

МОДЕЛИ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОМЕХ

3.1 Общие сведения о помехах

Помехи представляют собой постороннее воздействие, приводящее к искажению передаваемого сигнала и затрудняющее правильный его прием и выделение сообщения.

Источники помех могут находиться внутри самой системы передачи информации и вне ее. Внутренние помехи обусловлены в основном тепловым хаотическим движением электронов. Источниками таких помех служат электронные лампы, полупроводниковые приборы, активные сопротивления, резонансные контуры и т. п. К внешним помехам относятся атмосферные, космические помехи, помехи от посторонних радиосредств и каналов и индустриальные.

Столь большое разнообразие источников помех приводит к значительному различию структуры и вероятностных характеристик помех. По закону распределения мгновенных значений помехи подразделяют на гауссовские и негауссовские. Большинство помех имеют негауссовский закон распределения. К гауссовским помехам уверенно можно отнести лишь тепловой шум. По структуре и статистическим характеристикам помехи обычно подразделяют на следующие три основные группы: флуктуационные (гладкие), импульсные (сосредоточенные по времени) и синусоидальные (сосредоточенные по спектру частот, или стационарные) помехи.

В подавляющем большинстве случаев помехи представляют собой стационарные или нестационарные случайные процессы (импульсные потоки), которые наиболее полно описываются многомерной плотностью распределения вероятностей. Однако многомерные плотности распределения вероятностей легко получаются лишь для случайных помех с независимыми значениями, т. е. процессов типа белого шума.

В данной книге в качестве основной модели будут рассматриваться модели гауссовских и негауссовских помех с независимыми значениями, требующие минимальную информацию о помехе в виде одномерной плотности распределения

вероятностей. Заметим, что получаемые при этом оценки помехоустойчивости систем передачи могут служить верхней границей, так как более полное знание статистических характеристик помех может быть использовано для повышения помехоустойчивости.

Иногда негауссовские помехи подразделяют на импульсные и синусоидальные по форме одномерного распределения вероятностей мгновенных значений или амплитуд. Импульсные помехи характеризуются частыми большими выбросами и описываются распределениями вероятностей с положительным эксцессом. Синусоидальные помехи в противоположность импульсным имеют редкие выбросы за пределы диапазона наиболее вероятных значений и описываются распределениями с отрицательным эксцессом.

Напомним, что эксцесс служит для характеристики так называемой крутости, т. е. остро- или плосковершинности распределения. Эксцесс случайной величины X

$$E_x = (m_4(x)/\sigma_x^4) - 3,$$

где $m_4(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_1)^4 w(x) dx$ — четвертый центральный момент распределения;

σ_x^2 — дисперсия распределения $w(x)$.

Число 3 вычитается из отношения $m_4(x)/\sigma_x^4$ потому, что для весьма важного и распространенного гауссовского распределения $m_4(x)/\sigma_x^4 = 3$.

В общем виде влияние помехи $n(t)$ на передаваемый сигнал $s(t)$ может быть выражено оператором $y(t) = V[s(t), n(t)]$

В случае вырождения этого оператора в сумму

$$y(t) = s(t) + n(t)$$

помеху $n(t)$ называют аддитивной. Если же оператор V может быть представлен в виде

$$y(t) = v(t) s(t),$$

где случайный процесс $v(t)$ неотрицателен, то помеху $v(t)$ называют мультипликативной.

Мультипликативные помехи возникают из-за изменения во времени амплитудных и фазовых характеристик канала связи в целом или его отдельных звеньев. Мультипликативные изменения в сигнале появляются при прохождении последних через среду с изменяющимися во времени параметрами (например, ионосферу), а также в многолучевых кана-

лах, вследствие рассогласования структуры и параметров приемного устройства относительно структуры и параметров сигнала-переносчика (например, из-за расстройки по частоте) и т. п. В общем случае мультипликативная помеха приводит к амплитудным, фазовым и временным искажениям, причем всегда подразумевается, что помеха представляет собой более быстрый по сравнению с модулирующим сигналом процесс. При обратных соотношениях воздействие модулирующей помехи сводится к замиранию (федингу) сигнала, и в этом случае обычно говорят о сигнале с флуктуирующей амплитудой и начальной фазой.

В данной книге основное внимание уделено исследованию помехоустойчивости при воздействии аддитивных помех. Следует также отметить, что часто мультипликативное воздействие может быть сведено к аддитивному. Более подробно остановимся на основных моделях и характеристиках различных видов аддитивных помех.

3.2. Структура и статистические характеристики флуктуационных помех

Флуктуационные помехи (шумы) являются наиболее распространенным видом помех в различных системах передачи информации. Их источниками могут быть входные элементы приемного устройства, атмосфера, Галактика, Земля и др. Этот вид помех относят к числу стационарных случайных процессов.

В большинстве случаев считают, что флуктуационная помеха имеет постоянную спектральную плотность мощности в пределах полосы пропускания исследуемой системы, т. е. она может аппроксимироваться белым шумом. Спектральная плотность мощности белого шума N_0^2 представляет собой мощность шума, выделяемую на сопротивлении 1 Ом в полосе 1 Гц, и имеет размерность Вт/Гц. Спектральная плотность мощности теплового шума без учета квантовых эффектов

$$N_0^2 = kT_0, \quad (3.1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град;

T_0 — эквивалентная температура шума, К.

На выходе узкополосного тракта со средней частотой ω_0 флуктуационную помеху можно представить в виде

$$n(t) = U_n(t) \cos[\omega_0 t + \theta_n(t)], \quad (3.2)$$

где $U_n(t) = \sqrt{2} \sqrt{n_1^2(t) + n_2^2(t)}$ — случайная амплитуда (огibaющая) флуктуационного колебания;
 $\theta_n(t) = \arctg \frac{n_1(t)}{n_2(t)}$ — случайная фаза флуктуационного колебания.

Иногда узкополосную флуктуационную помеху (3.2) удобно представить в виде суммы двух квадратурных колебаний:

$$n(t) = \sqrt{2} n_1(t) \sin \omega_0 t + \sqrt{2} n_2(t) \cos \omega_0 t, \quad (3.3)$$

где $\sqrt{2} n_1(t) = U_n(t) \sin \omega_0 t$; $\sqrt{2} n_2(t) = U_n(t) \cos \omega_0 t$ — низкочастотные огibaющие квадратурных составляющих.

Можно показать, что случайные колебания $n_1(t)$ и $n_2(t)$ имеют тот же закон распределения и ту же спектральную плотность мощности N_0^2 , что и колебание $n(t)$, т. е. мощность узкополосного шума $n(t)$ делится поровну между двумя квадратурными составляющими.

Флуктуационная помеха обычно характеризуется законами распределения мгновенных значений, амплитуды и начальной фазы. При исследовании обычно принимают, что одномерное распределение мгновенных значений флуктуационной помехи описывается гауссовским законом со средним значением, равным нулю:

$$w(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} \exp\left(-\frac{n^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (3.4)$$

где $\sigma_n^2 = N_0^2 \Delta f_0$ — дисперсия (мощность) помехи в полосе Δf_0 .

Амплитуда такой помехи U_n распределена по закону Релея

$$w(U_n) = \frac{U_n}{\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{U_n^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (3.5)$$

а фаза — по равномерному закону в пределах от 0 до 2π , т. е. для $w(\theta_n) = 1/(2\pi)$

Как и всякая случайная функция времени, флуктуационный шум полностью характеризуется многомерной плотностью вероятности $w(n_1, n_2, \dots, n_m)$, заданной для всей области возможных значений ординат. Найдем выражение для $w(n_1, n_2, \dots, n_m)$ в предположении, что спектр шума равномерен и ограничен в полосе $0 - \Delta f_0$ и наблюдается в течение времени T . Такой флуктуационный шум может быть представлен в виде ряда из $M_n = 2\Delta f_0 T$ некоррелированных

ординат (выборок). При этом M_n значений ординат n_1, n_2, \dots, n_M шума будут статистически независимы, так как при гауссовском законе распределения отсутствие корреляции означает также статистическую независимость. Известно, что в таких случаях многомерная (M -мерная) плотность вероятности равна произведению одномерных плотностей вероятности:

$$w(n_1, n_2, \dots, n_M) = w(n_1) w(n_2) \dots w(n_M) = w(n)$$

Поэтому можно написать, что

$$w(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma_n)^{M_n}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{i=1}^{M_n} n_i^2\right) \quad (3.6)$$

При достаточно больших значениях M_n ($M_n \gg 1$), что соответствует условию, когда шум можно считать белым, справедливо равенство

$$\int_0^T n^2(t) dt = \frac{T}{M_n} \sum_{i=1}^{M_n} n_i^2 = \frac{1}{2\Delta f_n} \sum_{i=1}^{M_n} n_i^2$$

и выражение (3.6) можно представить в виде

$$w(n) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \sigma_n)^{M_n}} \exp\left[-\frac{1}{N_n^2} \int_0^T n^2(t) dt\right] \quad (3.7)$$

При оптимальном приеме любого сигнала флуктуационная помеха действует во всей его полосе и имеет ту же продолжительность, что и сигнал. Поэтому число степеней свободы флуктуационной помехи равно числу степеней свободы сигнала-переносчика. $M_n = M$. В случае использования реального приемника число степеней свободы флуктуационной помехи определяется эффективной шумовой шириной полосы приемника и обычно $M_n > M$.

Определение мощности и спектральной плотности мощности помехи на входе приемника. Полная мощность флуктуационной помехи (шумов) на входе приемника определяется его собственными (внутренними) шумами, шумами антенно-фидерного устройства и внешними шумами, принимаемыми антенной из окружающего пространства.

В последнее время для удобства расчетов уровень внешних и внутренних шумов приемника и антенно-фидерного устройства оценивают по так называемой эквивалентной

шумовой температуре T_n . При этом мощность помехи (шума), приведенная ко входу приемника, с учетом формулы (3.1) связана с эквивалентной шумовой температурой зависимостью

$$P_n = kT_n \Delta f_{\text{пр}} = N_n^2 \Delta f_{\text{пр}},$$

где $\Delta f_{\text{пр}}$ — эффективная ширина полосы пропускания приемника.

Эквивалентная шумовая температура T_n приемника показывает, до какой температуры необходимо нагреть активное сопротивление, равное выходному сопротивлению приемника и подключенное к его входу, чтобы получить такую же мощность шума, какую создает рассматриваемый приемник на выходе УПЧ.

Полная (суммарная) эквивалентная шумовая температура приведенная ко входу приемника, определяется эквивалентной шумовой температурой собственно приемника $T_{n \text{ пр}}$, антенно-фидерного устройства $T_{n \text{ АФУ}}$ и внешних источников шумов $T_{n \text{ внеш}}$:

$$T_{n \Sigma} = T_{n \text{ пр}} + T_{n \text{ АФУ}} + T_{n \text{ внеш}} \eta_{\text{АФУ}},$$

где $\eta_{\text{АФУ}}$ — к.п.д. антенно-фидерного устройства, определяющий потери энергии при ее передаче.

Из приведенных выражений видно, что эквивалентная шумовая температура однозначно определяет мощность помехи (шума) P_n (в фиксированной полосе пропускания) и спектральную плотность мощности N_n^2 . Достаточно подробный расчет отдельных составляющих эквивалентных шумовых температур можно найти, например, в работе [46]. Следует отметить, что в приемниках подвижной низовой связи основной вклад в $T_{n \Sigma}$ вносят внутренние (собственные) шумы приемника, определяемые в основном шумами входных цепей контуров, транзисторов, смесителей.

Эквивалентную шумовую температуру приемника часто определяют через коэффициент шума приемника $n_{\text{ш}}$:

$$T_{n \text{ пр}} = n_{\text{ш}} T_0,$$

где $T_0 = 290 \text{ K}$ (17°C) — стандартная температура входных цепей приемника.

Коэффициент шума $n_{\text{ш}}$ зависит от типа приемника, конструкции и особенностей регулировки его входных цепей и отдельных каскадов, от частотного диапазона.

Соответственно мощность внутренних шумов приемника и его спектральная плотность:

$$P_n = N_n^2 \Delta f_{\text{пр}} = 4,0 \cdot 10^{-21} n_{\text{ш}} \Delta f_{\text{пр}};$$

$$N_n^2 \Delta f_{\text{пр}} = 4,0 \cdot 10^{-21} n_{\text{ш}}.$$

Таблица 3.1

Приемник	$T_{\text{ш пр. К}}$	$n_{\text{ш. дБ}}$
Мазер	10—30	0,2—0,3
Параметрический	30—150	0,4—1,3
Туннельный диод	100—300	1—3
Металлокерамический триод (200—300 МГц)	300—400	3—4
Лампа бегущей волны	400—600	4—10
Ламповый (1 ГГц)	1000	12—13
Транзисторный (150—300 МГц)	600—1000	10—12

Примерные значения $T_{\text{ш пр}}$ и $n_{\text{ш}}$ для приемников с различными типами входных устройств приведены в табл. 3.1.

Из приведенных в табл. 3.1 данных видно, что обычные транзисторные приемники имеют достаточно высокую эквивалентную шумовую температуру

На рис. 3.1 приведены также некоторые усредненные данные по зависимости тепловых шумов обычных приемников от частотного диапазона (кривая 3) и аналогичные зависимости для помех искусственного (промышленного) происхождения в городских условиях (кривые 1, 2) [2]. По оси ординат отложена разница в децибелах между спектральными плот-

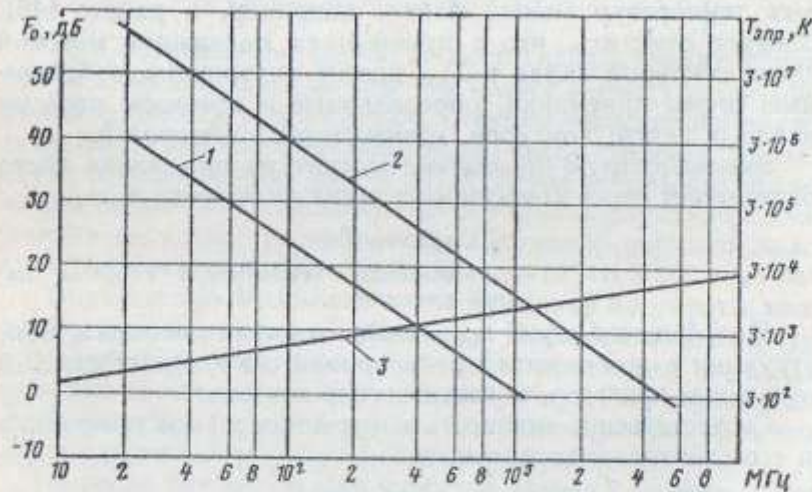


Рис. 3.1

ностями помехи искусственного происхождения и теплового шума со спектральной плотностью $N_0^2 = kT_0 = 4,0 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц.

Как следует из рис. 3.1, помехами промышленного происхождения по сравнению с собственными шумами приемника можно пренебречь лишь на частотах выше 4 ГГц.

3.3. Структура и статистические характеристики импульсных помех

Импульсная помеха представляет собой регулярную или хаотическую последовательность кратковременных импульсов. Импульсный характер, как правило, носят индустриальные помехи, создаваемые различными электрическими устройствами. На железнодорожном транспорте импульсные помехи создаются прежде всего контактной сетью электропотяги и другими искрящими устройствами

Предложено большое количество различных моделей импульсных помех, в виде неперекрывающихся и перекрывающихся импульсных последовательностей и случайных процессов с независимыми и зависимыми отсчетами и различными распределениями [47, 51, 53].

В общем случае статистические характеристики импульсной помехи (ИП) на выходе приемного устройства зависят от характеристик импульсов на входе приемника и характеристик последнего и прежде всего его избирательных свойств. Часто импульсную помеху на выходе высокочастотной части (полосового фильтра) приемного устройства рассматривают как результат ударного возбуждения резонансных контуров короткими одиночными импульсами, длительность которых меньше, а интервал следования больше времени существования переходных процессов в контурах. При этом считают, что длительность и форма импульсных помех, например, на выходе УПЧ определяются частотными свойствами его избирательной системы и не зависят от формы и длительности воздействующих входных импульсов.

При большой частоте следования отдельных ИП и относительно узкой полосе приемника отклики резонансных контуров перекрываются и импульсную помеху можно рассматривать как флуктуационную.

Следует отметить, что практически всегда в канале связи (на входе приемника) присутствуют помехи в виде гауссовского белого шума, которые аддитивно суммируются с импульсными помехами.