



МИР физики и техники

Процессы передачи
и обработки информации
в системах со сложной
динамикой

Под ред.
д.ф.-м.н., проф. А.С. Дмитриева,
д.ф.-м.н. Е.В. Ефремовой

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2019

УДК 621.37
ББК 32.85
П84

П84 Процессы передачи и обработки информации в системах со сложной динамикой
/ Под ред. А.С. Дмитриева, Е.В. Ефремовой
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 320с. ISBN 978-5-94836-541-1

Интригующие свойства динамического хаоса и связанных с ним бифуркационных явлений давно привлекают пристальное внимание исследователей. Достижения в области сложной динамики нелинейных систем позволили к началу 1990-х годов осознать потенциальное значение динамического хаоса как средства и идеологии обработки и передачи информации. В связи с этим в ИРЭ РАН было сформировано направление исследований «Информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса» – лаборатория «Информхаос».

В книге рассматриваются основные разработки лаборатории и полученные результаты, включая нелинейные динамические системы для записи, хранения и ассоциативного извлечения информации, общие принципы формирования шумоподобных хаотических сигналов в электронных устройствах, применение хаотических сигналов для беспроводной передачи данных, самоорганизующиеся сенсорные и активные сети беспроводной связи на основе прямохаотических приемопередатчиков, применение приемопередатчиков с хаотическими сигналами для связи и управления в группировках мобильных объектов, разработка идеи искусственного радиоосвещения на основе миниатюрных источников шумоподобного хаотического излучения микроволнового диапазона.

УДК 621.37
ББК 32.85

*Авторы: Ю.В. Андреев, Ю.В. Гуляев,
А.С. Дмитриев, Е.В. Ефремова, Л.В. Кузьмин,
В.А. Лазарев, А.И. Рыжов, Т.И. Мохсени*

© 2019, Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.
© 2019, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-541-1

Содержание

Введение	6
Глава 1. Шум, динамический хаос и информация	11
1.1. Введение.....	11
1.2. Синтез хаотических систем с заданной информацией на периодических траекториях.....	13
1.3. Организация хаотических последовательностей, содержащих требуемую информацию.....	15
1.4. Линейное взаимодействие хаоса, информационных сигналов и шума.....	17
1.5. Модуляция и демодуляция хаотического носителя информационным сигналом.....	21
1.6. Информация и вычисления.....	23
1.7. Обобщенный канал связи и вычисления.....	28
1.8. Информационно-открытые системы.....	30
1.9. Заключение.....	33
Литература.....	33
Глава 2. Источники и генераторы динамического хаоса микроволнового диапазона на сосредоточенных элементах	38
2.1. Введение.....	38
2.2. Микроразомкнутые генераторы хаоса.....	39
2.3. Моделирование генераторов хаоса.....	40
2.4. Генераторы хаоса на сосредоточенных элементах.....	44
2.5. Генератор с печатными индуктивностями.....	51
2.6. Генератор диапазона 3–7 ГГц в виде интегральной микросхемы на технологии SiGe 250 нм.....	53
2.7. Разработка моделей генераторов хаоса в диапазоне 10–60 ГГц в виде интегральных микросхем на основе технологии SiGe 130 нм.....	57
2.8. Генераторы хаоса на чип-усилителях.....	60
2.9. Заключение.....	63
Литература.....	64
Глава 3. Хаос и интеллект	68
3.1. Введение.....	68
3.2. Информация и хаос.....	68
3.3. Запись информации на траекториях динамической системы.....	80
3.4. Бифуркационные явления в отображениях с записанной информацией.....	99
3.5. Синтез многомерных отображений.....	105

3.6. Реализация различных функций обработки информации на основе динамики отображений с записанной информацией.....	106
3.7. Примеры практических приложений метода записи и хранения информации.....	121
3.8. Заключение.....	126
Литература.....	128
Глава 4. Передача информации с использованием эффекта хаотической синхронизации.....	134
4.1. Введение.....	134
4.2. Синхронизация хаоса и передача информации.....	135
4.3. Некоторые перспективные направления использования хаоса.....	139
4.4. Применение сигнальных процессоров и микроконтроллеров для передачи информации с использованием хаотических колебаний [4.35].....	161
4.5. Заключение.....	166
Литература.....	167
Глава 5. Прямохаотическая передача информации.....	170
5.1. Введение.....	170
5.2. Прямохаотические системы передачи информации.....	172
5.3. Некоторые свойства технологии.....	188
5.4. Первые эксперименты.....	192
5.5. Области применения сверхширокополосных сигналов.....	197
5.6. Заключение.....	201
Литература.....	201
Глава 6. Приемопередатчики на сверхширокополосных хаотических сигналах.....	203
6.1. Введение.....	203
6.2. Сверхширокополосный прямохаотический приемопередатчик для высокоскоростной беспроводной передачи данных. 2003 год.....	204
6.3. Прототип приемопередатчика для стандарта IEEE 802.15.4a.....	206
6.4. Приемопередатчик ППС-40.....	210
6.5. Приемопередатчики ППС-50 для беспроводной сенсорной сети в крытом конькобежном центре в Крылатском (г. Москва).....	212
6.6. Сверхширокополосный приемопередатчик ППС-42.....	214
6.7. Сверхширокополосный приемопередатчик ППС-43. 2012 год.....	216
6.8. Универсальные модули для активных беспроводных сетей ППС-47. 2016 год.....	218
6.9. СШП прямохаотический приемопередатчик повышенного радиуса действия.....	222

6.10. Заключение.....	223
Литература.....	223
Глава 7. Самоорганизующиеся сенсорные и активные беспроводные сети.....	225
7.1. Введение.....	225
7.2. Первые сетевые решения.....	226
7.3. Учебно-научно-исследовательский комплекс (УНИК).....	229
7.4. Беспроводная система сбора данных для крытого конькобежного центра в Крылатском.....	231
7.5. Самоорганизующиеся сети.....	233
7.6. Интернет вещей и коммуникационные сети.....	247
7.7. Активные сети.....	256
7.8. Мобильные сети.....	264
7.5. Заключение.....	273
Литература.....	273
Глава 8. Радиосвет.....	276
8.1. Введение.....	276
8.2. Источники радиоосвещения.....	279
8.3. Передатчик микроволнового динамического хаоса как искусственный источник радиоосвещения.....	280
8.4. Лампа радиосвета.....	282
8.5. Модели освещения в радиодиапазоне.....	284
8.6. Ячейка приемника радиосвета.....	287
8.7. Получение изображений в радиосвете.....	294
8.8. Заключение.....	300
Литература.....	301
Глава 9. Относительная прямохаотическая передача информации.....	303
9.1. Введение.....	303
9.2. Схема относительной передачи на основе хаотических радиоимпульсов.....	305
9.3. Математическая модель.....	308
9.4. Результаты моделирования.....	310
9.5. Аналитические оценки.....	310
9.6. Характеристики схемы в сверхширокополосном и гиперширокополосном случаях.....	313
9.7. Заключение.....	316
Литература.....	317

Введение

Интригующие свойства динамического хаоса и связанных с ним бифуркационных явлений привлекают пристальное внимание исследователей уже в течение несколько десятков лет. Первые идеи в этом направлении были высказаны в 60-е годы XX века и быстро завоевывали умы исследователей. Интерес к хаосу как к явлению, так или иначе имеющему отношение к информационным процессам, постоянно подпитывался развитием теоретических представлений и получаемых при этом результатов, а также исследованием реальных систем различной физической природы, включая радиофизические и биологические системы.

В Институте радиотехники и электроники РАН (АН СССР) явление динамического хаоса было обнаружено в генераторах на основе электронных вакуумных приборов в середине 60-х годов и в первое время использовалось только в специальных приложениях, но и эти приложения были напрямую связаны и информационными системами.

Общие тренды развития науки о динамическом хаосе позволили исследователям к началу 90-х годов более четко и осознанно сформулировать прикладное потенциальное значение динамического хаоса как средства и идеологии обработки и передачи информации.

В рамках этой парадигмы в ИРЭ РАН было сформировано направление исследований «Информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса (InformChaosLab)», позднее организационно оформленное в соответствующее подразделение Института.

В книге рассматриваются основные разработки лаборатории Информхаос и полученные результаты.

Вопрос, который постоянно возникает в радиофизической аудитории: в чем отличие динамического хаоса как сигнала от шума, например теплового? Какие у него специфические свойства и как эти свойства могут быть использованы при построении систем коммуникаций и анализа информации?

В главе 1 «Шум, динамический хаос и информация» (А. С. Дмитриев) рассматриваются общие свойства шумовых процессов и динамического хаоса применительно к обработке и передаче информации.

Динамический хаос (хаотические колебания) действительно имеет как черты, роднящие его с классическими шумами и позволяющие рассматривать хаотические колебания, аналоговый шумоподобный сигнал, так и черты, кардинально отличающие его от классических шумов. По существу, научиться эффективно использовать уникальную комбинацию свойств хаоса как шумоподобного сигнала и как процесса, генерируемого динамической системой с богатым набором бифуркационных явлений, — сверхзадача, над которой

ломают головы исследователи. Продвижения в этом направлении есть, и они значительные. Парадокс, однако, заключается в том, что такое фундаментальное и удивительное явление имеет на сегодняшний день очень скромные практические результаты.

Одна из главных задач, которая должна быть решена для того, чтобы практическое применение хаотических колебаний стало возможным, — создание эффективных источников таких колебаний. Это должны быть высокотехнологичные устройства, обеспечивающие необходимые, например спектральные, характеристики, с хорошей воспроизводимостью от образца к образцу, пригодные к массовому производству.

В главе 2 «Источники и генераторы динамического хаоса микроволнового диапазона на сосредоточенных элементах» (Е. В. Ефремова) излагаются основные принципы и результаты разработок генераторов хаоса микроволнового диапазона с сосредоточенными параметрами, разработанные в лаборатории.

Глава 3 «Хаос и интеллект» (Ю. В. Андреев, А. С. Дмитриев) посвящена разработке принципов ассоциативной памяти на траекториях нелинейных динамических систем и моделированию на ее основе ряда существенных явлений, которые можно отнести к интеллектуальной деятельности. Здесь стоит сразу оговорить, что речь идет об интеллекте как способности системы решать проблемы. С этой точки зрения интеллект — это свойство жизни, которым обладает даже самый примитивный одноклеточный организм. Принципиальная особенность модельных представлений, развиваемых в главе, заключается в использовании в качестве хранилища информации совокупности траекторий специально синтезируемых динамических систем (в основном одномерных отображений), что, во-первых, обеспечивает гигантскую емкость памяти по сравнению с другими конструктивными моделями на основе динамических систем и, во-вторых, позволяет использовать широкий набор свойств динамических систем и бифуркационных явлений в них для обработки записываемой и хранящейся информации.

В главе 4 «Передача информации с использованием эффекта хаотической синхронизации» (А. С. Дмитриев) обсуждаются общие принципы организации передачи информации с использованием специфических свойств динамического хаоса как колебаний, генерируемых нелинейными динамическими системами, и его отличий от классических шумов.

Глава 5 «Прямохаотическая передача информации» (А. С. Дмитриев) посвящена разработанному в лаборатории методу беспроводной передачи информации, который впервые позволил международному научно-техническому сообществу признать динамический хаоса как эффективный носитель информации при беспроводной передаче данных, включив его в стандарт IEEE. В этом методе хаотические колебания используются в качестве сверхширокополосного

аналогового шумоподобного сигнала. Динамическая природа этих колебаний используется при создании источника хаоса с заданными спектральными характеристиками и при формировании хаотических радиоимпульсов.

С момента первых экспериментов по прямохаотической передаче информации и первых экспериментальных передатчиков и приемников, с помощью которых продемонстрирована работоспособность предложенного принципа, в лаборатории было разработано и экспериментально исследовано более десяти вариантов сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиков различного назначения.

В главе 6 «Приемопередатчики на сверхширокополосных хаотических сигналах» (А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Л. В. Кузьмин, В. А. Лазарев, М. Ю. Герасимов, А. В. Уваров) описываются некоторые из этих устройств, их характеристики и назначение.

Все приемопередатчики, рассмотренные в главе 6 создавались как сетевые устройства, в том числе как основа узлов для беспроводных сенсорных сетей.

Глава 7 «Сверхширокополосные прямохаотические сенсорные и активные сети» (А. С. Дмитриев, Л. В. Кузьмин, В. А. Лазарев, Ю. В. Гуляев, В. В. Ицков, М. М. Петросян, М. Г. Попов, А. И. Рыжов) посвящена организации и примерам разработки сетей на основе СШП прямохаотических приемопередатчиков. В ней описываются сети различной степени сложности и топологической структуры, начиная с сетей с топологией типа звезда и статической адресацией, с переходом к самоорганизующимся сетям, сетям с переменной топологией для мобильных платформ (роботов). Рассматривается также эволюция сенсорных сетей к активным сетям при развитии концепции Интернета вещей и Интернета робототехники.

Характерной чертой видимого света (например, солнечного) является его некогерентность и шумовой характер. Именно это обстоятельство позволяет глазу получать изображение окружающего мира без эффектов интерференции, свойственных когерентному излучению. Некогерентность свойственна излучению тепловых источников и в других участках электромагнитного спектра, в том числе микроволнового и радиодиапазона. Такое излучение (свет) от естественных источников плодотворно используется при исследовании космического пространства с помощью радиотелескопов, в радиометрических методах исследования поверхности Земли с космических аппаратов, в медицине и других областях.

В качестве одного из применений динамического хаоса в лаборатории предложены искусственные малогабаритные источники некогерентного сверхширокополосного излучения в радио- и микроволновом диапазоне частот — источники радиосвета.

В главе 8 «Радиосвет» (А. С. Дмитриев, Е. В. Ефремова, Ю. В. Гуляев, М. М. Петросян, В. В. Ицков, М. Г. Попов, А. И. Рыжов) представлены результаты исследований лаборатории по созданию миниатюрных источников освещения в микроволновом диапазоне, приемников такого излучения и получения изображений в нем.

На сегодняшний день прямохаотическая схема связи является единственной практически реализованной и используемой схемой беспроводной связи на основе динамического хаоса. Вместе с тем современные требования к беспроводным средствам коммуникаций бросают новые вызовы. В первую очередь это относится к массовому применению беспроводных, малопотребляющих, достаточно высокоскоростных средств связи для Интернета вещей, Интернета вещей для робототехники и других массовых применений. Такие задачи стимулируют интерес к расширению возможностей использования хаотических сигналов в области беспроводной передачи данных.

В главе 9 «Относительная прямохаотическая передача информации» (А. С. Дмитриев, Т. И. Мохсени) рассматривается новая схема использования сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов для беспроводной передачи информации, потенциально намного расширяющая возможности прямохаотических систем.

Пользуясь случаем, хотелось бы еще раз отдать дань глубокого уважения В. Я. Кислову, Е. А. Мясину, Н. Н. Залогину, Н. Д. Девяткову, Ю. В. Анисимовой, Р. В. Беляеву, Г. М. Воронцову, З. С. Чернову, благодаря труду, упорству и научной удаче которых в ИРЭ АН СССР родилось, выросло и окрепло научное направление — микроволновой динамический хаос.

За более чем 25-летний период существования лаборатории «Информхаос» многие наши коллеги, включая авторов книги, так или иначе прошли через нее и до сих пор продолжают с ней сотрудничать. Все они внесли свой вклад в получение и развитие результатов, представленных в данном издании. Мы с удовольствием выражаем им признательность за совместную работу. Вот их, возможно, неполный список:

А. И. Панас, С. О. Старков, Ю. Л. Бельский, Д. А. Куминов, Е. М. Широков, В. Синякин, М. Коротеев, А. В. Кинев, А. В. Клецов, Н. А. Атанов, Б. Е. Кяргинский, А. М. Лактюшкин, Е. А. Сельменев, Г. Касьян, А. Хилинский, А. А. Дмитриев, Ю. А. Дмитриев, Д. Пузиков, Ю. Никишов, Н. А. Максимов, В. В. Ицков, М. М. Петросян, М. Г. Попов, А. В. Уваров, М. Герасимов, В. П. Иванов, К. М. Сьерра-Теран, Р. Емельянов, Е. В. Григорьев.

Наконец, нам приятно отметить, что представленные в книге исследования и полученные в них результаты рождались в обширной, доброжелательной, способствующей творчеству «экосистеме», в которую входят ведущие российские и зарубежные университеты и организации: МФТИ (Д. С. Лукин,

Н. П. Чубинский), МГУ (И. И. Минакова), ИПФ РАН (В. И. Некоркин), НГГУ (Л. П. Шильников, В. Д. Шалфеев, А. Л. Шильников, В. В. Матросов, С. В. Гонченко), ЯрГУ (С. А. Кашенко), Вл.ГУ (О. Я. Бутковский), СГУ (Д. И. Трубецков, В. С. Анищенко, Б. П. Безручко, Храмов, Короновский), ИПМ РАН (Г. Г. Малинецкий), СФ ИРЭ РАН (С. П. Кузнецов, Е. П. Селезнев, В. И. Пономаренко, М. Д. Прохоров), ИМ НАН Украины (А. Н. Шарковский, Ю. Л. Майстренко, В. Л. Майстренко, В. В. Федоренко), БГУ (Г. Крылов, А. В. Сидоренко), Калифорнийский университет (Беркли, США, Л. Чуа), Технический университет (Лозанна, Швейцария, М. Хаслер), Технический университет (Дрезден, Германия, В. Шварц).

*Издание подготовлено при финансовой поддержке Российского научного фонда
(Проект — 16-19-00084).*

ГЛАВА I

ШУМ, ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС И ИНФОРМАЦИЯ

I.1. Введение

В ИРЭ АН СССР в 1960-х годах в лаборатории В. Я. Кислова проводился цикл работ по получению шумовых колебаний в радио- и СВЧ диапазонах на основе электровакуумных приборов, в которых в качестве рабочей среды вместо вакуума использовалась плазма. Целью этих работ было получение эффективных источников излучения шумовых сигналов для задач радиомаскировки, а также уже наметившийся к тому времени интерес к применению шумовых сигналов как носителей для передачи информации [1.1–1.5]. В процессе этих исследований было обнаружено возникновение шумовых (или, точнее, как показали дальнейшие исследования, аналоговых шумоподобных) колебаний в сильно нелинейных режимах работы электровакуумных приборов, прежде всего в устройствах на основе лампы бегущей волны. История этого открытия и связанных с ним «приключений» описана непосредственными их участниками Е. А. Мясным [1.6] и Н. Н. Залогиним [1.7].

Следует отметить, что 1960-е годы оказались тем периодом в развитии динамики нелинейных систем, на котором «умерла» концепция полной предсказуемости поведения детерминированных систем (во всяком случае в практическом плане), вместе с этим возникла идея странных аттракторов, хаотических колебаний и динамического хаоса.

Открытие и изучение динамического хаоса заставили пересмотреть многие привычные представления о процессах в окружающем нас мире. Интерес к применению хаоса как шумоподобных аналоговых колебаний специального типа для решения таких классических задач теории информации, как обработка и передача сигналов, привлекает внимание к информационным свойствам самого динамического хаоса и порождающих его динамических систем (см., например, [1.8–1.11]). Еще одним классом процессов, где роль хаоса и нелинейной

динамики в целом чрезвычайно важна, являются информационные процессы в живых системах (мозге, сердечно-сосудистой системе, отдельных нейронных связях).

Ниже хаотические колебания (хаос) рассматриваются как носитель информации, а системы, их генерирующие, как специфические источники информации. Важным свойством хаотических колебаний как информационных сигналов является то, что средний объем информации в единицу времени у них строго определен. Отсюда следует, например, что они могут быть переданы без искажений по каналу с ограниченной пропускной способностью. Для других видов аналоговых сигналов, содержащих информацию, например для речевых сигналов или белого шума, это невозможно.

Непосредственно информация, содержащаяся в хаотических сигналах, не является «полезной». В этом смысле образ хаотических колебаний в фазовом пространстве — хаотический аттрактор — может рассматриваться в качестве резервуара, наполненного некоторой неконтролируемой информацией. Типичными хранимыми «информационными блоками» в резервуаре являются неустойчивые предельные циклы, число которых в хаотическом аттракторе счетно. Теоретически объем информации, хранящийся в хаотическом аттракторе, не ограничен.

Можно ли сделать так, чтобы хотя бы часть этого хранилища соответствовала содержательной информации? Оказывается, это возможно, и, более того, разработана теория (о ней пойдет речь в главе 3), обеспечивающая построение таких хранилищ полезной информации с практически неограниченной емкостью.

Следующий вопрос, связанный с информационными свойствами хаотических траекторий, звучит так: можно ли динамике произвольной динамической системы, не нарушая ее структуры, сопоставить требуемую информационную последовательность? Сформулируем этот вопрос несколько иначе: нельзя ли хаотическую систему использовать в качестве кодера, преобразующего информационный сигнал в хаотический? В данной главе приводятся простые примеры, показывающие, что построение такого кодера вместе с соответствующим ему декодером возможно.

Простейшим типом взаимодействия хаотических сигналов с информационными и шумовыми сигналами является линейное взаимодействие. Различные варианты взаимодействия этих сигналов приводят к содержательным задачам, анализ которых показывает, что как методы, так и результаты решения этих задач с учетом информационных свойств имеют фундаментальные отличия от аналогичных задач, решаемых для нехаотических сигналов. В частности, это относится к задачам очистки хаотических сигналов от шума (фильтрации), синхронизации хаотических систем и разделению хаотических сигналов.

Оказывается, при малых уровнях шума задачи с хаотическими сигналами решаются значительно эффективнее, чем с обычными сигналами. Однако в этих задачах существует порог на уровень шума, при превышении которого качество решения задачи резко падает.

Примером нелинейного взаимодействия хаотических и информационных сигналов является модуляция информационным сигналом хаотического сигнала или, в более широкой постановке, ввод информационного сигнала в хаотический сигнал и последующее извлечение информационного сигнала.

Как только речь заходит об обработке информации, возникает вопрос о связи нелинейной динамики и вычислительных процессов. Здесь полезно вспомнить о работах в области предельной эффективности вычислений и передачи информации (принцип Ландауэра и обратимые вычисления Беннета). Во-первых, в этой проблеме, как и в процессах обработки хаотических сигналов, возникают принципиальные ограничения (подобные второму закону термодинамики). Во-вторых, появляется возможность проанализировать общность явления генерации информации в вычислительных процессах, с одной стороны, и в динамических системах с хаосом, с другой стороны. В-третьих, заявленное в упомянутых работах единство процессов вычислений, измерений и передачи информации дает основание рассматривать вычислительный процесс (и его реализацию на компьютере) как «канал связи» во временной области. Необычным свойством такого типа «каналов связи» является то, что поток информации на его выходе может быть больше, чем поток информации на входе. В-четвертых, анализ проблемы предельной эффективности и предельной эффективности передачи информации проводился Ландауэром [1.54, 1.55] на примере двухъямного потенциала — вырожденного варианта нелинейного осциллятора, который представляет собой базовый элемент при исследовании явлений нелинейной динамики. Последнее обстоятельство наводит на мысль о едином корне рассматриваемых проблем.

И тут мы подходим к вопросу о взаимодействии систем, производящих информацию, с окружающей средой. Эти системы можно разделить на два класса: информационно-замкнутые (не обменивающиеся информацией с внешней средой) и информационно-открытые. Анализируются условия информационной замкнутости и информационной открытости, обсуждается вопрос о связи информационной и термодинамической открытости систем.

1.2. Синтез хаотических систем с заданной информацией на периодических траекториях

Каждую траекторию динамической системы можно рассматривать как некоторый информационный сигнал. Тем самым совокупность траекторий

динамической системы, например одномерного отображения отрезка в себя, представляет собой своеобразное хранилище информации в виде множества траекторий системы. Это хранилище обладает рядом интересных свойств, проявление которых зависит от того, имеются ли аттракторы в динамической системе и какого они типа.

Рассмотрим некоторые из этих свойств.

Если в момент времени $t = t_0$ задать начальные условия, то формально траектория отображения известна и однозначно определена для всех $t > t_0$ (аналог теоремы Коши для отображений). Если траектории вдоль ее длины сопоставлен информационный сигнал, он может быть воспроизведен путем итерирования отображения с заданными начальными условиями, т. е. информация извлекается из памяти путем решения эволюционного уравнения.

Хранилище информации как динамическая память обладает естественными ассоциативными свойствами. Действительно, задавая любой фрагмент сигнала, можно воспроизвести все его последующие значения, а в случае циклического сигнала — и весь сигнал целиком.

Пусть в отображении имеется единственный аттрактор — неподвижная точка. Тогда траектория, задаваемая любыми начальными условиями из области определения отображения, сходится к неподвижной точке, а соответствующий ей информационный сигнал — к постоянному значению. Текущее информационное содержание такого сигнала по мере сходимости уменьшается. «Информационное содержание» самих устойчивых неподвижных точек в случае одномерного отображения — это значение единственной константы. Увеличение объема записанной информации может происходить только за счет точности задания координаты — точки равновесия, т. е. за счет улучшения разрешающей способности.

Если в отображении имеется аттрактор — устойчивый предельный цикл, то все траектории со временем стягиваются к нему. Периодическую траекторию, соответствующую предельному циклу, можно рассматривать как периодически воспроизводимый информационный сигнал. Объем информации в таком сигнале определяется длиной цикла и степенью его изрезанности (информационной насыщенностью).

Если в системе имеется единственный хаотический аттрактор, то траектория от итерации к итерации теряет информацию о начальных условиях и отображение производит собственную информацию. При небольшой скорости производства информации аттрактор остается хорошо локализованным в фазовом пространстве. Такие хаотические аттракторы в принципе могут хранить достаточно большие объемы информации. Если же производство информации велико, то хаотический аттрактор как целое становится объектом с большой неопределенностью и как хранилище информации теряет свою привлекательность.

Однако можно использовать в качестве хранилища информации его систему неустойчивых циклов. Действительно, хаотические аттракторы содержат счетное число периодических орбит [1.12–1.15]. Это вполне определенные орбиты, которые могут рассматриваться как траектории, соответствующие информационным сигналам. Однако информация, соответствующая таким сигналам, неконтролируема.

Для того чтобы сделать часть циклических траекторий соответствующими содержательной информации, в работе [1.16] (см. главу 3) был предложен метод синтеза одномерных отображений, содержащих систему циклических траекторий с заданной структурой. На основе этого метода была продемонстрирована возможность записи информации на циклических траекториях, реализация ассоциативной памяти и других базовых операций [1.17–1.27].

Сжатие информации. В процессе записи производится специальное кодирование информационных последовательностей. Побочным результатом кодирования является обратимое (без потерь) сжатие информации — уменьшение общего объема данных, необходимых для полного и точного описания информационных объектов, например текстов или изображений.

Если взглянуть на этот метод кодирования как на метод сжатия информации, то оказывается, что коэффициент сжатия, достигаемый при его применении, примерно совпадает с тем, что дают другие известные методы сжатия информации без потерь — арифметический, Лемпеля—Зива (ЛЗ), Хаффмана [1.28].

1.3. Организация хаотических последовательностей, содержащих требуемую информацию

Хаотическая система генерирует информацию. Эта информация неконтролируема по содержанию. Можно ли заставить систему генерировать требуемую полезную информацию? Полезную в том смысле, чтобы это была информация, которую мы должны передать (закодировать в виде хаотического сигнала).

Рассмотрим отображение сдвига Бернулли:

$$x_{n+1} = 2x_n \pmod{1}. \quad (1.1)$$

Свойства траекторий этого отображения удобно анализировать, используя двоичное представление значений переменной x_n . Пусть траектория отображения стартует с начального значения, лежащего внутри отрезка $[0, 1]$ и представленного в двоичной системе счисления

$$x_0 = \sum_{v=1}^{\infty} a_v 2^{-v}, \quad a_v \in \{0, 1\}, \quad (1.2)$$

т. е. $x_0 = 0.a_1a_2$. Действие отображения (1.1) на начальное условие (1.2) заключается в сдвиге мантиссы переменной x_0 на одну позицию влево и отбрасывании первого члена a_1 . Таким образом,

$$x_1 = 0.a_2a_3. \quad (1.3)$$

То же самое происходит на последующих итерациях. Поэтому

$$x_n = 0.a_{n+1}a_{n+2}. \quad (1.4)$$

Представление справедливо при бесконечной точности вычислений. Пусть теперь точность вычислений конечна, например числа описываются M битами. Тогда

$$x_0 = \sum_{v=1}^M a_v 2^{-v}, \quad a_v \in \{0, 1\}, \quad (1.5)$$

т. е. $x_0 = 0.a_1a_2\dots a_M$. Применяя отображение сдвига Бернулли к x_0 , получаем x_1 :

$$x_1 = 0.a_2\dots a_M*, \quad (1.6)$$

где * означает новую открытую позицию. Как она заполняется? В зависимости от устройства компьютера на последней позиции равновероятно появляется 0 или 1. Мы можем на каждой итерации искусственно вставлять в последнюю позицию нужный информационный бит

$$x_1 = 0.a_2\dots a_M a_{M+1}. \quad (1.7)$$

Извлечение этого информационного бита осуществляется путем M кратного итерирования отображения (1.7).

Приведенный пример — тривиальный, но он показывает принципиальную возможность подобного кодирования. Сама по себе такая кодировка интереса не представляет.

В качестве менее тривиального примера рассмотрим симметричное «tent» отображение, описываемое уравнением

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n, & \text{если } 0 \leq x_n \leq 1/2, \\ 2(1-x_n), & \text{если } 1/2 < x_n \leq 1. \end{cases} \quad (1.8)$$

Эта система, как и сдвиг Бернулли, обладает полной символической динамикой. Снова рассмотрим двоичное представление переменной (1.5). Преобразование переменной при применении к ней отображения сдвига Бернулли в этом случае не так тривиально. Действительно,

$$x_1 = \begin{cases} 0.a_2a_3\dots a_M S_1, & \text{если } 0 \leq x_0 \leq 1/2, \\ 0.b_2b_3\dots b_M S_2, & \text{если } 1/2 < x_0 \leq 1, \end{cases} \quad (1.9)$$

где S_1 и S_2 — появившиеся после итерации открытые позиции. Как связаны a_i и b_i ?

$$1.000\dots 0 - 0.a_1a_2\dots a_M = 0.b_1b_2\dots b_M. \quad (1.10)$$

На открытую позицию, как и в случае отображения сдвига Бернулли, вводится информационный бит. Получаемая при итерациях «хаотическая» траектория содержит полезную информацию, но «запутана» по сравнению с траекторией, получаемой при итерациях отображения сдвига Бернулли. В каждом «хаотическом» отсчете будет содержаться ровно 1 бит полезной информации. Итак, мы построили хаотический кодер. Как организовать декодер? Приемник получает последовательность зашумленных «хаотических» отсчетов. Наша задача — извлечь заложенную в них информацию.

Будем действовать следующим образом. Введем отображение, обратное «tent» отображению. В декодер (обратное отображение) поступают, вообще говоря, искаженные «хаотические» отсчеты y_n :

$$y_n = x_n + w_n, \quad (1.11)$$

где w_n — шум в канале. Пусть уровень шума мал по сравнению с уровнем «хаотического» отсчета, но достаточно велик по сравнению с амплитудой младшего разряда отсчета. При этих условиях мы не можем установить непосредственно, какой бит вводится в младший разряд. Однако, у нас имеется информация о том, какую из ветвей выбрать при итерировании двузначного отображения, обратного «tent» отображению [35, 36]. Для извлечения заложенной в n -м отсчете информации итерируем обратное отображение M раз, взяв в качестве начального условия y_n . Для устранения неоднозначности при итерировании используются принятые ранее отсчеты y_{n-M}, \dots, y_{n-1} . При этом элементы последовательности восстанавливаются с предельно возможной точностью, и переданная информация извлекается из последнего двоичного знака.

1.4. Линейное взаимодействие хаоса, информационных сигналов и шума

Классическая теория информации имеет дело с двумя типами источников, порождающих информацию (энтропию): *источниками сообщений* и *источниками шума*.

Источник сообщений может породить в единицу времени конечное количество информации, как это имеет место в случае использования конечного алфавита. Он также может породить в единицу времени количество информации от нуля до бесконечности, если рассматривать непрерывные значения сигналов,

и иметь возможность измерять их с неограниченной точностью. Однако введение конечной точности измерений приводит к необходимости рассматривать только состояния, различимые при данной точности измерений. Их число конечно и информация, которая может быть воспринята от источника, также становится ограниченной. Причиной ограниченности объема воспринимаемой информации могут также служить шумы в канале связи.

Стандартной моделью *источника шума* является источник белого шума. Белый шум в источниках с дискретным временем представляет собой последовательность нормально распределенных независимых отсчетов. Формально такой шум обладает бесконечной энтропией.

Генераторы хаоса при рассмотрении их в качестве источников информации обладают весьма специфическими свойствами:

- сигналы этих источников принимают непрерывные значения;
- средняя скорость генерации информации ограничена и в простейшем случае систем с единственным положительным ляпуновским показателем λ определяется выражением

$$I = \lambda \log_2 e. \quad (1.12)$$

Задачей теории информации является анализ взаимодействия источников информации (энтропии) между собой и с приемниками. Фактически при наличии источников сообщений и источников шума речь может идти только о передаче информации в отсутствие шума и передаче информации в присутствии шума, т.е. либо о взаимодействии нескольких источников сообщений, либо о взаимодействии источников сообщений и источников шума. Дополнение этой пары источниками хаоса существенно расширяет и усложняет картину. Теперь возможны следующие новые комбинации взаимодействия источников энтропии (информации): источник хаоса — источник шума; источник хаоса — источник хаоса; источник сообщений — источник хаоса и, наконец, источник сообщений — источник хаоса — источник шума.

Покажем, что перечисленным типам взаимодействия отвечают содержательные информационные и коммуникационные задачи.

Источник хаоса — источник шума

Хаотическая самосинхронизация в присутствии шума. Хаотическую синхронизацию [1.29–1.34] можно рассматривать как процесс передачи информации через канал с шумом от хаотического источника к приемнику, который должен воспроизвести переданный сигнал либо точно, либо с допустимым уровнем искажений [1.35–1.38]. Здесь очень важно то обстоятельство, что независимо от «физического содержания» процесса синхронизации он может осуществляться

и поддерживаться при наличии канала связи между «передатчиком» и «приемником», обладающим достаточной пропускной способностью. Причем количественная величина необходимой пропускной способности канала определяется через степень хаотичности сигнала «передатчика».

Фактически в этом случае мы имеем дело с некоторым обобщением понятия синхронизации, поскольку она понимается не как навязывание поведения одной системы другой, а как получение точной или приближенной копии сигнала на приемной стороне (копия включает в себя также и «синхронизм» во времени с учетом времени распространения сигнала).

Важным обстоятельством представляется также тот факт, что содержательная сторона в рассмотрении синхронизации как процесса передачи информации имеется только в случае хаотических сигналов, поскольку количество информации в периодических, в любых других регулярных, а также в нерегулярных, предсказуемых на большие времена сигналах равно нулю.

Наконец, анализ хаотической синхронизации с точки зрения теории информации дает повод рассуждать о принципах согласованного поведения и «синхронизации» систем, в которых заведомо производится обмен информацией, но которые формально нельзя отнести к числу хаотических. Примерами таких систем могут служить биологические сообщества, большие экономические системы, большие информационные системы (телевидение, Интернет), сообщества государств и т. д. Можно предположить, что, несмотря на материальные потоки, физическое взаимодействие подсистем и т. д.: а) фундаментальной причиной координированного поведения являются процессы обмена информацией между подсистемами; б) в системах с «синхронизацией» производство информации способно в значительной степени компенсировать изменения материальных потоков; в) навязывание согласованного поведения проще в тех системах, где скорость производства информации в подсистемах минимальна; г) информационные потоки могут играть как интегрирующую, так и дезинтегрирующую роль для целостности систем.

Другими примерами задач взаимодействия хаотических сигналов (хаотических систем) и шума являются: *радио-, акустическая и оптическая локация на основе хаотических сигналов; различение хаотических и шумовых сигналов* [1.39, 1.40]; *выделение хаотических сигналов на фоне помех* [1.41].

Источник хаоса — источник информационных сообщений

Передача информации с использованием хаоса. Начиная с 1992 года был предложен ряд способов передачи сигналов, использующих хаотическую динамику; хаотическая маскировка (chaotic masking); переключение хаотических режимов; нелинейное подмешивание (nonlinear mixing); дуальное нелинейное преобразо-

вание (inverse systems); опережающее управление сечением Пуанкаре (Predictive Poincare control modulation); частотная модуляция хаотическим сигналом и др.

Хаотическая маскировка. Под хаотической маскировкой можно понимать несколько различных задач. Каждая из этих задач имеет свою специфику и требует выполнения различного набора условий для своего решения.

Задача 1. Пусть имеется источник «паразитных» излучений, которые содержат информацию, нежелательную для приема посторонним наблюдателем. Однако нет необходимости в приеме сообщений и «своими» пользователями. В этом случае источник хаоса может применяться для маскировки «паразитного» сигнала.

Задача 2. Имеется источник сообщений, информация от которого должна приниматься «своим» пользователем (пользователями), и нежелательно, чтобы она принималась посторонними наблюдателями. В этом случае источник хаоса может применяться для маскировки информационного сигнала. «Свои» пользователи обеспечиваются компенсаторами маскирующего сигнала.

Задача 3. Имеется n своих и m чужих источников сообщений, работающих в одном и том же диапазоне частот. Задача заключается в том, чтобы «накрыть» этот диапазон маскирующим «одеялом» так, чтобы, во-первых, обеспечить скрытность работы «своих» пользователей с одновременной возможностью для них компенсировать маскирующий эффект хаотического сигнала; во-вторых, максимально затруднить работу чужих радиоэлектронных средств.

Источник хаоса — источник хаоса

Разделение хаотических сигналов. Пусть имеются две, вообще говоря, неодинаковые («ведущие») динамические системы, генерирующие хаотические колебания. Эти колебания складываются, и суммарный сигнал передается к паре других («ведомых») динамических систем, которые могут быть связаны между собой. Возможна ли в этих условиях обратная операция разделения двух колебательных процессов в паре ведомых динамических систем? Это и есть задача разделения хаотических сигналов [1.42–1.44].

Источник информации — источник хаоса — источник шума

В качестве примеров такого типа взаимодействий можно привести системы передачи информации с использованием хаоса (о которых шла речь выше), работающие в реальных условиях с помехами. Также это многопользовательские системы связи, использующие хаотические несущие с выделением своих сообщений на «шумовом» фоне «чужих» сигналов, и, наконец, радиосреда со многими потребителями, использующими как обычные, так и хаотические сигналы и создающими помехи друг другу.

1.5. Модуляция и демодуляция хаотического носителя информационным сигналом

В большинстве современных систем связи в качестве носителя информации используются гармонические колебания. Информационный сигнал в передатчике модулирует эти колебания по амплитуде, частоте или фазе, а в приемнике информация выделяется с помощью обратной операции — демодуляции. Модуляция носителя может осуществляться либо за счет модуляции уже сформированных гармонических колебаний, либо путем управления параметрами генератора в процессе формирования колебаний.

Аналогичным образом можно производить модуляцию хаотического сигнала информационным сигналом. Однако возможности здесь значительно шире. Действительно, если в случае гармонических сигналов управляемых характеристик всего три (амплитуда, фаза и частота), то в случае хаотических колебаний даже небольшие изменения значения параметра одного из элементов источника хаоса приводят к изменению характера колебаний, которое может быть надежно зафиксировано. Это означает, что у источников хаоса с изменяемыми параметрами элементов потенциально имеется широкий набор схем ввода информационного сигнала в хаотический сигнал (модуляции хаотического сигнала информационным сигналом).

В системах связи традиционен интерес к сигналам с широкой полосой частот, которая используется как для увеличения скорости передачи информации, так и для повышения устойчивости работы систем при наличии возмущающих факторов. Хаотические сигналы являются принципиально широкополосными, и именно это обстоятельство привлекает внимание к ним как к носителям для передачи информации.

Рассмотрим некоторые методы модуляции хаотического сигнала информационным сигналом и соответствующие методы демодуляции.

Пусть требуется передавать двоичные данные в виде последовательности нулей и единиц. Как можно промодулировать хаотический сигнал, чтобы его фрагменты соответствовали нулям и единицам, а на приемном конце эти нули и единицы можно было бы выделить?

Несколько возможных решений приведено на рис. 1.1.

1. Нули и единицы кодируются последовательно расположенными фрагментами хаотического сигнала двух видов. Первый сигнал кодирует нули, второй — единицы. Приемник должен содержать устройство, способное фиксировать соответствующие временные интервалы, и идентифицировать два различных хаотических режима. Это метод модуляции, основанный на переключении хаотических режимов [1.45–1.47] (Chaotic Shift Keying, CSK).

2. Как и в предыдущем случае, нули и единицы кодируются последовательно расположенными фрагментами двух сигналов. Но теперь один из них, кодирующий нули, — нулевой сигнал, а второй, кодирующий единицы, — хаотический. Этот метод модуляции в случае нехаотических сигналов носит название «метод без возвращения к нулю» (Not Return to Zero, NRZ). В случае хаотического сигнала его логично назвать «методом без возвращения к нулю для хаотических сигналов» (CNRZ). В англоязычной литературе используется также термин OOK (On-Off Keying) для нехаотических сигналов и соответственно COOK (Chaotic On-Off Keying) для хаотических.

3. В методе с возвращением к нулю (Return to Zero, RZ) через время, соответствующее положению периода после прохождения сигнала «1», производится возврат к нулевому состоянию. Нули кодируются отсутствием на соответствующих позициях сигнала. В случае хаотического сигнала это «метод с возвращением к нулю для хаотических сигналов» (Chaotic Return to Zero, CRZ).

4. Для модуляции хаотических сигналов можно также использовать метод кодирования, в котором период делится на две части и производится попеременное инверсное преобразование «0» в «10», а «1» в «11» или в «00». В случае регулярных сигналов этот метод называется CMI. В случае хаотического сигнала — CSMI.

5. Применим и метод модуляции, называемый в случае нехаотических сигналов DMI, в котором при инвертировании нулей и единиц период изменяется в два раза. В случае хаотического сигнала его логично называть CDMI.

6. Еще одной возможностью является случайное или хаотическое размещение позиций, на которых располагаются приходящие сигналы, причем закон расположения позиций известен как отправителю, так и получателю.

Перечисленные типы модуляции (кодирования) предназначены для канала с одним пользователем. Однако часть из них может быть обобщена на многопользовательские системы. Например, если в методе CRZ увеличить интервалы

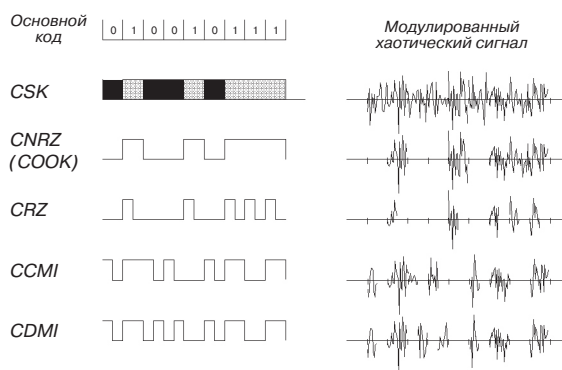


Рис. 1.1. Методы модуляции хаотического сигнала для передачи цифровой информации

времени, на которые производится возврат к нулю (т.е. интервалы времени, в которые сигнал не передается), то в них можно разместить сигналы от других пользователей, обеспечивая тем самым временное разделение сигналов для многопользовательского доступа.

Приведенные примеры методов модуляции хаотических сигналов показывают, что здесь применимы как традиционные для техники связи, так и относительно новые подходы. А как обстоит дело с демодуляцией?

Для демодуляции хаотических сигналов могут применяться как когерентные, так и некогерентные методы. Среди когерентных методов большой потенциальный интерес представляют методы, использующие хаотическую синхронизацию. Методы когерентной демодуляции на основе хаотической синхронизации имеют ряд очень привлекательных черт, однако им свойственен такой существенный недостаток, как слабая устойчивость к рассогласованию параметров передатчика и приемника, шума в канале и к другим возмущающим факторам.

Поэтому наряду с усилиями, направленными на поиск более устойчивых схем когерентного приема, уделяется большое внимание некогерентным методам приема. В простейшем случае это могут быть методы прямого детектирования хаотического сигнала с выделением огибающей, соответствующей информационному сигналу. Расчеты показывают, что при всей своей простоте этот метод демодуляции является достаточно эффективным, а в сложных условиях распространения сигнала даже более эффективным, чем когерентные методы.

Могут быть также использованы и относительные методы передачи (см. главу 9).

1.6. Информация и вычисления

Долгое время информация рассматривалась как нефизическая, простая запись состояния осязаемой материальной Вселенной, существующая вне физики и никак не связанная с областью, управляемой законами физики. Однако изучение физики, вовлекаемой в обработку информации (особенно с применением компьютеров), привело к твердому выводу, что информация — больше не метафора. Она не является чем-то абстрактным и субъективным, но реальна как атомы, энергия или горы. Информация может быть количественно определена. Она всегда воплощена в некотором физическом представлении, таком, как чернила на бумаге, отверстия в перфокарте, магнитные структуры на флоппи-дисках или расположение атомов в ДНК. Одно из самых глубоких и наиболее важных открытий современной науки: информация — физична.

В своем гипертрофированном варианте принцип физичности информации привел к идее о Вселенной как компьютере, которая, в свою очередь, базируется

на не менее содержательном принципе, утверждающем, что Вселенная может быть фактически описана в терминах обработки информации [1.48].

Принцип Ландауэра. В 1950-е годы в IBM проводились исследования по выяснению основных физических ограничений на вычислительный процесс. Изучением проблемы, которая в то время имела слабое отношение к технике разработки компьютеров, занимался Р. Ландауэр. Реально даже в наши дни компьютеры расходуют энергии значительно больше, чем принципиальный фундаментальный нижний предел.

«Когда реальность находится так далеко от фундаментальных пределов, пределы не используются в качестве ориентиров для технологов, — писал Ландауэр. — Тогда почему мы этим занимаемся? Потому, что это находится в самом центре науки. Наука, и физика в особенности, выражена в терминах математики, т. е. в терминах правил для оперирования с числами. Информация, численная или другая, не является абстракцией, но неизбежно связана с физическими представлениями. Поэтому обработка информации неизбежно связана с физической величиной, ее содержанием и ее законами» [1.49].

В своих поисках (конечных) пределов обработки информации Ландауэр руководствовался примерами шенноновского канала как наиболее эффективной системы связи и вопросом Карно о предельной эффективности тепловой машины. Задача была найти путь понимания фундаментальных пределов для эффективности вычислений, которые (пределы) не зависят от конкретной вычислительной машины.

Общий знаменатель между теорией Шеннона и теорией паровой машины заключается в том, что в обоих случаях были найдены пределы, по которым то, что вы пытаетесь сделать, не зависит от деталей выбранной технологии. Точно так же должен существовать путь обсуждения вычислительного процесса и его энергетических пределов, безотносительно к тому, будем ли мы говорить о релейной логике или логике на основе интегральных микросхем, должен существовать путь делать это на более фундаментальной основе.

Идеальная эффективность. Насколько в принципе может быть эффективен компьютер? Наряду с упоминавшимися выше теориями Карно и Шеннона, при анализе этого вопроса на Ландауэра оказали влияние взгляды Леона Бриллюэна. В середине 1950-х годов вышла ставшая знаменитой книга Бриллюэна «Наука и теория информации» [1.50], в которой рассматривалась связь между наукой (в основном физикой) и информацией. Тот вид, в котором это было сделано, Ландауэр счел неудовлетворительным. Он посчитал, что должен существовать более интересный путь размышления об этом.

В частности, в своей книге Бриллюэн анализировал парадокс демона Максвелла с позиций допущения, что демон не может видеть в темноте. Следовательно, требовалось бы подсветить приближающуюся молекулу для того, чтобы

увидеть ее и измерить ее скорость. Энергия, требуемая для подсветки, превышала бы энергию, спасенную демоном, оставляя справедливым второй закон термодинамики. Другие ученые того времени объясняли парадокс демона в такой же манере.

В конечном счете этот подход был основан на вычислениях Шеннона, касающихся того, какое требуется количество энергии, чтобы послать сообщение. *Измерение чего-то означает приобретение информации, что в основе своей то же самое, что и передача информации.* И Шеннон показал, что посылка бита информации по телефонной линии требует минимального количества энергии, которой обладает типичная молекула, находящаяся в окрестности при комнатной температуре.

Ландауэр при анализе парадокса демона Максвелла осознал, *что если измерения подобны передаче информации* (что становится ясно из анализа ситуации с демоном Максвелла с помощью теории Шеннона), *то они также подобны вычислениям* [1.51–1.54] — все три процесса относятся к обмену информацией. Если Бриллюэн был прав, то вычисления требовали бы неизбежной потери энергии на каждом шаге вычислений, тех же самых, что и каждое измерение для молекулы демона Максвелла. Однако Ландауэр предположил, что существует не только этот путь для передачи информации. Анализ Шеннона был проведен для специального случая. Существуют пути передачи сообщений, отличные от колебаний в проводах.

«Я не обязан передавать информацию именно этим путем (с помощью колебаний в проводах), — говорит Ландауэр. — Я могу передать вам флорпи-диск или использовать для этой цели обыкновенную почту». Обоснование этой идеи было изложено в статье «Энергетические требования для передачи информации» [1.55]. Однако эта статья пока не вызвала такого резонанса, как другая — главная статья Ландауэра.

Главная статья Ландауэра (в соавторстве с Дж. Свенсоном) опубликована в 1961 году в IBM Research Journal [1.54]. Там было объяснено, что вычисления сами по себе не требуют никакого, даже минимального расхода энергии. *Соединение двух систем вместе для обеспечения информационного обмена может быть реализовано таким образом, что не будет никакой потери энергии.* Идеальная вычислительная система может в принципе манипулировать информацией, не производя тепловых отходов вообще. Ключ объяснения состоял в понимании того, что вычисления могли быть все более и более медленными для уменьшения трения, вызывающего тепловые потери. Стирание же информации всегда производит тепло, которое рассеивается в окружающей среде.

Необходимые потери (затраты) энергии не зависят от того, как вы стираете информацию и какого она вида. Тот факт, что стирание требует (некоторой)

минимальной затраты энергии, известен теперь среди компьютерных физиков как *принцип Ландауэра*.

Пример с баскетбольными мячами. Простой пример с баскетбольными мячами демонстрирует, что стирание информации производит тепло, которое рассеивается в окружающей среде. Рассмотрим систему для представления информации, состоящую из двух мячей. Положите один из них около своей левой ноги и держите другой в правой руке. Мяч на полу соответствует состоянию «0», мяч в руке — состоянию «1». Вы играете роль человека — флоппи-диска с емкостью информационной памяти (записи) в два бита. Теперь ваше задание стереть бит «1» в вашей правой руке. Решение звучит довольно просто — бросить мяч. Но мяч после броска не займет просто состояние «0» на полу. Вместо этого он отскочит. Фактически, если вы имеете совершенный эластичный мяч и хороший жесткий пол, он отскочит прямо обратно вам в руку, в положение, соответствующее состоянию «1». Чтобы перейти в состояние «0» — стереть бит «1», мяч должен испытать трение о молекулы воздуха и пола. После каждого отскока мяч будет достигать все меньшей и меньшей высоты. В конечном счете трение оставляет мяч на полу и «1» стирается. Но почему? Только потому, что энергия от отскочившего мяча была передана полу и воздуху. В вакууме и с полом без потерь мяч отскакивал бы вам в руки постоянно (неопределенно долго). Информация может быть стерта, только если в процессе расходуется энергия.

Обратимые вычисления. Итак, энергия нужна для вычислений, поскольку необходимо стирать информацию по пути. Удаление информации требует затрат энергии.

Спустя несколько лет коллега Ландауэра по IBM Беннетт переформулировал вопрос следующим образом. Допустим, вы нашли способ вычислений без стирания какой-либо информации. Тогда вы могли бы не затрачивать никакой энергии.

Предположим, вы не пытаетесь спасти всю промежуточную информацию, рассуждал Беннетт. Если все шаги вычислительного процесса могут быть обращены, заключил он, тогда вся предыдущая информация может быть реконструирована. Предположим, что вы разработали вычислительные шаги так, что они могут быть восстановлены без размещения каждого шага в памяти. Вы программируете компьютер не запоминать все, что он сделал, а фиксировать место, где это было сделано. Другими словами, в любой точке в потоке вычислений (вычислительного потока) вы можете переключить устройство «на обратный ход» и послать компьютер к его исходной точке. Такой «обратимый компьютер» способен восстановить все логические шаги, включенные в формирование его вычислений. Запускаем компьютер вперед для получения вашего ответа, затем запускаем его назад для получения всей информации, которая была вовлечена для получения этого ответа.

Работа Беннетта [1.56] показала, что компьютер в принципе не обязан в действительности хранить любую информацию. Поэтому вычисления могут быть организованы так, чтобы тратить энергию настолько мало, насколько это потребуется, и без необходимости в больших объемах памяти. «Если вы делаете все верно, это не замедляет все очень сильно и не заставляет использовать очень большую память», — говорил Беннетт. Подумайте о переходе реки с использованием нескольких специальных камней. Вы можете собирать камни и размещать их обратно в воде согласно определенным правилам. Применяя эти правила, вы сможете пересечь реку, используя лишь несколько камней. А еще использование правил позволяет вам точно восстановить свои шаги, и, таким образом, информация о том, как вы переходите реку, будет сохранена. Точно так же обратимые компьютеры, используя соответствующие правила, могут осуществлять сложные вычисления, избегая совершать действия по сохранению информации о каждом шаге на пути.

Когда Беннетт впервые предложил обратимые вычисления, сам Ландауэр сомневался. В течение месяцев он предполагал, что что-то при анализе было упущено. Ричард Фейнман также сначала был настроен скептически. Однако оба в конце концов осознали, что идея Беннетта работает [1.57]. Ландауэр много раз возражал: «Существует некоторое, абсолютно минимальное количество энергии, необходимое для обработки одного бита информации. Это просто неправда». *«В действительности не существует никаких пределов на обработку информации, — настаивал он, — измерение не требует диссипации энергии, точно так же как передача информации»* [1.54].

В течение многих лет схема обратимых вычислений, предложенная Беннеттом, представляла интерес только для фундаментальной физики, а не для создания реальных чипов. Но постепенно обратимые вычисления входят в жизнь.

Так, Ральф Меркль из исследовательского центра фирмы Хехо в Калифорнии считает, что для практики обратимые вычисления не обязаны быть совершенными. Энергию можно экономить, даже если только часть вычислений будет обратимой.

Схема обратимых вычислений, предложенная Беннеттом, обходит пределы, налагаемые принципом Ландауэра. Поэтому цель конструкторов, занимающихся снижением потребления энергии компьютерами, заключается в том, чтобы использовать типы обратимых шагов, которые сохраняют исходную информацию настолько широко, насколько это возможно. Некоторые инструкции в компьютере обратимы, а другие — нет. Вы не обязаны иметь полную обратимость для всего компьютера. Грамотное проектирование аппаратуры может сделать большинство шагов обратимыми, спасая большое количество информации и, таким образом, спасая большое количество энергии.

Обратимые вычисления иллюстрируют, как важно принимать во внимание при конструировании компьютеров тот фундаментальный факт, что информация реальна и физична.

1.7. Обобщенный канал связи и вычисления

Теория Шеннона имеет удивительную особенность. Для выяснения возможности передачи информации из одной точки в другую она использует понятие канала связи, в котором не фигурирует в качестве переменной расстояние. Вместе с тем понятие канала связи позволяет рассматривать передачу информации не только через пространство, но и через время. По существу, имеется как минимум два типа коммуникационных каналов: 1) канал для передачи информации между двумя пространственными точками, расстояние между которыми D , и 2) канал для передачи информации через временной интервал T .

Примерами передачи информации через канал второго типа являются записи информации на бумаге, жестком диске, CD с последующим ее прочтением. В ряде случаев к каналам второго типа (передача информации через интервалы времени) применимо понятие пропускной способности канала. При этом является возможность осознать взаимосвязь между вычислениями и передачей информации, обозначенную в принципе Ландауэра.

Рассмотрим следующую структуру коммуникационного канала второго типа. Имеется источник информационного сообщения в виде начальных условий для решения некоторой задачи на компьютере. Обозначим эти начальные условия через $x \in X$, где X — множество всех начальных условий для данной программы P , реализованной на компьютере. Будем рассматривать компьютер как коммуникационный канал, на вход которого поступает информация x , содержащая некоторое количество бит, и на выходе которого через время T появляется результат работы программы (алгоритма, компьютера) в виде решения $y \in Y$, принадлежащего множеству возможных для этой задачи решений Y .

О передаче какой информации идет речь? Перед решением задачи была полная неопределенность в отношении того, что из себя будет представлять результат работы программы. Пусть Y состоит из N возможных равновероятных решений. В результате работы компьютера мы получаем знания о том, какое именно решение выбрано. Таким образом, неопределенность полностью исчезла и на выходе появляется информация в объеме $\log_2 N$ бит. Эта информация и была передана через канал за время T . Отсюда пропускная способность канала второго типа равна

$$C = \frac{\log_2 N}{T}. \quad (1.14)$$

Значение C определяется рядом факторов, в частности производительностью компьютера и сложностью задачи.

Таким образом, вычислениям можно сопоставить некоторый коммуникационный канал, что подтверждает общность процесса передачи информации и процесса вычислений.

Справедливо ли обратное, т. е. может ли произвольный коммуникационный канал быть представлен в виде вычислительного процесса? Какими свойствами обладают каналы типа вычислительного процесса?

Рассмотрим пример с синхронизацией двух хаотических систем через передачу информации от ведущей системы к ведомой системе [1.35–1.38].

Пусть необходимо обеспечить точность синхронизации в n бит. Пренебрежем тем фактом, что из-за разбегания траекторий ведомая система действует как усилитель шумов (т. е. понижает пропускную способность канала связи). Тогда требуемая точность передачи отсчетов равна n битам и, следовательно, необходимая пропускная способность канала связи равна n бит на отсчет хаотической системы.

Пусть для определенности динамическая система представляет собой одномерное отображение и генерирует один бит информации на отсчет. Тогда, применяя преобразователь хаотических отсчетов в двоичный поток, мы получаем поток данных в канале первого типа равный одному биту на отсчет динамической системы.

Восстановление хаотических отсчетов на входе ведомой хаотической системы в схеме синхронизации через передачу информации осуществляет обратный преобразователь. Он производит на каждом временном интервале, соответствующем длине такта системы, ровно n бит информации путем обработки входного сигнала. В каком-то смысле он в n раз усиливает (увеличивает) информационный поток. Тем самым преобразователь увеличивает общую пропускную способность «комбинированного» канала связи, состоящего из последовательно соединенных пространственного и временного каналов. Эта дополнительная информация производится самим обратным преобразователем.

Вывод 1. Устройства обработки принимаемого сигнала могут повышать пропускную способность канала связи.

Этот вывод не противоречит обычным представлениям о пропускной способности канала связи. Действительно, осуществляя фильтрацию шумов, мы также повышаем пропускную способность канала, поскольку уменьшаем уровень шумов в приемнике.

Однако здесь имеется и существенная разница.

Вывод 2. Линейные устройства обработки информации не позволяют увеличить поток выходной информации по отношению к входному (в канал). Применение же схемы обработки вычислительного (вообще говоря, необратимого)

процесса может приводить к дополнительному производству информации и, соответственно, к увеличению ее потока по сравнению с входным потоком. А это похоже на те процессы, которые свойственны живым системам и которые отличают их от неживых [1.58].

Замечание. Представим себе, что на передающей и приемной сторонах имеются две одинаковые машины Тьюринга. Каждая из машин при своем функционировании в силу логической необратимости производит в процессе своей работы информацию. Мы можем по шагам передавать информацию от машины-передатчика к машине-приемнику. Для того чтобы передавать всю эту информацию, необходим достаточно высокоскоростной канал. Однако можно поступить и по-другому. Задать одинаковые начальные состояния машин (для чего передать в машину приемника необходимые начальные условия) и запустить машину в приемнике. При этом получатель будет принимать в точности ту же информацию, которую он получал при непосредственной передаче данных с выхода машины передатчика. Возникает вопрос: а не банальность ли это? *Может быть, информация фактически уже имеется на приемной стороне и «зарыта» в конструкции машины Тьюринга?* Ответ заключается в том, что множество возможных начальных состояний настолько велико, что случайно воспроизвести нужный результат не представляется возможным. По существу, здесь идет обмен информацией, передаваемой по каналу, на информацию, порождаемую машиной Тьюринга. Но для внешнего наблюдателя это одна и та же информация.

1.8. Информационно-открытые системы

При синхронизации двух систем связи через передачу информации уменьшение объема данных, передаваемых через пространственный канал связи, по сравнению с синхронизацией на основе передачи самого хаотического сигнала компенсируется дополнительными вычислениями, которые трактуются как преобразование и «усиление» информации во временном канале связи. «Экономия» в пропускной способности канала связи весьма значительна: примерно в 10 раз для синхронизации с относительной точностью $\sim 10^{-3}$.

Имеются ли пути дальнейшего уменьшения объема передаваемой информации за счет дополнительных вычислений на приемной стороне? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо ввести понятия информационно-открытых и информационно-замкнутых физических систем.

Пусть имеется динамическая система Σ , описываемая некоторыми эволюционными уравнениями для переменной $x \in R^N$, где N — размерность фазового пространства системы. Поведение Σ можно изучать, квантуя ее по времени и переменной состояния. Основная идея заключается в делении множества возможных состояний на конечное число ячеек и нахождении маршрута, определяющего,

к какой ячейке относится состояние системы при каждом такте часов. Каждая ячейка описывает *информационное состояние системы* и ассоциируется с некоторым «символом», и, таким образом, информационная эволюция системы описывается бесконечной последовательностью символов.

Будем называть систему Σ информационно-открытой системой, если она связана с внешней по отношению к ней средой таким образом, что эта связь приводит к изменению информационных состояний системы в процессе ее эволюции относительно такой же системы, не связанной с внешней средой

В противном случае будем называть систему Σ информационно-замкнутой системой.

Термодинамическая и информационная открытость системы вещи, вообще говоря, разные. В частности, термодинамическая открытость системы еще не означает информационной открытости (хотя такое и может быть, см. пример с баскетбольными мячами).

Каждая динамическая система, на которую воздействует внешний шум, может рассматриваться по отношению к среде, порождающей этот шум, как кандидат на информационно-открытую для этой среды систему. Она будет информационно-открытой в том случае, если уровень внешнего шума таков, что шум способен изменить информационную эволюцию системы.

Рассмотрим примеры, которые поясняют понятие информационной открытости.

Пример 1. Пусть имеется диссипативный осциллятор с двухъямным потенциалом и внешним гауссовским шумом. Динамика осциллятора описывается уравнением

$$\ddot{x} + \alpha \dot{x} + V'_x(x) = \xi(t). \quad (1.15)$$

Связь с внешней средой осуществляется через шум $\xi(t)$. Система имеет два информационных состояния: около левого и около правого положений равновесия. Обозначим их соответственно через состояние «0» и состояние «1». Если $\alpha \gg 1$, то имеет место случай передемпфированного осциллятора, динамика которого в нормированном виде описывается уравнением

$$\dot{x} = -V'_x + \xi(\tau), \quad (1.16)$$

где $\tau = \alpha t$; $\langle \eta(\tau)\eta(0) \rangle = 2D\delta(\tau) = \sigma^2$ и для определенности потенциал $V(x)$ имеет вид

$$V(x) = -\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4}x^4. \quad (1.17)$$

При малых значениях σ система является практически информационно-замкнутой, поскольку связь с внешней средой, осуществляемая за счет

воздействия гауссовского шума, не меняет информационного состояния системы. Однако при увеличении σ вероятность перехода в другое состояние начинает существенно отличаться от нуля. При больших амплитудах шума траектория время от времени перескакивает через барьер, система «воспринимает» внешнюю информацию, ее информационное состояние меняется при каждом перескоке, и она становится информационно-открытой.

Количественно вероятность перехода r_k от одного состояния к другому определяет соотношение Крамерса:

$$r_k = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2}\right). \quad (1.18)$$

В рассмотренном примере существенно наличие порогового значения внешнего шума, ниже которого система является информационно-замкнутой, а выше — информационно-открытой.

Пример 2. Физически реализованная хаотическая гиперболическая система, описываемая одномерным отображением

$$x_n = f(x_n) + \xi_n, \quad \langle \xi_n \xi_m \rangle = \delta_{nm} \sigma^2, \quad (1.19)$$

где δ_{nm} — символ Кронекера. Гиперболические хаотические системы обладают высокой чувствительностью к возмущениям. В них сколь угодно малое возмущение траектории порождает траекторию, экспоненциально быстро расходящуюся с невозмущенной и, следовательно, с другим информационным содержанием. Эволюция информационных состояний самой возмущенной системы также отличается от информационной эволюции невозмущенной системы. Поэтому гиперболическая система является информационно-открытой при сколь угодно малом значении σ , т. е. для нее *порог внешнего шума, при превышении которого информационно-замкнутая система становится информационно-открытой, отсутствует (равен нулю)*.

Таким образом, информационный обмен между гиперболической системой и внешней средой существует при любом ненулевом уровне взаимодействия. Это подтверждает идею Ландауэра о том, что передача информации, вообще говоря, не требует затрат энергии.

Пример 3. В отсутствие внешнего воздействия информационно-замкнутыми системами являются системы с конечным числом состояний. Важным подмножеством (подклассом) таких систем являются типичные компьютеры.

Вернемся к синхронизации.

При обычном подходе к хаотической синхронизации мы должны постоянно передавать от одной системы к другой, как минимум, одну из компонент сигнала (содержащую всю информацию о нем).



Мы можем сократить объем передаваемой информации до некоторого минимального объема, достаточного для восстановления сигнала. Предельное значение этого объема равно производству информации самой системой.

Наконец, если ведущая и ведомая системы являются информационно-замкнутыми и реализуются на типичных процессорах, то по наблюдаемому сигналу от ведущей системы мы можем идентифицировать ее информационное состояние, после чего всю необходимую для синхронизации информацию (расчет траектории) производить в приемнике, уменьшив поток информации через коммуникационный канал до нуля.

При случайной потере синхронизации ее можно будет восстановить путем дополнительных краткосрочных наблюдений за приходящим сигналом.

1.9. Заключение

Интерес к взаимосвязи детерминированного хаоса и информации наблюдается уже в течение длительного времени. Однако в последние годы в этом интересе появились принципиально новые элементы. Они связаны прежде всего с применением хаотических сигналов для передачи сообщений. Оказалось, например, что такое явление, как синхронизация, обобщенное на хаотические системы, может рассматриваться через процесс передачи информации от одной системы к другой. Хаотические колебания могут выступать как в роли носителей информации, так и в роли процессов, маскирующих информационные сигналы. Они могут применяться при активном зондировании (в частности, радиолокации) и служить информативными индикаторами характера естественных и искусственных процессов. Применение динамического хаоса для передачи информации порождает новые возможности для мультиплексирования и демultipлексирования сигналов.

Перечисленные вопросы составляют только часть задач, в которых проявляется необходимость анализа информационных аспектов взаимодействия хаотических сигналов между собой, с другими типами сигналов и их воздействия на соответствующие приемные устройства. Характер этих взаимодействий существенно отличается от соответствующих взаимодействий для типичных сигналов, рассматриваемых в классической теории информации, и может стать мощным источником повышения эффективности коммуникационных систем.

Литература

- 1.1. Котельников В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости. — М.: Госэнергоиздат, 1956.