

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации

*Посвящается 30-летию
Санкт-Петербургского института
информатики и автоматизации
Российской академии наук*

В.В. Александров
С.В. Кулешов
О.В. Цветков

ЦИФРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИИ

*Передача, хранение и семантический
анализ
ТЕКСТА, ЗВУКА, ВИДЕО*



Санкт-Петербург
«НАУКА»
2008

УДК 004.2:004.6:004.7

ББК 32.973

А46

Александров В.В., Кулешов С.В., Цветков О.В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. – СПб.: Наука, 2008. – 244 с.

ISBN 978-5-02-025287-5

В монографии излагаются основы цифровой программируемой технологии инфокоммуникации. В отличие от общей теории связи авторы опираются на алгоритмическую теорию А. Н. Колмогорова и современные возможности ее реализации («хай-тек», нанотехнологии). Под программируемой технологией понимается реализация симуляционного процесса (непосредственная неарифметическая обработка битовых последовательностей). На основе программируемой технологии рассматриваются методы и алгоритмы построения систем искусственного интеллекта, симуляторов, процессоров виртуальной полосы пропускания, информационной защиты, распознавания и семантического анализа.

Программируемая технология рассматривается на различных примерах, в том числе при сопоставлении с принципом функционирования xDSL, построении кодеков, организации виртуальной полосы пропускания (от спектральной оценки – герц, к объемно-скоростной – бит/с). По аналогии с $E=mc^2$ получено соотношение эквивалентности между энергией и информацией (бит/с) $I=KE$.

Книга предназначена для студентов университетов, научных работников, инженеров и программистов, а также для широкого круга читателей желающих понимать специфику цифровых технологий.

Alexandrov V.V., Kuleshov S.V., Tsvetkov O.V. Digital info communication technology. Transmitting, storing and semantic analysis of text, audio, video. – St.-Petersburg.: Nauka, 2008. – 244 p.

In the monograph basis of digital programmed technology of info communication is stated. Unlike the general communication theory, we employ A.N.Kolmogorov's algorithmic theory and modern capabilities of its realization ("hi-tech", nanotechnologies). The programmed technology is understood as realization of simulation process (direct non-arithmetic processing of bit sequences). On the basis of programmed technology methods and algorithms of construction of artificial intelligence systems, simulators, processors of a virtual passband, information protection, recognition and the semantic analysis are considered.

The programmed technology is considering on various examples, including comparison to a xDSL principle, virtual passband organization (from a spectral estimation - hertz, to it is volumetric high-speed - bit per second). By analogy with $E=mc^2$ the relationship of equivalence between energy and the information (bit per second) $I=KE$ is obtained.

The book is intended for students of universities, informatics specialists, engineers and programmers, and also for a wide range of readers wishing to understand specificity of digital technologies.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. *В. А. Сарычев*

ISBN 978-5-02-025287-5

© В.В. Александров, С.В. Кулешов, О.В. Цветков, 2008
© СПИИРАН, 2008
© Издательство «Наука», 2008

Содержание

От авторов.....	5
Предисловие	8
1. От $E=mc^2$ к $I=KE$	8
2. Программа - кодовая модель	10
3. Инновации «хай-тек»	12
4. Дискурс «ай-ти» и «хай-тек»	19
5. Цифровая (пиксельная) технология	24
6. Экономика знаний	27
Введение	34
1. Исторический дискурс	34
2. Принцип этерификации	36
3. Алгоритмическая теория А. Н. Колмогорова	38
4. Оптическая связь и методы кодировки информационных сообщений	40
5. Фурье, Найквист и «bandwagon»	41
6. У. Томсон лорд Кельвин vs О. Хевисайд	45
7. А. Н. Колмогоров vs Р. Калман	48
Глава 1. Основы цифровой технологии	57
1.1. Число и цифра vs точка и пиксел	57
1.2. Путь к простоте	59
1.3. Аль-Хорезми vs А. Н. Колмогоров	61
1.4. Алгоритмическая теория информатики – программируемая технология А. Н. Колмогорова (ПТК)	64
1.5. Математическая модель и программный симулятор	71
1.6. Степенная форма, структурная иерархия и самоподобие	74
1.7. Анализ и синтез сигналов	81
1.8. Программируемое радио	85
1.9. Вычислительная vs программируемая сложность	87
1.10. Рекурсивный подход: синтез и анализ	91
1.11. Избыточность и семантика ПТК	97
1.12. Информация, масса и энергия. Бит vs джоуль	104
1.13. Нанотехнология, суперкомпьютеры и симуляторы	107
1.14. Физический принцип «машины Тьюринга»	110
1.15. Структурная схема ПТК	116
1.16. Цифровая технология инфокоммуникации	120
Глава 2. Математические модели анализа сигналов	125
2.1. Дискурс о математических моделях анализа сигналов	125
2.1.1. Фурье vs Вейерштрасс	126
2.2. Математические модели общей теории связи (волновой)	130
2.2.1. «Полоса» сигнала vs «полоса» канала	135
2.3. Функция Вейерштрасса	138
2.3.1. Комплексная функция Вейерштрасса	139
2.3.2. Основные свойства функции Вейерштрасса	140

2.3.3. Прикладной аспект функции Вейерштрасса	143
2.4. От анализа Фурье к вейвлет-анализу	146
2.4.1. Введение	146
2.4.2. Фурье-преобразование	148
2.4.3. Частотно-временное и масштабно-временное представления сигнала	151
2.4.4. Математические модели вейвлет-анализа	153
2.4.4.1. Непрерывный вейвлет-анализ	153
2.4.4.2. Дискретный вейвлет-анализ и кратноразрешающий анализ сигналов	155
2.4.4.3. Структурный вейвлет-анализ на основе скелета экстремумов	161
2.4.4.4. Мультимасштабно-разрешающий анализ – MMPA (MSRA)	163
2.5. Фрактальный подход	166
2.6. Пакет FractInt	169
2.7. Итерационно-функциональные системы	176
2.7.1. Рекурсивный аттрактор	177
2.7.2. Поиск преобразования самоподобия	178
2.7.3. Метод эталона	181
2.7.4. Метод коллажа	183
2.7.5. Фракталоподобный синтез	186
2.7.6. Информационная безопасность инфокоммуникации	189
2.7.7. Фрактальные методы оценки качества передачи данных	194
Глава 3. Адаптивно-динамическая структуризация данных	196
3.1. Семантический анализ	196
3.2. Адаптивно-динамическая структуризация данных	200
3.2.1 Концептуальная схема АДС	205
3.3. АДС данных на изображениях и видео	207
3.3.1. Многоуровневая модель сегментации	210
3.3.2. Ассоциативно-пирамидальное представление данных	216
3.4. АДС сигналов	220
3.4.1. Метод иерархически сегментированного анализа и синтеза аудиопотока	222
3.5. Аппаратная реализация	229
Послесловие	230
Глоссарий	234
Список сокращений	236
Литература	238

Боже мой, боже мой, - молча, но сердечно сердился наставник, - где вы, старинные механики, помощники, кочегары, обтирщики? Бывало, близ паровоза люди трепетали, а теперь каждый думает, что он умней машины!

Андрей Платонов

От авторов

Авторский коллектив – симбиоз инженеров трех поколений развивает инфокоммуникационные аспекты передачи, хранения, обработки и семантического анализа текстов, изображений, сигналов и аудиовизуального потока данных. В своей работе мы изначально опирались на спектральный анализ посредством иерархических самоподобных блочных структур (матрицы Адамара) [1] – аналог современного понятия вейвлет-анализа. Последующие возможности компьютеров и цифровой технологии значительно расширили диапазон моделирования развивающихся информационных процессов [2, 3], используя самоподобные свойства кривых Пеано и функции Вейерштрасса. Контрпример разрывных недифференцируемых функций лежит в основе иной парадигмы и концепции математического анализа и терминологических понятий данного этапа **цифровой технологии**, без которых трудно воспринимать и понимать смысл подобных фраз:

*«Страна, первой вышедшая на широкое использование технологий сверхширокополосной короткоимпульсной электродинамики, получит качественное преимущество перед другими».*¹

Специфика рассматриваемого подхода восходит к исследованиям [3, 4], в которых обращалось внимание на то, что принятая архитектура построения компьютеров и языков программирования ориентирована лишь на эффективный численный анализ. Возникшие потребности построения искусственного интеллекта, распределенных инфокоммуникационных систем (Интернет), баз данных и знаний, а также проблемы информационной защиты, идентификации и распознавания требуют иных парадигмальных знаний, а не упорства в скоростном моделировании вычислений интегралов, дифференциалов и фильтров Калмана. К сожалению, в 80-х годах XX века никто не обратил внимания на алгоритмическую теорию А. Н. Колмогорова, да и архитектура, память,

¹ Будущее сильной России – в высоких технологиях. Труды всероссийских научных чтений. СПб., 2007.

быстродействие компьютеров на тот момент не давали возможности эффективной реализации систем накопления, передачи, распознавания и семантического анализа данных.

Возможности **цифровых технологий XXI века**, представленные в нанометрах физически достижимого технологического процесса, привели к востребованности рекурсивного подхода обработки данных. Одних привлекла популяризация понятия фрактала [5], других – удивительное проявление рекурсии (самоподобного развития) в природе и творчестве как синтеза в математике, музыке и живописи [6], что привело к необходимости семантического анализа, исследование и разработка которого проводилась совместно с О.В. Цветковым.

К настоящему моменту цифровая технология процессоров осваивает десятки нанометров, например компания Intel сообщила о разработке 32-нанометрового техпроцесса и о разработке высокоскоростного стандарта передачи данных USB 3.0 со скоростью 5 Гбит/с.

Открыта возможность создания эффективных интеллектуальных систем связи, компрессии, анализа и защиты информации.

Технология же реализации этих возможностей потребовала от С.В. Кулешова искусства управления «единичками» и «ноликами» как самодостаточного средства – **программируемой технологии** при разработке компрессии, кодеков и семантического анализа.

Технология физического процесса, достигая 32 нм, уже позволяет построить практически гигагерцовые сверхширокополосные аналого-цифровые преобразователи (АЦП).

Становятся доступны высокие скорости передачи информации в различной форме и неиспользуемые ранее радиодиапазоны (частоты). Казавшиеся еще несколько лет назад фантастическими возможности, такие как программируемое радио (SDR), ныне являются коммерческими продуктами. Отчетливо виден и следующий шаг:

«Ученые из Калифорнийского университета разработали детектор в тысячу раз тоньше человеческого волоса, состоящий из углеродных нанотрубок всего лишь несколько атомов в диаметре, способный принимать радиоволны и преобразовывать их в звуковые. Из нанотрубок могут быть созданы датчики температуры, вибрации, света и т.д. – и все это размером с песчинку. Подобные технологии несут качественно новые применения – от микроскопического радиоприемника до медицины, коммерческих и военных продуктов»¹.

Термин «нанометр» - синоним «хай-тек» - уже давно используется инженерным сообществом для обозначения технологии изготовления микросхем (чипы).

Цифровая эра требует высоких скоростей и надежных соединений для перемещения громадных объемов «оцифрованных» данных. В 2006 году количество фотоснимков, сделанных цифровыми камерами, соста-

¹ www.cnews.ru

вило 150 млрд, а камерами мобильных – 100 млрд кадров. «Флэшки» – это расширение памяти; сотовый телефон со всей его функциональностью – это экзопротез мозга в целом; технологии широкополосного беспроводного доступа – это расширение функциональных возможностей коммуникативного общения человека.

Еще 50 лет назад, на заре расцвета телевидения, социолог Херберт Маршалл Мак-Люэн писал, что мы быстро приближаемся к финальной стадии расширения человека вовне – стадии технологической симуляции сознания, когда творческий процесс познания будет коллективно и корпоративно расширен до масштабов всего человеческого общества примерно так же, как ранее благодаря различным средствам коммуникации были расширены наши чувства и наши нервы.

Искушение «цифрой» – цифровой технологией как наименьшим размером физического представления «1» и «0» (пиксели) приняло характер цепной эксплозии.

Совокупность определенным образом упорядоченных атомов несет в физически доступном диапазоне частот одновременно функции и компьютера, и телерадиоприемника.

И это будущее из настоящего предъявляет вызов к качеству образования и интеллекта. «Биты» – количественная характеристика представления ДАННЫХ – могут быть измерены и выступать как синоним (эквивалент) МАССЫ и ЭНЕРГИИ.

А это уже феномен перехода количества (бит/с) в качество – нацивилизацию.

1. Александров В.В., Полонников Р.И. Об одном способе решения задачи опознавания объектов // Изв. АН СССР «Техническая кибернетика». 1967. №1. — С. 92-102.
2. Александров В.В., Лачинов В.М., Поляков А.О. О рекурсивной алгоритмизации кривой, заполняющей многомерный интервал // Изв. АН СССР «Техническая кибернетика». 1978. №1. — С. 192-198.
3. Александров В. В., Арсентьева А. В. Информация и развивающиеся структуры. Л.: ЛНИВЦ АН СССР, 1984. — 186 с.
4. Александров В. В., Горский Н. Д. Представление и обработка изображений: рекурсивный подход. Л.: Наука, 1985. — 190 с.
5. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1982. — 258 p.
6. Hofstadter D. R. Godel, Escher, Bach: an Eternal Golden Braid. NY: Basic Books, 1979. — 779 p.

Всякая предполагаемая книга для того, между прочим, и писана, чтобы увеличить существующую у нас возможность понимания условий для возможности увеличения средних народных достатков. Надо еще немного поработать мозгами в Государственной думе, чтобы законами поощрить труд и вызвать порывы долга перед Родиной... Нужно развивать мысли о накоплении в народе личной инициативы и трудолюбия... Затраты на науку окупаются тем, что она видит многое раньше, предупреждает, разбирает, отбирает существенное из кучи практических подробностей.

Д. И. Менделеев. «Заветные мысли», 1905 г.

В наших российских лабораториях искусственные атомы и их ансамбли выращиваются в гетероструктурах, которые позволили создавать принципиально новые типы полупроводниковых лазеров. Для того чтобы вырваться из «сырьевой ловушки», нужно выйти на современный уровень.

Ж.И. Алфёров. «Вырваться из сырьевой ловушки». «Завтра», номер 07(639) от 15 февраля 2006 г.

Предисловие

1. От $E=mc^2$ к $I=KE$

В начале XX века технический прогресс отражался в словах, терминах и понятиях, объяснявших физические и математические свойства энергетических преобразований, наиболее часто упоминались: «термодинамика», «энтропия» – тепловая смерть и «теория относительности».

Качественно иная, не ньютоновская, концепция картины мира проистекала из теории относительности А. Эйнштейна, мало кому понятной на тот момент даже в узком кругу научного сообщества.

Оцененная журналистами наглядная интерпретация эквивалентности энергии и массы $E = mc^2$, истоки которой из XIX века, привела к эффекту катализа общественного интереса и явилась путеводной нитью энергетических преобразований на протяжении всего XX века - от атомных бомб до атомной и лазерной энергетики.

Одновременно с А. Эйнштейном внутренний мир атомов в своих картинах (иллюстрации на обложках) отображал и В. Кандинский. В книге «О духовном в искусстве» (1910 г.), на критику своих картин журналистами он отвечал: «...Почему вы восторгаетесь теорией относительности, не зная законов физики, и негативно воспринимаете кар-

тины, иллюстрирующие художественный образ тех же свойств и законов, но представленных иными понятийными средствами и языковыми формами...» [1].

В течение всего XX века математики и физики разрабатывали доступный общественному пониманию язык и доказательную базу функционирования энергетики. Убедили. Наградой чему стало появление в XXI веке нобелеподобной премии по энергетике «Глобальная энергия».

И уже, в свою очередь, XXI век порождает иную информационную концепцию научно-технического прогресса (НТП) и свою понятийную базу. А наиболее часто употребляемые слова и термины происходят уже из обозначенных аббревиатур Hi-Tech («хай-тек»), и IT («ай-ти»). Однако заметим, что общим понятийным корнем, отражающим свойства и термодинамической энергетики, и информационной технологии (IT, «ай-ти»), по-прежнему является понятие энтропии.

Термин «энтропия» впервые использовался в середине девятнадцатого столетия Р. Клаузиусом, который искал математическое уравнение, отражающее физическое свойство среды. Энтропия - комбинация греческих слов «tropos», что означает преобразование или развитие, и «energy» - **количественная мера** физической системы, которая в то же время может использоваться как мера «хаоса-беспорядка» системы. Понятие энтропии отождествляется с неопределенностью - уровнем «хаоса-беспорядка». В изолированной физической системе беспорядок (то есть однородное распределение энергии) увеличивается, ведя к «тепловой смерти». Однако это не распространяется на открытые системы и живые организмы. Такие системы развиваются от низших к более высоким формам организации, разнообразия и сложности и не сводятся лишь к оптимизации энергетических преобразований. Их поведение в большей степени связано с информационными преобразованиями.

XX век через концепцию термодинамики привел к пониманию и строгим научным теориям решения транспортных и энергетических проблем: «минимум материи - максимум энергии» ($E = mc^2$).

Концепция информатизации общества да и само понятие информации (**I**), склоняясь в разных сочетаниях (см. подробнее [2]), не имеет, подобно термодинамике, аналитического выражения для эквивалентности между энергией и количеством информации.

Например, строго обязательное в термодинамике выравнивание энтропийного различия - от более теплого к менее теплому – не имеет соответствующего аналога, выравнивающего негэнтропийное-информационное различие.

Обычно постулируемое принятие решения на основе полученной информации никак не связано ни с количеством, ни с качеством информации и зачастую принимается наименее профессионально подготовленными.

Объяснение этого феномена по-видимому, кроется в таких казалось бы, парадоксальных афоризмах, как:

- чем большим объемом знаний вы владеете, тем больше и граница вашего незнания;
- величие ученого состоит в том, на сколько лет он задержал развитие науки в своей области [3], – это «открытие» советских академиков, как результат борьбы консервативных научных школ с прогрессивными инновациями.

Активно склоняя такие понятия, как «информация», «информатика», «информатизация», «информационные технологии», невозможно определить, к какой области знаний относится, например, биологический процесс узнавания клеткой «свой-чужой» при защите иммунной системой от различных паразитов, микробов и вирусов.

2. Программа - кодовая модель

Биочипы, диагностирующие наличие тех или иных вирусов, иллюстрируют компьютерно-программируемый подход идентификации резонансно-когерентного отклика - корреляции, при котором неразделимы информационная и энергетическая составляющие клетки.

«...С того времени, когда Карно дал свой классический анализ термодинамического цикла, а Клаузиус и Больцман смогли подвергнуть его математическому обобщению, привлекиши для этой цели теорию вероятностей, стало бесспорным, что энергия нуждается (по меньшей мере) в двух характеристиках, не сводимых одна с другой. Этими характеристиками являются: 1) количество энергии и 2) ее качество или ценность; обе характеристики дали начало обоим главным мировым законам учения об энергии. Первый установил неизменяемость количества энергии, второй – неизбежность ее обесценения в изолированных системах.

Собственно говоря, только второй закон термодинамики прочно вводит в характеристику явлений фактор времени или направленной последовательности событий. Только с его установлением приобретает строгий смысл и понятие причинности, поскольку причина обязана предшествовать во времени следствию.

В такой формулировке принцип причинности не знает исключений и является необходимым; оставалось невыясненным, является ли он также достаточным во всех случаях.

Для биологов XIX века представлялось немыслимым, чтобы действие или следствие направлялось чем-то, что должно наступить в его результате, т. е., по сути дела, чтобы причина явления или процесса находилась в будущем относительно этого явления.

Сравнительный анализ живых систем и целесообразных автоматов показал, что если цель сама по себе еще не существует, относится к будущему и потому не имея права быть причиной чего бы то ни было в настоящем, то существует и разрабатывается заранее кодовая модель этой цели, которая предшествует целенаправленному действию и не содержит никаких отводов против права служить его причиной.

Фактический материал из области сравнительной физиологии говорит о таком не предполагавшемся никогда раньше разнообразии материальных субстратов регуляционных кодов и самих форм и принципов кодирования, в котором осознаваемые и вербализованные психические коды человеческого мозга занимают лишь место одной из частных, хотя и наиболее высокоразвитых форм.

Понятие **программы** действия, закладываемой в автомат или вырабатываемой живым организмом для прокладки пути к требуемой цели, включает в себя, даже филологически, предрешение или предвидение чего-то, относящегося к будущему. Термин «программа» (Прω + γράμμα = *предначертание*) прямо подчеркивает, что речь идет не о самом предстоящем событии, а об его описании **чертами** соответствующего кода.

Так называемая теорема Пригожина [4], гласящая, что «открытая термодинамическая система, приближающаяся к устойчиво-стационарному состоянию, изменяется во времени всегда в направлении, которое обуславливается ослаблением термодинамической силы безусловно неприложима к эмбриогенетическому периоду развития организма, поскольку в этом периоде дифференциации и структурирования организма, от оплодотворенной яйцеклетки до рождения жизнеспособной особи, происходит непрерывное нарастание удельного производства энтропии.

Ускоренное возрастание энтропии в непосредственном окружении организма в этом периоде непосредственно связано и, по-видимому, прямо обусловлено **интенсивным возрастанием отрицательной энтропии** или негэнтропии – **информационной составляющей** в самом организме, являющейся **мерилом усложнения** его структуры, его прогрессирующей дифференциации, наконец (что сводится к тому же самому), его движения в сторону все уменьшающейся вероятности конечного состояния.

Прежде всего нужно отметить здесь существенное смысловое различие между тесно связанными понятиями **негэнтропии** и **информации**. Можно сказать, что, относясь в конечном счете к одним и тем же объектам, они характеризуют в них **меру** (негэнтропия) и **содержание** (информация).

Два объекта могут быть приравнены друг другу в отношении количества заключающейся в том и другом негэнтропии, в то же время эти объекты могут существенно различаться между собою в отноше-

нии **информационного содержания**. Например, два вида растений, равные между собой в смысле меры их структурной «противовероятности», но из оплодотворенной завязи одного неизбежно и с высокой мерой биологической активности разовьется **фиалка**, а из другого – **ландыш**.

Здесь существенно, **что информация как фактор развития необходимо подразумевает материализованную программу, а эта последняя требует определенного кода, который только и является устойчивым ключом как сохранения вида, так и направленного развития...**» [5].

Приведенные выдержки - биологический аналог (терминологический прототип) компьютерной программируемой технологии как следующий шаг в эволюционном развитии информационных средств.

3. Инновации «хай-тек»

И вот инновационные сленги XXI века: информационное общество, информационные технологии, цифровая цивилизация и пр. - на новом витке технологического прогресса нацелены на расширение границ нашего научного знания, догоняя мифологическое, порожаемое искусством и художественным вымыслом.

XXI век наиболее отчетливо за весь ход истории развития научно-технического прогресса (НТП) свидетельствует о неразрывной связи между уровнем развития науки, образования и технологии с экономикой, политикой и национальным государственным выживанием. Понимание этого процесса даже декларируется на самом высоком уровне:

«...В постиндустриальном информационном обществе оно становится необходимым фактором жизненного успеха и значимым ресурсом экономического развития...

...Доступ к глобальному информационному пространству в корне меняет сами образовательные методики. Происходит переход к непрерывному обучению. Складываются предпосылки формирования общего образовательного пространства...»¹ (В.В. Путин).

Однако предоставление права принятия решения правительственным чиновникам при реализации этих процессов зачастую приводит к катастрофическим последствиям.

*«...Россия остается одной из последних стран Европы и мира, где еще практически ничего не сделано для перехода на **цифровое телевидение**. Государственная программа, утвержденная в 2004 году, предусматривает закончить переход на цифровое вещание к 2015 году. С чего начать внедрение новых технологий, обсудили представители*

¹ Газета «Известия». 01.03.2006 г.

*власти, руководители телерадиокомпаний и технические специалисты на Первой международной конференции «**Цифровая Россия сегодня и завтра**», прошедшей в Ханты-Мансийске.*

Цифровое вещание позволит уплотнить эфир и по одной частоте передавать не один, а 4-5 каналов. Следовательно, уже через 10 лет в стране может появиться от 50 до 80 телеканалов с высоким качеством изображения.

*В этом заключается основная привлекательность цифрового ТВ. Технические преимущества на порядок больше: и экономия средств на электроэнергию, так как передатчики будут не такими мощными, и отсутствие необходимости пользоваться видеопленкой для съемок, и возможности совмещения телевещания с Интернетом, заказом продуктов и т.п. **Для решения проблем участники предложили создать при правительстве надведомственную рабочую группу...**¹.*

И как, по-видимому, результат работы этой группы появляется решение о закупке во Франции на 3 млрд. евро аппаратуры для цифрового телевидения, на которую нашлись деньги, однако реализация подобных планов лишь затормозит собственное инновационное развитие цифровых технологий в России и не решит ни одной из поставленных задач.

Приводимые на конференции аргументации о пользе заимствований (в ущерб отечественных инноваций) обеспечивают не более пяти процентов действительно возможной экономии средств, но что несравненно более важно при повсеместном глобальном переходе на цифровые технологии так это то, что открывается путь к качественно новой информационной цивилизации. **Цифровое ТВ** – лишь малый ее элемент.

Удивительно укоренившееся смешение семантико-смысловых причинно-следственных понятий. Все рекламируемые фантастические возможности информационных технологий (ИТ - IT) «ай-ти», в том числе воспроизводство виртуальных аудиовизуальных эффектов, проистекают из возможностей **цифровой технологии**.

«Кучка спекшегося песка» - электронная кремниевая интегральная схема – символ цифровой цивилизации. «Кучка песчинок», составляющая **электронный мозг компьютера**, правила функционирования которого порождены разумом человека, **выигрывает** в интеллектуальном соперничестве у естественного **биологического нейронного мозга**, который отличается неопределенностью функционирования и непредсказуемостью поведения интеллектуально разумного человека.

Это любимая тема режиссеров, использующих фрейдовские комплексы бессознательного поведения, единственным противоядием от которых является психоаналитик, адекватность поведения которого также должен оценивать другой психоаналитик и т. д.

¹ Газета «Известия». 15.09.2005 г.

В повседневной же жизни об IT укоренилось представление как об «инструменте» интенсификации процесса воспроизводства, хранения и обмена различными формами информационных посланий посредством развитого компьютерного интерфейса и инфокоммуникационных сетей.

Цифровые же технологии и их концептуальное, теоретическое, аппаратное и программное обеспечение предъявляют специфические требования к принципиально иным парадигмальным знаниям и подготовке инженерно-технических специализаций в области физики, программируемой технологии и инфологии. Возникла проблема понятийного соответствия между повседневно массово-используемыми англо- и русскоязычными терминами.

Наиболее часто цитируемые англоязычные аббревиатуры-сленги, ставшие общеупотребительными русифицированными словами: *IT* («ай-ти») – информационные технологии (ИТ), *Hi-tech* («хай-тек») – высокие технологии, - не имеют даже однозначного русскоязычного правописания, не говоря уже о понятийной стороне используемых терминологий. Мы пытаемся ее упорядочить собственной разработкой понятийного глоссария «ай-хай-тек» как минимально необходимого тезауруса - понятийного словаря, разработав программу визуально-динамического представления.¹

Неоднозначность русскоязычной транскрипции в правописании терминологических понятий «информационные технологии» и «высокие технологии» и их аббревиатурных сленгов: «ИТ» («ИТ» - «ай-ти») и «Hi-tech» («hi-tech» - «хай-тек» - «хай тек») приводит к необходимости уточнения. В дальнейшем будем использовать «ай-ти» и «хай-тек».

Отличительная черта, уникальность человека-творца (*homo-faber*) как раз и состоит в том, что терминологическое понятие «ай-ти» изначально, по определению, присуще человеку, также как основа выживания вида всегда являлась сопровождающей чертой развития цивилизации.

Биологический аспект информационной ненасытности человека приводит к постоянно возрастающей потребности в коммуникативном общении.

Казалось бы, потребности инстинкта выживания вида (*homo-faber*) давно достигнуты, например, дельфин имеет лучшие характеристики коммуникации в воде, обеспечивающие его выживание. Дельфин, обладая достаточно развитым, согласно томографии, головным мозгом, в эволюционном развитии ограничился лишь выживанием, без творчества и развития вербального мышления. Это сопоставление – яркая иллюстрация бессмысленных спекуляций и надежд на электронный аналог разума.

Содержимое интеллекта и разума не поддается стандартизации и

¹ <http://www.vslotvar.ru>

не у всех человеческих особей, генетически содержащих в себе биологическую субстанцию мозга, способно к развитию.

Как часто бывает, консервативно инерционное мышление сосредотачивает внимание на **следствии** развивающегося явления, а не на его причине. Концепцию информатизации общества провозгласил журналист А. Тоффлер в книге «Третья волна» (1980 г.) [6], в которой предвосхитил социально-политические последствия развивающейся роли компьютеров как инструмента информационной глобализации, следствием чего и стала глобализация экономики.

Научные же дебаты в 1950-х годах сторонников и противников создания искусственного интеллекта были построены лишь на существовавшей на тот момент технологии, что приводило к энергетической потребности, эквивалентной энергии Ниагарского водопада, при реализации числа электронных нейронов, сопоставимых с числом биологических нейронов в мозге человека. Через 50 лет «хай-тек» ликвидировал энергетическое ограничение на реализацию электронного мозга, массо-энергетические характеристики которого не только сопоставимы с биологическим аналогом, но и имеют принципиальные возможности к дальнейшему прогрессу.

Мозг как субстанция постоянно рефлексивно дифференцирует поток сенсорных сигналов, превращая их в семантико-смысловой атрибут через специфические конструкции вербального и визуального отражений информационного представления окружающего мира.

Звук барабана, свет костров, наскальные пиктограммы – не культурологические изыски первобытных, а начальные элементы инфокоммуникационных систем связи, достигших к XXI веку новых высот, концентрированно отражаемых в таких терминологических понятиях, как MP3, MPEG-4, AVI и др. А Windows – одна из возможных компьютерных программ реализации **пиктографического интерфейса - визуального языка межнационального общения**. Отличительной же чертой современного прочтения – символом информационного общества следует по праву считать лишь аббревиатуру «хай-тек» – **высокая технология как синоним цифровой технологии**.

Само по себе понятие «ай-ти» не содержит никакой конструктивной идеи, оно лишь следствие «хай-тек», осуществившей современный революционный прорыв - мультиплицирование телевизионных каналов и мобильной связи без строительства высотных башен и прокладывания кабелей, а также внедрение ряда полезных для развития цивилизации технических решений. Среди них штрихкодирование, массовый дистанционный контроль, в том числе встроенные идентифицирующие датчики контроля за функциональным состоянием любого объекта.

Конструктивная идея – краеугольный камень «ай-ти» - содержится в терминологическом понятии «хай-тек» как технологическая возможность построения интегральных микросхем, позволяющих воспро-

изводить и управлять на атомно-молекулярном уровне устойчивыми состояниями «1» и «0» - элементами памяти. Это и сигнальная форма информационных носителей (речь, музыка, текст, аудиовидеопоток), представляемая в виде **«скважности импульса»**, как двоичная последовательность и ее количественная характеристика в «бит/с».

Отметим, что в электросвязи единица измерения символьной скорости - бод.

«Часто ошибочно считают, что бод это количество бит, переданных в секунду. В действительности же, это верно лишь для двоичного кодирования, которое используется не всегда. Например, в некоторых модемах используется квадратурная амплитудная манипуляция (КАМ) и одним изменением уровня сигнала может кодироваться несколько (до 16) бит информации. Например, при символьной скорости 2400 бод скорость передачи может составлять 9600 бит/с благодаря тому, что в каждом временном интервале передается 4 бита. Кроме этого, бодами выражают полную емкость канала, включая служебные символы (биты), если они есть. Эффективная же скорость канала выражается другими единицами, например битами в секунду (бит/с, bps) [7].

Параметры **«скважность импульса»** и «бит/с» (цифровой аналог полосы пропускания) определяют требуемую **скорость передачи данных** – понятие, вытесняющее актуальность частотно-волновой характеристики полосы пропускания канала связи.

Для цифровых технологий передача данных и информационных преобразований параметр «бит/с» - это инвариантная характеристика наподобие «энергетического» джоуля. «Бит/с» объединяет в себе традиционные понятия: «полосу пропускания» и объем информационного содержания, подвергаемый различного рода преобразованиям, но не на основе аксиоматически ограниченных математических моделей, а на основе **программной симуляции – кодовой модели** (кодеки).

Инновации же связаны с цифровой технологией, алгоритмами обработки и компрессией последовательности «бит/с» информационного содержания. Это и приводит к недопониманию, путанице и к проблеме с лицензированием.

Что и как надо лицензировать: канал или информационное содержание? Какой из параметров лучше контролировать: частоту, объем или время?

*«...У нас нет четких определений кабельного, интерактивного и Интернет-вещания. И благодаря этой мешанине можно экспериментировать с лицензиями как угодно».*¹

Отсюда научно-технологическая конкуренция и соответствующее ей рекламное сопровождение.

¹ Новая газета. №53 (1175). 17.07 – 19.07.2006 г.

Последние 10 лет из года в год прогрессивность информационных технологий преподносится СМИ как некая мистика:

Рекорды скорости передачи данных

2003 год

Осуществлена передача 1.1 терабайта информации (не информации, любимое слово журналистов, а последовательности «бит/с» - синоним передачи данных) из CERN, Швейцария, в Калифорнийский технологический институт (Пасадена, США) на скорости в 5.44 Гбит/с. Все данные были переданы на расстояние свыше 7000 км.

2005 год

Новый протокол IPv6 позволил передать на расстояние 35755 км содержимое DVD емкостью 4.7 гигабайта за 5 с. Скорость передачи данных 5.58 Гбит/с (почти 700 мегабайт/с).

Построен самый быстрый в мире канал передачи данных

Компания «Oki Electric Industry Co. Ltd.» провела тестовую передачу данных со скоростью 160 Гбит/с на расстояние в 635 км. Быстрота передачи данных с такой скоростью такова, что пересылка на указанное расстояние четырех видеофильмов, которая при средней скорости соединения достигает 8 часов, занимает одну секунду.

Эксперимент скоростной передачи данных, успешно проведенный компанией «Oki», является частью проекта «Исследование и развитие сверх высокоскоростных оптических сетевых технологий» (Research and Development on Ultrahigh-speed Backbone Photonic Network Technologies), порученного Национальному Институту Информатизации и Телекоммуникаций Японии.¹

2006 год

Сотрудникам «Siemens» совместно с работниками «Micram Microelectronic», института Фраунхофера и Голландского технологического университета Эйндховен удалось создать принципиально новую систему передачи данных, которая позволяет обрабатывать информацию до и после ее преобразования в оптический сигнал. Благодаря этому ученым удалось увеличить скорость передачи данных по оптическому кабелю почти в 2.5 раза по сравнению с предыдущим рекордом, отмечает агентство «Reuters».

По мнению разработчиков, широкое внедрение новой технологии, благодаря которой содержимое двух DVD можно будет пересылать на большие расстояния за 1 с, начнется в 2010 году.

¹ Построен самый быстрый в мире канал передачи данных. Электронное издание Lenta.ru — <http://www.lenta.ru/news/2006/03/16/gigabit/>

Абсолютный рекорд скорости передачи данных принадлежит ученым из института Heinrich-Hertz, которые совместно с японской компанией «Fujitsu» смогли передать данные на расстояние в 160 км со скоростью 2.56 Тбит/с. Такая скорость передачи данных эквивалентна передаче информации с 60 DVD за одну секунду. Правда, в отличие от этого эксперимента специалисты «Siemens» для своего рекорда работали с обычными сетями США. Команде немецких ученых принадлежат еще два рекорда по скоростной передаче данных на большие расстояния: 1.28 Тбит на расстояние в 240 км и 160 Гбит/с на расстояние в 4000 км.

Где предел?

IP-телевидение

Концепция Triple Play - передача данных, голоса и видеотрафика по одной сети.

И спутниковое вещание, и MMDS, и проводные DVB-системы обеспечивают так называемое цифровое качество, однако ресурсы пропускной способности этих технологий значительно **проигрывают** IP.

Переход на цифровое телевидение высокой четкости (HDTV) и уплотнение эфира, передача на одной несущей частоте не одного, а 4-5 каналов.

Почему не 8-10...?

В основе этого лежит потенциальная технологическая возможность генерировать все более короткие импульсы электромагнитного излучения длительностью менее 1 фемтосекунды ($1\text{фс}=10^{-15}$ с, т. е. с частотой порядка 1000 ТГц), но теоретики уже ищут возможность сделать следующий шаг – научиться генерировать импульсы длительностью менее 1 аттосекунды ($1\text{ас}=10^{-18}$ с). В настоящее время осваивается терагерцовый диапазон передачи данных (1 ТГц = 10^{12} Гц, порядка 10^{12} с = 1 пс). В связи с чем эпицентр качественных изменений в инфокоммуникациях связан с технологическим освоением новых физических принципов и построением терагерцовых элементов цифровой технологии и, следовательно, принципиально новых подходов при обработке аудиовидеоданных.

HDTV (High-Definition Television), русский аналог – это телевидение высокой четкости, ТВЧ. Изображение в этом формате в лучшую сторону отличается от картинки, транслируемой из Останкино. HDTV превосходит обычное телевидение своим разрешением и звуком. Так, в HD-вещании достижимо разрешение 1920×1080 точек, что почти вчетверо больше разрешения 768×576, определенного форматами PAL и SECAM. Качественное же отличие состоит в том, что передачи в HD-формате ведутся в цифровом виде, что подразумевает отсутствие помех (цветовых и геометрических искажений, потери звука и пр.) и облегчает запись телепрограмм.

К сожалению, именно это обстоятельство определяет недоступность HDTV для подавляющего большинства российских зрителей. Массового цифрового телевидения высокой четкости в России пока нет. Это связано как с необходимостью переоборудования вещательных центров, так и с малой распространенностью цифровых приемников ТВЧ среди населения. В то же время обладатели спутниковых антенн могут принимать вещание в формате HDTV, но русскоязычные программы на доступных каналах сейчас практически отсутствуют.

2007 год

Несмотря на то что во многих странах еще не существует ни телевидения, ни дисков с фильмами высокой четкости, а в других они только входят в обиход, инженеры научно-исследовательского центра NHK Science and Technical Research Laboratories в Японии разработали новую технологию. Новая технология, получившая название Super Hi-Vision (SHV), позволяет записывать, передавать и показывать видео с разрешением 4320 горизонтальных и 7680 вертикальных линий, что в 16 раз больше по сравнению с HDTV-разрешением.

4. Дискурс «ай-ти» и «хай-тек»

Отечественная проблема не столько в «ай-ти», сколько в «хай-тек», и в исторической амнезии негативного проявления в политико-экономических предпочтениях России в начале XX века, несмотря на предостережения Д.И. Менделеева о тупиках сырьевого рынка России. И через 100 лет опять-таки эти предупреждения остаются неслышанными, чему посвящена статья нобелевского лауреата Жореса Алферова «Вырваться из „сырьевой ловушки“».¹

Приведем несколько цитат:

«...Ещё в 1959 году произошло значимое событие: два американских инженера построили первую интегральную схему на кремнии. Это было революционное изменение в полупроводниковой технологии,...

...Количество транзисторов в одной интегральной схеме достигло в 2000 году сорока трех миллионов, а в 2014 году оно составит 4.3 миллиарда. Скорость каналов передачи от десяти гигабит в секунду в 2000 году за этот срок возрастет в тысячу раз, до 10 000 гигабит...

...Основные активные компоненты – полевой транзистор и биполярный транзистор – физически, так сказать, остались такими же, как были открыты в 1947 году, а вот технология совершила гигантский прогресс. Термин «нанотехнология» возник так: сегодня масштаб измерений кремниевой микроэлектроники переходит от десятых долей

¹ Жорес Алферов. Вырваться из «сырьевой ловушки». Газета «Завтра» от 15.02.2006 г.

микронов в нанометровый диапазон, 45, 60, 70 нанометров – это то, что сегодня осваивается в опытном производстве, а 13 нанометров – это будущее, и не такое отдаленное...

...С помощью технологических методов мы даже получаем возможность создания того, что называется теперь созданием «искусственных атомов». Сверхбыстрая электроника существенным образом изменила скорости всех электронных компонентов, которые сегодня являются основными компонентами в космической связи, мобильных телефонах и во многом другом. Лазеры позволили сегодня получить коэффициент полезного действия в 74%, и это самый высокоэффективный преобразователь электрической энергии в световую...

...Без полупроводниковых электронных компонент Россия не может быть современной державой, не может развивать практически никаких наукоемких технологий. Для того чтобы вырваться из «сырьевой ловушки», нужно выходить на современный уровень...»

Добавим, что для «ай-хай-тек» и нанотехнологий требуется дифференцированный уровень школьного и университетского образования, а также углубленная профессиональная специализация. Притом что современный мировой уровень и темп развития «ай-ти» значительно опережают не только освоение требуемых знаний в российском обществе, но и понятийную сущность быстро меняющейся в «ай-ти» массово тиражируемой англоязычной терминологии, которая непосредственно влияет на выбор приоритетов национальных проектов – путей развития, влияющих на социальные, экономические и политические последствия.

Невозможно не обратить внимания на удивительное упорство в повторении принятия тупиковых решений.

Это – закупка устаревших технологий производства автомобилей Форда при строительстве Горьковского автомобильного завода (ГАЗ, 1930-е гг.), а затем в 1970-е - выбор за прототип устаревшей на тот момент модели автомобиля «Фиат 124» при производстве ВАЗов.

И решение Государственного комитета по вычислительной технике (ГКВТ) в 70-80-х годах XX века по воспроизводству устаревших уже на тот момент прототипов универсальных ЭВМ американской фирмы IBM и их программных продуктов при массовом выпуске в СССР вычислительных машин серии ЕС, вместо поддержки отечественных разработок БЭСМ и ЭЛБРУС. В Ленинграде в 1980 году в старинном академическом здании проходило обсуждение перспективной архитектуры построения универсальных компьютеров фирмы IBM. При этом обсуждении известный в то время программист из Нидерландов Эдсгер Дейкстра прямо заявил, что ориентация на воспроизведение устаревшей конфигурации IBM будет самой удачной диверсией ЦРУ. Вот с этого момента и возникло торможение собственных российских разработок в области компьютерных и информационных технологий. До тех пор пока универсальные компьютеры использовались лишь как инструмент чис-

ленного анализа, а не средство массовых инфокоммуникационных технологий, отставание слабо сказывалось.

Однако в 90-х годах появление дешевых высокоскоростных технологических элементов цифровой обработки процессоров типа Intel 386 и выше, кэш- и флэш-памяти, а также аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотой от 20 до 200 МГц открыло принципиально новые возможности создания пространственно распределенной инфраструктуры информационных технологий, массового ее внедрения и распространения во все сервисные функции от экономики до туризма – истоков современной глобализации экономики. Прогрессирующее развитие «хай-тек» привело к качественно новому уровню – к экономике знаний.

Приведенный исторический дискурс призван проиллюстрировать, как некомпетентные решения приводят к катастрофическим последствиям, национальным и мировым кризисам. Заметим, что понятие «кризис», согласно Конфуцию, имеет два определения: катастрофа и благоприятная возможность. Две стороны одной медали: для одних крах – регресс и экономические трудности, для других – коммерческий успех.

Современный этап цифровых телекоммуникационных технологий достиг точки разлома – бифуркации. Одни монопольно владеют знаниями «цифровой» цивилизации и коммерчески используют эти знания через навязывание своих стандартов, протоколов и пр. (экономика знаний в действии), другим отведена лишь роль потребителей и «рабов» сервисного обслуживания.

Уже сейчас российские потребители компьютеров, Интернет и другой аппаратуры, а также программного обеспечения (Windows, Java, C++, Oracle, IPv6, xDSL) оплачивают чужие научно-исследовательские разработки, образовательные стандарты и научные школы, блокируя, не давая развиваться отечественным научным школам.

Вспомним, что теоретические основы алгоритмической теории информатики и программируемая технология построения подобных программных продуктов были впервые предложены русским ученым академиком А. Н. Колмогоровым [8].

Следующий шаг - глобализация Интернет – использование образовательных и информационных ресурсов на культуре «латиницы» ставит перед «кириллицей» дополнительный объем проблем.

Например, Россия должна покинуть «зону Windows»: ¹ *«В современных общественных науках используется введенное филиппинским ученым Роберто Версола понятие «кибер-лорд»: «кибер-лорды – это класс собственников в информационном секторе. Они контролируют либо сам массив информации, либо материальную инфраструктуру, необходимую для ее создания, распространения и использования».*

¹ Василий Суханов. Россия должна покинуть «зону Windows». KMnews от 09.02.2007

Как лендлордам крестьяне в свое время платили ренту лишь за тот факт, что они владели землей, так и кибер-лорды получают деньги только за то, что имеют исключительное право на некую информацию. Причем для получения дохода им вовсе не обязательно прилагать какие-либо усилия (в этом их отличие от капиталистов).

Самым известным кибер-лордом является компания «Майкрософт». Ее владения повсюду, где пользуются какой-либо разновидностью операционной системы Windows. И всякий, кто находится в этих владениях, обязан платить «ренту» уже за сам этот факт. Иными словами, «Майкрософт» извлекает деньги практически из ничего».

Разумеется, существуют попытки подорвать монопольное господство этой компании. Например, Линус Торвальдс, финский программист, создал альтернативную, пользующуюся большой популярностью операционную систему Linux, открытую и общедоступную.

Однако к России с «кириллицей» это имеет малое отношение, так как страна почти полностью находится в «зоне Windows» и сполна платит за это.

Отсюда проистекает и отставание требуемых знаний у профессорско-преподавательского состава, а следовательно, и недостаточный уровень образования у выпускников Российских университетов в области цифровой обработки и передачи данных.

Получаемый уровень знаний достаточен лишь для продажи компьютеров и периферии, цифровых фото- и кинокамер, но не достаточен даже для консультаций и пояснений, например для каких целей какая требуется аппаратура, какие программы необходимы для совместимого функционирования по свойствам и характеристикам: память, протоколы, форматы и др.

Это и привело к последовательной потере не только приоритета, но и конкурентоспособности в фундаментальных исследованиях и технологических разработках в областях физики, механики, робототехники и информатики. И это при том, что в 60-х годах в СССР действительно было лучшее инженерно-техническое и фундаментальное образование и научный приоритет в механике робототехники и манипуляторов (В.Н. Охацимский), в физике инфотелекоммуникаций (Ж.И. Алферов) и в алгоритмической теории - программируемой технологии (А. Н. Колмогоров).

Не соизволив еще разобраться в причинах, затормозивших индустриальное развитие, Россия средствами массовой информации «строит» в XXI веке информационное общество из **недоиндустриального состояния** в отличие от стран, достигших уже **постиндустриального** уровня развития.

«Светлое будущее» информационного общества в России связывается не с собственными научными исследованиями и технологиями, а опять-таки с заимствованием, но еще худшего типа. В настоящее время

заимствование происходит уже на уровне закупок не технологий, а конечного продукта (вместо «удочки» - «рыба»).

Правительственные решения и предпочтения, от которых зависит будущее России, формируются исходя из сиюминутной потребности без какого-либо понимания даже сути используемых англоязычных аббревиатур-сленгов.

Московский Комсомолец от 18.02.2006: *«...на заседании президиума Госсовета глава государства поставил несколько задач. Одна из них – обеспечить равный доступ граждан к современным технологиям. “В стране сложилась диспропорция по использованию технологий в различных регионах: мобильной связи – в 80 раз, домашних компьютеров – в 50 раз, – сообщил президент. – Рост телефонизации составляет 30% в год. Но в стране до сих пор не телефонизированы 40 тыс. населенных пунктов”»*.¹

К сожалению обещания чиновников, что к **2008** г. все российские школы будут иметь как минимум **один компьютерный класс**, не являются панацеей, так как не имеется возможности использовать интернет-образовательные ресурсы вследствие отсутствия скоростных цифровых каналов передачи данных.

При таком уровне обсуждения на *президиуме Госсовета* какое-либо осмысленное принятие решения невозможно по причине даже терминологической путаницы. Надежда на карманные персональные компьютеры и телефоны следующего поколения, так называемые **смартфоны** (смартфон – в переводе с английского **умный телефон** - обладают возможностью установления связи и дополнительно развитым интерфейсом) неоправдана, так как «умным» смартфон становится только для **умного пользователя**. И **связь, в том числе и с Интернетом**, возможна лишь при наличии так называемой зоны прозрачности - «точки доступа» для того протокола (WiFi, WiMAX, G3 и др.), который установлен в той или иной модели смартфона.

Необходимость подобных обсуждений и их целесообразность заключается прежде всего в профессионально грамотных решениях об унификации протоколов и стандартов, открывающих путь коммерциализации и создания повсеместной «зоны прозрачности», которая может быть реализована как бесконтактно, т. е. радиоканалом, так и проводными средствами.

Принятие решения определяется лишь коммерческой составляющей, которая и привела к размыванию границ понимания тенденции и перспективности тех или иных научных и технических решений в отличие от рекламных продвижений продукции цифровых технологий.

¹ *Наталья Галимова.* От чего краснеет Путин. Губернаторов поссорил Интернет. Газета «Московский Комсомолец» от 18.02.2006 г.

*«Российская телевизионная и радиовещательная сеть» (РТРС) уже договорилась с консорциумом французских банков о получении кредита на 1.5 миллиарда евро сроком на 15 лет под правительственные гарантии. В РТРС говорят, что их проект позволяет завершить переход на цифровое вещание уже в 2009 году. Минкульт и Мининформсвязи настаивают на более позднем сроке – 2015 год. Для сравнения, Финляндия может завершить переход на цифровое вещание уже в 2007 году. Через год к ней присоединятся Швеция, Норвегия и Италия, в 2009 – США и Германии, в 2010 – Франция, Бельгия и Испания, в 2011 – Япония, в 2012 – Великобритания, Австралия и Австрия. Какое место в этой очереди за информационным счастьем займет Россия? Теперь это всецело зависит от сговорчивости чиновников - в правительстве хотят, чтобы в итоговом документе были учтены интересы всех сторон. Отстаивая корпоративные интересы, чиновники должны понимать, что заносчивость и личная неприязнь могут дорого стоить России. В конечном счете совершенно справедливо отмечено, что **степень доступности услуг связи определяет уровень и качество жизни**».¹*

5. Цифровая (пиксельная) технология

Мир цифровых технологий постоянно развивается, возникает проблема, как избежать тупиковых направлений. В этой книге мы постараемся сконцентрировать внимание читателя на научно-технической стороне обсуждения настоящих и ожидаемых перспектив цифровых технологий обработки аудиовизуального потока данных.

Информационная безопасность, борьба с террором и преступностью призвала на службу современные цифровые технологии повсеместной установкой аппаратуры аудио- и видеоконтроля и слежения. Следующий шаг – защита этого аудио- и видеопотока данных от несанкционированного съема и сокрытых воздействий, искажающих исходную информацию. В связи с этим требуется иной специфический подход к алгоритмам, программам, протоколам и форматам обмена, хранения, обработки и передачи данных при разработке аппаратно-программных комплексов и компьютерных систем аудио-, видеонаблюдения с целью компрессии, кодировки и защиты от несанкционированного внедрения. Цифровые технологии обладают неограниченными возможностями управления аудиовизуальным потоком, звуковой и световой модуляцией, создавая иллюзии виртуальной реальности, эксплуатируя специфические биологические свойства зрительного и слухового восприятия человека, зомбируя его психику. Причем такое виртуальное воздействие может быть сокрыто в любом цифровом информационном

¹ Цена одной чиновничьей войны. Газета «ИЗВЕСТИЯ» от 06.04.2006 г.

потоке и проявляется лишь при его воспроизведении (компьютерный цифровой аналог «25»-го кадра).

Заметим, что современный «ай-хай-тек» вызревал в недрах различных научных дисциплин и наиболее емко отразился в ряде научных публикаций, появившихся почти одновременно в 60-70-х годах XX века в физике, математике, связи и работах, раскрывающих концептуальную основу цифровых технологий.

Реализация изложенных в них идей ожидала появления «хай-тек» в виде цифровых программируемых технологий, реализующих концепцию кодовой модели, программной симуляции (simulator), т. е. непосредственного виртуального построения, воспроизведения физического процесса, а не его математического моделирования. Первым прототипом такого подхода явилась компьютерная программа FractInt (подробное описание такого подхода приведено в книге [9], а программная реализация имеет большое число модификаций, которые можно найти на сайте <http://www.fractint.org/>).

По непонятной причине она до сих пор чаще всего используется лишь для развлечения – для синтеза «музыки» и «картин».

Основной вопрос, на который хотелось бы обратить внимание, – это цель появления данной книги. Ее содержание ориентировано на вдумчивого, критически мыслящего, желающего профессионально прогрессировать читателя, а не на всеядного поглотителя Интернета - «вигнетного» и рекламного содержания.

Коммерческое свойство Интернета в большей степени порождает рекламно-информационный поток, призванный отвечать на вопрос о достоинствах рекламируемого продукта, но не на вопрос о потребности в нем. Заметим, что интеллектуально-образовательный ценз многих профессий не поспевает даже за понятийно-интерпретационной стороной появляющихся в цифровой технологии терминов.

Режиссер аудиовизуальных эффектов не подозревает о постоянно развивающихся компьютерных технологиях их виртуального построения и психофизиологического воздействия на зрителя. Фантазия архитектора способна спроектировать любую пространственную конструкцию, но не способна сориентироваться в программах расчета надежности конструкции.

Наблюдается разрастающаяся узкоспециализированная профессионализация. Этот процесс, сопровождаемый научно-техническим прогрессом, приводит к диахронизму – к потребности изменения словарного состава выявлением предметно-ориентированного тезауруса и построению глоссариев, как элементов профессионализации.

В Интернете пользователь добывает информацию по ключевым словам, которые в свою очередь откуда-то должны быть ему известны и адекватны теме поиска и на доступном для его - пользователя языке содержаться в Интернете. И только в этом случае пользователь сможет получить доступ к массе научных публикаций, книг, учебников и рекла-

мируемых инноваций. Расклассифицировать же по практической значимости и научной истинности и ценности получаемый при этом терминологический и понятийный «винегрет» - достаточно сложная задача.

ИТ привели к разрыву профессиональных знаний и понятийного глоссария чиновников, принимающих решения, с инновационными процессами профессионалов предметных областей, в том числе и к непониманию употребляемых сленгов и терминов в рекламно-маркетинговых представлениях.

В сопоставлении экономических, политических и рекламных заявлений прослеживается влияние «хвоста», т.е. рекламы на поведение «головы» - принятие решения.

Примером такого рекламно-маркетингового воздействия, по сути диктующего государству стратегию принятия решений, но не отвечающего за социально-экономические последствия, является цикл статей «Цифровое ТВ: технологии опережают бизнес-сознание» [10].

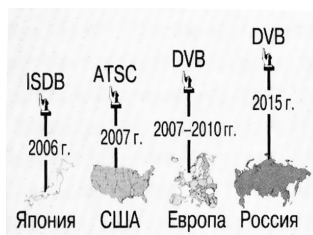


Рис. 1. Планы перехода на цифровое вещание в мире.

Конгресс США одобрил закон о переводе национального ТВ на цифровой формат к февралю 2007 г. Переход на «цифру» позволит высвободить часть РЧС, что даст возможность продавать частоты компаниям и физическим лицам. Проект обойдется примерно в \$1.5 млрд, причем большая часть средств пойдет на субсидии владельцам аналоговых приемников для приобретения цифровых приставок.

Прибыль от продажи радиочастот составит не менее \$10 млрд, так что перевод ТВ на «цифру» выглядит весьма прибыльным проектом.

Рассмотренные же в [10] проблемы телевидения и вопросы, поставленные специалистами телевизионного рынка, - беседа «глухого» со «слепым». Мы видим, что **выбор стандартов** это стратегия развития экономики цифровой цивилизации.

6. Экономика знаний

Экономика «сырьевой» цивилизации имеет иной вектор стратегического развития. Капитал уходит в трубу, а не в канал передачи данных.

Суть экономики знаний, а не **капитала** в создании и использовании постоянно возобновляемого ресурса, которым и является программируемая технология создания все более эффективных протоколов, операционных систем, интерфейсных программ, форматов, кодеков и других продуктов.

Чтобы понимать настоящее и предвидеть будущее, необходимо знать прошлое – истоки современных достижений и тупиковых решений при формировании, передаче и анализе информационных потоков. Иначе получается, что оптимальный неравновесный код Морзе (1840 г.), учитывающий рейтинг наиболее часто употребляемых букв в тексте, приписывается Хаффману (1952 г.), а передача – контент содержания, осуществленная оптическим телеграфом (Клодом Шатто в 1794 г.), считается прерогативой поисковых Интернет-серверов.

Широко известен традиционный подход к передаче и обработке данных, проистекающий из «общей теории связи», - волновой, т. е. аналоговый, и дискретный (цифровой) спектральный анализ и синтез сигналов.

Высокая технология же «**хай-тек**» породила иную концептуальную схему «**цифровой технологии**».

Из огромного перечня научных и учебных трудов по традиционному спектральному анализу и синтезу обратим внимание на следующие:

1. **В. А. Сарычев. Лекции по курсу «Теория радиотехнических цепей и сигналов»** [11].

Поставил удивительно «наивные» вопросы, ответы на которые лежат вне области классического спектрального анализа и которые не возникают при «цифровой технологии».

Данный курс лекций готовился автором, который полностью разделяет убеждение, что цифровые методы обработки информации практически полностью вытесняют сегодня аналоговые, они приводят к качественно иным технологиям создания и эксплуатации соответствующих радиоэлектронных устройств, комплексов и систем. По этой причине, даже двигаясь по несколько искусственному для «чисто» цифровой радиоэлектроники пути «аналог $\Rightarrow$ цифра», следует, как можно раньше, предлагать вниманию обучающихся идеи, понятия, концепции и технологии, задействованные в современной системотехнике и системологии информационных радиоэлектронных систем.

Так, уже на первой лекции сталкиваются такие понятия, как сигналы, данные, сообщения, информация, знания, причем под углом

зрения наличия в них синтактики, семантики и прагматики. Далее студент подводится к пониманию сентенции, что радиотехнические цепи и «обслуживаемые» ими сигналы используют только синтактику, а потому соответствуют описанию информационной системы как простой системы. Семантика и прагматика, заключенные в сигнале, а также сложные в информационном плане системы – это прерогатива последующих курсов по радиоэлектронике. «...Не надо стремиться поступать в те радиотехнические вузы, в рекламных проспектах которых упоминается хоть одна учебная дисциплина с определением «аналоговые» или «цифровые». Там работают люди, которые остались во времена «Очакова и покоренья Крыма». Самое интересное, что цифровые технологии намного проще и физичнее аналоговых. Оказывается, «нетехнологичные» производные n -го порядка трансформируются в необходимость простого учета n текущих отсчетов; спектральный анализ лишается почти всех своих парадоксов (гармоники имеют длительность самого сигнала и амплитуда их никак не нулевая и даже не стремится к нулю), операционное исчисление трансформируется в простое алгебраическое z -преобразование и т.д. Здесь хорошая аналогия с восприятием идей квантовой механики, где все физические величины «отдельно», все проявления разнообразных физических эффектов «отдельно», а используемая математика в своей основе содержит простую арифметику. В этом случае, например, гениально решается проблема тождественности частиц, логика разрешения которой легко переносится на сигналы. В квантовой механике тождественными считаются частицы, у которых одинаковые различимые (то есть отстоящие друг от друга на конечную величину) значения одного и того же набора также различных (в данном случае, хотя бы перечислимых) физических характеристик. Для специалиста по цифровой обработке абсолютно ясно, что такое тождественные сигналы; различие в сигналах устанавливается элементарно. С точки зрения аналоговой обработки два сигнала, которые считаются тождественными, могли бы быть лишь приблизительно одинаковы или настолько одинаковы, что на практике с помощью современной техники эксперимента их нельзя было бы различить. При этом сохраняется возможность, что техника будущего установит такое различие. В цифровой технике положение совершенно иное: мы можем указать прямой критерий, устанавливающий, являются ли сигналы совершенно неразличимыми или они различимы.

Сложности в цифровой радиоэлектронике возникают (консервативность обучения) тогда, когда из-за цифровых технологий в нее стали все активнее проникать принципы обработки сигналов и изображений, базирующиеся на очень рваных функциях типа Вейерштрасса (у которых, несмотря на их непрерывность, отсутствуют какие-либо производные в каждой точке), фрактальные, самоподобные или самоаффинные и т.п.

2. В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин «Теория и практика вейвлет-преобразования»[12].

*В книге рассмотрен круг вопросов, связанных с вейвлетами и вейвлет-преобразованием. При этом наряду с основами теории представлены и современные направления исследований в этой области. Вейвлет-преобразование рассмотрено в книге с точки зрения **субполосного кодирования**. Основной упор делается на применение вейвлет-преобразования для сжатия изображений. Этим определяется и обсуждаемый круг вопросов. Книга написана инженерами и для инженеров. Поэтому здесь отсутствуют доказательства тех или иных положений, излишняя строгость формулировок. Книга представляет собой обобщение научно-технической литературы, издаваемой на Западе и состоит из 11 глав:*

- Глава 1. Субполосное кодирование
- Глава 2. Основы теории вейвлет-преобразования
- Глава 3. Вейвлет-декомпозиция сигналов произвольной длины
- Глава 4. Сравнение вейвлет-фильтров с фильтрами субполосного кодирования
- Глава 5. Адаптивные ортогональные преобразования
- Глава 6. Лифтинговая схема
- Глава 7. Целочисленное вейвлет-преобразование
- Глава 8. Мультивейвлеты
- Глава 9. Характеристики кодирования изображения с применением вейвлет-преобразования
- Глава 10. Применение вейвлет-преобразования для сжатия изображения
- Глава 11. Видеокодеки семейства ADV6xx производства фирмы «Analog Devices»

3. Steven W. Smith «Научно-техническое руководство по цифровой обработке сигналов» [13].

Книга, посвященная вопросу цифровой обработки сигналов, написана для ученых и инженеров различных областей деятельности: физиков, биоинженеров, геологов, океанографов, инженеров-механиков и инженеров-электриков. Целью данной книги является демонстрация практических методов, без детального углубления в математические расчеты и абстрактную теорию. На англ. языке.

Основные принципы:

- Часть 1. Области применения цифровой обработки сигналов
- Часть 2. Статистика, вероятность и помеха
- Часть 3. АЦП и ЦАП
- Часть 4. Программное обеспечение DSP

Основные методы:

- Часть 5. Линейные системы
- Часть 6. Свертка
- Часть 7. Свойства свертки
- Часть 8. Дискретное преобразование Фурье
- Часть 9. Приложения ДПФ
- Часть 10. Свойства преобразования Фурье

- Часть 11. Пары преобразования Фурье
- Часть 12. Быстрое преобразование Фурье
- Часть 13. Непрерывная обработка сигналов

Цифровые фильтры

- Часть 14. Введение в цифровые фильтры
- Часть 15. Скользящие средние фильтры
- Часть 16. Оконные гармонические фильтры
- Часть 17. Заказные фильтры
- Часть 18. Свертка БПФ
- Часть 19. Рекурсивные фильтры
- Часть 20. Фильтры Чебышева
- Часть 21. Сравнение фильтров

Приложения

- Часть 22. Обработка звуковых сигналов
- Часть 23. Формирование и показ изображения
- Часть 24. Линейная обработка изображений
- Часть 25. Специальные методы формирования изображения
- Часть 26. Нейронные сети
- Часть 27. Сжатие данных
- Часть 28. Цифровые процессоры сигналов
- Часть 29. Начало работы с DSP

Комплексные методы

- Часть 30. Комплексные числа
- Часть 31. Комплексное преобразование Фурье
- Часть 32. Преобразование Лапласа
- Часть 33. Z-преобразование

4. С. Л. Марпл, мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1990.

5. Р. Блейхут. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. — Москва: Мир, 1989.

6. Р. Брейсуэлл. Преобразование Хартли. Теория и приложения. — М.: Мир, 1990.

7. Р. Гонсалес, Р. Вудс. Цифровая обработка изображений. — Техносфера, 2005. 1070 с.

Монография раскрывает базовые понятия и методологию компьютерной обработки изображений, дает основы для дальнейшего изучения этой многогранной и быстро развивающейся области. Книга является одним из наиболее популярных, известных в мире и полных учебников в области теории и методов цифровой обработки видеoinформации. Многие из приведенных в ней алгоритмов реализованы в широкоизвестных пакетах компьютерной обработки изображений. Рассмотрены все основные направления обработки и анализа изображений, включая основы теории восприятия и регистрации видеoinформации, методы фильтрации, вейвлет-преобразования, улучшения, восстановления и сжатия черно-белых и цветных изображений. Обсуждаются также вопросы сегментации, распознавания образов,

описания и представления деталей, морфологического анализа изображения. Все разделы сопровождаются большим количеством примеров и иллюстраций.

Уже авторские аннотации книг по цифровой обработке сигналов и изображений в большей степени несут рекламно-маркетинговые функции в ущерб научно-образовательным. Более того, понятийная терминология интегральных и дифференциальных математических моделей неоправданно распространяется на конкретные компьютерные программные продукты.

Подчеркнем, что приведенный выше, как пример, список публикаций отражает лишь адаптированные на компьютерную реализацию методы и алгоритмы, но их содержание ни в коей мере не отражает концепцию ЦИФРОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.

Несмотря на то, что делаются попытки создать глоссарии, такие как [14], основная тематика этих глоссариев, тем не менее опирается на аналитические функциональные преобразования. В приложении мы предлагаем глоссарий собственной разработки, ориентированный на цифровую технологию.

К цифровой технологии обработки и передачи данных наиболее приближена следующая работа.

Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. — 384 с.

Основная задача, которая ставилась при написании этой книги изложить в одном издании и достаточно единообразно современные методы сжатия данных. Тема эта необъятная. Все разделы достойны отдельных книг, а развернутое описание методов сжатия видеоданных требует нескольких томов. Поэтому в изложении основной упор делался на базовые идеи и концепции, используемые при сжатии. Нам бы хотелось, чтобы, изучив изложенные в книге методы, читатель мог понять принципы работы большинства компрессоров и разобраться в методах сжатия данных по исходным текстам программ.

Многие в первую очередь зададут вопрос: «Где взять исходные тексты архиваторов? И чтобы степень сжатия была хорошая!». Это не проблема.

Нет – это и есть проблема. Разные формы и виды информационного содержания: текст, сигналы, аналоговые и цифровые, «языковые», «образные», аудио- и видеопотоки - принципиально имеют разные информационно-энергетические потенциальные характеристики компрессаторов, зависящие в большей степени от освоения пико- нанодиапазона «цифровых технологий».

Учебник [15], рекомендованный Министерством образования для инженерно-технических специальностей по обсуждаемой тематике, свое содержание концентрирует на описании существовавших на тот момент

форматов, протоколов, но не на фундаментальных принципах цифровой битовой программируемой технологии обработки аудио- и видеопотоков данных. Мы благодарны авторам, которые обратили внимание и привели ссылку на рекурсивный подход цифровой обработки данных, предложенный еще в 80-х годах [16]. Разработанные в ней алгоритмы и программы на основе матриц Адамара и заполняющих пространства кривых сегодня преподносятся, как вейвлет или кратко-масштабный анализ.

Конечно, существует потребность в дифференциации специализаций на эксплуатационщиков систем (связисты-телефонисты) и разработчиков инновационных технологий – фундаментальных основ теории связи и инфологии.

В отличие от ми-фологии, ин-фология - развивающийся процесс превращения информации в знание, каждый следующий уровень знаний порождает новую порцию информации – самовоспроизводимый ресурс.

Мы здесь употребили понятие инфологии, введенное в научный обиход шведом Börje Langefors [17], известным разработчиком информационных систем (Information Systems Development, ISD). Ему принадлежит эффектная инфологическая запись: $I = i(D, S, T)$, где I – информация, D – данные, T – время, S – знания, а i – процесс их интерпретации.

Из этой итерации следует, что информация получается из данных и ее интерпретация – это адаптивный процесс развития знаний.

Поэтому и возникает профессиональный водораздел: одни создают инновационные технологии, а другие собирают прибыль: связисты-менеджеры продают «бит/с», техники и инженеры поддерживают работоспособность аппаратуры, именно на них и ориентировано современное инженерное образование в России. В то время как отечественные разработки инновационных цифровых технологий, включающие увеличение объема и скорости передачи данных, создание уникальных интерфейсных возможностей, построение виртуальных аудиовизуальных эффектов, трехмерное пространственно-временное воссоздание голографических сцен, воспроизводство в реальном времени в широкополосном адаптируемом диапазоне обзора местности в операторном и автоматическом режиме и др., не востребованы промышленностью.

И это не те проблемы, которые способны решать «лучшие из лучших» программисты.

Авторы ориентируют свой труд прежде всего на инженерно-техническую подготовку специалистов, призванных выступать не только дилерами фирм, производящих цифровую аудио- и видеопroduкцию, и пользователями программных продуктов, форматов, протоколов и другой конечной продукции компьютерного мира, но и разработчиками собственных прогрессивных решений, исходя из возможностей цифровых технологий.

Мы считаем, что проблема естественного диахронизма – изменения во времени словарного состава и понятий, ускоряющегося в Интернет-среде, может быть преодолена постоянным выделением ядра понятийных соответствий посредством предложенного визуального глоссария www.vslovar.ru

Наш оптимизм в историческом прошлом: существовали же в России фундаментальные исследования и разработки, опережавшие свое время на 30-40 лет, оправдывая тезис, что совершившееся однажды способно повториться. Успех в создании атомной бомбы советскими физиками (даже, если бы им и преподнесли чертежи) прежде всего в наличии знаний о физических процессах, которые школа А. Иоффе с 20-х годов XX века вынесла из контактов с западной наукой и самостоятельно развила и распространила в СССР, участвуя в образовательном процессе.

Этот же подход – ориентация на собственные силы привел к переломным позициям в производстве самолетов, ракет и исследовании космоса.

О всех в России произрастаниях, кои могут заменять многие из чужих земель вывозы и тем усугубить коммерческий перевес в пользу Российской империи. Предложена награда – двести червонцев за проблему: указать наилучшие, основанные на точных опытах и положительно доказанные, способы для придания русскому дубу той же или даже большей прочности, какою обладает дуб немецкий и английский.

Из юбилейного доклада – пятидесятилетие (29-е декабря 1776 г.) С.-Петербургской Академии Наук.

Цифровой разрыв - или почему бит в России.

Госдума поручала комитету по энергетике разобратся с цифровым телевидением. Во сколько России обойдется конфронтация чиновников из-за перехода эфирного ТВ на «цифру»?

*Цена одной чиновничьей войны.
Известия от 06 апреля 2006 г.*

Введение

1. Исторический дискурс

Исторический процесс развития цивилизаций немислим без адекватного общепонятного «языка» общения, т. е. способности воспринимать и понимать информационные сообщения. В силу биологической природы для человека основными информационными источниками и средствами их производства до 90% являются зрение, слух, речь и специфическая работа мозга. Коммуникационные возможности общения, технологически доступные на тот или иной момент развития знаний, средства передачи и распространения информации основаны прежде всего на физических свойствах окружающей среды, выживание в которой в первую очередь требовало развития сигнальных элементов связи от факелов до лазеров, «языковых» и других форм общения. Наскальные рисунки древних и звуки барабана не иллюстрация их художественных и творческих способностей, а сигнал соплеменникам о насущных потребностях.

Именно эта потребность людей в эффективном и интенсивном коммуникационном общении и привела к развитию инженерно-технических технологий и теории связи – передачи (транспортировки)

сигналов - акустических и визуальных. Потребность в информационной коммуникации привела к изобретению специфических кодировок, сенсорно-воспринимаемых человеком в виде букв, слов, текста, речи и зрительных образов, обобщаемых в понятие культурное наследие. Что отнюдь не решило гуманитарной проблемы, наивно сформулированной Льюисом Кэрроллом: *«Думай о смысле, слова придут сами»*, но позволяет более точно провести границу между такими понятиями, как **сигнал, данные, знания, информация, семантика и смысл**.

16 августа 1858 г. была передана первая телеграмма из Европы в Америку. Это было послание королевы Виктории, начинавшееся словами: *«Королева желает поздравить президента с окончанием величайшей международной работы, которая вызвала у нас необычайный интерес»*. Америка ликовала. Звонили колокола, ревели заводские трубы, взлетали ракеты фейерверков. Стефан Цвейг посвятил этому эпохальному событию новеллу «Первое слово из-за океана» в цикле «Звездные часы человечества». Цвейг писал: *«Небывалая победа: впервые с момента возникновения мышления на земле мысль со скоростью мысли пронеслась через океан»*.

Отметим, что современное знание свойств и законов передачи сигналов и данных расширило интеллект человека, по крайней мере до понимания различий между мыслью, информацией, данными и скоростями их передачи (транспортировки).

Современные средства массовой информации XXI века ежеминутно вываливают такой огромный поток слов, звуков и образов, что проблемой уже непосредственно является выявление **семантики и смысла, в том числе и в очередных инновациях**.

Математическая формулировка этой проблемы носит название **проблемы Кука (сформулирована в 1971 году)**.

«...Допустим, что вы, находясь в большой компании, хотите убедиться, что там же находится ваш знакомый. Если вам скажут, что он сидит в углу, то достаточно будет доли секунды, чтобы, бросив взгляд, убедиться в истинности информации. В отсутствие этой информации вы будете вынуждены обойти всю комнату, рассматривая гостей. Это говорит о том, что решение какой-либо задачи часто занимает больше времени, чем проверка правильности решения»[18].

Стивен Кук сформулировал проблему: может ли проверка правильности решения задачи быть более длительной, чем само получение решения, независимо от алгоритма проверки. Эта проблема также является одной из нерешенных задач из области логики и информатики. Ее решение могло бы революционным образом изменить основы криптографии, используемой при передаче и хранении данных.

В традиционной алгебраической аксиоматике проблему Кука сводят к эквивалентной сложности класса P vs NP Problem, хотя на быто-

вом уровне эмпирически известно: чтобы **узнать** некий предмет требуется меньше информации, чем для анализа и восприятия нового, на чем построены различные телешоу типа «Угадай Мелодию» и др.

В этом и состоит роль обучения как предварительной стадии анализа и установления структурных соотношений «нового» объекта в терминах и понятийных категориях ранее сформировавшегося знания. Что никак не учитывается в традиционных подходах математического моделирования при цифровой обработке аудиовидеопотока. Противоречивые требования в информационной потребности при **познании и узнавании** и приводят к необходимости опираться на использование семантико-смыслового анализа [19, 20].

2. Принцип этерификации

Многие принципы и законы информационных преобразований переоткрываются и изобретаются заново на ином витке инновационных технологических достижений.

Развитие различных форм представления информационного содержания, их распространение и сохранение - прерогатива науки и технологий. Семантический, смысловой аспект восприятия информационного содержания все еще в большей степени составляет предмет искусства.

Технические средства передачи аудиовидеопотока данных, несущих акустические (речь) и визуальные (буквы, изображения и др.) **образы**, отнюдь не одинаково воспринимаемые и интерпретируемые, **становятся информацией** лишь при осознании их интеллектом – разумом, когерентном отклике **в соответствии с ранее приобретенным и навязанным знанием**.

Это образно отразил В.Брюсов: «...ухо обманывает нас, считая колебания воздуха свойством звенящего колокольчика...», и активно эксплуатируют иллюзионисты, идеологи, СМИ и маркетологи.

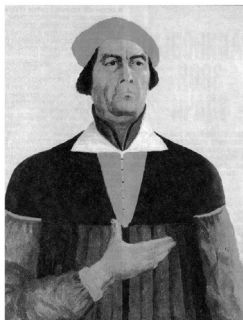
С увеличением «транспортных» возможностей информационно-коммуникационных систем, в том числе с развитием Интернет-технологии, все более очевидным и осознанным становится факт, что сами по себе слова, музыка и фильмы **не несут мысли, они лишь формируют интерфейсно-когерентные метки, идентификаторы наших мыслей**.

Так возникло понятие «мем» (происходит от греческого слова μίμνησκα, «подобие»), которое связывает символизацию предмета, объекта, явления с его информационным содержанием.

Одним из мемов является «квадрат Малевича», который по-разному идентифицируется в социально-групповых кластерах, так же как различны и ассоциации на слово «красное»: для одних - это икра, для других - идеология. Для астролога Р. Флудда «черный квадрат»

символизировал бесконечность Вселенной, для художника Малевича – авангард живописи (рис. 2). Их авторские права на мем - черный квадрат и его информационное содержание лежат в разных отраслях знаний. На обложках приведен художественный прием такой символизации – абстрактная живопись В.Кандинского.

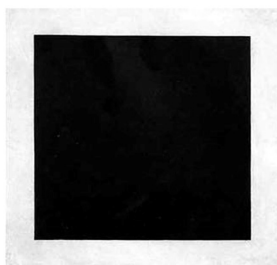
Специфика восприятия и понимания аудиовидеопотока данных для эффективного общения - коммуникации в большей степени происходит из психофизиологических, как персональных, так и общественных, установок, которые исследовались в диалогах Платона, логике смысла Делеза, деконструкции Деррида и отражены в **принципе этерификации**, сформулированном Дж. Тойнби [21]: *«...В истории письменности наблюдается не только соответствие между развитием техники письма и упрощением формы, но и эти две тенденции фактически тождественны друг другу, поскольку вся техническая проблема, которую должно решить письмо как фиксатор, посредник человеческой речи, - это отчетливая репрезентация широчайшей сферы человеческого языка с максимальной экономией визуальных символов, т.е. этерификация - закон прогрессирующего упрощения...».*



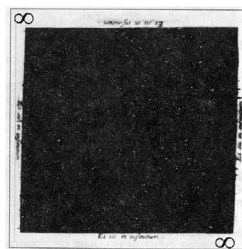
а



б



в



г

Рис. 2. а – XX век. К. Малевич. Автопортрет. б – XVII век. Роберт Флудд.
в – К. Малевич. Черный квадрат. г – Р. Флудд. Великая тьма

По сути, это и есть ответ на проблему Кука.

Логик Э. Пост считал, что «...дар творчества невозможно представить в чистом виде, но можно формализовать способность конструировать более высокие типы. Подобно трансфинитным ординальным числам, творческий процесс состоит в постоянном переупорядочивании их вследствие восприятия ранее не замеченных знаков, которые задают последовательность этих чисел...» [22].

Иначе, интеллект человека обеспечивает гибкий компромисс между правильностью действия и постоянной готовностью к ответам на любое раздражение, позволяя тем самым принимать решения, которые в общих чертах составляются почти мгновенно и затем постоянно совершенствуются путем уточнения и обработки деталей.

3. Алгоритмическая теория А. Н. Колмогорова

Приведем выдержки из работ А. Н. Колмогорова, актуальные и через 50 лет [23].

«...Пользуясь своим мозгом, как данным от господ бога, математик мог не интересоваться комбинаторными основами его работы. Но искусственный интеллект машин должен быть создан человеком, и человеку приходится погрузиться в неизбежную при этом комбинаторную математику...».

Следует пояснить, что на тот момент так называемые универсальные электронно-вычислительные машины не обладали и тысячной долей современных возможностей, а под комбинаторной математикой понималась **алгоритмическая теория**, предложенная А. Н. Колмогоровым.

«...Дискретные формы хранения и переработки информации являются основными. На них основана и сама мера “количества информации”, выражаемого в “битах” - числе двоичных знаков...»

Постулат, который следует из технологии построения существующих компьютеров, но отнюдь не из специфики функционирования биологической субстанции интеллекта человека. Это уточнение необходимо, чтобы лучше понимать и отсеивать спекулятивный характер многих публикаций по искусственному интеллекту.

«...Из развитых вкратце общих соображений не видно, почему теория информации должна столь существенно основываться на теории вероятностей, как это представляется по большинству руководств.

Моей задачей является показать, что эта зависимость от зараннее созданной теории вероятностей в действительности не является неизбежной. Обычно пользуются вероятностным определением энтропии, которое относится, однако, не к индивидуальным объектам,

а к случайным, т. е. по существу к распределениям вероятностей в каких-либо классах объектов.

Замысел определения (1965 г. [24]) алгоритмической теории очень прост: энтропия $H(x|y)$ есть минимальная длина записанной в виде последовательности нулей и единиц “программы” P , которая позволяет построить объект x , “имея в своем распоряжении объект y ”...

Этот замысел и возник, исходя из осознания концептуально специфических свойств компьютерной цифровой технологии обработки последовательностей нулей и единиц, который и позволяет перейти от “вероятностной энтропии” - классовой идентификации, к **уникальной** - на основе “объектной энтропии”, определяемой как **минимальная длина “программы” построения информационного объекта, несущего семантико-смысловое содержание**».

Однако до сих пор в учебной и научной литературе узаконенное понятие информации по Шеннону определяет лишь количество «кирпичей» для строительства некоего «объекта-здания», но не отвечает на вопрос об «архитектуре - семантике» объекта.

Этот замысел А. Н. Колмогорова не воспринят полностью и в **теории инфокоммуникации** не востребован. Он активно востребован на практике развития «ай-ти» и «хай-тек» информационных технологий, но реализуется на эмпирическом уровне как **программируемая технология** построения операционных систем, компьютерных симуляторов, тренажеров и игр; протоколов, форматов и стандартов цифровой обработки аудиовидеопотока данных.

Именно А. Н. Колмогоров впервые обратил внимание на принципиальное парадигмальное различие между априорно сформулированным функционально-энтропийным представлением сигнала в парадигме Гильберта и программируемой - вычислимой сложностью построения сигнала в терминах машины Тьюринга.

Отсюда и возникает неоднозначность понятия «сложность». Сложность - как объем необходимых вычислений при дискретном численном анализе математических моделей, приводящих с увеличением размерности к экспоненциальной (полиномиальной) сложности – увеличению требуемого объема вычислений. И решение этой проблемы ищется лишь в увеличении скорости процессора и распараллеливании вычислений согласно арифметики (алгоритма) аль-Хорезми.

Иное же понятие сложности было предложено А. Н. Колмогоровым, а именно посредством определения алгоритма как минимальной длины программы – последовательности технологических операций, например кодеки: MP3, MPEG и др.

Отсюда вытекают и принципиальные различия между волновыми (аналоговые) и корпускулярными (цифроимпульсные) способами организации связи и передачи данных. При аналоговой связи качество, т. е.

семантика информационного содержания заложена в форму сигнала и подвержена непосредственному искажению помехой-шумом, при импульсной – цифровой кодировке возможные помехи и ошибки в меньшей степени сказываются на восстановлении семантики, что и приводит к новым возможностям, например к цифровому телевидению высокой четкости и соответствующей ему аббревиатуре-сленгу (HDTV-TBЧ).

В основе цивилизационного прогресса лежит взаимосвязанный принцип «тяги-толкай» (усилительная схема push-pull), порождаемый развивающимися технологическими возможностями – инженерными изобретениями и инновациями в физике и математике. Подчеркнем, что открытие новых свойств физической природы непосредственно влияет на развитие технологий. За математикой же – строгая формализация и объяснение физических свойств. Казалось бы, непрерывное развитие этой триады – технологии, физики и математики, обеспечивает и непрерывность НТП. Однако консерватизм в мышлении и задержка в смене технологий играют роль тормоза, причем, парадоксально, но факт, наиболее сильно проявляющегося в «лучших», до поры до времени консервировавшихся образовании и технологии. И связано это с несовпадающими по времени качественными прорывами в отдельных областях триады знаний. В свою очередь это приводит к неадекватно продвинутым знаниям и уровням образовательного процесса, а новые, инновационные, процессы трудно воспринимаются поколением, воспитанным на фундаменте предыдущего суженного (зашоренного) знания и соответствующих ему концепциях и терминологиях.

Чтобы разобраться с существующими и перспективными возможностями современных цифровых технологий обработки ДАННЫХ: компрессии, стеганографии, передачи, хранения и семантического анализа текстов, речи и аудио-и видеопотока, приведем удивительные аналогии научных заблуждений при развитии теории связи, управления и инфокоммуникации в 19-м и 20-м столетиях.

4. Оптическая связь и методы кодировки информационных сообщений

Обратим прежде всего внимание на оптический телеграф, разработанный французом Клодом Шаппо в 1794 г., прототип современного оптоволоконного канала связи, и на методы кодировки информационных сообщений, разработанные французом и русским И.П. Кулибиным. Они – эти методы кодировки до сих пор актуальны как наглядное пособие двух подходов - с учетом **и без учета** семантико-смыслового аспекта при передаче и обработке сигналов.

Оптический телеграф – башня с расположенными на ней тремя переключателями: одной горизонтальной, длинной, и двумя короткими, подвижно прикрепленными к ее концам. Изменением положения пере-

кладин образовывали 256 возможных фигур (сочетания положений). Их них Клод Шапп в 1793 году выбрал **только 92 фигуры**, наиболее различимые человеком, **ориентируясь на специфику зрительного восприятия**. Он также отобрал 8400 наиболее употребительных французских слов и расположил их на 92 страницах – по 92 на каждой.

С башни на башню передавался вначале номер страницы, а затем – номер слова. Оказалось, это – **наиболее оптимальное семантико-смысловое кодирование**. И в 1794 г. оптический телеграф получает широчайшее военное и гражданское применение. Вскоре протяженность линий оптического телеграфа составляет уже 50 000 км, а сообщения передаются в трех кодировках – военной, гражданской и служебной.

Каждая тема опирается на собственный глоссарий, включающий 8400 слов.

Заметим, что такой подход оказался востребован и наиболее эффективен в поисковиках Интернет-среды [25].

В то же время кодировка, предложенная Кулибиным, на основе того же набора положений перекладин, должна была обозначать 32 буквы, 10 цифр, 6 знаков препинания и все сочетания букв (слоги).

Вместо распознавания - идентификации 92 позиций необходимо уже идентификация 208 позиций, что является непосильной задачей для человека.

Богатство словаря сообщений значительно затрудняло технологию составления сообщения и затормаживало скорость передачи. Поэтому на линии Санкт-Петербург – Варшава протяженностью 1200 км использовалась не кулибинская, а французская кодировка.

Справедливости ради, заметим, что понимание перспективности цифровых технологий семантико-смысловой кодировки восходит еще к Морзе.

5. Фурье, Найквист и «bandwagon»¹

С середины 19-го века разложение сигнала по функциям Фурье, обеспечивается технологией построения резонансных контуров L, R, C и становится общепринятым языком для анализа проблем, возникающих при его передаче.

«Но разложение Фурье – мощное орудие решения задач, возникающих при передаче сигналов. Математики и инженеры с его помощью получили множество противоречивых результатов, которые поначалу не были правильно поняты. Так, первые телеграфисты утверждали, что они будто открыли всевозможные виды форм и ком-

¹ Shannon C.E. . The Bandwagon (Editorial), Institute of Radio Engineers, Transactions on Information Theory. Vol. IT-2 (March, 1956), P. 3.

бинаций сигналов, якобы обладающих желаемыми свойствами, но очень часто их математические выкладки оказывались ошибочными, а доводы – абсурдными. Очень много споров велось о том, какие сигналы наиболее эффективны с точки зрения ограничения передаваемой мощности, увеличения предельной скорости передачи, уменьшения взаимных помех, ослабления шумов.

В 1917 году Гарри Найквист, получив степень доктора философии (в те времена доктора философии встречались значительно реже, чем в наши дни), пришел работать в фирму “Америкен Телефон энд Телеграф Ко”. Результат своего исследования он опубликовал в 1924 году в очень важной работе, которую назвал “Некоторые факторы, влияющие на скорость передачи телеграфных сигналов”.

Найквист прежде всего показал что: «если посылать символы (последовательные значения тока) с постоянной скоростью, то скорость передачи W связана с числом m различных символов логарифмической зависимостью

$$W = k \log m ,$$

Чтобы одновременно передать M сообщений, потребуется 2^M различных символов, так как число возможных комбинаций M независимых выборов 0–1 равно 2^M . Предположим, что символов имеется 2^M . Найквист говорит, что для получения предельной скорости передачи следует взять логарифм по основанию 2 от числа символов».

И только затем в 1928 г. Найквист показал, «как нужно формировать телеграфные сигналы, чтобы они не имели синусоидальных составляющих слишком высоких частот и не мешали телефонным переговорам, ведущимся по тем же проводам. Он обратил внимание на то, что предельная скорость в линии, а следовательно, и скорость передачи пропорциональны ширине диапазона, или полосе частот, используемых в телеграфии».

Иная интерпретация передачи сигнала привела Хартли к той же формуле, но иной терминологии, исходя из понятия информации.

«Хартли определил информацию сообщения H как логарифм числа возможных последовательностей символов, которые могли бы быть выбраны, и показал, что

$$H = n \log s ,$$

где n – количество выбранных символов, а s – количество различных символов в наборе, из которого делается выбор.

Инженеры, желая улучшить электрическую связь, постоянно пытаются найти новые достаточно простые для использования схемы кодирующих и передающих устройств. В частности, они пытаются закодировать телевизионные и звуковые сигналы как можно меньшим количеством двоичных цифр в секунду. Значение

такого эффективного кодирования будет возрастать по мере того, как цифровая передача сигналов (импульсно-кодовая модуляция, например) будет становиться более обычным явлением. Его значение будет возрастать также по мере того, как шифрование сигналов для обеспечения секретности будет становиться более обычным делом, ибо секретность лучше всего достигается цифровыми методами» [26].

Это цитаты из книги Дж. Пирса 1967 г., одного из немногих учебников, содержание которого до сих пор актуально относительно специфики инфокоммуникации, в том числе и для «хай-тек» – цифровых технологий.

Наконец, в 2005 г. появляется статья [27], в которой также обращается внимание на некоторые укоренившиеся заблуждения:

*«В 1950-е годы было распространено мнение о том, что Шеннон создал общую теорию связи, а представителям конкретных видов связи (телеграф, телефон, телевидение) надо побыстрее применить ее к своим системам, чтобы получить частную теорию. Считалось, что, применив теорию Шеннона в телевидении, можно получить теорию телевидения. Не только связисты из разных видов связи, но и ученые из разных отраслей науки вознамерились применять теорию Шеннона в своих интересах. Мода на автора информационной теории связи сопровождалась непониманием самой теории. Причина не только в том, что связисты не знают математическую статистику, а в том, что связь, как информационный процесс, не сводится только к физическому процессу. Основная теорема Шеннона доказывает существование идеального блочного кода, который физически не осуществим из-за требования бесконечного времени. Идеальная связь по Шеннону есть передача бесконечного количества информации за бесконечное время через канал с конечной пропускной способностью. Она должна обеспечивать неискаженную передачу формы сигнала через канал с шумом, т. е. выполнять мечту старых связистов об идеальной неискаженной передаче. Шеннон как бы говорил связистам: “Получите то, о чем вы мечтали”, хотя и предупреждал в статье **“Бандвагон”**: “Сознвая, что теория информации является сильным средством решения проблем теории связи (и в этом отношении ее значение будет возрастать), нельзя забывать, что теория информации не является панацеей для инженера-связиста и тем более для представителей всех других специальностей”.*

Если бы связисты вняли предупреждению Шеннона и не впали в эйфорию, то поняли бы, что именно Шеннон показывает, что их мечта есть информационный “вечный двигатель”, требующий передачи бесконечного количества информации за бесконечное время. Основная теорема Шеннона, а, значит, и вся его теория связи, призвана к нереальному способу блочного кодирования, изобретенному самим авто-

ром. Блоки Шеннона по определению бесконечны. А принципиальный переход от бесконечной к конечной длине блока никем не обоснован.

У Шеннона нет теоремы, относящейся к реальным способам кодирования, когда блоки имеют очень малую длину».

Корректная формулировка очень частного недостатка, имеющего отношение лишь к априорному предположению о Гауссовом канале связи, статистика которого не имеет ничего общего со статистикой ошибок цифрового канала (Канторово множество [28]).

«Теперь доказано (доказано А. Н. Колмогоровым в 60-х), что существует не один метод кодирования, а разные методы кодирования, которые удовлетворяют требованию информационного равновесия. Уравнение связи математически определяет информационное равновесие как равенство скорости создания информации, которую мы хотим передать, и скорости передачи информации через канал. Новый взгляд дал понимание того, что энтропия источника (т.е. минимальное среднее количество информации для восстановления непрерывного сообщения с заданной точностью ε) равна энтропии пропускной способности канала, а фактически обосновал то, что это одна и та же величина. В результате уравнение связи стало ядром теории телевидения как связи в реальном времени».

Заметим, это относится лишь к оптимальному по скорости и энергетике цифровому кодированию сигнала, транспортирующего информационное содержание, **но ни в коей мере не решает проблемы семантико-смыслового кодирования.**

«Телевидение - это процесс видения, в котором участвует человек и информационная машина (техническая система от света до света). Значит, проблема теории телевидения не может ограничиться изучением физических и информационных процессов в машине, а должна учитывать психофизиологические процессы в человеке и, прежде всего, рефлекс человека.

А. А. Ухтомский показал, что рефлекс человека и животных являются образными. По Ухтомскому образ создается телом и душой, образ, как и душа, не имеет локализации. Система образов определяет человеческую личность и всю культуру человечества. Мышление, наука, искусство и образование являются образными. Образы управляют поведением людей.

В объединении человека и телевизионной информационной машины образы создаются человеком, а машина дает ему необходимую информацию. Триада сигнал-информация-образ нераздельна. Соединение взглядов А.А. Ухтомского и К. Шеннона, привело к выводу о том, что информация служит пищей человеку для создания образов. Этот вывод, кажущийся почти очевидным, многие ученые боятся делать. Боятся признать образное значение информации. Признание этого вывода разрушает всю концепцию свободных СМИ.

Из «овечьей шкуры» телевидения как вида радиосвязи показывается новое хищное обличье. Телевидение является тоталитарным и глобальным средством навязывания народным массам системы образов, удобной небольшой группе людей. Опорой служит не талант авторов, а каждодневное длительное смотрение телевизора. Целью информации является создание образов. Этот тезис нашел отображение в нашем уравнении в виде набора условий для равенства экстремумов количества информации при равновесии. Конечно, образ, обладая свойством целостности, не поддается математизации, но условия уравнения выражают отчасти начальные требования к качеству информации в данном конкретном случае.

Обращение к понятию образа позволило нам понять родство процессов связи и познания. Весьма отраднo, что уравнение связи и его информационно-обращенная интерпретация помогут развить учение о рефлексах Ухтомского и помогут созданию современной теории познания».

Интуитивно это и было осуществлено в методе кодирования К. Шаппо, чем и объясняется его эффективность, который появился намного раньше кода Морзе и тем более популярной в среде программистов кодировки Хаффмана.

Заметим, что «образы» могут быть не только визуальными, но также и акустическими, текстовыми, а Интернет-технологии - интегрированными.

Теория инфокоммуникационной связи - это оптимальный по скорости и энергетике обмен между источником и потребителем ДАННЫХ, как битового потока (Bit Stream) кодированного представления различных форм информационных сообщений.

6. У. Томсон лорд Кельвин vs О. Хевисайд

VS («versus» - противопоставление) используется, чтобы подчеркнуть оппозиционность и противостояние двух подходов – научных теорий.

«...В 1880-х годах Хевисайд подробно исследовал распространение сигнала по проводной линии. В его теории учитывались такие параметры линии, которые не вошли в рассмотрение У. Томсона. Кроме емкости линии на единицу длины и сопротивления на единицу длины (эти величины входили в теорию У.Томсона, получившем титул лорда Кельвина), Хевисайд учел еще индуктивность линии на единицу длины и утечку на единицу длины. Все эти величины называют просто “емкость”, “сопротивление”, “индуктивность”.

Учет Хевисайдом индуктивности и утечки имел принципиальное значение. Для распространения сигнала по кабелю Хевисайд получил волновое уравнение. Волны разных частот имеют, вообще говоря,

разную фазовую скорость, и это приводит к искажению сигнала. Но, как показал Хевисайд, можно так подобрать параметры кабеля, что волны всех частот будут иметь одну и ту же фазовую скорость и одинаковое затухание вдоль кабеля. Поэтому сигнал будет распространяться без искажения формы. Условие, найденное Хевисайдом, состояло в следующем: надо так подобрать параметры кабеля, чтобы произведение емкости на сопротивление было равно произведению утечки на индуктивность.

По теории же Т. Кельвина все процессы в линии определяются произведением емкости на сопротивление.

Далее Хевисайд оценил параметры реально действующих линий и пришел к выводу, что, как правило, для этих линий произведение индуктивности на утечку оказывается намного меньше, чем нужно для связи без искажений. Увеличить это произведение можно было либо за счет увеличения утечки, либо за счет увеличения индуктивности. Но увеличение утечки приводит к сильному затуханию сигнала и поэтому нежелательно. Увеличение же индуктивности даже уменьшает затухание и, кроме того, что самое важное, дает линию без искажений.

Создалось удивительное положение. Большинство ученых, его современников, равнодушно или с сомнением относились к возможности существования электромагнитных волн. Немногочисленные энтузиасты думали о том, как создать электромагнитные волны, планировали или уже проводили эксперименты. Но открытие волн было еще впереди. И тут появляются исследования Хевисайда, из которых следует, что эти самые электромагнитные волны уже существуют в линиях связи, в реально уже действующих линиях связи, и параметры линии определяют условия распространения этих волн. Больше того, можно добиться таких условий, при которых все волны будут идти по линии с одинаковой фазовой скоростью и тогда сигнал будет переноситься без искажений вдоль линии. Высокая теория, от которой не ждали особой пользы, обернулась важными практическими советами.

Но советы Хевисайда были встречены в штыки. Вот что он сам писал об этом впоследствии: “Но в 1877 году я был на некоторое время остановлен намертво, когда я подошел к разработанным практическим приложениям моей теории с новыми предложениями (частично опубликованными ранее) большого практического значения относительно телефонной связи на большие расстояния. Эти предложения были в противоречии с теми взглядами, которые в то время официально отстаивались”» [29].

Под официальными взглядами имеются в виду, в частности, взгляды Уильяма Генри Приса, одного из руководящих работников британского почтового ведомства, а впоследствии главного инженера почтового ведомства. Занимая высокий официальный пост и ведая всеми техническими устройствами связи, он препятствовал

распространению выводов Хевисайда о роли индуктивности в телефонной связи. Прис отрицал какую бы то ни было роль индуктивности в обеспечении телефонной связи, свободной от искажений. Прис опирался на теорию передачи сигнала по кабелю, разработанную Кельвином.

Теория Кельвина была частным случаем более общей теории, разработанной Хевисайдом, и для высоких частот была неприменима.

Кстати, именно Прис привез телефон из Америки, но он же заявлял, что телефон никогда не принесет пользы и не заменит телеграфа.

Практический совет Хевисайда заключался в том, что для создания линии, передающей сигнал без искажений, нужно увеличить ее индуктивность. Сделать это можно, например, подключая к линии катушки индуктивности, расположенные на равных расстояниях друг от друга. По этому пути (хотя и с задержкой из-за непонимания) и пошла телефония. К 1920 году только в Америке индуктивная нагрузка была установлена на дальних телефонных линиях протяженностью 300 тыс. км. С развитием техники телефонной связи нужда в нагрузках на дальних линиях уменьшилась, но даже и при этом в 1949 году число катушек только на линиях компании «Bell System» составляло приблизительно 20 млн... [30].

Заблуждения министра – «вера лорду Кельвину» стоили Великобритании потери коммерческого рынка телефонизации.

Возникший цифровой «разрыв» и отставание России в потребностях современной телекоммуникации – скоростных линиях связи стал результатом подобных некомпетентных правительственных решений. Широкополосной связи нет, а 100%-ный охват Интернетом школ объявлен («Еще рожь не поспеет, а социализм будет построен», - А.Платонов «Чевенгур»).

Следующий пример «торможения» связан с консервацией устаревающих научных парадигм в процессе перехода от аналоговой к цифровой технологии. От математических моделей таких физических процессов, как теория фильтрации (Н. Винер-Смолуховский, Р. Калман и др.), оптимальный корреляционный приемник и автоматическое управление (аналитические регуляторы), к численно вычислимым моделям, плавно перетекавшим под знамя кибернетики, и к математическим моделям, ориентированным на специфику их вычисления на компьютере. И здесь ярко проявилось противостояние двух подходов - «фильтра» Р. Калмана и «алгоритмической теории» А. Н. Колмогорова.

7. А. Н. Колмогоров vs Р. Калман

Р. Калман в 1959 году предложил математическую модель фильтра, которая до сих пор популярна и пользуется спросом у рожденных в СССР, особенно при защите докторских диссертаций, авторы которых неоправданно пытаются применять этот фильтр при обработке сигналов и создании автоматических систем управления, а также в социальных и экономических областях.

Р. Калман в статье «Открытие или изобретение: Ньютонианская революция в технологии систем» [31] почти **через 50 лет** вынужден разъяснять ограничения и проблемы при реализации его фильтра.

Характерно, что для пояснений он также опирается на О. Хевисайда:

«...Никто не сделал больше для алгебраизации физической динамики, т.е. дифференциальных уравнений, чем Оливер Хевисайд (1850–1925), особенно в тех областях физического мира, которые захватили инженеры-электрики. Он был первым, кто убедил инженеров-электриков, что электрические цепи имеют определенные физические признаки, названные импедансом. Они могут быть определены как комплексные числа в обычных алгебраических вычислениях, но в то же самое время измерены как напряжение или ток.

В ведущих центрах прикладных исследований, таких как Массачусетский технологический институт (МТИ), существовало основное направление на электрические цепи и имитационное моделирование, управление, а также на системы связи и теорию сигналов. Ньютон и его дифференциальные уравнения были далеко не в моде. Но Хевисайд не видел, что его идеи можно было видоизменить и представить как преобразование Лапласа и пользоваться ранее неизвестным понятием линейные системы. Вместо этого предлагались резистивно-индуктивно-емкостные цепочки (RLC-цепочки), которые использовались как модели конечных прототипов многопараметрических систем, называемых линейными, если они удовлетворяли принципу суперпозиции. Всегда предполагалось, что это условие выполняется. Размытое понятие суперпозиции заимствовано из терминов, но не математики или физики, а квантовой механики, и, казалось, что никто никогда не задумывался, что линейность – это строгое математическое понятие.

Норберт Винер (1894–1964) сформулировал фильтрацию как математическую проблему. Но носились также слухи, что фильтры Винера бесполезны, безнадежно непрактичны и слишком сложны для применения в автоматических системах управления...» [31].

Справедливости ради, заметим, что математики и инженеры СССР в области связи и автоматического управления в те годы значительно опережали своих западных коллег, что особенно заметно по фундаментальным работам А. Н. Колмогорова.

«...Открытие фильтра Калмана (январь 1959 г.) прошло сложный, длительный математический путь.. Это понятие в общем не относилось к проблеме фильтрации. Винер был математиком высокой интеллектуальной культуры, но не пользовался математикой как живым и растущим направлением науки. Винеровская фильтрация (первоначально названная им как «экстраполяция и интерполяция временных рядов») была сформулирована с безупречной математической точностью, но с некоторыми отступлениями в направлении исчисления переменных и без какого-либо признания на словесном уровне к более глубинному приложению в виде «большой картины». Я же хотел увидеть общую картину. Вскоре я заметил некоторые изъяны в формулировках Винера. Два из них были следующими. Во-первых, он принял как очевидное, что статистические характеристики, такие как корреляционная функция во времени, являются верным способом раскрытия численной неопределенности. Во-вторых, находился под впечатлением, что описание системы в виде передаточной функции есть в точности то же самое, что представление системы в конкретном физическом смысле.

Первое из них, возможно, относилось к требованию статистики больших выборок начала 1920-х, но уже 20 лет спустя оно не заслуживало доверия.

Ошибочно было думать, что данные от множества сложных статистических процедур обязательно предпочтительнее данных от физических измерений, и нельзя считать, что прямая обработка, скажем, усреднение физических данных, достаточна, чтобы избавиться от шума.

Тем не менее целое направление, особенно в МТИ, возникло вокруг теории игр, численных процедур и других исследований, построенных на корреляционных функциях. Таким образом, Винер, сделав свой главный вклад в фильтрацию через корреляционные функции, не вышел за рамки господствовавшей тогда в МТИ тенденции. Что касается фильтра Калмана, то сам изобретатель и его изобретение должны были считать себя удачливыми, что появились как раз в то время, когда после долгого и беспокойного ожидания – прихода вычислений в реальном времени появились КОМПЬЮТЕРЫ.

...В работе был определен источник стохастического сигнала, состоящий из линейной системы и дискретного белого шума, не рассматривая в связи с этим сложную проблему ввода реальных данных, чтобы обосновать такую абстрактную модель. Мой источник сигнала был почти детерминированным, действующим на реальную систему с ее физическими параметрами, заданными априорно, причем стохастичность вводилась только как белый шум.

Действительно, корреляционная функция может оказаться результатом неверной обработки данных, когда наш главный интерес сводится к нахождению математически естественных природных моделей.

Если Вы математизировали Ваши данные, то математика (математик и компьютер) автоматизирует построение Вашей модели, а затем все то, что следует из нее, также получается автоматически...» [31].

Отметим, что Р. Калман не поясняет, что значит **математизировать данные**, и лишь впоследствии через 50 лет приходит к уточнению области применимости изобретенного им фильтра.

«...Случайный процесс представляет собой абстрактную придуманную конструкцию, но не такую, которая может быть воссоздана с помощью измерений. Процедуры для определения параметров случайного процесса являются косвенными. Если случайный процесс существует в аксиоматическом смысле, а есть и такие люди, включая автора, которые могут не согласиться с этим, т.к. все это математика, то с фильтром Калмана ничего не произойдет и он будет нормально функционировать.

Ответственность ложится на тех, кто хочет применить фильтр Калмана любой ценой, даже когда имеются плохие данные или когда отсутствуют необходимые научные знания.

Мы еще не всегда знаем, когда и как это работает? Почему это работает? В качестве примера фильтр, кажется, не работает на фондовой бирже. Поэтому я не получаю ни благодарностей, ни денег...» [31].

Заметим, что слово «мы» относится к автору популярного среди математиков фильтра, опубликовавшего свое изобретение 50 лет назад и наконец-то осознавшего и разъясняющего, что проблема не в математической МОДЕЛИ, а в соответствующих ей исходных ДАННЫХ.

Но до сих пор многими специалистами математического моделирования эта проблема и 50 лет спустя все еще плохо понимается.

Приведенные из [31] фразы призваны подчеркнуть, что компьютерное представление данных требует более внимательного отношения к **адекватности данных математическим моделям**, на основе которых и разрабатываются компьютерные программы, форматы, протоколы и т.д.

Это связано с тем, что алгебраический подход опирается на **априорно заданную систему аксиом**, которая и предопределяет свойства формируемых ДАННЫХ. Восприятие же семантико-смыслового содержания ДАННЫХ – прерогатива внутренней интерпретации, опирающейся на инфологический процесс **адаптивно развивающегося знания**. Отсюда следует, что критерий адекватности внешнего и внутреннего представления данных носит сугубо эмпирический характер. Наподобие персональной настройки цветности, контрастности и прочих характеристик при просмотре телевизионных передач.

Заметим, что понимание приведенных выше проблем «филт-

ра Калмана» при компьютерном моделировании было достаточно подробно рассмотрено в те же 1960-е годы в публикациях А. Н. Колмогорова.

Выборочно воспроизведем основные формулировки предложенной А. Н. Колмогоровым **алгоритмической теории**, ориентированной на специфику развивающихся цифровых элементов вычислительных машин [23].

«...До недавнего времени и в математическом естествознании господствовало моделирование реальных явлений при помощи математических моделей, построенных на математике бесконечного и непрерывного. Например, изучая процесс молекулярной теплопроводности, мы представляем себе непрерывную среду, в которой температура подчинена уравнению

$$\frac{\partial u}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

Математики привыкли рассматривать соответствующую разностную схему

$$\Delta_t u = K(\Delta_{xx} u + \Delta_{yy} u + \Delta_{zz} u) \quad (2)$$

лишь как возникающую при приближенном решении “точного” уравнения (1).

Но реальный процесс теплопроводности не более похож на свою непрерывную модель, выраженную уравнением (1), чем на дискретную модель, выраженную непосредственно уравнением (2).

Весьма вероятно, что с развитием современной вычислительной техники будет понято, что в очень многих случаях изучение реальных явлений разумно вести, избегая промежуточного этапа их стилизации в духе представлений математики бесконечного и непрерывного, переходя прямо к дискретным моделям. Особенно это относится к изучению сложно организованных систем, способных перерабатывать информацию, и человеку приходится погрузиться в неизбежную при этом комбинаторную математику...».

Понятие «комбинаторная математика» сводится к понятию «программы» и критерию оценки ее эффективности посредством битовой минимизации ее длины.

«...Стандартным способом задания информации считаем двоичные последовательности, начинающиеся с единицы,

$$1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, \dots,$$

являющиеся двоичными записями натуральных чисел. Будем обозначать через $l(n)$ длину (программы представления – прим. авт.) последовательности n ...

Достаточно ограничиться способами задания, которые каждому

двоично записанному числу p ставят в соответствие некоторый номер

$$n = S(p).$$

Таким образом, способ задания объекта из D становится ничем иным как функцией S от натурального аргумента с натуральными значениями. Немного далее мы обратимся к случаю, когда эта функция вычислима. Такие методы задания можно назвать “эффективными”. Но пока сохраним полную общность. Для каждого объекта из D естественно рассмотреть приводящие к нему p наименьшей длины $l(p)$. Эта наименьшая длина и будет “сложностью” объекта x при “способе задания S ”:

$$K_S(x) = \min l(p), \quad S(p) = n(x).$$

На языке вычислительной математики можно назвать p «программой», а S – «методом программирования». Тогда можно будет сказать, что p есть минимальная длина программы, по которой можно получить объект x при методе программирования S ».

Некорректный переход от понятия **информации** к двоичным последовательностям, которые суть ДАННЫЕ в современной компьютерной терминологии, был воспринят научным сообществом как критерий оценки «сложности» информации, а не **программы представления данных!**

Понятие информации интуитивно воспринимается как окончательный шаг в обработке данных (любого типа: сигнал, текст, формулы, изображения и т.д.) для принятия решения, когда семантика, содержащаяся в данных, уже извлечена.

Иными словами, корректно говорить о семантическом анализе как о специфическом процессе выявления информации из данных. Поэтому сочетания типа семантическая информация – это информация из информации или «масло масляное».

Из приведенных формулировок следует, что под программированием А. Н. Колмогоров имел в виду **программируемую технологию**, что в 21-м веке интерпретируется как форматы, стандарты, протоколы (например, MP3, JPEG, MPEG и др.), а отнюдь не **технологию программирования** (Java, C, Visual C++ и т.д.).

Алгоритмическая теория А. Н. Колмогорова: «...Способ, позволяющий по виду записи находить ее номер, а также по номеру восстанавливать саму запись, является обычно весьма простым (так что существование алгоритма, «перерабатывающего» запись в номер, и алгоритма, «перерабатывающего» номер в запись, не вызывает сомнений)» [24].

Сегодня это естественный постулат, который является основой любой интерфейсной программы. «Вид записи»: текст, музыка, изображения, программа и др. (поток данных) - перерабатывается и сохраняется как «номер» – уникальный идентификатор, трансформируемый в сим-

волы инструментальной панели экрана компьютера.

Приведенные выше примеры иллюстрируют, как корпоративно «демократическое» большинство консервирует устаревающие научные знания. В результате сначала США в XIX–XX веках отвоевали у Англии коммерческий рынок телефонизации, а затем через 50 лет захватили коммерческий рынок информационных технологий (весь мир – «рабы», несущие дары Б. Гейтсу за **организацию** монополии на Windows). И это без каких-либо авторских прав на идейную и теоретическую основу **программируемой технологии**.

А наиболее продвинутое образование и наука 60-х годов 20-го столетия в СССР привели к **«цифровому разрыву»** – отставанию России в научном и концептуальном понимании роли современных возможностей информационных технологий и развития интеллектуального сервиса (информационной поддержки экспертиз). Без этого словосочетание «экономика знаний» – пустой звук.

Именно недопонимание принципиальных возможностей «хай-тек», различий в физических принципах транспортировки потока **ДАННЫХ**, а не **ИНФОРМАЦИИ**, инвариантной по отношению к формам (текст, голос, музыка, видео, спутниковый мониторинг и глобальное позиционирование (GPS)), делает абсолютно бессмысленными попытки правовой регламентации цифровой программируемой технологии. Вопрос лишь в том, как долго можно балансировать между феодальной, индустриальной и информационной организацией общества **без осмысления основ «цифровой» цивилизации**.

Ориентированный на адекватное восприятие семантико-смыслового содержания **аудиовизуальный информационный поток терминологически разрывается физиками, математиками и достигнутыми технологическими возможностями на самостоятельно развивающиеся научные направления, которые и внутри-то себя содержат противоречивые тенденции: в физике волна - частица; в математике между всюду дифференцируемыми аналитическими функциями Фурье и нигде не дифференцируемыми функциями Вейерштрасса; в технологии связи колебательный контур из сопротивлений, индуктивностей и емкостей (RLC-цепочки) сменяется в мире Тьюринга программируемой технологией по определению А. Н. Колмогорова.**

Следующий пример ставший классическим, ярко иллюстрирует различия в теоретических основах и свойствах аналоговой и импульсной (**цифровой**) связи:

«...Инженеров корпорации IBM ставила в тупик проблема шума в телефонных линиях, используемых для импульсной передачи данных от одной вычислительной машины к другой. Инженеров учили и все еще учат, что влияние помех будет тем меньше, чем выше мощность сигнала, однако некий самопроизвольный шум никак не удавалось свести на нет. Временами он возникал, угрожая стереть часть сигнала и тем

самым внести ошибку в передаваемые данные.

Несмотря на то что помехи при трансляции сигнала имели случайную природу, шумы генерировались в виде кластеров. Промежутки «чистой» передачи сменялись периодами помех. Б. Мандельброт (B. Mandelbrot) [32] выяснил, что устранить помехи стандартными методами они не смогли, – чем ближе располагались пучки шума, тем более сложными виделись скопления погрешностей. Феномен был в высшей степени странным! В силу определенных причин **подсчитать средний (вероятностный) уровень шумов – их среднее количество в час, минуту или секунду – представлялось невозможным.**

При разбиении часового промежутка с помехами на более мелкие временные интервалы, например двадцатиминутные, оказывается, что некоторые из них абсолютно чистые, в то время как в других внезапно обнаруживаются шумы. Практически – это совершенно противоречило интуиции! – не найти временного промежутка, в течение которого распределение погрешностей станет непрерывным. Внутри каждого пучка шумов, независимо от его продолжительности во времени, всегда будут наблюдаться моменты абсолютно чистой передачи!

Инженеры не обладали достаточными знаниями и не понимали, что имеют дело с абстрактной конструкцией, названной последовательностью Кантора – по имени великого математика XIX века.

Увеличивать МОЩНОСТЬ сигнала в целях устранения ШУМОВ бесполезно. Разумнее остановить выбор на сравнительно слаботочной связи, смириться с неизбежностью погрешностей и использовать стратегию дублирования сигналов для исправления ошибки...» [33].

Этот, казалось бы, тривиальный факт вызывает необходимость скорректировать концептуальные и теоретические основы обработки ДАННЫХ в соответствии с цифровой технологией. И что наиболее принципиально и важно, снимается ограничение на полосу пропускания по Найквисту–Шеннону–Котельникову, за счет возможности ее виртуализации.

Существует достаточно много публикаций на тему цифровой обработки изображений и сигналов. Для нас же «цифровая технология» – это прежде всего физико-технологический процесс воспроизводства «1» и «0», обеспечивающий оптимально стабильные и устойчивые соотношения между преобразованием масса-энергетических характеристик вещества (кремний и др.) в «биты» информационного содержания.

Так что «биты» как количественная характеристика представления ДАННЫХ, могут быть измерены и как эквивалент массы и энергии.

Атомно-молекулярный уровень воспроизводства, хранения и передачи последовательности «1» и «0» порожден нанотехнологией и порождает новые возможности нанотехнологии.

Создан гибридный чип памяти на основе нанонитей:¹

«Как сообщает *PhysOrg*, энергонезависимая память на основе кремниевых нанонитей подобна обычной *flash*-памяти, распространенной в настоящее время в большинстве цифровых видеокамер, фотоаппаратов и мобильных телефонах. Ученые разработали новый метод производства подобных наноструктур, благодаря которому они добились параллельного расположения нанонитей на многослойной подложке полупроводник-оксид-нитрид-оксид-полупроводник (*SONOS*).

Благодаря нововведениям в производстве исследователи уверены, что конечная стоимость чипов будет невысокой, так как для производства современной *flash*-памяти требуется большее количество производственных операций.

Кремниевые нанонити изначально выращивались учеными на подложке оксид-нитрид-оксид. Принцип хранения памяти в устройстве сравнительно прост: при подаче положительного потенциала на нанонить электроны туннелируются в подложку, заряжая ее. Отрицательный потенциал, наоборот, способствует возвращению электронов назад в нанонить. Таким образом реализованы два логических состояния: «1» и «0».

Как позже показали тесты, устройство находится в состояниях «1» и «0» устойчиво, без промежуточных состояний».

Развиваемый подход опирается на следующие публикации:

1. Колмогоров А. Н., Успенский В.А. К определению алгоритма // Успехи математических наук. — 1958. — Т.13, вып.4. — С. 3-28.
2. Mandelbrot B.B. The Fractal geometry of nature. — San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1982. — 258 p.
3. Simon J.C. Patterns and operators. The Foundations of Data Representation. — R. R. Donnelley and Sons Company, 1986.
4. Александров В.В., Арсентьева А.В. Информация и развивающиеся структуры. — Л.: ЛИИАН, 1984. — 182 с.
5. Hofstadter D. R. Godel, Escher, Bach: an Eternal golden braid. — NY: Basic Books, 1979. — 779 p.
6. Александров В.В., Горский Н.Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. — Л.: Наука, 1985. — 190 с.
7. Falconer K.J. Fractal geometry: Mathematical foundations and applications. - John Wiley & Sons, 2003.
8. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2001. — 528 с.

¹ <http://www.rsci.ru/smi/?id=6654>

9. *Кроновер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. — М.: Постмаркет, 2000. — 352 с.
10. *Alexandrov V.V., Gorsky N.D.* From humans to computers: Cognition through visual perception. Singapore: World Scientific, 1991.
11. *Александров В.В.* Развивающиеся процессы и системы. Степенные законы. // Журн. «Информационные системы и технологии». 2007. №1(1). С. 58-83.
12. *Александров В.В.* Глаз и визуальное восприятие // Оптический журн. 1999. № 8.

Я с дрожью ужаса отворачиваюсь от Ваших – Вейерштрасс несчастных проклятых функций, у которых нет производных.

Шарль Эрмит

Я вижу, но я не верю! что существует взаимно однозначное соответствие точек числового интервала $(0,1)$ и точек p -мерного пространства.

Кантор

Точка – пиксел, теряя массу, излучая фотон, – обретает информацию.

«Mens agitat molem» – «Ум движет массу», а информация – ум.

Эмпирический факт нанотехнологии.

Глава 1. Основы цифровой технологии

1.1. Число и цифра vs точка и пиксел

Числа и цифры есть составная часть языка общения, исходная специфическая функция которых идентификация, перечисление, сопоставление, сравнение, то есть установление меры «чего-либо». Форма цифр (символы, знаки) и конструктивные свойства чисел постоянно совершенствовались и видоизменялись согласно функциональным предназначениям, поддерживая тем самым развитие цивилизации.

И в то же время излишняя математическая формализация понятия числа затормаживает восприятие физической сущности инновационных технологий цифровой цивилизации.

В 1920-е годы в Венском философском кружке, заседания которого посещал Курт Гедель, много спорили об основах математики. Существуют ли в действительности такие математические истины, как «дважды два – четыре», «пять плюс пять – десять», или это лишь абстрактные формулы, принятые людьми для удобства вычислений? Существуют ли и впрямь все эти математические объекты – треугольники, квадраты, окружности? Можно ли «открывать», то есть находить математические истины, как открывали неизвестные континенты или планеты? Или же они логически проистекают из каких-либо произволь-

но введенных и недоказуемых гипотез, получивших название «аксиом»?

Великий немецкий математик и один из самых популярных в 1920-е годы ученых, Давид Гильберт, полагал, что «здание математики» – это искусственная конструкция. Математика как шахматы. В ней изначально введены определенные аксиомы («правила»), ставшие фундаментом этой сложной, многообразной науки. Если предельно полно составить список аксиом, то исходя из них можно вывести все математические теории, положения и тому подобное, как с помощью «аксиом» фонетики – звуков можно составить все слова и фразы в том или ином языке.

Эта имманентная логика делает науку математику как самодостаточной, так и априорно ограниченной. Не важно, имеет ли она какое-либо отношение к природе или нет.

Главное, что, основываясь на исходных аксиомах, можно построить особый, логически непротиворечивый мир высказываний и суждений. Формальная изощренность, а вовсе не способность отражать сущее, – вот главное свойство математики Д. Гильберта и его многочисленных последователей, которых называли «формалистами».

Крылатая фраза И. Канта: *«... во всякой науке столько науки, сколько математики...»* – воспринимается настолько буквально, что многие даже не задумываются, а какая из математик пригодна и адекватна для решения той или иной реальной проблемы.

К. Гедель был убежден в реальном – физическом существовании математических объектов, например точки как пиксела, и в 1931 году убедительно доказал, что Гильберт заблуждается. Не существует и не может существовать безупречно строгой системы логических предпосылок, на которых, как на строительном фундаменте, могло бы покоиться все здание математики.

Математика, скорее, совокупность стоящих «зданий» – «архитектура города».

Так, например, функциональный анализ – основа математического моделирования – в большей степени вынужден исследовать собственные математические вопросы корректности и адекватности полноты, достаточности и непротиворечивости аксиом, не затрагивая вопросов о физической реализуемости (симуляции – simulation).

К. Гедель же был убежден в том, что мир чисел – это мир реально существующих объектов, которые скрепляют все вокруг нас. Числа и математические истины, словно легендарный эфир, пронизывают все мироздание. Мы можем находить, нащупывать эти истины, подобно тому как под очертаниями плоти мы можем нащупать кость. Мы можем постигать их интуитивно, повинувшись фантазии и вдохновению.

Заметим, что в англоязычной терминологии при компьютерном моделировании все чаще стала использоваться иная терминология: симуляция, симуляторы, имитация, тренажеры и д.р. Проблема синтеза речи – это sound simulator (симулятор звуков).

Другой пример - компьютерная шахматная программа, обыгрывающая гроссмейстеров, не имеет ничего общего с гильбертовским математическим моделированием.

Проблема создания современных компьютерных эффективных систем логистики, биометрической идентификации, построения индексов (ИНН, ISBN, ББК, УДК и пр.) состоит в том, что они опираются не на аксиоматические свойства числа (аддитивность, коммуникативность и др.), а на его уникальное свойство в организации процесса систематизации, упорядочения и идентификации.

1.2. Путь к простоте

Введение египтянами цифровых обозначений ознаменовало один из важных этапов в развитии систем счисления, так как дало возможность существенно сократить записи числовых соотношений. Однако их операции с дробями продолжали оставаться на примитивном уровне, так как они знали лишь аликвотные дроби (т.е. дроби с числителем 1) и каждую дробь записывали в виде суммы аликвотных дробей, например дробь $\frac{2}{43}$ они записали бы так: $\frac{1}{42} + \frac{1}{86} + \frac{1}{129} + \frac{1}{301}$. В этих системах счисления над символом, обозначающим знаменатель, ставился специальный знак. В искусстве оперирования дробями египтяне значительно уступали жителям Месопотамии.

Это не сказалось на строительстве пирамид, но не замедлило кризисные проблемы развития цивилизации.

Письменность шумеров является, по-видимому, столь же древней, как и письменность египтян. Развитие способов представления чисел в Месопотамской долине вначале шло так же, как и в долине Нила, но затем жители Междуречья ввели совершенно новый принцип. Система счисления в Месопотамии и, что характерно, в других географически удаленных местах стала шестидесятеричной. Интуитивный выбор определился из простоты метрологических измерений:— число 60 имеет много делителей.

В Древнем Вавилоне, около 1650 г. до н. э., система счисления оставалась псевдопозиционной, поскольку не существовало эквивалента современной десятичной запятой, равно как и символа для обозначения отсутствующей позиции.

Поскольку греки работали с обыкновенными дробями лишь эпизодически, они использовали различные обозначения. Герон и Диофант, самые известные арифметики среди древнегреческих математиков, записывали дроби в алфавитной форме, причем числитель располагали под знаменателем. Но в принципе предпочтение отдавалось либо дробям с единичным числителем, либо шестидесятеричным дробям. Недостатки греческих обозначений дробных чисел, включая использование

шестидесятеричных дробей в десятичной системе счисления, определяются отнюдь не пороками основополагающих принципов, а стремлением к **строгости, которое заметно увеличило трудности в обучении и практике анализа отношений несоизмеримых величин.**

Слово «число» определялось как набор единиц, а дробь – как отношение двух целых чисел. Именно этим объясняется, почему обыкновенные дроби редко встречались в греческой арифметике. Кроме того, десятичные представления обыкновенных дробей в большинстве случаев бесконечны. А поскольку бесконечность была исключена из строгих рассуждений, то и арифметика не нуждалась в представлениях такого рода. С другой стороны, областью, в которой **практические вычисления испытывали величайшую потребность в точных дробях, была астрономия, а здесь вавилонская традиция была настолько сильна, что шестидесятеричная система обозначений угловых, дуговых и временных величин сохраняется и поныне.**

Римляне использовали принцип вычитания, поэтому иногда вместо VIII использовали IX и XC вместо LXXX; сравнительно позднее символ IV вместо III.

В целом римляне не были склонны заниматься математикой, поэтому не испытывали особой потребности в больших числах. Дробей римляне избегали так же упорно, как и больших чисел. В практических задачах, связанных с измерениями, они не использовали дроби, подразделяя единицу измерения обычно на 12 частей, с тем чтобы результат измерения представить в виде составного числа, суммы кратных различных единиц, как это делается сегодня, когда длину выражают в ярдах, футах и дюймах. Английские слова «ounce» (унция) и «inch» (дюйм) происходят от латинского слова uncia (унция), обозначавшего одну двенадцатую основной единицы длины.

Семитские народы могут претендовать на роль создателей **алфавитного принципа обозначения чисел** в том виде, как он использовался в ионической системе. Действительно, с небольшими модификациями этот принцип применялся евреями, сирийцами, арамейцами и арабами. И все же существует мало сомнений в том, что алфавитные обозначения чисел были заимствованы ими у древних греков, которые изобрели эти обозначения еще в VIII в. до н. э. У евреев использование алфавитных обозначений чисел окончательно вошло в обиход ко II веку до н. э. **Девять букв алфавита** использовались для обозначения первых девяти целых чисел; еще девять букв означали первые девять кратных числа 10; остальные буквы использовались для обозначения сотен. Так как букв в алфавите для обозначения всех кратных числа 100 не хватало, в Талмуде числа, превосходящие 400, записывались путем комбинации: например, число 500 обозначалось символами, соответствующими числам 400 и 100, а 900 записывалось как 400 и 400 и 100 [34].

Такие сложности развивали интеллектуальные способности.

Самым важным элементом в системе счисления майя было исполь-

зование **позиционного принципа и символа нуля**. Если отвлечься от того, что принятая у индейцев майя система счисления была не шестидесятеричной, а двадцатеричной и вместо 10 использовала вспомогательное основание 5, то в остальном принципы были аналогичны тем, которые ранее были в ходу у жителей Древнего Вавилона.

Надписи, найденные в Нана-Гат и Насике, относящиеся к первым векам до нашей эры, по-видимому, содержат обозначения чисел, которые получили теперь название индо-арабской системы. Первоначально в этой системе не было ни позиционного принципа, ни символа нуля. Оба эти элемента вошли в индийскую систему к VIII-IX вв. Позиционная система счисления с нулем возникла не в Индии, она использовалась в Древнем Вавилоне в связи с шестидесятеричной системой. Поскольку индийские астрономы использовали шестидесятеричные дроби, вполне возможно, что это навело их на мысль перенести позиционный принцип с шестидесятеричных дробей на целые числа, записанные в десятичной системе.

В Индии в V в. н. э. было открыто и формализовано понятие нуля, которое позволило перейти к позиционной записи чисел. В итоге произошел сдвиг, приведший к современной системе счисления.

Название же «арабские цифры» происходит от индийских символов для записи чисел.

1.3. Аль-Хорезми vs А. Н. Колмогоров

Арабские цифры были искаженными изображениями индийских цифр, приспособленными к арабскому письму.

Впервые индийскую систему записи использовал арабский ученый Мухаммед Ибн Муса Аль-Хорезми, автор знаменитой «Китаб Аль-джабар валь-Мукабала», от названия которой произошел термин «алгебра». Решающую роль в распространении индийской нумерации в арабских странах сыграло руководство, составленное в начале IX века Мухаммедом из Хорезма (ныне Хорезмская область Узбекистана).

В XII в. Хуан из Севильи перевел на латынь трактат «De numero indorum» («Об индийских числах») арабского математика Аль-Хорезми. В следующем же веке индийские обозначения стали широкоизвестными, и система получила название «алгоритм» – от искаженного Аль-Хорезми. Через пару столетий европейские **алгоритмики** одержали верх и над абакистами, и над теми, кто пользовался римскими цифрами в вычислениях с целыми числами, но лишь с 1585 г. индо-арабская система обозначений, систематически расширяясь, стала использоваться и применительно к дробям [35].

Итак, **Аль-Хорезми** подвел итог разнообразию, предложив систему правил формирования чисел и работу с ними – **арифметику вычис-**

лений, которую и назвали в его честь **алгоритмом**. Европейцы, заимствовавшие **индийскую нумерацию от арабов**, называли ее «арабской». Это неправильное название удерживается и поныне.

При Петре I индийские цифры уже вытесняются на монетах славянские, а позднее славянские цифры вообще быстро исчезают из обихода.

Сохраняющееся разнообразие систем счисления свидетельствует о потребности в поиске при технологическом прогрессе более эффективных алгоритмов для реализации иных функциональных предназначений, связанных с появлением «цифровой» цивилизации: штрихкодирование (ИНН, биометрическая паспортизация, документооборот и др.), логистика, CALS-технология, инфология.

Исходное понятие компьютера было связано с потребностью создания инструмента вычисления (computer – «вычислитель») для математического моделирования. Отсюда и первоначальная специфика развития операционных систем, языков программирования и структур данных. Однако возможности компьютеров все в большей степени переключаются на проблемы информатики: упорядочение (le'ordinateur – фр., согласно словарю Lingvo, в том числе и компьютер), идентификация, каталогизация и систематизация информационных сообщений, - то есть на решение задач **вербализации – инфологии [17], а не функции численного моделирования**.

Принципиальное функциональное различие этих задач требует и разнообразия технических воплощений, которые опираются на различия в концептуальных схемах алгоритмов компьютерного моделирования, т. е. **вычислений, или вербализации, онтологических понятий – инфологии** (более подробно это рассмотрено в [20]).

Согласно алгоритму Аль-Хорезми, приспособленному для обучения и работы с числами интеллекта человека, его реализация в компьютере – это «**числодробилка**». Компьютер – лишь инструмент скоростных вычислений в соответствии с выбранной математической моделью со всеми присущими ей априорными ограничениями.

Определение же алгоритма по А. Н. Колмогорову: программируемая технология – это **симуляция, процессорная обработка** информационных объектов, представленных последовательностью «1» и «0», их идентификация и переупорядочение в мире А. Тьюринга, которая расширяет понятие компьютерного моделирования, включая процесс мониторинга, имитации и построения симуляторов.

Интересна следующая историческая справка. Впервые двоичная система, содержащая алфавит из двух цифр «1» и «0», была разработана математиком Лукой Пачиоли (1445-1514). Двоичной системой счисления пользовался в начале XVII в. Т. Харриот. И в то же время Г. Лейбниц обратил на двоичную систему внимание миссионеров, отправлявшихся для проповеди христианства в Китай в надежде убедить китайского императора в том, что Бог (единица) сотворил все из ничего (нуля). Однако вплоть до XX в. двоичную **систему** рассматривали как

своего рода математический курьез, и время от времени раздавались предложения перейти от десятичной системы к восьмеричной или двенадцатеричной, но отнюдь не к двоичной системе.

Но именно в двоичной системе арифметические операции особенно просты. Для двоичной системы не существует «таблицы сложения». «Перенос в старший разряд» – это сдвиг: $1 + 1 = 10$. В двоичной «таблице умножения» единственный результат, отличный от нуля, соответствует единице. Умножение «столбиком» выполняется без труда, так как необходимость в «переносе в старший разряд» отпадает, за исключением сложения частичных произведений при получении окончательного ответа. Однако за эту легкость приходится «платить» большим числом знаков при умножении даже небольших чисел.

Деление «углом» в двоичной системе выполняется быстро, при этом нет необходимости в пробных делителях. По существу, деление становится своего рода непрерывным вычитанием, которое отличается необычайной «прозрачностью».

Так что современные суперкомпьютеры стали возможны благодаря тому, что четыре тысячи лет назад в Месопотамии было совершено важнейшее открытие в области построения чисел.

И в двоичной, и в десятичной системах суть состоит в позиционном – то есть иерархическом принципе записи чисел. Частный случай самоподобной, фрактальной и структурной иерархии, реализующий процесс этерификации, – **закон прогрессирующего упрощения**. Потребное количество символов, необходимых для перечисления и идентификации объектов и их информационного содержания, определяется **логарифмом** от идентифицируемого количества информационных объектов.

А современный **технологический «хай-тек»**, символом которого стало освоение **нанодиапазона** (нм), превратил недостатки двоичной системы в ее достоинства и привел прогресс цивилизации к следующему шагу **цифровой технологии** – глобальному инфокоммуникационному обслуживанию экономических, социальных и культурологических потребностей.

Цивилизация постоянно приспосабливает алфавит цифр и их начертание в соответствии с изменяющимися потребностями и достигнутыми технологией, уровнем образования и социально-экономическими возможностями. Отсюда, с одной стороны, желание сохранить своеобразие национальной культуры, с другой – потребность глобализации и унификации. В итоге потребовался Билл Гейтс, сотворивший империю Microsoft – инфраструктуру **цифровой цивилизации из алфавита двух цифр: «1» и «0»**.

С точки зрения же авторских прав теоретические основы построения подобных программных продуктов были впервые сформулированы русским ученым-академиком А. Н. Колмогоровым [24].

1.4. Алгоритмическая теория информатики – программируемая технология А. Н. Колмогорова (ПТК)

Появление цифровых универсальных вычислительных машин (в 1950-60-е годы еще существовала конкуренция со стороны аналоговых вычислительных машин) заставило математиков искать более строгое определение понятию алгоритма с позиций функционирования цифровых электронных вычислительных машин. Стало очевидным, что укоренившееся понятие алгоритма как «арифметики» Аль-Хорезми не имеет ничего общего с понятием алгоритма – «вычислимой функции», реализуемой машиной А. Тьюринга.

К сожалению, даже в библиографическом списке приоритетных математических работ А. Н. Колмогорова не приводятся работы, составляющие основу предложенной им алгоритмической теории.

В [23] А. Н. Колмогоровым было сформулировано **определение программируемой технологии (ПТК)** посредством введения понятия сложности как критерия оценки эффективности программы через ее длину. В библиографии же этот вспомогательный термин отмечается как *«теория сложности конструктивных объектов»*, вместо мирового приоритета в создании алгоритмической теории информатики как основы программируемой технологии.

ПТК, все еще лишь на эмпирическом уровне, воспроизводится при разработке различных программных продуктов: операционных систем Windows, Linux, архиваторов RAR и ZIP, инструментальных средств Photoshop, Flash, JPEG-кодеров, MP3-плееров и т.д.

Это наглядный пример, когда научная интеллектуальная **собственность** никак не защищена и присваивается на этапе технологического воплощения.

В дальнейшем мы будем придерживаться понятий алгоритма и программируемой технологии, в соответствии с алгоритмической теорией, предложенной А. Н. Колмогоровым, как наиболее приближенной и адаптированной к организации вычислительных процессов, реализуемых на основе цифровых технологий.

Позволим себе лишь ту интерпретацию, которая необходима для коррекции в соответствии с современными понятиями, терминами и языком информационных технологий в части проблем цифровой связи, обработки и передачи данных.

Именно связь понятий **«процесс»** и **«вычислимая функция»**, проистекающие из конструктивной организации вычислительного процесса, сформулированного А. Тьюрингом в 1936 году и получившего название «машина Тьюринга», составляет основу алгоритмической теории [23];

«...способ, позволяющий по виду записи находить ее номер, а также по номеру восстанавливать саму запись, является обычно весь»

ма простым (так что существование алгоритма, «перерабатывающего» запись в номер, и алгоритма, «перерабатывающего» номер в запись, не вызывает сомнений) ...».

Следующее важное для программируемой технологии и нетривиальное для 60-х годов рассуждение А. Н. Колмогорова связано с формой представления данных: «...**стандартным способом задания информации считаем двоичные последовательности, начинающиеся с единицы,**

$$1, 10, 11, 100, 101, 110, 111, 1000, 1001, \dots,$$

являющиеся **двоичными записями натуральных чисел**. Будем обозначать через $l(n)$ длину последовательности n .

Пусть мы имеем дело с какой-либо областью объектов D , в которой уже имеется некоторая стандартная нумерация объектов номерами $n(x)$. Однако указание номера $n(x)$ далеко не всегда будет наиболее экономным способом выделения объекта x . Например, двоичная запись числа

$$9^{9^{9^9}}$$

необозримо длинна, но мы его определили **достаточно просто**».

Надо подвергнуть сравнительному изучению различные способы задания объектов из D . Достаточно ограничиться способами задания, которые каждому **двоично записанному числу p ставят в соответствие некоторый номер – уникальный идентификатор информационного содержания**

$$n = S(p), \quad (1.1)$$

Таким образом, способ задания объекта из D становится ничем иным, как функцией S от натурального аргумента с натуральными значениями. Немного далее мы обратимся к случаю, когда эта функция вычислима. Такие методы задания можно назвать «эффективными». Но пока сохраним полную общность. Для каждого объекта из D естественно рассмотреть приводящие к нему p наименьшей длины $l(p)$. Эта наименьшая длина и будет «сложностью» объекта x при «способе задания S »:

$$K_s(x) = \min l(p), \quad S(p) = n(x). \quad (1.2)$$

На языке вычислительной математики можно назвать p «программой», а S – «методом программирования». Тогда можно будет сказать, что p есть минимальная длина программы, по которой можно получить объект x при методе программирования S .

Следует особо подчеркнуть, что А. Н. Колмогоров подменил понятие «алгоритм» на понятие «программа», и следует лишь сожалеть,

что этот фундаментальный результат не был замечен.

По сути, это и есть **концепция цифровой технологии** – представление инвариантной двоичной (битовой) последовательности ДАННЫХ, несущих любой вид информационного содержания и ПРОЦЕССОРНУЮ технологию – **программную инструкцию воспроизводства** этих данных.

А. Н. Колмогоров как математик сформулировал эту проблему в следующей форме [23]: среди вычислимых функций $S(p)$ существуют оптимальные, т.е. такие, что для любой другой вычислимой функции

$$K_s(x) \leq K_{s'}(x) + l(S, S'). \quad (1.3)$$

По сути, $K_s(x)$ – критерий оценки оптимальности компьютерных программ, определяющий их эффективность либо с точки зрения требуемого для передачи данных объема битового потока, либо скорости процедуры развертывания терминальной программы, формата или нарротивного кода [36] в данные.

А. Н. Колмогоров впервые обратил внимание на специфику компьютерной математики, сформулировав строгое, с точки зрения программируемой технологии (не путать с технологией программирования), понятие алгоритмической теории информатики, а не информации. А. Н. Колмогоров подчеркивал, что его информация в его понимании это **объектная идентификация**, а не ансамблевая (Шенноновская), что по смыслу ближе к современному понятию информатики.

Заметим, что подавляющее число появившихся, казалось бы, альтернативных теорий и подходов [37] являются попытками скорректировать принципиальные ограничения функционального анализа **мира Д. Гильберта** при их компьютерном моделировании в **мире А. Тьюринга**. И такой подход все еще сохраняется при разработке различных форматов, протоколов и программ при работе с аудиовидеопотоком данных. Отметим, что по А. Н. Колмогорову, количество информации – это длина «программы», симулятора воспроизводящего посредством двоичной последовательности ДАННЫХ то или иное информационное содержание.

Программируемая технология (ПТК) открыла путь разработки различного рода программ: архиваторов, компрессаторов, кодеков - для скоростной свертки и развертки битовой последовательности информационного содержания. При этом жесткие ограничения по полосе пропускания, спектральным и энергетическим характеристикам подменяются при ПТК и цифровой связи на постоянно увеличивающиеся объемно-скоростные характеристики ((кило-, мега-, гига-, тера-) бит/с) обработки и передачи данных.

Особо подчеркнем, что введенные А. Н. Колмогоровым понятия: естественные методы программирования, сложность $K_s(x)$ и эффективность – никак не связаны с языками программирования.

Функциональная же подготовка программистов до сих пор нацелена лишь на перевод с формализма языка постановки задачи в ограниченный базис машинных команд, реализующих заданную аксиоматику (арифметику) обработки данных на принципах математического моделирования – функционального анализа.

Исторически же первым инструментом информационной коммуникации людей служили проявления искусства: естественный язык, живопись, музыка. Значительно позднее математики ввели число и алгебраические структуры. Аристотель в своих работах ввел логику. Но с появлением логики появилась и проблема – непротиворечивость высказывания, а с ней и неоднозначность процесса идентификации объекта.

Позднее среди математиков возникает идея информационного обмена. Появляется «вторая математика» – обмен объектами, которая восходит к теории множеств Г. Кантора и принципу идентификации неразличимости Г. Лейбница.

Конструктивно для работы компьютерной математики А. Н. Колмогоров связал эти процессы (обмен объектами и идентификацию) в понятие алгоритмической теории.

Интерпретация формулировки алгоритмической теории приводит к понятию алгоритма, который включает входные данные и процесс (инструкцию) получения результата. Это сводится к проблеме идентификации, т.е. операции трансляции идентификатора результата по идентификатору входных данных. В явном виде это проявилось при реализации программируемой логики FPGA [38].

В дальнейшем, с развитием цифровых телекоммуникационных технологий, приходится иметь дело только с информационными объектами.

Компоненты цифровых систем связи, используя логику Аристотеля в качестве формализма, унаследовали проблему идентификации, которая для человеческого мозга не так актуальна. Кроме того, в цифровых процессорах понятие замкнутости, приносимое алгебраическими структурами, не вносит ничего, кроме противоречий. Так, например, деление целого (integer) числа на целое дает число с плавающей точкой (float), то есть процессорные операции не являются замкнутыми. Некоторые математические аксиомы оказываются невыполнимыми в цифровых процессорах и, следовательно, в компьютерах и контроллерах, построенных на их основе.

Цифровая реализация большинства подобных методов проходит через серию бесполезных операций по преобразованию задачи в термины математического описания и программной реализации этого описания.

В свою очередь, компьютер всего лишь эмулирует работу с «математическими» числами, а не выполняет ее аппаратно. Это означает, что **физические процессы, происходящие на аппаратном уровне компьютера, и даже их логическое описание, не соответствуют ма-**

тематической работе с числами. Процессор оперирует с битами и наборами битов. Эти наборы битов являются идентификаторами (символами, указателями) или собственно числами. Это означает, что, например, указатель необязательно должен интерпретироваться как число, ему достаточно иметь свойство уникальности, обеспечивающее идентификацию.

Общеизвестно, что некоторые математические аксиомы оказываются не выполняющимися в компьютере, например, результаты вычисления $z \cdot (x/y)$ и $(z/y) \cdot x$ для компьютера, в общем случае, не эквивалентны. В рамках компьютера нет больше различий между счетными и несчетными множествами, то есть вещественное представление чисел дискретно; некорректны теоремы о пределах, интегральное и дифференциальное исчисление. Все это – следствия искусственного переноса арифметики как «математического базиса» на процессоры, работающие на «логическом базисе» [39].

В [40] рассматривалась возможность замены «арифметических» вычислений математической модели ее непосредственной трансляцией в команды процессора. Иначе говоря, не математическую модель вкладывать в «прокрустово ложе» компьютера, а наоборот, формализовать ее компьютерное представление (память, процессор) и его аксиоматический базис (команды управления).

Приведем пример (рис. 1.1), который иллюстрирует информационную неоднозначность интерпретации понятия «сложность».

Рис. 1.1,*а* представляет собой традиционную математическую модель аналогового Фурье-анализа. В этом случае «сложность» – это требуемый объем вычислений и как следствие – поиск быстрых алгоритмов вычисления.

Рис 1.1,*б* характеризует непосредственную симуляцию – воспроизводство сигнала цифровыми логическими элементами. Здесь отражен принцип построения того же сигнала методом последовательной итерации (рекурсии) начального эталона – шаблона. Мы видим, что количество информации в данном случае определяется лишь сложностью «эталона» и степенью его детализации (числом итераций).

Рис. 1.1,*в* иллюстрирует анализ того же сигнала самоподобными функциями Вейерштрасса.

Другими словами, n -ая итерация начального элемента (эталона) сигнала, а не его энергетические, интегральные характеристики (спектральные коэффициенты Фурье) (рис.1.1,*а*) отражают информационную сущность сигнала.

Приведенная неоднозначность в определении информационной сложности описания сигнала порождает множество вопросов к «общей теории связи». По канонам общей теории связи количество необходимой информации для передачи сигнала $S(t)$ определяется либо интервалом корреляции, либо шириной спектра (рис. 1.1,*а*), что и закрепило за собой название «спектральный анализ».

Если анализ Фурье (рис. 1.1,*а*) есть совокупность амплитудных значений различных частотных составляющих, то вейерштрассовский сигнал (рис. 1.1,*б*) есть суперпозиция «эталона» функции $\sin(\omega t)$ при различных кратных масштабных коэффициентах, что приводит к понятию «масштабной иерархии самоподобия». Обратим внимание, что функция Вейерштрасса в отличие от функции Фурье осуществляет преобразование по той же самой переменной t без перехода на спектральное разложение по частоте ω .

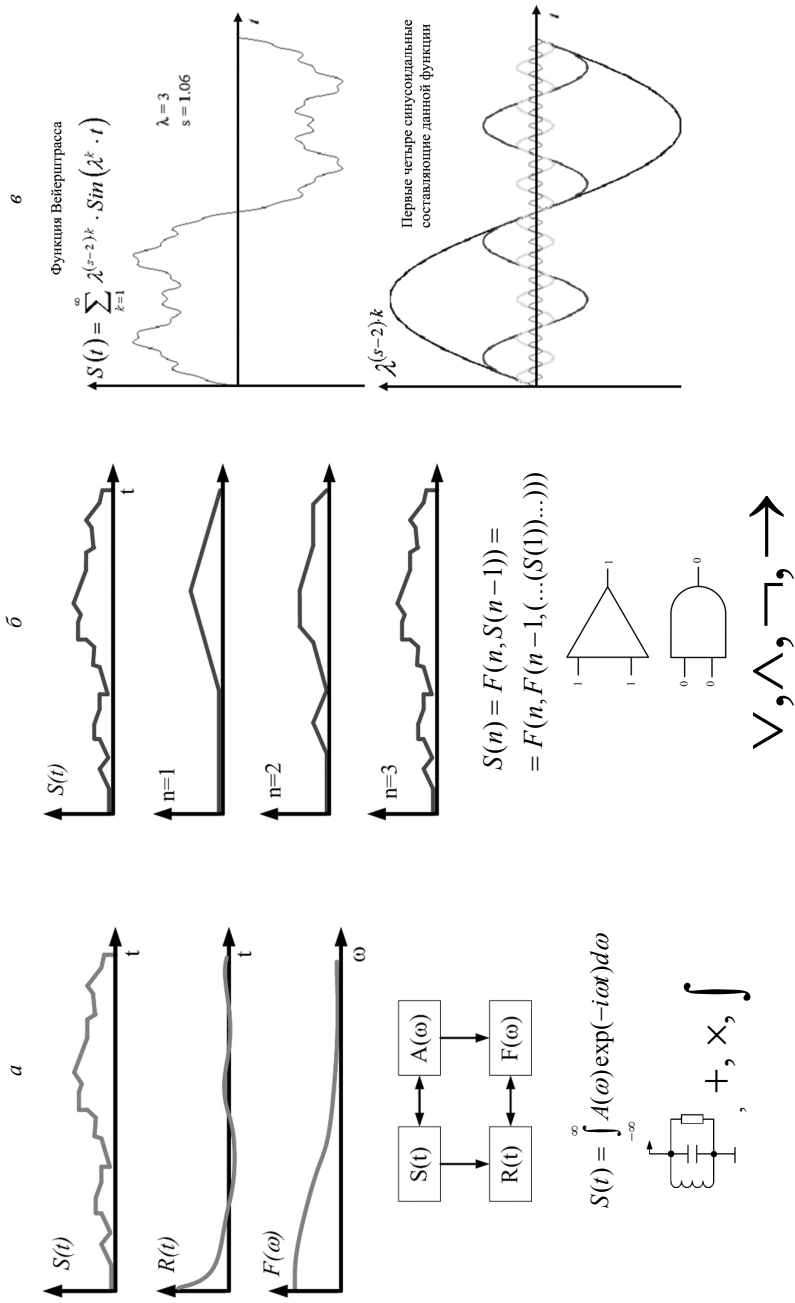
Эти свойства функции Вейерштрасса сравнительно недавно стали предметом строгого математического исследования [41].

Информационная неоднозначность представления одного и того же сигнала $S(t)$ сводится к различному определению сложности - вычислительной (*а*), структурной (*б*) и программируемой (*в*).

Сложности – вычислительная и программируемая – определяются технологическими аспектами их реализации.

Структурная же «сложность» проистекает, определяется и несет в себе семантику анализируемого процесса с разной степенью раскрытия и восприятия информационного содержания.

На примере известных методов компрессии **данных** покажем, что их программная компьютерная реализация более эффективна, если НЕ опирается на математические модели функционального анализа.



1.5. Математическая модель и программный симулятор

Проведем сопоставление реализации алгоритмов компрессии, сформулированных на языке математического моделирования и на языке ПТК – «программного симулятора» процессора (последовательности действий). Эффективность программируемой технологии по А. Н. Колмогорову (ПТК) заключается в непосредственной процессорной симуляции (трансляции) входного битового потока в требуемый результат.

Пример. Рассмотрим, в соответствии с ПТК, программную реализацию (симулятор) алгоритма JPEG.

Концепция спектрального преобразования и сжатия, на основании которой конструируются алгоритмы JPEG (и в несколько модифицированном виде - MP3), имеет следующий вид:

$$D_{mn} = C_m C_n \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} S_{ij} \cos\left(\frac{\pi(2i+1)m}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi(2j+1)n}{2N}\right); \quad (1.4)$$

$$C_m = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, m = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}}, 1 \leq m \leq M-1 \end{cases}, C_n = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, n = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, 1 \leq n \leq N-1 \end{cases},$$

где M, N – размеры матрицы, S_{ij} – исходные данные.

Представим в наглядной форме матрицу преобразований, традиционно реализуемых на БПФ (быстрое преобразование Фурье) для алгоритмов компрессии изображений. Для матрицы преобразования JPEG, согласно выражению (1.4), элементы четырехмерного гиперкуба (m, n, i, j) задаются следующим выражением:

$$P(m, n, i, j) = \cos\left(\frac{\pi(2i+1)m}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi(2j+1)n}{2N}\right), \quad (1.5)$$

$m, n, i, j = 0..7$

Непосредственное математическое моделирование этих функций в среде Matlab или через программное БПФ приводит к неоправданным затратам вычислительных ресурсов.

Эффективная же программная реализация (симуляция) возможна как на целочисленном (integer), так и на вещественном (real) представлении числа, что позволяет осуществлять операции с использованием заранее предвычисленной матрицы целочисленных значений. По сути, это матрица трансляций (в отличие от матрицы ДКП – дискретного косинусного преобразования) исходного сигнала в его вторичную компрессированную форму. Основными свойствами матрицы трансляций ПТК в отличие от матриц ДКП являются целочисленные, значительно

ограниченные по разрядности значения не элементов, а областей-сегментов матрицы трансляций. К тому же матрица трансляций ПТК может быть представлена в виде итерационно-фрактальной свертки, обладающей минимальной сложностью ($\min I(p)$), что на практике приводит к максимальным компрессирующим и криптографическим свойствам [42].

Приведем двумерную матрицу трансляций, полученную сечением гиперкуба. Растровый вид полученной матрицы в различных сечениях показан на рис. 1.2, 1.3.

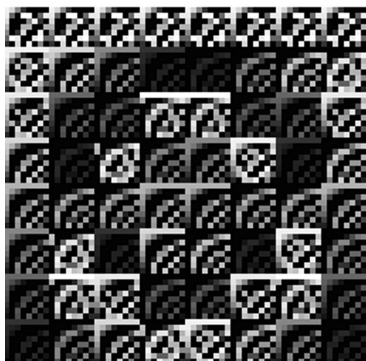


Рис. 1.2. Сечение гиперкуба по m и n .

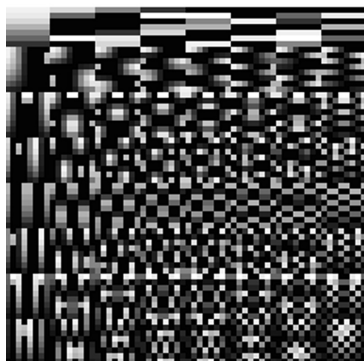


Рис. 1.3. Сечение гиперкуба по m и j .

Вид преобразования для формирования матрицы трансляции не играет особой роли. Рассмотренное преобразование лишь эксплуатирует физическое свойство электромагнитного поля (ЭМП) при переходе от пространственно-временного представления исходного сигнала в спектральную форму. Неравномерно распределенные по полосе частот энергетические составляющие сигнала позволяют уменьшать требуемую полосу частот за счет раздельной группировки высокочастотных и низкочастотных составляющих.

В этом примере в терминах «вычислимой функции» и ПТК показана возможность преобразования одного вида представления информационного содержания в другой. Спектральное представление – лишь один из видов трансляции данных, используемый в компрессии сигналов и изображений.

Проиллюстрируем этот факт следующим экспериментом. В качестве матриц трансляции использовались матрицы растрового изображения, и даже матрицы, заполненные псевдослучайными значениями. Эксперимент показал работоспособность компрессии и при таких «произвольных матрицах» трансляции. Размер полученного файла оказывался лишь немногим меньше, чем размер исходного, но при этом проявлялись все эффекты алгоритма компрессии с потерями: зависимость размера файла от фрагментарной насыщенности изображения, меньший

объем данных цветовой составляющей по сравнению с яркостной компонентой и некоторые другие.

Следовательно, минимизация $K_s(x)$ – критерия оценки «сложности» как длины «программы» является эффективным путем программируемой технологии построения симуляторов. Этим показана синонимичность понятий «вычислимая функция», «программная симуляция» и «машина Тьюринга».

Любая оцифровка – «цифровизация информационного содержания» сводится к процессорной обработке битового потока, в том числе и в задачах компрессии, шифрования, вставок, коллажей и др., реализует принцип ПТК и основана на понятии вычислимой функции как программируемой симуляции.

Постоянно склоняемые сленги «хай-тек», WiFi, xDSL и др., синонимы цифровой связи, музыки и видео – это эмпирический факт новых возможностей компьютерных технологий инфокоммуникации. В их основе лежит иная «цифровая» парадигма обработки и передачи данных, которая не вытекает из традиционных математических моделей общей теории связи.

Удивительным же фактом является то, что А. Н. Колмогоров уже в 1960-х годах обращал внимание на принципиальное различие между математическим моделированием в мире функционального анализа – Д. Гильберта и понятием алгоритма как «программой», реализуемой в терминах машины А. Тьюринга. Более того, подчеркнем, что под «цифрами» А. Н. Колмогоров понимал не дискретные значения сигнала, представленного двоичными числами, а любую последовательность «1» и «0». Это одновременно и сигнальная форма информационных носителей (речь, музыка, текст, аудиовидеопоток), представляемая в виде «скважности импульса», и формирующая ее двоичная последовательность как количественная характеристика в «бит/с». Поэтому современная лексика все чаще опирается на англоязычные понятия **сэмпл** (sample – единица значения оцифрованного сигнала) и **пиксел** (pixel – наименьший неделимый технологический элемент представления изображений).

Характеристика канала связи в «бит/с» объединяет в себе традиционные понятия и «полосы пропускания», и объема информационного содержания, подвергаемого различного рода преобразованиям, но не на основе аксиоматически ограниченных математических моделей, а на основе «программной» симуляции – кодовой модели (кодеки).

До появления компьютерных цифровых технологий передача и обработка данных (сигналов, изображений, и т.д.) сводилась к поиску функциональных преобразований, допускающих, с одной стороны, взаимно однозначное соответствие между исходными (входными) и преобразованными (выходными) данными. Этот поиск преобразований является прерогативой математиков. В свою очередь, математические свойства интеграла Фурье оказались технологически реализуемы и аде-

кватны ряду физических свойств электромагнитного поля. Отсюда происхождение теоремы отсчетов (дискретизация) Х. Найквиста и полосы пропускания Котельникова-Шеннона как инженерной эксплуатации некоторых свойств интеграла Фурье. С другой стороны (прерогатива инженеров), выбор фурье-анализа и спектральной характеристики для оценки полосы пропускания был связан с технологической реализацией резонансного контура на RLC -элементах.

Понятно, что спектральный анализ, традиционно являясь универсальным инструментом для анализа и представления неизвестных функций, обладает большей вычислительной сложностью (и большим объемом битового представления объекта).

В то же время рекурсивный подход, основанный на выявлении самоподобия и масштабируемой суперпозиции «эталонов», приводит к меньшему объему битового представления [16, 40]. Это аналогично синтезу терминальных программ для битовых последовательностей, что будет рассмотрено ниже.

1.6. Степенная форма, структурная иерархия и самоподобие

Здесь следует заметить, что лишь в 19-м веке было строго показано, что решение проблемы «сложности» представления – идентификации «большого числа» от простого перечисления до символьной подмены имеет степенную зависимость, структурно отраженную в позиционной записи числа. Минимизация же сложности определяется логарифмической характеристикой $N=n \log a$, где n – число позиций; a – число различных символов.

Сложность, определяемая через ПТК, по сути обобщение, расширяемое на различные виды информационных объектов и реализуемое как программируемая технология.

Удивительно, но факт, что функция Вейерштрасса также опирается на степенную зависимость, что и отражается в виде самоподобной структурной иерархии в древовидном, позиционном и масштабируемом представлениях (рис. 1.4).

Позиционное представление числа в десятичной системе, $a_i=0..9$ – цифра $\dots + a_4 10^4 + a_3 10^3 + a_2 10^2 + a_1 10^1 + a_0 10^0$	Позиционное представление функции $\dots + \lambda_3 \sin(\lambda^3 t) + \lambda_2 \sin(\lambda^2 t) + \lambda_1 \sin(\lambda^1 t) + \lambda_0 \sin(\lambda^0 t)$
Позиционное представление числа в двоичной системе, $a_i=0, 1$ – цифра $\dots + a_4 2^4 + a_3 2^3 + a_2 2^2 + a_1 2^1 + a_0 2^0$	

Рис. 1.4. Степенная форма представления чисел и функций.

Так же как проблема «сложности» представления – идентификации «большого числа» эмпирически была решена позиционной иерархией в виде древовидной структуры с самоподобным ветвлением, так и проблема сложности анализа и обработки информационных объектов – сигнала, изображения, текста и др. связана с формой их представления и достигнутой технологией воспроизводства и распространения.

По-видимому, специфика восприятия и память человека приводят к необходимости использовать иерархию и рекурсию как эффективный способ информационного интерфейсного обмена.

В символично названной книге «Гедель, Эшер, Бах – эта бесконечная гирлянда» [43] продемонстрирована рекурсия как общий элемент творческого процесса, используемый в математике, живописи и музыке. Общим объединяющим элементом математика (Гедель), художника (Эшер) и музыканта (Бах) оказалось порождение семантического содержания через повторение, итерацию, рекурсивность воспроизведения некоторого начального базиса – эталонов (шаблона).

Например, в картинах М. Эшера рекурсия используется как процесс построения коллажей.

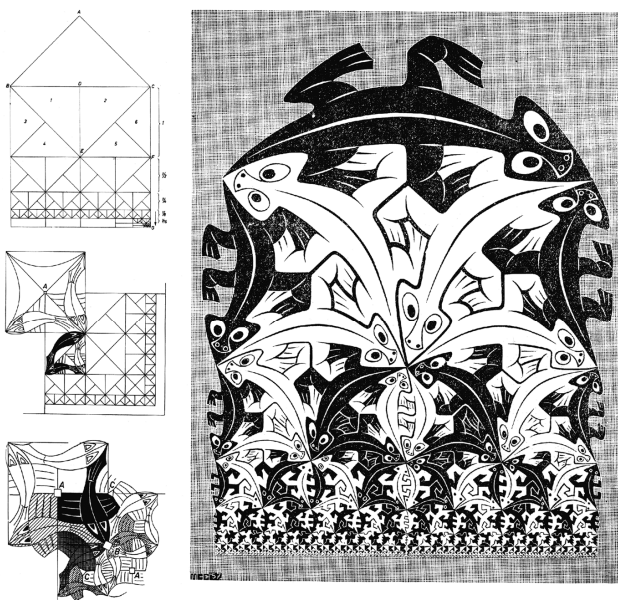


Рис. 1.5. Рисунок М. Эшера.

В исследованиях сюжетного развития текста рекурсия также отмечается как необходимый элемент.

«...Удержание и воспроизведение накопленного знания отражено в докучных сказках. Самый известный образец такой структуры – «Сказка про белого бычка». В классической чистоте структура докучной сказки предстает в следующем варианте: «Рассказать ли тебе докучную сказочку? – Расскажи. – Ты говоришь: расскажи; я говорю: расскажи. - Расскажать ли тебе докучную сказочку? – Не надо. – Ты говоришь: не надо; я говорю: не надо. - Расскажать ли тебе докучную сказочку? – и т.д.» [44]. Поскольку ответ не влияет на поведение структуры, в которой для него предусмотрено «пустое» место, и не препятствует повторению, весь смысл структуры заключается в порождении бесконечно длинного текста посредством воспроизведения сюжетной морфемы. Умножения знаний при этом не происходит.

Вероятно, эти сказки отражают ранние шаги человека по упорядочению окружавшего хаоса. Условием такого упорядочения было, во-первых, удержание накопленного знания, а во-вторых, его преумножение.

Рекурсивные сказки моделируются самоподобными рекурсивными структурами и представляются в виде связанных графов – древовидной структурой (Александров, Арсентьева 1984)» [45].

Концептуально это приводит к возможности формирования ассоциативного ряда в семантико-смысловом контексте. Это принципиально иной подход – не функциональной, а объектной идентификации. При этом используется лишь понятие взаимной однозначности по Кантору, которая необходима и присутствует лишь как фактор идентифицируемой перечислимости объектов, а семантическая упорядоченность опирается на принцип идентификации неразличимости Лейбница, устанавливая семантическую эквивалентность объектов за счет постулата эквивалентности их свойств.

Процесс идентификации производится в соответствии с выбранным семейством рекурсивного построения древовидных структур [40, 43]:

$$f(n) = n - \sum_{i=1}^{t-1} f(n-i), n > t-1, f(0) = 0, f(1) = f(2) = \dots = f(t-2) = 1.$$

Например, рекурсивная формула порождения дерева Фибоначчи имеет вид:

$$f(n) = n - f(f(n-1)), \quad f(0) = 0.$$

Соответствующий этой формуле ряд значений:

$n =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$f(n) =$	1	1	2	3	3	4	4	5	6	6	7	8	8

приводит к построению дерева (рис. 1.6).

От корня $n = 1$ отходит единственная связь как ствол дерева, элемент $n = 2$ также имеет единственную связь со следующим элементом $n = 3$, который имеет две связи (ветки) со следующими вершинами (элементы 4, 5). Вид связи зафиксирован в значении функции $f(n)$, которая одновременно несет информацию о числе элементов следующего уровня дерева. Две вершины 4, 5 связаны с элементом 3 предыдущего уровня, а значение $f(n) = 3$ элемента 5 определяет число вершин на следующем уровне дерева, а именно три: 6, 7, 8, а связь с предыдущим уровнем отражена значениями $f(6) = 4$, $f(7) = 4$, $f(8) = 5$. Более того, $f(8) = 5$ дополнительно определяет число вершин следующего уровня.

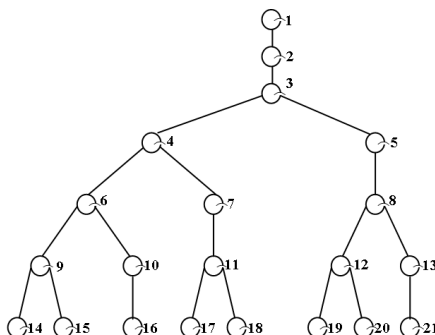


Рис. 1.6. Дерево Фибоначчи.

Полученные структурные связи соответствуют общепринятой форме дерева Фибоначчи, в котором по правому краю номера вершин дают последовательность Фибоначчи либо, что эквивалентно, количество вершин на каждом уровне дает число Фибоначчи со сдвигом на два уровня, что вполне естественно вытекает из определения самой последовательности как суммы двух ближайших предшественников.

Каждому элементу дерева ставится в соответствие уникальный идентификатор. Этот идентификатор сформирован таким образом, что в нем содержится информация обо всем дереве в целом, о местонахождении элемента относительно этого дерева. Имея этот уникальный идентификатор, мы можем получить аналитическую форму представления данной древовидной структуры (свернуть все дерево в одну строчку), нарисовать «дерево» и получить информацию обо всех «ветках» и «листьях», расположенных на этом дереве.

Такая древовидная структура позволяет построить ассоциативную идентификацию по заранее выделенной предметной области. При этом необходимо учитывать, что ассоциации возникают только после присваивания «листу», «стволу», «ветке» имен.

Приведем следующую интерпретацию формирования ассоциативного ряда семантико-смыслового контекста:

$f(n) = \{N\}$ – окружающая среда, порождающая информационные агенты (объекты) – имена и понятия: физические, лингвистические и др. модели, диалоги Платона, а также показатели эффективности IQ, NASDAQ и др. Другими словами, формируется социальный семантический смысловой контент, или по определению Ричарда Доукинса – «теме» [46], или по Тойнби [21] – мимесис, мем.¹

f – технология построения «теме» – информационных агентов (ИА); библия, Коран, мифы, философия, наука и коммуникации;

n – аргумент, порождающий многообразие форм ИА, таких как число, символ, музыка, графика, картины, видео, голос, аудиовидеопоток.

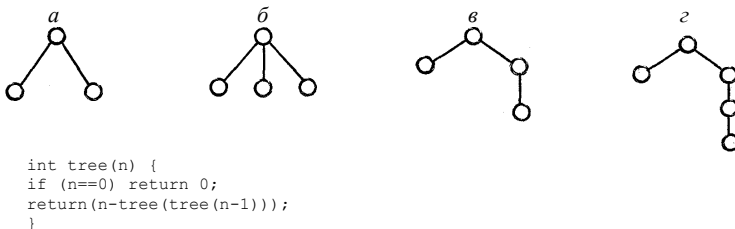


Рис. 1.7. Эталоны некоторых самоподобных деревьев:
 а - бинарного дерева; б - тернарного дерева; в - дерева Фибоначчи;
 г - дерева Лукаша.

На рис.1.7 приведены эталоны некоторых самоподобных деревьев. Если деревья (рис. 1.7,б, в) типа Фибоначчи или t -арного имеют четкую нумерацию вершин «сверху-вниз, слева-направо» и всегда дают полные деревья (т.е. без висячих вершин на всех уровнях, кроме последнего – для конечных деревьев), то представители семейства «псевдохаотических» деревьев характеризуются как раз обратными свойствами. На рис.1.8 приведен представитель семейства, который достаточно наглядно демонстрирует общую закономерность при изменении числа слагаемых в формуле их аналитического представления:

$$f(n) = f(n - f(n - 1)) + f(n - f(n - 2)), \quad f(0) = 0, f(1) = 1.$$

По способу построения «псевдохаотические деревья» не отличаются от структуры «дерева» Фибоначчи. Хаотичность, случайность лишь подчеркивают «сложность» предсказания (поиск каждого последующего элемента) идентификационного ключа: для непосредственно предшествующих элементов определяют, насколько следует сдвинуться влево по имеющейся последовательности чисел, чтобы получить слагаемые для очередного элемента последовательности. Чем более длинный ряд чисел будет выстроен, тем труднее будет уловить закономерность в его построении.

¹ Википедия – свободная энциклопедия <http://ru.wikipedia.org/>

Следует особо подчеркнуть, что такой аппарат динамических структур нерегулярных деревьев поддерживает произвольную иерархию вложенных сегментов и поэтому одинаково приложим как к многоуровневому, так и к компактному иерархическому адаптивному представлению. В обоих случаях он обеспечивает максимально экономичное использование памяти, а для компактного представления – также высокую скорость вычислений.

Суть формализма динамических структур (в приложении к ресурсоемкой задаче анализа данных) сводится к сопоставлению семантических, смысловых и наглядных понятий с доступными «измерениями» свойств и форм их представления.

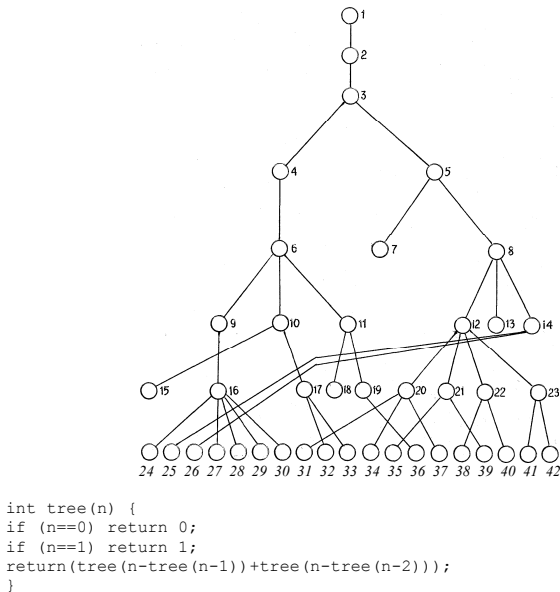


Рис. 1.8. Семейство «псевдохаотических» деревьев.

Таблица 1.1.

Соотношение основных понятий

Наглядное описание	Формальное представление
Сегмент	Дерево
Слияние сегментов	Объединение деревьев
Уровни сегментации	Индексация дуг
Восстановление уровня	Разрыв дуг

Практика «измерений» и форм представлений информационного объекта (ИО) всегда имеет дело с конечностью как числа значащих цифр измеряемого параметра, так и возможного диапазона, в котором производится измерение. Это означает, что моделью процесса измере-

ния может служить следующий оператор: идентифицировать (определить), какому из конечного множества ИО с известными свойствами эквивалентен предъявленный неизвестный. Ему и приписываются те же самые уже известные свойства. Это принцип «идентификации неразличимости», который был впервые сформулирован Г. Лейбницем [47]. Чаще всего идентифицирующими элементами выступают градации некоторой шкалы (например, деления линейки), причем, как уже отмечено, количество этих градаций конечно, конечны также и их минимальное и максимальное значения. Градации этой шкалы можно идентифицировать с помощью правильных дробей в системе счисления с целым основанием k . Тогда на шкалу окажется наложенной рекурсивная структура (одна из возможных) в виде регулярного k -ичного дерева с m самоподобными уровнями. Каждая ветвь дерева соответствует правильной дроби из m цифр, которая идентифицирует одну из градаций предельного разрешения. Ограничившись $t < m$ вершинами на ветви, получим менее точное значение той же градации; число таких «грубых» градаций на шкале равно k_t – по числу вершин t -го уровня дерева (рис. 1.6).

Этот процесс самоподобен и структурно иерархичен, что проявляется и в удивительной функции Вейерштрасса (рис. 1.1, в). Математики в начале XX века быстро споткнулись на сложных вычислениях. Воображение способно рисовать тончайшие детали, но лишь до определенной черты.

Независимо от Вейерштрасса, с развитием компьютеров возникла и принципиально иная парадигма рекурсивно-фрактального анализа и синтеза [40, 43, 28]. Стал доступным процесс «визуализации» тонких физических и математических свойств. Компьютер справляется с этим без особого труда, демонстрируя порой весьма неожиданные результаты.

Как отмечал Мандельброт, «целое столетие для математики прошло впустую, поскольку рисование не играло тогда в науке никакой роли. Рука, карандаш и линейка исчерпали себя».

Любой с помощью компьютера в состоянии «поиграть», синтезируя картины и музыку, – ведь фракталы первичны настолько же, насколько и формы Евклида. Простейшими программами для создания фракталоподобных изображений и сигналов (музыки) забит Интернет. Появились даже картины, созданные при помощи программного кода, генерирующего изображения на основе электронных писем, так называемого спама. «Растения», изображенные на этих картинах, получили название Spam Plants.

Алгоритм выращивания таких «растений» включает в себя грамматический разбор текста в колонтидулах, теме и теле письма. От взаимосвязей между этими фрагментами послания и зависит то, что будет изображено на иллюстрации. Используются также данные из заголовка письма, цвет «растения» вычисляется из IP-адреса отсылающего, а раз-

мер непосредственно зависит от времени отправления. Поэтому «растения» из утренних писем получаются маленькими, а из вечерних – большими.¹



Рис. 1.9. Цветы из спама – Spam Plants.

1.7. Анализ и синтез сигналов

Здесь под **сигналом** будем понимать средство передачи каких-либо данных. Разница в технологии передачи состоит лишь в том, как именно передавать (а соответственно и принимать) данные.

В настоящее время существуют различные формы представления цифровых сигналов. Существуют вариации от передачи непосредственно битовых последовательностей в синхронном и асинхронном режимах (рис. 1.10) до передачи аналоговых величин «псевдоцифровым» кодированием (рис. 1.11).

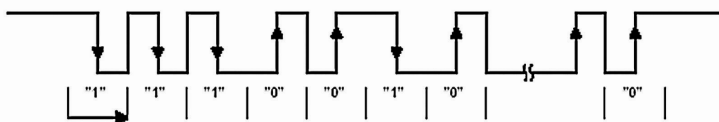


Рис. 1.10. Информационное и физическое представление потока данных (битовая последовательность).

«Истинно» битовые последовательности предполагают передачу в один временной интервал одного бита данных. Существует множество вариаций такого способа формирования интервала (синхронная – асинхронная передача), как и способа кодирования бита (по уровню, по фронту). Отличительной особенностью этой группы способов кодирования является то, что передаются только битовые данные. Аналоговые величины могут быть переданы только после предварительного их перевода в числовые значения, а потом и в битовые последовательности.

¹ www.sq.ro/spamplants.php

При этом скорость передачи определяется длительностью этого интервала, а как следствие быстродействием логических элементов, способных формировать и воспринимать импульсы требуемой длительности.

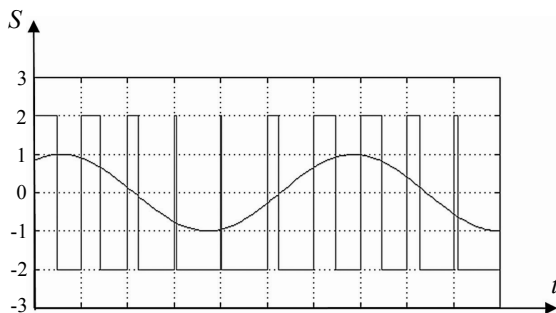


Рис. 1.11. Сигнал и скважность (широтно-импульсная модуляция).

Авторы специально ввели понятие «псевдоцифрового» кодирования для обозначения группы способов кодирования аналоговых величин. Одним из таких способов является широтно-импульсное кодирование (рис. 1.11), где значение аналоговой величины задается значением скважности, т.е. отношением времени импульса ко времени интервала (периода). Скорость передачи в таком случае определяется разрешающей способностью таймера, определяющего значения скважности для восстановления аналоговых величин.

На рис. 1.12 приведена иллюстрация широтно-импульсной модуляции и соответствующая ей форма аналогового сигнала.

Третья группа представляет собой аналоговые способы передачи данных, в которых аналоговые величины передаются непосредственно. Скорость передачи данных в этом случае напрямую определяется техническими возможностями АЦП и ЦАП – их разрешающей способностью по времени (другое название – частота квантования).

Традиционное («консервативное» при «цифровой» технологии) представление сигнала через его фурье-спектр является информативным (семантически интерпретируемым) с точки зрения доступной или заданной полосы пропускания (физическое ограничение по частоте канала связи). Другими словами, такое представление рассчитано на существовавшие ранее технологии, основанные на аналоговых контурах, способных выделять требуемую полосу частот, т.е. аппаратно производить спектральный анализ.

С другой стороны, дискретное представление (функцией Дирака) аналогового сигнала и его семантическая адекватность связаны с разрешающей способностью по частоте квантования, т.е. со скоростью выборки (ее физической и технологической возможностью), а инженерная реализация – с разрешающей способностью АЦП.

Рис. 1.12, *а* поясняет понятие разрешающей способности АЦП по времени. Заметим, что с точки зрения вейвлет-анализа спектральное представление Хаара (рис. 1.12, *б*) по сути использует разноуровневую (кратномасштабную) разрешающую способность, реализуемую АЦП как функцию времени.

Обратим внимание на совмещение информационного представления сигнала в виде дискретной функции времени (функция Дирака) с его физическими свойствами, представленными в виде спектральных составляющих (функции Хаара, матрица Адамара и др.) – рис. 1.12, *б*.

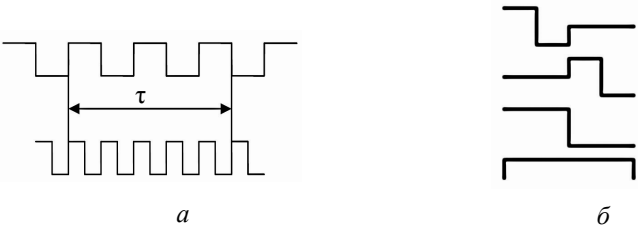


Рис. 1.12. Изменение разрешающей способности по времени (*а*) и по спектру (*б*).

Левая часть рис. 1.13 иллюстрирует известный аналитический, вычислительный процесс перехода от функции времени к спектру, правая часть иллюстрирует возможность невыхода за рамки временного (пространственного) дискретного представления с использованием программируемой технологии.

Представление сигнала в плоскости двух параметров позволяет визуализировать процесс анализа его свойств, совмещая частотную и временную локализацию (рис. 1.13).

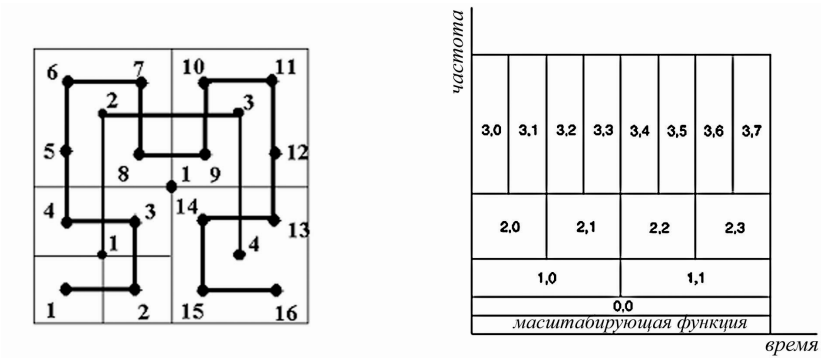


Рис. 1.13. Заполняющая пространство кривая (ЗПК) и кратномасштабный анализ.

Обратим внимание, что заполняющая пространство кривая (ЗПК) – эффективный метод сканировать многомерное описание в одномерный поток данных (сигнал) [16].

Инженерная – аппаратная реализация такого процесса опирается в большей степени на такие параметры, как «**скважность импульса**» и «**бит/с**» – «цифровые» аналоги полосы пропускания, определяющие требуемую **скорость передачи данных** – понятие, вытесняющее актуальность частотно-волновой оценки полосы пропускания канала связи в «герцах».

Приведем другой пример, требующий пересмотра классической **архитектуры процессоров** и более подробного изучения физических принципов, и в частности идеи квантового компьютера.

Согласно исследованиям национальной лаборатории Лоуренса Ливермора (LLNL) обнаружена возможность получения когерентного излучения на частотах до 100 ТГц (терагерц!)¹.

Для обработки потока данных должен быть «запас по быстродействию». При этом для методов обработки, основанных на спектральном анализе, этот запас должен быть порядка N^2 . Соответственно для обработки сигналов на частотах близких к физическому пределу, быстродействие должно быть порядка 10^{24} Гц, что вряд ли возможно с физической точки зрения.

Исследование физических процессов (в первую очередь волновых) породило математическое моделирование.

Альтернативой является подход, основанный на программной симуляции, который требует меньшего «запаса по быстродействию», что позволяет производить обработку при быстродействии того же порядка, что и скорость представления сигнала. Современный уровень (кванты и нанотехнология) при исследовании физических процессов опирается на непосредственную их симуляцию – до этапа математического моделирования.

Нанотехнологии уже сегодня способны поддерживать программируемую технологию построения симуляторов как эффективный способ исследований физических процессов на следующем витке развития цифровых технологий.

Передовые позиции снова переходят к непосредственной симуляции физического процесса, отражаемого динамикой «битового» потока.

Для цифровой передачи данных актуальность смещается в область разработки все более скоростных аналого-цифровых преобразователей, выраженную в стремлении реализовать предельные физические и технологические возможности, минимизируя интервал формирования «1» и «0».

На рис. 1.14 представлены сигналы с различным числом итераций

¹Пищевая соль может быть терагерцевым лазером — <http://www.membrana.ru/lenta/?5532>

(для функции Вейерштрасса это количество синусоидальных функций), что приводит к разной требуемой ширине полосы пропускания в случае аналоговой передачи, но не требует увеличения битового объема при цифровой, т.е. программируемой передаче этих объектов. Число же итераций определяется требуемой точностью (разрешающая способность) представления сигнала.

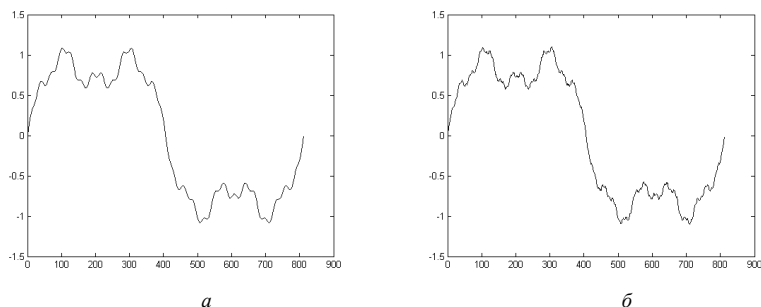


Рис. 1.14. Функция Вейерштрасса: 4 итерации (а) и 8 итераций (б).

Сохранение семантики информационного содержания и определяет необходимую в каждом конкретном случае достаточную разрешающую способность передачи данных. А компрессия без потерь (lossless) определяется через ε -тождественность при $\varepsilon = 0$.

Зрительное и слуховое восприятие человека по физиологическим характеристикам неспособно справиться с возрастающим потоком данных и требует структурной многоуровневой интеграции и адаптации информационного содержания.

1.8. Программируемое радио

Уже достигнутые возможности «хай-тек» привели к актуальности непосредственной обработки сигналов как импульс-битовой последовательности. Одно из инновационных направлений программируемой технологии привело к цифровой технологии Software Defined Radio (SDR), которая позволяет передавать и обрабатывать сигналы с использованием разных частот и стандартов, при этом все параметры устройства определяются программно.

Термин «Software Defined Radio» на данный момент даже не имеет устоявшегося перевода на русский язык, можно перевести его как «программируемое радио». Суть технологии заключается в том, что базовые параметры приемопередающего устройства определяются именно программным обеспечением, а не аппаратной конфигурацией, как в классических конструкциях [48].

Классические радиопередающие и принимающие устройства имеют «жесткую» архитектуру, определяемую конкретными электронными компонентами – *LRC*-контурами, детекторами и т.п. Такие устройства поддерживают один тип сигнала, что позволяет связываться между собой только однотипным устройствам. Это являлось и является сильным ограничением и усложняет организацию связи. В связи с этим ощущалась потребность в «гибкой» архитектуре, которая могла бы задаваться и изменяться программно. Так появилось SDR – «программируемое радио», в котором вид модуляции, частота и другие параметры определяются процессором или микроконтроллером.

Типовая архитектура SDR (рис. 1.15) содержит антенну, блоки аналого-цифрового, цифро-аналогового преобразования, блок обработки цифровых сигналов на базе быстродействующего процессора и другие вспомогательные блоки. Одним из самых важных узлов является аналого-цифровой преобразователь, который напрямую подключается к антенне. Очевидно, что его характеристики будут во многом определять и характеристики устройства в целом. Основными параметрами являются разрешающая способность по уровню сигнала, линейность и скоростные характеристики. Именно скоростные характеристики определяют частоту, на которой способно работать программируемое радио.

Другой, не менее важный компонент архитектуры SDR – процессор. Именно он обеспечивает гибкость системы и используется для полной обработки сигналов – детектирования, коррекции, демодуляции, исправления ошибок, шифрования и последующей обработки.

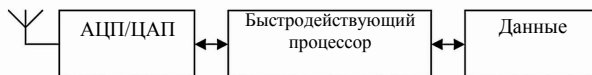


Рис. 1.15. Упрощенная архитектура типового SDR-устройства.

Преимущества подобной технологии очевидны, – набрав код на панели управления можно «превратить» Bluetooth-приемопередатчик в WiFi-устройство. При этом изменяются не только радиочастотные параметры (вид модуляции, мощность, избирательность и другие), но и протокольная часть устройства – происходит полное перерождение аппаратуры, которая ранее могла выполнять только одну жестко заданную функцию. При этом устройство обладает уникальной возможностью обновления программы при появлении новых форматов и протоколов передачи данных без переделки аппаратной части.

Одним из приоритетных направлений развития систем SDR является создание универсальных многопротокольных систем. При использовании SDR можно упростить техническое обеспечение международного роуминга, увеличить число поддерживаемых сервисов, добиться большей гибкости устройств связи.

Использование программируемой технологии позволяет также продлить активную фазу жизненного цикла изделия, заменяя программное обеспечение при введении новых стандартов обмена данными – форматов и протоколов.

Кроме того, мобильное устройство на базе архитектуры SDR может более эффективно использовать радиочастотный спектр и потребляемую от источника питания энергию.

Известно, что архитектуру SDR планируется использовать как базовую для аппаратного обеспечения мобильной связи третьего поколения 3G [48].

Пока что недостатком устройства SDR является слишком высокая стоимость такой системы и достаточно ощутимые ограничения технологии (например, имеющиеся цифровые сигнальные процессоры обладают недостаточным быстродействием для реализации одновременно всех функций радиопередающего и принимающего устройства).

1.9. Вычислительная vs программируемая сложность

Приведенные выше примеры иллюстрируют принципиально различные подходы к оценке «сложности» представления и обработки данных:

- оценка необходимого числа элементарных операций в соответствии с алгоритмом вычисления по математической модели (4, 5);
- оценка структурной сложности через принцип структурной декомпозиции потока данных;
- оценка длины программы $l(p)$, например матрицы трансляции, как симулятора воспроизведения информационного продукта (изображение, сигнал, текст). Сложность при этом определяется программируемой технологией, осуществляющей структурную декомпозицию информационного потока.

В основе **вычислительной сложности** лежит поиск алгоритмов быстрых вычислений, которые используют возможности декомпозиции и факторизации, иными словами, выявление однородной блочной структуры, заложенной в математической модели. Наиболее эффективно это реализуется алгоритмами и процессорами быстрых преобразований Фурье, Уолша, Адамара и др. Простой пример факторизации – уменьшение «сложности» от степенной функции (прямое произведение декартовых координат) до логарифмической $N^2 \rightarrow N \log N$ – проиллюстрируем исходя из принципа построения матриц Адамара [40, 49]:

$$H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ и т.д.}$$

Это и приводит к структурной схеме вычислений (рис 1.16,а).

На современном этапе компьютерного моделирования подобные вычисления представляются как вейвлет (wavelet) или кратномасштабный (multiresolution) анализ. Более подробно это будет рассмотрено в главе 2.

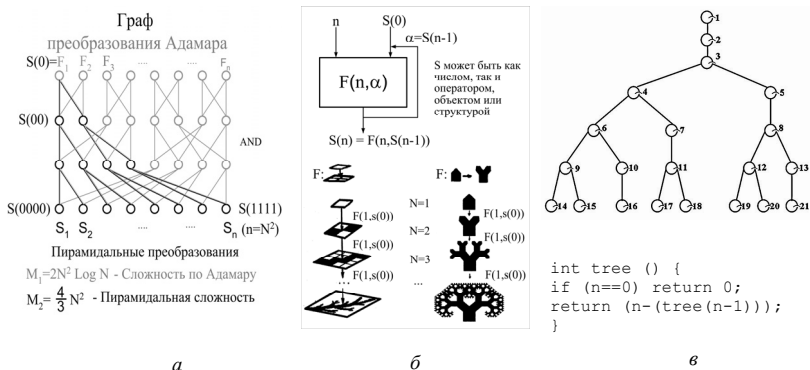


Рис. 1.16. Иллюстрация вычислительной (а), структурной (б) и программируемой (в) сложности.

«Вычислительная сложность» — следствие выбранной математической модели и области функционирования в декартовой системе координат, которые по построению (прямое произведение) приводит к степенной функции оценки операций вычислений, а также необходимости опираться на аксиоматические свойства чисел и функциональных взаимнооднозначных отображений (преобразований) в соответствии с заданными интегральными (энерго-энтропийными) отношениями.

Когда заявляют, что формат, протокол, кодек и т.д. осуществляют преобразование и передачу **информации без потерь**, то во-первых, еще нет никакой информации, есть только ДАННЫЕ, а во-вторых, передача ДАННЫХ без потерь справедлива лишь с точки зрения того или иного критерия оценки «потерь», например, точность измерения и/или разность битового представления.

Сигнал как музыка и его МР3 копия считаются эквивалентными (одинаковыми), т.е. не имеют энергетических потерь во всех воспринимаемых человеческим ухом составляющих спектра сигнала, однако это отнюдь не гарантирует сохранение семантической эквивалентности восприятия.

Это следствие того, что математические модели информационных объектов не в полной мере способны учитывать природные свойства – порождение и восприятие сигналов. Они ориентированы и подчинены количественным и пространственным отношениям порядка. Поэтому для функционального анализа требуется лишь, чтобы выполнялись определенные отношения. Скажем, утверждая, что $3+6=9$, мы ведь не имеем в виду какие-то конкретные объекты. Это могут быть объекты самой различной природы. Например, 3 журавля и 6 синиц вместе составят 9 так же, как 3 барана и 6 петухов. Получается, что математические высказывания часто не зависят от конкретных состояний внешнего мира, а справедливы сами по себе истинны в себе, в силу формального, отвлеченного от свойств информационных объектов, определения меры (критерия) «похожести-равенства».

Программируемая технология позволяет перейти от «вычислительной сложности» к «структурной». На рис. 1.17 отчетливо виден «крест» в центре прямоугольника. Возникает вопрос, каков критерий его идентификации и параметры распознавания границы.

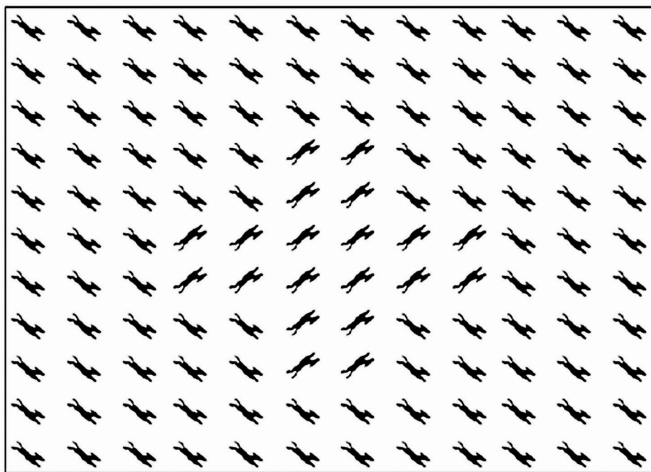


Рис. 1.17.

Для ответа на этот вопрос рассмотрим способ создания этого рисунка. Сначала были сформированы две прямоугольные области, заполненные фигурками, причем вторая область была получена из первой отображением вокруг горизонтальной оси. Затем вторая область была помещена под первую, а в центре первой области (верхний слой изображения) был вырезан крест, через который видна вторая область (нижний слой изображения).

Фигурки верхнего слоя образуют четкую периодическую структуру, описываемую несложным алгоритмом, который воспроизводит пер-

вую фигурку, а остальные порождает рекурсивно. Фигурки нижнего слоя также образуют периодическую структуру, описываемую аналогичным алгоритмом, но в этом алгоритме первая фигурка перевернута, следовательно, начальные данные алгоритма несколько отличаются.

Граница «креста» – это граница смены программы, порождения элементов данного изображения. Никаких других отличий (по яркости, спектру) между изображениями первого и второго слоев нет. Следует отметить, что, глядя на рис. 1.17, мы не просто понимаем, что имеется область, где меняется направление фигурок, но мы видим «крест» на однородном фоне.

Локальный срыв изменения установленной зафиксированной закономерности проявляется в обнаружении возникшего артефакта. Возникающий и воспринимаемый «контур креста» проявляется как дополнительный семантический элемент данного изображения.

Структурная сегментация изображения осуществляется уже на ранних стадиях его обработки в зрительном анализаторе, и результаты этой алгоритмизации заданы в процессе предварительного обучения в форме выделенных объектов и иллюзий.

Следовательно, для реализации функций семантического анализа информационных сообщений путем моделирования процессов человеческого восприятия необходимо привлекать тот же аппарат программируемой избыточности.

Идея ПТК использует декомпозицию структурной сложности, которая в явном виде на рис. 1.17 отражена как семантический компонент. Тот же механизм используется, например, в картинах Эшера и музыкальных композициях (рис. 1.5).

Подобная структурная декомпозиция обеспечивает уникальные свойства вложенных ассоциаций, порождающих иерархию и самоподобие при построении процесса идентификации (подобные механизмы используются в ISBN, BIB и др.), выявляя классификационные и информационные свойства объектов.

Следует заметить, что математический аппарат, соответствующие определения и свойства примитивной рекурсии были известны [16], но опередили появление соответствующей им адекватной элементной базы и вычислительных средств.

Современный «хай-тек» востребовал для реализации своих возможностей известный математический подход [50].

1.10. Рекурсивный подход: синтез и анализ

На рис. 1.18 приведена иллюстрация рекурсивного подхода [16]. Он наиболее адекватен описанию алгоритмов и программ, эффективно реализуемых современной цифровой технологией. В его основе лежит понятие примитивной рекурсии.

Примитивная рекурсия

На рис. 1.18 проиллюстрирован рекурсивный подход к анализу и синтезу.

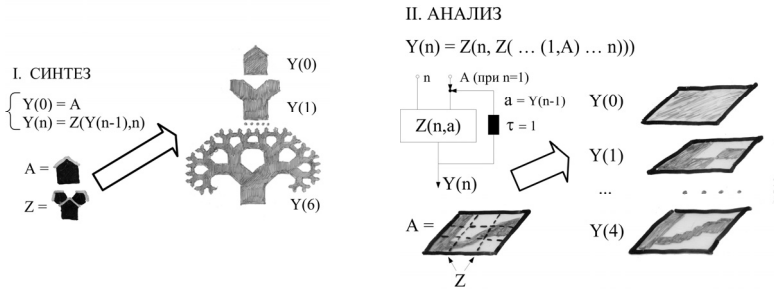


Рис. 1.18. Рекурсивный подход: синтез и анализ.

В качестве формального рекурсивного определения приведем частную схему, называемую примитивной рекурсией и широко используемую в конструктивной математике [16]:

$$\left. \begin{aligned} y(0) &= a, \\ y(n) &= z(n, y(n-1)) \end{aligned} \right\}. \quad (1.6)$$

Здесь a – натуральное число; y, z – функции, значения которых также являются натуральными числами. Так, например, можно записать:

$$\left. \begin{aligned} a \times 1 &= a, \\ a \times n &= a \times (n-1) + a, \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} a^0 &= 1, \\ a^n &= a^{n-1} \times a, \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} 0! &= 1, \\ n! &= n \times (n-1)! \end{aligned} \right\}$$

Схема (1.6) задана лишь для числовых функций, но с ее помощью можно определять объекты и иной природы. Далее мы трактуем ее более широко следующим образом. Пусть A – объект произвольной природы из класса A , $A \in A$; Y – функция или оператор, аргументом которого является натуральное число, а результатом – объект из A ; Z – функция от двух аргументов: натурального числа и объекта из A , результатом которой снова является объект из A , тогда

$$\left. \begin{aligned} Y(0) &= A, \\ Y(n) &= Z(n, Y(n-1)) \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

будем называть рекурсивным определением Y на классе A . Здесь и далее опускаем термин «примитивно», поскольку далее рассматривается именно этот тип рекурсии.

Замена числа a в (1.6) на объект A в (1.7) внешне не изменяет схемы, однако значительно расширяет область ее применимости. Если определение (1.6) при подстановке $n = 1, 2, 3, \dots$ порождает лишь линейную последовательность чисел, то с помощью (1.7) можно получать сложные объекты, имеющие иерархическую структуру. Это достигается за счет того, что объект $Y(m)$, хотя и будет принадлежать к тому же классу, что и $Y(m-1)$, но может быть «сложнее» его в том смысле, что он включает в себя $Y(m-1)$ как составную часть. Например, фрактал на рис. 1.19, согласно (1.7), можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{фрактал «капуста» } (0) &= \square \text{ с треугольником на вершине} \\ \text{фрактал «капуста» } (n) &= \text{фрактал «капуста» } (n-1), \\ &\text{на каждом из выделенных отрезков которого} \\ &\text{построена фигура } \square \text{ в масштабе } 1:2^{n/2}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Определяющую роль в получении иерархического объекта, каким является и приведенный фрактал, играет возможность так задать оператор Z , чтобы за один такт рекурсии на n -м шаге произошло параллельно несколько элементарных изменений в объекте $Y(n-1)$. В приведенном примере пятиугольник строится на каждом выделенном на предыдущем такте отрезке, т.е. усложнение объекта на n -м такте идет двумя путями: за счет изменения формы объекта, полученного на предыдущем такте, и за счет увеличения числа возможностей, по которому может такое изменение происходить.

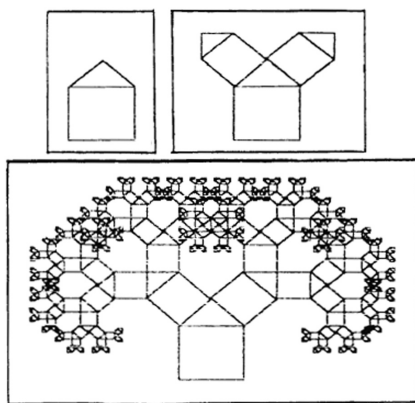


Рис. 1.19 – Фрактал «капуста».

Основное достоинство рекурсивного определения состоит в том, что оно позволяет в компактном виде дать описание некоторого объекта или класса объектов. Это предопределяет удобство использования рекурсивных определений для человека, как средства экономного представления информации о сложном явлении. Однако программистам, например, известно, что рекурсивно определенные программы оказываются часто неэффективными (в смысле использования вычислительных ресурсов), несмотря на свою кажущуюся простоту и компактность. Это происходит от того, что в компьютере используется фактически не само рекурсивное определение, а некоторая его преобразованная форма, на достижение которой и затрачиваются основные средства. Действительно, человек, увидев определение фрактала (1.8), будет действовать следующим образом: он возьмет элементарный объект 0-го порядка и будет достраивать к нему пятиугольники 1-го порядка и т.д., пока хватит терпения. Совсем иначе вынужден действовать компьютер. Получив задание построить фрактал 10-го порядка, он определит, какие действия следовало бы выполнить при наличии фрактала (9) и запомнит их, определит то же самое для фрактала (8) и т.д., пока не дойдет до фрактала (0), который ему известен. На этом этап декомпозиции задачи или, как говорят, сведения будет закончен. И лишь теперь начнется этап композиции, т.е. выполнения запомненных действий, как это имело место у человека. Человек действовал таким образом, что постоянно уточнял результат, полученный на предыдущем шаге. Машина же вместо конструирования объекта по предъявленному закону Z и элементарному описанию (эталоноу) A вынуждена заниматься долгим сведением исходного определения к приемлемой для выполнения предписанных операций форме. Таким образом, схема (1.7) при практическом использовании оказывается неконструктивной в том смысле, что она не приспособлена для автоматического конструирования описанного объекта. Изменим ее форму.

Отметим, что для выполнения вычисления машине пришлось преобразовать схему рекурсии (1.7), выразив в правой ее части каждое вхождение $Y(m)$ через $Z(m, Y(m-1))$ т.е.

$$\left. \begin{aligned} Y(0) &= A, \\ Y(n) &= Z(n, Z(n-1, Z(\dots(1, Y(0))\dots))) \end{aligned} \right\}.$$

Подставив $Y(0) = A$, получим, что функция Y в правой части не встречается, т.е. рекурсивность определения Y заменена рекурсивностью использования оператора Z (поскольку Z является аргументом при обращении к самому Z):

$$Y(n) = Z(n, Z(n-1, Z(\dots(1, A)\dots))). \quad (1.9)$$

Фактически (1.9) описывает иной, совершенно отличный от рекурсивного определения тип рекурсии. Баррон [51] называет его рекур-

сивным использованием функции (оператора), другое известное название [52, 53] – восходящее рекурсивное вычисление. Часто рекурсивное определение и рекурсивное вычисление смешивают. На самом деле их взаимосвязь четко определена. Как отмечает Тарьян: «Рекурсия – это метод решения задачи путем сведения ее к одной или более подзадачам. Подзадача сводится дальше тем же способом. В конечном итоге подзадачи становятся достаточно малыми, чтобы их можно было решить непосредственно. Затем решения меньших подзадач объединяются для получения решения большей подзадачи до тех пор, пока не будет получено решение исходной задачи» [54]. Выполняя в (1.9) предписываемые оператором Z действия (начиная с самого внутреннего его вхождения), получаем последовательные решения подзадач, а на n -м такте – искомым объект (решение задачи). Преимущество такого вычисления, согласно (1.9), состоит в том, что трудоемкий процесс сведения (декомпозиция задачи) передается человеку, за счет чего получаемое описание фактически есть одновременно и алгоритм вычисления. Например, вычисление факториала можно описать следующим образом:

$$n! = YM(n, YM(n-1, YM(...(2, YM(1,1))...)))$$

где $YM(a, b) = ab$.

Изобразив действие оператора Z в виде блок-схемы, получим рис. 1.20. Это не что иное, как схема обратной связи: A играет роль входного импульса; $Y(m)$ – отклик оператора $Z(m, \alpha)$, зависящего в общем случае от условного времени m ; τ – единичная задержка. Таким образом, вновь возвращаемся к исходному значению термина «рекурсия», хотя на самом деле мы получили сведение рекурсивного вычисления к итерации.

Резюмируя, можно отметить следующее: во-первых, (1.9) сохраняет все преимущества рекурсивного определения (1.7), поскольку для получения объекта достаточно задать начальный объект (эталон) и закон его преобразования, в общем случае зависящий от номера такта, $m - Z(m, \alpha)$, $\alpha \in A$, но уже не зависящий от определяемого объекта Y .

Во-вторых, построение сложного объекта описывается простым алгоритмом, т.е. получаемое описание не только компактно, но и легко программно реализуемо, поскольку программированию подлежит лишь решение элементарной задачи $Z(m, \alpha)$; этапы конструирования объекта выполняются автоматически.

В-третьих, схема может применяться как для описания традиционных числовых функций, так и для конструирования сложных иерархических объектов, уточняемых на каждом шаге рекурсии. Нас интересует такой случай этого применения, когда в качестве эталона A выступает некая структура, описывающая обрабатываемые данные. Рекурсивное описание этой структуры в форме (1.9) позволяет обрабатывать представленные ею данные «сверху-вниз», т.е. уточняя на каждом шаге полученные ранее результаты.

Перейдем теперь к описанию рекурсивных структур. Заметим, что с помощью схем (1.7), (1.9) можно описывать множество объектов. Рассмотрим, например, как задается бэкусовой форме целое положительное число: «Запись (цифра)::=0|1|...|9 определяет класс (цифра), как состоящий из вариантов 0,1,...,9. Теперь можно определить более сложные конструкции:

(целое без знака) ::= (цифра) | (целое без знака) (цифра) .

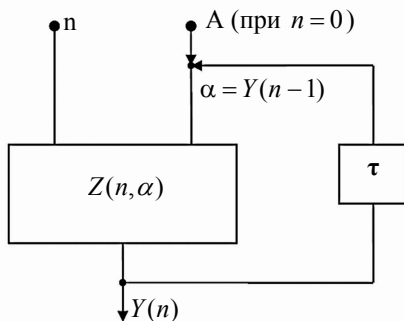


Рис. 1.20. Схема рекурсивного вычисления.

Это рекурсивное описание целых чисел. Слегка видоизменив это определение, получим описание целого числа на множестве строк символов по схеме:

$$\begin{aligned}
 \text{Целое (однозначное)} &= \text{цифра} \\
 \text{Целое (n-значное)} &= \text{целое} \\
 ((n-1)\text{-значное}) &\text{ с приписанной справа цифрой,}
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

где цифра есть символ из множества $\{0, 1, 2, \dots, 9\}$.

Описание (1.10) не дает возможности построить ни одного конкретного числа, если неизвестен по крайней мере один объект, принадлежащий множеству цифр. Если же известно, что такое цифры, например (цифра) ::= 0 | 1 | ... | 9, то возникает возможность подстановки в схему различных цифр и в различной последовательности, чтобы получать различные числа. Таким образом, определение (1.10) описывает не отдельный объект типа «целое число», а любой объект из множества целых чисел, поэтому его можно также трактовать как определение целого класса объектов.

Такое определение описывает только структуру отдельного объекта из определяемого класса, наполнение же этой структуры конкретной информацией дает в результате конкретный объект. Структуру объекта будем изображать в виде графа $G(S, R)$, где S – множество вершин, R – множество дуг. Дуга графа соответствует применению опе-

ратора Z ; вершина обозначает один из множества возможных вариантов подстановок конкретных объектов. Это множество обозначим B . В рассматриваемом примере с числом дуга означает приписывание очередной цифры, а вершина – одну из десяти цифр, т.е. $B = \{0,1,\dots,9\}$. Тогда (1.10) задает следующую структуру числа:

$$\begin{array}{ccccccc} \cdot & & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \hline 1\text{-я цифра} & & 2\text{-я} & & 3\text{-я} & \dots & n\text{-я цифра.} \end{array}$$

Если на каждом такте рекурсии оператор Z применяется несколько раз, то получаем более сложные, иерархические структуры. Например, если предположить, что в качестве эталона A (1.8) могут выступать различные геометрические фигуры (пятиугольники или многоугольники) с двумя выделенными сторонами, то на n -м шаге будем получать различные фигуры, однако структура у них будет одна и та же – бинарное дерево, поскольку именно на двух выделенных сторонах происходит очередное построение.

Введение и популяризация понятия фрактал лишь наглядный частный случай, ничего не добавляющий к программируемой технологии синтеза информационных объектов.

Этот процесс иллюстрирует две стороны взаимнооднозначного соответствия по Кантору – множества точек в различно-мерном пространственном представлении (соответствия точек куба квадрату и отрезку). Более того, и часть эквивалентна целому: например, множество чисел натурального ряда сопоставимо со множеством квадратов этих чисел соответственно:

$$\begin{array}{l} 1, 2, 3, 4, 5, \dots; \\ 1, 4, 9, 16, 25, \dots \end{array}$$

«Я вижу это, но не верю этому!», - заявил Г. Кантор, когда доказал теорему.

Именно рекурсивная запись этих процессов иллюстрирует возможность по части воспроизводить целое.

В терминах взаимно однозначного соответствия возможно и решение проблемы «квадратуры круга» рис. 1.21. [55].

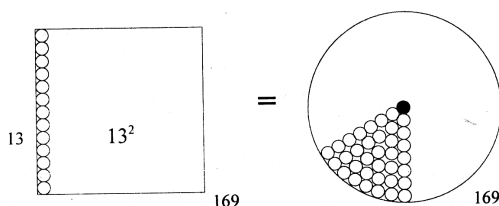


Рис. 1.21. Решение задачи о «квадратуре круга» методом симуляции.

Другой подход представления структурной сложности последовательностей нулей и единиц, предложенный В. И. Арнольдом [56], предполагает построение графа, соответствующего заданной бинарной последовательности, и исследование его свойств, где предлагается в качестве меры (структурной) сложности битовой последовательности использовать геометрические свойства графа. Приведем геометрическую интерпретацию структурной сложности объектов.

При этом последовательность считается более сложной, если она принадлежит циклу, который имеет большую длину. В случае если две последовательности имеют циклы одинаковой длины, то сложнее та, которая дальше от цикла. Так, на рис. 1.22 показано сравнение сложности, где последовательности 001, 100, 010 оказываются сложнее последовательностей 000 и 111.

Заметим, что определение сложности по Колмогорову как длины программы включает в себя и приведенный выше способ оценки сложности.

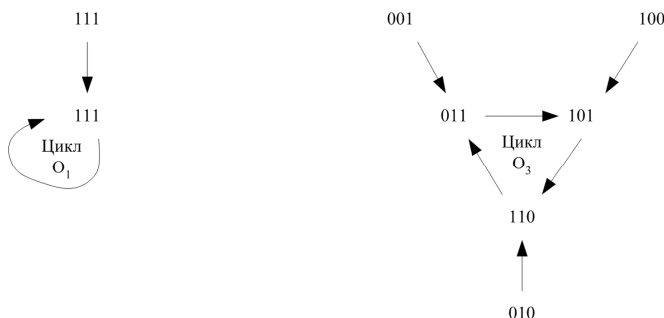


Рис. 1.22. Иллюстрация сложности двоичных последовательностей по В. И. Арнольду.

1.11. Избыточность и семантика ПТК

Закономерность и хаос. Два подхода к оценке «сложности»: число вычислений и длина программы, приводят к неоднозначной интерпретации понятия информации.

Именно неоднозначная интерпретация понятия информации приводит к следующим парадоксам. Исходно понятие хаоса всегда использовалось как синоним трудно прогнозируемого события, которое требует для своего анализа большого объема информации. Однако К. Лоренц в [57] показал, что поведение даже «простой детерминированной системы» может быть трудно прогнозируемо. Но вот появляются книги и статьи с названием «Теория хаоса», несмотря на то что по отдельности

эти два слова – антиподы и семантически противоречат друг другу: **или хаос, или теория**.

Для устранения понятийной неоднозначности между закономерностью (теорией), случайностью (хаосом) и сложностью их описания (представления), А. Н. Колмогоров и предложил **объектную идентификацию** конкретного процесса, а не его некий интегральный показатель. Например, «белый шум» – синоним хаоса, его интегральная (энергетическая) оценка – равенство мощности по спектру. Оценка же сложности компьютерной реализации конкретного процесса типа «белого шума» зависит от вида алгоритма и способности программиста.

Известно, что широко используемые компьютерные программы формирования псевдослучайных последовательностей используют простой итерационный детерминированный процесс.

Например, реализация функции `rand()` в стандарте ANSI-C имеет следующий вид:

<pre>unsigned long next=1; int rand(void) { next=next*1103515245+12345; return((unsigned int)(next/65536)%32768); }</pre>	«белый шум»
---	-------------

Традиционный подход Шеннона основан на интегральной оценке процессов: «белый шум», «бернуллиевская последовательность» и др., - и оперирует лишь вероятностными (статистическими) характеристиками.

Физическая интерпретация этих информационных характеристик сводится к энтропии как мере неупорядоченности физической системы, учитывающей лишь интегральные характеристики (давление, температура и др.), а не поведение отдельной частицы.

Программная же реализация, воспроизводящая «белый шум» с позиций вычислимых (частично рекурсивных) функций, и есть программируемая технология. Это означает, что множество программ разной длины (реализующих разные алгоритмы с помощью различных технологий программирования) могут давать эквивалентные результаты. Такое компьютерное и интегральное (энергетическое) представление «белого шума», иллюстрирует различную оценку **сложности**.

Сложность, энтропия и информация. Различные подходы к оценке сложности определяют и соответствующие им определения понятия информации:

- энтропийная (ансамблевая) оценка информации по Шеннону;
- идентифицируемая (объектная) оценка информации по Колмогорову.

Рассмотрим более подробно определение оценки сложности ПТК. Опираясь на отдельные положения алгоритмической теории

А. Н. Колмогорова, мы адаптируем их в соответствии с современными возможностями компьютерных технологий.

«...Далеко не все применения теории информации по Шеннону укладываются разумным образом в интерпретацию ее основных понятий. Я думаю, что потребность в придании определенного смысла выражениям $H(x|y)$ и $I(x|y)$ в случае индивидуальных объектов (персональная идентифицируемость) x и y , не рассматриваемых как реализации случайных испытаний с определенным законом распределения, была давно понятна многим, занимавшимся теорией информации».

Объектная (персонально идентифицируемое) оценка информации им определена через условную энтропию $H(x|y)$ **как минимальную длину записанной в виде последовательности нулей и единиц “программы” P** , которая позволяет построить объект x , «имея в своем распоряжении объект y

$$\begin{aligned} H(x|y) &= \min l(P) \\ A(P, y) &= x \end{aligned} \quad (1.11)$$

«Точное проведение этого замысла опирается на общую теорию «вычислимых» (частично рекурсивных) функций, т. е. на общую теорию алгоритмов во всей их общности.

*Для конечных последовательностей нет резкой грани между «закономерным» и «случайным». Строгое различие между «бернуллиевскими» и «небернуллиевскими» последовательностями возможно **лишь после предельного перехода для бесконечных последовательностей нулей и единиц**. Мы практически исходим из допущения, что так устроены помещаемые в руководствах по математической статистике и теории вероятностей «таблицы случайных чисел» [24].*

По сути, эта фраза является ключевой для понимания принципиального различия математического моделирования с опорой на бесконечность и компьютерной программируемой технологией получения конечного результата как нумерации объекта, используемая в качестве идентификации (см. пример «белый шум»).

Иначе, либо «вероятность», которая априорно задана или определена только на бесконечном числе экспериментов, либо «детерминированность» как закономерность, порожаемая программой.

Заметим, что существует класс последовательностей, которые нельзя определить программой короче, чем их длина. Чтобы их задать, надо их просто выписать. Никакой более просто выражаемой закономерностью их нельзя определить.

«...Действительно, если энтропия $H(x|l, k)$ близка к этой верхней границе, то не существует существенно более экономного способа задания x , чем указать l , k и номер последовательности x среди всех C_l последовательностей с данными l и k . Примерно так мы и представляем себе “бернуллиевские последовательности”, в которых отдельные

знаки “независимы”, возникая с некоторой “вероятностью”.

Мы видим, таким образом, что некоторый аналог понятия “бернуллиевской” последовательности может быть сформулирован **на языке алгоритмической теории информации**.

Отсутствие закономерности по здравому смыслу является признаком случайности...»

Следовательно, и понятие хаоса может быть определено через сложность – длину программы, порождающей его описание, что синонимично требуемому количеству информации.

Рассмотрим более подробно понятие «программируемой сложности». Под программируемой сложностью информационного объекта понимается эквивалентная сложность программы порождения данного объекта, причем под программой понимается любое однозначное описание (уникальный идентификатор), позволяющей его построение.

Программируемую сложность можно интерпретировать через следующие виды структурной сложности:

- позиционное представление многомерных данных,
- рекурсивное представление данных (включает, в том числе, и представление повторяющихся элементов объекта).

Приведем исходные ограничения, наложенные на архитектуру и формализм компьютера, которые поддерживают его наилучшие характеристики как счетчика-«вычислителя». Эти ограничения вытекают из основных универсальных формализмов – машины с неограниченными регистрами (МНР). Согласно[58]:

«...Машина с неограниченными регистрами является исполнителем, представляющим собой простой «идеализированный компьютер». Идеализация состоит в том, что каждый отдельный реальный компьютер ограничен как величиной чисел, которые поступают на вход, так и размером памяти (необходимой для запоминания промежуточных результатов), МНР лишена этих ограничений. Машина с неограниченными регистрами имеет неограниченно большую память, ячейки которой будем называть регистрами и обозначать $R_1, R_2, R_3, \dots$. Каждый регистр в любой момент времени содержит неотрицательное целое число.

В список предписаний МНР входит четыре команды: команда обнуления $Z(n)$; команда прибавления единицы $S(n)$; команда переадресации $T(t, n)$ и команда условного перехода $J(t, n, q)$. Команды обнуления, прибавления единицы и переадресации называются арифметическими.

Алгоритмом называется конечная непустая последовательность команд из списка предписаний МНР, начинающаяся с команды с номером 1.

Производя вычисления по данному алгоритму, МНР изменяет содержимое регистров памяти в точном соответствии с командами ал-

горитма. Исходное состояние памяти, то есть последовательность чисел в регистрах перед началом вычислений, называется начальной конфигурацией...»

Несмотря на то что МНР является универсальной, **формализм этой машины ограничен аксиоматикой натуральных чисел как на уровне представления данных, так и на уровне выполняемых операций.**

Команда $S(n)$ является чисто арифметической вычислительной операцией.

В таком формализме в принципе все понятия «чисел» могут быть подменены понятием «идентификатор». В частности, **оператор J** может быть определен как переход по условию **идентификации неразличимости**, но арифметическая команда $S(n)$ не будет иметь прямого аналога для работы с неарифметическими идентификаторами (см. глоссарий).

Рассмотрим «безарифметическую» альтернативу вычислительному формализму МНР и покажем его преимущества.

Согласно выражению К. Шеннона [59], для последовательности из M символов

$$I = -MK \sum_{j=1}^{i=Z} p_j \ln p_j, \quad (1.12)$$

где Z – количество символов в алфавите; p_j – их априорные вероятности, K – коэффициент пропорциональности, связанный с термодинамическим коэффициентом.

При использовании кодирования количество символов выходной последовательности является монотонной функцией от информации I .

Пусть S – входная последовательность символов; m – их количество; P – программа, порождающая последовательность S ; $l(P) = n$ – длина программы. P , согласно терминологии [23], есть терминальная программа, т.е. программа, не требующая входных данных и формирующая выходные данные, т.е. последовательность S .

Назовем «сложной» последовательностью S , такую что

$$n = l(P_{m+1}) = l(P_m) + 1. \quad (1.14)$$

Назовем «простой» последовательностью S , такую что

$$n = l(P_{m+1}) = l(P_m). \quad (1.15)$$

При этом $n \leq m$, так как в самом худшем случае P просто непосредственно хранит элементы S .

Введем следующее формальное представление для построения терминальных программ.

Оператор OUT x – вывод символа x .

Оператор $C(a, b)$ – повтор следующих a операторов b раз.

Каждый из операторов является единичным символом в алфавите P . Данный формальный язык является лишь одним из возможных и показывает особенности ПТК.

Классическая теория об энтропийном кодировании, учитывающая статистические характеристики и на которой построены методы компрессии (алгоритмы Хаффмана, LZW и др.), утверждает, что $l(P)$ должна быть неубывающей функцией при увеличении m (т.е. она не может быть сложнее «сложной» или проще «простой»).

Приведем пример простой битовой последовательности, чтобы наглядно представить зависимость длины ее терминальной программы как оценки структурной сложности без строгих математических доказательств.

Рассмотрим последовательность S следующего вида:

$$S_{10} = ABBBBABBBB.$$

Терминальная программа ее представления (кодирования) P выглядит следующим образом:

C(3,2)
OUT A
C(1,4)
OUT B

$$\min l(P) = 4.$$

Для $S_9 = ABBBBABBB$ терминальная программа P выглядит следующим образом:

OUT A
C(1,4)
OUT B
OUT A
C(1,3)
OUT B

$$\min l(P) = 6.$$

На рис. 1.23 приведена зависимость кратчайшей длины программы от длины входной последовательности S . Согласно же выражению (1.11), длина закодированного сообщения является неубывающей функцией от длины кодируемого сообщения.

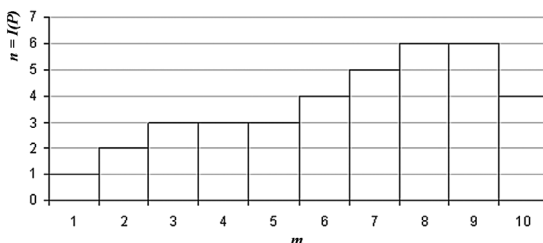


Рис. 1.23. Зависимость длины $l(P)$ от длины входной последовательности.

Это говорит о том, что **количество информации по К. Шеннону не является критерием оценки сложности терминальной программы уникальной идентификации при кодировании и декодировании информационного содержания.**

Приведем следующую иллюстрацию структурной и программируемой сложности.

Рассмотрим два различных растровых изображения ели размером 300x250 (исходный размер файла 224 Кб).

После сжатия этих изображений архиватором ZIP получаем файлы размером 31 Кб, 16 Кб и 12 Кб соответственно для фотографии и рисунков. Данный пример показывает, что все эти три объекта эквивалентны с точки зрения семантики восприятия, но имеют разную емкость битового представления.

Полученная компрессия определяется технологией реализации архиватора и может отличаться в больших пределах для разных алгоритмов компрессии и их реализации, что и предопределяет **технологическую сложность**. Различие в размерах двух полученных файлов определяется **структурной сложностью** – зависимостью между отдельными элементами изображения (пикселями), закономерность расположения которых эффективно компрессируется алгоритмами энтропийного сжатия (Хаффман, LZW и др.) и которые использует, в том числе, архиватор ZIP.

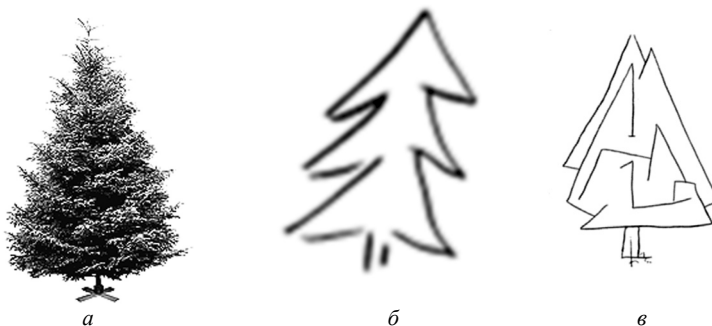


Рис. 1.24. К понятию структурной и программируемой сложности.

Обратим внимание, что существенное управление программируемой сложностью – длиной программы обеспечивается оператором «идентификации неразличимости» согласно критерию ε-тождественности. С точки зрения семантического понятийного восприятия (узнавания) – понятийной идентификации все три образа ели (рис. 1.24): природная (а), схематическая (б) и авторская работа (в) [60] - эквивалентны.

1.12. Информация, масса и энергия. Бит vs джоуль

Предположение Р. Фейнмана о возможности уменьшения размера устройств до уровня атомов: «...биты должны отстоять один от другого на пять атомов...», опубликованное в 1959 году в работе [61], сегодня реализуется под названием «**нанотехнология**».

Возникает вопрос: почему «пять»? Ведь по прошествии времени может измениться не только уровень развития технологий, для которого было определено данное минимальное соотношение на основе физических законов, но, например, и сам способ идентификации битов, что позволит говорить о еще меньших размерах элемента памяти.

Независимо от конкретных количественных оценок «бита» как носителя информации, все более очевидной становится связь информационнх и природных физических характеристик - массы и энергии.

Бит как единица информации обретает массу и энергию, а следовательно, «стоимость» информации можно и взвесить, и оценить энергией, которая требуется для ее получения, передачи и сохранения.

Приведем основные понятия теории информации в интерпретации А. Н. Колмогорова [24]. Исходным будем считать понятие условной энтропии объекта x при заданном объекте y , $H(x|y)$, которую можно интерпретировать как количество информации, необходимое для задания объекта x в обстановке, когда объект y уже задан.

Обозначая через ϕ «заведомо заданный объект», получим безусловную энтропию: $H(x|\phi) - H(x)$.

Информация, содержащаяся в объекте y относительно объекта x , определяется формально при помощи вычитания $I(x|y) = H(x) - H(x|y)$.

Рассмотрим переход от условной энтропии объекта к **объектной идентификации**, постулируемой А. Н. Колмогоровым как минимальная длина записанной в виде последовательности нулей и единиц «программы» P , которая позволяет построить объект x , имея в своем распоряжении объект y , то есть $H(x|y) = \min l(P)$.

Это позволяет перейти от энергетического – энтропийного критерия к битовому представлению программы как трансляции: «**данные – программа – данные**», которая изменяет концепцию передачи данных.

При цифровой связи передаваться могут не только последовательности данных, то есть битовое представление, но и непосредственно терминальные программы, порождающие эти данные также в их битовом представлении [36].

Приведем физическую эквивалентность осуществления передачи импульсов как битового потока и энергии, требуемой для их передачи. При этом **бит** уже следует воспринимать и как информационный, и как физический носитель элемента памяти.

Заметим, что в то же время, когда А. Н. Колмогоров (1962 г.) сформулировал ПТК, Дж. Пирс [26] предложил наглядную схему связи между битом и его энергией через производимую им работу. В соответствии с физическими законами для определения состояния системы при температуре T потребуется энергия

$$W = 0.693k \log_2 n = kT \ln n, \quad (1.16)$$

где W – энергия; k – постоянная Больцмана; n – количество возможных состояний; T – температура.

Минимальная мощность P передатчика при скорости потока S бит/с

$$P = 0,693kTS. \quad (1.17)$$

Пример связи объектной и ансамблевой энергетической идентификации проявляется в телекоммуникационных системах, где слабым звеном является ограниченность объема передаваемых битов энергетической емкостью аккумулятора.

Возьмем для примера сотовый телефон. Общеизвестно, что его батареи аккумуляторов хватает на определенное время работы во время разговора.

На что расходуется эта энергия? Если не учитывать вспомогательных функций типа вывода на экран, подсветки и других непосредственно не относящихся к передаче голоса функций, то она расходуется на питание процессора, звуковых цепей и передатчика.

В связи с тем что в телефонах формата GSM передача производится в цифровом формате, то время работы батареи зависит от числа переданных битов данных:

$$P = \frac{kIS(I)}{t} \quad (1.18)$$

где P – потребляемая мощность (Вт); l – длина информационного сообщения (бит); t – время передачи (с); $S(I)$ – функция сложности информационного сообщения, показывающая во сколько раз можно компрессировать сообщение; k – коэффициент (Вт·с/бит).

Присутствие функции $S(I)$ требуется из-за того, что передаются не все биты оцифрованного звукового сообщения, так как использование в канале передачи процессоров позволяет компрессировать входной поток. Значение $S(I)$ показывает, насколько эффективно алгоритм компрессии, реализованный на процессоре, сжимает входные данные.

При этом необходимо учитывать, что для более эффективной компрессии в общем случае требуется более быстродействующий процессор, который в свою очередь потребляет большую мощность. Естественно, что потребляемая процессором мощность также зависит от его особенностей и технологии его производства.

Для современной технологии производства (2007 год) и типовых

параметров мобильного телефона (скорость GSM потока 13 кбит/с, емкость аккумулятора 800 мА/ч, время работы в режиме разговора 4 ч) можно определить, что для передачи 1 бита данных требуется порядка 0.06 мДж энергии.

Это позволяет предложить следующее концептуальное соотношение бит - энергия:

$$I \leq KE = Kmc^2, \quad (1.19)$$

где E – энергия, необходимая для передачи сообщения в I бит; K – коэффициент Колмогорова, показывающий эффективность выбранной $I(P)$ программы: форматов и протоколов хранения и передачи данных, а также уровень развития технологии и КПД оборудования. Увеличение скорости процессоров и памяти за счет освоения новых физических элементов приближает K к теоретически возможному пределу формирования физически устойчивых состояний «1» и «0». Масса же информационного носителя, (например, CD-R диск) одинакова до записи («чистый» диск) и после записи (диск с данными), масса вещества не изменяется от изменения состояния при записи информации. Приведенная формула показывает не изменение массы при наличии и отсутствии информации, а минимальную массу носителя для сохранения требуемого объема данных (задача хранения) или эквивалент минимальной энергии для передачи требуемого объема данных. Тогда для передачи сообщения потребуется мощность PS Вт, при скорости равной S бит/с, если для передачи одного бита данных требуется затратить P Дж (с учетом мощности передатчика и энергопотреблением его вспомогательных узлов). Следовательно, использование алгоритмов компрессии позволяет уменьшать длину сообщения, и использовать меньшую скорость передачи, что уменьшает требуемую мощность.

Вместе с тем эффективность различных программ компрессии в среднем пропорциональна количеству операций над данными, что в сочетании с необходимостью выполнять передачу данных в реальном времени требует применения процессора соответствующей производительности. Производительность процессора, в свою очередь, также пропорциональна потребляемой им мощности. Отсюда очевидно, что оптимизация параметров «скорость – энергия» зависит от предметной ориентации и типа информационного сообщения.

При этом производительность канала передачи данных (полоса пропускания) зависит от производительности процессора.

Канал с процессором способен справиться с определенным объемом данных в единицу времени:

$$SP^\gamma \ln E \geq D_{\max},$$

где S – физическая скорость канала (без процессора);
 P – производительность процессора;
 γ – эффективность архитектуры;

E – эффективность кодирования;

$D_{\max}$ – максимальная скорость потока данных источника.

На рис. 1.25, 1.26 показано существование оптимальных параметров – точки наиболее эффективной компрессии (и скорости передачи) данных с точки зрения энергопотребления. Такая точка может быть определена для конкретного типа данных, программ компрессии и используемой элементной базы, на которой реализованы передатчик и компрессор.

Сплошной линией показано энергопотребление передатчика без использования компрессии, пунктирной – энергопотребление с учетом компрессии.

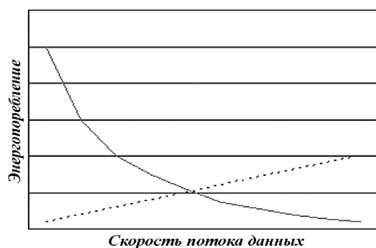


Рис. 1.25. Соотношение скорости передачи данных и энергопотребления при использовании компрессии данных.

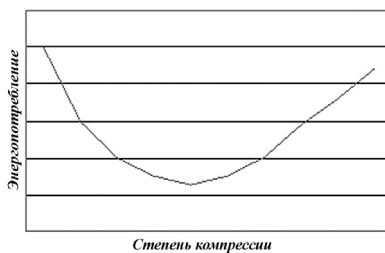


Рис. 1.26. Зависимость общего энергопотребления (передатчик + процессор) от степени компрессии данных.

Дополнительные возможности радикального снижения энергопотребления связаны с переходом на процессоры, выполненные по другой технологии и архитектуре, или разработки принципиально иных программ компрессии.

Но именно физическое существование взаимосвязи между информацией и энергией:

$$I \leq KE = Kmc^2,$$

позволило фантасту А. Кларку предвидеть, что на смену доллару придет другой эквивалент мировой валюты – джоуль энергии.

1.13. Нанотехнология, суперкомпьютеры и симуляторы

Обратим внимание на следующие рекламные публикации, отражающие современный этап развития цифровых технологий.

«Авиация России получит самый мощный суперкомпьютер для российской авиационной промышленности.

...Суперкомпьютер, запуск в промышленную эксплуатацию которого в НПО «Сатурн» планируется уже в конце 2007 г., предназначен для проведения конструкторских расчетов. По словам руководителей

предприятия, в результате проведенного конкурса на поставку вычислительного комплекса было выбрано решение от IBM, пиковая производительность которого превысит 8 терафлоп.

Предпроектная работа, продолжавшаяся около полугода позволила определить требования к конфигурации системы: суперкомпьютер, состоящий из 168 двухпроцессорных блейд-серверов, будет построен на базе двухъядерных процессоров Intel Xeon с тактовой частотой 3 ГГц. Емкость дискового пространства системы хранения данных составит 20 ТБ.

В «Сатурне» уверены, что уже в середине следующего года ресурсы вычислителя будут задействованы на 100%, так как в настоящее время на НПО реализуются несколько крупнейших в России проектов по созданию новых авиационных и газотурбинных двигателей, наземных энергетических и газоперекачивающих установок...»¹

Те же, кто «наигрался» с суперкомпьютерами за предыдущие тридцать лет пошли дальше: согласно [62], «...Компания Lockheed Martin по заказу ВВС США приступила к модернизации истребителей A/OA-10 Thunderbolt в конфигурацию A-10C с цифровой, а не аналоговой, платформой. Понятие *Situational Awareness* не имеет «устоявшегося» перевода на русский и обозначает принцип комплексного представления разнородной информации, привязанной как к пространству (то есть географически достоверной), так и ко времени (представляемой в реальном масштабе времени). Комплексное представление данных позволяет качественно повысить степень восприятия географической и тактической информации операторами систем вооружений и командованием, повысить быстроту выработки решений и их качество с одновременным снижением нагрузки на человека».

Развитие технологий вызвано развитием «интеллекта» как способности справиться с управлением все более скоростными микродинамическими процессами. Нанотехнологии – следующий технологический уровень, требующий адекватного интеллекта, как естественного, так и искусственного, для своего осуществления.

Соразмерность атомных взаимодействий требует и соответствующего инструмента. По крайней мере управление на сегодняшнем уровне требует профессионально адаптированного взаимодействия с суперкомпьютером, а не с его освоением.

При этом исходное понятие суперкомпьютера как универсального скоростного вычислителя показывает его неспособность решать многие возникающие телекоммуникационные и информационные проблемы пользовательского интерфейса, семантического анализа, информационной безопасности, скоростного широкополосного пространственного виденья, формирования и распространения знаний.

¹ИТАР-ТАСС, 24.08.07.

Крылатые фразы о необходимости квантового компьютера проблемы не решают, так как заранее неизвестно, какие функции того или иного суперкомпьютера требуются.

Большинство современных суперкомпьютеров занимают верхние строчки рейтинга благодаря высокой производительности в одном типе вычислений. В решении остальных задач, более приближенных к реальным нуждам и требующих передачи огромных массивов разнообразных структур данных, – эти компьютеры далеко не так хороши.¹ При этом никто не ставит вопрос о различных предназначениях суперкомпьютеров. Для большого класса реальных современных задач, например логистики, не требуются терафлопы вычислительных операций.

Существует множество задач, где используемые технологии «универсального компьютера» оказываются не вполне адекватными. Как правило, это задачи, не связанные с вычислениями.

Инфология [17], семиология [20] и задачи информационного поиска требуют иной архитектуры, чем принято для «универсальных вычислительных» машин [63].

Информационной системой назовем систему, использующую в качестве входных, выходных или справочных данных тексты на естественном языке.

На современном этапе информационная система работает с текстовыми данными (при этом отдельными информационными элементами являются синтаксические структуры текста – слова, предложения). Основные операции при этом: сопоставление элементов, перемещение элементов, косвенная и ассоциативная адресация, сортировка элементов, поиск элемента по условию (по ключу или по фрагменту ключа).

Основной единицей при работе с текстовыми данными является идентификатор понятийной единицы – слова (IDWord). При этом под понятийной единицей понимается нормализованная форма (единственное число, именительный падеж и т.п.). Такая форма представления и хранения данных является необратимой. При необходимости взаимно однозначного восстановления текста по его представлению используется представление пары идентификаторов слово-словоформа (IDWord, IDForm).

Классический полнотекстовый поиск – это поиск вхождения введенной фразы во всех известных системе документах (или в терминах идентификаторов – поиск наличия идентификаторов понятийных единиц запроса среди идентификаторов различных документов).

Сопоставление (установление эквивалентности) элементов является базовой операцией, реализующей принцип идентификации неразличимости, для которого, как показал Лейбниц, достаточно логического базиса. Перемещение и адресация элементов выполняются устройством

¹ Sun построит самый быстрый суперкомпьютер – webzona.ru/novosti/2007_06_26_sun_digital.htm

управления памятью (так как зависят от физической реализации памяти) и не являются непосредственной функцией процессора. Сортировка и поиск являются комбинацией операций циклического сопоставления и перемещения элементов. Эти перечисленные функции эффективно могут быть реализованы на специализированном процессоре, а не на традиционной архитектуре.

Разбор на лексические и синтаксические конструкции традиционно осуществляется при помощи формализмов конечных автоматов, регулярных выражений или автоматных грамматик, для которых формализм фон Неймана далеко не самый оптимальный в смысле эффективности реализации.

Понимание необходимости адаптировать структуру суперкомпьютера под функциональное предназначение хорошо представлено в работе [64]. Приведем основные положения этой работы.

1.14. Физический принцип «машины Тьюринга»

Упомянутое выше предположение Р. Фейнмана «о минимально возможном размере устройств» приводит к необходимости подробнее рассмотреть, что же происходит при вычислительных, информационных и симуляционных операциях на физическом уровне.

В работе [64] показана принципиальная возможность неразрывной совместимости программируемой технологии мира Тьюринга и эквивалентного ему физического процесса, наподобие того, как мир фурье-анализа соответствует резонансному колебательному контуру.

«..Гипотеза Черча-Тьюринга является неявным физическим предположением. Это предположение может быть представлено в явном виде как физический принцип: “каждая конечно реализуемая физическая система может быть полностью промоделирована (simulation) универсальной модельной вычислительной машиной, оперирующей конечными средствами”. Классическая физика и универсальная машина Тьюринга по причине непрерывности первой и дискретности второй не подчиняются этому принципу, по крайней мере в выше приведенной строгой форме.

Однако интуитивно вычислительная машина – это любая физическая система, динамическая эволюция которой переводит ее от одного из множества «входных» состояний к одному из множества выходных состояний. Эти состояния помечены некоторым каноническим образом, машина готовится в состоянии с заданной меткой входа, и затем, вслед за некоторым движением, измеряются выходные состояния. Для классической детерминированной системы измеренная метка выхода есть определенная функция f заданной входной метки; более того, значение этой метки может быть в принципе измерено внешним

наблюдателем («пользователем») и тогда говорят, что машина «**вычисляет**» функцию f .

Две классические детерминистические вычислительные машины «вычислительно эквивалентны» относительно заданных разметок их входных и выходных состояний, если они вычисляют одну и ту же функцию по отношению к этим разметкам.

Не существует чисто логических причин, по которым нельзя до бесконечности строить все более мощные вычислительные машины. И для которых существует какая-либо функция, находящаяся за пределами вычислимого множества любой физически возможной машины.

Хотя логика и не запрещает физическое вычисление произвольных функций, кажется, что такой запрет накладывает физика. Как хорошо известно, разработчик вычислительной машины быстро достигает точки, когда добавление нового оборудования не меняет множество функций, вычисляемых машиной (при идеализации неограниченности памяти); более того, для функций, отображающих множество целых чисел Z в себя, множество $C(M)$ всегда содержится в $C(T)$, где T — универсальная вычислительная машина Тьюринга (Тьюринг, 1936). Само $C(T)$, также известное как множество всех частично-рекурсивных функций, перечислимо и, следовательно, бесконечно меньше, чем множество всех функций из Z в Z . Черч (1936) и Тьюринг (1936) предположили, что эти ограничения на то, что может быть вычислено, вызваны не состоянием дел в конструировании вычислительных машин или нашими способностями в изобретении моделей вычислений, а являются универсальными. Это называется гипотезой Черча-Тьюринга. По Тьюрингу:

Любая функция, «вычисляемая в естественном» смысле, может быть вычислена универсальной машиной Тьюринга. (1.1)

Обычный нефизический подход к (1.1) интерпретирует это, как квазиматематическое предположение о том, что все возможные формализации интуитивного математического понятия «алгоритм» или «вычисление» эквивалентны друг другу. Но мы увидим, что это может также рассматриваться как утверждение нового физического принципа, которое будем называть принципом Черча-Тьюринга, чтобы отличить его от других следствий и переформулировок утверждения (1.1). Гипотеза (1.1) и другие формулировки, которые существуют в литературе (см. интересное обсуждение разнообразных версий, Хофштадтер (Hofstadter), 1979) [43, 16], не рассматриваются со стороны физических принципов как законы термодинамики или гравитационный принцип эквивалентности. Она имеет такой же эпистемологический статус, как и другие физические принципы.

Вычислительная машина M может полностью моделировать

(perfect simulation) физическую систему Y относительно данной разметки их входов и выходов, если для M существует программа $\pi(Y)$, которая делает M вычислительно эквивалентной Y относительно этой разметки. Другими словами, $\pi(Y)$ превращает M в «черный ящик», функционально неотличимый от Y » [64].

Заметим, что при переводе англоязычного понятия «perfect simulation» на русский язык как «*полное моделирование*» привело к существенной потере основной идеи работы [64].

Для инженерных цифровых технологий существенно, что существует реализация программы $\pi(Y)$ или «программы» P , как ПТК и на универсальных вычислительных машинах, и при аппаратной реализации на физических элементах, например МРЗ, МРЕГ и др., а также в перспективе и на квантовых компьютерах.

*«Физический принцип Черча – Тьюринга:
Каждая конечно реализуемая физическая система
может быть полностью моделирована универсальной
модельной вычислительной машиной, оперирующей
конечными средствами.»* (1.2)

Эта формулировка имеет более физический смысл, чем собственный способ формулировки Тьюринга (1.1), так как она ссылается исключительно на физические понятия, такие как «измерение», «подготовка» и «физическая система», которые уже существуют в теории измерений. Она избегает терминологий типа «естественно определенный», которые не ложатся в существующую структуру физики.

Понятие «конечно реализуемые физические системы», о которых говорится в (1.2), должно включать любой физический объект, над которым возможно проведение эксперимента. «Универсальная вычислительная машина», с другой стороны, должна быть ТОЛЬКО идеализированной (но теоретически разрешенной), конечно-определимой моделью. Разметки, на которые есть неявная ссылка в (1.2), также должны быть конечно-определимыми.

Ссылка в (1.1) на особую универсальную машину (Тьюринга) по необходимости заменена в (1.2) на более общее требование того, что эта машина действует «конечными средствами». Понятие «конечных средств» может быть определено аксиоматически без ограничительных предположений о форме физических законов. Поскольку мы можем представить, что действие вычислительной машины требует последовательности шагов, длительность которых имеет ненулевую нижнюю границу, то она действует «конечными средствами», если (i) только конечная подсистема (хотя и не всегда одна и та же) находится в движении на протяжении одного шага, (ii) движение зависит только от состояний конечного числа подсистем и (iii) правило, которое определяет движение, может быть конечно задано в математическом смысле (например, как целое число)» [64].

В иной интерпретации это было в 1960-х годах сформулировано А. Н. Колмогоровым как алгоритмическая теория.

Физический принцип Черча-Тьюринга (1.2) – эмпирическое утверждение. Речь идет о принципиальной возможности **симуляции** – о подмене физической системы (природы) «функциями вычислимыми в естественном смысле», которые могут быть в принципе «вычислены» реальной физической системой, а не **математической моделью**.

Обычный критерий эмпирического статуса теории – это возможность ее экспериментальной фальсифицируемости (Поппер (Popper), 1959) [65], т.е. существование потенциальных наблюдений, которые противоречат ей. Но поскольку наиболее глубокие теории мы называем «принципами», то мы говорим об опытах только через другие теории; критерий фальсифицируемости должен в каждом случае применяться косвенно.

Например, принцип сохранения энергии сам по себе не может противоречить какому-нибудь подходящему наблюдению, поскольку он не содержит определения процесса измерения энергии.

Никакой конечный процесс не может уменьшить энтропию системы или температуру конечно-реализуемой физической системы до нуля (1.3)

Он также не является опровержимым непосредственно: никакое измерение температуры конечной точности не может отличить абсолютный ноль от произвольно малой положительной температуры. Аналогично, поскольку число возможных программ для универсального компьютера бесконечно, то, вообще говоря, никакой эксперимент не может установить, что ни одна из них не может моделировать систему, претендующую быть контрпримером (1.2).

Часто утверждается, что любая «разумная» физическая (в противоположность математической) модель вычисления, по крайней мере для детерминированного вычисления функций из Z в Z , эквивалентна тьюринговой. Но это не так: нет никакой априорной причины, по которой физические законы должны следовать ограничениям математических процессов, которые мы называем «**алгоритмами**» (т. е. **вычислимыми функциями $C(T)$**).

С другой стороны, не очевидно а priori, что любая из известных рекурсивных функций вычислима в физической реальности.

Причины того, почему возможно сконструировать, например, электронный калькулятор и почему возможны арифметические действия в уме, не могут быть найдены в математике или логике. Причина состоит в том, что законы физики «оказались» такими, что разрешают существование физических моделей для операций арифметики, таких как сложение, вычитание и умножение. Если бы это было не так, то эти известные операции были бы невычислимыми функциями. Уверенность в том, что машины, например калькуляторы, на самом деле вычисляют

арифметические функции, которые им предписано вычислять, состоит не в том, что возможно «проверить» их ответы, так как это крайне бесполезный процесс сравнения одной машины с другой.

Quis custodiet custodies ipsos?¹ Настоящая причина заключается в том, что существует детальная физическая теория, которая была использована при их конструировании. Эта теория, включающая утверждение о том, что абстрактные функции арифметики реализованы в Природе, – эмпирическая.

«Программирование» как симулятор (universal quantum simulator) бесконечной последовательности состоит в настройке его в соответствии с желаемыми динамическими законами и затем в приведении его в требуемое начальное состояние. Но механизм, который позволяет выбирать произвольные динамические законы, не моделируется. Динамика настоящего «компьютера» должна быть зафиксирована раз и навсегда, а программирование должно состоять целиком в подготовке его в подходящее состояние (или смешанный случай).

Современные CPU (Central Processing Unit) содержат в себе схемы, оптимизирующие и меняющие код «на лету», предсказание ветвлений и массу других ухищрений, которые призваны выжать максимум производительности из работающих приложений. Несмотря на такие ухищрения, они базируются на «арифметическом базисе операций» и решение современных IT-задач на таких процессорах, подобно просьбе решить физическую задачу специалисту в математике: он обладает принципиальной возможностью сделать это, но делать это будет не самым эффективным образом.

Как альтернативу «арифметическому процессору» можно привести концепцию «симуляционного процессора» (SimPU – Simulating Processing Unit).

В отличие от технологии виртуализации и процессоров преобразования кода, позволяющих за счет микропрограмм выполнять команды другого процессора (например, Code Morphing Software в процессорах Transmeta), SimPU – симуляционный процессор имеет основной набор команд, направленный не на арифметические действия, а на прямую работу с идентификаторами.

Такой процессор можно рассматривать как гибридный программно-аппаратный CPU.

Подчеркнем, что если для «арифметического процессора» основным показателем является чистая производительность, то для «симуляционного процессора» нужно оценивать эффективность преобразований (операций трансляции и симуляции).

Использование **вычислительной** (матлабовской) технологии компьютерного моделирования во многих случаях не эффективно. Так, например, методы компьютерного моделирования (вычисления) изме-

¹ Кто будет стеречь самих сторожей?

нений в кристаллических структурах под воздействием внешних факторов обладают серьезным недостатком: даже для кристаллов с относительно небольшим количеством атомов в элементарной ячейке число возможных вариантов структур очень велико и для их моделирования требуется много времени и мощная вычислительная техника. Существует принципиально иной подход – компьютерный метод непосредственной симуляции процесса, т.е. его построение. Это позволяет моделировать изменения в кристаллических структурах более быстро и эффективно и не требует использования сверхмощных компьютеров. С этой целью и разрабатываются так называемые эволюционные алгоритмы. Они моделирует структуру кристаллов при заданных параметрах (температуре, давлении и пр.) без использования экспериментальных данных. Программа воспроизводит возможные варианты структур поэтапно, причем на каждом этапе полученные варианты сортируются по энергетическим состояниям и для дальнейших вычислений используются только энергетически стабильные структуры. Результат работы программы – кристаллическая структура, стабильная при заданных условиях. Этот метод быстрее и достовернее чем вычисления через математические модели (анализа) физического процесса и может использоваться для **синтеза структур кристаллов** с большим количеством атомов в элементарной ячейке. Благодаря такому **симуляционному методу** удалось за очень короткое время смоделировать структуры кристалла известняка CaCO_3 при температуре и давлении, которые наблюдаются в мантии земной коры. При высокой температуре и давлении известняк превращается в арагонит – именно структура арагонита и была получена в результате моделирования по новому методу, что доказывает его достоверность. При повышении давления кристалл арагонита изменяет структуру и превращается в пост-арагонит, структуру которого до сих пор не удавалось получить с помощью традиционных программ компьютерного моделирования. Симуляционное построение структур кристаллов применяется при создании новых фармацевтических, сверхтвердых и иных материалов.

Квантовые компьютеры

Любая существующая общая модель вычислений – эффективно классическая. Это означает, что полное описание ее состояния в каждый момент эквивалентно определению множества чисел и все эти числа в принципе измеримы. Однако квантовая теория утверждает, что систем с таким свойством не существует.

Действительно, моделировать состояние микрочастиц, которое описывается многомерной волновой функцией с числом переменных, равным числу частиц в системе, да еще и зависящей от времени, даже на современном и мощнейшем компьютере, по-видимому, довольно проблематично. Поэтому, как считал Фейнман, было бы естественно

моделировать физическую реальность, которая подчиняется квантовым законам.

Основная идея квантового вычисления состоит в том, чтобы хранить данные в ядрах атомов, изменяя их ориентацию в пространстве. Элементарная ячейка такого компьютера получила название квантовый бит (quantum bit = кубит). В отличие от привычной нам единицы информации – бита (binary digits = bits), который может принимать только два значения или «0», или «1», квантовый бит, в соответствии с принципом неопределенности, постулируемым квантовой механикой, может находиться одновременно в состоянии и «0», и «1».

Таким образом, если классическое вычислительное устройство, состоящее из L вычислительных ячеек, способно выполнять одновременно L операций, то для квантового устройства размером L кубит количество выполняемых параллельно операций будет равно 2 в степени L .

Мы не рассматриваем продолжение текста статьи [64], так как автор сосредоточивает внимание на свойствах универсального квантового компьютера.

Основная цель данной работы – привлечь внимание к специфике применения программируемой технологии для цифровой технологии обработки сигналов, изображений и текстов, а также их эффективной передачи, хранения и поиска.

Направленность на массовый аудиовизуальный и текстовый мониторинг предъясняет необходимость разработки новых методов и программ под постоянно расширяющийся класс задач.

1.15. Структурная схема ПТК

На рис. 1.27 приведена структурная схема программируемой технологии, где последовательно выделены следующие этапы цифровой обработки и передачи ДАННЫХ.

Источник данных (различные виды и формы информационного содержания) – семантика данных → конвертер (двоичный битовый поток) → кодер (логический уровень) → программируемый процессор (физический уровень) → канал (физическая среда), → декодер (логический уровень) → конвертер → восстановление семантики исходного информационного содержания → **потребитель**.

Основным объектами инфокоммуникационного взаимодействия являются источник и потребитель информационного содержания, а также среда инфокоммуникационного обмена.

Основным показателем инфокоммуникационного взаимодействия является скорость битового потока (или битовый объем данных для задач хранения). Физическая среда может не обеспечивать требуемой про-

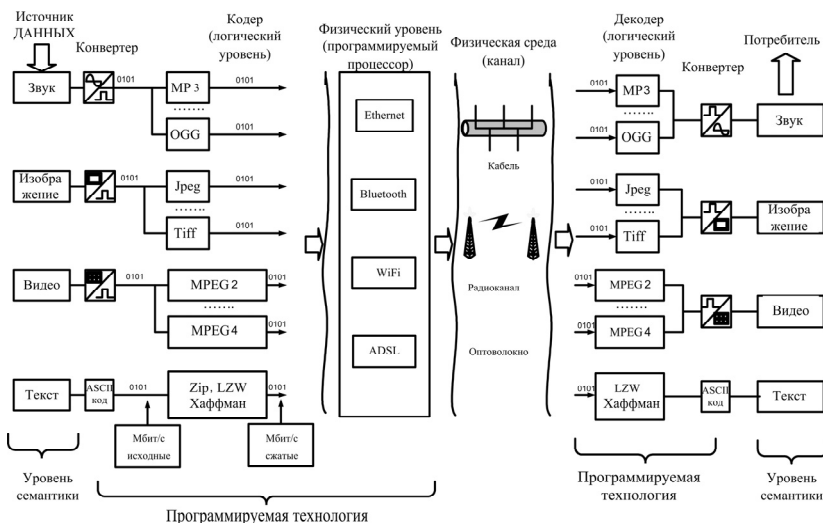


Рис. 1.27. Принцип программируемой технологии.

пускной способности для имеющегося битового потока. Классическая теория связи в этом случае говорит о невозможности решения задачи обмена данными при поставленных условиях. В свою очередь, программируемая технология за счет динамической компрессии битового потока с помощью пары кодер-декодер позволяет обойти это ограничение, превысив пропускную способность физического канала. При этом важной становится форма семантического содержания и тип передаваемых данных, которые определяют такую информационную характеристику, как «избыточность», т.е. потенциальную сжимаемость битового потока.

С другой стороны, программируемая технология позволяет использовать обобщенную инфокоммуникационную среду (ее логический и физический уровни) для одновременной передачи разнородных типов данных. Единственным условием возможности такой передачи является то, что сумма скоростей всех передаваемых потоков с учетом их информационной избыточности не должна превосходить пропускной способности **обобщенной инфокоммуникационной среды – виртуально-го канала**.

Естественно, что с помощью дополнительных средств должна обеспечиваться: идентификация потребителя (как, например, в сетях TCP/IP), разделение разнородных потоков, обеспечение защищенности от несанкционированного доступа, надежность доставки и т.д. Это означает интеграцию (целостность) среды инфокоммуникации относительно видов и форм содержания передаваемых данных.

Рассмотрим блок-схему программируемой технологии более подробно. Первоначально исходные данные подаются на конвертер, преобразующий их в двоичные последовательности. Такой конвертер физически может представлять различные устройства или программы (в случае звука – это АЦП, в случае оцифрованного изображения, представленного в виде матрицы пикселей, – это программа, осуществляющая развертку и т.д.), но всех их объединяет – единый вид выдаваемых данных, который позволяет абстрагироваться от типа источника.

Следующий этап логического уровня – кодер, осуществляющий преобразование исходного битового потока в новый битовый поток, обладающий требуемыми характеристиками (объем/скорость данных, точность представления, защита от сбоев, защита от несанкционированного доступа). На этом этапе возможна обработка данных даже при незнании их источника. Так, большинство алгоритмов «энтропийного сжатия» способны в среднем уменьшать объем/скорость потока за счет учета повторяемости отдельных фрагментов. Однако, следует заметить, что действительно хорошие параметры компрессии могут быть достигнуты только в случае использования особенностей семантико-смыслового содержания исходных данных. И только затем битовый поток на физическом уровне свертывается и включается в транспортный протокол, обеспечивающий корректную работу аппаратной части передачи по физическому каналу. На этом этапе оптимизируется лишь скорость передачи битовой последовательности по физическому каналу.

При приеме данных производятся обратные преобразования (декодирование, дешифрование, декомпрессия и т.п.), восстанавливающие из битового потока исходную форму и семантику.

Рассмотрим принцип построения виртуальных сверхширокополосных систем связи на примере функционирования ADSL (рис. 1.28).

Общее название технологий DSL возникло в 1989 году, когда впервые появилась идея использовать аналого-цифровое преобразование на абонентском конце линии, что позволило бы усовершенствовать технологию передачи данных по витой паре медных телефонных проводов. Технология ADSL была разработана для обеспечения высокоскоростного доступа к интерактивным видеослужбам (видео по запросу, видеоигры и т.п.) и не менее быстрой передачи данных (доступ в Интернет, удаленный доступ к JIBC и другим сетям).

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Loop – асимметричная цифровая абонентская линия) – модемная технология, предназначенная для решения проблемы последней мили. Преобразует стандартные абонентские телефонные аналоговые линии в линии высокоскоростного доступа. Технология ADSL обеспечивает скорость «входящего» потока данных в пределах от 1.5 до 24 Мбит/с и скорость «исходящего» потока данных от 640 до 3.5 Мбит/с. ADSL позволяет передавать данные со скоростью 1.54 Мбит/с на расстояние до 5.5 км по одной витой паре проводов.

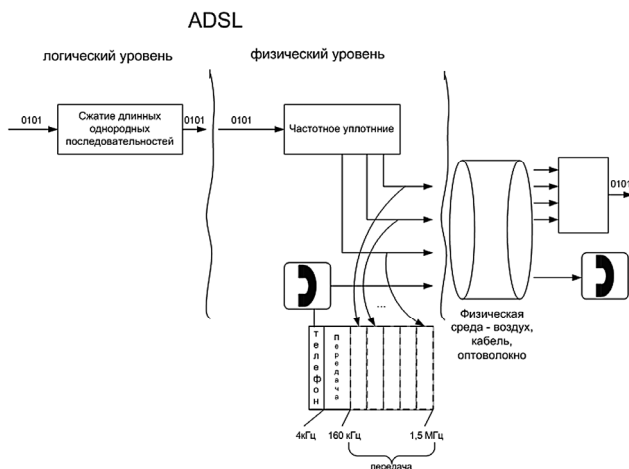


Рис. 1.28. Принцип функционирования ADSL.

Скорость передачи порядка 6-8 Мбит/с может быть достигнута при передаче данных на расстояние не более 3.5 км по проводам диаметром 0.5 мм.

Технология ADSL использует метод разделения полосы пропускания медной телефонной линии на несколько частотных полос (также называемых несущими). Это позволяет одновременно передавать несколько сигналов по одной линии. При использовании ADSL разные несущие одновременно переносят различные части передаваемых данных. Этот процесс известен как частотное уплотнение линии связи (Frequency Division Multiplexing – FDM). При FDM один диапазон выделяется для передачи «восходящего» потока данных, а другой – для «нисходящего» потока данных. Диапазон «нисходящего» потока в свою очередь делится на один или несколько высокоскоростных каналов и один или несколько низкоскоростных каналов передачи данных. Диапазон «восходящего» потока также делится на один или несколько низкоскоростных каналов передачи данных. Кроме этого, может применяться технология эхокомпенсации (Echo Cancellation), при использовании которой диапазоны восходящего и нисходящего потоков перекрываются и разделяются средствами местной эхокомпенсации.

Технология предусматривает резервирование определенной полосы частот для обычной телефонной связи (или POTS – Plain Old Telephone Service). Одним из основных преимуществ ADSL над другими технологиями высокоскоростной передачи данных является использование самых обычных витых пар медных проводов телефонных кабелей. ADSL образует «наложенную сеть». При этом дорогостоящей и отнимающей много времени модернизации коммутационного оборудования не требуется.

Следует рассматривать две скорости передачи данных: «нисходящий» поток (передача данных от сети к компьютеру) и «восходящий» поток (передача данных от компьютера в сеть).

Технология ADSL позволяет полностью использовать ресурсы линии. При обычной телефонной связи используется около одной сотой пропускной способности телефонной линии. Технология ADSL устраняет этот «недостаток» и использует оставшиеся 99% для высокоскоростной передачи данных. При этом для различных функций используются различные полосы частот. Для телефонной (голосовой) связи используется область самых низких частот всей полосы пропускания линии (приблизительно до 4 кГц), а вся остальная полоса используется для высокоскоростной передачи данных.

ADSL открывает совершенно новые возможности в тех областях, в которых в режиме реального времени необходимо передавать качественный видеосигнал. К ним относится, например, организация видеоконференций, обучение на расстоянии и видео по запросу. Технология ADSL позволяет телекоммуникационным компаниям предоставлять частный защищенный канал для обеспечения обмена информацией между пользователем и провайдером.

1.16. Цифровая технология инфокоммуникации

Следует прежде всего уточнить, что понятие **цифровая технология** (цифровой звук, телевидение, канал передачи данных и др.) используется нами как синоним «хай-тек» и нанотехнологии, в отличие от исходного понятия цифры как количественного символа числа.

Поэтому большинство книг, учебников и словарей, в названиях которых употребляется «цифровая обработка», не отражают терминологической специфики современного понятия цифровой (пиксельной), в основе которой лежат логические операции и операция идентификации, а не арифметические вычисления. Вследствие этого возникают специфические терминологические понятия.

В разделе «Нанотехнология, суперкомпьютеры и симуляторы» уже приводился пример, когда для новой технологии «Situational Awareness», внедряемой в американском самолете, не существует устоявшегося термина в русском языке.

Для понимания сути ПТ приведем необходимые терминологические понятия.

Программируемая технология (ПТ) – способ представления (инфология) и обработки (дейталогия) данных в виде битового представления.

Битовое представление – представление данных в двоичном виде. Битовое представление требует неизменности данных при передаче, сохранении и последующем считывании, а методы хранения и передачи опираются на уникальность (объектную однозначность) принципа «идентификации нераз-

личимости» Г. Лейбница (при аналоговом представлении данных возможна лишь «ансамблевая» близость). Способ организации битового представления определяется форматом.

Формат – способ записи информационного описания для получения битового представления, а также формальные соглашения для обеспечения записи и считывания данных. Формат может содержать некоторые преобразования данных (MP3, JPEG), а также может быть «прозрачным», т.е. битовое представление этого формата будет совпадать (возможно, исключая служебные заголовки) с непосредственными отсчетами сигнала (WAV, RAW). В этом случае важно отличать информационное описание объекта, допускающее, например, загробление значений, повреждение данных при передаче от битового представления, изменение значений которого недопустимо.

Терминальная программа – программа в ее битовом представлении, формирующая в качестве выходного результата сигнал (данные) и, как правило, не использующая входных данных.

Передача данных – использование физической среды для передачи данных в пространстве.

Хранение данных – использование материального носителя для сохранения данных (передача данных во времени).

Носитель данных – материальный объект, в котором возможно выборочное изменение состояний отдельных элементов, считывание их состояния. Носитель данных должен обеспечивать неизменность своих элементов в течение времени хранения.

Среда передачи данных – физическое соединение, по которому осуществляется передача данных от одного устройства к другому. Физическая сущность среды влияет только на максимально возможное число передаваемых бит в секунду. Заметим, что это эквивалент понятия полосы пропускания, но не требующий спектральных представлений.

Соотношение между уровнями цифрового представления информационного объекта приведено на рис. 1.29.

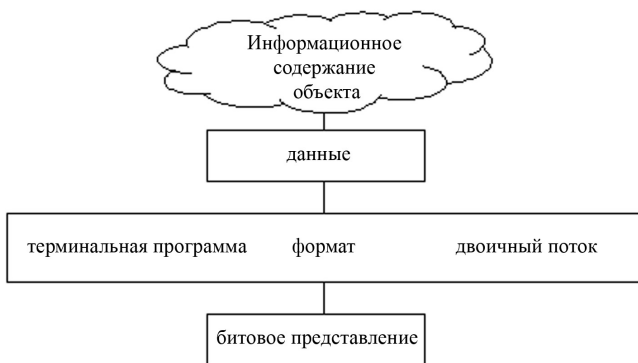


Рис. 1.29. Уровни представления информационного содержания объекта.

Любое битовое информационное представление объекта дает возможность реализации таких задач, использующих идентификацию неразличимости, как:

1. Уникальная идентификация – восстановление информационного содержания объекта в соответствии с исходной точностью представления данных: сигнала, текста, изображений, аудио- и видеопотоков.

2. Множественная идентификация информационного объекта (отнесение объекта к некоторому классу). Данная задача используется в большинстве практических приложений при работе с информационными описаниями (как в технических приложениях, так и в повседневной жизни). Например, формат представления звука может быть ориентирован либо на речь, либо на музыку для различной аудитории. Это приводит к разной требуемой битовой скорости передачи данных.

Идентификация неразличимости Лейбница – компьютерно-ориентированный процесс идентификации связан с процессами классификации, ассоциации, анализа, синтеза и базируется на принципе идентификации неразличимости, который был сформулирован Г. Лейбницем [47] следующим образом: «Два объекта считаются неразличимыми, если все их свойства общие». Этот принцип наиболее активно используется при индексном ключевом поиске в компьютерных системах (поиск по однозначному совпадению), в котором в качестве ключа выступают буквы, слова, символы и т.д.

Для этой цели Лейбниц предложил «универсальную характеристику» – конгруэнтность $ABC \sim AXC$ (рис. 1.30).

Для компьютерных информационных систем можно дать следующую интерпретацию. A – исходная посылка – множество известных манифестанту-пользователю знаний, упакованных и упорядоченных в его компьютерном представлении, из которого он и актуализирует конкретный объект – денотат B и получает X как список из множества эквивалентных объектов из иных информационных источников C , значения которых и сигнифицирует, т.е. раскрывает информационное содержание денотата B , который раскрывается через X в том и только в том случае, если информационные источники B текстуально идентифицируемы, полны, достоверны и внутренние непротиворечивы. Проблема C – это проблема адекватности энциклопедических знаний.

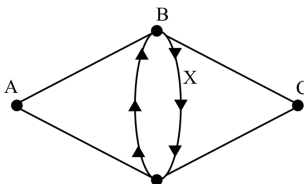


Рис. 1.30. Принцип идентификации неразличимости Лейбница.

Рассмотрим другую интерпретацию идентификации неразличимости, которая подходит для решения большинства конкретных задач.

Дано множество идентификаторов объектов k_N , где N – натуральный ряд чисел; каждый объект характеризуется совокупностью p параметров

(признаков, атрибутов) $\{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kp}\}$. Будем рассматривать только дискретные значения x_{ki} , спроектированные на интервал $[0;1]$. Тогда декартово произведение p одномерных интервалов дает p -мерный единичный гиперкуб и каждый объект принадлежит определенному кванту p -мерного дискретного пространства, объем и местоположение которого определяются декартовым произведением p отрезков, каждый из которых в свою очередь определяется дискретным значением параметра (признака, атрибута) на одномерном интервале.

Очевидно, что все объекты, принадлежащие одному и тому же кванту, неразличимы по определению (у этих объектов все признаки имеют одни и те же дискретные значения). Следовательно, одна из наиболее наглядных иллюстраций принципа идентификации неразличимости есть иерархический способ дробления каждого параметра, что приводит к динамическому представлению p -мерного дискретного пространства. Рис. 1.31 иллюстрирует принцип идентификации неразличимости.

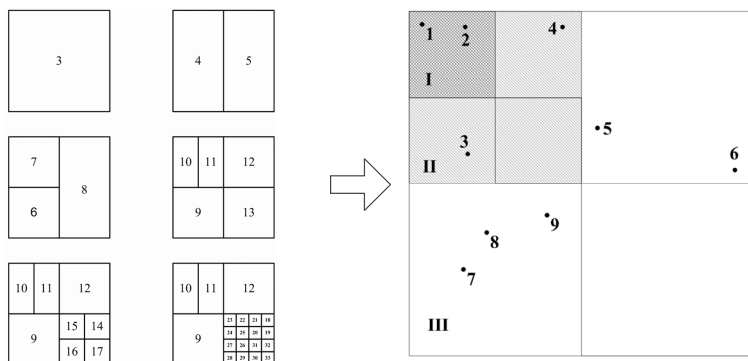


Рис. 1.31. Принцип идентификации неразличимости на основе заданного дробления дискретного пространства.

I уровень: 1 2

II уровень: 1 2 3 4

III уровень: 1 2 ... 9

Информационное представление – запись значений параметров идентифицируемых объектов (процессов) для сохранения или передачи данных об этих объектах. Если идентифицируемый объект - динамическая система, то информационное представление есть его состояние, подготовленное к записи или передаче другому объекту. Набор параметров объекта, значения которых возможно использовать, определяется сенсорными возможностями человека или технического устройства. Потенциальная длина информационного описания – бесконечность, т.е. возможно неограниченное увеличение количества параметров и увеличение точности их представления. Информационным представлением (идентификацией) могут являться: данные (например, представленный непосредственно цифровыми отсчетами сигнал), формат (полученное с помощью алгоритма упорядочивание), терминальная программа.

Это развивающийся процесс, который постоянно стремится уточнить универсальную характеристику Г. Лейбница для информационных процессов – принцип «идентификации неразличимости» как итерационный процесс. В англоязычной литературе эти понятия, как правило, рассматриваются в рамках инфологии и дейталогии.

Виртуальная полоса – виртуальная среда передачи данных, организованная на базе физической среды, которая превосходит физическую полосу по какому-либо критическому для данного применения параметру (скорости, надежности) в обмен на другой менее критический для задачи параметр. Виртуальная полоса может быть организована средствами ПТ. Пример реализации виртуальной полосы – xDSL-технология.

Перенос – основной принцип в ПТ, обозначающий преобразование некоего типа данных в соответствии с некоторой задачей, в рамках их битового представления. Данный термин имеет столь же фундаментальное свойство в программируемой технологии, как понятие "обратная связь" в кибернетике.

Трансляция – реализация переноса с использованием конкретных технологических возможностей (матрицы трансляции и т.д.) Используется, например, в алгоритмах компрессии данных.

Симулирующий процессор (SimPU – Simulating Processing Unit) – альтернатива «арифметическому процессору». Симулирующий процессор имеет основной набор команд, направленный не на арифметические действия, а на прямую работу с идентификаторами.

Арифметический процессор – процессор, основными базисными операциями которого являются действия над целыми числами.

Если для «арифметического процессора» основным показателем является чистая производительность, то для симулирующего – нужно оценивать эффективность преобразований (операций трансляции).

Кодек – КОдер-ДЕКОдер, программная или аппаратная реализация компрессаторов информационного содержания.

«Великая трагедия науки – убийство красивой теории безобразным фактом».

Т. Хаксли

«Я хотел бы иметь силу сделать мой голос слышным от одного края королевства до другого и даже по всей земле; я готов кричать изо всех сил».

Жан Мелье

«...ухо обманывает нас, считая колебания воздуха свойством звенящего колокольчика...».

В. Брюсов

Глава 2. Математические модели анализа сигналов

2.1. Дискурс о математических моделях анализа сигналов

Наиболее глубокий все расширяющийся водораздел между теорией и практикой анализа сигналов проистекает из неоднозначной совместимости **физической** и **физиологической** природы сигналов и их **математических** теорий представления и моделирования – анализа априорно неизвестных свойств сигнала аксиоматически ограниченной непрерывной аналитической функцией.

Приведенные эпиграфы подчеркивают семантику отличий и несовместимости понятий теории (связи и информации) описания сигнала, физического процесса его транспортировки (свойства электромагнитного поля) и восприятия этого сигнала – «звуком колокольчика».

Другими словами, между открытиями – теориями, расширяющими научную картину мира, изобретениями инновационных технологий и интеллектом мозга с психофизиологическими свойствами биологических сенсоров постоянно возникают несоответствия, требующие смены устоявшихся традиций.

Современные компьютерные инфокоммуникационные технологии вбирают в себя и интегрируют эти процессы. Для эффективной компрессии и высокоскоростной цифровой передачи данных организуется

виртуальное расширение канала связи для транспортировки данных, например IP-технология, ADSL и др.

Возникает вопрос о применимости и адекватности математической модели «общей теории связи», в основе которой лежит лишь одно из свойств электромагнитного поля – «энергетическая» составляющая (минимизация среднеквадратичного отклонения – СКО) при резонансной идентификации «волновой» – спектральной составляющей.

Это был естественный процесс, исходя из достигнутых, доступных инженерно-технологических инноваций 19-го и середины 20-го веков.

Компьютер же 21-го века породил иную – программируемую цифровую парадигму коммуникационных технологий.

2.1.1. Фурье vs Вейерштрасс

Приведем кратко исторический экскурс развития теории и практики (технологии) связи:

И. Ньютон (1671 г. – использование понятия спектра для теории цвета),
А. М. Ампер (1822 г. – изобретение соленоида),
М. Фарадей (1831 г. – открытие явления электромагнитной индукции),
Дж. К. Максвелл (1865 г. – теория электромагнитного поля),
Г. С. Ом (1827 г. – открытие основного закона электрической цепи),
Дж. Генри (1842 г. – обнаружил колебательный характер у искрового разряда),
К. Доплер (1842 г. – установил зависимость частоты звуковых и световых колебаний от взаимного движения источника и наблюдателя),
Г. Р. Кирхгоф (1847 г. – установил закономерности протекания электрического тока в цепях),
Г. Л. Ф. Гельмгольц (1847 г. – сформулировал закон сохранения и превращения энергии в математической форме «о сохранении силы»).

Все они имели дело с сигналами как откликами протекающих физических процессов. Возникла естественная потребность представления взаимосвязи физических процессов с помощью неких математических форм – формул. Это привело к появлению профессии ученых по математическому моделированию физических процессов. И наипростейший ее представитель – Жан Батист Жозеф Фурье (1822 г. – книга «Основания гармонического анализа») сформулировал задачу представления некоего сигнала совокупностью заданных функций.

Однако класс таких сигналов оказался ограничен. К. Вейерштрасс представил свой контрпример недифференцируемости непрерывных функций в Берлинской академии 8 июля 1872 года.

Функция Вейерштрасса является самой ранней записанной **непрерывной недифференцируемой функцией**, и ее публикация в 1875 г. принята за точку отсчета кризиса математики.

Определение «бесконечного числа сингулярных точек в диапазоне, представляющем физические свойства», несомненно относится ко множеству Кантора, а последователи Вейерштрасса и Кантора создали огромную коллекцию множеств такого типа. Многие из них очень хорошо известны составителям математических игр, например «снежинка Коха» – наиболее простой вариант функции Вейерштрасса, предложенный Н. Кохом. Эту коллекцию множеств Н.Я. Виленкин назвал в своей книге «математическим музеем искусств». Другие, начиная с Генри Пуанкаре, называют ее «Галерея монстров».

Но еще раньше Леопольд Гюго (брат Виктора Гюго) рассмотрел телá, промежуточные между сферами и полиэдрами (с плоскими гранями). И «гюгомоидальная» геометрия, представленная в книге «Геометрические курьезы» математика Э. Фуррэ в 1907 году, ввела понятие эквидомоиды, которое на 50 лет опередило понятие фрактала.

Эквидомоиды лучше представляли естественные (природные) формы: линии берегов, поверхности гор, геометрию кристаллов и архитектуру зданий, например, парадомоид – это клиронс романской церкви.

Истинный объект эквидомодальной геометрии Л. Гюго также связан с проблемой непрерывности в математике.

«”...Нет ничего более естественного, чем мой бесконечный полигонизм. В действительности, ПРЯМОЛИНЕЙНАЯ траектория всякой молекулы, не будучи связанной с осью движения, доказывает, что прямолинейный и касательный (к траектории тела) элемент лежит незаметно в основе кривой вращения и просто остается скрытым в природе под видом многоугольника с бесконечным числом углов”, - писал Л.Гюго.

В 1913 году, почти через двадцать лет после его смерти, физик и нобелевский лауреат Жан Перрен задался тем же вопросом, исходя из аналогичных соображений по поводу микроскопического движения частиц, называемого броуновским. “Понятие непрерывности является результатом произвольного выбора из экспериментальных данных только тех, на которые направлено внимание”, – писал он в предисловии к своей книге «Атомы», знаменитой тем, что там обсуждается известная проблема протяженности берегов Британии (при измерении по карте она увеличивается с увеличением масштаба из-за того, что появляются новые и новые детали)» [66].

Цель этих абстрактных построений - показать, что не все функциональные описания верны, и правильнее было бы эту коллекцию рассматривать в разделе «музей науки» как катализаторы инноваций.

С нашей точки зрения это лишь историческое свидетельство эволюции технологий, а математика лишь интеллектуальная игра избранных – поиск наиболее компактного специфического языка символизаций, не противоречивших известным проявлениям природы. Красивые шарады типа квадратуры круга, уравнений Ферма, по-

иска логической непротиворечивости, исходящие лишь из заранее заложенных постулатов «правил игры», или мистические озарения – «игра в бисер» и др. - звенья одной цепи поиска закономерностей.

Будущий создатель теории множеств Г. Кантор на начальном этапе также не обошелся без попытки представления произвольного сигнала тригонометрическими функциями. Но лишь через 100 лет эмпирические исследования в области связи обнаружили существование квантованных, т. е. импульсных, помех типа «канторова множества», которые никак не следуют из традиционной математической модели спектральных преобразований фурье-анализа.

Поясним этот факт. При передаче сигнала в виде спектральных составляющих основной помехой действительно является энергетическое соотношение между спектрами сигнала и шума. Возможности и недостатки такого подхода достаточно доступно для разработки инженерных систем связи были рассмотрены в монографии А.А. Харкевича «Борьба с помехами» [67] и в [11].

При «цифровизации» же сигнала, т.е. при импульсной передаче «1» и «0», основная погрешность уже проистекает из существования помех в виде «канторова множества».

«Инженеров корпорации IBM ставила в тупик проблема шума в телефонных линиях, используемых для передачи информации от одной вычислительной системы к другой, когда электрический ток несет информацию в виде импульсов. Разумнее остановить выбор на сравнительно слаботочной связи, смириться с неизбежностью погрешностей и использовать статистику дублирования сигналов для исправления ошибки» [33].

Принцип различного проявления помех на качество аналоговой (волновой) и цифровой (импульсной) связи проиллюстрируем следующими рисунками (рис. 2.1, 2.2, 2.3) [68].

Цифровой сигнал, так же как и аналоговый, подвержен искажениям – частотным, нелинейным и шумовым воздействиям. Для аналогового сигнала это приводит к искажению формы несущей (рис. 2.1), непосредственно отвечающей за семантику сообщения, которая и превращает сигнал в музыку. Для цифрового же сигнала эти воздействия в меньшей степени приводят к искажениям и мало влияют на семантику передаваемого сообщения (рис. 2.3).

Цифровая (двоичная) запись и идентификация при воспроизведении обладает помехозащищенностью лучшей, чем аналоговая.

Высокое качество цифровой аппаратуры требовало больших затрат на технологическую реализацию такого подхода и ожидало появления иных электронных (немеханических, лазерных) принципов записи. Более того, требуется осознание и понимание иных фундаментальных основ функционирования цифровых технологий.

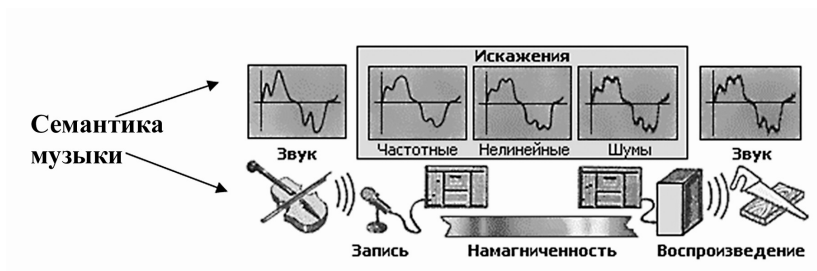


Рис. 2.1. Тракт аналогового магнитофона.

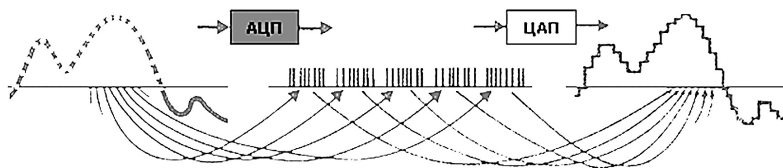


Рис. 2.2. АЦП и ЦАП.

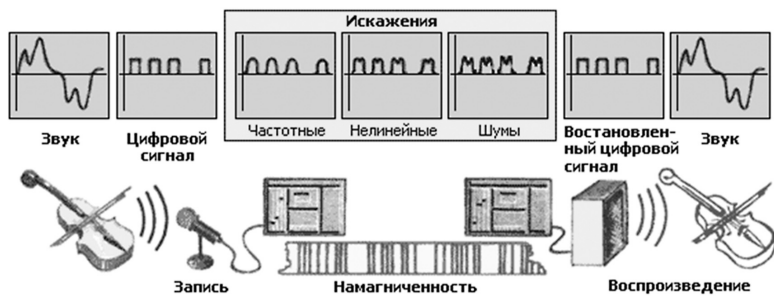


Рис. 2.3. Тракт цифрового магнитофона.

2.2. Математические модели общей теории связи (волновой)

Под сигналом понимается любая физическая, биологическая или иная природа порождения пространственно-временного, измеряемого отклика, фиксируемого в виде потока данных. Мы познаем окружающий нас мир посредством сигналов. Например, сигналом является зависимость тока от времени в электрической цепи $I(t)$, кардиограмма представляет собой пространственную развертку на бумаге временного ритма сердца. Профиль поверхности Земли или фотография – это простейшие представители двумерных сигналов $h(x,y)$, где h – высота профиля или интенсивность сигнала в точке с координатами x и y .

Фурье-анализ же один из наиболее распространенных способов функционального представления, который использует разложение сигналов по тригонометрическому базису функций Фурье. Смысл такого разложения заключается в том, что сигнал-функция $f(x)$ может быть представлен спектром, т.е. суммой гармонических колебаний:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx,$$

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega x} d\omega,$$

где $F(\omega)$ называют комплексным спектром функции, а значение $|F(\omega)|$ – спектром.

Для представления $f(x)$ интегралом Фурье необходимо и достаточно, чтобы

1) функция $f(x)$ была интегрируема на интервале $[-\infty, +\infty]$
 $\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx \leq k$ (т.е. интеграл сходилась);

2) на любом конечном отрезке функция была кусочно-гладкой;

3) в точках разрыва функции, ее интеграл Фурье определялся полусуммой левого и правого пределов в этих точках, а в точках непрерывности самой функцией $f(x)$.

Заметим, что в **теории связи** таким образом произвели подмену – трансляцию свойств **функций** на свойства **сигнала**, осознанно ограничивая анализируемый класс сигналов априорно, аксиоматически заданными свойствами функций.

Все сигналы конечной энергии, т.е. функции $f(x)$, удовлетворяющие условию $\int_a^b f^2(x) dx < \infty$, образуют пространство Гильберта

$L^2[a,b]$. В нем всегда можно выбрать бесконечный счетный набор функций $\psi_j(x)$, $j=1,2,\dots$, такой что $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_j(x) \cdot \psi_k(x) dx = \delta_{jk}$, где $\delta_{jk}=0$ если

$j < k$, а $\delta_{jj}=1$. Таких наборов существует бесконечно много, но выбираются лишь те, которые при определенных условиях образуют ортонормированный базис, тогда и только тогда сигнал конечной энергии можно представить в виде

$$f(x) = c_1 \psi_1(x) + c_2 \psi_2(x) + \dots = \sum_{j=1}^{\infty} c_j \psi_j(x), \quad (2.1)$$

где c_j – числовые коэффициенты – энергетический вклад соответствующей спектральной составляющей, которые вычисляются как $c_j = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_j(x) dx$.

Отсюда и происходят основные спекуляции и инновации теории связи. Выбор же функций Фурье, исходя из технологической реализуемости колебательного контура на емкостях и индуктивностях, предопределяет выбор синусно-косинусного базиса. При использовании же «1», «-1» более эффективными окажутся матрицы Адамара, а также функции Уолша, Радамахера и др.

Компьютерное моделирование сигнала – музыки (например, представление в формате MP3), в основе которого находится «как бы» дискретное косинусное преобразование (ДКП), заключается не только в быстрых алгоритмах, но и в «составлении» заранее заложенных табличных значений вместо последовательных вычислений. Наряду с этим учитываются и эвристические свойства психофизиологии восприятия человека – разные весовые характеристики в спектральной полосе. Именно в этом, в большей степени, состоит эффективность компрессии формата MP3.

Так что все возможные «чудеса» теории связи в «**технологическом исполнении**» являются следствием достаточно тривиальной записи (2.1). Адекватность же семантической составляющей определяется лишь в малой степени составляющими сигнал спектральными (волновыми) коэффициентами.

Возникает вопрос, насколько они (спектральные коэффициенты) отражают информационно-семантическое восприятие сигнала. Вопрос не возникал до появления компьютеров, вследствие отсутствия какой-либо технологической альтернативы колебательному контуру и фурье-анализу.

Имея априорно неизвестный сигнал $f(x)$ и набор $\psi_j(x)$, вычисляют коэффициенты c_j . Эта процедура и называется анализом, позволяя интерпретировать свойство исходного сигнала его спектральными коэффициентами c_j . И обратно, зная коэффициенты c_j , восстанавливается начальный сигнал по формуле (2.1), и такая процедура называется синтезом, реализующим концепцию компрессии и согласованной фильтрации.

Обратим внимание на знак ∞ , который принципиально недостижим при компьютерном моделировании, а следовательно, оп-

ределяет, кроме массы других ограничений, применимость и адекватность фурье-анализа.

Следующий шаг – замена аналоговой непрерывной функции $f(x)$, посредством функции Дирака на дискретную последовательность чисел. В соответствии с теоремой Найквиста-Шеннона-Котельникова такая подмена непрерывной функции дискретным и спектральным ее аналогом адекватна лишь с точки зрения минимизации среднеквадратической ошибки (СКО), т.е. только «энергетической» составляющей эквивалентности **сигнала и функции**.

Отсюда совершенно очевиден класс сигналов, обладающих максимальной эффективностью «эмпирической» компрессии. Это непосредственно базисные функции $\psi_j(x)$ и их аффинные преобразования, технологически реализуемые в виде резонансно-колебательных контуров. С практической точки зрения бесконечностей просто не существует, так же как и непрерывных функций. Любой сигнал задается конечной последовательностью точек с разрешающей способностью, определяемой достигнутой технологией измерения.

Точность аппроксимации лежит в основе прикладного аспекта сжатия сигнала, то есть в повышении скорости передачи сигнала по линиям связи. Действительно, условие конечности энергии позволяет обойтись конечным числом членов ряда разложения. При заданной погрешности ε их можно минимизировать путем подбора функций базиса $\psi_j(x)$.

Несмотря на кажущуюся простоту вышеописанного подхода, для его применения требуются некоторые уточнения. Последовательность функций необходимо упорядочить. Любую функцию из пространства $L^2[a, b]$ (постулат математических свойств, но не технологии) можно взять в качестве одного из элементов базиса, подобрав остальные с помощью процедуры ортогонализации. Однако это не решение проблемы, так как подбор функций базиса трудоемок, а передача информации о базисе на приемное устройство для последующего синтеза эквивалентна передаче начального сигнала. При необходимости передачи большого набора сигналов различной природы невыгодность этой процедуры очевидна.

Значит, требуется оптимизация по выбору базиса разложения, допустимой дискретизации и критерия адекватности функции сигналу.

Классическая (общая) теория связи трактует взаимосвязь между собственно сигналом и каналом связи как пропускную способность, исходя из некоторой максимальной полосы пропускания, ориентируясь лишь на такой параметр, как частота. Согласно этому, пропускная способность канала связи определяется хорошо известной формулой Шеннона:

$$C = F \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{N} \right), \quad (2.2)$$

где C – пропускная способность канала; P_c – средняя мощность сигнала; F – ширина полосы канала, N – мощность шума, равная $N_0 F$; N_0 – спектральная плотность гауссова шума.

Приступая к попытке дать теоретическое решение проблемы соотношения частотной полосы сигнала и ширины канала по частоте, рассмотрим перечень факторов, которые, как показывает практика, влияют на требования к частотной полосе канала. Вот примерный перечень этих факторов.

1. Полоса частот сигнала. Если исходный сигнал аналоговый (звук, изображение), то при его оцифровке необходимо соблюдение теоремы отсчетов. Это требование широко известно, и нет смысла его обсуждать.

2. Способ оцифровки. Под оцифровкой мы понимаем не просто последовательное аналого-цифровое преобразование, а любое обратимое преобразование аналогового сигнала в цифровую форму. Разные способы оцифровки одного и того же аналогового сигнала могут порождать различные объемы цифровых данных.

Например:

а) можно оцифровывать не временное представление, а спектральное в произвольном базисе. Например, оцифровка сигнала, являющегося суммой нескольких гармонических колебаний, представленного в базисе Фурье, дает эффективно сжимаемый код (несколько чисел и массив нулей);

б) для двумерного (и большей размерности) сигнала в общем случае возможны различные развертки, при этом ширина полосы частот одномерного сигнала, получаемого в результате развертки, при разных вариантах развертки будет изменяться. Это дает возможность выбора развертки с наименьшей шириной полосы частот;

в) сигнал может быть представлен в цифровой форме не только последовательностью отсчетов, но и набором более сложных элементов. Так, для некоторых изображений растровая оцифровка может быть заменена векторной, что дает существенную экономию объема цифрового представления.

3. Сжимаемость цифрового кода. В общем случае цифровой код, полученный в результате оцифровки аналогового сигнала, является избыточным. Исследования показали, что в цифровых данных можно выделить два типа избыточности – вероятностную и алгоритмическую [69]. Устранение избыточности приводит к уменьшению объема цифрового кода и к снижению требований к каналу передачи данных.

4. Эффективность модуляции (бит/с на Гц).

Заметим, что и при цифровом способе передачи, физически ограниченным ресурсом в электросвязи является именно полоса частот, а не пропускная способность канала в бит/с.

Существуют разные виды модуляции, обеспечивающие передачу цифровых данных по каналу электросвязи. В разных условиях передачи

оптимальными могут оказаться разные методы. Для нас важно получить теоретические оценки эффективности кодирования в зависимости от параметров канала.

В канале без помех с любой частотной полосой, отличной от нуля, один импульс может передать сколь угодно большое количество битов путем простой амплитудной модуляции, при условии обеспечения сколь угодно высокой разрешающей способности приемника. Теоретически этому соответствует бесконечное значение энтропии распределения вероятностей непрерывной случайной величины, получаемой путем предельного перехода от энтропии дискретного распределения ее значений по интервалам, при стремлении величины интервала к нулю, а количества интервалов – к бесконечности, что является возможным в отсутствие помех.

Таким образом, в канале без помех сигнал со сколь угодно большой шириной частотного спектра может быть передан в цифровом виде по каналу со сколь угодно малой шириной полосы в реальном масштабе времени.

В реальных каналах всегда присутствуют помехи, поэтому пропускная способность канала ограничена. В соответствии с известными формулами Шеннона, энтропия канала с помехами определяется шириной полосы и энергетическим критерием через отношение сигнал/шум (2.2). Но это отношение зависит от **технологии** обработки сигнала приемником, например с помощью частотной фильтрации или программными способами (SDR, глава 1).

Поэтому в аналоговой технике принято использовать отношение мощностей сигнала и помехи в частотной полосе (точнее, интеграл по частотной полосе от отношения спектральных плотностей сигнала и помехи) как величину, которая не может быть увеличена с применением частотной фильтрации. С этим уточнением формула Шеннона вполне справедлива для аналоговой техники связи.

Цифровая же обработка сигнала предлагает множество технологий подавления шумов помимо частотной фильтрации. Их применение, естественно, приводит к изменению отношения сигнал/шум.

Следовательно, при переходе к цифровым технологиям отношение сигнал/шум потеряло однозначность своей трактовки. Факторами, влияющими на пропускную способность аналого-цифрового канала, являются не только мощность и спектр помехи, но и параметры регулярности (упорядоченности), которые определяют возможные пределы ее подавления.

Значительная часть всех аналоговых сигналов, передаваемых в системах связи, предназначена для восприятия человеком посредством органов чувств. К ним относятся сигналы: телефонии, телевидения, радиовещания, звукозаписи, видеозаписи. Из психофизиологии известно, что в любом сигнале человек выделяет два компонента – фигуру и фон, причем восприятие фигуры отличается от восприятия фона. Подобные

(семантические) закономерности можно использовать для уменьшения объема данных при передаче по каналам связи. Для передачи «новостей» потребуется канал с меньшей пропускной способностью, чем для футбола, а для хоккея – с максимальной (шайба меньше мяча, а ситуация на хоккейном поле меняется быстрее, чем на футбольном). И если некоторые факторы могут быть учтены в аналитическом виде (формулой), то параметры «интересности» сигнала для восприятия человеком-потребителем выступают как критерии достаточности при оценке качества (см. табл. 2.1–2.3).

Фактор ценности сигнала, по существу, относится к оптимизации сообщений, передаваемых по каналам связи, поэтому его следует отнести к проблемам оптимизации источника сигнала, исходя из **семантического содержания информационного потока**.

2.2.1. «Полоса» сигнала vs «полоса» канала

В названии параграфа «vs» следует понимать как синоним оппозиции, противостояния между физическими свойствами канала транспортировки (передачи) сигнала и его целевой функцией – коммуникационным актом, т.е. оптимизацией семантической – смысловой составляющей сигнала. Это приводит к необходимости построения огромной гаммы специализированных систем, функционирующих в стро-го выделенных частотных диапазонах.

Требование улучшения качества информационно-коммуникативных свойств ведет к необходимому «усложнению» семантической составляющей сигнала при неизменном выделенном «транспортном коридоре». Отсюда и разные проблемы передачи данных: сокрытие, методы компрессии и др.

Рассмотрим возможность оценки соотношения «спектрально-волновой» полосы сигнала и «спектрально-частотной» ширины канала, необходимого для его передачи в реальном масштабе времени. Мы подчеркиваем этим, что семантико-смысловое содержание сигнала неадекватно оценке требуемой частотной ширины канала, получаемой вследствие использования критерия СКО.

Требуемая полоса частот определяется отношением объема передаваемых в единицу времени данных к эффективности кодирования:

$$\Delta F_{\text{кан}} = \frac{D}{\xi}, \quad (2.3)$$

где D - объем данных, передаваемых в единицу времени (бит/с); ξ – эффективность кодирования $\left(\frac{\text{бит}}{\text{с} \cdot \text{Гц}} \right)$. Определяет коэффициент отношения между полосой пропускания (Гц) и виртуальной полосой (бит/с).

Объем данных определяется теоремой отсчетов с учетом эффективности компрессии:

$$D = \frac{2B\Delta F_c}{K}, \quad (2.4)$$

где K – коэффициент сжатия, основанного на удалении вероятностной и алгоритмической избыточности цифровых данных; B – разрядность оцифровки (количество бит на отсчет); ΔF_c – ширина частотной полосы сигнала с учетом оптимизации оцифровки.

Предельная эффективность кодирования по теореме Шеннона (2.2) определяется как:

$$\xi = \frac{C}{F} = \log \left(1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right),$$

где P_c – мощность сигнала; $P_{ш}$ – мощность помехи.

Учитывая особенности цифровой обработки сигнала, внесем небольшие изменения в эту формулу:

$$\xi = \frac{C}{F} = \log \left(1 + \frac{R_c}{R_{ш}} \right), \quad (2.5)$$

где R_c и $R_{ш}$ – параметры сигнала и помехи, определяющие как их мощности, так и потенциальные возможности шумоподавления цифровыми методами.

Подставляя (2.4) и (2.5) в (2.3), получим:

$$\Delta F_{кан} = \frac{D}{\xi} = \frac{2B\Delta F_c}{K \log \left(1 + \frac{R_c}{R_{ш}} \right)} = Q \Delta F_c$$

$$Q = \frac{2B}{K \log \left(1 + \frac{R_c}{R_{ш}} \right)} \quad (2.6)$$

Из анализа выражения (2.6) следует:

- как и в аналоговых каналах, при прочих фиксированных параметрах ширина частотной полосы канала, необходимой для передачи сигнала, пропорциональна ширине частотной полосы сигнала;
- в отличие от аналоговых каналов коэффициент пропорциональности Q в цифровом канале может быть как много меньше, так и много больше единицы. Иначе говоря, в одних условиях цифровой канал требует меньшей полосы, чем аналоговый, в других – наоборот.

Формула (2.6) находится в хорошем соответствии с примерами из инженерной практики. Так, цифровизация аналоговых телевизионных

каналов использует следующие особенности: достаточно высокое отношение сигнал/шум в аналоговых трактах телевидения и значительную избыточность телевизионного сигнала, представленного в цифровой форме. Сочетание этих факторов приводит к уменьшению коэффициента пропорциональности Q до уровня порядка 0.25.

Хорошо известно, что передача высококачественного звука в формате МР3 при подключении к Интернету по телефонной линии в реальном масштабе времени осуществляется лишь тогда, когда телефонная сеть обеспечивает хорошее качество связи, то есть высокий уровень отношения сигнал/шум. При ухудшении параметров телефонной связи передача данных не прерывается, но реальный масштаб времени не достигается и воспроизведение звука происходит в старт-стопном режиме. Это объясняется возрастанием параметра Q при снижении отношения сигнал/шум до уровня, когда потребная частотная полоса превосходит полосу телефонного канала.

Таким образом, формула (2.6) позволяет до некоторой степени приблизить теорию к практике, однако инженерную ценность она сможет приобрести только после определения всех входящих в нее величин. В частности, на сегодня не до конца понятно, как определить потенциальную сжимаемость цифрового кода по параметрам сигнала источника и как определить предельное отношение сигнал/шум для случая применения современных цифровых методов шумоподавления. Впрочем, в этих вопросах практика также дает богатую почву для анализа с целью получения неких обобщенных оценок, что и является предметом дальнейших исследований.

Между тем, учитывая лишь форму сигнала, общая теория связи оставляет в стороне его содержание, которое требует иного подхода к полосе пропускания. Классическая «общая теория связи» позволяет представить сигнал, как последовательность отсчетов через определенный интервал в соответствии с теоремой Котельникова, не принимая во внимание содержание сигнала. В частности, сложный акустический сигнал может представлять собой последовательный или хаотический набор звуков, а может повторять хорошо известное музыкальное произведение.

Очевидно, оптимальным методом выбора формы является синтез сигнала, то есть эмпирический поиск формы сигнала при априорных ограничениях на свойства среды передачи. Истоки возникновения речи в идентификации, т. е. в звукоподражании, как например: собака – «гав», кошка – «мяу» ...[70]. Клиппированный язык дельфинов – стробирующие «импульсы-щелчки» лучше приспособлены к свойствам передачи в водной среде и имеют меньший коэффициент затухания по сравнению с «волновым» сигналом той же частоты.

Проблема синтеза сигнала, согласно и работам В.А. Котельникова [71], не имеет однозначного решения, то есть синтез в полном смысле слова эвристичен, так как и выбор критерия, и реализация оптимальной

коммуникационной системы осуществляется различными путями. **В этом заключается основа многообразия форм и языков общения.**

Фурье-анализ легко отфильтровывает «белый» шум, который имеет постоянное значение энергетической составляющей во всем спектральном диапазоне и интерпретируется как f^0 . Но уже так называемый «мерцательный» – «розовый» шум $1/f = f^{-1}$ значительно снижает возможности построения оптимальных приемников на основе минимизации отношения сигнал/шум.

Кажется естественным, что раз существуют шумы типа «белого» и «розового», то должны существовать и другие «спектры цветов». И действительно, физики для ультрафиолетовых и инфракрасных катастроф опираются на «степенные показатели» вплоть до 4 [72].

Общая же формула, из которой проистекают эти степенные показатели, была открыта Вейерштрассом еще в 1875 г.

«...Метафизика этих функций скрывает множество загадок, и я не могу избавиться от ощущения, что поиски ответов на них приводят к границам нашего интеллекта» [28].

И действительно, через сотню лет компьютерные возможности моделирования функций Вейерштрасса участвуют в развитии искусственного интеллекта и понятий, таких как фрактализация, самоподобие, вейвлет-анализ. А также и в осмыслении роли степенных показателей в семантическом отражении информационного содержания в музыке, текстах, живописи, биологии и катастрофах [40, 90, 43, 75].

2.3. Функция Вейерштрасса

Приведем кратко из [73] текст с пояснениями инженерно–программистскому сословию и необходимыми коррекциями применимости и роли функции Вейерштрасса в исследуемом процессе компьютерного моделирования – «цифровизации» систем связи. Для нас важно подчеркнуть не математические свойства функции Вейерштрасса, а природные процессы, стоящие за этими свойствами. Например, почему коммуникационные «сигналы», порождаемые человеком: тексты, картины, музыкальные произведения, - содержат ранговые (рейтинговые) распределения слов, цвета, тональностей и нот и др. элементов с показателями $\alpha = 1.4, \dots, 1.8$ степенного закона $1/f^\alpha$, [40, 74, 75, 76].

18 июля 1872 г. Карл Вейерштрасс представил Берлинской академии наук свой знаменитый пример непрерывной функции, не имеющей производной ни в одной точке:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a^n \cos(b^n \pi x),$$

где b – нечетное целое, большее единицы, $0 < a < 1$ и $ab > 1 + \frac{3\pi}{2}$.

Пример Вейерштрасса потряс математиков. Он подорвал интуитивное представление о том, что к непрерывной кривой всегда можно провести касательную. «Как интуиция может обмануть нас до такой степени?» – спрашивал А. Пуанкаре. Ш. Эрмит говорит о том, что он «с ужасом отворачивался от внушающей сожаление язвы непрерывных функций, не имеющих ни в одной точке производной» [77].

2.3.1. Комплексная функция Вейерштрасса

Комплексная функция Вейерштрасса имеет вид:

$$W_0(t) = (1 - \omega^2)^{-1/2} \sum_0^{\infty} \omega^n \exp(2\pi i b^n t),$$

где $b > 1$ – некоторое вещественное число, а ω записывается либо как $\omega = b^{-H}$ ($0 < H < 1$), либо как $\omega = b^{D-2}$ ($1 < D < 2$). Вещественная и мнимая части функции $W_0(t)$ называются соответственно косинусоидой и синусоидой Вейерштрасса.

Функция $W_0(t)$ непрерывна, но нигде не дифференцируема. Однако ее формальное обобщение на случай $D < 1$ и непрерывно, и дифференцируемо.

Кроме самой функции $W_0(t)$ в настоящем разделе рассматриваются некоторые ее варианты; необходимость в их представлении обусловлена тем новым смыслом, который **придала** функции Вейерштрасса теория фракталов [41].

Заметим не только справедливости ради, но в большей степени для пояснения **не математикам, а разработчикам эффективных прикладных программ компьютерного анализа и синтеза потока данных: никакого нового смысла функциям Вейерштрасса теория фракталов не придала, наоборот, увлечение математиками дробной топологической размерностью заводит в тупик прикладные аспекты компьютерной реализации.**

Прикладные, конструктивные свойства фракталов проистекают из свойств заполняющей пространство кривой (ЗПК) – кривой Пеано. Она и фрактальна, и самоподобна, но, что особенно важно в прикладном аспекте, имеет эффективную (в смысле А. Н. Колмогорова) программную реализацию при компьютерном моделировании, предложенную и развитую еще в 1980-х в работах [78, 79, 40, 16].

Действительно же, новым в прикладном аспекте оказалась интерпретация, вытекающая из показателей функции Вейерштрасса – степенных законов при аппроксимации временных последовательностей, позволяющих ввести в обиход кроме понятия «белого»

шума дополнительно понятие «мерцательного» шума – розового, коричневого, черного по степени сложности прогнозирования их поведения и катастрофического воздействия на исследуемые процессы.

Подобные процессы и до исследования фракталов были известны в различных областях знаний: самоподобие чисел Фибоначчи, аллотомия в биологии, показатели степенного закона Ципфа в лингвистике, Парето в экономике, Мура в производительности процессоров и т.д.

Всплеск интереса к исследованию степенных законов связан с возможностями их эффективного компьютерного моделирования: программируемая технология лишь раскрывает скрытые возможности математической модели функций Вейерштрасса [41,80].

2.3.2. Основные свойства функции Вейерштрасса

Частотный спектр функции $W_0(t)$. Обычно под частотным спектром понимается множество допустимых значений частоты f безотносительно к амплитудам соответствующих составляющих. Частотный спектр периодической функции представляет собой линейную последовательность положительных целых чисел.

Частотный же спектр функций Вейерштрасса есть дискретная последовательность степенных функций b^n от $n=1$ до $n \rightarrow \infty$. Однако пока научились интерпретировать физическую природу этих функций – сигналов лишь до $n=4$.

Энергетический спектр функции $W_0(t)$. Под энергетическим спектром понимается множество допустимых значений частоты f вместе со значениями энергии (квадраты амплитуд) соответствующих составляющих. На каждое значение частоты вида $f = b^n$ в функции $W_0(t)$ имеется спектральная линия энергии вида $(1 - \omega^2)^{-1} \omega^{2n}$. Следовательно, суммарное значение энергии на частотах $f \geq b^n$ сходится и пропорционально $\omega^{2n} = b^{-2nH} = f^{-2H}$.

Недифференцируемость. Для доказательства отсутствия у функции $W_0(t)$ конечной производной при любом значении t Вейерштрассу пришлось объединить два следующих условия: а) b – нечетное целое число, вследствие чего функция $W_0(t)$ представляет собой ряд Фурье, и б) $\log_b(1 + 3\pi/2) < D < 2$. Необходимое и достаточное условия: $b > 1$ и $1 < D < 2$.

Именно это свойство функции Вейерштрасса заставило «забыть» ее до появления возможности ее компьютерного моделирования, для которого «недифференцируемость» не является непреодолимым препятствием.

Историческое отступление. Отметим (хотя я не совсем понимаю, почему никто не сделал этого раньше; во всяком случае, в доступных мне источниках я ничего похожего не обнаружил), что причиной смерти как старой физики (1900 г.), так и старой математики (1875 г.) является одна и та же расходимость, подорвавшая их веру в то, что непрерывные функции просто обязаны быть дифференцируемыми [73].

Расходимость энергии. Привычному к спектрам физику эти условия представляются очевидными. Эмпирическое правило гласит, что производная функции вычисляется умножением k -го коэффициента Фурье на k . Квадрат амплитуды коэффициента Фурье с $k = b^n$ равен $(1 - \omega^2)^{-1} \omega^{2n} b^{2n}$. И совокупная энергия на частотах, больших b^n , стремится к бесконечности. Физику становится ясно, что производную $W'_0(t)$ определить невозможно.

Интересно отметить, что Риман в поисках примера недифференцируемости пришел к функции $R(t) = \sum_1^{\infty} n^{-2} \sin(2\pi n^2 t)$, энергия спектра которой на частотах, больших $f = n^2$, пропорциональна, где $H = 3/4$. Таким образом, применяя то же эвристическое рассуждение, можно предположить, что производная $R'(t)$ неопределима, а значит, функция $R(t)$ недифференцируема.

Ультрафиолетовая расходимость – катастрофа. Термин «катастрофа» появился в физике в первом десятилетии XX века, когда Дж. У. Рэлей и Дж. Джинс независимо друг от друга разработали теорию излучения абсолютно черного тела, согласно которой энергия частотного диапазона ширины df в окрестности частоты f пропорциональна f^{-4} . Это означает, что совокупная энергия спектра на высоких частотах стремится к бесконечности, что оказывается весьма катастрофичным для теории. Поскольку источником неприятностей являются частоты, лежащие за ультрафиолетовой частью спектра, явление получило название *ультрафиолетовой (УФ) катастрофы*.

Инфракрасная расходимость. Хотя частотный спектр броуновской функции непрерывен, масштабно-инвариантен и существует при, частотный спектр функции Вейерштрасса дискретен и ограничен снизу значением f^{-1} . Наличие нижней границы обусловлено исключительно тем обстоятельством, что число b у Вейерштрасса изначально было целым, а функция – самоподобна. Попытка изменить условия, позволив n принимать любое значение от $-\infty$ до $+\infty$, а для того чтобы энергетический спектр стал масштабно-инвариантным, достаточно сопоставить каждой частотной компоненте b^n амплитуду ω^n .

К сожалению, получаемый в результате ряд расходится и повинны в этом низкочастотные компоненты. Такой дефект называется *инфракрасной (ИК) расходимостью*, или «*катастрофой*». Как бы то ни было, с этой расходимостью приходится мириться, поскольку иначе нижняя

граница f^{-1} вступает в противоречие с самоподобием, присущим энергетическому спектру.

Фрактальные свойства. Согласно теореме, доказанной в работах [81] и [82], фрактальная размерность графика функции с некоторым показателем H , удовлетворяющей условию Липшица, находится в интервале от 1 до $2 - H$. Известно, что в случае броуновской функции с тем же кумулятивным спектром f^{-2H} размерность $2 - H = D$ принимает наибольшее возможное значение.

Приведенная математика необходима лишь для интерпретации специфических свойств этих функций, которые с физической точки зрения достаточно популярно изложены в [72].

Физики отреагировали простым изменением правил игры, математики же не научились жить с недифференцируемыми функциями и их формальными производными.

Мы же обращаем внимание, что с целью эффективной реализации вычислительного процесса – компьютерного моделирования на основе программируемой технологии были разработаны подходы разной степени строгости и эвристичности.

Например, в работе [75] показано, что именно свойство масштабной инвариантности присуще музыкальному произведению как семантической составляющей сигнала. Приведена интерпретация инвариантности воспроизведения сигнала как музыкального произведения, которая в своей основе может быть объяснена простым правилом масштабирования преобразования Фурье (табл. 2.2)

$$S_{\text{мп}}(f) = 1/f, \quad (2.7)$$

$$R_{\text{мп}}(t) = F^{-1}(S_{\text{мп}}(f)) = F^{-1}(1/f), \quad (2.8)$$

$$R_{\text{мп}}(\beta\tau) = F^{-1}\left(\frac{1}{\beta} S_{\text{мп}}(f/\beta)\right) = F^{-1}\left(\frac{1}{\beta} \cdot \frac{\beta}{f}\right) = F^{-1}(1/f). \quad (2.9)$$

Из уравнений (2.8) и (2.9) мы можем заключить:

$$R_{\text{мп}}(t) = R_{\text{мп}}(\beta\tau). \quad (2.10)$$

Это означает, что автокорреляционная функция музыкального произведения $R_{\text{мп}}(t)$ масштабно инвариантна. Обратим внимание, что равенство (2.10) сохраняется для любых β и этот факт можно интерпретировать как семантическое, «детерминированное» поведение сигнала. Множество сигналов, различимых во временной области, могут иметь одинаковый спектр мощности.

Семантическая составляющая сигнала, однозначно идентифицируемая, делает сигнал «детерминированным», а не случайным процессом, отсюда и масштабная инвариантность автокорреляционной функции. Физическая природа этого явления проявляется в независимости

тональности мелодии от скорости развертки сигнала (проигрывателя). Экспериментальное исследование различного типа музыкальных произведений как раз и демонстрирует устойчивость степенного показателя спектрального распределения $\alpha = 1.4, \dots, 1.8$.

2.3.3. Прикладной аспект функции Вейерштрасса

Понимание роли степенных показателей никак не коснулось создателей «общей теории связи» и разработчиков систем связи, что значительно задержало эффективные цифровые системы связи, обработки сигналов, компрессии и скоростной передачи потока данных и возможностей «виртуального» расширения частотного диапазона.

Пока же протоколы и форматы передачи данных, цифровой звук и телевидение разрабатываются эмпирически, опираясь на математические модели «волновых» процессов, например MP3 и MPEG.

Среди многих областей, в которых проявляется самоподобие, присутствуют степенные законы и особая «статистика» рейтингового (рангового) типа без математического ожидания и дисперсии. Особую приверженность к простым однородным степенным законам вида $f^{-\alpha}$ проявляют спектры мощности (квадраты амплитуд преобразования Фурье), часто называемые шумами. Среди шумов широкой известностью пользуется белый шум со спектральным показателем $\alpha = 0$. Иначе говоря, спектр мощности белого шума не зависит от частоты. Однако белый шум, т.е. шум с постоянным, или плоским, спектром мощности, представляет собой удобную абстракцию, так сказать, небольшую ложь во спасение. Подобно спектру белого света (отсюда и название – белый шум), спектр белого шума является плоским только в некотором конечном диапазоне частот. Тем не менее белые спектры позволяют моделировать множество процессов в широчайшем диапазоне научных дисциплин. К числу таких процессов принадлежат, в частности, показатели броуновского движения и разные другие инновационные процессы (ученое название для любой последовательности неожиданностей и сюрпризов). На членство в этой «бело-шумной компании» претендуют электронный и фотонный дробовые, «мерцательные» шумы, тепловой шум и всякого рода шипящие звуки, издаваемые человеком или животными.

Проинтегрировав белый шум один раз по времени, мы получаем «коричневый» процесс – проекцию броуновского движения. Коричневый шум имеет спектр мощности, пропорциональный f^{-2} , в довольно широком диапазоне частот. Процессы от белого до коричневого – лишь специфика свойств сигналов, которые далеко не исчерпывают спектральные возможности: например, между ними располагается *розовый*

процесс с показателем спектра $\alpha = 1.3, \dots, 1.8$, который характерен и отражается в творческом процессе писателей, художников и композиторов, а за коричневым спектром маячит *черный*, пропорциональный $f^{-\alpha}$, где $\alpha > 2$.

В табл. 2.1-2.3 приведены примеры физических процессов и их математические модели.

Приведенные в таблицах примеры иллюстрируют особенности спектрального проявления функции Вейерштрасса, которая отражает различную природу физических свойств не только распространения транспортировки сигнала, но и оптимальную организацию «языка» информационного содержания, т.е. когда сигнал превращается в «звук колокольчика».

Такое «семантическое поведение» распределения информационного содержания отражает иерархию самоподобия – принцип этерификации (принцип прогрессирующего упрощения) языка описания.

Инфракрасная концентрация и ультрафиолетовая «катастрофа» отражают физические свойства частотного диапазона.

Таблица 2.1

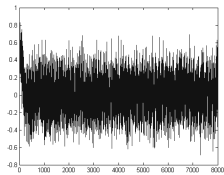
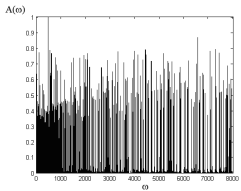
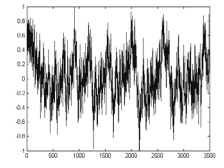
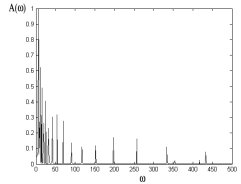
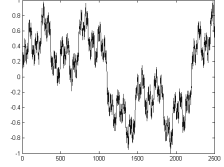
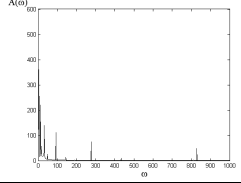
Процесс	График	Спектр
«белый» шум Вейерштрасса $f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^{(s-2)k} \cdot \sin \lambda^k t$ $\lambda = 1.01 - 1.05$ $s = 1.98 - 2.0$ интервал [0:628] Шаг 0.06		
«Семантическое» распределение Вейерштрасса от $\lambda = 1.05$ до $\lambda = 1.8$, от $s = 1.0$ до $s = 1.8$, интервал [0:628] Шаг 0.06		
Самоподобие. Функция Вейерштрасса $f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda^{(s-2)k} \cdot \sin \lambda^k t$ $\lambda = 3; s = 1.618$		

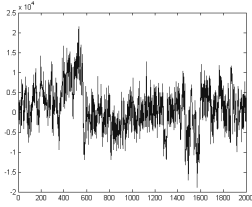
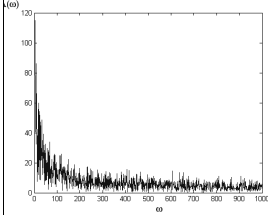
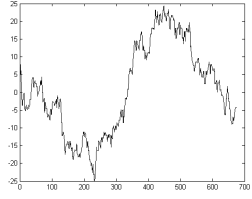
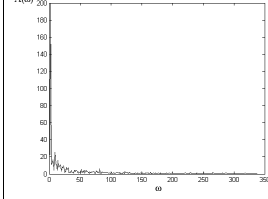
Таблица 2.2

Процесс	График	Спектр
Функция Вейерштасса $\lambda = 1.005; s = 3$		
Музыкальный сигнал - фрагмент «К Элизе» (Бетховен) wav –файл: 8кГц , 16 бит, моно		
Звук церковного коло- кола  Основные частоты 150, 386, 521 Гц		
Функция Вейерштасса $\lambda = 1.001; s = 3$		

Таблица 2.3

Процесс	График	Спектр
«Белый» шум, сгенерированный программой Cool Edit Pro 2.0 $\frac{1}{f^0}$		

Таблица 2.3 (продолжение)

Процесс	График	Спектр
«Розовый» шум, сгенерированный программой Cool Edit Pro 2.0 $\frac{1}{f^1}$		
«Броуновский» шум, сгенерированный программой Cool Edit Pro 2.0 $\frac{1}{f^2}$		

2.4. От анализа Фурье к вейвлет-анализу

2.4.1. Введение

Известно, что методы, основанные на использовании рядов и преобразований Фурье, не являются адекватными для решения многих проблем. Поэтому появлялись их различные модификации, например так называемые методы Литтлвуда-Пэли [83]. Данные методы были предложены в 30-е годы прошлого века с целью помочь пониманию проблемы суммируемости рядов Фурье и граничного поведения аналитических функций. Уже в 1950-60-е годы они превратились в мощное средство для решения дифференциальных и интегральных уравнений. Стало понятным, что они лежат в области гармонического анализа, именуемой теорией Кальдерона-Зигмунда. Этот метод использовался для того, чтобы установить, имеет ли обобщенная функция f такое разложение, чтобы использовать «формулу Кальдерона»:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} db \int_0^{\infty} \frac{1}{a^2 \sqrt{a}} W(a, b) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) da,$$

где $W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx$.

Такое параметрическое представление функции и является примером непрерывного вейвлет-преобразования.

Первый ортогональный вейвлет был применен Ж.-О. Стрёмбергом (Jan-Olov Stromberg) в начале 1980-х. Дискретная версия формулы Кальдерона называется сейчас дискретным вейвлет-преобразованием, которое с развитием возможностей компьютерных вычислений (скорость, память) с середины 1980-х активно применяется для эффективной замены фурье-анализа в численных методах.

В это же время [82, 84] разработаны алгоритмы быстрых вычислений на основе матриц Адамара при анализе и параметрической оценке сигналов. И. Мейер и Ю. Морле (1984 г.) предложили именовать строительные блоки, имеющие форму волны, – вейвлетами (wave), и то, что раньше относилось к теории Литтлвуда-Пэли, получило название вейвлет-анализа.

В настоящее время различного вида вейвлет-функции широко применяются в задачах распознавания образов, при обработке и синтезе нестационарных сигналов, при анализе изображений самой различной природы, для эффективной упаковки больших объемов информации и во многих других случаях.

Другими словами, вейвлет-анализ называют «локализованным спектральным анализом» или «спектральным анализом локальных возмущений». Вейвлет-преобразование сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Таким образом, в отличие от традиционно применяемого для анализа сигналов преобразования Фурье, вейвлет-преобразование несет информацию о двух параметрах (двумерная развертка) исследуемого одномерного сигнала, при этом частота и интервал (масштаб) сегмента сигнала рассматриваются как независимые переменные.

Это дает принципиальную возможность компьютерного моделирования свойств сигнала одновременно в реальном физическом пространстве (время, пространственная координата) и спектральном.

Интуитивная понятность аппарата вейвлет-анализа позволяет использовать его как иерархический базис, хорошо приспособленный для описания динамики сложных нелинейных процессов, которые характеризуются взаимодействием возмущений в широком диапазоне пространственных, временных и спектральных характеристик. По аналогии с фурье-анализом существует и возможность разработки быстрых алгоритмов вычислений, позволяющих за приемлемое время осуществлять компрессию сигнала с регулируемой степенью детализации. Однако эта же возможность накладывает и жесткие аксиоматические ограничения на вейвлет-функции, вытекающие из аппарата фурье-преобразования.

2.4.2. Фурье-преобразование

Интегральное преобразование Фурье и ряды Фурье являются основой гармонического анализа стационарных непрерывных сигналов. Получаемые в результате преобразования коэффициенты Фурье поддаются достаточно простой физической интерпретации, причем простота ни в коем случае не умаляет важности последующих выводов о характере исследуемого сигнала. Применение интегрального преобразования и рядов Фурье в вычислениях и аналитических преобразованиях легко интерпретируется посредством действительных функций $\sin t, \cos t$ (или одной комплексной – синусоидальной волны $e^{it} = \cos t + i \sin t, i = \sqrt{-1}$) и достаточно легко доказываются. Другой, не менее важной причиной популярности фурье-анализа явилось наличие адекватной аналоговой элементной базы (*RLC*-цепочек), позволившее в свое время совершить существенный прорыв в теории и технологии связи. Язык фурье-анализа является все еще языком «общей теории связи» и технологии построения систем связи.

И, несмотря на существенное превосходство цифровой технологии систем связи и явное несоответствие ключевых свойств целого ряда сигналов классической спектральной модели, ее популярность до сих пор остается преобладающей.

Тем не менее возможности компьютерного моделирования требуют расширения математических моделей на нестационарные и степенные процессы.

Хотя все определения, свойства и их следствия приводятся для одномерных функций и рядов данных, при необходимости все сказанное может быть обобщено на многомерные случаи. Для определенности ниже будет говориться о функциях, зависящих от времени, о временных рядах и соответственно о частотах. Однако без нарушения общности независимая координата может быть пространственной (с соответствующими волновыми числами) и любой другой природы.

В классическом спектральном анализе сигнал во временной области удобно представлять в виде преобразования Шеннона, или разложения по δ -функциям Дирака

$$f(t) = \int_R f(u) \delta(t - u) du, \quad (2.12)$$

и соответственно его частотное представление или преобразование Фурье – не что иное, как разложение по комплексным экспонентам

$$f(t) = \int_R F(\omega) e^{i\omega t} d\omega. \quad (2.13)$$

Первая формула дает информацию о максимально возможном разрешении по времени: величина $f(t)$ представляет интенсивность сигнала в момент времени t . Никакая частотная информация при этом

нам недоступна, простое поточечное представление не дает никакой информации о частотном содержании сигнала. Напротив, фурье-представление дает точное частотное представление, не обеспечивая никакой информацией о временной локализации событий. На практике далеко не все сигналы стационарны. Пик в сигнале во временной области распространится во всей частотной области его преобразования Фурье. Можно провести аналогию с аудиозаписью. Ее временное представление позволяет нам знать ноты или паузы и слышать звенящий колокольчик. Напротив, частотное представление говорит, какие тоны присутствуют в музыке, не говоря ничего, в какой момент они могут быть услышаны.

Каждое из представлений содержит различного рода информацию о сигнале. Преобразование Фурье лишь на бесконечности является взаимнооднозначным отображением временного представления сигнала в частотное и наоборот. Однако в каждом из этих двух видов (временном и спектральном) представления сигнала доступна различная семантическая информация. Иными словами, распределение по импульсам Дирака имеет сколь угодно малое разрешение по времени, в то время как фурье-спектр дает распределение по частоте. Отсюда возникает очевидная потребность представления сигнала одновременно по двум параметрам, при которых сохраняется вся информация, и лишь возможности компьютерного моделирования позволяют практически решать эти задачи.

Первые попытки частичного устранения неспособности анализа Фурье осуществлять временную локализацию сингулярностей сигналов заключались в применении оконного преобразования Фурье. В стандартное преобразование вводится умножение на так называемое окно $w(t)$ — движущуюся по временной оси функцию, имеющую компактный носитель. Использование оконной функции позволяет представить результат анализа — образ Фурье — в виде функции двух переменных, а именно частоты ω и времени τ положения окна:

$$F(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t - \tau) f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.14)$$

или с учетом обозначения

$$g(\omega, t) = w(t - \tau) e^{-j\omega t} \quad (2.15)$$

следующим образом:

$$F(\omega, t) = \langle g(\omega, t), f(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, t) f(t) dt. \quad (2.16)$$

Однако введение оконных функций имеет существенный недостаток, который состоит в том, что ширина окна при данном виде анализа фиксирована и поэтому не может быть адаптирована к локальным свойствам сигнала. Возникают и другие дополнительные проблемы, уже не поддающиеся решению в рамках традиционного фурье-анализа.

Первый шаг к новому виду анализа сделал Д. Габор, который предложил использовать базисные функции, лежащие посередине между импульсами Дирака и комплексными экспонентами, т. е. локализованные как во времени, так и по частоте.

Теоретический предел такой локализации широко известен как неравенство Гейзенберга. Пусть f – квадратично-интегрируемая функция в L^2 с единичной нормой

$$\int |f(t)|^2 dt = 1. \quad (2.17)$$

Определим центр $c(f)$ и ширину $\Delta(f)$ такой функции как

$$c(f) = \int t |f(t)|^2 dt, \quad (2.18)$$

$$\Delta(f) = \sqrt{\int (t - c(f))^2 |f(t)|^2 dt}. \quad (2.19)$$

Неравенство Гейзенберга – фундаментальное неравенство, устанавливающее, что для любой функции $f(t)$ с единичной нормой и убывающей быстрее, чем $1/\sqrt{t}$ при $t \rightarrow \pm\infty$, справедливо соотношение

$$\Delta(f)\Delta(F) \geq \frac{1}{2}. \quad (2.20)$$

Здесь и далее F – преобразование Фурье-функции f .

Если мы назовем полосой частот функции f ширину ее Фурье-преобразования F , то это неравенство означает, что нельзя найти функцию, локализирующую событие в частотно-временной области с произвольно малой погрешностью. Однако известны функции, позволяющие провести локализацию с теоретически максимальной точностью. Это семейство смещенных во времени и модулированных гауссовских функций вида

$$g(t) = A e^{-(t-t_0)^2/2\Delta t^2}, \quad (2.21)$$

где A – нормализующий коэффициент. Только для этих функций неравенство Гейзенберга обращается в равенство. Теперь эти функции называют вейвлетами Габора. Очевидно, что в случае $t_0 = 0$, $\omega_0 = 0$, $\Delta t = 0$ габоровский вейвлет вырождается в функцию Гаусса, для которой, таким образом, также характерна минимальная частотно-временная неопределенность.

2.4.3. Частотно-временное и масштабно-временное представления сигнала

Сопоставим функции $g(t)$ из предыдущего подраздела частотно-временной прямоугольник на плоскости (t, ω) с центром в точке $(c(f), c(F))$ и размером $\Delta(f) \times \Delta(F)$. Такой прямоугольник является интуитивным представлением частотно-временной локализации функции. Каждому базису из $L^2(R)$ мы также ассоциируем покрытие частотно-временной плоскости такими прямоугольниками. Прямоугольники в таком покрытии центрируются вокруг частотно-временного центра $(c(f), c(F))$ функций, а их размеры пропорциональны частотно-временным размерностям $\Delta(f) \times \Delta(F)$ в порядке проведения разбиения частотно-временной плоскости. Такое представление в большой степени произвольно, поскольку нет теоретических результатов, связывающих частотно-временное разбиение с тем фактом, что соответствующее семейство функций является базисом.

Частотно-временные покрытия для преобразования Шеннона, анализирующей функцией которого является функция Дирака, и для преобразования Фурье с комплексными экспонентами представляют собой прямоугольники бесконечно малой ширины и бесконечно большой длины, как показано на рис. 2.4.

Очевидно, что представление любой функции в виде линейной комбинации обеих этих функций с использованием всех возможных комбинаций параметров t_0 , ω_0 и Δt будет явно избыточным. Для устранения этой избыточности были предложены два различных подхода:

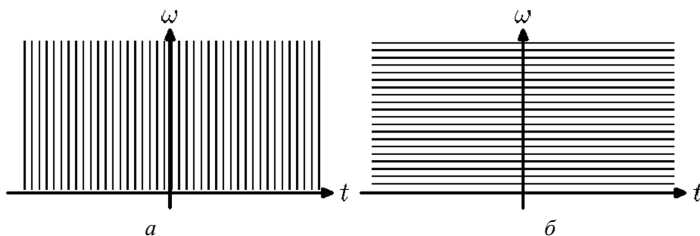


Рис. 2.4. Частотно-временное покрытие для представлений: а - Фурье и б - Дирака.

– *частотно-временной подход*, который состоит в выборе временной протяженности функций g независимо от частоты модуляции. Такие функции могут быть записаны в виде

$$g_{t_0, \omega_0}(t) = e^{i\omega_0 t} g_0(t - t_0), \quad (2.22)$$

где $g_0(t) = A_0 e^{-t^2/2\Delta t^2}$. Такое представление совпадает с упоминаемым выше оконным преобразованием Фурье.

– *масштабно-временной подход*, в котором ширина функций во времени обратно пропорциональна их частоте, то есть произведение $\omega_0 \Delta t$ равно некоторой константе C . В таком представлении мы имеем следующие параметризованные функции:

$$g_{t_0, \Delta t}(t) = \frac{1}{\sqrt{\Delta t}} g_0\left(\frac{t-t_0}{\Delta t}\right), \quad (2.23)$$

где $g_0(t) = A_0 e^{-t^2/2\Delta t^2} e^{i\omega t}$.

Покрывтия частотно-временной плоскости наглядно демонстрируют разницу между двумя этими подходами (рис. 2.5). В случае частотно-временного представления покрытие состоит из одинаковых прямоугольников, транслируемых по всей плоскости. В случае же масштабно-временного представления прямоугольники имеют одинаковую площадь, но их относительная разрешающая способность по частоте остается при этом неизменной.

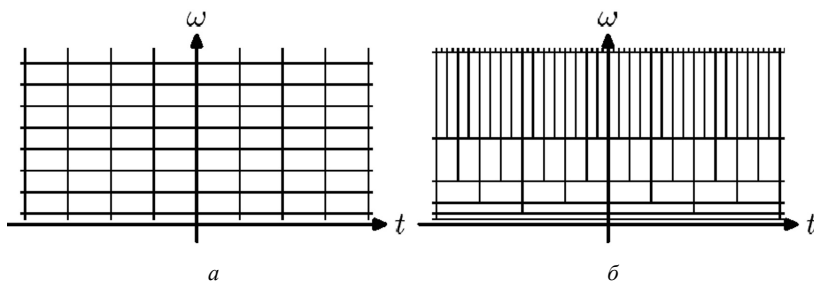


Рис. 2.5. Покрытие частотно-временной плоскости для *a* - частотно-временного и *б* - масштабно-временного представлений.

Вейвлет-анализ имеет дело с масштабно-временным представлением базисных волновых (wave) функций. Этот подход имеет достаточные преимущества, главными из которых являются наличие быстрых алгоритмов вычислений и пропорциональность частотной и временной протяженности каждой функции и разрешающей способности по частоте и времени, определяемой неравенством Гейзенберга.

На данный момент не существует общепринятого определения вейвлет-функций, однако они, исходя из свойств частотно-временной локализации, способны аппроксимировать тонкую, нестационарную структуру сигналов.

Локализация вейвлет-функций во времени подразумевает наличие концентрации их энергии внутри некоторого конечного интервала. Частотная локализация вейвлет-функций говорит о компактности носителя их фурье-образа, т.е. о локализации его энергии внутри определенного частотного интервала.

Существует, таким образом, аналогия между вейвлет-функциями и фильтрами, полоса пропускания которых определяется степенью гладкости самих функций во временной области.

2.4.4. Математические модели вейвлет-анализа

2.4.4.1. Непрерывный вейвлет-анализ

Масштабно-временное вейвлет-представление обычно использует растяжения и переносы во времени одной фиксированной вейвлет-функции $\psi \in L^2(R)$. В случае непрерывного вейвлет-анализа параметры растяжения и переноса во времени также изменяются непрерывно. Иначе говоря, данное преобразование использует функции вида

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \text{ где } a, b \in R, a \neq 0. \quad (2.26)$$

Данные функции нормализованы для удовлетворения условия нормировки в L^2 . При этом условии непрерывное вейвлет-преобразование функции $f \in L^2(R)$ определяется по формуле

$$W_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (2.27)$$

Используя равенство Парсеваля, непрерывное вейвлет-преобразование можно переписать в виде

$$2\pi W_f(a,b) = \langle F(\omega), \Psi_{a,b}(\omega) \rangle, \quad (2.28)$$

где $\Psi_{a,b}(\omega)$ – представление в области Фурье вейвлет-функции $\psi_{a,b}(t)$, равное

$$\Psi_{a,b}(\omega) = \frac{a}{\sqrt{a}} e^{i\omega b} \Psi(a\omega), \quad (2.29)$$

при этом – Фурье-преобразование фиксированной вейвлет-функции $\psi \in L^2(R)$.

Теперь предположим, что вейвлет $\psi(t)$ и его преобразование Фурье $\Psi(\omega)$ удовлетворяют требованию частотно-временной локализации и имеют центры $c(\psi)$, $c(\Psi)$ и ширину $\Delta(\psi)$, $\Delta(\Psi)$ конечного размера. Из формул непрерывного вейвлет-преобразования видно, что оно собирает информацию о функции f из временного интервала $[b + a(c(\psi) - \Delta(\psi)), b + a(c(\psi) + \Delta(\psi))]$ и из частотного интервала $[(c(\Psi) - \Delta(\Psi))/a, (c(\Psi) + \Delta(\Psi))/a]$.

Если также предположить, что вейвлет ψ удовлетворяет условию допустимости

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty, \quad (2.30)$$

то вейвлет-преобразование $W_f(a, b)$ является обратимым и обратное преобразование определяется соотношением

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{dad b}{a^2}. \quad (2.31)$$

По сути, прямое непрерывное вейвлет-преобразование представляет собой бесконечный набор линейных сверток анализируемой функции с вейвлет-функциями изменяющегося масштаба. Что предопределяет требуемые свойства непрерывного вейвлет-преобразования:

Линейность. Линейность непрерывного вейвлет-преобразования следует из линейности скалярного произведения функций в L^2 . Пусть функции $f(t)$ и $g(t) \in L^2$. Тогда

$$W_{f+g}(a, b) = W_f(a, b) + W_g(a, b). \quad (2.32)$$

Сдвиг. Рассмотрим непрерывное вейвлет-преобразование функции $f_1(t) = f(t - b')$. Тогда

$$W_{f_1}(a, b) = W_f(a, b - b'), \quad (2.33)$$

то есть вейвлет-образ функции также сдвигается на b' .

Масштабирование. Теперь рассмотрим непрерывное преобразование вейвлет-функции $f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{c}} f\left(\frac{t}{c}\right)$, где множитель $\frac{1}{\sqrt{c}}$ введен для сохранения энергии. Имеем:

$$W_{f_1}(a, b) = W_f\left(\frac{a}{c}, \frac{b}{c}\right), \quad (2.34)$$

то есть непрерывное вейвлет-преобразование также подвергается масштабному преобразованию. Это означает, что если функция расширяется во временной области, то в масштабно-временной плоскости $[a, b]$ она также расширяется.

Аналог теоремы Парсеваля. Для каждой функции $f(t) \in L^2$ и ее непрерывного вейвлет-преобразования справедливо следующее соотношение:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 \frac{dad b}{a^2}. \quad (2.35)$$

Кроме того, к важным свойствам непрерывного вейвлет-преобразования относятся упоминаемые выше свойства локальности. Из

этого следует, что мелкомасштабные вариации функции $f(t)$ будут проявляться в вейвлет-области при малых значениях масштаба a , в то время как при больших значениях масштаба они будут сглаживаться, но при этом будут проявляться кратномасштабные изменения функции $f(t)$.

Непрерывный вейвлет-анализ можно уподобить анализу сигнала с непрерывным изменением разрешающей способности восприятия. Именно такой способ восприятия информации характерен для зрительной системы человека и во многих других практических случаях, например ночное видение, когда недостаточное освещение компенсируется изменением временного или частотного диапазона.

Аналоговое, непрерывное вейвлет-преобразование обладает колоссальной избыточностью и не приспособлено для программируемой технологии цифровых методов обработки информации.

Приведем следующую интерпретацию непрерывного так называемого всплеск-преобразования [37], которое определяется с помощью произвольной функции $\psi(x)$, имеющей конечную энергию и нулевое среднее значение:

$$c(a,b) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \text{ АНАЛИЗ}; \quad (2.36)$$

$$f(x) = C_{\psi} \int_{-\infty}^{\infty} db \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) c(a,b) \frac{da}{a^2}, \text{ СИНТЕЗ}, \quad (2.37)$$

где C_{ψ} – некоторая постоянная. В квантовой механике функция $\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ называется когерентным состоянием аффинной группы. В отличие от Фурье-преобразования, в котором координата x заменяется на одну частотную переменную p , здесь x заменяется на две переменные a и b . В определенном смысле b является аналогом координаты x , а параметр a – аналогом обратной частоты $1/p$, т.е. $c(a,b)$ содержит информацию о пространственных (или временных) и частотных свойствах сигнала одновременно. Это и позволяет изучить сигнал более детально, чем с помощью Фурье-анализа.

2.4.4.2. Дискретный вейвлет-анализ и кратноразрешающий анализ сигналов

Описание дискретного всплеск-преобразования требует более сложной математики, опирающейся на кратко-разрешающий анализ

Формально он звучит следующим образом. Разобьем пространство Гильберта L^2 на совокупность вложенных друг в друга подпространств $\dots V_{1c} V_{0c} V_{1c} \dots$, таких что самое полное пространство V_{∞} и есть

L^2 , а $V_{-\infty}=0$. Наложим два основных требования на эту разбивку: 1) если $f(x) \in V_j$, то $f(2x) \in V_{j+1}$; 2) в подпространстве V_0 существует такая функция $f(x)$, что ее трансляции $f(x-k)$, $k=0, \pm 1, \pm 2$, образуют базис V_0 . Этот простой набор предпосылок достаточен для построения полной теории всплесков.

Из взятых аксиом следует, что функции базиса V_1 получаются из базиса V_0 , $f(x-k)$, простым двухкратным сжатием его элементов, $f(2x-k)$. Так как любой элемент из V_0 принадлежит и V_1 , то, следовательно, $f(x)$ можно разложить в сумму $f(2x-k)$:

$$\phi(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k \phi(2x-k), \quad (2.38)$$

где h_k – некоторые коэффициенты. Это функциональное уравнение самоподобия, или скейлинговое уравнение, и является «уравнением колебаний» для дискретного всплеск-преобразования.

Его формальное решение конечной энергии легко находится в виде интеграла Фурье, но анализ свойств возникающих функций далеко не прост. Разные типы всплесков появляются при наложении разных дополнительных ограничений на $f(x)$. В случае Хаара-Добеши число коэффициентов h_k конечно, а скейлинговые функции $f(x)$ имеют компактный носитель (т.е. конечную длину). Они самоподобны в том смысле, что конечная комбинация сжатых в два раза и сдвинутых на целые числа относительно друг друга функций $f(2x-k)$ равна начальной функции $f(x)$. Простейший пример: уравнение $f(x) = f(2x) + f(2x-1)$ имеет решение в виде ступеньки $f(x)=1$ для $0 \leq x \leq 1$ и $f(x)=0$ для остальных x .

В теории всплесков были найдены аналоги быстрых преобразований Фурье, которые основывались на ортогональных вейвлетах. Один из таких алгоритмов называется алгоритмом Малла [85]. Исходная информация для него – сигнал, заданный с разрешением 1 (на практике – массив длины N). Требуется получить разложение в сумму деталей на более грубых масштабах.

Процедура такова: по исходной информации строится два сигнала (два массива длины $N/2$). Первый – исходный сигнал, сглаженный фильтром $H = \{h_k/\sqrt{2}\}$ и прореженный вдвое; второй – исходный сигнал, обработанный фильтром $G = \{g_k/\sqrt{2}\}$ и прореженный вдвое. На языке кратко-масштабного анализа первый сигнал вдвое более грубая версия исходного – есть его проекция на подпространство, порожденное сдвигами $\phi(x/2)$; второй (различия между версиями сигнала на масштабе 1 и 2) – проекция на подпространство, порожденное сдвигами $\psi(x/2)$. Затем та же процедура применяется к сглаженному сигналу. Возникает два массива длиной $N/4$, и так далее. Результат работы алго-

ритма – набор высокочастотных деталей плюс самая сглаженная версия сигнала. Суммарная длина этих массивов равна N .

В процессе восстановления, на каждом шаге алгоритма размерность массивов удваивается; «сверху вниз» восстанавливаются сглаженные версии сигнала, пока в конце концов не получится исходный сигнал. Другими словами, сигнал раскладывается по октавам, без промежуточных голосов. Тем самым, ортогональный вейвлет-анализ – предельно экономное разложение, в противоположность непрерывному вейвлет-анализу, учитывающему вклад от каждой точки на плоскости (время-частота).

Данный алгоритм исключительно прост в реализации, к тому же очень быстр: и на разложение, и на восстановление требуется порядка cN операций, где c – длина фильтра. К примеру, быстрое преобразование Фурье требует $M \log(n)$ операций. Формально он дает наиболее компактное представление сигнала в виде разномасштабных компонент – ведь они по построению ортогональны, а значит, «некоррелированы».

Надо отметить, что пары фильтров с такими же свойствами, как у описанных выше H и G , использовались в теории связи задолго до вейвлетов, под названием квадратурных зеркальных фильтров («quadrature mirror filter»). С их помощью сигнал разбивался на несколько поддиапазонов, каждый диапазон кодировался и передавался отдельно, а затем все восстанавливалось по тем же формулам, которые использует на каждом шаге алгоритм Малла.

Дискретный вейвлет-анализ. Одним из способов устранения избыточности множества базисных функций непрерывного вейвлет-анализа является дискретизация значений a и b при сохранении возможности восстановления сигнала из его преобразования. Можно показать, что для выполнения последнего условия дискретизация должна осуществляться следующим образом:

$$a = a_0^m; \quad b = nb_0a_0^m; \quad m, n \in Z, \quad a_0 > 1, \quad b_0 \neq 0. \quad (2.39)$$

Возможен произвольный выбор параметра b_0 . Без потери общности выберем $b_0 = 1$. Очевидно, что параметр местоположения зависит от параметра масштаба: с увеличением масштаба увеличивается шаг сдвига. Это интуитивно понятно, так как при анализе детали не так важны.

Для дискретных значений a и b вейвлет-функции представляются в виде

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m}t - n). \quad (2.40)$$

По аналогии с преобразованием Фурье название рядов вейвлетов определяются путем дискретизации непрерывного вейвлет-преобразования:

$$d_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} a_0^{-m/2} \psi(a_0^{-m}t - n) f(t) dt. \quad (2.41)$$

Восстановление $f(t)$ из последовательности возможно в том случае, если существуют числа $A > 0$ и $B < \infty$, такие что

$$A\|f(t)\|^2 \leq \sum_{m \in \mathbb{Z}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} |d_{m,n}|^2 \leq B\|f(t)\|^2 \quad (2.42)$$

для всех $f(t)$ в $L^2(R)$. Это означает, что хотя реконструкция $f(t)$ из ее вейвлет-коэффициентов может не совпадать точно с $f(t)$, она будет близка к ней в среднеквадратическом смысле. Если $A = B = 1$ и $a_0 = 2$, то возможно полное восстановление и семейство базисных функций $\psi_{a,b}(t)$ образует ортогональный базис. Тогда

$$f(t) = C_\psi \sum_{m \in \mathbb{Z}} \sum_{n \in \mathbb{Z}} d_{m,n} 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n). \quad (2.43)$$

Если базисные функции нормализованы, то $C_\psi = 1$.

Кратно-мультиразрешающий анализ является другим способом дискретного вейвлет-анализа. Его теоретические основы лежат в теории квадратурно-зеркальных фильтров и в пирамидальном представлении сигналов с помощью пирамид лапласианов и гауссианов Берта и Адельсона [86]. Можно дать неформальное определение кратно-разрешающего анализа как представления сигнала в виде совокупности его последовательных приближений. Самый простой способ подобного представления – передача усредненного значения некоторого сигнала, затем усредненного значения его половинных временных интервалов, четвертых, восьмых частей и т.п. При этом объем переданной информации остается таким же, как и при последовательной передаче дискретных значений, при очевидном преимуществе подобной стратегии передачи. К примеру, если целью передачи является идентификация объекта человеком-оператором, то при одном и том же объеме переданной информации передача с уточнением детализации обеспечит намного большую вероятность правильной идентификации объекта, чем традиционный способ передачи.

С математической точки зрения под кратно-масштабным анализом понимается описание пространства $L^2(R)$ через последовательность иерархически вложенных друг в друга подпространств $V_j \subset L^2(R)$, $j \in \mathbb{Z}$, которые удовлетворяют следующим свойствам:

- каждое предыдущее подпространство непосредственно вложено в следующее за ним: $V_j \subset V_{j+1}$;
- если некоторая функция принадлежит одному из подпространств, то в два раза растянутая по временной оси ее копия принадлежит следующему подпространству: $\nu(t) \in V_j \Leftrightarrow \nu(2t) \in V_{j+1}$. Как видно из определения, данное условие обратимо;

- если некоторая функция принадлежит одному из подпространств, то сдвинутая на единичный отрезок по временной оси ее копия также принадлежит этому подпространству: $v(t) \in V_j \Leftrightarrow v(t+1) \in V_j$. Данное условие также является обратимым;
- данные подпространства не имеют пересечений и их объединение в пределе дает $L^2(R) : \overline{\bigcup_{j \in Z} V_j} = L^2(R)$, $\bigcap_{j \in Z} V_j = \{0\}$;
- существует масштабирующая функция $\varphi(t) \in V_0$, имеющая ненулевое интегральное значение, такая что набор ее сдвигов $\varphi_{0,n}(t) = \varphi(t-n)$, $n \in Z$, образует ортонормированный базис в V_0 .

Можно показать, что столь строгий математический формализм является необходимым для построения ортонормированной системы вейвлет-функций на основе масштабирующих функций, определенных в данных подпространствах.

Так как функции $\varphi_{0,n}(t)$ образуют ортонормированный базис пространства V_0 , то функции $\varphi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \varphi(2^{-m}t - n)$ образуют ортонормированный базис пространства V_m . Из этого следует, что функция $f(t)$ в $L^2(R)$ может быть представлена множеством ее последовательных приближений $f_m(t)$ в V_m . Другими словами, функция $f(t)$ есть предел аппроксимаций $f_m(t) \in V_m$ при m , стремящемся к минус бесконечности:

$$f(t) = \lim_{m \rightarrow -\infty} f_m(t). \quad (2.44)$$

Отсюда следует возможность анализа сигнала на различных уровнях разрешения. Переменная m при этом играет роль разрешающего коэффициента на уровне анализа. При больших значениях m функция в V_m грубо аппроксимирует $f(t)$; при малых значениях m имеет место точная аппроксимация.

Очевидно, что при таком представлении точная аппроксимация уже содержит в себе все грубые аппроксимации исходного сигнала. На практике же хотелось бы иметь некоторую очень грубую аппроксимацию исходного сигнала (например, его усредненное значение) и набор последовательных уточнений до достижения необходимой степени детализации. Иными словами, нужна следующая форма представления исходной функции $f(t)$:

$$f(t) = f_m(t) + \sum_{j=-\infty}^m e_j(t). \quad (2.45)$$

Поскольку функции $\varphi_{m,n}(t)$ образуют ортонормированный базис пространства V_m , любая функция $f_m(t)$ из V_m может быть представлена в виде линейной комбинации масштабирующих функций:

$$f_m(t) = \sum_n c_{m,n} \varphi_{m,n}(t). \quad (2.46)$$

Далее, каждое из последовательных уточнений $e_j(t)$ функции $f(t)$ принадлежит некоторому подпространству W_j , представляющему разность соседних подпространств V_{j-1} и V_j и определяющемуся как ортогональное дополнение подпространства V_j до V_{j-1} :

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j, \quad \overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} W_j} = L^2(R), \quad \bigcap_{j \in \mathbb{Z}} W_j = \{0\}. \quad (2.47)$$

Как оказалось, любая функция $e_j(t)$ из W_j также может быть представлена в виде линейной комбинации масштабирующих функций:

$$e_j(t) = \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t). \quad (2.48)$$

При этом $\psi_{j,k}(t) \in W_j$ определяет семейство вейвлет-функций

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), \quad (2.49)$$

где $\psi(t) = \psi_{0,0}(t)$ есть базисная функция W_0 . Это семейство функций образует ортонормированный базис в $L^2(R)$.

Как можно видеть, определение семейства вейвлет-функций на основе концепции кратно-масштабного анализа полностью совпадает с определением, выведенным на основе непосредственной дискретизации непрерывного вейвлет-преобразования. Таким образом, дискретное вейвлет-преобразование дает прекрасные результаты как с точки зрения частотно-временной локализации, так и с точки зрения иерархической системы последовательного приближения исходного сигнала. В довершение всего, существуют эффективные алгоритмы вычисления вейвлет-преобразования, превосходящие по скорости вычислений методы, основанные на быстром преобразовании Фурье [87].

Поясним методологию вейвлет на примере самоподобия корреляционной функции (2.8, 2.9). Принципиально мы должны иметь скользящее окно с различным τ для выявления интервала самоподобия анализируемого процесса.

Для больших временных отрезков (масштабов) исследуемых процессов увеличение разрешающей способности в два раза вызывает слишком большую неопределенность определения локальных особенностей. Тем самым теряется одно из важных свойств непрерывного вейвлет-анализа, обеспечивающего непрерывное отслеживание локальных особенностей сигнала вдоль интервала наблюдения.

Это одна из причин необходимости разработки адаптивно-динамической сегментации.

2.4.4.3. Структурный вейвлет-анализ на основе скелета экстремумов

Приведенные выше математические модели и алгоритмы вейвлет-анализа при решении задач исходили из приспособления компьютерных вычислений к строго постулируемой аксиоматике математической модели вейвлет-анализа. Однако решение конкретной задачи обработки и анализа сигналов, изображений и видеопотока данных видится в выявлении семантико-смысловых характеристик, которые в малой степени зависят от энергетических характеристик аппроксимации сигналов вейвлет-функциями. Сама концепция «multi scale», «multi resolution» изменения интервала наблюдения и разрешающей способности (точно-сти) представления сигнала сводится к адаптивно-динамической сегментации.

Как было указано ранее, непрерывный вейвлет-анализ дает крайне избыточное представление сигнала. Между тем для многих приложений достаточно знать лишь поведение его характерных особенностей. Очевидно, что для сигналов неизвестной природы важнейшими особенностями являются точки максимумов и минимумов энергии или амплитуды сигнала в частотно-временной плоскости. Именно ими, а также изменениями градиента концентрации энергии или амплитуды определяется поведение нестационарных сигналов. Задачи выделения контуров на изображении, резких перепадов и фронтов, многие другие задачи сегментации и распознавания образов основаны на изучении таких экстремальных точек. Совокупность этих точек в области вейвлет-преобразования образует картину, именуемую скелетом максимумов или, более точно, скелетом экстремумов. Особая привлекательность скелета экстремумов состоит в том, что он играет важнейшую роль в применениях вейвлетов к анализу фракталоподобных сигналов и хаотической динамики любых фрактальных процессов, например турбулентных течений, изменения стока рек, вариаций курса акций на бирже и многих других.

Для одномерного сигнала скелет экстремумов представляет собой множество точек на плоскости (a, t) , в которых находятся локальные «пики» вейвлет-преобразования. Этих точек обычно очень много в области малых масштабов. Их появлением вейвлет-преобразование реагирует на любые шероховатости сигнала. При росте масштаба мелкие шероховатости исчезают, а вместе с ними и точки максимумов. Оставшиеся сливаются в довольно гладкие кривые, которые при дальнейшем росте масштаба тоже сливаются друг с другом. При этом они либо «аннигилируют», либо продолжают «расти» в область еще более крупных масштабов. Типичная картина показана на рис. 2.6.

В определенном смысле вся существенная информация о сигнале находится в значениях вейвлет-преобразования в точках скелета экстремумов.

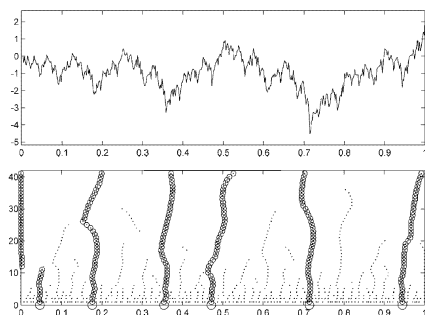


Рис. 2.6. Скелет экстремумов фракталоподобного сигнала [88].

Для вейвлет-анализа широкого класса сигналов все остальные точки непрерывного вейвлет-преобразования не дают никакой существенной информации. Важные для исследователей фрактальные параметры таких явлений, как турбулентные течения, колебания разливов рек, индексов развития и др., свидетельствуют о наличии самоподобного развивающегося процесса, который и выявляется при помощи значений вейвлет-преобразования на скелете экстремумов.

Очень полезным свойством скелета экстремумов является наглядное ранжирование особенностей сигнала по их «силе». У фракталоподобных сигналов, таких как скорость жидкости в данной точке турбулентного течения, электрофизиологические данные и многих других, все точки особые, но все в разной степени. Сама их иерархия является важным физическим параметром, который можно оценить с помощью скелета экстремумов. Например, можно предположить, что самые длинные линии растут из «самых особых» точек, что отмечено на рисунке жирными линиями. Для большинства фракталоподобных сигналов это предположение справедливо. Например, вычисление особых точек по модельным сигналам с заранее известными параметрами показало высокую точность их определения по скелету. В особо нетривиальных случаях наряду со скелетом амплитудного распределения исследуют фазу комплексного вейвлет-преобразования и в качестве скелетной картины берут картину фазовых переходов.

Приведем следующие подходы к устранению избыточности вейвлет-анализа:

- кратно-разрешающий анализ сигнала – вложенная иерархия;
- скелетон – локализация динамики (экстремумов) сигнала.

Первый путь основан на допущениях, которыми руководствуется традиционная цифровая обработка сигналов. Во-первых, анализируемый сигнал полагается имеющим ограниченную полосу частот. Из этого допущения для данного сигнала следует, что его традиционное дискретное представление с использованием равномерной дискретизации

по Шеннону и последующим квантованием по уровню не влечет за собой существенной с точки зрения анализируемых свойств потери информации. В этом случае для непрерывного сигнала применяется концепция кратно-разрешающего («multiresolution») анализа, которая подразумевает представление пространства сигнала – **анализируемого интервала** в виде иерархически вложенных подпространств и выбор в этих подпространствах ортонормированного вейвлет-базиса. Функции этого базиса имеют дискретный набор значений масштабирования, отличающихся на соседних уровнях иерархии в два раза, и дискретный набор значений сдвига, имеющих смысл дискретной выборки значений. При этом интервал сигнала и разрешающая способность по времени делают возможным использование конечного набора дискретных базисных функций.

Второй подход основан на отслеживании изменения локальных особенностей сигнала. В случае нестационарного сигнала такими особенностями являются локальные экстремумы самого сигнала. Применение масштабируемого анализа не позволяет восстановить точную картину поведения этих особенностей вследствие грубой масштабной дискретизации. В связи с этим предлагается другой способ устранения избыточности непрерывного вейвлет-преобразования, предлагающий рассматривать только значения экстремальных точек и их «спектральное» поведение в базисе вейвлет-преобразования. Такая огрубленная картина, содержащая в сжатом виде описание масштабного изменения особенностей сигнала, получила название скелета экстремумов. Конечное количество экстремумов исходного сигнала и приемлемая разрешающая способность их масштабного описания делают данный метод удобным для адаптивной цифровой обработки.

2.4.4.4. Мультимасштабно-разрешающий анализ – MMPA (MSRA)

Получившее распространение в англоязычной литературе понятие «multi scale, multi resolution analysis» (MSRA) не имеет адекватного русскоязычного аналога. Используемые понятия как дословный перевод – кратно-масштабируемый или кратно-разрешающий анализ не полностью отражают исходный смысл. Смысловая интерпретация требует организации вложенной иерархии на заданном (пространственном и временном) интервале анализа сигнала, а также выбор дискретности отсчетов и точности их представления.

Идея MMPA (MSRA) – изменяемая разрешающая способность (точность) анализа («multiscale», «multiresolution») – состоит в том, чтобы взглянуть на сигнал сначала издалека, затем подойти на пару шагов, потом – через лупу и наконец посмотреть под микроскопом.

Эта идея реализуется разными способами, но все они сводятся к последовательному огрублению той информации, которая дана изна-

чально. Иногда действуют наоборот: сначала сильно огрубляют сигнал, смотрят на те особенности, которые еще сохранились, и начинают уточнять их положение.

Что это нам дает? Во-первых, мы можем выявлять локальные особенности сигнала и классифицировать их по интенсивности. Например, в обработке изображений широко распространена разномасштабная локализация резких границ («multiscale edge detection»), когда очень резкие перепады яркости заметны и на малых, и на больших масштабах. В некоторых задачах можно считать их наиболее информативной частью изображения и вычислять с большой точностью. Такой подход последовательного уточнения чего-либо при переходе от крупного масштаба к мелкому возникает в самых разных областях обработки информации и прикладной математики. Хороший пример – многосеточные схемы в вычислительной физике.

Во-вторых, это позволяет визуализировать динамику изменения сигнала вдоль «оси интервалов». Если резкие скачки во многих случаях можно заметить невооруженным глазом, то взаимодействие событий на малых масштабах, перерастающее в крупномасштабные явления, увидеть очень сложно. Например, фрактальная структура каких-либо графиков, сигналов или поверхностей связана с физической природой – «однородностью», которая проявляется на различных интервалах – пространственных и временных.

ММРА (MSRA) анализ помогает количественно охарактеризовать эту однородность. Скачки динамики по «масштабной переменной» могут нести не менее важную информацию, чем резкие изменения по времени или по пространству. Так, при анализе космических снимков земной поверхности выяснилось, что имеется несколько характерных масштабов, на которых фрактальные параметры меняются скачком. Так же и в экологии, и в экономике очень полезно выявлять ситуации, когда изменяемая разрешающая способность позволяет активно выявлять значимые интервалы прогнозирования.

В [89] предложены реализующие подобные концепции адаптивно-динамической обработки сигналов и изображений.

Часто в задачах обработки сигналов и изображений важнее выявить не сами разномасштабные версии сигнала, а найти семантически значимые детали, которые исчезают при переходе к более детальному подробному представлению – реализация эффекта постепенного «проявления».

Вейвлет-преобразования – один из возможных методов компьютерного моделирования при анализе сигналов и изображений. Особенно это касается компрессии данных, и, как показала практика, основанный на вейвлет-преобразовании алгоритм компрессии JPEG2000 превосходит основанный на модификации оконного преобразования Фурье алгоритм JPEG. Однако для других приложений, к примеру для анализа локальных особенностей сигнала, дискретное вейвлет-преобразование

обеспечивает не самые лучшие показатели. Это связано с грубой дискретизацией базисных вейвлет-функций по масштабному разрешению.

Таким образом, при априорно неизвестном масштабе проявления важных для нас особенностей сигнала наиболее эффективной является адаптивно-динамическая сегментация (АДС) сигналов и изображений, опирающаяся на концепцию ПТК. Целью АДС является построение иерархии локальных особенностей сигнала и взаимосвязи этих особенностей на различных масштабах. Взаимосвязь между свойствами сигнала на различных масштабах может быть определена либо заданным дроблением области сигнала, либо адаптивно, например, поиском характерных точек сигнала и объединением их на разных масштабах в древовидную структуру данных [90].

Рис. 2.7 иллюстрирует АДС на трех типах сигналов: самоподобном (б), музыкальном (в) и шумовом (а).

АДС выявляет наличие регулярности (для музыки) и ее отсутствие (шумоподобный сигнал).

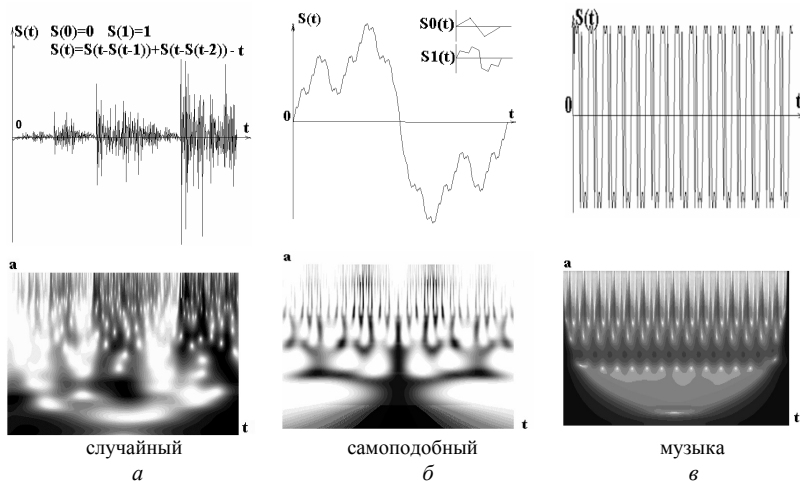


Рис. 2.7. Иллюстрация АДС на разных типах сигналов.

Прикладная направленность АДС заключается в выявлении некоторого ряда сегментов сигнала или фрагментов изображений, на которых проявляется семантика информационного содержания, которая исчезает на следующих уровнях иерархии дробления (масштабирования).

Проблема выбора достаточного для семантического анализа интервала сигнала принципиально неоднозначна и составляет предмет поиска. Это является результатом того, что в каждом конкретном сигнале и изображении **семантически смысловые детали сосуществуют в определенном сегментном диапазоне и требуется лишь определить достаточный уровень масштабной иерархии.**

Другими словами, локализация и идентификация семантической составляющей информационного потока лежит в основе метода АДС. И эта проблема не имеет решения в формализованном описании традиционных математических моделей, в том числе и фурье-анализа.

Рассмотренные выше математические модели функционального описания и обработки сигналов основаны на концепции анализа, что и приводит к исходному противоречию между синтезом информационного содержания и его препарированием - анализом через сопоставление с законсервированными свойствами аппроксимирующих функций.

Компьютер и программируемая технология в большей степени инструмент синтеза, который предоставляет широкие возможности семантического анализа информационного содержания, в отличие от технологии фурье-анализа.

2.5. Фрактальный подход

Востребованность в слове «фрактал» и понятиях «фрактализация», «фрактальность» возникла из необходимости обозначить часто встречающийся феномен самовоспроизводящихся процессов, проявляющихся во многих областях знаний. Этот итерационный процесс познания был известен с древности, проявляющийся, например, в «мистике» числа Фибоначчи, иллюстрирующего самоподобный развивающийся процесс [82, 90, 91].

Другими словами, синтетический подход, который отражает способность к возвратному воздействию, как бы самовоспроизводиться по типу эталона, ДНК или, согласно В. Брюсову, «...стремиться передать создания поэта с одного языка на другой, – это то же самое, как если бы мы бросили в тигель фиалку с целью открыть основной принцип ее красок и запаха. Растение должно возникнуть вновь из собственного семени, или оно не даст цветка, – в этом-то и заключается тяжесть проклятия вавилонского смешения языков».

Самовоспроизводящийся процесс лежит и в основе лингвистики и сюжетного развития. Например, выражение «про белого бычка» употребляется в значении повторения одного и того же. Возникло оно из «докучной» сказочки, которой дразнят детей, докучающих просьбой рассказать им сказку: « – Сказать ли тебе сказку про белого бычка? – Скажи. – Ты скажи, да я скажи, да сказать ли тебе сказку про белого бычка? – Скажи. – Ты скажи, да я скажи, до чего у нас будет, да доколь это будет! Сказать ли тебе сказку про белого бычка?» и т. д., пока не наскучит одному спрашивать, а другому отвечать» [45].

Синтетический подход – это такое построение информационного сообщения, когда содержание развертывается в процессе самоопределения элементов, понятий и связей между ними, образуя семантические связи и смысловые значения.

Основным элементом адекватности восприятия является **идея возвратного воздействия**, когда алгоритм свертки и развертки непосредственно присутствует в самом информационном содержании.

Наша способность к обучению: читать, писать, видеть, понимать основана на принципе возвратного воздействия – обобщения как связанной иерархии понятийных отношений.

Нотная запись – только для музыканта является информационным сообщением, для основной же массы слушателей таковым является непосредственно музыка.

Основа изоморфизмов текста, звука, образа и т.д., с одной стороны, и клавиатуры, памяти, дисплея компьютера - с другой, определяется интерфейсными протоколами, форматами и другими идентификационными двоично-кодowymi представлениями. Поисковые серверы Интернета по сути отображают изоморфизмы (транслируют) «числа» (уникальные идентификаторы) в тексты, звуки и образы, реализующие **«магию»** воспроизводства, а в качестве современного **мага** – «посвященного» выступают хакеры, системные программисты, те, для кого последовательность единиц и нулей – такой же естественный язык.

Штрихкодová унификация – «зерно-семя-ДНК» является компьютерным прототипом такой свертки и развертки: каждый вид «семени» приводит к своему «плоду», который уже содержит «семена» будущего. Процесс, обеспечивающий эволюцию, опирается на простой рекурсивный механизм: **подобное воспроизводит подобное**. Все остальные свойства: инвариантность масштабирования, дробная топологическая размерность, рекурсивность построения, степенные законы, фракталы, фрактальность - лишь следствия проявления различного типа и уровня подобия.

Самоподобная, масштабно-инвариантная связанная линия, составленная из прямых или криволинейных участков, названная по имени шведского математика Хельга фон Коха, впервые описавшего подобный феномен в 1904 г., используется в качестве иллюстрации понятия фрактала.

Биологи-теоретики пришли к открытию – самоподобная итерация, приводящая к масштабно-инвариантным процессам развития организма - не просто широко распространенный, но и универсальный принцип морфогенеза. Проникновение в механизмы кодирования и воспроизводства таких моделей станет настоящим вызовом традиционной биологии [5, 33]. Подобно тому как кривая Коха «сжимает» бесконечно длинную линию в ограниченное пространство, так в системе кровообращения поверхность с огромной площадью должна вмещаться в ограниченный объем.

Традиционное описание разветвлений в бронхах также оказалось в корне неверным; их аналог – самоподобная иерархия. Самоподобие – процесс развития биологических организмов как единого целого.

Факты проявления самоподобия в природе и различных научных дисциплинах требовали обобщения и гносеологической опоры на иную парадигму знаний, которые в действительности не вытекали из определения термина «фрактал», но как часто бывает, новое «крылатое» слово дало имя «новой науки». И эта «новая наука», доступно изложенная в [73], проявила себя через огромное число, казалось бы, частных междисциплинарных примеров – аналогов, развивающих один частный факт. Исследования Б. Мандельброта на примере кривых колебаний суточных, месячных и годовых цен на хлопок показали удивительное их соответствие друг другу. Это и есть феномен масштабирования – проявления рекурсивной повторяющейся симметрии крупных и мелких масштабов. Значительно позднее определение фрактала было введено Бенуа Мандельбротом в его книге «Фрактальная геометрия природы» [28] и было сформулировано как математический объект – дробная топологическая размерность и лишь как способ вычисления размерности кривых, поверхностей и других объектов.

Исследование же неупорядоченности в естественных процессах и анализ сложных форм пересекались, и точкой пересечения послужило так называемое внутреннее подобие.

Внутреннее подобие проявляется в иерархии симметрий через масштабы повторения большого в малом, целого в части.

В обычной геометрии кроме уравнения необходим также и набор чисел, которые ему удовлетворяют, тогда решения уравнения типа $x^2 + y^2 = 1$ образуют форму, в данном случае – окружность. Другим простым уравнениям соответствуют иные фигуры: эллипсы, параболы, гиперболы конических сечений и даже более сложные формы, порождаемые дифференциальными уравнениями в фазовом пространстве.

Но когда прибегают к итерации, вместо того чтобы решать уравнение, последнее преобразуется из описания в процесс, из статического объекта в динамический.

С появлением вычислительных машин «геометрия проб и ошибок» становится эффективным методом научных исследований.

Принцип внутреннего подобия при различных масштабах позволяет «визуализировать» поведение исследуемой системы. И каждый взгляд в глубины системы приносит все новые сюрпризы. При достаточном «увеличении» (числе итераций) выяснилось, что система лишь приблизительно повторяет свои же элементы – крошечные, похожие на жучков объекты, отделившиеся от основной формы. Однако, еще более увеличив изображение, можно заметить, что эти формы не во всем соответствуют друг другу, всегда появлялись новые формы, похожие на морских коньков или на вьющиеся ветви оранжерейных растений. Фактически ни один фрагмент «изображения» системы точно не походил на

другой при любом увеличении. Что никак не соответствует определению термина «фрактал».

Тем не менее термином «фрактал» стали обозначать метод описания, вычисления и рассмотрения множества неупорядоченных и фрагментарных, зазубренных и разъединенных объектов, начиная от кристаллообразных кривых-снежинок и заканчивая прерывистой цепью галактик. Фрактальная кривая воплощает организующую структуру, скрытую в сложности описания различных форм.

А фрактальный подход, скорее, философская концепция, реализуемая посредством программируемой технологии – синтезом различных информационных объектов.

Инвариантная масштабность наблюдаемая в микро- и макро- мире находит все большее число сторонников новой альтернативной атомарной теории строения вещества, уже не требующей наличия элементарных частиц в качестве фундаментального «кирпичика» материи. Концепция нового состояния вещества, обладающего свойством масштабной инвариантности и не описываемой в терминах атомарной теории должна обладать существенно иными, чем «обычные» элементарные частицы, свойствами, но при этом может взаимодействовать с ними. Эта гипотеза хорошо согласуется и с принципом простоты, когда сложность целого: описание процесса, явления, факта, системы, организма и др., связана не с их параметрами, а с интервалом (числом итераций) в процессе самоподобного развития. До сих пор законы симметрии и их интерпретация, например при описании кристаллов, основаны на функционально параметрическом представлении, которые являются лишь следствием феномена самоподобного развития.

И в этом легко убедиться, например, при помощи пакета FractInt [9].

2.6. Пакет FractInt

Программная среда FractInt [9] предназначена для конструирования изображений фракталов с произвольной степенью детализации. Пакет является результатом совместной работы международного коллектива энтузиастов. В отличие от иных генераторов фракталов он обладает неожиданно высоким быстродействием и содержит большое количество различных типов фракталов, а также дает пользователю возможность построения собственных вариантов (либо взяв за основу стандартный шаблон, либо создав совершенно новое описание).

FractInt – пример программируемой технологии, симулятор, создающий фракталоподобные информационные объекты разнообразных типов. Опишем некоторые из этих типов, а затем расскажем, как средствами пакета создать новые. Когда говорят о разных типах фракталов,

надо понимать, что речь идет о разных способах определения фракталов и разных вариантах их построения.

Примеры построения различных фракталов с помощью FractInt приводятся на рис. 2.8-2.15, а их параметры – в табл. 2.4.



Рис. 2.8. Водоросли.

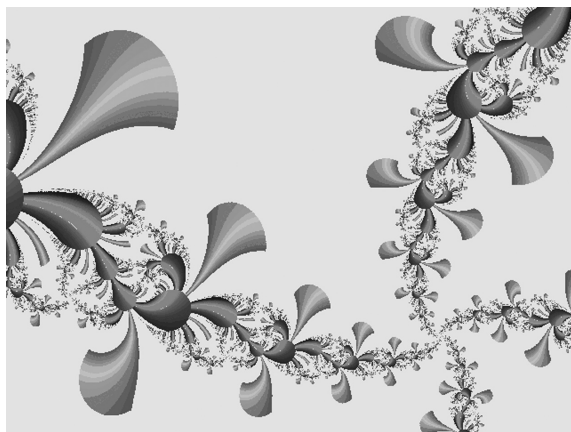


Рис. 2.9. Цветы.

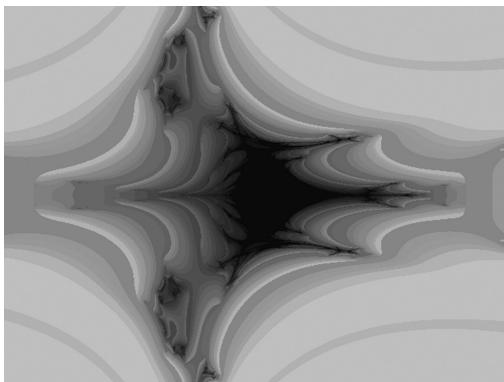


Рис. 2.10. Бэтмен.

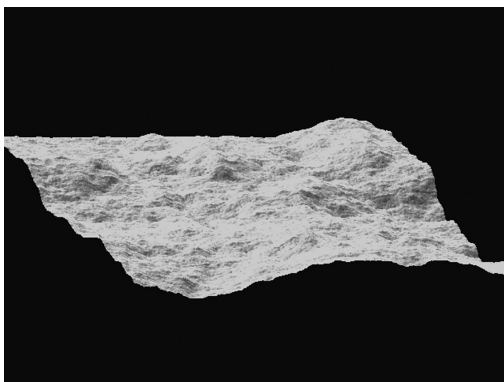


Рис. 2.11. Ландшафт.

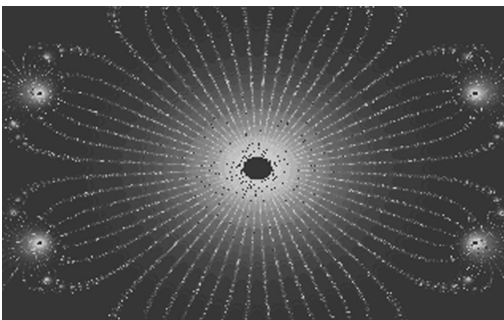


Рис. 2.12. Электромагнитное поле.



Рис. 2.13. $y = \sqrt[6]{x}$.

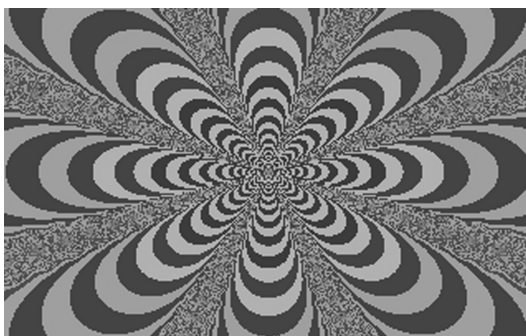


Рис. 2.14. $y = \sqrt[8]{x}$.

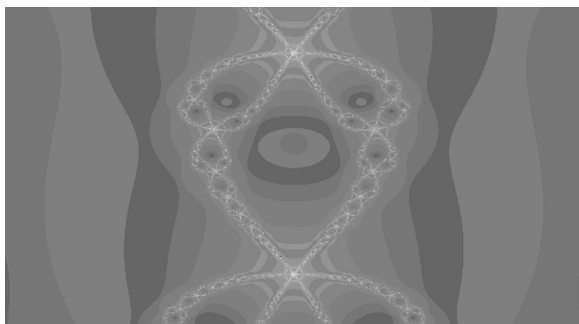


Рис. 2.15. Муравей.

Таблица 2.4.

Параметры фракталов

Рис. №			2.8	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15
Тип фрактала			lambda	Lambdafn exp	Manfn +zsgrd cosxx	“3D”	Complexnew-ton	Newton	Newton	Complex newton
Corners	Top-left	X	0.7317	-0.5430	1.5916		-0.8470	-0.0371	-0.0032	-31.99
		Y	0.5003	0.5511	3.1446		0.6486	0.0292	-0.0141	24.1774
	Bottom-right	X	1.3121	0.5211	1.5916		0.8402	0.0382	0.0032	31.99
		Y	0.0645	-0.5136	-3.1556		-0.6216	-0.2751	-0.0190	-24.6275
Center			1.0218		-0.0034		-0.0034	0.0005	0	
			0.2824		0.0135		0.0135	0.0009	-0.0166	
Mag			4.5895				1.5745	35.2149	416.1702	
Params.	1	0.85	22	0			8.1	3	3	8
	2	0.6	0	0			0	0	0	0
	3	0	0	0			0	0	0	8
	4	0	0	0			1	0	0	0
Iteration maximum			200	50	32000		200	150	200	150
Effective bailout			4	0	127		0	0	0	0
Current ‘rseed’										
Select a map file				headache. map	lyapunov. Map		default. map	default. map	default. Map	head-ache. map

Множество Мандельброта описывается при помощи формулы $z_{n+1} = z_n^2 + C$; поясним связь между формулой и возникающей картинкой: на экране дисплея отображается фрагмент плоскости. Каждая точка этой плоскости соответствует некоторому комплексному числу C , последовательность $z_0 = 0; z_{n+1} = z_n^2 + C$, определяет ее орбиту. Точка будет отмечена черным цветом, если она отклонится за пределы заданного круга. Если же, например, первые 100 итераций попадут в круг, тогда точки имеют белый цвет. Так строится черно-белое изображение. Для получения же цветных изображений в разные цвета окрашиваются точки, соответствующие которым орбиты покидают круги в разные моменты времени (число итераций). Таким способом раскрашивается не фрактал, а его дополнение до комплексной плоскости.

Множество Мандельброта, которое Д. Ж. Глик назвал «самым сложным объектом среди известных математикам», является характерной иллюстрацией ещё одного полезного свойства фракталов – описывать такие предельно сложные объекты, как множество, при помощи всего нескольких символов. В этом и заключаются практически неограниченные возможности компрессии информационных объектов, хранящихся в компьютере в цифровом представлении.

Любое множество Мандельброта можно рассматривать как каталог множеств Жулиа, а именно: для точки C повторим весь процесс создания фрактала, но в выражении $z^2 + C$, используемом при построении орбит, значение C будет теперь фиксированным, а z_0 последовательно принимает значения, соответствующие всем точкам плоскости. Поэтому для каждой точки C множества Мандельброта может быть построен свой фрактал Жулиа.

FractInt позволяет построить и 4-мерный фрактал: в плоскости (x,y) построим множество Мандельброта и в каждой его точке построим по осям (y,t) соответствующее множество Жулиа. Этот процесс соответствует стандартному типу JuliBrot [9]. Используя оси (x,y,z) как пространственные и рассматривая различные сечения по оси t , можно наблюдать развивающийся во времени трехмерный фрактал.

Но орбиты, используемые для построения множеств Мандельброта сами могут являться фракталами (так называемые орбитальные фракталы), например GingerBreadMan, получаемый по формуле:
$$\begin{cases} x' = 1 - y + |x| \\ y' = x \end{cases}$$
, каждый фрагмент которого содержит копию исходного изображения. Процесс построения орбитального фрактала бесконечен.

Еще один орбитальный фрактал – фрактал Лоренца – две спирали, соединенные подобно крыльям летящей бабочки, – эта траектория никогда не замкнется. Можно включить звук и, установив вдоль какой оси изменяется частота звука, слушать, как строится этот фрактал.

Другой тип фракталов – ИФС (итерационные функциональные системы), – т.е. описание через самоподобие. Каждое уравнение, приведенное в описании такого фрактала, задает положение части фрактала, являющейся его уменьшенной копией. Классической иллюстрацией подобного свойства служит фрактал, известный под названием листа папоротника. Можно конструировать и трехмерные ИФС.

Диффузия также имеет фрактальную основу. Для моделирования в центр экрана помещается единственная точка, а затем вокруг нее случайным образом генерируются новые точки. Точки, которые оказались рядом с уже построенными, добавляются к фракталу, а все остальные удаляются.

Другой фрактал, основанный на генераторе случайных чисел, – Plasma имеет рекурсивный алгоритм построения и случайный выбор цветов на каждом шаге. Когда цвета четырех вершин прямоугольника

определены, цвет середины каждого отрезка выбирается как произвольное значение из диапазона, заданного цветами точек на концах этого отрезка, и т.д. При этом алгоритм сглаживает цветовые контрасты, благодаря чему результат построения напоминает облако.

Обычно самоподобие является следствием основного определения фракталов, но можно прийти к фракталам и от самоподобия, определив некоторый элемент и задав рекурсивный процесс построения фрактала.

Те же фракталы можно получить и как странные аттракторы хаотически развивающихся процессов.

Слишком долго пришлось бы перечислять все категории, типы и конкретные фракталы, которые могут быть получены при помощи пакета, но FractInt также позволяет пользователю создавать собственные типы фракталов.

Простейший способ создать новый фрактал – это воспользоваться готовым шаблоном (тип Formula). Кроме того, сам шаблон может быть определен, так как любое описание фрактала достаточно набрать в текстовом файле, все остальное сделает встроенный компилятор формул.

Например, описание множества Мандельброта, основанного на функции тангенса, будет выглядеть так:

```
TypeName = { Z=pixel; Z=pixel*(sin(Z)/(cos(Z))); /Real(Z)/<=32 }  
Comment={pixel это координаты исходной точки изображения }
```

Другой способ построения – это *L*-системы, которая была введена в рассмотрение А. Линденмейером в 1968 году для моделирования развития живых организмов, но могут быть применены и для получения таких абстрактных объектов, как ковер Серпинского. Близкое отечественное название – развивающиеся системы.

Для того чтобы, например, «вырастить дерево» нужно выбрать тип фрактала Lsystem и воспользоваться описанием на специальном языке. Этот язык состоит из 20 команд [9], ограничимся примерами.

Полученный авторами фрактал Cabbage – развивающаяся структура, построенная по правилам самоподобных преобразований простой исходной конфигурации также легко может быть получена и как *L*-система:

```
Cabbage {   Angle 8  
           Axiom X  
           X=>1F++F++F++++--F++F_@Q12{++<1X }
```

Заполняющие пространство кривые также строятся как системы Линденмейера:

```
DragonCurve {   Angle 4  
               Axiom X  
               X=X-YF-  
               Y==FY+Y }
```

2.7. Итерационно-функциональные системы

Удивительным образом дисциплины, развивавшиеся как самостоятельные, например теория катастроф, нелинейные динамические системы и фракталы, сошлись в применении итерационно-функциональных систем (ИФС). Наиболее полно их математический аппарат изложен в [41, 92] под понятием «интегральная геометрия».

Мы адаптируем достаточно сложный текст [41] об ИФС, который дополнит итерационный процесс синтеза сложных информационных объектов. Особенно интересен факт применения ИФС к исследованию динамических развивающихся систем.

Динамические развивающиеся системы продолжают интенсивно изучаться как с теоретической, так и с прикладной точки зрения. Возможности компьютеров позволили дополнить теоретический анализ числовым исследованием – синтезом. В соответствии с конструктивной математикой вместо доказательства существования строится непосредственно объект. Например, из рис. 2.8-2.15) легче понять свойства исследуемых функций и моделей. Кроме того, оказываются возможным «топологические» методы изучения качественного поведения систем, что значительно расширяет традиционный количественный подход. Итерационный синтез ИФС как один из способов компьютерного моделирования стимулируется все более и более разнообразными областями применения. Развивающиеся системы – естественный процесс в биологии, географии, экономике и интернетовском развитии, так же как и в традиционных дисциплинах - физике, связи и теории управления.

Пусть множество D будет подмножеством R^n (обычно R^n непосредственно), и пусть $f: D \rightarrow D$ непрерывное отображение. Тогда, f^k обозначает k -ю итерацию f так, что

$$f^0(x) = x, f^1(x) = f(x), f^2(x) = f(f(x)) \text{ и т.д.}$$

Ясно, что $f^k(x)$ принадлежит D для всех k , если x - это точка в R^n . Как правило, $x, f(x), f^2(x) \dots$ – это значения во время $0, 1, 2 \dots$ как число итераций. Таким образом, значение во время $k+1$ дается в элементе значения во время функцией f . Например, $f^k(x)$ может представлять размер биологической популяции после k лет или значение инвестиционного предмета к определенному параметру и заданным условиям.

Повторяющуюся схему называют дискретной динамической системой. И задача сводится к исследованию поведения последовательности на итерациях, или орбитах, $\{f^k(x)\}_{k=1}^{\infty}$ для различных начальных точек $x \in D$, особенно для больших k . Например, если $f(x) = \cos x$, то последовательность $f^k(x)$ сходится к $0,739 \dots$ при $k \rightarrow \infty$ для любой начальной точки x .

2.7.1. Рекурсивный аттрактор

Примером простой динамической системы с рекурсивным аттрактором является преобразование «пекаря», называемое так, потому что напоминает процесс повторяемого растяжения части теста и сворачивания этого вдвое. Пусть $E = [0,1] \times [0,1]$ единичный квадрат. Для фиксированной $0 < \lambda < 1/2$ мы определяем преобразование «пекаря» $f: E \rightarrow E$ следующим образом:

$$f(x, y) = \begin{cases} (2x, \lambda y) & (0 \leq x \leq \frac{1}{2}), \\ (2x - 1, \lambda y + \frac{1}{2}) & (\frac{1}{2} < x \leq 1). \end{cases} \quad (2.50)$$

Это преобразование может быть расценено как растяжение E прямоугольника $2 \times \lambda$, разделение его на два прямоугольника $1 \times \lambda$ и расположение их друг над другом с промежутком $1/2 - \lambda$ между ними (рис. 2.17). Тогда $E_k = f^k(E)$ — уменьшающаяся последовательность наборов, включающая 2^k горизонтальные полосы высотой λ^k , отделенные промежутками $(1/2 - \lambda)\lambda^{k-1}$.

Анализ по этим линиям показывает, что f имеет чувствительную зависимость от начальных условий и что периодические точки f являются плотными в F , так что F — хаотический аттрактор для f . F — аттрактор — $[0,1] \times F_1$, где F_1 — набор Кантора, который является ИФС аттрактором $S_1(x) = \lambda x, S_2(x) = 1/2 + \lambda x$.

Преобразование «пекаря», будучи кусочно-линейным и прерывистым, довольно искусственно, однако действительно может иллюстрировать, как процедура «растяжения и свертывания» приводит к рекурсивному аттрактору.

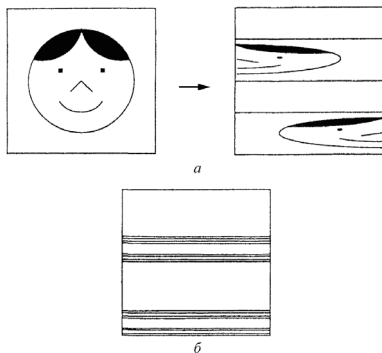


Рис. 2.17. Преобразование пекаря:
а — его эффект на единичный квадрат; б — его аттрактор.

2.7.2. Поиск преобразования самоподобия

Рассмотрим итерационно-функциональную систему, заданную преобразованиями $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ над $D \in \mathbf{R}^n$, такими что

$$|S_i(x) - S_i(y)| \leq c_i |x - y|, \quad (2.51)$$

где $(x, y) \in D$, $c_i < 1$ для всех i . Тогда существует уникальный аттрактор F , такой что

$$F = \bigcup_{i=1}^m S_i(F). \quad (2.52)$$

Более того, если мы определим преобразование S над классом $\mathbf{S}$, как

$$S(E) = \bigcup_{i=1}^m S_i(E) \quad (2.53)$$

для $E \in \mathbf{S}$ и запишем S^k для k -й итерации (т.е. $S^0(E) = E$ и $S^k(E) = S(S^{k-1}(E))$ для $k \geq 1$), то

$$F = \bigcap_{k=0}^{\infty} S^k(E) \quad (2.54)$$

для каждого множества $E \in \mathbf{S}$, такого что $S_i(E) \subset E$ для всех i .

Самое сильное ограничение аксиоматического свойства – то, что структура $\mathbf{R}$ не полностью воспроизводима в мире Тьюринга, т.е. при компьютерном моделировании. Кроме того, существуют следующие две основные проблемы, связанные с итерационно-функциональными системами. Одна из проблем заключается в представлении, или «кодировании», заданного множества в виде аттрактора некоторой ИФС. Другая проблема – в «декодировании» ИФС.

Поиск ИФС, для которой существует уникальный аттрактор, часто может быть осуществлен путем исследования, по крайней мере, если F самоподобно или самоаффинно. Например, легко установить, что канторова пыль является аттрактором четырех подобий, которые задают основу построения множества:



$$S_1(x, y) = (\tfrac{1}{4}x, \tfrac{1}{4}y + \tfrac{1}{2}),$$

$$S_2(x, y) = (\tfrac{1}{4}x + \tfrac{1}{4}, \tfrac{1}{4}y),$$

$$S_3(x, y) = (\tfrac{1}{4}x + \tfrac{1}{2}, \tfrac{1}{4}y + \tfrac{3}{4}),$$

$$S_4(x, y) = (\tfrac{1}{4}x + \tfrac{3}{4}, \tfrac{1}{4}y + \tfrac{1}{4}).$$

В общем случае невозможно найти ИФС с заданным аттрактором, но вполне возможно найти аттрактор, который является близким приближением к необходимому множеству.

Преобразование S является ключевым для расчета аттрактора ИФС. Последовательность итераций $S^k(E)$ сходится к аттрактору F

для любого начального множества E из класса $\mathcal{S}$, т.е. $d(S^k(E), F) \rightarrow 0$. Из неравенства $d(S(A), S(B)) \leq (\max_{1 \leq i \leq m} C_i) d(A, B)$ следует, что

$$d(S(E), F) = d(S(E), S(F)) \leq cd(E, F).$$

Откуда $d(S^k(E), F) \leq c^k d(E, F)$, где $c = \max_{1 \leq i \leq m} c_i < 1$.

Для всех k

$$S^k(E) = \bigcup_{L_k} S_{i_1} \circ \dots \circ S_{i_k}(E) = \bigcup_{L_k} S_{i_1}(S_{i_2}(\dots(S_{i_k}(E))\dots)), \quad (2.55)$$

где объединение проводится над множеством L_k всех k -членных последовательностей $(i_1, \dots, i_k)$, где $1 \leq i_j \leq m$ (рис. 2.18). Если $S_{i_j}(E)$ содержится в E для всех i , а x является точкой из F , то из (2.54) следует существование (не обязательно уникальной) последовательности $(i_1, i_2, \dots)$, такой что $x \in S_{i_1} \circ \dots \circ S_{i_k}(E)$ для всех k . Эта последовательность обеспечивает кодирование x :

$$x = x_{i_1 i_2 \dots} = \bigcap_{k=1}^{\infty} S_{i_1} \circ \dots \circ S_{i_k}(E), \quad (2.56)$$

откуда $F = \bigcup \{x_{i_1 i_2 \dots}\}$.

Отметим, что если объединение (2.52) несвязно, то F должно быть полностью несвязным, так как при $x_{i_1 i_2 \dots} \neq x_{i'_1 i'_2 \dots}$ можно найти k , такое что $(i_1, \dots, i_k) \neq (i'_1, \dots, i'_k)$, т.е. несвязные закрытые множества $S_{i_1} \circ \dots \circ S_{i_k}(F)$ и $S_{i'_1} \circ \dots \circ S_{i'_k}(F)$ разделяют две точки.

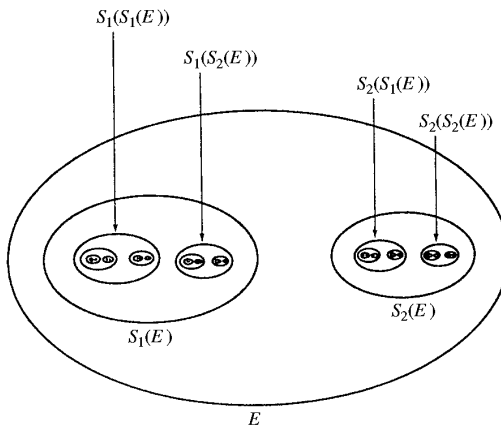


Рис. 2.18. Создание аттрактора F для сжатий S_1 и, которые отображают большой эллипс E на эллипсы $S_1(E)$ и $S_2(E)$. Множества $S^k(E) = \bigcup_{i_1=1,2} S_{i_1} \circ \dots \circ S_{i_k}(E)$ обеспечивают возрастающую степень аппроксимации множества F .

Это может быть проиллюстрировано на примере множества кантора. Если $E = [0,1]$, то $S^k(E) = E_k$ представляет собой совокупность 2^k основных интервалов длиной 3^{-k} , полученных на шаге k .

Существует два метода компьютерного изображения аттракторов ИФС на плоскости, как показано на рис. 2.19. Первый метод (рис. 2.19, а) состоит в выборе некоторого начального множества E и изображении k -го приближения $S^k(E)$ к F , заданного через (2.55) для соответствующего k ; $S^k(E)$ состоит из m^k множеств, их можно изображать полностью или в виде точки. Если E выбрано в виде прямой, так что $S_1(E), \dots, S_m(E)$ формируют полигональную кривую с концами, совпадающими с концами исходной прямой, тогда последовательность кривых $S^k(E)$ обеспечивает возрастающее качество аппроксимации фрактальной кривой F . Принятие в качестве E начального отрезка при построении кривой Коха является примером вышеописанного. При решении задач такого рода может быть полезным применение рекурсии.

Для второго метода (рис. 2.19, б) возьмем x_0 за начальную точку, выберем сжатие S_{i_1} из $S_1, \dots, S_m$ случайным образом и положим, что $x_1 = S_{i_1}(x_0)$. Продолжая, случайным образом выберем S_{i_k} из $S_1, \dots, S_m$ и положим $x_k = S_{i_k}(x_{k-1})$, где $k = 1, 2, \dots$. Для достаточно больших значений k точки x_k будут неотличимо близки к F , таким образом последовательность $\{x_k\}$ будет случайным образом распределена по множеству F .

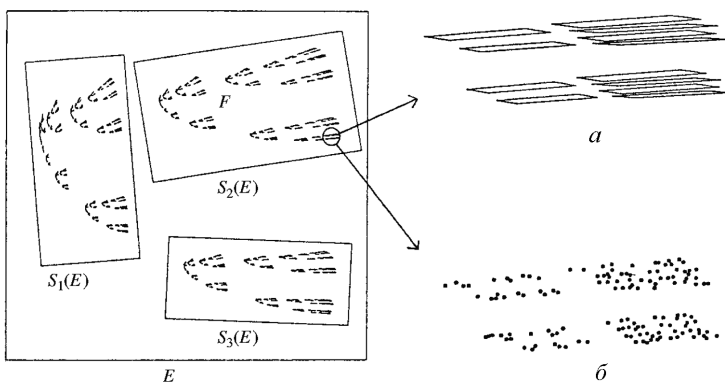


Рис. 2.19. Два способа компьютерного изображения аттрактора F ИФС, состоящей из трех аффинных преобразований S_1, S_2 и S_3 , которые отображают квадрат на прямоугольники.

2.7.3. Метод эталона

Существует удобный способ задания некоторых самоподобных множеств с помощью диаграмм. Эталон состоит из некоторого количества отрезков прямых и двух специально отмеченных точек. Каждый отрезок ассоциируется с преобразованием подобия, которое отображает две специальные точки на конечные точки сегмента. Последовательность множеств, аппроксимирующая самоподобный аттрактор, может быть построена путем итерационной замены сегмента линии на эталон.

Проиллюстрируем построение ИФС по заданному эталону следующими примерами (рис. 2.20–2.23).

Модифицированная кривая Коха (рис. 2.20). Зафиксируем $0 < a \leq 1/3$ и построим кривую F путем последовательной замены средней части каждого отрезка на две другие стороны равностороннего треугольника. Тогда $\dim_{\text{н}} F = \dim_{\text{в}} F$ является решением $2a^s + 2(\frac{1}{2}(1-a))^s = 1$.

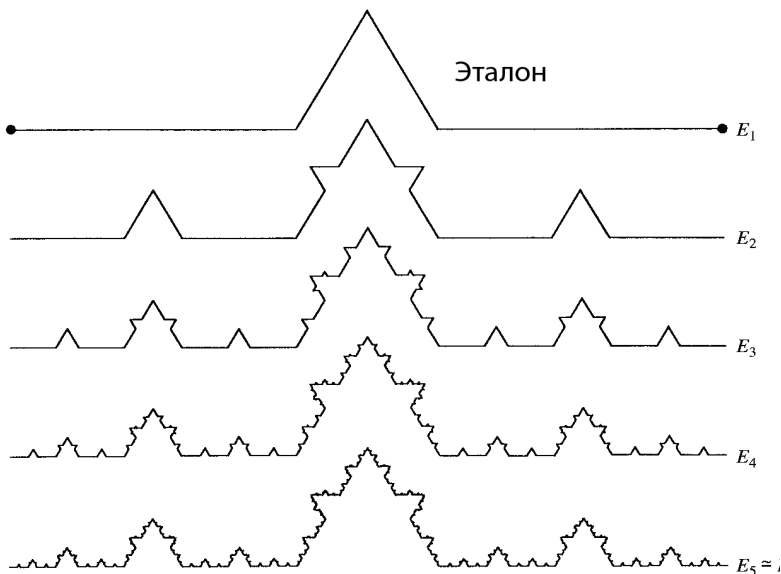


Рис. 2.20. Построение модифицированной кривой Коха.

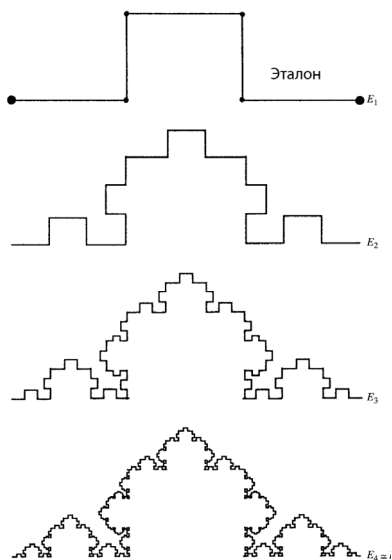


Рис. 2.21. Этапы построения фрактальной кривой по эталону. Длины сегментов в генераторе равны $1/3, 1/4, 1/3, 1/4, 1/3$, размерность Хаусдорфа для множества F задается выражением $3(1/3)^s + 2(1/4)^s = 1$ или $s = 1.34$.

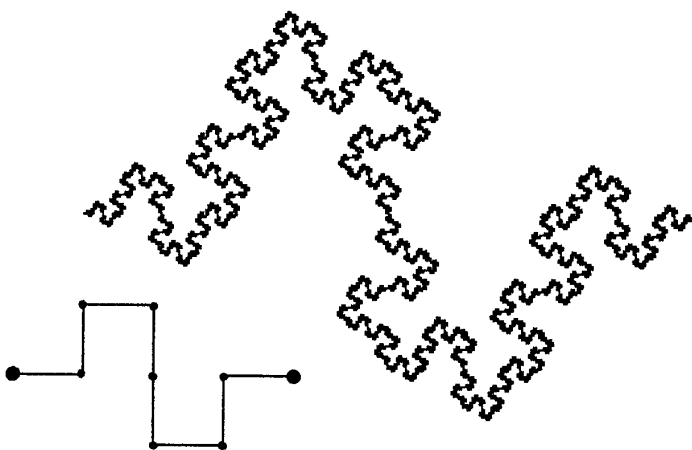


Рис. 2.22. Фрактальная кривая и ее эталон. Размерность Хаусдорфа для кривой равна $\log 8 / \log 4 = 1\frac{1}{2}$.

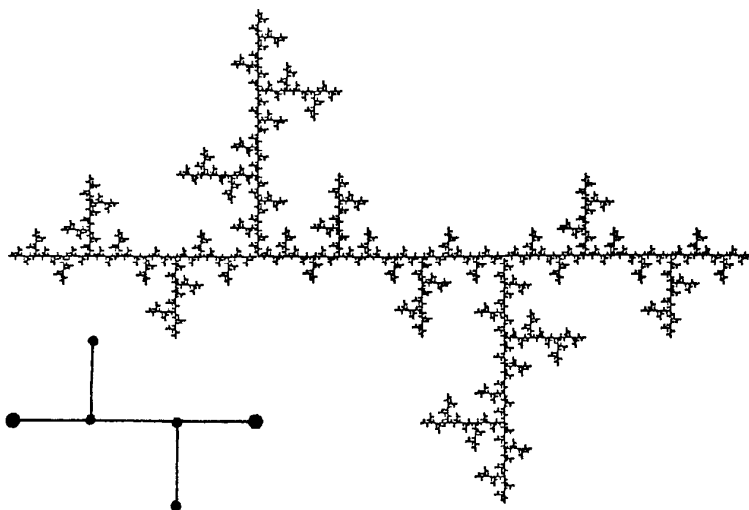


Рис. 2.23. Фрактал, похожий на дерево, и его эталон. Размерность Хаусдорфа для кривой равна $\log 5 / \log 3 = 1.465$.

2.7.4. Метод коллажа

Рассмотрим метод, обратный нахождению аттрактора ИФС. Пусть имеется некоторое изображение или его часть, например изображение листка, дерева и т. п. Необходимо найти совокупность сжимающих аффинных отображений, для которых данное множество является аттрактором. Решение обратной задачи имеет большое значение для такой области прикладных исследований, как сжатие изображений, широко используемое при передаче изображений в реальном времени. Проиллюстрируем сказанное на примере передачи телевизионного сигнала высокой четкости (HDTV). Из-за того что стандартные кабели, подводящие сигнал к пользовательским телеприемникам, не могут передавать данные достаточно быстро, частота обновления экрана не удовлетворяет стандарту HDTV – она ниже требуемой. По некоторым оценкам, для достижения приемлемой частоты регенерации требуется сжатие данных порядка 1000:1. Было опробовано множество алгоритмов, некоторые из которых претендуют на успешное решение проблемы.

Один привлекательный способ сжатия изображения заключается в том, чтобы разбить исходное изображение на компоненты и считать их аттракторами некоторых ИФС. Так как каждое аффинное преобразова-

ние определяется всего лишь шестью коэффициентами, то полное изображение в принципе может быть закодировано достаточно малым числом аффинных коэффициентов. Тогда по кабелю можно передавать коэффициенты, а изображение (совокупность аттракторов) - восстанавливать по ним, выполняя алгоритм ИФС.

Рассмотрим гипотетический пример. Пусть нам требуется передать изображение ковра Серпинского размером 512×512 . Не применяя сжатия, придется послать 262 144 бит информации, ноль или единицу для каждого пиксела. С другой стороны, если передавать всего лишь 18 аффинных коэффициентов трех аффинных преобразований (каждый коэффициент задан с точностью 8 бит), коэффициент сжатия будет $262\,144 : 144 = 1820 : 1$.

Таким образом, вопрос заключается в том, как найти совокупность сжимающих аффинных отображений для данного аттрактора. Мы только коснемся этой новой темы научных исследований. Метод, который рассматривается ниже, метод коллажа, основан на элементарных свойствах фрактальных построений.

Предположим, что некоторая конфигурация X представляет собой объединение (коллаж) N непересекающихся множеств, связанных с X преобразованиями подобия $T_1, T_2, \dots, T_m$ с коэффициентами подобия $s_1, s_2, \dots, s_m$ соответственно. Коэффициенты подобия могут быть не равны друг другу. Единственное условие, чтобы $s_i < 1, i = 1, 2, \dots, N$. Тогда X – аттрактор, заданный преобразованиями $T_1, T_2, \dots, T_m$.

Вообще говоря, мы можем использовать не только преобразования подобия, но и другие. Это обстоятельство становится важным, если нам, к примеру, требуется эффект удлинения в некотором направлении, как на рис. 2.24. **Безусловно, отыскание аффинных отображений для произвольного аттрактора может оказаться очень сложным делом.**

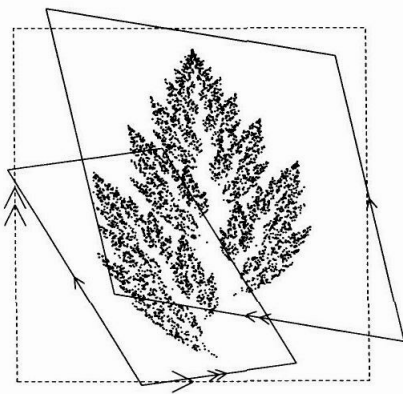


Рис. 2.24. Коллаж из фигуры «лист».

Оставляя в стороне вопрос об отыскании аффинных отображений для аттрактора, соответствующего исходному изображению, обратимся к главному математическому аспекту проблемы. Оценим хаусдорфово расстояние между исходным изображением и построенным аттрактором. Следующая теорема пытается дать необходимую оценку.

Теорема. Пусть I – непустое компактное множество (исходное изображение); $T_1, T_2, \dots, T_m$ – сжимающие отображения с коэффициентами сжатия $s_1, s_2, \dots, s_m$ соответственно; E – аттрактор ИФС, связанной с этими отображениями, и $s = \max\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$. Тогда, если для некоторого $\varepsilon > 0$ выполняется неравенство

$$H\left(I, \bigcup_{i=1}^m T_i(I)\right) < \varepsilon,$$

то

$$H(I, E) < \frac{\varepsilon}{1-s}.$$

Этот формализованный критерий останова, т.е. близости исходного и компрессированного сигналов, изображений и т.д.

«Точка» x_0 – исходный информационный объект (изображение) I , «неподвижная точка» x_f – аттрактор E , а $d(x_0, x_1)$ есть не что иное, как оператор формирования подмножеств

$$H\left(I, \bigcup_{i=1}^m T_i(I)\right).$$

Рис. 2.24 и 2.25 иллюстрируют, как с помощью метода коллажа можно получать некоторые фракталы. На этих рисунках конфигурации, обведенные штриховой линией, можно рассматривать в качестве приближения к аттрактору.

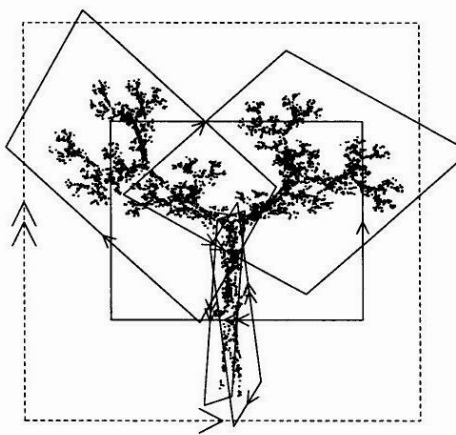


Рис. 2.25. Коллаж из фигуры «дерево».

Элементы коллажа обведены сплошной линией и представляют собой результат применения одного из аффинных преобразований к штрихованной фигуре. Таким образом, можно считать, что аттрактор составлен (приблизительно) из элементов коллажа.

К сожалению, исходные изображения, несущие семантико-смысловую информацию, – отнюдь не подмножества R^n , да и структура вполне упорядоченного поля R неадекватна его компьютерному представлению. От того что два изображения или кривые – границы стран или побережья имеют одинаковую фрактальную размерность – хаусдорфову метрику, не следует «похожесть» с точки зрения семантики и визуализации их форм и вида.

Поэтому математический аппарат ИФС, обладающий теоретически наилучшими возможностями по компрессии исходного информационного содержания, принципиально не способен выловить семантико-смысловые фрагменты.

Исходя из этой проблемы и был разработан метод АДС, который работает от обратного: при $\varepsilon = 0$ имеем исходный информационный объект (изображения, звук, текст и др.), а поиск сегментов, фрагментов и семантически значимых областей осуществляется адаптивно, увеличивая значение критерия ε -тождественности, сохраняющего семантическую целостность.

2.7.5. Фракталоподобный синтез

В действительности, существует много различных подходов компьютерного синтеза информационного объекта (так же как и примеров в природе – горные хребты, разнообразные трещины, звездные карты, узоры на стекле, броуновское движение, электрические разряды), однако набор выделяемых свойств позволяет рассматривать подобные явления как однотипные аналоги. Одним из наиболее перспективных свойств представляется существование нескольких независимых подходов к их описанию и построению. Естественное использование этого свойства заключается в смене интерпретации природных явлений, имеющих фрактальные аналоги, и установлении масштабных коэффициентов прогностических ожиданий.

Действительно, рассматривая escape-time фракталы, системы итеративных функций, развивающиеся системы, клеточные автоматы, орбитальные фракталы, аттракторы хаотических процессов и т.д., мы ведем речь об одних и тех же объектах.

Продemonстрируем это на следующих примерах.

Множество Мандельброта (см. п. 2.6 пакет FractInt) обычно определяется как escape-time фрактал, т.е. множество на комплексной плоскости, состоящее из всех точек z , для которых последовательность $z = z^2 + c$ остается в некотором круге с центром в начале координат. Но,

благодаря ярко выраженному свойству самоподобия, оно может быть рассмотрено так же как система итеративных функций.

Для сравнения можно рассмотреть фрагмент множества Мандельброта и результат построения системы итеративных функций, определенной при помощи итеративного применения операции поворота изображения на $(4/33)\pi$.

Треугольник Серпинского может быть рассмотрен как L -система, в качестве аксиомы которой выступает равносторонний треугольник, который на каждой итерации заменяется на набор из трех треугольников со сторонами в два раза меньшей длины, но может также быть рассмотрен и как результат хаотического процесса.

Рассмотрим следующий эксперимент. На плоскости расположим три точки (a_0, a_1, a_2) в вершинах равностороннего треугольника. Поставим в произвольном месте точку p_0 . Далее случайным образом генерируем последовательность $p_1, p_2, \dots, p_n, n \in N$. При этом p_n каждый раз ставится посередине пути между p_{n-1} и $a_{random(3)}$, т.е. случайным образом выбирается один из трех возможных вариантов. Результатом работы такого процесса также будет построение треугольника Серпинского. Изменяя распределение вероятностей выбора точек a_0, a_1, a_2 , можно заметить, что результат сохраняется тем же, без каких бы то ни было изменений.

Тот же треугольник Серпинского также очевидным образом может быть получен как система итеративных функций, как клеточный автомат или escape-time фрактал, полученный по формуле

$$z_n = (x, y); \quad z_{n+1} = \begin{cases} (2x, 2y - 1), & \text{если } y > 0.5 \\ (2x - 1, 2y), & \text{если } (x > 0.5) \\ (2x, 2y), & \text{если } (x < 0.5) \& (y < 0.5). \end{cases}$$

В свете этих примеров представляется необходимым явно выделить взаимосвязи между различными методами построения фракталов и построить алгоритмы перехода между видами представления фракталов.

Развивающиеся структуры, системы итеративных функций и L -системы [93] имеют много общего в методах построения, и способы перехода между ними, как правило, достаточно очевидны.

Escape-time и орбитальные фракталы [9] образуют вторую группу родственных методов.

Поэтому наиболее интересным представляется исследование связей между данными двумя группами фракталов. Методы первой группы основаны на явном конструировании объектов с использованием самоподобия при построении фракталов, вторая группа использует построения на основе функциональных зависимостей. Результаты подобного исследования могли бы привести к описанию различных фрактальных

изображений на единой основе и помогли бы понять причины самоподобия escape-time фракталов.

ИФС работает как симулятор компьютерного исследования динамических систем. Грубо говоря, аттракторы – это наборы, которые были замечены, когда орбиты были подготовлены на компьютере.

Например, схожесть спектральных характеристик фракталов и музыки [75] позволила высказать предположение о возможности генерации музыкальных произведений с помощью фракталов и реализовать эту идею на практике.

Анализ музыкального фрагмента, сгенерированного программой фрактальной музыки, приведен на рис. 2.26.

Для генерации используются алгоритмы escape-time фракталов, строящих числовую последовательность на основе создаваемых изображений. Были выбраны наиболее удачные, хорошо воспринимаемые на слух произведения. Соответствующие им спектральные характеристики (рис. 2.26) подтверждают мысль об адекватности фракталоподобной математической модели для описания сигнала как звукового фрагмента, воспринимаемого как речь или музыка [90].

Многие фракталоподобные проявления отражаются в сигналах – потоках данных, состоящих из частей – сегментов, которые в некоторой



$$\begin{aligned} a &= 0.6555675, b = 0.09663302, c = 0.3376776; \\ x_0 &= 2.363091, y_0 = -2.731497, z_0 = 1.718588; \\ F &= 10, x = x_0, y = y_0, z = z_0; \\ d_1 &= y; \quad x = x + d_1 / 100; \\ d_2 &= -ax^3 - x - by + F\cos(z); \quad y = y + d_2 / 100; \\ d_3 &= c; \quad z = z + d_3 / 100 \end{aligned}$$

Рис. 2.26. Фрактальная «музыка». Исходный фрактал duffing.

степени похожи на целое. Такое самоподобие является не только свойством фракталов, оно также может быть использовано для их эффективного итерационно-рекурсивного программируемого представления.

Итерационно-функциональные системы делают это унифицированным образом, приводя к простому способу реализации программируемой технологии в мире Тьюринга.

2.7.6. Информационная безопасность инфокоммуникации

Понятие информационной безопасности, а также методов ее осуществления в настоящее время существенно размыто. Обеспечение информационной безопасности может осуществляться не только кодированием физических носителей информационного содержания, но и методами восприятия (инициализации) семантико-смыслового содержания изменением языка, смещением семантики и др. В данном разделе рассматривается процесс обеспечения информационной безопасности инфокоммуникации, который формально может быть выражен через свертку и развертку информационного содержания. Такой процесс обеспечивают многие известные методы шифрования данных.

Представим процесс в следующем виде. Защита информационного содержания предполагает сокрытие алгоритма (языка) его построения. ИФС - один из компьютерно-ориентированных подходов трансляции (оператор Θ), а в данном конкретном случае смешивания исходной битовой последовательности S (в частном случае сигнала) с маскирующей (гаммирующей) последовательностью Γ

$$S' = S\Theta\Gamma.$$

Наиболее строгая теоретическая основа выбора последовательности Γ базируется на использовании ИФС. Ключом шифрования служат ее начальные значения.

Декодирование осуществляется обратным оператором трансляции $\tilde{\Theta}$ сформированной по известным параметрам на приемной стороне маскирующей последовательности Γ из принятой битовой последовательности

$$S = S'\tilde{\Theta}\Gamma.$$

В случае неизвестных начальных параметров декодирование по другой маскирующей последовательности Γ' даст шумоподобную выходную последовательность

$$N = S'\tilde{\Theta}\Gamma'.$$

Подробный анализ свойств маскирующих последовательностей, построенных на основе ИФС, показывает, что в ряде случаев последовательность, сформированную с помощью ИФС, можно свести к последовательности, определяемой тремя параметрами: Φ – параметром формы; φ – параметром фазы; L – параметром периодичности, которые и определяют степень защиты информационного сообщения. При неудачном выборе начальных параметров ИФС [94] может оказаться, что параметр $L \ll \infty$, что может упростить задачу несанкционированного декодирования передаваемых данных методом перебора. Однако, с другой стороны, это позволяет оптимизировать соотношение уровня защиты к ее стоимости.

Более общий подход обеспечения информационной безопасности может быть основан на трансляции «данные – программа – данные».

Пусть C – множество битовых операций I , выполняемых процессором, имеющих обратные операции $\tilde{I}$. Каждая операция производится над одним машинным словом данных, причем источник и приемник данных совпадают (в языках программирования аналогом таких операций являются операторы $++$, $+=$, $\wedge=$ и др.) Последовательность k таких операторов, последовательно изменяющих слова входной последовательности S назовем программой P_k .

Обозначим $S \oplus E$ добавление нового элемента E в конец последовательности S . Рассмотрим программу P_k , составленную из операций множества C . Программа модифицируется на каждом шаге путем добавления в конец одной инструкции из C , причем выбор инструкции определяется ИФС

$$P_{k+1} = P_i \oplus C(F(i)),$$

где $P \oplus I$ – обозначение добавления операции I в конец программы P , $F(i)$ – значение ИФС на k -ом шаге итерации.

Длина программы P_k равна номеру шага k :

$$l(P_k) = k.$$

Это означает, что первое слово в битовой последовательности S кодируется программой, состоящей из одной операции, второе слово – программой из двух операций и так далее:

$$S' = P_1(S_1) \oplus P_2(P_1(S_1)) \oplus \dots \oplus P_n(\dots P_2(P_1(S_1))\dots).$$

Процесс декодирования аналогичен процессу кодирования, за исключением того что вместо битовых операций I выбираются обратные операции $\tilde{I}$ и программа выполняется в обратном направлении.

Применение случайных процессов дает потенциальное преимущество над традиционными системами псевдослучайных последовательностей.

Ключевой проблемой технических средств защиты информации является порождение действительно случайной последовательности битов. Дело в том, что генераторы случайных последовательностей, используемые для общих целей, являются псевдослучайными генераторами, так как в принципе существует конечное, а не бесконечное множество состояний ЭВМ, и, как бы сложно ни формировалось в алгоритме число, оно все равно имеет относительно немного битов информационной насыщенности. Более качественными генераторами случайных чисел являются генераторы, основанные на физических процессах (высокоточное измерение тепловых флуктуаций и др.)

Рассмотрим более подробно частный случай использования ИФС для шифрования изображений.

Рассматриваемый итерационно-функциональный подход отличается от обычных методов шифрования тем, что фрактальная последовательность используется в качестве достаточно сложной кодирующей функции. При этом описание этой функции, достаточное для построения, является набором вещественных чисел, которые задают начальные условия итерационного процесса построения фрактальной последовательности. Предлагаемый подход является вариантом гаммирования – процесса «наложения» гамма-последовательности на открытые данные, где в качестве гамма-последовательности (последовательность псевдослучайных элементов) используется фрактальная последовательность.

Наиболее наглядно принцип работы данного метода можно проиллюстрировать на одноцветных растровых изображениях.

Пусть исходное растровое изображение представлено яркостными отсчетами, расположенными в матрице прямоугольного вида. Выберем специально подобранный фрактал, как ИФС с заданными начальными параметрами. Затем, применяя некоторую обратимую функцию (например, поразрядную сумму по модулю 2) к парам значений точек исходного изображения и изображения полученного фрактала, получим новое изображение, которое и передается по каналу связи. Для расшифровки сообщения требуется, зная начальные значения процедуры построения фрактальной последовательности, восстановить изображение фрактала и, применяя операцию, обратную по отношению к операции передающей стороны (в рассматриваемом примере это также сумма по модулю 2), восстановить исходное изображение.

Принцип работы метода приведен на рис. 2.27. Как видно из схемы, сначала с помощью функции гаммирования вырабатывают гамма-последовательность, которая зависит от параметра K . После этого исходный сигнал просто суммируется с полученной гаммой.

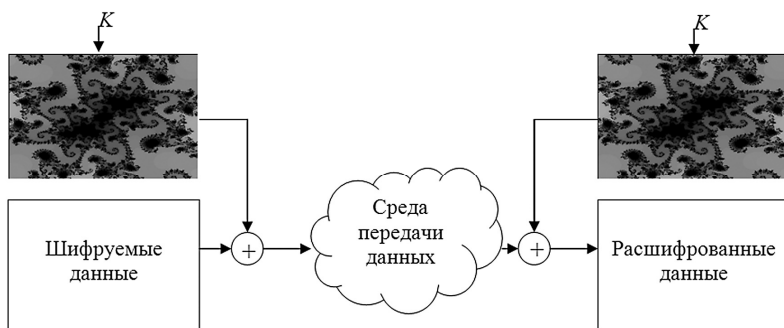


Рис. 2.27. Принцип работы фрактального шифрования.

Для усложнения прямого подбора начальных значений фрактала можно предварительно использовать перемешивание последовательности позиций отсчетов (символов) исходного сигнала используя, напри-

мер, заполняющую пространство кривую (ЗПК) [40]. При этом параметр начальной точки для ЗПК является дополнительным фактором, повышающим защищенность.

Начальные параметры итерационной функции являются криптографическим ключом и обеспечивают выбор одного преобразования из множества. Для эффективного выбора ключа шифрования используется предварительно составленный каталог функций, удовлетворяющих заданным свойствам. При этом форма зависимости определяется видом конкретного итерационного функционала из каталога.

Важно подчеркнуть, что если начальные значения итерационной функции построения фрактала взяты вблизи точки аттрактора, то требуется очень точное представление параметров, так как в этом случае фрактал обладает качественной неоднозначностью, что усложняет задачу подбора значений. При этом итерационная функция, порождающая фрактальную последовательность, является вычислительно необратимой функцией, т.е. легко вычислима в прямом направлении, в то время как определение значения аргумента при известном значении самой функции обладает сложностью, эквивалентной полному перебору. Иными словами, вычисление обратного преобразования не может быть произведено более эффективным способом, чем перебором по множеству возможных значений начальных параметров функции.

Итерационный процесс построения фрактала – относительно долгий процесс, что при процедуре полного перебора начальных значений при воспроизводстве фрактала и последующей расшифровки требует больших вычислительно-временных ресурсов.

Численный эксперимент, производящий перебор начальных значений итерационной функции с большим шагом, показал тенденцию быстрого уменьшения значения минимальной ошибки при приближении к истинным значениям начальных параметров. В то же время при уменьшении шага перебора начинают проявляться хаотические свойства фрактального сигнала, что не позволяет осуществлять поиск начальных параметров более эффективным способом, чем полный перебор.

Форма зависимости, полученная экспериментально, приведена на рис. 2.28. Верхний график показывает изменение ошибки (ось ординат) при переборе по всей области значений (ось абсцисс) начальных параметров. Выделенный фрагмент в увеличенном масштабе показан на нижнем графике. Истинное значение начальных параметров показано пунктирной линией.

Следует заметить, что положение минимума ошибки не совпадает с положением истинного значения начального параметра, что не позволяет применять типовые алгоритмы поиска решения (секретного ключа), осуществляющие останов в области минимума ошибки ($\epsilon \rightarrow 0$).

Задача фрактального шифрования позволяет переформулировать задачу криптографии в терминах сложности по А. Н. Колмогорову [24], как построение минимальной программы, порождающей псевдослучай-

ную последовательность при известных параметрах ключа и невозможность построения короткой программы восстановления последовательности при неизвестном ключе. В этом случае сложность данных, согласно Колмогорову, определяется как минимально возможная длина программы, которая может сгенерировать требуемую последовательность данных.

Кроме того, рассматриваемый метод осуществляет переход между функциональным описанием и дискретным представлением множества точек, так как итерационные функционалы описывают не все множество, а только конечную его часть, в то время как функция задает бесконечное множество точек. При этом фрактал является механизмом построения множества, которое удовлетворяет требованиям псевдослучайной последовательности.

При оптимальном выборе начальных условий итерационного процесса и использовании асимметричного фрагмента фрактала можно обеспечить значимость всех битов выбранного ключа при выполнении операции шифрования. Полученный сигнал сложно отличить от шума, к тому же для расшифровки необходимо знать конкретный вид динамической системы и начальный параметр процесса.

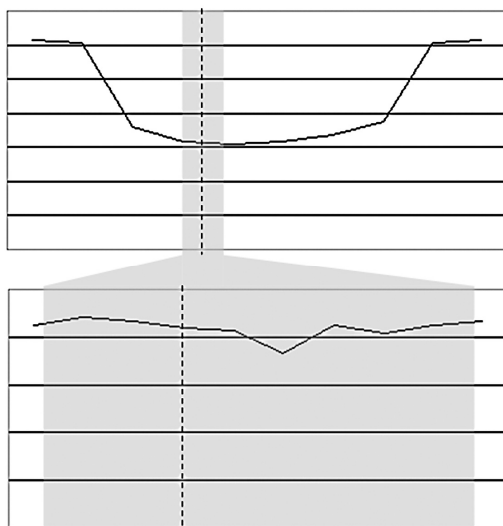


Рис. 2.28. Зависимость значения минимальной ошибки от выбора начальных параметров (на нижнем графике фрагмент с увеличенным масштабом).

Приведенный пример фрактального шифрования демонстрирует иной концептуальный подход к организации процедуры как сокрытия, так и возможного дополнительного внедрения информационного содержания.

2.7.7. Фрактальные методы оценки качества передачи данных

Операция идентификации осуществляется на основе сопоставления по критерию ε -тождественности, например при $\varepsilon = 0$ имеем уникальную идентификацию (например по штрихкоду).

Примером использования операции идентификации является, разработанная для оценки качества цифровых телевизионных каналов, фрактальная испытательная таблица (рис. 2.29).

Эта таблица позволяет определить информационную избыточность формата передачи изображений, эффективность и корректность работы алгоритмов компрессии видеопотока. Таблица представляет собой изображение итеративной функции, заданной начальными параметрами и состоит из 4 квадрантов, на каждом из которых функция построена с разным количеством итераций (50, 100, 150, 200).

Информационная избыточность формата оценивается как отношение размера кадра, представленного в формате, к известному размеру параметров, требуемых для построения этой функции.

Точность передачи изображения каждого из квадрантов позволяет оценить уровень потерь при использовании форматов компрессии с потерями.

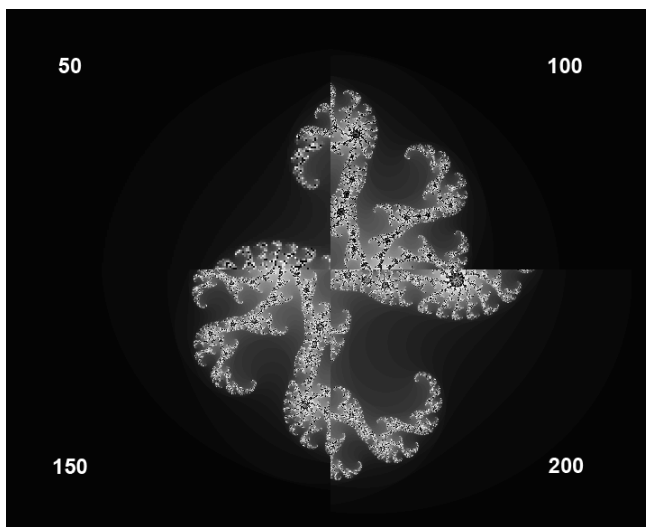


Рис. 2.29. Фрактальная испытательная таблица (ФИТ).

Эта табличная форма оценки (идентификации) адекватности семантического восприятия квадрантов, при которой производится не попиксельное сравнение на базе критерия СКО, а комплексная оценка целостного восприятия объекта.

Другим примером, основанным на операции идентификации неразличимости, является адаптивно-динамическая сегментация (АДС). Ее суть заключается в последовательном «огрублении» изображения за счет применения сегментации вплоть до уровня семантической идентификации «узнавания», что позволяет значительно сокращать объем передаваемых и хранимых данных, а также выявлять значимые параметры при принятии решения.

Отличие процессов идентификации от сравнения (похожести) проявляется в неоднозначности критерия останова и выбора уровня сегментации при использовании СКО (в котором критерий останова имеет сильную зависимость от типа изображения). В то же время использование операции идентификации неразличимости делает задачу выбора уровня АДС тривиальной при сопоставлении уровней «тождественности процесса «узнавания».

Суть равенства не в том, чтобы иметь одинаковый взгляд на разные вещи, а в том, чтобы видеть разные вещи по-разному.

Постулат научного развития

Глава 3. Адаптивно-динамическая структуризация данных

3.1. Семантический анализ

В отличие от инженерно-технических экспертиз (основанных на конструкции «если... то...») и строгого математического формализма, постулирующего отношения близости, сходства, равенства и др., в основе измерения и оценки параметрических характеристик природных, физических, биологических, исторических, экономических и культурологических исследований лежит принцип идентификации неразличимости. Это связано с «кодовой» (программной, генетической) технологией воспроизводства объекта («яйцо и курица» в одной программе). Сбивается высказывание Дж. фон Неймана: «Сложную систему проще построить, чем детально (инструктивно) описать».

Действительно, в случае программируемой технологии кодовая модель объекта воспроизводит информационное содержание и/или непосредственно материальный объект. Речь, письменность, чертежи, графика – адаптированная человеком форма коммуникативного общения, один из технологически доступных этапов программируемой технологии, прогрессирующий с развитием «хай-тек» и нанотехнологий.

Сравнительно недавно обратили внимание на тот факт, что компьютер и Интернет-технологии – наиболее яркий пример инженерно-технического творения сложной инфокоммуникационной системы, которая сама себя тестирует, программно развивается и обучает своим функциональным возможностям.

Это приближает ее гносеологически к живым природным процессам самоорганизации и адаптации, которые в свою очередь, зависят от структурной организации и определяются ею на начальной стадии развития организма. О чем свидетельствует эффект гомеостазиса и адаптации организма, который в сильной степени зависит от фазы его развития. На начальной фазе имеются огромные адаптационные возможности: зона гомеостазиса обширна. Затем она уменьшается и адаптационные возможности почти полностью исчезают (даже насморк – летален). Приведем следующий пример. Исследователи брали котят и сразу же после рождения сшивали им веки одного из глаз. После не-

скольких месяцев швы снимали и животные участвовали в разного рода поведенческих экспериментах; и не видевшим мир глазом они никогда не узнавали человека, который с ними работал, а другим – нормальным глазом делали это безошибочно. Более того, временно отключенным (депривированным) глазом они были не в силах даже отличить, когда показанный треугольник был обращен вершиной вверх, а когда – вниз.

Для глаза, не получившего изначального зрительного опыта, оказывалась неразрешимой примитивнейшая задача!

Однако то, что другой глаз ее решал, говорило, что эксперимент не затронул высшие функции мозга. Не сформировались некие нужные структурные связи. У подопытных котят исчезла способность, называемая переносом. Нормально развивающейся системе она присуща и заключается в том, что если закрыть повязкой один глаз и выработать условный рефлекс на распознавание хотя бы тех же треугольников, то после переноса повязки поведение не изменится. Иными словами, обучается что-то, находящееся выше тех клеток мозга (нейронов), которые объединяют сигналы от каждого глаза в единое целое.

Не сформировавшиеся на начальной фазе развития организма структуры, ответственные за восприятие сигнала и функцию его «переноса», приводят к отсутствию пути передачи.

Возможности функции «переноса» всецело зависят от «повязки» как искусственно сформированного ограничения (свободы). В отличие от обратной связи кибернетики – это универсальный механизм, определяющий пределы обучаемости, распространения и передачи знаний, в том числе и на основе тестирования, хотя бы, например, по ЕГЭ.

Другой удивительный факт состоит в том, что, например, утенок в промежутке между тринадцатым и семнадцатым часами после выхода из яйца «считает матерью» любой движущийся возле него предмет и затем всегда бежит за такой «мамой», пусть ею окажется служитель инкубатора, футбольный мяч или небольшая зеленая коробочка с тикающим внутри будильником. Здесь нет и не может быть инстинкта формы, отсутствует обучение: формы чересчур неожиданны и слишком невелико время между появлением на свет и выработкой «привычки». К тому же импринтинг не возникает, если его пытаются вызвать всего лишь немного позже оптимального срока. Птенец тогда не узнает и родную мать.

Факторы чистой случайности прочно заменены в эволюции факторами активного программирования.

На рис. 3.1 приведена структурная схема системы «глаз – мозг» как модель восприятия окружающей среды со своей спецификой вербального и образного мышления и формирования знания.

Множество экспериментов показало, что мы воспринимаем, осознаем увиденное и услышанное лишь после того, как зрительная и слуховая сенсорные системы, их нейронная семантика связей адаптировались и специальным образом реорганизовались.

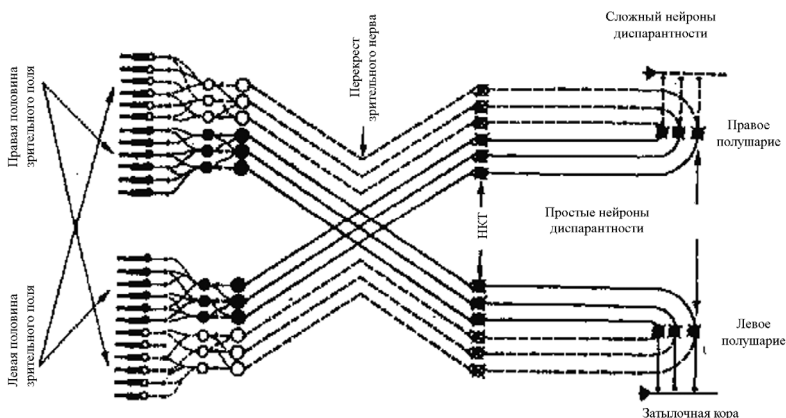


Рис. 3.1. Структурная схема системы «глаз – мозг».

На схеме 3.1 приведены структурные связи, которые в явном виде отражают удивительную специфику виденья. Это принципиальное наличие у каждого глаза двух каналов ответвлений: в правое полушарие – образное восприятие и в левое – вербальное восприятие (последовательное, логическое, речеслуховое).

Эксперимент с «кошкой» наглядно свидетельствует, что наше осознание того, что мы видим и слышим, возникает как результат предварительно запрограммированных ассоциативных связей между одновременно воспринимаемой иерархией образных форм и установлением последовательных логических связей между признаками, понятиями и символами. Это визуальный процесс, когда зрительные формы знака, например «буквы», отождествляются со смысловым значением слова. И наоборот, это вербальный процесс, когда произносимые звуки идентифицируются в знаки, в зрительные и слуховые образы.

Биологическая запрограммированность – это ассоциированный след, связывающий «вербальные» и «образные» семантико-смысловые компоненты речеслухового и визуального сигналов окружающей среды.

Начальная программируемая фаза ответственна и за ментальную этнизацию как ограниченную общность культуры, языка и пр., что приводит к различному функциональному перераспределению – доминанте либо правого, либо левого полушария головного мозга. С этим явлением связан и акцент. Примеры многих иллюзий и патологий отчетливо фиксируют нарушения работы головного мозга, проявляясь через образное и/или вербальное мышление [19, 95].

Этот механизм **«переноса»** за счет структурного обмена обеспечивает сверхнадежную и быструю эффективно корректируемую идентификацию и распознавание, повышая уровень абстрагирования понятий и семантико-смыслового восприятия.

На рис. 3.2 иллюстративно приведена схема «интеллектуального» электронного глаза зрительного восприятия.

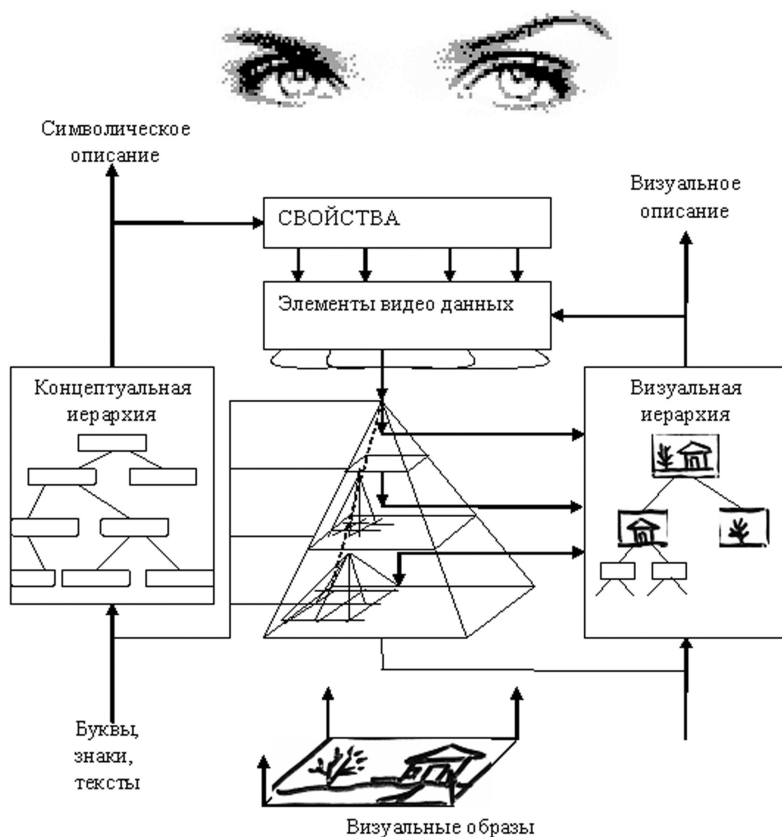


Рис. 3.2. Вербальное и образное представление данных.

Подчеркивая важную роль начальной программируемой фазы подготовки биологических сенсоров к восприятию, заметим, что такие «открытия и гипотезы», как генетическая заложенность фурье-преобразования, голографии, фрейм-структур, а также другие подобные теории функционирования биологических структур, не имеют под собой никаких оснований. Простым подтверждением этого является крайняя персональная неоднородность по качественным свойствам восприятия: одни обладают абсолютным слухом (композитор, певец), другие - зрительной памятью (художник, архитектор) и т.д.

Приведем следующий поясняющий пример. В одном из университетов Японии на английском языке читался курс по теории автоматов, логическим исчислениям и компьютерным экспертным оболочкам. На

первых же упражнениях известный (англоязычный) профессор с удивлением установил факт затруднения восприятия элементарных предикатных последовательностей «если ... то». Длительная беседа с одним из студентов, хорошо знающим английский язык, показала, что для данной аудитории естественными были операции вложения – концепция холизма (целого), от целого к частному, а не концепция причинно-следственных отношений от частного к целому.

Из противостояния этих двух оппозитивных концепций и вытекают два уровня мыслительного процесса – ассоциативно-образный, как иерархическая вложенность, и вербальный (причинно-следственный). Приведем пример [96]. Еще в середине XX века Конрад Лоренц раскрыл многие механизмы мышления животных. Он описал формирование ассоциативных связей, на которых животное строит свое поведение. Если два события происходят одновременно, то у животного формируется связь между ними, даже если у этих событий нет ничего общего, кроме хронологического совпадения.

Считается, что в отличие от животных у человека формируются не только ассоциативные, но и причинно-следственные отношения, то есть из множества совпадений человек способен выделить причину события. Философы и психологи подчеркивали именно это свойство мышления как главную отличительную черту разума человека.

Симбиоз ассоциативных структур, синтезирующих входной поток данных в соответствии с процессами «включения», «объединения» и «кластеризации», а также причинно-следственных отношений, порождает итерационную процедуру принятия решений (идентификации и распознавания). Аналог этому – известный статистический метод последовательной проверки гипотез [97], удачно примененный в системе распознавания рукописных текстов [98].

Рассмотренный метод построения рекурсивно-древовидных структур, несущих ассоциативную идентификацию, позволяет реализовать функции индукции (поиск **по** уровням иерархии – «стволу дерева») и дедукции (поиск **на** сетевом уровне «от листа к листу»).

Программная реализация этого подхода и лежит в основе адаптивно динамической структуризации (АДС).

3.2. Адаптивно-динамическая структуризация данных

Рассмотренная программная реализация «идентификации неразличимости» осуществляет поиск и установку логических связок и иерархических ассоциативных отношений (вложений).

Алгоритм программы установления «идентификации неразличимости» опирается на необходимость определения (априорная оценка) достаточной информативности измеряемых данных исследуемого объекта: сигнала, звука, образа, аудиовидеопотока данных. Например, ис-

На рис. 3.4 приведен пример АДС изображения при редуцировании (детализации) до некоторого уровня, при котором еще сохраняется **узнавание**, позволяющее принять решение об идентификации объекта (картины). На рисунке указано исходное изображение для фрагмента картины Шилова «С базара» и 100-й уровень созданной иерархии фрагментов.



Рис. 3.4. Фрагмент картины Шилова «С базара» и 100-й уровень иерархии фрагментов.

Ряд исследователей, неудовлетворенных результатом работы тех или иных компьютерных программ при наличии удивительно хорошо работающих биологических аналогов, начинают фетишизировать слова, перечисляя феноменальные особенности нейронных сетей, пытаются создать технические аналоги, структурная организация которых пока принципиально не воспроизводима в современной технологической схемотехнике. Спекуляция понятием нейронных сетей продолжается уже более 50 лет.

Подчеркнем, что способность АДС к редукции данных неразрывно связана с наличием семантико-смыслового содержания и априорно заданной цели. Без цели возникает множество альтернативных вариантов принятия решения. Например, исследуя, где у блохи слуховой анализатор, экспериментатор обучил ее прыгать по команде. Затем, последовательно отрывая по ноге, проверял исполнение команды «прыгать». При удалении последней ноги, когда не последовало прыжка, был сделан вывод: стоит оторвать блохе ноги, как она сразу теряет слух.

АДС данных приводит к появлению крупных структурных единиц, позволяющих выявлять существенно более значимые семантические компоненты и устанавливать понятийные отношения. В некотором роде подобная редукция применяется и при известных форматах компрессии изображения – JPEG, видео – MPEG, звука – MP3, но лишь как специфика предметной области и свойства слухового и зрительного восприятия человека.

Разработанная программа АДС достаточно универсальна и выполняет преобразование данных, приводящее к уменьшению объема и выделению существенных, семантически значимых компонентов.

Подход, использующий АДС, основывается на том, что любой поток аудиовизуальной информации независимо от той или иной проблемно-ориентированной области содержит разные семантические компоненты, выделение которых следует представить в форме рекурсивной реструктуризации пространств сигналов и образов при формировании полисемантической связности и ассоциативной идентификации объектов.

В соответствии с указанным подходом мы визуально воспринимаем внешний мир как оптический процесс **переноса** изображения на сетчатку глаза, а затем методом локального анализа и синтеза строим зрительную модель как пространственно-временную совокупность предметов и их взаимосвязей. Это позволяет выделить образно-семантические отношения и, используя логический анализ, перейти на вербальный уровень представления исходной визуальной информации. Слуховое восприятие также приводит к формированию адекватных образов внешнего мира, которые в принципе могут не отличаться от визуальных.

При семантическом анализе видеоданных исходное изображение, заданное совокупностью яркостных и цветовых пикселей, представляется посредством динамической интеграции по областям в виде индексированных древовидных структур, поддерживающих так называемую адаптивную иерархическую сегментацию в виде вложенных разбиений. По сути, это решение обратной теоремы о коллаже – поиск (оценка) ε – верхней границы, информативно достаточной для принятия решения об идентифицируемости (узнавании) исходного объекта.

АДС изображения позволяет организовать семантико-ассоциативные связи между «именем» и индексом того или иного выделенного фрагмента и сформировать семантико-ассоциативные составляющие информационного объекта. Для этого подхода не существенна размерность сигнала и в этом смысле безразлично, рассматривается ли аудиосигнал, изображение или любая другая n -мерная функция пространственно-временных параметров. Поэтому преобразования, используемые для изображений, имеют смысл и в приложении к аудиосигналам.

В связи с огромным объемом данных, в частности для передачи, обработки и анализа спутниковых снимков, коллекций, ассоциативного поиска в базах аудио- и видеоданных по семантическому содержанию возникла необходимость в адаптивно-динамической структуризации. Поскольку основной целью является не столько представление текстовой, образной или звуковой информации, сколько последующий семантический анализ, возникает необходимость перейти от стандартных форматов передачи и хранения данных к специфическим формам, ориен-

тированным на решение конкретных проблем.

При семантическом анализе изображений, как правило, необходимо реализовать следующие функции:

- автоматическую локализацию объектов с заданными свойствами;
- автоматический поиск объектов на изображениях, аналогично воспринимаемых и выделяемых человеком. В данном случае можно говорить об обучаемом симуляционном процессе;
- выделение фрагментов связанного множества пикселей на изображении, несущих семантическую нагрузку.

Локализация и идентификация объектов на изображении традиционно сводится к описанию набора характеристик искомого объекта. Наиболее сложной проблемой при этом является выявление и локализация границ фрагментов, несущих семантическое содержание. В предлагаемом методе рассматривается возможность построения фрагментов в виде древовидной связанной динамической структуры данных.

Фрагменты изображения должны нести на себе определенную семантическую нагрузку, построенная структура должна быть рекурсивно-иерархической, для возможности быстрого поиска и ассоциативной идентификации фрагментов с их семантическими отношениями и заданными свойствами на изображении.

С этой целью используется преобразование изображения как совокупности двумерных пикселей, предварительно представленного в компьютере в виде одного из стандартных форматов хранения изображений, во внутреннее компьютерное представление динамической структурой данных (ДСД).

Такое представление изображения назовем фрагментарной моделью. Ее базовым элементом является фрагмент, определяемый как узел древовидной структуры. Его атрибутом является идентификационный адрес (число), ассоциируемый с цветовыми и яркостными составляющими некоторой области изображения.

Организация фрагментов изображения в виде древовидной структуры предполагает возможности описания (задания) вложенных иерархических отношений между фрагментами, выделенными на различных уровнях (слоях) представления изображений.

Структура фрагментов строится итеративно начиная с «нулевого» уровня (исходное изображение) объединением пикселей с неразличимыми параметрами, например освещенности, цветности и др. Последующие уровни являются объединением фрагментов предыдущих, исходя из заданного критерия их эквивалентности.

Итеративное объединение фрагментов приводит к образованию многоуровневой иерархии, которая и представляет собой динамическое дерево. Получаемая адаптивно-динамическая структура позволяет эффективно выявлять фрагменты для семантической локализации и идентификации объектов.

3.2.1 Концептуальная схема АДС

Закономерности, лежащие в основе этого метода, базируются не только на специфике представления изображений, но и на пространственной структуре реальных объектов, представленных видеорядом. Так как задача «понимания» изображений, т.е. выделения семантики и структурной взаимосвязи объектов, находится далеко за пределами традиционных математических методов, использование универсальных свойств подобных структур не представляет принципиальной сложности на основе программируемой технологии.

Поля фрагментов, полученные в результате циклического процесса последовательного увеличения допустимого порога отклонения ярких и цветовых составляющих при их объединении во фрагменты, образуют последовательно укрупняющуюся пирамидальную иерархическую структуру плоских сетей фрагментов, каждый из которых может иметь своего потомка или предка, что и образует адаптивно-динамическую структуру данных [99].

Фрагмент изображения – это узел пространственной структуры, а также множество пикселей, составляющих площадь и обеспечивающих графическую форму данного фрагмента. Это и позволяет организовать объектно-ориентированную идентификацию семантически значимых областей изображения.

Данная многоуровневая сегментации предназначена для использования в качестве базовой структуры для применения алгоритмов локализации и выделения объектов на изображениях. Методы работы с полученной структурой ориентированы на самообучающиеся алгоритмы поиска фрагментов изображения на основе их взаимного расположения и основных параметров фрагментов (цвет, яркость, площадь ...).

Проиллюстрируем работу метода АДС [100, 101, 102, 103].

На рис. 3.5 проиллюстрирован процесс адаптивной сегментации на примере условного изображения 3x3 элементов (обозначенных буквами а...і).

При $\varepsilon = 0$ все элементы идентифицируемы. По мере увеличения порога ε происходит слияние. На последнем шаге (в примере $\varepsilon=4$) все элементы оказываются объединенными в один фрагмент, при этом каждому элементу оказывается сопоставленным узел связного дерева, отражающего иерархическую структуру исходных данных.

Рассмотрим ряд примеров программной реализации АДС для различных типов данных.

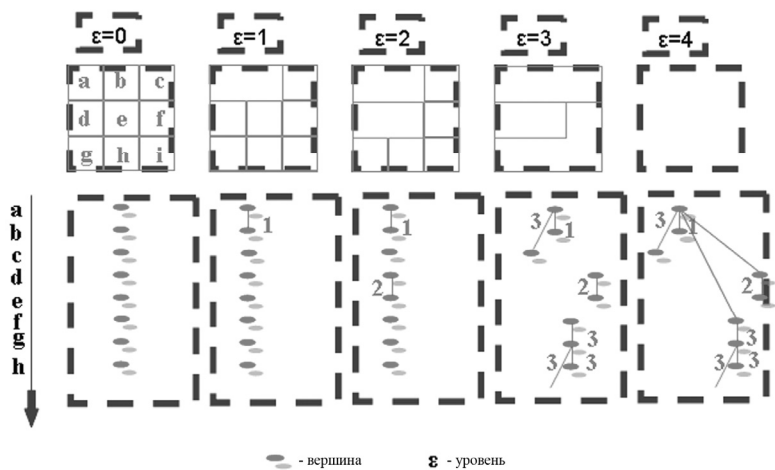


Рис. 3.5. Адаптивная сегментация в терминах динамических деревьев.

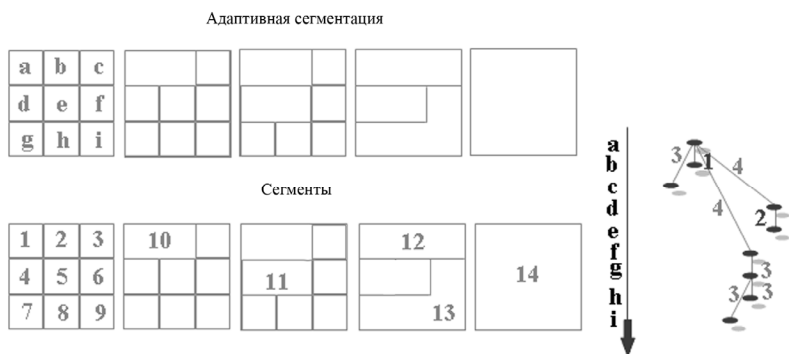


Рис. 3.6. Результат адаптивной сегментации – 14 сегментов на пяти уровнях.

3.3. АДС данных на изображениях и видео

Приведем одну из схем алгоритма адаптивно-динамической фрагментации (АДФ).

Пусть исходное изображение I^* представлено в виде матриц пикселей размером $a \times b$. Алгоритм выполняет несколько разбиений исходного изображения на фрагменты:

$$I = \bigcup_{p \in D_m} F_p.$$

Каждый фрагмент m -го разбиения будем обозначать как F_p^m . Первый уровень разбиения представляет собой множество $L_1 = \{F_p^1\}$, в котором каждый фрагмент F соответствует отдельному пикселу $|L_1| = ab$.

Из механизма построения разбиений очевидно, что

$$\begin{aligned} |L_i| &> |L_{i+1}| \\ |L_{255}| &= 1 \end{aligned}$$

Для каждого $p \in D_m$ существует $q \in D_{m+1}$, такой что $F_p^m \subset F_q^{m+1}$.

Этот алгоритм похож на подобие теоремы о коллаже (подробнее см. гл. 2); его критерий останова АДС – это семантический поиск при $\max \varepsilon$ и не требующий полного перебора при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Кроме того, рассматривая кортеж $\langle |L_1|, |L_2|, \dots, |L_{255}| \rangle$ (экспериментальные данные), отметим, что данные величины имеют степенной закон распределения измеряемых параметров пикселей.

Для описанного алгоритма возможна следующая интерпретация. Выбираем на изображении любую точку (пиксел) и представим, что, начиная с нее, расплывается «чернильное» пятно, последовательно захватывая соседние точки, если их перепад яркости не превышает некоторый заданный порог ε . В результате формируются фрагменты однородной яркости. Совокупное множество фрагментов не зависит от выбора начальных точек, а определяется выбором последовательности устанавливаемых порогов. Исходное изображение ε равно нулю; единственный фрагмент определяет наибольший порог ε (перепад яркости). Итеративно меняя значение ε , разбиваем изображение на множество фрагментов, адаптивно выявляя соответствующие семантические компоненты. Внутри каждого фрагмента проводится осреднение по яркости, и цикл обработки повторяется до тех пор, пока на изображении все локальные яркостные перепады не превысят ε . Затем порог ε увеличивается и процедура повторяется.

Процесс обучения и самообучения заложен в специально организованной интерфейсной оболочке программы «Analysis». На рис. 3.7 приведен один из примеров программной реализации «Analysis» для ассоциативно-динамической структуризации видеоданных [101].

Интерфейс, обеспечивающий связь сегмента и уровня дерева, разработан в программе «Analysis», в которой используется метод выделения реальных объектов путем последовательных итеративных приближений при помощи многоуровневой фрагментации изображения (адаптивно-динамической фрагментации – АДФ).

В ряде разработанных демонстрационных программ в качестве критерия использовалось объединение фрагментов с близкой яркостью (см. рис.3.9 и 3.10).

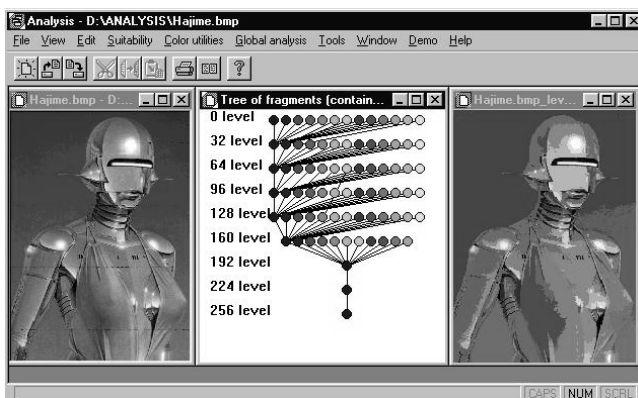


Рис. 3.7. Программа «Analysis».

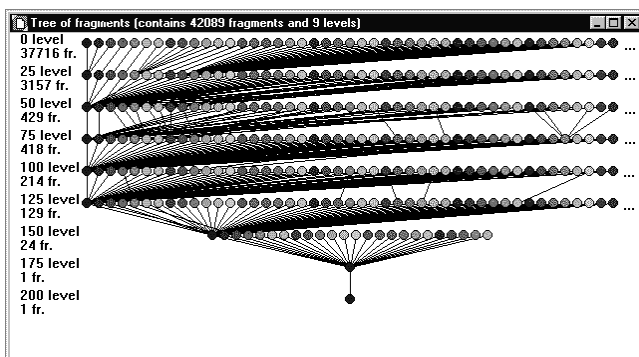


Рис. 3.8. Дерево фрагментов структурированного изображения (рис. 3.7).



Рис. 3.9. Тестовое изображение «Ахе».



Рис. 3.10. Тестовое изображение «Plait».

Последовательное объединение фрагментов по указанному критерию приводит к образованию их многоуровневой иерархии. Такая иерархия или многоуровневая фрагментация является эффективным способом представления данных для методов локализации и выделения объектов на изображениях. Связи между узлами динамических деревьев непосредственно указывают на соседние семантически значимые области. Поскольку области изображения идентифицируются соответствующими узлами динамических деревьев, отношение соседства между ними может быть полностью задано специально организованной таблицей связности. Изменение структуры построенного динамического дерева, в том числе добавление или удаление из него некоторых ветвей, позволяет видоизменить результирующую область и добиться более точного выделения объекта. Уровни дерева и фрагменты, обозначаемые кружками разного цвета (в зависимости от веса) на уровнях ε , имеют возможность инициировать свое место на изображении, и наоборот.

Процесс обучения системы для распознавания объектов произвольной природы реализован следующим образом. Оператор, работающий с набором изображений на «значимом» уровне иерархии при помощи мыши выделяет рассматриваемые объекты.

Рассматриваемый метод является эффективным средством выделения семантически значимой информации на изображениях, основанных на использовании рекурсивных иерархических структур и гиперболического закона развития. В данном контексте описывается концепция адаптивной динамической структуры данных и ее конкретная реализация в виде алгоритма локализации объектов на изображениях.

В результате используемого подхода к конструированию контекстно-значимых фрагментов происходит формирование равнояркостных и равноцветных фрагментов и придание им интегрированных по изображению характеристик за счет выбора переменных порогов отсечки.

Последовательное объединение фрагментов приводит к образованию их многоуровневой иерархии. Построение структуры фрагментов производится итеративно, начиная с нижнего уровня. На первом этапе соседние пиксели с совпадающими характеристиками объединяются во фрагменты первого уровня. Каждый следующий уровень строится при помощи объединения фрагментов предыдущего уровня на основании корреляции их основных свойств из выбранного набора. Изменение критерия объединения областей оказывает существенное влияние на форму получаемой древовидной структуры.

В процессе структуризации происходит предварительная обработка изображения, позволяющая перейти к его компактному представлению и далее работать с удобным уровнем его детализации. В результате существенно сужается количество рассматриваемых объектов. Происходит фильтрация информации.

На завершающем этапе построения иерархии фрагментов производится переиндексация полученного дерева с целью реструктуризации и контекстного целевого указания семантических связей в изображениях различного класса.

Возможности механизма вторичной индексации фрагментов выделенных областей при построении деревьев иерархической связи и процедура принудительной реструктуризации связей являются механизмом внесения прагматики в анализ видеоданных.

3.3.1. Многоуровневая модель сегментации

Отправной точкой развития многоуровневой модели послужил базовый алгоритм сегментации аудиовизуальных данных, который обеспечивает формирование информативных сегментов, устойчивое к изменению условий получения исходного сигнала. Он применим и для двумерных изображений и для одномерных аудиосигналов. Однако в приложении к изображениям реализация алгоритма требует больших пояснений, а результаты получаются более наглядными. Поэтому при иллюстрации конкретного алгоритмического аппарата многоуровневой модели имеет смысл ориентироваться преимущественно на случай обработки видеоданных.

Базовый алгоритм сводится к поэтапному слиянию сегментов, наиболее близких по средней амплитуде. Алгоритм многоуровневой сегментации полутонового изображения можно представить в следующем виде.

Если под свободными точками понимать точки, не принадлежащие какому-либо сегменту, а под близкими яркостями иметь в виду яркости, модуль разности которых не превышает порога ϵ , то цикл сегментации изображения при заданном пороге перепада яркости состоит в следующем.

Все точки считаются свободными.

1. Если свободные точки исчерпаны, то обработка заканчивается. В противном случае находим свободную точку.

2. Выбранная точка порождает связный сегмент, который формируется рекурсивно, т. е. при включении точки в данный сегмент к этому же сегменту относим и все свободные соседние точки близкой яркости.

3. Заменяя яркостные значения точек сформированного сегмента их арифметическим средним, возвращаемся к п. 1.

Для получения стабильного результата преобразования имеет смысл при фиксированном пороге повторять обработку согласно пп.1-3 до получения устойчивой картины.

Преобразуя исходное изображение с порогом 1, затем с порогом 2 и т.д., получаем определенную цепочку в различной степени детализированных представлений исходного изображения (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Многоуровневая сегментация полутонового изображения.

Аналогичные результаты достигаются для большинства изображений из различных предметных областей. По существу, речь идет об упрощении изображения посредством итеративной сегментации с сохранением семантического содержания. На рис. 3.12 показаны итерации преобразования стандартного изображения «Лена», рядом приведены результаты сегментации, выполненной по типу обычной.



Рис. 3.12. Сохранение семантики при итеративной сегментации.

Нетрудно заметить, что по числу сегментов изображения различаются незначительно, однако при постепенном наращивании порога смысловое содержание изображения сохраняется гораздо лучше.

Следует отметить, что для обсуждаемого алгоритма характерно симметричное рассмотрение сегментов, при котором считается, что все сегменты в равной степени представляют объекты (части объектов). Поэтому он применим для выделения на полутоновых изображениях объектов различных типов, что помимо практики обработки глубоководных снимков подтверждено результатами многочисленных экспериментов с аэрокосмическими изображениями и изображениями, полученными с помощью телекамеры. Эксперименты с телевизионными изображениями проводились на примере снимков человеческих лиц. Аэрокосмические изображения изучались в виде снимков земной поверхности и искусственных космических объектов. Обработка изображений лиц показала, что разумная степень сегментации исходных изображений практически не влияет на распознавание, так как глазом различие воспринимается слабо. По сравнению с изображениями лиц снимки земной поверхности геометрически более просты и на них легче рассмотреть результаты укрупнения сегментов. Как показал опыт, после 10-15 итераций обработки снимков земной поверхности наблюдаемые объекты результирующего изображения представляются равноркостными сегментами с резкими границами, что удобно для автоматизации анализа данных.

Укрупнение равноркостных областей в процессе циклического применения базового алгоритма сегментации до определенного предела можно рассматривать как удаление информационной избыточности исходного полутонового изображения, что явно обнаруживается при применении к сегментированным изображениям стандартных программ факсимильного сжатия. Как показал эксперимент со снимками искусственных космических объектов, для сегментированных полутоновых изображений с укрупненными равноркостными областями коэффициент сжатия возрастает до 10-30.

Таким образом, замещение исходных снимков изображениями с укрупненными сегментами решает задачу хранения изображений при ограниченных ресурсах. При интерактивном контроле в ходе итеративной сегментации выбор уровня аппроксимации исходного изображения производится из условия сохранения на сегментированном изображении всей информации, полезной для данной предметной области.

Для автоматизированного снижения информационной избыточности необходим численный критерий, который может быть получен на основе анализа площадей сегментов. Максимально возможное количество сегментов различной площади линейно зависит от размеров и для квадратного изображения $N \times N$ оценивается числом $\sqrt{2N}$. Для реального полутонового изображения разброс встречающихся площадей обычно значительно меньше. В процессе итеративной сегментации чис-

ло сегментов различной площади растет, достигая при определенном ε максимального значения (рис. 3.13). Как показывают эксперименты, несмотря на существенное (в 7-10 раз) уменьшение общего количества сегментов, определяемая ε -аппроксимация изображения сохраняет семантическое содержание (объекты не сливаются с фоном и между собой).

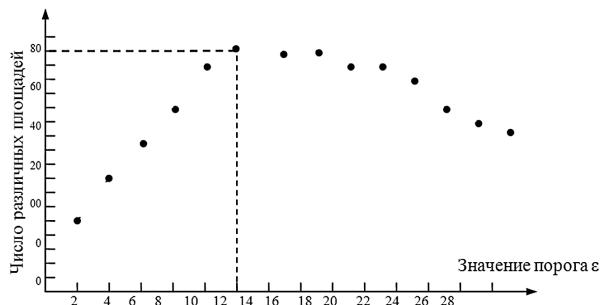


Рис. 3.13. Критерий сегментации изображения без нарушения семантики. Изменение числа встречающихся областей различной площади в процессе итеративной сегментации полутонового изображения размером 256*256

Многократная обработка изображения в базовом алгоритме сегментации позволяет улучшить качество аппроксимации объектов, однако ведет к большим временным затратам. Снижение времени достигается без применения спецпроцессоров за счет оптимизации операций со связными сегментами произвольной формы и размеров, что требует разработки структуры данных, отличной от матричной, что достигается в многоуровневой модели (при этом базовый алгоритм сегментации сохраняет практическое значение для отладки программ).

Необходимо отметить, что редукция изображения по количеству сегментов, согласно базовому алгоритму, допускает оптимизацию вычислений с комбинированной структурой данных [102], но выигрыш по времени достигается за счет неадекватного возрастания числа вычислительных операций.

Совокупность различных сегментов, получаемых на всех уровнях аппроксимации исходных данных в базовом алгоритме выделения объектов, является вариантом экспериментально обоснованного объектно-ориентированного представления и служит реальной основой комплексного решения проблемы анализа аудиовизуальных данных. Практической целью комплексного решения является создание прототипа обучаемой (самообучаемой) системы автоматизированного семантико-ориентированного визуального анализа (СОВА), настраиваемой на обнаружение и идентификацию объектов желаемого типа при условии, что используемая априорная информация ограничена идентификаторами данных, вводимыми в процессе обучения. В условиях исследования

реализация сводится к созданию программного ядра, адаптируемого к решению широкого круга прикладных задач, что определяется конечной целью работы – созданием интеллектуального комплекса СОБА в рамках внедрения нового подхода, а именно адаптивно-динамического выделения семантических полей при аудиовизуальном восприятии.

В простейшем случае многоуровневая модель аудиовизуальной информации строится на множестве приближений сигнала посредством сегментов из одинаковых отсчетов (рис. 3.12).

Многоуровневая модель – это своего рода алгебраический «конструктор», обеспечивающий аппроксимацию сигнала «деталью» различной формы и размеров. Детали способны сливаться друг с другом, что позволяет представить сигнал минимальным количеством частей.

Детали конструктора в виде связанных сегментов задаются как элементы последовательности разбиений сигнала (уровней), порождаемой базовым алгоритмом итеративной сегментации. В качестве начального уровня берется исходный сигнал, представленный наиболее мелким разбиением на отдельные отсчеты, либо используется любое другое разбиение сигнала на связанные сегменты. Ограничений на форму и размеры рассматриваемых сегментов не накладывается. Каждый сегмент характеризуется средней амплитудой, которая выражается через характеристики, аддитивные относительно слияния сегментов, – интеграл амплитуды по числу отсчетов и число отсчетов. Пары сегментов характеризуются отношением смежности.

Уровни строятся последовательно. При фиксированном текущем разбиении находятся все смежные сегменты близкой амплитуды, затем путем слияния найденных сегментов из рассматриваемого разбиения получают следующее – с меньшим количеством элементов. Каждое новое разбиение от порядка слияния пар смежных сегментов не зависит. Уровни представляются наглядно, посредством усреднения амплитудных отсчетов в пределах укрупненных сегментов.

В порядке построения уровни индексируются неубывающими значениями параметра ϵ . В [103] значение индекса ϵ отождествляется с верхней границей минимальной разности средней амплитуды, встречающейся между соседними сегментами, и приписывается результату нескольких последовательных итераций переходного процесса достижения верхней границы при слиянии сегментов. Для простоты индекс ϵ допустимо отождествлять с порядковым номером итерации. Тогда минимальная амплитудная разность с ростом ϵ , вообще говоря, изменяется немонотонно.

Пусть исходные сегменты аудиосигнала или изображения пронумерованы в произвольном порядке целыми числами от 1 до N .

Сегменты любого уровня представления сигнала условимся описывать в виде деревьев [103], устанавливая связи между обозначениями компонент. Каждому исходному сегменту сопоставляется дерево, состоящее из единственного изолированного узла. Слиянию сегментов

ставится в соответствие слияние деревьев, при котором связываются между собой корневые (минимальные по номеру) узлы (рис. 3.14). Корневой узел совокупного дерева принимается в качестве обозначения укрупненного сегмента, а с помощью всего набора узлов его можно получить путем объединения элементов исходного разбиения.

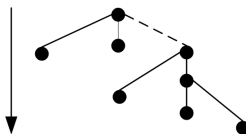


Рис. 3.14. Описание слияния пары сегментов в форме слияния деревьев.
Новая дуга обозначена пунктиром

Таким образом, каждый укрупненный сегмент представляется в виде дерева исходных. При условии слияния между собой только смежных сегментов дерево отвечает новому связанному сегменту.

В компьютере разбиение сигнала на сегменты задается в виде массива чисел $f[n]$, где n – номера узлов деревьев, отвечающие сегментам исходного разбиения, а значения f обозначают дуги, установленные между узлами деревьев. В исходном состоянии массив $f[n]$ представляет собой ряд натуральных чисел от 1 до N , где N – число элементов начального разбиения на сегменты, в котором все значения f совпадают со своими адресами и являются обозначениями элементов начального разбиения. При слиянии пары сегментов большее по величине обозначение замещается меньшим. Текущее обозначение сегмента совпадает со значением одного из сохранившихся элементов массива и определяется в алгоритме циклической переадресации, который сводится к последовательности переходов от одного элемента к другому. Значение данного элемента определяет адрес следующего. Переходы производятся до тех пор, пока не найдется элемент, адрес которого совпадает со значением, записанным по этому адресу, что эквивалентно поиску элемента, сохранившего исходное значение. Значение найденного элемента рассматривается в качестве текущего номера сегмента. Например, сегмент сигнала, описываемый массивом 1 1 2 3 4 5, имеет обозначение 1.

В терминах языка C алгоритм циклической переадресации выражается оператором:

```
for (  $n=n_0$  ;  $n \neq f[n]$  ;  $n=f[n]$  )  
{
```

где n_0 – адрес рассматриваемого узла. Результат n отвечает текущему обозначению, вычисленному на данный момент времени.

Следует отметить, что представление сегментов в виде деревьев позволяет оптимизировать решение часто возникающей задачи разметки двумерного сигнала на связанные сегменты в условиях построчного считывания.

3.3.2. Ассоциативно-пирамидальное представление данных

Еще один частный метод использования АДС для изображения основан на алгоритме пирамидального представления изображений (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Иллюстрация результатов работы алгоритма пирамидального представления изображений (исходное изображение и изображение после обработки).

Идея пирамидального представления приведена на рис. 3.16 и заключается в том, что классический способ представления растровых изображений основан на передаче абсолютных значений интенсивности цветовых компонент, т. е., по сути, отличия передаваемого изображения от черного (в некоторых форматах – белого) однородного прямоугольника.

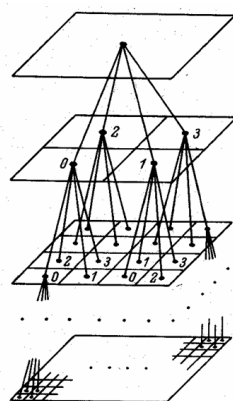


Рис. 3.16. Идея пирамидального представления изображений.

Для минимизации битовой размерности передаваемых элементов имеет смысл передавать разность не относительно пустого изображения, а относительно похожего изображения, так как в этом случае отличия будут минимальны.

Таким шаблоном (подложкой, канвой) может служить уменьшенный вариант изображения, растянутый до требуемого размера. Интуитивно понятно, что многократное повторение уточнения областей относительно фона является наиболее эффективным способом представления данных в смысле минимизации разрядности передаваемых данных.

Использование части уровней иерархии представления в дополнение с арифметическим кодированием позволяют уменьшать битовый объема цифрового представления сигнала (рис. 3.17).

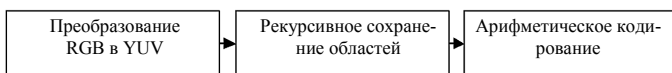


Рис. 3.17. Структурная схема алгоритма компрессии изображений на основе пирамидального представления.

Существуют два варианта представления данных, полученных в результате рекурсивного вычисления областей при пирамидальном представлении.

Первый способ (рис 3.18,а) предполагает последовательное размещение данных одного уровня иерархии в различных областях. Достоинство такого метода заключается в возможности создания формата представления изображений с постепенным «проявлением» изображения в процессе загрузки, но ухудшает сжимаемость получаемого потока на этапе кодирования.

Второй способ (рис 3.18,б) предполагает последовательное углубление детализации данных внутри одной области (левый обход дерева). Достоинством является более высокая степень компрессии за счет учета локальных особенностей области.

Результат сжатия изображения с использованием пирамидального представления и динамической сегментации на этапе предобработки приведен на рис. 3.19.

Следует заметить, что методы, имеющие в основе АДС, способны работать с данными произвольной размерности, например при компрессии видеоданных или карты высот ландшафта поверхности Земли и др. Общая структура такой программы компрессии многомерных данных приведена на рис.3.20.

На этапе предобработки осуществляется перевод данных в стандартизованную унифицированную форму (например, для изображений из цветовой системы RGB в систему YUV).

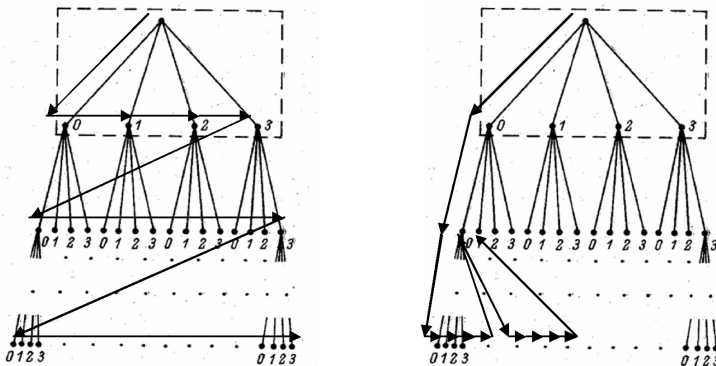


Рис. 3.18. Варианты представления данных.



Рис. 3.19. Пример изображения при сохранении в пирамидальном представлении при детализации до 4 пикселей и сегментации $\epsilon = 4$.



Рис. 3.20. Общая схема алгоритма компрессии.

На этапе дискретизации (рис. 3.21 для трехмерного случая) производится разбиение исходного дискретного пространства на элементы – кубы $N \times N \times N$, где N обычно равно 8 (эмпирическое значение).

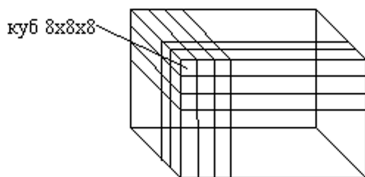


Рис. 3.21. Этап дискретизации.

С целью обеспечения высокой степени компрессии исходных данных требуется, с помощью некоторого преобразования, сформировать структуру данных, которая будет эффективно сжата алгоритмом вторичной компрессии. В программируемой технологии для этого используется многомерная матрица трансляции (подробнее см. гл. 2), которая позволяет сосредоточить семантически значимые компоненты в локальной области многомерного пространства (в трехмерном случае – в углу куба).

На этапе квантования полученные после трансляции данные квантуются согласно выражению (3.1). Квантование позволяет представить данные с минимальной точностью, которая обеспечивает требуемый уровень качества изображения:

$$D = \left\lfloor \frac{S}{q} \right\rfloor, \quad (3.1)$$

где S – матрица после трансляции; D – результат квантования; q – значение параметра квантования.

Таблица значений q определяется эмпирически и может быть как статической (заданной в программе), так и динамической (формируется для конкретного потока данных).

При декомпрессии алгоритм деквантования устраняет эффекты квантования. Процесс деквантования определяется согласно (3.2):

$$D = qS. \quad (3.2)$$

Этап развертки требуется для отображения элементов пространства в вектор, где происходит формирование битового потока данных, подлежащих последующему вторичному сжатию.

С целью эффективного применения алгоритмов вторичного сжатия требуется организовать формирование длинных последовательностей нулевых значений в потоке. Для формирования данных в такой форме используется алгоритм трехмерной «зиг-заг развертки» (рис. 3.22). Применение такой развертки позволяет в начале полученной последовательности получить семантически значимые элементы данных, а в конце – малозначимые элементы, которые после этапа квантования имеют близкие к нулю или нулевые значения. В ряде случаев, ко-

гда требуется обеспечить связность локальных областей, эффективной разверткой является многомерная заполняющая пространство кривая – ЗПК [79] рис.3.23.

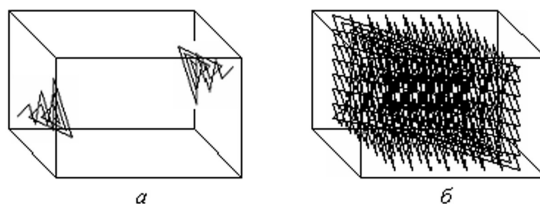


Рис. 3.22. Внешний вид сканирующей кривой (а – начальный и конечный участки сканирующей кривой, б – общий вид сканирующей кривой).

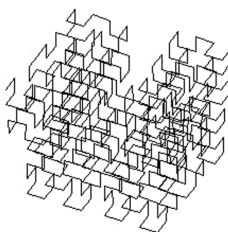


Рис. 3.23. Внешний вид сканирующей кривой 3D ЗПК.

На заключительном этапе производится вторичное сжатие, компрессирующее полученный битовый поток. В качестве такого сжатия могут быть использованы широко известные алгоритмы: групповое кодирование (RLE), арифметическое сжатие, сжатие Хаффмана и другие.

3.4. АДС сигналов

Рассмотренные выше алгоритмы и схемы АДС изображений и видео применимы и для анализа сигналов как функции времени. Рассмотрим как примеры схемы анализа и синтеза одномерного сигнала.

По эффективности применения процедуры АДС исходные сигналы можно разделить на три большие группы.

Первую группу составляют одномерные фракталы, сгенерированные по методу систем итерируемых функций ИФС (подробнее см. гл. 1). В связи с идеализированностью математического определения фрактальных объектов, их амплитудная спектральная характеристика является хорошим приближением к функции $1/f^\alpha$. Однако применение

вейвлет-анализа к этим функциям дает возможность оценки их общего рекурсивно-иерархического принципа формирования. Координата масштабирования определяет число совпадений с сопоставляемой функцией вейвлета на каждом масштабном уровне, а также их межуровневую связь. Это масштабное подобие (вариант корреляционной функции) выявляет семантически значимые сегменты на каждом уровне иерархии. Этот факт является ключевым в определении рекурсивно-иерархического подхода к одномерным сигналам, поскольку для них, в отличие от двумерных изображений использование динамического пирамидального подхода в явном виде является непростой задачей. Приведение к двумерному представлению с помощью преобразования, локализирующего временные и частотные особенности одномерного сигнала, существенно облегчает эту задачу.

Результаты кратномасштабного анализа фрактальной функции с помощью вейвлетов Морле и Хаара, при котором на каждом уровне масштабирования строился так называемый скелет максимумов, приведены на рис. 3.24. Следует заметить, что в работе [40] задолго до развития вейвлет-анализа использовалось понятие ДМДП как многоуровневой разномасштабной структуризации, что очень наглядно представлено в выделенных областях на рисунке 3.24,в.

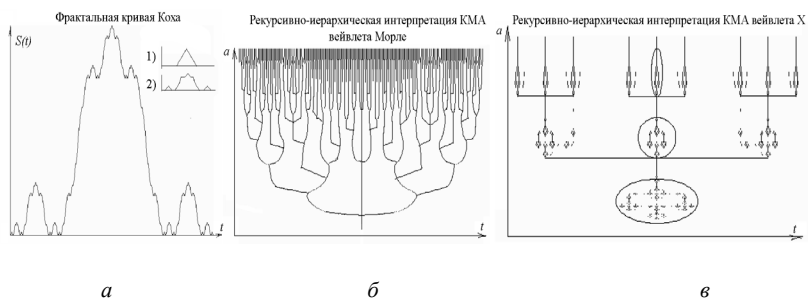


Рис. 3.24. Анализ фрактальной функции Коха методом скелета максимумов.
а- исходный сигнал, б- дерево Морле, в- дерево Хаара

Ко **второй группе** относятся сигналы физической, биологической и иной природы, характеризующиеся рекурсивным способом формирования. В эту группу входит также сигнал, моделирующий броуновское движение. Все эти сигналы в спектральной области аппроксимируются видом $1/f^\alpha$, а кратномасштабный вейвлет-анализ также выявляет частотно-временную структуру распределения семантически значимых компонент. Однако это распределение имеет не столь регулярный характер. Степень приближения регулярности их иерархического распределения к идеальным фракталам показывает степень адекватности применения фрактальной модели к данного вида сигналам. Наибольшей

степенью приближения к фрактальной модели обладают: сигналы электроэнцефалограммы человека, сигналы, характеризующие последовательность извлечения звуков на музыкальном инструменте при исполнении музыкального произведения (сигнал типа MIDI), в меньшей степени – сигналы, характеризующие акустические колебания при исполнении музыкального произведения (сигнал типа WAV). Таким образом, к сигналам данного рода применимы методы рекурсивной обработки временного потока. Результаты представления сегмента музыкального аудиосигнала (Бетховен, «К Элизе») в виде иерархического скелета максимумов показаны на рис. 3.25.

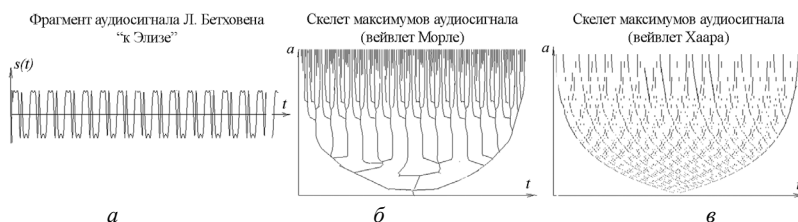


Рис. 3.25 – Анализ цифрового аудиосигнала методом скелета максимумов.
а- исходный сигнал, б- дерево Морле, в- дерево Хаара

Третью группу составили сигналы, у которых отсутствует структурно-иерархическое представление или оно носит крайне сложный или неявный характер. Классическим примером первого случая является белый шум, а хорошим примером второго – хаотическое дерево, описанное в [40]. Их спектральная характеристика не удовлетворяет закону $1/f$, а вейвлетные спектрограммы либо равномерны в масштабно-временной плоскости, как для белого шума, либо характеризуются крайней нерегулярностью, как в случае хаотического дерева. Таким образом, эти две крайности определяют границы применения рекурсивно-иерархического подхода к одномерным сигналам. По мере приближения к ним эффективность этого подхода будет резко падать, а сложность соответственно возрастет.

3.4.1. Метод иерархически сегментированного анализа и синтеза аудиопотока

Рекурсивное кодирование с использованием системы итерируемых функций кодирует аудиосигнал с помощью систем итерируемых функций, модифицированных для одномерного случая. Алгоритм данного вида кодирования включает четыре основные процедуры:

- поиск рекурсивно-иерархического представления исходного сигнала на основе его кратномасштабного анализа;

- фрактальную аппроксимацию исходного сигнала с вариацией некоторых параметров между уровнями рекурсии;
- оптимизацию полученной системы ИФС с целью выявления локального минимума сигнала ошибки;
- избыточное квантование и эффективное кодирование сигнала ошибки с помощью повторного применения системы ИФС.

Рассмотрим каждую из этих процедур в отдельности.

1. Определение рекурсивно-иерархического представления напрямую влияет на качество компрессии и на размерность системы ИФС (а следовательно, и на вычислительную сложность алгоритма). Возможны два способа вариации размерности системы итерируемых функций: метод равных интервалов и метод предварительного рекурсивно-иерархического представления. В первом случае производится тривиальная процедура разбиения области определения исходного сигнала на определенное количество отрезков одинаковой длины, и затем применение того или иного метода рекурсивно-фрактальной аппроксимации. Преимуществом данного подхода является его быстродействие. Поведение функции ошибки для этого случая крайне непредсказуемо и зачастую приходится констатировать неадекватность применения данного метода к аудиосигналам.

Существенно более эффективным приемом определения временных характеристик фракталоподобного сигнала является его кратно-масштабный анализ, хорошо выделяющий локализованные во времени особенности сигнала. Для рассматриваемых нами сигналов наиболее важными являются следующие локальные особенности.

Критические точки. Эти точки определяют области изменения локальных параметров и в большинстве случаев являются концами отрезков соответствующих элементов системы итерируемых функций, описывающей данный сигнал. Процедура нахождения этих точек состоит в огрубленной версии кратно-масштабного анализа, строящей «скелет максимумов» по временной оси. Типичный вид скелета максимумов для аудиосигнала показан на рис.3.25, б. Линии скелета максимальной длины определяют главные критические точки.

Области равной гладкости. Нестационарность одномерного сигнала может выражаться в сильном изменении гладкости на различных отрезках, например в электрокардиограммах. Модель системы итерируемых функций позволяет учесть лишь глобальный параметр гладкости, однако предлагаемая модификация АДС позволяет учесть и ее локальные изменения. АДС – всего лишь удобный инструмент идентификации изменений гладкости исходного сигнала, что соответствует точкам бифуркации «скелета максимумов» на масштабной оси.

Таким образом, определение отрезков должно сочетаться с выявлением этих особенностей. Предлагается брать в качестве исходных такие точки, которые при наличии локального экстремума во временном скелете максимумов совпадают с бифуркациями на масштабной оси.

2. *Фракталоподобная рекурсивная аппроксимация исходного сигнала.* После выявления критических точек функции производится ее аппроксимация на основании выбранной фрактальной модели. Классическим случаем аппроксимации на каждом уровне рекурсии является кусочно-линейная аппроксимация. Она характеризуется минимальным числом коэффициентов, подставляемым в уравнения системы итерируемых функций. Более сложные методы аппроксимации, например сплайновая, ведут к усложнению системы итерируемых функций, при этом поведение сигнала ошибки в таких случаях еще недостаточно изучено. Однако характер исследуемого структурированного аудиосигнала дает повод экспериментирования по применению аппроксимирующих многочленов большой степени гладкости, при этом следует учесть ограничения, связанные с разрывностью и дифференцируемостью исследуемых сигналов.

Исходя из всего вышесказанного, к исследуемым сигналам была применена кусочно-линейная аппроксимация системой итерированных функций. Нулевой уровень рекурсии сигнала выделяет постоянную составляющую. На первом уровне производится кусочно-линейная аппроксимация по выбранным критическим точкам, а также проводится вычитание результатов аппроксимации из исходного сигнала для выявления сигнала ошибки. Второй и последующие уровни рекурсии выбираются системой кусочно-линейной аппроксимации предыдущего уровня. Для минимизации сигнала ошибки на каждом уровне рекурсии производится оптимизация некоторых параметров системы. К таковым относятся стандартные операции аффинных преобразований: масштабирование, соответствующее изменению гладкости функции на данном уровне рекурсии, а также инверсия по амплитуде и времени и перестановочные операции. Величина масштабного коэффициента определяется исходя из поведения сигнала ошибки данного уровня, после чего оптимизируются параметры остальных преобразований. При этом заметим, что использование критерия СКО для оценки эффективности преобразования является некорректным. Это связано с наличием в сигнале ошибки резких скачков и перепадов, которые могут остаться неучтенными при оценке среднеквадратического отклонения. Поэтому также следует оценивать величину пиковых выбросов по отношению к среднему их значению и минимизировать этот параметр при аппроксимации. В разработанной реализации оптимизация производилась по обоим параметрам одновременно, при этом были положены равные приоритеты при окончательном принятии решения.

3. *Оптимизация полученной системы ИФС с целью выявления локального минимума сигнала ошибки.* На данном этапе производилось окончательное уточнение взаимного расположения элементов кусочно-линейной аппроксимации системы ИФС. Для поиска локального минимума применялся интегрированный критерий оценки сигнала ошибки, принятый в п. 2. В качестве метода оптимизации был выбран метод

простого координатного спуска. В качестве координат были выбраны длины отрезков образующих первого уровня рекурсии. Цель данной операции состояла в достижении локального минимума, поскольку, как было показано выше, задача поиска глобального минимума близка по сложности к методу полного перебора.

4. *Избыточное квантование и эффективное кодирование сигнала ошибки с помощью повторного применения системы ИФС.* Необходимость применения данной операции возникает в случае превышения результирующим сигналом ошибки уровня ошибки квантования. В этом случае восстановление исходного сигнала без потерь не представляется возможным, что является недопустимым для структурированного аудиосигнала. Применялась процедура избыточного квантования, описанная в предыдущем разделе. Повторное применение фрактального кодирования с помощью системы ИФС не имело отличий от кодирования исходного сигнала, описанного в п. 1-3. Заключительные шаги алгоритма кодирования подразумевали эффективную битовую упаковку полученной системы итерируемых функций.

Схема последовательных преобразований данных, описанных в алгоритме кодирования, представлена на рис. 3.26.

При кодировании данных этим методом степень компрессии для тестовых сигналов превосходит классические алгоритмы кодирования без потерь, основная доля вычислительных операций приходится на процедуры кратномасштабного анализа и оптимизации, т.е. алгоритм имеет быструю реализацию.

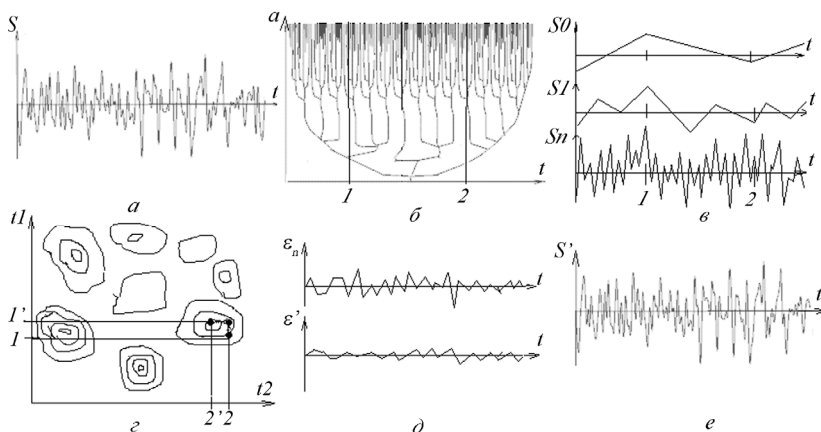


Рис. 3.26 Последовательность преобразований данных при иерархической сегментации аудиопотока.

a – исходный сигнал, b – анализ скелета максимумов, c – синтез сигнала методом фрактальной аппроксимации, d – оптимизация методом координатного спуска, e – сигнал ошибки для синтезированного и оптимизированного сигнала, f – оптимизированный сигнал

Это объясняется тем, что была разработана эффективная процедура рекурсивно-иерархического синтеза как обратная процедура рекурсивно-иерархической сегментации, имеющая линейную зависимость сложности вычислений от заданной глубины рекурсии.

Программа «Scalespace» предназначена для обработки одномерных сигналов с целью их сжатия и последующего восстановления с априорно заданным СКО [104, 105].

Перед обработкой зачастую требуется выполнить следующие действия: нормировку сигнала по амплитуде, коррекцию нулевого уровня, вычисление производной исходного сигнала, построение гистограммного распределения по амплитудам и спектра мощности. Непосредственно обработка осуществляет:

- 1) вывод сглаженного уровня масштабной иерархии сигнала, представляющую собой результат гауссовской фильтрации исходного сигнала с заданным коэффициентом масштабирования функции Гаусса;

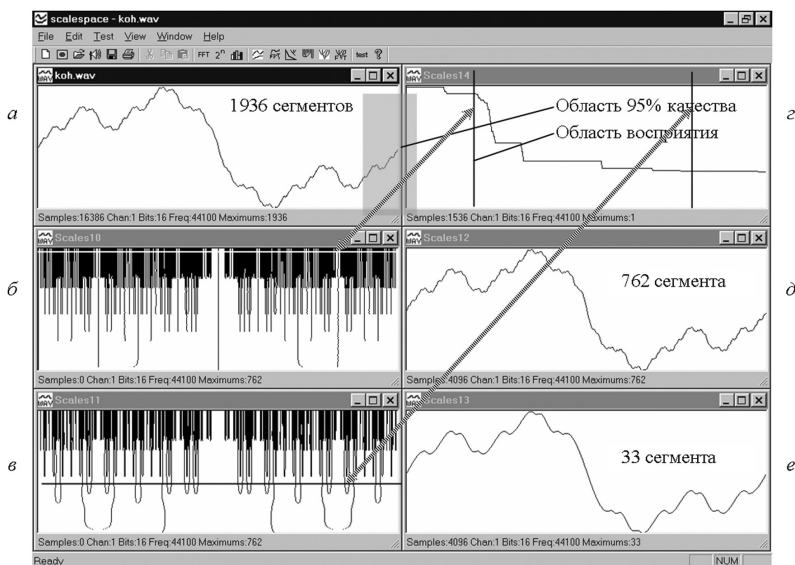
- 2) построение гистограммы распределения количества экстремумов в зависимости от уровня иерархии. Гистограмма характеризует изменение информационной сложности сигнала в зависимости от уровня иерархии. Согласно фундаментальному свойству линейного масштабируемого пространства (Scale-Space), данная зависимость является монотонно убывающей. Характер поведения первой производной данной зависимости позволяет судить о природе сигнала (речь, музыка, шум);

- 3) построение скелета экстремумов иерархического представления сигнала. Показывает расположение экстремумов в масштабируемом пространстве иерархического представления сигнала. Иллюстрирует фундаментальное свойство линейного Scale-Space – каузальность экстремумов на соседних уровнях иерархии;

- 4) построение древовидной структуры иерархического представления сигнала. Использует в качестве элементов структуры области монотонного поведения каждого уровня иерархии. Результирующая картина представляет собой тернарное дерево, параметры которого определяются формой исходного сигнала. Наилучшие результаты в плане симметрии дает древовидное представление искусственного фрактального сигнала, а также речи и музыки.

Результаты обработки различных типов сигналов с помощью программы «ScaleSpace» приведены на рис. 3.28–3.30.

Разработанный интерфейс позволяет управлять уровнем детализации при сегментном анализе, обеспечивая как объективные (среднеквадратическое отклонение от исходного сигнала, соотношение сигнал/шум), так и субъективные (визуализация, прослушивание) критерии качества (ε -тождественность) восстановления исходного сигнала с приемлемым для конкретной задачи качеством детализации.



Стрелками показаны одинаковые масштабы сглаживания на гистограмме и соответствующей древовидной структуре.

Рис. 3.27. Адаптивная динамическая структуризация сигналов. Рекурсивно-фрактальная кривая Коха. *а* – исходный сигнал; *б* – дерево иерархии, вертикальная ось – масштаб сглаживания.; *в* – скелет экстремумов, вертикальная ось – масштаб сглаживания; *г* – гистограмма распределения количества экстремумов (вертикальная ось) от величины масштаба сглаживания (горизонтальная ось); *д* – восстановление на малых масштабах иерархии (на двумерной структуре слева линией показан уровень восстановления из структуры); *е*– восстановление на больших масштабах иерархии.

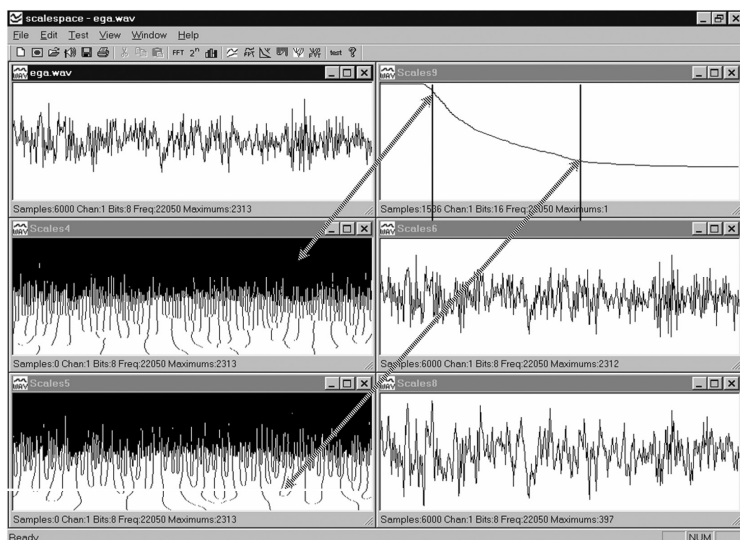


Рис. 3.28. ЭЭГ(1-ое ответвление 12-канального осциллографа), 250Гц, 4 с.

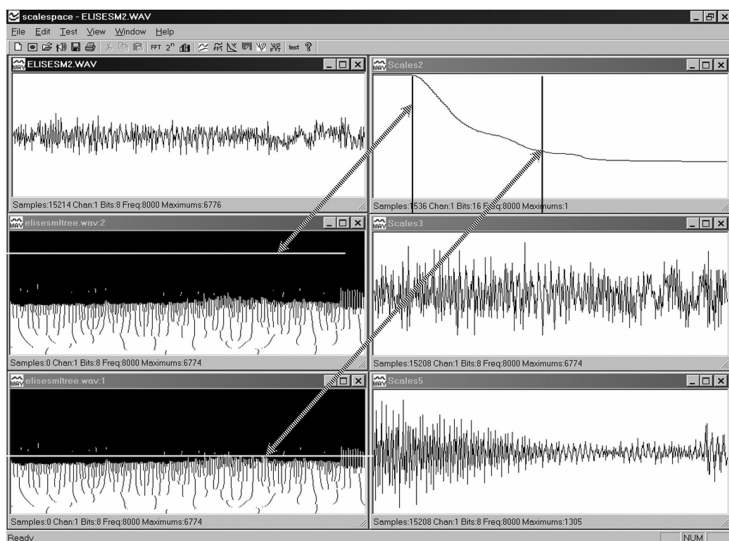


Рис. 3.29. Музыкальный сигнал (фрагмент «к Элизе»).

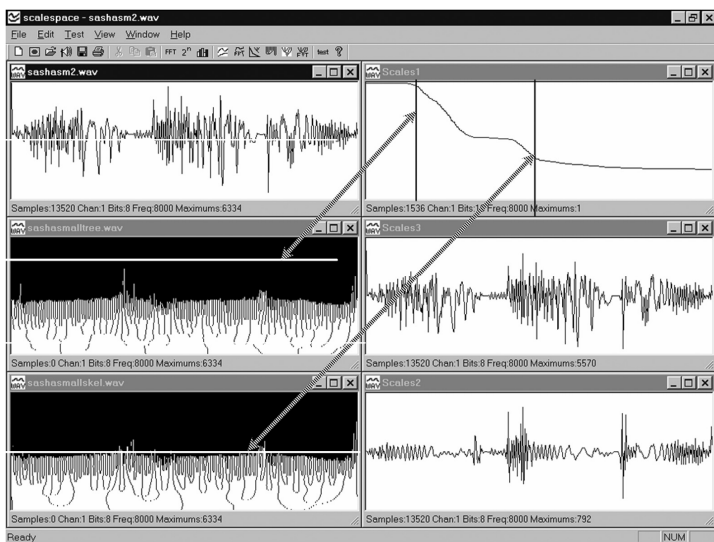


Рис. 3.30. Речь («раз-два-три», женский голос) 8кГц, 1.7с.

3.5. Аппаратная реализация

Рассмотренные схемы, алгоритмы и программы содержат однотипные итерационно-рекурсивные процедуры, а следовательно, имеют наиболее эффективную аппаратную реализацию.

Программируемая технология как язык управления «единицами» и «нулями» создает универсальные возможности для взаимной интеграции структур данных - текста, видео, звука.

Обратим внимание, что программируемая технология и ее аппаратная реализация более эффективны, чем построение систем инфокоммуникации в традиционной архитектуре. Для разных задач - лишь разная специфика может быть отражена в программной реализации.

Рассмотренная выше структуризация данных позволяет рассматривать входную часть приемника как сверхширокополосный аналого-цифровой преобразователь (СШП-АЦП) совместно с протокольной частью реализации некоторого стандарта обмена данными.

Хорошим примером является технология программируемого радио SDR, которая уже продемонстрировала возможность практического применения программируемой технологии. Одной из целей SDR является интеграция всех видов связи и 100%-ная совместимость всех протоколов и форматов. Так, приемник для SDR не использует промежуточную частоту, а антенна непосредственно подключается к СШП-АЦП, а цифровой сигнальный процессор считывает сигнал с конвертора и программно преобразует его в любую форму.

Представленная на рис. 1.27 схема программируемой технологии имеет следующую аппаратную реализацию (рис. 3.31) на различных видах микропроцессоров, сигнальных процессорах, микроконтроллерах и т.д.

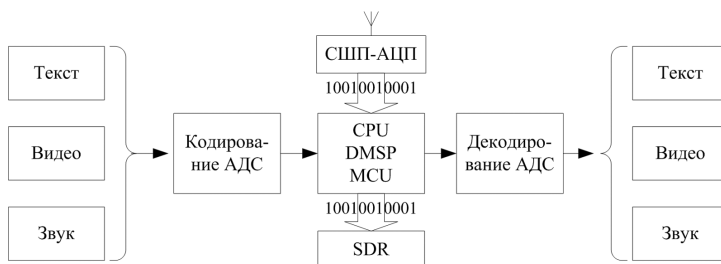


Рис. 3.31. Иллюстрация возможности аппаратной реализации АЦС.

Мы вопрошаем и допрашиваем прошедшее, чтобы оно объяснило нам наше настоящее и намекнуло нам о нашем будущем.

В.Г.Белинский (1840 г.)

В истории возможно пророчество. Более того, история ровно настолько является научной деятельностью, насколько делает возможным пророчество.

Х.Ортега – и – Гассет (1940 г.)

Послесловие

За научные открытия ученые дорого расплачиваются. За фразу: *«все небесные тела составляют бесконечные миры. Они образуют бесконечную Вселенную, в которой находятся бесчисленные миры, вытекает отрицание истины на вере»*, – Джордано Филиппо Бруно 17 февраля 1600 года был сожжен на костре в Риме [106].

В XIII веке английский алхимик и богослов Роджер Бекон провел четырнадцать лет в одиночной камере тюрьмы за связь с дьяволом, после того как изобрел **очки**. Человечество не узнало об открытии Р.Бекона. Прозревшее же человечество в XXI веке с удовольствием потребляет «дьяволиаду» (гарри поттера манию). История ничему не учит тех, кто в сутолоке спешных решений и плохих знаний не умеет сопоставлять прошлое с настоящим и будущим [90].

Так и в нашем, казалось бы, частном факте развития нанотехнологии, которая воздействует на общество как аттрактор (ключевое звено) наступления иной эпохи – наноцивилизации.

Афористический эпиграф главы 1 *«Точка – пиксел, теряя массу, излучая фотон – обретает информацию»* концентрировано отражает суть нанотехнологии. Однако он и вызывает больше всего вопросов. Причем фотон, какая точка, что за пиксел? Хотя именно нанотехнология приводит к синонимической эквивалентности этих понятий.

Фотон – физическая материализация - бит/с.

Точка – математический объект - для всех точек X , принадлежащих пространству R^n , существует взаимнооднозначное отображение и т.д.

Пиксел – инженерная потребность в измерении предельно возможного параметра, например, HDTV – цифровое телевидение высокой разрешающей способности - **1920x1080**.

Удивительно, но ростки будущего – цифровой инфотехнологии в популярном изложении хорошо отражены в следующих выдержках из [107].

«Ставки огромные, ты должен это хорошенько прочувствовать. «Трион системс», как мы понимаем, разработал важнейшую технологию со времен интегральной схемы. Они решили проблему, над которой хай-текговые компании бились десятки лет. Они изменили ход истории. Эпоха кремникового чипа кончается. Каким-то образом «Триону» удалось разработать оптический чип. Компания «Интел» потратила миллиарды на то, чтобы открыть этот секрет, однако безуспешно. Пентагон ищет решение больше десяти лет. Они понимают, что оптический чип полностью перевернет системы навигации и наведения ракет, и готовы отдать практически любые деньги, чтобы заполучить настоящий оптический чип. Опточип, - передает не электронные, а оптические сигналы – свет. С помощью вещества под названием фосфид индия. «Трион» скупил все фирмы, которые его производят. Это нас и насторожило. **Фосфид индия** нужен для полупроводника в микросхеме. Он пересылает информацию быстрее, чем **арсенид галлия**.

Что тут такого особенного?

В опточипе есть модулятор, способный переключать сигналы со **скоростью сто гигабайт** в секунду.

Да это же Святой Грааль! Ладно, объясняю для чайников. Малюсенький опточип в сто раз тоньше человеческого волоса сможет передавать трафик целой корпорации: телефонную, компьютерную, спутниковую и телевизионную связь одновременно. С опточипом можно скачать двухчасовой фильм в цифре за одну двенадцатую секунды.

Это революция в промышленности, компьютерных технологиях, спутниковых системах, кабельном телевидении. Опточип позволит принимать немерцающее телевизионное изображение. Он на сто порядков превосходит существующие технологии – по скорости, по энергопотреблению, по точности, по нагреву. Самая передовая технология и единственное комбинированное устройство - КПК, коммуникатор и смартфон одновременно, а по мощности – ноутбук в двухсотграммовой коробочке. Он позволял пользоваться электронной почтой, системой мгновенной отправки сообщений, делать крупноформатные таблицы и был оснащен полноценным HTML-браузером и отличным цветным дисплеем с активной TFT-матрицей. Пехота, ВВС, канадцы, британцы – все переработали систему глобальных коммуникаций. Теперь у них есть особая «оборонная система связи», секретное средство общения для миллионов военных по миру. Все это – на базе обычных компьютеров, но Пентагон мечтает перейти на беспроводную связь и удаленный доступ к секретным данным и сообщениям, с идентификацией отправителей и получателей, с полным и надежным шифрованием. То есть брандмауэры, проверки допуска, защита сети, многоуровневый секретный доступ – все существующие виды защиты. Это самый настоящий конус молчания. Разрабатываемая технология будет поистине фундаментальным прорывом. То есть настоящим скачком в будущее, который перевернет все нынешние представления. В общем,

тотальная революция в науке и технике! Это величайшее изобретение со времени транзисторов.

Все электронное и интернетное комбинируется и сливается. Настала эпоха комбинаций. Потребителям не нужен отдельный телевизор, видеомаягнитофон, факс, компьютер, стерео, телефон и так далее. Будущее за системами «все в одном».

Медицинские системы «Триона» лучшие в своем роде технологии магнитного резонанса, ядерной медицины и ультразвука, но слабоваты в обслуживании, например, в управлении информацией о пациентах и вкладах.

Мы можем упустить свой шанс, если не займемся технологиями передачи цифровой музыки и видео по Интернету».

Но для этого и следует раскрыть свойства неразрывной связи между информацией, фундаментальной физикой и технологией

$$I \leq KE = Kmc^2$$

Известный принцип Ландауэра [108] основан на парадигме, что информация вещественна т.е. первична. Это порождает следующие вопросы:

(1) Каково наибольшее количество классической информации, которое может быть передано без потерь через традиционный зашумленный волновой или квантовый канал?

(2) Можно ли идентифицировать и компрессировать квантовую информацию подобно работе традиционной машины Тьюринга?

Возвращаясь к эпиграфам и размышляя о будущем, следует задуматься и над таким историческим фактом «Главенство идеологии, чудовищная заорганизованность и секретность в сочетании с неизбежной конкурентной борьбой ведомств, интригами, доносами приводили к распылению сил и катастрофическим просчетам. "Немецкие ученые имели более высокий статус, чем их английские коллеги, - пишет Дейтон, - однако они не имели доступа во все военные учреждения - от сержантской столовой до кабинета министров, каким пользовались английские ученые. Трудно представить себе гражданских штафинок, указывающих лощеным нацистским штабным офицерам, что последние допустили те или иные ошибки или просчеты. А английские ученые сплошь и рядом делали это и поэтому имели возможность с поразительной быстротой доводить до боевых частей все сделанное ими в лабораториях. Это было следствием доверия, которое английские военные, бизнесмены и политики испытывали к ученым. Одним из результатов этого доверия была большая роль, которую сыграла **радиолокация** в битве за Англию».

Научно-технический прогресс, разумеется, не признает ни государственных границ, ни национальных и религиозных различий. Однако уже к началу XX века наука оказалась в теснейшей связи с конкретным социально-экономическим и политическим устройством общества. С

одной стороны, необычайно возросло влияние науки на экономику и военную мощь. С другой - неимоверно увеличились масштабы и стоимость разработок. Все это потребовало финансовых затрат и организационных усилий уже не только со стороны заинтересованных предпринимателей, но и напрямую от государства. Огромное влияние на процесс научно-технического творчества начали оказывать моральный климат, государственная идеология, политические цели правящих кругов. Зачастую это влияние становится решающим» [109].

Глоссарий

Адаптивно-динамическая сегментация (АДС) – итерационный процесс иерархической структуризации информационного содержания 165, 200, 205

Алгоритм арифметический – аксиоматические правила выполнения арифметических вычислений 39, 61

Алгоритм по А. Н. Колмогорову – способ, позволяющий по виду записи находить ее номер, а по номеру – восстанавливать запись. Существование алгоритма, «перерабатывающего» запись в идентификатор (номер), и алгоритма, «перерабатывающего» идентификатор (номер) в запись, как эмпирический факт 52, 61, 64

Арифметический процессор – процессор, основными базисными операциями которого являются действия над числами 100, 114

Асимметричная цифровая абонентская линия (Asymmetric Digital Subscriber Loop – ADSL) – модемная технология. Преобразует стандартные абонентские телефонные аналоговые линии в линии высокоскоростного доступа 118

Битовое представление – представление данных в двоичном виде 120

Вейвлет-анализ, функции, преобразование – свертка сигнала по выбранной форме вейвлет-функции и кратно-масштабируемого интервала 83, 147, 153

Виртуальная полоса – расширение физического ограничения полосы пропускания за счет компрессии данных 117

Идентификация неразличимости – принцип, сформулированный Г. Лейбницем следующим образом: «Два объекта считаются неразличимыми, если все их свойства общие» 76, 122

Имитационное моделирование – подмена исследуемой системы, объекта математической, компьютерной, кодовой или программной моделью 48, 62, 111, 197

Инфокоммуникация – средство, инструмент коммуникативного общения 45, 117

Информационное представление – запись значений параметров идентифицируемых объектов (процессов) для сохранения или передачи данных об этих объектах 122

Искусственный интеллект – раздел информатики, изучающий возможность разумных рассуждений (аналогичных естественному интеллекту) 38

Итерационные функциональные системы (ИФС) – итерационный (рекурсивный) процесс воспроизводства информационного объекта 174

Кодек – КОдер-ДЕКОдер, программная или аппаратная реализация компрессаторов информационного содержания 66

Кодовая модель – программный (генный) процесс воспроизведения оригинала (клона) 73, 196

Математическая модель – функциональная, аксиоматическая форма информационного представления объекта 50, 85

Нанотехнология – характеристика достигнутого уровня «хай-тек», определяющая тенденции развития «цифровой технологии» 55, 84, 104, 108

Носитель данных – физический материальный объект для хранения данных (дисковые носители, носители на картах памяти и др.) 121

Пиксел (picture element – pixel) – наименьший неделимый технологический элемент представления изображений. Синонимы: математическое понятие – точка, физическое – фотон 73, 103

Преобразование Фурье – интегральное преобразование исходного сигнала в спектр базисных функций 130, 148

Программа – последовательность операций для процессора, в том числе воспроизводящая информационное содержание 11, 39, 52, 66

Программируемая технология – способ битового представления, хранения и обработки данных 62

Программируемая технология Колмогорова (ПТК) – оптимизация программы через минимизацию ее длины (измеряется числом битов) 64, 99, 116

Протокол – стандарт, определяющий процесс передачи данных 106, 118, 229

Симуляция (perfect simulation) – виртуальное компьютерное воспроизводство реальной системы или физического процесса, например симулятор управления автомобилем 58, 112

Скважность импульса – отношение длительности импульса к периоду его следования 84

Сложность по Колмогорову – длина программы, позволяющей по виду записи идентифицировать ее содержимое 64, 89

Среда передачи данных – физическое соединение, по которому осуществляется передача данных от одного устройства к другому 121

Стеганография – технология скрытой передачи данных путем сохранения в тайне самого факта передачи 40

Терминальная программа – программа в ее битовом представлении, формирующая в качестве выходного результата сигнал (данные) и, как правило, не использующая входных данных 101

Трансляция – реализация переноса с использованием конкретных технологических возможностей 71

Уникальный идентификатор – любое однозначное описание информационного объекта (штрихкод) 65

Формат – способ записи информационного описания для получения битового представления, а также формальные соглашения для обеспечения записи и считывания данных 121

VS – versus – подчеркивает контраст, противопоставление, борьбу, конкуренцию двух научных подходов, поиск истины 35, 45, 57, 87, 104, 135

ε-тождественность – критерий тождественности (останова) при семантическом анализе и АДС (в частном случае, среднеквадратическое отклонение - СКО) 103, 186

Список сокращений

ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Loop – асимметричная цифровая абонентская линия

CPU – Central Processing Unit – центральное процессорное устройство (ЦПУ)

DSP – Digital Signal Processor – цифровой сигнальный процессор

DVB – Digital Video Broadcasting – семейство европейских стандартов цифрового телевидения

DVD – Digital Versatile Disc – цифровой многоцелевой диск

FDM – Frequency Division Multiplexing – частотное уплотнение линии связи

HDTV – High-Definition Television – телевидение высокой четкости (ТВЧ)

IQ – Intelligence Quotient – коэффициент интеллекта

JPEG – Joint Photographic Experts Group – объединенная группа экспертов в области фотографии, а также стандарты представления изображений, разработанные этой группой

LRC – обозначение электрической цепи, включающей индуктивности, емкости и сопротивления

MCU – Microcontroller Unit – микроконтроллер

MMDS – Multichannel Multipoint Distribution System – многоканальная многоточечная распределительная система

MP3 – MPEG, Layer 3 – формат представления аудиоданных

MPEG – Moving Picture Experts Group – экспертная группа по вопросам движущегося изображения, а также стандарты представления видеоданных, разработанные этой группой

RAW – данные в «сыром» необработанном виде

RGB – Red, Green, Blue (красный, зеленый, синий) – способ представления цвета

RLE – Run-length Encoding – групповое кодирование повторов

SDR – Software Defined Radio – программируемое радио

SimPU – Simulating Processing Unit – симуляционный процессор

TCP – Transmission Control Protocol – протокол управления передачей, один из основных сетевых протоколов Internet

vs – versus – обозначает противопоставление, см. Глоссарий

WAV – wave – формат представления аудиоданных

WiFi – Wireless Fidelity – технология беспроводной передачи данных

АДС – адаптивно-динамическая сегментация

АДФ – адаптивно-динамическая фрагментация

АЦП – аналого-цифровой преобразователь (ADC)

БПФ – быстрое преобразование Фурье

ДКП – дискретное косинусное преобразование (DCT)

ДМДП – динамическая модель дискретного пространства

ДСД – динамическая структура данных

ЗПК – заполняющая пространство кривая

ИО – информационный объект

ИТ – информационные технологии (IT)
ИФС – итерационно–функциональная система (IFS)
ММРА – мультимасштабно-разрешающий анализ (MSRA)
ПТ – программируемая технология
ПТК – программируемая технология А. Н. Колмогорова
СКО – среднеквадратическое отклонение
СОВА – семантико-ориентированный визуальный анализ
СШП – сверхширокополосный
ТВ – телевидение
ТВЧ – телевидение высокой четкости (HDTV)
Хай-Тек – Hi-Tech – высокие технологии
ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь (DAC)
ЭМП – электромагнитное поле
ЭЭС, ЭЭГ – электроэнцефалографический сигнал

Литература

1. *Кандинский В.* О духовном в искусстве. — 1910 .
2. *Полонников Р.И.* Основные концепции общей теории информации. — СПб.: Наука, 2006. — 204 с.
3. *Велихов Е.* Отчего науку финансируют «под столом»? // *АиФ.* 2005. -№28.
4. *Пригожин И.* Введение в термодинамику необратимых процессов. — М.:ИЛ, 1960.
5. *Тринчер К.С.* Биология и информация. Элементы биологической термодинамики. — М.: Наука, 1964. — 100 с.
6. *Тоффлер Э.* Третья волна / Перевод с англ. А. Тоффлер. — М.: ООО Изд-во АСТ, 2004. — 783 с.
7. Электронная Интернет-энциклопедия. — <http://ru.wikipedia.org>
8. *Колмогоров А. Н.* Теория информации и теория алгоритмов. — М.: Наука, 1987. — 304 с.
9. Fractal Creations (Paperback) by *Tim Wegner, Mark Peterson*. Paperback: 335 pages. Publisher: Waite Group Press; 1st ed edition (1991).
10. Цифровое ТВ: технологии опережают бизнес – сознание. // Информ-Курьер-связь. 2006. № 3, март. — <http://www.iks-media.ru/issue/2006/3/index.html>
11. *Сарычев В. А.* Лекции по курсу «Теория радиотехнических цепей и сигналов». Лекция 1. Что такое сигналы и радиотехнические цепи? — СПб.; Томск, 2005.
12. *Воробьев В. И., Грибунин В. Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. — СПб.: Изд-во ВУС, 1999. — 208 с.
13. *Steven W. Smith.* The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Second Edition. — San-Diego: California Technical Publishing, 1999.
14. *Грибунин В. Г.* Глоссарий по цифровой обработке сигналов. — <http://www.autex.spb.ru>

15. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. — 384 с.
16. Александров В. В., Горский Н. Д. Представление изображений. Рекурсивный подход. — Л.: Наука, 1985. — 190 с.
17. *Langefors B.* Infological models and information user views. // *Information Systems*. 1980. Vol. 5. — P.17-32.
18. Витебский М. Миллион долларов за дырку от бублика. — <http://lenta.ru/articles/2004/09/12/poincare/>
19. *Alexandrov V.V., Gorsky N.D.* From Humans to Computers: Cognition through Visual Perception. — Singapore; New Jersey; London; Hong Kong. 1991. — 203 p.
20. Александров В. В., Андреева Н. А., Кулешов С. В. Системное моделирование. Методы построения информационно-логистических систем: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. — 95 с.
21. Тойнби А. Дж. Постигание истории. / Пер. с англ. и сост. А.П. Огурцов; Вступ. ст. В.И. Уколовой; Закл. ст. Е.Б. Рашковского. — М.: Прогресс, 1996. — 608 с.
22. Симпозиум по проектированию машин, имитирующих поведение человеческого мозга // Кибернетический сборник, Вып. I / Под ред. А.А. Ляпунова. — М.: Ин.яз., 1960. — С.61-68.
23. Колмогоров А. Н., Успенский В.А. К определению алгоритма// Успехи математических наук. 1958. - Т. 13, вып. 4. — С. 3-28.
24. Колмогоров А. Н. Три подхода к определению понятия «количество информации»// Проблемы передачи информации. 1965. - Т. 1, № 1. — С. 3-11.
25. Александров В.В., Кулешов С.В. Интернет – обучение и поиск информации. Поиграем в ассоциации! // Сб. трудов Всероссийских чтений «Будущее сильной России – в высоких технологиях». — СПб.: ООО Изд-во «Логос». 2007. — С. 29-33.
26. Пирс Дж. . Символы, сигналы, шумы: закономерности и процессы передачи информации. М.:Изд.: «Мир», 1967. — 234 с.
27. Храмов А. В. Проблемы теории телевидения. // РЭТТ. 2006.
28. *Mandelbrot B. B.* The Fractal Geometry of Nature. — San Francisco: W.H. Freeman and Company, 1982. — 258 p.
29. Болотовский Б. М. Оливер Хевисайд. — М.: Наука, 1985.
30. *Buckley O.E.* Address at the Heaviside centenary meeting. // In: The Heaviside centenary volume. L.: IEE, 1950, 6 p.
31. Калман Рудольф. Открытие или изобретение: Ньютонианская революция в технологии систем//Авиакосмическое приборостроение. 2004 - № 6.
32. *Mandelbrot Benoit.* Some noises with 1/f spectrum, a bridge between direct current and white noise.// *IEEE Transaction, Information Theory*. 1967. Vol. 13 (2). - P. 289-298.
33. Глейк Дж. Хаос: Создание новой науки / Пер. с англ. М. Нахмансона, Е. Барашковой. — СПб.: Амфора, 2001. — 398 с.
34. Данн-Дальмедико А., Пейффер Ж. Пути и лабиринты. Очерки по истории математики. — М., 1986.

35. *Шилов В.В.* Слово алгоритм: происхождение и развитие. — <http://ru.wikibooks.org>
36. *Александров В.В., Кулешов С.В.* Нарротивные представления информационных процессов. // Электронный науч. журн. «Информационные процессы». 2004. - Т. 4, № 2. — С.160-169. — <http://www.jip.ru>
37. *Спирidonов В.П.* Самоподобие, всплески и квазикристаллы. // Компьютерра. 1998. - № 8 от 02 марта.
38. *Грушвицкий Р. И. Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П.* Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой. — СПб.: Изд-во «БХВ-Петербург», 2006. — 736 с.
39. *Жаблон К., Симон Ж.-К.* Применение ЭВМ для численного моделирования в физике. 1978 / Пер. с франц. А.В. Арсентьевой; под ред. В.В. Александрова и Ю. С. Вишнякова. — М.: «Наука», Главная редакция физ.-мат. литературы, 1983.
40. *Александров В. В., Арсентьева А. В.* Информация и развивающиеся структуры. — Л.: ЛНИВЦ АН СССР, 1984. — 186 с.
41. *Falconer K.J.* Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications. John Wiley & Sons, 2003. — 337 с.
42. *Александров В. В., Кулешов С. В., Цветков О. В.* Концепция программируемой технологии цифровой теории связи: от герц к бит/с // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. № 6. — С. 62-72.
43. *Hofstadter D.A.* Godel, Esher, Bach: An eternally golden braid. N.Y.: Harvester Press, 1979. — 843 p.
44. Народные русские сказки: Из сборника А. Н. Афанасьева. — М.: Худ. лит., 1979. — 348 с.
45. *Кретов А. А.* Рекурсивные сказки. — Воронежский университет — <http://www.ruthenia.ru/folklore/kretov1.htm>
46. *Dawkins R.* The selfish gene. Oxford University Press, Oxford, 1976.
47. *Лейбниц Г.* Новые опыты о человеческом разуме. — М., Л.: Гос. соц.-эконом. изд-во. 1936.
48. *Силин А.* Технология Software Defined Radio // Беспроводные технологии. 2007. №2. — с. 22.
49. *Александров В.В., Полонников Р.И.* Об одном способе решения задачи опознавания объектов // Изв. Академии наук СССР. Техническая кибернетика. 1967. № 1 — С. 92-102.
50. *Манин Ю.И.* Вычислимое и невычислимое. — М.: Сов. радио, 1980.
51. *Барон Д.* Рекурсивные методы в программировании. — М.: Мир, 1974.
52. *Мейер Б., Бодуэн К.* Методы программирования. — М.: Мир, 1982.
53. *Berry G.* Bottom-up computation of recursive programs // Rev. Franciase, d'automatique, d'informatique et de recherché operationnelle. 1976. Vol. 10, №3. — p. 47-82.
54. *Тарьян Р. Э.* Сложность комбинаторных алгоритмов// Кибернет. сб. — М.: Мир, 1980. - Вып. 17. — С. 60-109.
55. *Якушин А. Н.* Количества и пространство. — СПб.: ОАО «Павловская типография», 1998. — 111 с.

56. Арнольд В. И. Сложность конечных последовательностей нулей и единиц и геометрия конечных функциональных пространств: Доклад в Моск. мат. обществе. — 2006.
57. Lorenz Edward N. Determenistic non Periodic Flow// Journal of the Atmospheric Sciences 20, March 1963.
58. Емельченков Е.П., Емельченков В.Е. Вычислимость. Введение в теорию алгоритмов. — 2000.
59. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication// Bell System Technical Journal. Vol. 27 (July and October 1948). — P. 379-423 and 623-656. Reprinted in D. Slepian, editor, Key Papers in the Development of Information Theory, IEEE Press, NY, 1974. Included in Part A.
60. The Tree of Life. Symbol of the Centre. Roger Book, 1974.
61. Хоард Б. Данные в чаше Петри// Журн. «Computerworld Россия», 22 мая 2007. — С. 29.
62. Цифровая модернизация штурмовиков А-10. — http://rnd.cnews.ru/natur_science/news/top/index_science.shtml?2007/07/09/257874.
63. Кулешов С. В. Терминальные программы «цифровой» передачи и обработки данных, энергетическая и информационная эквивалентность // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. № 9.
64. Deutsch D. Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer// Proc. Roy. Soc. Lond. 1985. - Vol. A400. - P. 97-117. Перевод А.П. Бельтюкова.
65. Popper K.R., Eccles J. C. The Self and Its Brain. – Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 1977.
66. Витковски Никола. Сентиментальная история науки. — М.: Колибри, 2007. — С. 331.
67. Харкевич А. А. Борьба с помехами. — М.: Наука, 1965. — 276 с.
68. Сворень Р. Магнитофон осваивает «цифру»// Журн. «Наука и жизнь». 1988. — № 8.
69. Цветков О. В. Цифровые технологии обработки аудиовидеосигналов: компрессия и семантический анализ // Труды СПИИРАН. Вып. 2, т. 1. — СПб.: Наука, 2004. — С.145–158.
70. Сулеймеков О. Изогнутый лекалом мысли звук// Журн. «Дружба Народов». 2007. — № 6.
71. Котельников В. Теория потенциальной помехоустойчивости — М.: Госэнергоиздат, 1965.
72. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2001. — 528 с.
73. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. — М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
74. Zipf G.K. Human behavior and the principle of least effort. Addison Wesley Publ.Co., Inc., Cambridge, Mass., 1949.
75. Jadegari S. D. Self-similar Synthesis on the Border between Sound and Music. Ph.D. Thesis, MIT, 1992. — 146 p.

76. Александров В. В. Биоинформационный процесс познания и моделирования// Журн. «Информационные технологии в проектировании и производстве». 2003. - № 3. — С. 70-74.
77. Дорофеева А. В., Чернова М. Л. Карл Вейерштрасс (К 170-летию со дня рождения)// Сер.: Математика и кибернетика. — Изд. «Знание», 1985. — 48 с.
78. Simon J. C. L'éducation et L'information de la société: Rapport an President de la République. — 1980.
79. Александров В. В., Лачинов В. М., Поляков А. О. О рекурсивной алгоритмизации кривой, заполняющей многомерный интервал // Изв. АН СССР Техническая кибернетика. 1978. — № 1.
80. Александров В. В. Развивающиеся процессы и системы. Степенные законы// Журн. «Информационные системы и технологии». 2007. - № 1 (1). — С. 58-83.
81. Love E. R., Young L. C Sur une classe de fonctionnelles lineaires. Fundamenta Mathematicae. 1937. - № 28. — P. 243-257.
82. Besicovitch A. S., Ursell H. D. Sets of fractional dimensions (V): On dimensional numbers of some continuous curves//. The London Mathematical Society. 1937. – Vol. 12. — P. 18-25.
83. Степанов В. Д. Теорема Литтлвуда-Пэли для интегралов Фурье / ВЦ ДВНЦ АН СССР. — Владивосток, 1985. — 35 с. (Препринт).
84. Александров В. В., Юрченко Ю. С. Применение полиномов Уолша для оценки параметров некоторой модели // Вопросы кибернетики. Адаптивные системы. — 1976.
85. Mallat S. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation// Proc. IEEE Trans on Pattern Anal. and Math. intel. 1989. - Vol. 11, N 7.
86. Adelson E. H., Anderson C. H., Bergen J. R., Burt P. J., and Ogden J. M. Pyramid methods in image processing// RCA Engineer. 1984. – Vol. 29(6). — P. 33-41.
87. Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. – Vol. 41(12). Dec. — P. 3445-3462, Dec. 1993.
88. Левкович-Маслюк Л. И. Нахождение порождающих матриц для фрактальных интерполяционных функций с помощью вейвлет-анализа. // Регулярная и хаотическая динамика. — 1998. Т. 2.
89. Александров В. В. Глаз и визуальное восприятие// Оптич. журн. 1999. Т. 66, №9. — С. 54-63.
90. Александров В. В. Интеллект и компьютер. — СПб.: Изд-во «Анатолия», 2004. — 282 с.
91. Александров В. В. Развивающиеся системы в Науке, Технике, Обществе и Культуре. — СПб: Изд-во СПбГТУ, 2000. — 244 с.
92. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. — М.: Постмаркет, 2000. — 322 с.
93. Prusinkiewicz P. and Hanan J. Lindenmayer systems, fractals, and plants. Springer-Verlag: New York, 1989.
94. Кулешов С. В. Фрактальное шифрование // Труды СПИИРАН. — Вып. 2, т. 1. — СПб.: Наука, 2004. — С. 231-235.

95. *Александров В. В., Горский Н. Д.* ЭВМ видит мир. — Л.: Машиностроение, 1990.
96. Животные мыслят логически// Журн. «Наука и религия». 2007. - № 5. — С.23.
97. *Вальд А.* Последовательный анализ. — М.: ФМ, 1960.
98. *Горский Н., Анисимов В., Горская Л.* Распознавание рукописного текста. От теории к практике.— СПб.: Политехника, 1997. — 126 с.
99. *Александров В. В., Зайцева А. А., Харинов М. В., Цветков О. В.* Концепция динамического выделения семантических компонент аудиовизуального потока данных// Проблемы информатизации: теоретич. и научно-практич. журнал / РАН, Министерство науки и технологий РФ. — М. 2001. — Вып.3. — С. 45-48.
100. *Александров В. В., Харинов М. В.* Представление изображений ранговыми распределениями. Препринт ЛНИВЦ АН СССР № 61, 1988. — 47 с.
101. *Лайков Е. В.* Компрессия изображений с частичной потерей данных // Сб. науч. трудов аспирантов СПИИРАН «Информационные технологии и интеллектуальные методы» — СПб. 1996. — С. 71-78.
102. *Levachkine S., Velázquez A., Alexandrov V. and Kharinov M.* Semantic analysis and recognition of raster-scanned color cartographic images.// Blostein, D., Young-Bin Kwon (eds.), 4th International Workshop, GREC'01, Kingston, Ontario, Canada, 7-9 Sep. 2001; Lecture Notes in Computer Science, 2390. Springer-Verlag, 2002. — P. 171-182.
103. *Alexandrov V.V., Frenkel B.E., Kharinov M.V.* Object-fitting Approach to Image Representation, Computer Applications in Industry /Proc. Fourth IASTED Intern. Conf. Cairo, Egypt (ARE). 1995.
104. *Александров В. В., Блажис А. К., Скурихин А. В.* О новой парадигме информационной связи// Информационные технологии и интеллектуальные методы, 1999. - Вып.3. — С. 289-299.
105. *Alexandrov V.V., Gorsky N.D.* Image Representation and Processing. A Recursive Approach. — Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1993. — 194 p.
106. *Орган Дж. К.* История итальянского искусства. Пер. с ит. В двух томах. — М.; Радуга, 1990. — 239 с.
107. *Файндер, Дж.* Паранойя: пер. с англ. Джозеф Файндер. — М.: АСТ: АСТ МОСКВА: Транзиткнига, 2005. — 382 с.
108. *Plenio M. B. and Vitelli V.* The physics of forgetting: Landauer's erasure principle and information theory// Contemporary Physics, 2001. - vol. 42, № 1. — P. 25-60.
109. *Оскотский Захар.* Гуманная пуля. СПб.: Изд-во Ин-та химии СПбГУ совместно с изд-вом «Четверг», 2001. — 256 с.

Научное издание

**Виктор Васильевич Александров
Сергей Викторович Кулешов
Олег Викторович Цветков**

**ЦИФРОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИИ.
ПЕРЕДАЧА, ХРАНЕНИЕ И СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ТЕКСТА, ЗВУКА, ВИДЕО**

*Утверждено к печати
Ученым советом Санкт-Петербургского
института информатики и автоматизации РАН*

Редактор издательства *Л.С. Тихомирова*
Художник *В.В. Александрова*
Книга печатается с оригинал-макета,
подготовленного *А.А. Зайцевой* (СПИИРАН)

Лицензия ИД №02980 от 06 октября 2000 г.
Подписано к печати 26.11.2007. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.
Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15.25. Уч.-изд. л. 16.2
Тираж 500 экз. Тип. зак. № 123 от 19.11.2007

Санкт-Петербургская издательская фирма «Наука» РАН
199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1
E-mail: main@nauka.nw.ru
Internet: www.nauka.nw.ru

Типография издательства ООО «Анатолия»
199178, Санкт-Петербург, В.О., 14-я линия, 39

ISBN 978-5-02-025287-5



9 785020 125287 5