

ГЛАВА 5

Статистическое моделирование и прогнозирование процессов в системах передачи

Формализация процесса работы ВОСП, включающая в себя как выработку вектора количественных критериев работоспособности, так и построение физических и математических моделей процессов тех или иных преобразований сигналов, несёт практический интерес в виде создаваемых методик согласования телекоммуникационных устройств и настройки сети под выполнение поставленных задач. Только окончательный результат, представленный, например, в виде выработанной методики настройки оборудования под рассматриваемый конкретный случай, является критерием состоятельности моделирования («случай» здесь – это совокупность объекта, цели моделирования и положения объекта в системе телекоммуникаций). Такие методики должны содержать ответы на вопросы о том, можно или нельзя на данном сегменте установить то или иное сетевое приложение, какое изменение конструктивных параметров сети для этого потребуется, придётся ли производить дополнительный учёт каких-либо факторов, минимальную модернизацию, каковы при этом будут показатели работоспособности. Необходимы ли мероприятия в процессе эксплуатации, поддерживающие работоспособность на требуемом уровне, что связано с наличием возможных причин деградации качества. Если же процесс моделирования не удаётся довести до подобных рекомендаций, то очевидно, что его практическая значимость будет существенно снижена.

Так как, с одной стороны, адекватные модели систем передач, отражающие стохастический характер поведения моделируемого объекта, являются достаточно сложными, с другой стороны, для описания процесса передачи сигналов с требуемой точностью необходимо значительное количество входных параметров, произвести моделирование в аналитическом виде удаётся либо в отдельных частных случаях либо не удаётся вовсе. С этой точки зрения компьютерное моделирование является не столько фактором упрощения, сколько неотъемлемой частью процесса анализа системы телекоммуникаций. В настоящей главе представлены основные аспекты компьютерного статистического моделирования, а также постановка задачи моделирования с целью непосредственного нахождения значений показателей работоспособности ВОСП исходя из имеющихся конструктивных параметров (прямая задача) и определения вектора подстройки конструктивных параметров для обеспечения требуемых показателей работоспособности (обратная задача).

Целью представленных исследований является выработка пути получения оптимальных решений по резервированию, модернизации сетей с учётом значительной разнородности эксплуатируемого оборудования и сред передачи, требований к компонентам системы передачи в эксплуатации. Хотя эти аспекты в немалой степени определяют работоспособность ВОСП, им уделено недостаточное внимание в нормативных документах. Не разработаны методики расчёта надёжности сетей, методики сбора и анализа данных по фактической надёжности [65]. Вместе с тем согласно [16], сети ТСС присоединяемых операторов связи должны удовлетворять требованиям международных и европейских стандартов к хранимому сигналу не только по показателям качества, но и по показателям надёжности. То же самое распространяется на сети передачи и другой информации - служебной, пользователя и т.д.

Значимость компьютерного моделирования в телекоммуникационных задачах является высокой как из-за огромного количества факторов, подлежащих учёту, так и необходимости делать не только текущий анализ, но и прогнозирование состояния ВОСП. Актуальность последнего надо рассматривать не только в узком кругу задач, посвящённых, например, оценке пропускной способности и сетевой нагрузки, ожидаемой в ближайшем будущем. Под прогнозированием в ВОСП следует понимать оценку развития во времени всех показателей работоспособности *с задаваемой в задаче вероятностью*. Применительно к системам телекоммуникаций к настоящему моменту подобная постановка задачи отсутствует. Закреплённые же в нормативных документах понятия помехоустойчивости и особенно надёжности систем передач носят весьма поверхностный характер, что не позволяет наблюдать за системой во времени и оптимальным образом осуществлять какие-либо мероприятия, направленные на поддержание надёжности отдельных составляющих, выявлять точки (области) деградации качества и т.д. С целью частичного устранения указанного пробела в последнем параграфе главы вводится понятие о гамма-процентных показателях надёжности применительно к системам телекоммуникаций.

5.1. Метод имитационного статистического моделирования

Перейдём к основным аспектам компьютерного моделирования, которые необходимы для анализа систем телекоммуникаций. Целью метода имитационного статистического моделирования (МИСМ) является обеспечение возможности воспроизведения процесса работы исследуемого объекта с любой точностью в пределах используемых физических и математических моделей и получение интересующих статистических характеристик. По сравнению с непосредственным (макетным и измерительным) экспериментом, моделирование на ЭВМ обладает рядом преимуществ: его можно применить к новым, ещё не введённым в эксплуатацию сегментам, работу исследуемой

сети можно проверить в самых разнообразных условиях, которые порой трудно или невозможно воссоздать на системах связи, а сам процесс исследования можно провести в ускоренном темпе за счёт как изменения масштаба времени, так и введения специализированных методик ускоренных испытаний [5] и подобных.

Для имитации случайных величин и событий используют библиотечные подпрограммы (датчики) генерирования псевдослучайных чисел. *Псевдослучайная последовательность чисел – это такая не случайная последовательность, в которой частота появления любых чисел и их комбинаций совпадает в пределе с частотой появления этих чисел и их комбинаций для имитируемой случайной величины или процесса.*

Большинство датчиков вырабатывают псевдослучайные числа x_i ($i = 1, 2, 3 \dots$), равномерно распределенные на отрезке $[0, 1]$, для которых вероятность появления некоторого числа x_i , меньшего чем y , равна y :

$$P(x_i < y) = y. \quad (5.1)$$

Псевдослучайная последовательность чисел x_i характеризуется длиной отрезка аперидичности L и длиной периода M . Первые L чисел x_0, x_1, \dots, x_{L-1} будут все различными, а число x_L ввиду конечности числа знаков в ячейке непременно совпадёт с одним из ранее выданных чисел. Кроме того, длина отрезка аперидичности зависит от x_0 . С этой точки зрения необходимо, чтобы количество используемых псевдослучайных чисел не превосходило L , иначе возможно получение неверных результатов при моделировании. Для увеличения отрезка аперидичности используют несколько чередующихся рекуррентных соотношений [36] или способов получения псевдослучайных чисел.

Для проведения дальнейших расчетов каждая такая последовательность проверяется на “случайность” по ряду критериев. Наиболее распространёнными являются: проверка частот (или критерий Пирсона), проверка пар, разрядов, комбинаций и серий [36]. Такие проверки обеспечивают заданное оператором качество получаемой в итоге псевдослучайной последовательности – путём выбора метода получения, используемого датчика и т.д. Одним из наиболее жёстких критериев случайности является критерий Пирсона, который, во-первых, непосредственно является следствием определения полученных статистически псевдослучайных чисел, во-вторых, во многих технических задачах его применение достаточно для обеспечения качества моделирования. Суть критерия Пирсона представлена далее.

Интервал $[0, 1]$ разбивается на $N^{(z)}$ равных промежутков, и фиксируется количество α псевдослучайных чисел ($\alpha = 1 \dots N^{(z)}$ $N^{(z)} = 10 \dots 20$), попадающих в соответствующий промежуток. Полученные эмпирические частоты $\beta_\alpha = \alpha / \hat{\alpha}$ ($\hat{\alpha}$ – общее количество чисел) сравниваются с теоретическими вероятностями $1/N^{(z)}$, при этом вырабатывается критерий χ^2 :

$$\hat{\lambda}^2 = \sum_{\alpha=1}^{\dot{a}} \left\{ \beta_{\alpha} - \frac{1}{N^{(z)}} \right\}^2. \quad (5.2)$$

Критерий Пирсона заключается в том, чтобы величина $\hat{\lambda}^2$ была не больше задаваемого в задаче значения $\xi_{\text{Пир}} > 0$, допустимого отличия эмпирических частот появления чисел от теоретических вероятностей, т.е.:

$$\hat{\lambda}^2 \leq \xi_{\text{Пир}}. \quad (5.3)$$

При проведении технических расчётов величину $\xi_{\text{Пир}}$ следует выбирать не более 0.001...0.005 на отрезке, меньшем отрезка аperiodичности [131]. Проверить выполнение последнего требования можно следующим образом: после того как программа получила определенное количество псевдослучайных чисел N_1 , необходимо сравнить их между собой. Если среди них есть одинаковые, то N_1 уменьшается на некоторую величину (например, на 5%) и процесс получения чисел с последующим их сравнением повторяется до тех пор, пока все псевдослучайные числа не окажутся разными.

Из равномерно распределённых в интервале $[0, 1]$ чисел x_i преобразованием подобия несложно найти числа z_i , равномерно распределённые в произвольном интервале $[a, b]$. Согласно рис. 5.1, a закон преобразования выглядит следующим образом:

$$z_i = (b - a) \cdot x_i + a. \quad (5.4)$$

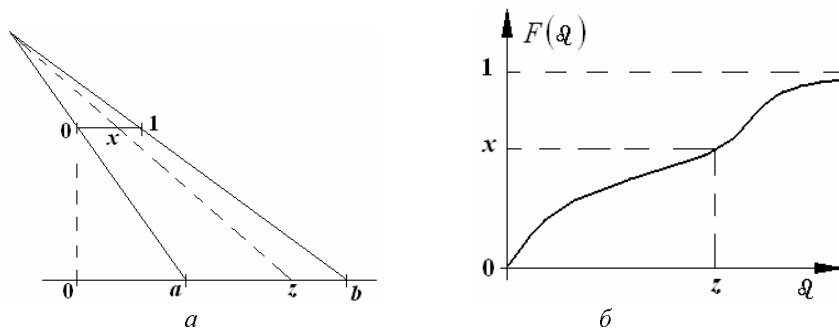


Рис. 5.1. Иллюстрация к получению закона преобразования псевдослучайных чисел: a – распределённых равномерно на отрезке $[a, b]$; b – по произвольному закону с интегральной функцией вероятности $F(Q)$

Для получения чисел z_i , подчинённых произвольному закону распределения с интегральной функцией вероятности $F(Q)$, необходимо равномерно распределённые в интервале $[0, 1]$ числа x_i подставить в функцию, обратную к $F(Q)$, рис. 5.1, b :

$$z_i = F^{-1}(x_i). \quad (5.5)$$

При этом числа z_i будут подчиняться распределению $F(\Omega)$:

$$P(z_i < \Omega) = P[F^{-1}(\Omega) < \Omega] = P[x_i < F(\Omega)] = F(\Omega). \quad (5.6)$$

Для пояснения приведём пример получения чисел z_i , подчинённых экспоненциальному распределению: $F(\Omega) = 1 - e^{-\hat{\lambda}\Omega}$, в котором $\hat{\lambda}$ - некоторая постоянная величина. Согласно (5.5), $x = 1 - e^{-\hat{\lambda}z}$, тогда $z = -\ln(1-x)/\hat{\lambda}$ или, заменяя x на величину $1-x$, получаем преобразующее соотношение

$$z_i = -\ln(x_i)/\hat{\lambda} \text{ для всех } i. \quad (5.7)$$

Следовательно, применение МИСМ открывает возможность имитировать на ЭВМ достаточно широкий класс случайных процессов, а значит - проводить моделирование разнообразных телекоммуникационных задач.

5.2. Задача анализа и настройки параметров системы передачи с применением статистического моделирования

С использованием метода статистического моделирования на ЭВМ относительно несложно провести имитацию процесса передачи сигналов в телекоммуникационной системе. В нижеследующих подразделах представлены основные аспекты моделирования цифровых информационных сигналов с учётом случайного характера следования логических единиц и нулей и процесса преобразования этих сигналов оборудованием линейного тракта, расположенным на сетевых узлах. Предполагается, что изменение работоспособности ОЛТ на протяжении времени может быть описано на основе векторных матриц (см. раздел 3). Как упоминалось во введении к данной главе, цель моделирования может состоять в непосредственном нахождении значений показателей работоспособности ВОСП исходя из имеющихся конструктивных параметров (прямая задача) либо определении вектора подстройки конструктивных параметров для обеспечения требуемых показателей работоспособности (обратная задача).

Прямая задача или *задача анализа работоспособности ВОСП* посвящена определению значений вероятности ошибки, количества секунд с ошибками, вероятности безотказной работы и других показателей на основе использования физических и математических моделей процессов преобразования сигналов в системе телекоммуникаций исходя из следующих наперёд заданных параметров:

- конструктивных параметров системы передачи, под которыми следует понимать уровень мощности логической единицы в оптоволоконном тракте, тип линейного кодирования, набор параметров, характеризующих приёмник в зависимости от его типа (см. раздел 1.2), архитектуру

сегмента с учётом физических особенностей линейного тракта, длин сегментов, типа волокна на них, и т.д.; и

- параметров искажения, являющихся результатом действия всевозможных возмущающих факторов: мультипликативных и аддитивных помех, возможных ошибок в преобразовании сигналов, связанных с реальной работоспособностью аппаратуры, искажений алгоритмического характера, заложенных непосредственно в процесс работы сети в виде неудачных конструктивных решений и т.д.

Очевидно, что, задав реальную сеть в виде некоторого объекта, рис. 5.2, и его передаточную функцию преобразования, можно определить параметры выходных сигналов, если известны параметры входных сигналов.

Иными словами, если мы произвели моделирование действия возмущающих факторов и процесса преобразования сигналов, подаваемых на вход системы телекоммуникаций, то можно находить те или иные характеристики выходных сигналов для различных входных. Это позволяет проводить исследования о возможности установления на данной конкретной сети какого-либо приложения, увеличения битовой скорости и т.д. Задаваясь каждый раз одним из таких вопросов, что равносильно изменению ряда параметров входных сигналов, в результате вычислений оператор будет получать значения показателей работоспособности сети по отношению к рассматриваемому случаю. Сравнивая полученные значения с регламентируемыми НТД, оператор будет определять возможность решения той или иной телекоммуникационной задачи с использованием этой конкретной телекоммуникационной системы.

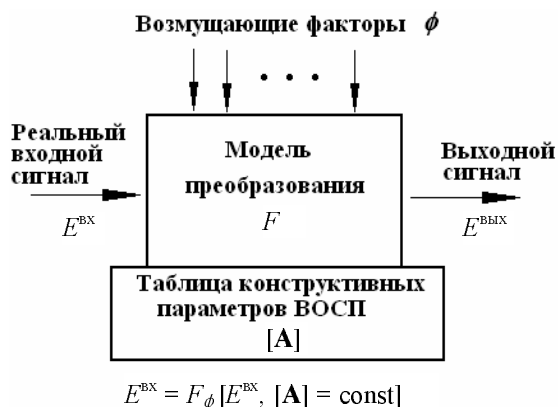


Рис. 5.2. Иллюстрация постановки задачи анализа ВОСП

Безусловно, в представленной постановке моделирование ВОСП не сёт определённый технический смысл. Более того, именно решением прямой задачи можно установить адекватность разработанных аналитических моделей процессов преобразования сигналов в сети, адекватность моделирования

искажающих факторов и их влияние на процесс приёма-передачи и т.д. Здесь предполагается, что результат, полученный вычислительным путём, может быть сравнен с результатами реальных измерений и данными из эксплуатации. Следовательно, можно сказать, что прямая задача несёт существенный аналитический смысл и может быть использована для проверки адекватности и корректности всех применяемых в процессе вычисления моделей на примере какого-либо сегмента с известными характеристиками.

Вернёмся к вопросу модернизации и эксплуатации систем передач. Оператора интересует ответ типа «можно или нельзя» решить ту или иную телекоммуникационную задачу, а что именно надо сделать с минимальными затратами финансовых и рабочих ресурсов, для того чтобы решить поставленную телекоммуникационную задачу. Здесь обозначается *постановка обратной задачи*: если заданы характеристики входных сигналов, модель влияющих факторов и искажений, которые практически не поддаются какому-либо управлению и изменению, модель процесса преобразования сигналов в сети, то каковы должны быть конструктивные параметры последней для того, чтобы характеристики получаемых выходных сигналов оставались в установленных НТД пределах, рис. 5.3. В результате решения такой задачи оператор получает рекомендации по изменению конструктивных параметров своей телекоммуникационной системы, которая обеспечит решение поставленной телекоммуникационной задачи с требуемым качеством и надёжностью. Следовательно, можно говорить о применении физического, математического и компьютерного моделирования для настройки сети.

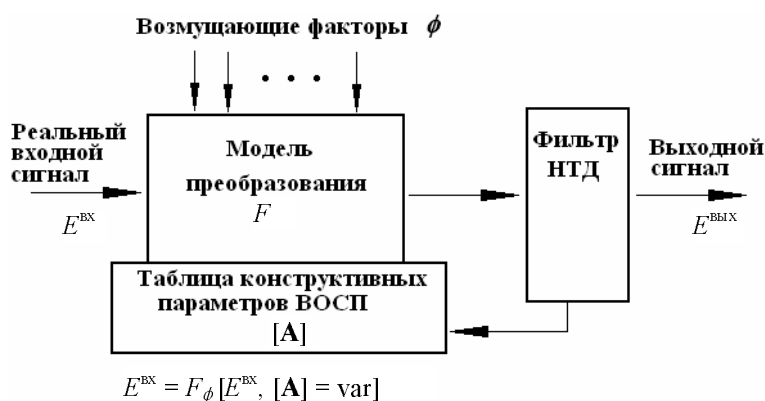


Рис. 5.3. Иллюстрация задачи настройки ВОСП

Очевидно, что вектор конструктивных параметров, искажающих факторов, характеристик входных и выходных сигналов, функций преобразования, контролируемых показателей работоспособности определяется для каждого конкретно рассматриваемого случая. Так, например, в [132] достаточно подробно представлен перерасчёт конструктивных параметров сегмента

ВОСП ведомственной сети предприятия ОАО «Башкирэнерго» на основе выбранных применительно к рассматриваемой задаче искажающих факторов и контролируемых параметров. Такой перерасчёт позволил подстроить конструктивные параметры сетевых устройств и обеспечить работоспособность сегмента на требуемом НТД уровне.

В настоящей монографии пример [132] не приводится, так как последний имеет весьма узкую применимость, актуальную именно в рассматриваемой задаче. Хотя, как уже неоднократно упоминалось, целью данной монографии является проработка концепции построения вычислительного полигона, охватывающего широкий круг телекоммуникационных задач, являющийся в общем случае расширением версии [132]. Безусловно, именно такой имитационный компьютерный полигон позволит автоматизировать процесс отладки сети и несёт законченную практическую ценность. Непосредственной разработке последнего авторы предполагают уделить отдельное внимание, а для предоставления разработчикам и сетевым проектировщикам хотя бы круг начальных возможностей в области моделирования, в конце настоящей главы кратко приведены известные базовые программные средства с телекоммуникационной спецификой.

Не останавливаясь на аспектах теории управления, элементы которой вырисовываются в постановке обратной задачи по настройке ВОСП, рис. 5.3, связанные с выявлением области оптимального регулирования [9, 10, 133 и др.], устойчивости и т.д., перейдём к описанию подхода к статистическому моделированию цифровых сигналов и характеристик оборудования линейного тракта, что имеет прямое отношение к тематике главы. Рассмотрение аспектов теории управления, во-первых, выходит за рамки настоящей монографии, во-вторых, данной теме посвящено значительное количество литературы и, в-третьих, априори предполагается незначительное изменение конструктивных параметров устройств, что не должно приводить к потере их работоспособности. В противном случае последнее будет отчётливо видно по результатам вычислений, хотя, конечно же, в ряде случаев применение положений теории регулирования окажется оправданным и необходимым.

5.2.1. Подход к статистическому моделированию цифровых сигналов

Известен способ [134] формализованного представления цифровых сигналов, учитывающий их цикловую структуру и специфику описываемой системы передачи – иерархию скоростей, способ сигнализации, что отражается на заголовках, служебных битах и т.д. Способ основан на представлении сигнала многомерной матрицей, по координатам которой отложены различные характеристики сигнала. Принципиальным отличием многомерных матриц в [134] от векторных матриц, представленных в главе 3 настоящей монографии, является принципиальное отсутствие в известном способе фактора

времени и, соответственно, фактора случайности, что является неотъемлемой стороной моделируемого объекта. Поставленная задача предполагает моделирование процесса передачи сигналов по сети на протяжении времени, где все параметры являются *функциями времени*. Именно это позволяет *наблюдать* за процессом работы системы телекоммуникаций с проведением соответствующих оценок. Применительно к решаемой задаче идея, заложенная в [134], должна трактоваться как наличие не только случайной, но и детерминированной составляющей в передаваемом цифровом сигнале. Детерминированная составляющая сводится к передаче вполне известных битов заголовков и служебной информации, имеющих место в конкретной системе телекоммуникаций. Тем не менее цифровой сигнал в поле данных, а именно – расположенная там последовательность единиц и нулей носит принципиально случайный характер. Это приводит к тому, что весь сигнал, т.е. вся последовательность единиц и нулей, рассматриваемых на произвольном временном интервале, должна моделироваться как случайный процесс с некоторой оговоркой.

Суть последней состоит в том, что любая передаваемая информация, что бы она не содержала: речевой сигнал, видеоизображение, данные и т.д., несёт в себе избыточность [7], а значит, моделирующий последовательность поступления единиц и нулей процесс не может быть чисто случайным. Этот процесс обязательно содержит последствие [135, 136 и др.]. Иными словами, вероятность случайного события, состоящего в том, что в некоторый момент времени t_0 в решающую схему приёмника поступила логическая единица, зависит от случившегося ранее события: на один или несколько тактовых интервалов раньше t_0 .

Таким образом, для проведения компьютерного имитационного моделирования процесса следования логических единиц или что то же самое – поступления их в решающую схему приёмника, расположенного на некотором сетевом узле, предлагается *поступление логической единицы считать случайным событием*. Очевидно, что длительность временного интервала между этими моментами представляет собой также случайную величину. Под перечисленным временным интервалом следует понимать количество тактовых интервалов $N_{\Delta t}$, заполненных нулями, умноженное на длительность тактового интервала Δt .

Вполне справедлива аналогичная постановка относительно нулей, представляющих собой случайные события и следующих через случайные промежутки времени. Тем не менее такой подход не использовался в [132] вследствие того, что количество единиц в реальной системе передачи меньше, чем количество нулей. В случае принятия подобной концепции имело бы место снижение точности вычислений.

Следовательно, для обеспечения состоятельности имитационного статистического моделирования ВОСП предложено цифровой сигнал представить в виде последовательности поступления единиц (импульсов) в схему приёмника, *интервал времени между которыми является случайной величи-*

ной. Для отображения реальных возмущающих факторов дополнительно предложено форму импульсов – амплитуду и положение фронтов по отношению к «маске» приёмника, а также и длительность поступающего на приёмник тактового интервала – представлять случайными величинами.

Тогда для численного моделирования информационного входного сигнала (передаваемого, например, по потоку E1) необходимо генерировать четыре псевдослучайные последовательности:

- $[z^{(I)}]$ предназначена для формирования случайного потока единиц. Случайной величиной является промежуток времени (количество тактовых интервалов) между импульсами логических единиц.
- На базе $[z^{(II)}]$ моделируется значение девиации временного интервала. Случайным фактором являлось значение длительности реального тактового интервала.
- На базе двух последовательностей $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$ моделируется форма реального импульса: с учётом джиттера и уровня шума в канале. Случайными факторами являются: амплитуда джиттера и амплитуда шума.

Если количество чисел в последовательностях $[z^{(I)}]$ и $[z^{(II)}]$ равно количеству тактовых интервалов в течение времени наблюдения, т.е. каждое такое число определяет случайные параметры одного такта, то последовательности $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$ в зависимости от методики моделирования формы импульса могут быть либо целиком предназначены для получения этой случайной формы на протяжении одного такта, либо определять все импульсы на протяжении интервала наблюдения. В первом случае, как это было сделано в [132], необходимо последовательности $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$ каждый раз генерировались заново для каждого нового тактового интервала. Если необходимо имитировать сигнал служебной сетевой синхронизации, передаваемый, например, по потоку E1, то используются последовательности $[z^{(II)}]$, $[z^{(III)}]$ и $[z^{(IV)}]$. Генерировать $[z^{(I)}]$ не имеет смысла ввиду вполне определённого закона следования импульсов в таком сигнале.

На рис. 5.4 представлен результат имитационного моделирования, проведённого в [132], с использованием четырёх перечисленных псевдослучайных последовательностей.



Рис. 5.4. Статистическая модель цифрового сигнала с учетом шума, джиттера и ДВИ в канале передачи E1. Ровными линиями представлен идеальный сигнал в коде СМІ (с инверсией комбинаций) [18]

Моделирование проведено в предположении, что случайные значения длительности промежутка времени между импульсами логических единиц подчиняются распределению Эрланга второго порядка [36]. Выбор последнего объясняется его принадлежностью к потокам Пальма [36], которые обладают ограниченным последствием, что правдоподобно отражает реальный информационный сигнал со скремблером [18].

Далее кратко представлен пример методики статистического моделирования цифровых информационных сигналов, предназначенных для имитации процесса работы ВОСП.

Пример

Пусть плотность вероятности наступления очередного события подчинена распределению Эрланга II порядка [36]:

$$p_{\mathcal{E}}(t) = I_{\mathcal{E}}^2 \cdot t \cdot \exp(-I_{\mathcal{E}} \cdot t), \quad (5.8)$$

где $I_{\mathcal{E}}$ – интенсивность потока, t – время. $I_{\mathcal{E}}(t)$ есть предел отношения вероятности поступления не менее одного импульса (обозначим событие поступления импульса из оптоволоконного тракта на фотоприёмник за $\mathbf{И}$) в промежутке $[t, t + \delta \hat{t}]$ к величине этого промежутка $\delta \hat{t}$ при $\delta \hat{t} \rightarrow 0$, [36], или:

$$I_{\mathcal{E}}(t) = \lim_{\delta \hat{t} \rightarrow 0} \frac{P_{\mathbf{И} \geq 1}(t, t + \delta \hat{t})}{\delta \hat{t}}. \quad (5.9)$$

Для стационарного потока справедливо: $P_{\mathbf{И} \geq 1} = I_{\mathcal{E}} \cdot \delta \hat{t} + o(\delta \hat{t})$. Здесь $o(\delta \hat{t})$ – бесконечно малая величина по сравнению с $I_{\mathcal{E}} \cdot \delta \hat{t}$. Найдём $I_{\mathcal{E}}$ по отношению к потоку Е1. Реальный сигнал с учётом вводимого скремблера, избыточности при кодировании и т.д. имеет значение среднестатистической скважности $\chi \cong \cong 3.1 \dots 3.2$ [18]. Скремблер вводят для обеспечения благоприятного режима работы фотоприёмника, идеальным считается случай $\chi = 2$ (реально недостижимый). Скважность характеризует количество импульсов логических единиц в определенном количестве тактовых интервалов. Отсюда найдём интенсивность потока:

$$P_{\mathbf{И} \geq 1} = I_{\mathcal{E}} \cdot \Delta t \cdot \chi, \quad \text{или} \quad I_{\mathcal{E}} = (\Delta t \cdot \chi)^{-1} \approx 1.3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}. \quad (5.10)$$

Полученное значение соответствует реально наблюдаемому сигналу данных по потоку Е1 (в рабочее время).

В рассматриваемом примере закон преобразования случайных чисел, аналогичный (5.6) и (5.7) для потока информационных единиц, выглядит следующим образом:

$$z^{\text{сигн}} = F_{\text{Эрл}}^{-1} \left[I_{\text{Э}}^{-2} \cdot \int_0^t t \cdot e^{-I_{\text{Э}} \cdot t} \cdot dt \Big|_{t=z^{(I)}} \right]. \quad (5.11)$$

Аналогично в [132] с использованием последовательности $[z^{(II)}]$ моделировалось значение девиации временного интервала для цифровых плезихронных потоков Е1:

$$z^{\text{ДВИ}} = F_{\text{ДВИ}}^{-1} \left[\int_0^t \mathfrak{Z}_{\text{ДВИ}}(t) \cdot dt \Big|_{t=z^{(II)}} \right]. \quad (5.12)$$

В (5.12) $F_{\text{ДВИ}}^{-1}$ - функция, обратная к интегральному распределению случайной величины девиации временного интервала; $\mathfrak{Z}_{\text{ДВИ}}(t)$ - плотность вероятности распределения случайной величины девиации временного интервала. Функция $\mathfrak{Z}_{\text{ДВИ}}(t)$ в [132] была определена путём проведения измерений значения ДВИ на узлах связи моделируемого сегмента. Интегрирование (5.12) проводилось в численном виде. Случайная реальная длительность тактового интервала $\tau_{\text{пер}}$ принимала значение

$$\tau_{\text{пер}} = z^{\text{ДВИ}} \cdot \Delta t. \quad (5.13)$$

Последовательность $[z^{(III)}]$ использовалась для получения функции джиттера $\tilde{\Phi}^{\text{Е1}}$ в соответствии с определённой стандартом [11] равномерно распределённой его плотностью вероятности. Джиттер в телекоммуникационных системах возникает под действием многих факторов – ошибок при перемещениях указателя АСГ, появлении некорректных сигнальных компонентов, различного рода нарушениях и т.д. Подробное изложение материала о фазовых дрожаниях цифрового сигнала, в том числе джиттере, и причинах их появления в сети представлено в разделе 2.2.1 и Приложении F. Здесь дополнительно добавим, что в результате действия джиттера возникает либо размытие фронтов импульсов, либо несоответствие реальной (возможно, чёткой) формы фронта тому положению, которое регламентировано «маской» приёмника. Амплитуда джиттера равна длительности этого размытия на протяжении тактового интервала, рис. 5.5, а, либо величине несоответствия реальной границы фронта требуемому положению. Частота джиттера определяет скорость изменения значения его амплитуды со временем, рис. 5.5, б. Фазовое дрожание именуется джиттером, если его амплитуда меняется с частотой выше 10 Гц, в противном случае фазовое дрожание называется вандером (см. разд. 2).

Так, амплитуда джиттера, равная $t_{\text{дж}}$, может быть получена по принципу «одно число $z^{(III)}$ на один такт»:

$$t_{\text{дж}} = z^{\text{дж}} = z^{(III)} \cdot 0.15 \cdot \Delta t. \quad (5.14)$$

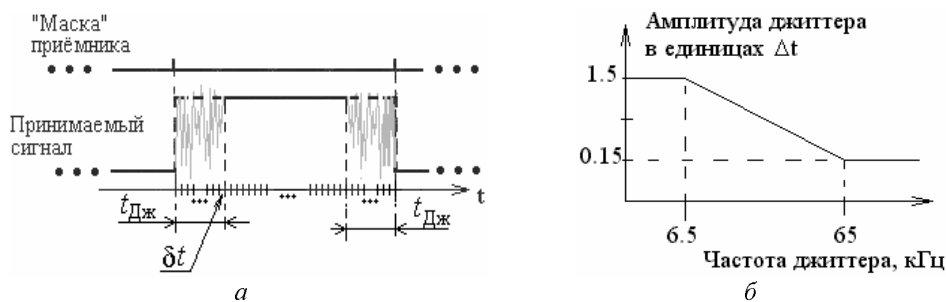


Рис. 5.5. Иллюстрация джиттера: *a* – феноменологическое представление джиттера в такте, области $t_{Дж}$ характеризуют амплитуду джиттера; *б* – допустимая маска джиттера по [11].

В [132] предполагалось, что на протяжении времени $t_{Дж}$ фронты импульса претерпевают размытие, как показано на рис. 5.5, *a*, что, безусловно, было отражено в расчётах – при определении случайной амплитуды импульса на протяжении времени $t_{Дж}$ и соответствовало реально исследуемой телекоммуникационной задаче. В общем случае, как уже говорилось, джиттер может выглядеть как отставание (опережение) реального фронта по отношению к нормативному моменту времени его прихода, что является достаточно распространённым случаем. Тогда на протяжении времени $t_{Дж}$ методика определения реальной амплитуды импульса должна быть изменена. Кроме того, такая методика должна зависеть и от типа приёмного решающего устройства. Так, приёмники, принимающие решение по значению энергии в такте, начинают отсчитывать энергию с нормативного момента времени (т.е. в соответствии с «маской»). По этой причине размытие фронтов импульса, пришедшего, тем не менее, вовремя, не приведёт к нарушению приёма. Это не остаётся справедливым для приёмников, принимающих решение по значению амплитуды, сохраняющейся на протяжении времени $\tau_{пр}^{реш}$, так как интервал длительностью $t_{Дж}$ неопределённой амплитуды сокращает реальное время принятия решения. Если джиттер представляет собой нарушение времени поступления чётко выраженного фронта в приёмник, то как для первого, так и второго типа приёмника вероятность ошибки возрастает: полученная энергия в такте оказывается меньше на величину порядка $t_{Дж} \cdot A_{реал}$, а также сокращается время принятия решения. Следовательно, по той причине, что методика моделирования джиттера представляет весьма узкую задачу, имеющую специфическое решение в каждом отдельно рассматриваемом случае, здесь это рассматриваться не будет. Поясним только, что в [132] джиттер моделировался в виде размытых фронтов, поэтому на протяжении времени $t_{Дж}$ к действию шума, искажающего форму идеального импульса, добавлялась ещё одна значащая составляющая, собственно, и приводящая к такому заметному размытию, рис. 5.5, *a*.

Псевдослучайная последовательность $[z^{(IV)}]$ предназначена для формирования шумовой функции \tilde{H}^{E1} . Так как действующий в канале шум в подавляющем большинстве случаев соответствует Гауссову распределению [5, 8, 9, 10, 13, 14, 31 и др.], то случайные числа z^m преобразуются из $[z^{(IV)}]$ с нормальным распределением в интервале $[-3\sigma^{E1}, 3\sigma^{E1}]$ вокруг математического ожидания $\langle \tilde{H}^{E1} \rangle$:

$$z^m = F_{\text{шум}}^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma^{E1}} \cdot \int_{-\infty}^m \exp \left(-\frac{(\mathfrak{m} - \langle \tilde{H}^{E1} \rangle)^2}{2(\sigma^{E1})^2} \right) \cdot d\mathfrak{m} \right]_{\mathfrak{m}=z^{(IV)}}, \quad (5.15)$$

где \mathfrak{m} - переменная интегрирования. В [132] было принято: $\langle \tilde{H}^{E1} \rangle \cong 83 \dots 85$ мкВт, $\sigma^{E1} \cong 150$ мкВт, если уровень мощности логической единицы составляет около 1 мВт.

Моделирование шума в [132] в тактовом интервале с произвольным номером $\ell \in [1, \tilde{N}]$ производилось следующим образом. Реальная длительность такта, полученная с учётом $[z^{(II)}]$, разбивалась на достаточное число (равное количеству чисел в $[z^{(IV)}]$) интервалов длительностью δt , рис. 5.5, а. На каждом из участков δt вычислялась реальная амплитуда сигнала исходя из соответствующего этому участку числа $z^{(IV)}$ и передаваемого значения оптической мощности (0 или 1):

$$A_{\text{реал}}(\delta t) = A^{(1)} \cdot z^m(\delta t) \quad \text{или} \quad A_{\text{реал}}(\delta t) = A^{(0)} \cdot z^m(\delta t). \quad (5.16)$$

На рис. 5.4 представлена статистическая модель цифрового сигнала, полученная в [132] с использованием соотношений вида (5.10), (5.11), (5.12), (5.14) и (5.16). Данная модель имитирует поток Е1, передаваемый в линейном коде СМ1 и отражает особенности искажённого сигнала, имеющего место в исследуемом сегменте системы телекоммуникаций.

5.2.2. Подход к статистическому моделированию работы аппаратных устройств

Так как при передаче сигналов в системе телекоммуникаций определяющее значение имеет работоспособность оборудования линейного тракта, то для полноценной имитации работы ВОСП необходимо произвести моделирование реального процесса их преобразования в ОЛТ. Важной особенностью современной телекоммуникационной аппаратуры является многоканальность, что по отношению к рассматриваемой задаче означает наличие нескольких физически различных путей, по которым передаются сигналы. В отличие от этого заметим, что в канале (за исключением радиоканала) все сигналы абонентов, уплотнённые в единый групповой сигнал, передаются по физически единственному пути. И воздействие какой-либо помехи сказыва-

ется на всей этой совокупности одинаково, а возникающее в общем случае различие в уровне искажений наблюдается во времени, но не в пространстве. Что касается сетевой аппаратуры, то вполне может иметь место различие в работоспособности стоящих параллельно функциональных узлов, что приводит к отличию по уровню искажений в обрабатываемых сигналах. Расшифровать наблюдаемые искажения можно путём описания функциональных узлов оборудования на базе матричной математической модели, подробно изложенной в главе 3 настоящей монографии.

Необходимо пояснить, что понимается под «функциональными узлами» и в чём принципиальное отличие последних, например, от компонентов блок-схемы, конструктивной схемы и т.д., изображённой в том числе на рис. М.1 (Приложение М) для мультиплексора, который рассматривается в представленном там примере. *Функциональный узел* аппаратуры в понимании указанного моделирования – это такой физический компонент, который может быть описан одной матрицей объекта АСГ (см. главу 3). Очевидно, что данное определение не может претендовать на строгую академичность, тем не менее оно является понятным с технической точки зрения. Функциональным узлом может являться как одна микросхема, так и ряд взаимодействующих микросхем в зависимости от их строения, предназначения в процессе обработки сигналов и вида описывающей их матрицы АСГ.

Придать понятиям более конкретный вид и внести ясность в рассуждения может конкретный пример, который и приведён ниже. В нём представлено описание терминального мультиплексора типа I.1 (сокращённо ТМ.I.1), который служит для объединения 63-х потоков E1 в синхронный модуль STM-1 и исследовался в [132]. Изучив пример, читатель вполне может по аналогии провести моделирование любого другого телекоммуникационного устройства. Отметим только, что задача моделирования реальной работоспособности многоканальных аппаратных устройств ВОСП в общем случае может решаться не обязательно на основе векторных матриц. Представленный в главе 3 метод является лишь одним из способов такого описания, по мнению авторов, обладающий достаточной наглядностью. Ясно, что могут существовать и другие подходы. Не менее очевидно, что необходимость в моделировании процесса преобразования сигналов в ОЛТ существует не в каждой телекоммуникационной задаче. Способ с использованием векторных матриц является всё же достаточно громоздким и требует применения специальных программных средств. Так, в ряде случаев достаточно ограничиться моделированием воздействия канала, считая аппаратуру идеальной, согласно известной математической модели МКС [8]. Для моделирования реальной работоспособности ОЛТ необходимы соответствующие предпосылки, хотя, с другой стороны, при наличии таковых (например, если требуется узнать, как битовая ошибка в групповом сигнале повлияет на правильность приёма одного из компонентных сигналов) матричная математическая модель МКС обладает существенной аналитичностью и широтой.

Пример

Итак, пусть необходимо провести моделирование процесса преобразования сигналов в ОЛТ, в частности – процесса уплотнения 63-х потоков E1 в синхронный модуль STM-1, с учётом реальной работоспособности устройства ТМ.1.1.

Осуществить моделирование можно с применением матричной математической модели многоканальных систем, в данной задаче - АСГ, путём представления функциональных аппаратных узлов ТМ.1.1 в виде матриц объектов АСГ. Для мультиплексора, построенного на интегральных микросхемах серии Level ONE, за функциональные узлы можно принять элементы схемы: *LPA*, *LPT*, *LPC*, *HOA* и *HPC*, см. рис. 2.3. При этом необходимо использовать следующие псевдослучайные последовательности:

- 63 для задания трёх матриц [*LPA*] – в каждом блоке по 21-й,
- 63 для трёх [*LPT*],
- 63 для трёх [*LPC*],
- 3 для трёх [*HOA*] и
- 3 для единственной [*HPC*].

При моделировании используются положения разделов 3.2 и 3.3, где с целью большей понятности элементы матриц и сами матрицы поименованы в соответствии с рассматриваемым примером. Ввиду наличия как минимум двух путей преобразования сигналов вида $63 \times E1 = STM-1$, см. рис. F.1, для внесения однозначности обозначим, что в данной задаче выбран путь ... TUG-2 → VC-3 → AU-3 → AUG1.... Этот же путь обозначен на блоках мультиплексора на рис. M.1. Следовательно, в общей сложности необходимо получить 195 псевдослучайных числовых последовательностей. Если же ставится задача моделировать работу не отдельно рассматриваемого мультиплексора, а сегмента системы передачи, содержащего канал и аппаратуру на приёмном узле, то последним также ставятся в соответствие векторные матрицы согласно их функциональной структуре. Так, в [132] оптоволоконный канал был описан вектор-столбцом [●] для каждого из рассматриваемых участков ВОСП.

Как было показано в главе 3, в общем случае элементы векторных матриц могут представлять функциональные зависимости. В рассматриваемом случае предположим, что элементы являются рациональными числами, принадлежащими интервалу $[0, 1]$, и пусть эти числа характеризуют передаточную функцию того или иного узла. Так, элементы строки (столбца), расположенные по направлению хода времени, должны быть получены из какой-то одной псевдослучайной последовательности путём преобразований вида (5.5), если выбрана функция распределения вероятности. Для идеального сегмента сети такие матрицы будут содержать единицы (характеризующие узлы мультиплексирования, присвоения заголовков) или нули (характеризующие вставку цифровых указателей).

Очевидно, что в общем случае вероятностную функцию распределения, характеризующую работоспособность функционального узла, задать невозможно. Более того, определение такой функции является весьма сложной

составляющей при проведении моделирования. Тем не менее, решая конкретную техническую задачу, можно рассчитывать на упрощающие предположения. Так, в [132] решение было найдено для случая, когда случайный процесс изменения элементов матриц на протяжении хода времени может быть аппроксимирован марковским процессом Орнштейна-Уленбека [137], см. также Приложение М. Обоснованием этому служили результаты измерений параметров (в частности, напряжённости электрического поля) кратковременных нестационарных случайных помех, имеющих место на узлах связи. Вообще в задачах теории связи в большинстве случаев справедливо применение случайных марковских процессов, последовательностей и цепей [7, 8, 36, 136 и др.], что, по-видимому, адекватно отражает реально происходящие физические процессы. По этой причине в Приложении М кратко представлены основные понятия из данной области, а также схема проведения статистического моделирования элементов векторных матриц АСГ применительно к рассматриваемому примеру.

Задать характер изменения значений элементов векторных матриц можно и другим способом, например, с применением стандартов, регламентирующих изменение свойств электронных, оптоэлектронных и оптических устройств по причине старения или под влиянием внешних факторов. Как правило, это стандарты электронной промышленности либо из области машиностроения.

В представленном примере статистического моделирования значений элементов векторных матриц (см. Приложение М) произведено определение наиболее вероятного значения произвольного элемента (рассуждения проведены относительно некоторого обобщённого элемента, обозначенного через \mathfrak{A}) к задаваемому наперёд моменту времени в предположении, что случайный процесс его изменения является марковским и имеет функцию плотности вероятности Орнштейна-Уленбека. Следовательно, к моменту времени, равному $t \cdot \Delta t$ от начала наблюдения в j -м канале (по которому проходит j -й поток Е1 от входного порта к выходному) для устройства ТМ.1.1, расположенного на k -м сетевом узле рассматриваемого сегмента ВОСП, получены

следующие значения текущих элементов векторных матриц: $\mathfrak{A}_{tj}^{[LPA]^{(k)}}$, $\mathfrak{A}_{tj}^{[LPT]^{(k)}}$,

$\mathfrak{A}_{tj}^{[LPC]^{(k)}}$, $\mathfrak{A}_{tj}^{[HOA]^{(k)}}$ и $\mathfrak{A}_{tj}^{[HPC]^{(k)}}$. Как уже говорилось, эти величины принадлежат интервалу $[0, 1]$. Преобразования входного сигнала в j -м канале (в соответствующий момент времени) вида рис. 5.4, проводимые в мультиплексоре по схеме (3.21)...(3.32), позволяют получить значение амплитуды выходного сигнала. Если интервал Δt равен тактовому интервалу, то в преобразованиях участвует среднее за время Δt значение амплитуды входного сигнала, соответственно, в результате преобразований получается также среднее значение. Более информативным будет моделирование, если Δt представляет собой время,

меньшее длительности такта (или то же самое, что δt , см. (5.15) и способ моделирования шума на протяжении тактового интервала), что позволит учесть форму импульса в такте и рассогласование в сети – см. также соотношения (3.34), (3.36) и (3.37) с пояснением по рис. 3.3, 3.4. В [132] моделирование было проведено в предположении, что шаг по времени в 1000 раз меньше тактового интервала компонентного сигнала в системе передачи. В результате чего выходной сигнал мультиплексора содержит информацию об искажениях, вносимых преобразующей аппаратурой с учётом входного шума и возможного рассогласования в длительностях принимаемого тактового интервала с «маской» приёмника.

Очевидно, что полученный результат может характеризовать помехоустойчивость сегмента системы телекоммуникаций, т.е. даёт возможность определять вероятность битовой ошибки PE в выходном сигнале. В [132] предложена статистическая методика нахождения $PE_{\ell_j}^{(k)}$, которая имеет широкую применимость для подобного моделирования и представлена в следующем подразделе. Важной характеристикой надёжности в телекоммуникационных системах выступает коэффициент готовности сегмента (см. разд. 1.2), устройства и т.д. Согласно [27], *коэффициент готовности равен вероятности нахождения данного объекта в работоспособном состоянии к рассматриваемому моменту времени от начала наблюдения*. Причём в нормативных документах систем телекоммуникаций не уточняется, должен ли работоспособный объект иметь идеальную передаточную функцию (что, заметим, невозможно, и коэффициент готовности такой сети как вероятность данного состояния почти всегда будет равен нулю), либо реальную передаточную функцию, но тогда неоднозначным является вопрос, какую в количественном отношении.

Представленная же статистическая модель системы передачи позволяет определять не только значение передаточной функции объекта, но и вероятность полученного значения. Так, в приводимом примере итоговые величины \mathfrak{A} были взяты как значения с наибольшей, но вполне конкретной вероятностью, определяемой в данном случае из уравнения Орнштейна–Уленбека с последующим интегрированием и определением максимума функционала, см. Приложение М. Иными словами, про найденное значение передаточной функции \mathfrak{A} к моменту времени с номером ℓ всегда можно сказать, с какой вероятностью $P_{\mathfrak{A}}$ оно найдено. Следовательно, о том, работоспособна ли эта конкретная сеть в рассматриваемый момент времени, можно судить по итоговой величине PE , а коэффициент готовности может быть определён по аналогии с (1.3) через произведение вероятностей состояний, что в рассматриваемом примере имеет место:

$$\mathbf{K}_{\text{red } \ell_j}^{(k)} = P_{\mathfrak{A}}^{[LPA]} \cdot P_{\mathfrak{A}}^{[LPT]} \cdot P_{\mathfrak{A}}^{[LPC]} \cdot P_{\mathfrak{A}}^{[HOA]} \cdot P_{\mathfrak{A}}^{[HPC]}. \quad (5.16)$$