

В.И. Тихонов

**Статистическая
радиотехника**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 621.39
ББК 32
В11

В11 **В.И. Тихонов**
Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов – М.: Книга по Требованию,
2024. – 678 с.

ISBN 978-5-458-37876-5

Приведены необходимые сведения из теории вероятностей и математической статистики, подробно изложена прикладная теория разных видов случайных процессов и рассмотрено их влияние на работу нелинейных и линейных систем. На базе теоретических сведений подробно рассмотрены разнообразные содержательные радиотехнические задачи. В книгу включены вопросы программ-минимумов кандидатских экзаменов по нескольким радиотехническим специальностям. Для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, специализирующихся в области радиотехники и автоматического управления.

ISBN 978-5-458-37876-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Не касаясь специфических особенностей, характерных для отдельных отраслей радиотехники (радиосвязь, радиолокация, радионавигация, телеметрия, телевидение и др.), в качестве типовых можно указать функциональную схему, представленную на рис. 1. Она состоит из двух симметричных частей: передающей и приемной.

Под сообщением понимаются любые сведения или данные, подлежащие передаче. По своей физической природе сообщения могут быть механическими, тепловыми, световыми и электрическими. Для того чтобы сообщения можно было передавать на большие расстояния, необходимо сформировать радиосигналы, отображающие сообщения. С этой целью неэлектрические сообщения преобразуют в электрические сигналы при помощи соответствующих преобразователей. При этом обычно стремятся к тому, чтобы зависимость между интересующей нас физической величиной (сообщением) и ее электрическим аналогом (сигналом) на выходе преобразователя была линейной. В передатчике сигнал преобразуется в радиосигнал.

Радиосигнал при помощи передающей антенны излучается в окружающее пространство, распространяется в нем и посредством приемной антенны воздействует на вход радиоприемника. В приемнике радиосигнал усиливается до необходимой величины, превращается в сигнал (при помощи детектирования), преобразуется в нужное сообщение и затем поступает к получателю — конечному устройству или лицу, для которого предназначено сообщение.

Основное требование, обычно предъявляемое к системам радиосвязи, состоит в достоверной и своевременной передаче большого количества информации на большие расстояния при ограниченной мощности передатчика. Ясно, что ложные, запоздалые или неполные сведения обесценивают полученную информацию, так как не позволяют оперативно принимать правильные решения.

Достоверности передачи информации по реальным линиям радиосвязи препятствуют три причины: 1) неизбежное наличие внешних и внутренних помех, 2) искажения радиосигнала при распространении через турбулентную атмосферу и ионосферу, 3) техническое несовершенство устройств.

Искажения сообщения, возникающие в результате прохождения его через технически несовершенную аппаратуру, в принципе

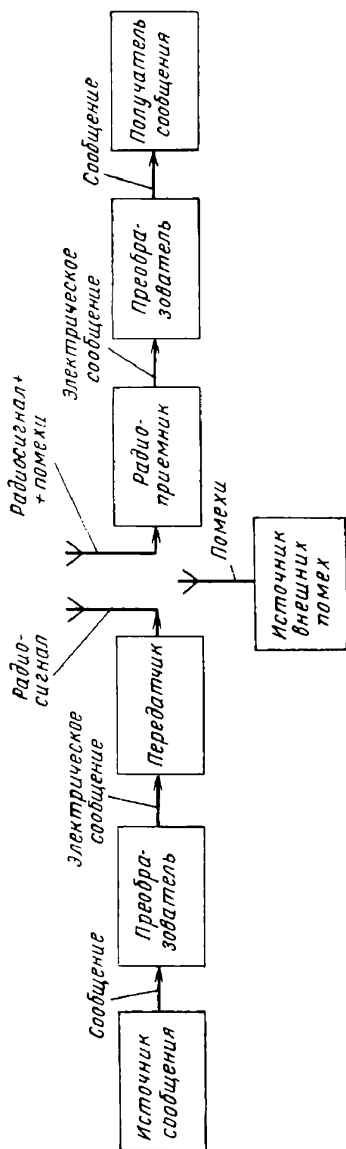


Рис. 1. Система радиосвязи.

могут быть уменьшены путем ее улучшения. Помехи и искажения радиосигнала при распространении обусловлены неподвластными нам причинами.

Действительно, вследствие распространения электромагнитных волн через турбулентную атмосферу и ионосферу, обладающих случайными коэффициентами поглощения и преломления, неизбежно происходит случайная модуляция радиосигнала по амплитуде, частоте и фазе.

Внешние помехи принимают антенной вместе с сигналом (рис. 1). Они создаются различными естественными электромагнитными процессами, происходящими в атмосфере, ионосфере и космическом пространстве (космические шумы, атмосферные помехи и т. д.), электроустановками и соседними радиостанциями, а также преднамеренными средствами, применяемыми противником для создания помех (пассивные отражатели и радиостанции помех).

Кроме перечисленных внешних источников помех имеются другие, внутренние, локализованные в различных элементах схемы рис. 1. Сюда можно отнести флуктуационные шумы ламп, полупроводниковых приборов и сопротивлений потерь, микрофонный эффект, обусловленный механическими вибрациями, нестабильности питающих напряжений и др.

Во многих практических случаях прием сигналов должен осуществляться при небольших значениях отношения

сигнал/помеха. Это объясняется следующими обстоятельствами. При ограниченной мощности передатчика сигнал на большой дальности оказывается слабым. С другой стороны, необходимость иметь большую скорость передачи информации (т. е. передачу большого количества сведений в единицу времени) требует расширения полосы рабочих частот, что связано с увеличением уровня помех.

Помехи и искажения радиосигнала уменьшают вероятность правильного приема переданного сообщения. Поэтому принимаемое сообщение всегда оказывается не предсказуемым, а в той или иной мере случайным. Многие задачи радиотехники становятся бессодержательными без учета наличия помех и искажений радиосигнала.

В дальнейшем мы убедимся, что чем больше предварительных сведений известно о сигнале и помехах, тем лучше можно выполнить указанные выше требования, предъявляемые к системе радиосвязи. Отсюда следует необходимость изучения случайных сигналов и помех.

Математический аппарат, позволяющий описывать и оперировать со случайными величинами и случайными процессами, дает теория вероятностей. Сведения по теории вероятностей и случайным процессам излагаются в первом разделе данной книги.

Второй раздел посвящен анализу работы радиотехнических устройств при наличии помех. Здесь задача ставится так. Предполагая известными характеристики сигнала и помехи, нужно количественно оценить влияние помех на работу радиоустройств. Поскольку радиоустройства представляют различные комбинации линейных и нелинейных элементов, то задача, по существу, сводится к анализу прохождения сигнала и шума через линейные и нелинейные системы. Необходимая степень детальности такого анализа в значительной мере определяется тем количественным критерием, который оценивает влияние помех.

На первый взгляд может показаться, что сформулированная задача анализа работы радиотехнических устройств при наличии помех не имеет особого значения. При разработке радиотехнических устройств всегда стремятся к тому, чтобы принятое сообщение было по возможности тождественно переданному. Поэтому целесообразно сразу ставить и решать задачу синтеза радиотехнических устройств при работе в условиях помех.

Задача синтеза формулируется следующим образом. Предполагая заранее (априорно) известными некоторые характеристики сигнала и помех, нужно найти функциональную схему идеального радиоприемного или решающего устройства, которое бы воспроизводило переданное сообщение с наименьшими искажениями в определенном смысле. Конкретные варианты этой задачи будут рассмотрены в третьем разделе книги «Оптимальные методы радиоприема».

Решение задачи синтеза позволяет получить два важных результата: во-первых, выяснить схему оптимального радиоприемного или решающего устройства, которое при данном способе передачи обеспечивает наилучшее решение конкретной задачи, и, во-вторых, найти его рабочие характеристики (например, вероятность правильного решения, предельную точность и т. д.). Сравнивая характеристики оптимального радиоприемника с характеристиками реального, можно судить о том, целесообразно ли работать над техническим усовершенствованием последнего. Сравнение же характеристик оптимальных приемников для различных методов передачи позволяет установить наилучшие методы передачи, т. е. выбрать оптимальные виды сигналов. Следовательно, теория оптимальных методов радиоприема позволяет указать рациональные пути при разработке радиотехнических устройств и оценить предельно достижимые точности их работы в заданных условиях.

Однако синтез радиотехнических устройств не исключает задачу анализа. Дело в том, что во многих случаях практики затруднительно точно реализовать оптимальные устройства как по соображениям их сложности, так и ввиду отсутствия элементов, которые бы адекватно осуществляли нужные математические операции. Различие между реальными и оптимальными устройствами приводит к тому, что оценка искажений сигналов в реальных устройствах может быть получена из решения задачи анализа.

Настоящая книга содержит четвертый раздел—«Теория информации». Основное назначение его состоит в установлении теоретически предельных возможностей канала связи в отношении скорости безошибочной передачи информации. Общий смысл этого раздела заключается в том, что при передаче информации по каналу связи возможна безошибочная передача при условии, если скорость передачи не превосходит некоторого максимального значения. При этом в принципе существует способ кодирования, обеспечивающий безошибочную передачу со скоростью, сколь угодно близкой к максимальной.

Материал указанных четырех разделов является необходимой основой для грамотного конструирования различных радиотехнических устройств и систем с учетом случайного характера реальных радиосигналов при наличии помех. Знание этого материала также необходимо при анализе влияния помех на работу конкретных радиоустройств.

Раздел I

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

§ 1. О ВЕРОЯТНОСТНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ

Все происходящие в мире явления связаны с бесчисленным множеством других явлений. Избрав какое-либо явление объектом изучения, мы обнаруживаем, что среди этих связей есть существенные, действие которых определяет основные черты изучаемого явления, но есть и несущественные, оказывающие влияние лишь на некоторые второстепенные его особенности. При изучении явления необходимо выделить и учесть все существенные связи и одновременно отвлечься от несущественных подробностей, обусловленных побочными связями. Таким образом, анализу подвергается не само явление во всей его сложности, а упрощенная его модель.

Изучение построенной модели приводит к установлению тех или иных количественных закономерностей. Критерием правильности принятой модели являются результаты сравнения выводов теории с данными практики, опыта.

В зависимости от принятой модели возможны два метода изучения ее: детерминистический и вероятностный (статистический).

Детерминистический метод применяется при рассмотрении детерминированной (полностью определенной) модели, для которой заранее точно известны как начальное состояние, так и внешние воздействия. Решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение системы (модели), однозначно определяет поведение системы в будущем. Например, зная начальный заряд на конденсаторе C , можно указать закон изменения во времени величины разрядного тока через параллельно присоединенное сопротивление R . Факт детерминированности означает, что при одном и том же комплексе исходных условий мы будем получать каждый раз один и тот же результат.

Детерминированные модели правильно отражают не все реальные явления, и правомерность применения детерминированной модели для одного и того же явления зависит от необходимой степени детальности изучения его. Допустим пока, что мы хотим знать поведение молекулы определенного объема газа. Для этого нужно бы-

ло бы точно указать координаты и скорости всех молекул в некоторый начальный момент времени, по законам механики составить систему дифференциальных уравнений и затем решить ее. На пути реализации такого метода пришлось бы столкнуться с непреодолимыми трудностями. Во-первых, принципиально невозможно указать точно положения и скорости молекул. Во-вторых, полученную систему из очень большого числа дифференциальных уравнений практически невозможно решить. К этому следует добавить, что поведение отдельной молекулы ничего не говорит о свойствах газа в целом (давлении, температуре, теплоемкости и др.). А ведь именно эти свойства, характеризующие некоторый усредненный эффект случайно движущихся молекул, представляют практический интерес. В данном примере следует отказаться от детерминистического метода и применить вероятностный, позволяющий получить нужный результат.

При вероятностном методе рассматривается статистическая модель, поведение которой в каждом конкретном испытании не может быть предсказано, но при многократных испытаниях в одних и тех же условиях подчинено определенным закономерностям. Теперь элементы случайного в явлениях не игнорируются, но по-прежнему учитываются только существенные и необходимые взаимозависимости, проявляющиеся как тенденция в массе случайных событий. Конкретные случайности индивидуального события не учитываются вследствие их частного характера.

В соответствии со сказанным выше, теорию вероятностей определяют как математическую науку, изучающую закономерности массовых случайных явлений.

Хотя все реальные процессы и явления в той или иной мере случайны, в тех случаях, когда случайные составляющие процесса не играют заметной роли, допустимо их детерминистическое рассмотрение. Напротив, в тех задачах, где случайные составляющие имеют определяющее значение, необходимо статистическое рассмотрение.

Применительно к радиотехнике роль статистических методов особенно возросла за последние годы. Это объясняется тенденцией увеличения дальности действия и повышения надежности и быстродействия современных радиотехнических устройств. При этом оказывается необходимым учитывать случайный характер передаваемых сигналов, их искажения при распространении и наличие помех.

§ 2. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ. ВЕРОЯТНОСТЬ СОБЫТИЯ

В теории вероятностей рассматриваются явления (опыты), которые при одном и том же комплексе начальных условий в зависимости от случайных обстоятельств заканчиваются различными ис-

ходами (событиями). При этом, говоря об одном и том же комплексе начальных условий, подразумевают, что остаются без изменения основные существенные обстоятельства опыта.

В связи с тем, что заранее предсказать точный исход случайного опыта нельзя, при изучении случайных явлений возникает следующий кардинальный вопрос: как часто наступает то или иное событие при многократных испытаниях? Например, какая доля заявок (вызовов), поступающих на телефонную станцию, получает отказ; или какая доля электронных ламп, установленных в вычислительной машине, выходит в течение некоторого фиксированного времени из строя?

Пусть при N -кратном повторении опыта некоторое событие A произошло n случаев. Относительной частотой события A называется отношение числа испытаний, в которых появилось событие A , к общему числу произведенных испытаний:

$$v(A) = n/N.$$

Из-за случайных причин число v при разных значениях N и в разных сериях из N опытов одинаковой длины будет получаться различным. В качестве примера в табл. 1.2.1 приведены результаты некоторого опыта по бросанию монеты в зависимости от числа бросаний. Возможные исходы каждого бросания условно обозначены как 0 и 1. В третьей строке таблицы приведена относительная частота появления единицы.

Таблица 1.2.1.

Результаты опыта по бросанию монеты

Количество бросаний	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Исход бросаний	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
$v(1)$	1	1	2/3	3/4	3/5	1/2	4/7	1/2	4/9	4/10

Однако повседневная практика и специальные эксперименты говорят о том, что с увеличением числа испытаний сколько-нибудь значительные отклонения относительной частоты от некоторого среднего значения происходят редко. Например, в опыте с 12 000 бросаний монеты относительная частота появления герба оказалась равной 0,5016, а в опыте с 24 000 бросаний — 0,5005.

Число, около которого группируются при многократных испытаниях относительные частоты события, называется его вероятностью. Несколько изменяя формулировку, можно определить вероятность как отношение среднего числа появлений события A в N испытаниях к числу испытаний N .

Практическая ценность понятия вероятности определяется следующим обстоятельством. Хотя тот или иной исход случайного яв-

ления не может быть предугадан, однако можно рассчитывать на то, что в любой достаточно длинной серии испытаний относительная частота события будет мало отличаться от его вероятности. Чем больше вероятность события, тем чаще в достаточно длинной серии испытаний оно происходит, и наоборот.

Это позволяет людям строить свою практическую деятельность так, как если бы рассматриваемые события осуществлялись в соответствии с их вероятностью. Естественно, например, послать на соревнование того спортсмена, который ранее показывал лучшие результаты, или применять тот вид бомбометания, который в аналогичных условиях давал наибольший процент попаданий, или использовать тот метод лечения, который дал наибольший процент выздоровлений, хотя во всех этих примерах нет полной гарантии того, что в данном конкретном случае принятый вариант приведет к наилучшему исходу.

Учитывая органическую связь, существующую между относительной частотой события γ и его вероятностью p , а также то, что относительная частота есть неотрицательная величина, не превосходящая единицы, следует считать, что вероятность $p(A)$ некоторого события A удовлетворяет тем же ограничениям, т. е.

$$0 \leq p(A) \leq 1. \quad (1.2.1)$$

Событие, вероятность которого равна единице, называется достоверным, а событие с нулевой вероятностью — невозможным.

Следует иметь в виду, что понятия достоверного и невозможного событий в теории вероятностей несколько шире общепринятых. Хотя событие, имеющее вероятность, равную единице, происходит практически всегда, но в принципе не исключено, что при каком-то частном испытании оно не наступит. Аналогично не исключается принципиальная возможность появления события с нулевой вероятностью. Например, вероятность человеку прожить точно 5 лет, 3 дня, 5 часов и 20 секунд равна нулю, но тем не менее такое событие возможно.

Выше было сформулировано так называемое статистическое определение вероятности. При всей своей практической значимости оно имеет тот недостаток, что не дает указаний к вычислению вероятности некоторого события иначе как путем статистических испытаний. Познакомимся теперь с так называемым классическим определением вероятности.

В любой научной теории, в том числе и в теории вероятностей, существует некоторое число изначальных истин, которые нельзя путем логических рассуждений свести к еще более элементарным истинам. Если практика или специально поставленные эксперименты подтверждают их справедливость, то они принимаются без каких-либо дополнительных теоретических выкладок, т. е. как аксиомы.