МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА ОШИБОК ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ В КОРОТКОВОЛНОВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ С ЗАМИРАНИЯМИ

В.Е. Дидрих, М.А. Шелковников

Тамбовский завод «Октябрь», Тамбов, Российская Федерация

Предложен способ моделирования потока ошибок при передаче данных по КВ каналу связи в условиях замираний. Для формирования потока ошибок предлагается использовать феноменологический подход к моделированию решения задачи различения при обработке цифрового сигнала. В рамках моделирования радиоканала охватывается участок, ограниченный модулятором и демодулятором модема. Рассмотренный вариант имитации замираний предполагает формирование случайного процесса, описывающего изменение уровня отношения сигнал/шум на выходе радиоканала. Адекватность полученных результатов подтверждается их сравнением с теоретически обоснованными зависимостями для вероятности ошибки в канальном бите данных при приёме двоичных цифровых сигналов в условиях релейских замираний.

Ключевые слова: моделирование, поток ошибок, передача данных, коротковолновый, канал связи, замирания, система передачи данных, модем, феноменологический подход, задача различения, имитация, цифровой сигнал, амплитуда, мощность, плотность вероятности, релейские, райсовские, математическое ожидание, дисперсия, случайный процесс, квадратурные составляющие, отношение сигнал/шум, частота ошибок, вероятность ошибок.

SIMULATION OF ERRORS DURING DATA TRANSFER IN THE SHORT-WAVE COMMUNICATION CHANNEL WITH FADING

V.E. Didrikh, M.A. Shelkovnikov

Tambov Factory "Oktyabr", Tambov, Russian Federation

A method for modeling the error flow in the transmission of data over the HF communication channel under fading conditions is proposed. To form a stream of errors, it is proposed to use a phenomenological approach to modeling the solution of the problem of distinction in digital signal processing. As part of the radio channel modeling, the area limited by the modulator and the modem demodulator is covered. The considered option of simulating fading involves the formation of a random process that describes a change in the signal-to-noise ratio at the output of the radio channel. The adequacy of the obtained results is confirmed by their comparison with theoretically justified dependences for the probability of error in the channel data bit when receiving binary digital signals in the conditions of Rayleigh fading.

Keywords: simulation, error flow, data transmission, short-wave, communication channel, fading, data transmission system, modem, phenomenological approach, distinction problem, simulation, digital signal, amplitude, power, probability density, Rayleigh, rice, expectation, variance, random process, quadrature components, signal/noise ratio, error rate, error probability.

Для оценки потенциальных характеристик систем передачи данных (СПД) построенных на основе коротковолновых (КВ) каналов связи, как правило, используются имитаторы этих каналов. Это позволяет учесть в ходе моделирования передачи данных сложные и постоянно изменяющиеся условия связи в КВ диапазоне, детальное аналитическое описание которых представляет собой достаточно сложную задачу. При этом решение подобной задачи не всегда позволяет получить желаемые результаты.

Очевидно, что в рамках анализа эффективности применения СПД с позиций реализации информационного обмена, предполагается, что имитатор КВ канала связи, по существу, формирует поток ошибок в последовательности передаваемых данных.

Подобный имитатор, определяемый как имитатор потока ошибок, при условии раздельной последовательной реализации процедур кодирования и модуляции, а так же демодуляции и декодирования, должен с достаточной степенью адекватности в различных условиях ведения связи моделировать участок СПД, включающий в себя:

- непосредственно КВ радиолинию;
- КВ радиосредства, обеспечивающие формирование канала передачи данных с заданными частотным и энергетическим ресурсами;
- модем, обеспечивающий преобразование потока данных с выхода кодера канала в цифровой сигнал при передаче и реализующий обратное преобразование на входе декодера канала при приёме (модем как модулятор и демодулятор цифрового сигнала).

Использование имитатора потока ошибок в КВ канале связи позволяет оценить:

- потенциально достижимые уровни достоверности передачи и предполагаемых потерь информации;
- корректирующие возможности применяемых помехоустойчивых кодов (в частности, свёрточных кодов и турбокодов);
- эффективность использования разнообразных процедур и протоколов обмена данными (например, таких как FEC, ARQ, ALE, LQA и т. п.).

Оценку адекватности получаемых посредством такого имитатора результатов можно провести на основе их сравнения с известными аналитическими зависимостями вероятности ошибки в канальном бите от отношения сигнал/шум или сигнал/помеха (ОСШ или ОСП), без дополнительных экспериментальных исследований [1–6].

Для моделирования потока ошибок при передаче данных в КВ канале, целесообразно использовать феноменологический подход. Он позволяет учесть в целом основные особенности построения используемого радиоканала, условия связи (передачи данных) в нём, а так же способов формирования и обработки сигнала. Непосредственно моделирование может рассматриваться как имитация решения задачи различения элементов обрабатываемого при приёме цифрового сигнала. При этом предполагается, что в соответствии с ошибками при различении этих элементов должны формироваться ошибки в канальных битах данных на выходе демодулятора модема.

Реализация подобного подхода к моделированию потока ошибок позволяет учесть частотный и энергетический ресурсы КВ канала, которые определяются техническими характеристиками используемых для его построения радиосредств. Полагая, что полоса частот канала (частотный ресурс) соотнесена с используемым видом манипуляции цифрового сигнала, определяющим для структуры и интенсивности потока ошибок в этом случае становится ОСШ или ОСП на выходе канала (энергетический ресурс).

Следует отметить, что важным аспектом моделирования потока ошибок в КВ канале связи является реализация возможности учёта преобладающих вариаций проявления многолучёвого приёма, приводящих к замираниям сигнала. При этом желательно оценить влияние замираний на приём цифровых сигналов в среднем, т. е. принимая во внимание периодические изменения параметров многолучёвого КВ канала.

Учесть влияние многолучёвого приёма на качество передачи данных в КВ канале связи можно, моделируя при формировании потока ошибок изменения ОСШ (ОСП) описываемые как некоторый случайный процесс (СП), статистические характеристики которого зависят от параметров канала и используемых средств радиосвязи.

Определяющим для характеристик подобного СП является прежде всего проявляющийся в КВ канале связи вид замираний.

Известно, что в радиоканалах КВ диапазона наблюдаются замирания, обусловленные интерференцией нескольких лучей в точке приёма и изменением условий распространения

радиоволн. Изменения уровня сигнала в последнем случае могут значительно превышать флуктуации при интерференционных замираниях [1; 2; 6].

Замирания, проявляясь в виде флуктуации амплитуды и фазы принимаемого сигнала, приводят к значительным изменениям ОСШ (ОСП) на входе приёмника. При этом периодическое снижение уровня ОСШ (ОСП) является наиболее критичным последствием замираний. Это обусловлено тем, что применение в данном случае различных методов коррекции параметров искаженного в канале связи сигнала не эффективны и не позволяют обеспечить необходимый уровень помехоустойчивости. Уровень мощности сигнала просто не достаточен для его качественной обработки.

Особенно сложными, с точки зрения обеспечения качества связи, являются интерференционные замирания, поскольку методы борьбы с ними, связанных с увеличением энергетического ресурса канала связи (увеличение мощности передатчика, применения более эффективных антенных систем и т. д.), не эффективны.

При интерференционных замираниях в КВ каналах связи принимаемый сигнал обычно представляется в виде суммы регулярной составляющей сигнала (которая может и отсутствовать) и множества рассеянных составляющих со случайными начальными амплитудами и фазами [1; 4; 6]. Плотность вероятности огибающей сигнала A при этом описывается законами Релея (при отсутствии регулярной составляющей) $p'(A)$ или Райса (при наличии регулярной составляющей) $p''(A)$ [1 – 6]:

$$p'(A) = \frac{A}{D} \exp\left(-\frac{A^2}{2D}\right), \quad p''(A) = \frac{A}{D} \exp\left(-\frac{A^2 + A_m^2}{2D}\right) I_0\left(\frac{A_m A}{D}\right), \quad A \geq 0. \quad (1)$$

где D – мощность рассеянных составляющих замирающего сигнала, A_m – амплитуда регулярной составляющей принимаемого сигнала (зеркально отраженной от ионосферы), $I_0(\cdot)$ – функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

Параметр, характеризующий интенсивность замираний определяется как [1]

$$\beta^2 = \frac{A_m^2}{D}. \quad (2)$$

Отсутствие замираний соответствует условию, при котором $\beta^2 \rightarrow \infty$. Если $\beta^2 \geq 0$, то замирания описываются законом Райса (райсовские замирания). В случае $\beta^2 = 0$, для описания замираний используется закон Релея (релеевские замирания). Для реальных КВ каналов связи значения β^2 обычно изменяются в пределах от 0 до 20 [1].

Для учёта изменений в условиях замираний ОСШ (ОСП) необходимо определить особенности перераспределения принимаемой из канала мощности сигнала в мощность его огибающей, распределения которой представляются как (1).

Очевидно, что среднюю мощность принимаемого в условиях замираний сигнала можно представить через осреднение квадрата огибающей этого сигнала [4; 7; 8]

$$P_c \approx \frac{1}{2} M \{ A^2 \}, \quad (3)$$

где $M \{ \cdot \}$ – операция математического ожидания.

Поскольку момент второго порядка – это сумма централизованного (центрального) момента второго порядка (дисперсии) и квадрата математического ожидания (МО), то (3) можно записать в виде

$$P_c \approx \frac{1}{2} M \{ A^2 \} = \frac{1}{2} (\sigma_A^2 + m_A^2). \quad (4)$$

Здесь: σ_A^2 – дисперсия огибающей сигнала (квадрат среднеквадратического отклонения огибающей сигнала σ_A); m_A^2 – квадрат МО огибающей сигнала m_A .

Среднюю мощность принимаемого в условиях замираний сигнала можно выразить через параметры распределений Релея и Райса, представленных как (1).

Если имеют место релеевские замирания ($\beta^2 = 0$), то известно, что [7; 8]

$$\sigma_A^2 = \frac{(4 - \pi)D}{2}, \quad m_A = \sqrt{\frac{\pi D}{2}}. \quad (5)$$

Очевидно, что с учётом (5) выражение (4) можно представить в виде

$$P_c \approx \frac{1}{2} \left[\frac{(4 - \pi)D}{2} + \frac{\pi D}{2} \right] = D. \quad (6)$$

Следовательно, параметр D при релеевском распределении определяется как средняя мощность сигнала в точке приема P_c . Дисперсия и МО огибающей сигнала в случае релеевских замираний исходя из (5) и (6) через мощность P_c выражаются как

$$\sigma_A^2 = \frac{(4 - \pi)P_c}{2}, \quad m_A = \sqrt{\frac{\pi P_c}{2}}.$$

В случае райсовских замираний (в КВ диапазоне $0 < \beta^2 \leq 20$), с учётом (2) справедливо представление [7; 8]:

– если $\beta < 1$

$$\sigma_A^2 = \frac{(4 - \pi)D}{2} (1 + 0,25\beta^2)^2, \quad m_A = \sqrt{\frac{\pi D}{2}} (1 + 0,25\beta^2); \quad (7)$$

– если $\beta > 3$

$$\sigma_A^2 \approx D, \quad m_A \approx \beta \sqrt{D}. \quad (8)$$

По аналогии с соотношением (4) и (5), исходя из (7) и (8) выражение (4) для райсовских замираний можно записать как:

$$P_c \approx \frac{1}{2} \left[\frac{(4 - \pi)D}{2} (1 + 0,25\beta^2)^2 + \frac{\pi D}{2} (1 + 0,25\beta^2)^2 \right] = D (1 + 0,25\beta^2)^2 \quad \text{при } \beta < 1; \quad (9)$$

$$P_c \approx \frac{1}{2} [D + \beta^2 D] = \frac{D(1 + \beta^2)}{2} \quad \text{при } \beta > 3. \quad (10)$$

Из (7) – (10) следует, что дисперсия и МО огибающей сигнала в случае райсовских замираний через мощность P_c представляются в виде:

$$\sigma_A^2 = \frac{(4 - \pi)P_c}{2}, \quad m_A = \sqrt{\frac{\pi P_c}{2}} \quad \text{при } \beta < 1;$$

$$\sigma_A^2 \approx \frac{2P_c}{1 + \beta^2}, \quad m_A \approx \beta \sqrt{\frac{2P_c}{1 + \beta^2}} \quad \text{при } \beta > 3.$$

Таким образом, с учётом (5) – (10), параметры распределений (1) можно описать через среднюю мощность принимаемого сигнала P_c и параметр замираний β^2 .

В общем случае средняя мощность принимаемого сигнала P_c на выходе КВ канала связи может быть определена из уравнения радиопередачи, в котором учитываются основные технические характеристики используемых для построения канала радиосредств и параметры линии связи [2–6; 9; 10]. При этом, принимая во внимание особенности распространения радиоволн КВ диапазона, множитель ослабления поля волны на трассе распространения может быть рассчитан [9; 10]:

– при распространении поверхностной (земной) волной на дальности соизмеримые с приближением «плоской земли» – по формуле М.В. Шулейкина – Ван-дер-Поля (до нескольких километров);

– при распространении поверхностной (земной) волной на дальности, соответствующие условию «сферической земли» – по формулам В.А. Фока (до нескольких десятков километров);

– при распространении пространственной (ионосферной) волной на большие дальности – по методу А.Н. Казанцева (от нескольких сотен до нескольких тысяч километров).

В свою очередь параметр интенсивности замираний β^2 определяется исходя из особенностей построения и параметров конкретной реализации КВ канала связи.

Учитывая, что моделирование потока ошибок в условиях замираний, по существу, сводится к моделированию СП отображающего изменения ОСШ (ОСП) во времени, необходимо описать этот СП.

Процесс, описывающий изменение огибающей сигнала при приёме в условиях замираний в КВ канале, можно представить следующим образом [4; 7; 8]:

– для релейских замираний с учётом (6)

$$A(t) = \sqrt{DX_c^2(t) + DX_s^2(t)} = \sqrt{P_c[X_c^2(t) + X_s^2(t)]}; \quad (11)$$

– для райсовских замираний с учётом (9) и (10)

$$A(t) = \sqrt{D(\beta + X_c(t))^2 + DX_s^2(t)},$$

$$A(t) = \sqrt{\frac{P_c}{(1 + 0,25\beta^2)^2}[(\beta + X_c(t))^2 + X_s^2(t)]} \quad \text{при } \beta < 1, \quad (12)$$

$$A(t) = \sqrt{\frac{2P_c}{(1 + \beta^2)}[(\beta + X_c(t))^2 + X_s^2(t)]} \quad \text{при } \beta > 3.$$

Здесь в (11) и (12) процессы $X_c(t)$ и $X_s(t)$ – это нормированные квадратурные составляющие сигнала. В рассматриваемом случае они являются гауссовскими СП с нулевым МО и единичной дисперсией [4; 7; 8].

Поскольку процесс изменения уровня средней мощности сигнала в точке приёма, по аналогии с (3), в общем случае, представляется как [1 – 4]

$$P_c(t) \approx \frac{A^2(t)}{2}, \quad (13)$$

то СП соответствующих изменений ОСШ (ОСП) можно записать в виде:

в случае релейских замираний с учётом (11)

$$q(t) = \frac{P_c(t)}{P_{u(n)}} \approx \frac{A^2(t)}{2P_{u(n)}} = \frac{DX_c^2(t)}{2P_{u(n)}} + \frac{DX_s^2(t)}{2P_{u(n)}} = \frac{P_c[X_c^2(t) + X_s^2(t)]}{2P_{u(n)}} = \frac{q}{2}[X_c^2(t) + X_s^2(t)]; \quad (14)$$

в случае райсовских замираний с учётом (12)

$$q(t) = \frac{P_c(t)}{P_{u(n)}} \approx \frac{A^2(t)}{2P_{u(n)}} = \frac{q}{2(1 + 0,25\beta^2)^2}[(\beta + X_c(t))^2 + X_s^2(t)] \quad \text{при } \beta < 1,$$

$$q(t) = \frac{P_c(t)}{P_{u(n)}} \approx \frac{A^2(t)}{2P_{u(n)}} = \frac{q}{(1 + \beta^2)}[(\beta + X_c(t))^2 + X_s^2(t)] \quad \text{при } \beta > 3. \quad (15)$$

Здесь в (14) и (15): $P_{u(n)}$ – мощность шума (помехи) в точке приёма; $q = P_c/P_{u(n)}$ – значение ОСШ (ОСП) при отсутствии замираний, которое является исходным для моделирования СП. Представление СП $q(t)$ в (15) при значениях параметра β^2 в диапазоне от 1 до 9 может быть аппроксимировано исходя из конкретных параметров канала.

Использование представлений СП (14) и (15) позволяет описать изменение энергетического ресурса КВ канала связи в условиях замираний. Фактически эти СП определяют структуру и интенсивность потока ошибок на выходе модема при моделировании передачи данных. В частности, увеличение или уменьшение количества ошибок, а так же наличие и объём «пакетов ошибок», определяется уменьшением или увеличением значений СП $q(t)$ соответственно. Однако необходимо отметить, что интерференционные искажения спектра сигнала, вызванные, например, быстрыми и частотно-селективными замираниями, непосредственно эти процессы не отражают.

Корреляционные характеристики СП (14) и (15) определяются характером замираний, который, в свою очередь, зависит от скорости манипуляции используемого в модеме цифрового сигнала V_m , а так же таких параметров многолучевого приёма как максимальная задержка сигнала τ_{max} и доплеровское смещение (сдвиг) Δf_d [3–6].

В процессе моделирования потока ошибок с использованием СП (14) и (15) следует учитывать, что адекватный уровень помехоустойчивости при передаче данных в каналах связи (в том числе и в КВ каналах) возможен только при условии проявления медленных и амплитудных замираний. В случае быстрых и частотно-селективных замираний, обычно принимаются меры для их компенсации и приведения к варианту медленных и амплитудных (предполагается использование эквалайзеров, расширения спектра сигнала, устойчивых видов манипуляции, разнесённого приёма и т. п.) [3–5].

Оценка адекватности результатов, получаемых посредством предложенного варианта имитации потока ошибок в КВ канале при проявлении замираний, производилась на основе сравнения получаемых в результате моделирования значений частоты ошибок и определённой аналитически вероятности ошибки в канальном бите.

В ходе моделирования передачи данных предполагалось, что реализуется некогерентный приём двоичных цифровых сигналов с относительной фазовой и частотной манипуляцией (ОФМ (DPSK) и ЧМ (FSK) соответственно) в условиях замираний на фоне аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). Замирания принимались как медленные амплитудные описываемые законом Релея, а АБГШ (AWGN) определялся как некоторый несократимый помеховый фактор, моделирующий флуктуационную помеху в канале связи. Результаты моделирования приведены на рис. 1 и 2 в виде зависимостей частоты и вероятности ошибки в канальном бите от ОСШ.

Сравнение результатов моделирования производилось с расчётными значениями теоретически определяемой вероятности ошибки в канальном бите P_κ для КВ канала с переменными параметрами и релеевскими замираниями. Известно, что выражения для этих вероятностей представляются в виде [2–4]:

– при некогерентном приёме сигнала с ОФМ (DPSK) по методу сравнения фаз

$$P_\kappa = \frac{1}{2(1 + \bar{q})}; \quad (16)$$

– при некогерентном приёме сигнала с ЧМ (FSK)

$$P_\kappa = \frac{1}{2 + \bar{q}}. \quad (17)$$

где $\bar{q}$ – осредненное ОСШ (с учётом случайных изменений амплитуды сигнала).

При представлении зависимостей вероятности ошибки от ОСШ полагалось, что исходя из предположения о стационарности СП, описываемого как (14), и с учётом единичных значений дисперсии СП $X_c(t)$ и $X_s(t)$, для релеевских замираний величина $\bar{q}$ в (16) и (17) определяется как

$$\bar{q} = M \{ q(t) \} = M \left\{ \frac{q}{2} [X_c^2(t) + X_s^2(t)] \right\} = \frac{q}{2} M \{ X_c^2(t) + X_s^2(t) \} = q.$$

Рис. 1. Зависимости частоты и вероятности ошибки в канальном бите при некогерентном приёме сигналов с ОФМ (DPSK) и ЧМ (FSK) в условиях релейских замираний и отношении $V_M/\Delta f_D = 10$

Рис. 2. Зависимости частоты и вероятности ошибки в канальном бите при некогерентном приёме сигналов с ОФМ (DPSK) и ЧМ (FSK) в условиях релейских замираний и отношении $V_M/\Delta f_D = 1000$

Объём передаваемых данных при моделировании составлял 10^5 бит. Параметры канала соответствовали условиям медленных амплитудных релеевских замираний. Соотношение $V_m/\Delta f_\phi$, которое определяет среднее отношение длительностей периода замираний и элемента сигнала (в рассматриваемом случае двоичных сигналов соответствующего биту данных), задавалось как 10 и 1000.

Из зависимостей на рис. 1 видно, что при заданном объёме выборки (10^5 бит) и $V_m/\Delta f_\phi = 10$ результаты моделирования практически совпадают с аналитически определённой зависимостью для вероятности ошибки. В случае $V_m/\Delta f_\phi = 1000$ на рис. 2 диапазон разброса значений частоты ошибок относительно кривой вероятности ошибки возрастает. Это объясняется недостаточным объёмом выборки для условий моделирования замираний. При увеличении этого объёма (до 10^6 бит и более) результаты моделирования, как и на рис. 1, полностью совпадают с аналитической зависимостью.

Следует отметить, что результаты моделирования потока ошибок, при определённых выше условиях, для вариантов использования многопозиционных радиосигналов (в частности, применяемых в КВ каналах сигналов с ФМ-4 (QPSK), ФМ-8 (8-PSK), КАМ-16 (QAM-16) и др.) так же полностью соответствуют теоретически обоснованным предположениям о достоверности передачи данных.

В целом, предложенный метод моделирования потока ошибок в условиях замираний выгодно отличается от других возможных способов имитации ошибок в последовательности передаваемых данных, основанных на феноменологическом подходе. Например, способов, реализующих модели Л.П. Пуртова и Б. Мандельброта [11; 12]. Это обусловлено прежде всего возможностью описания изменений в ходе сеанса связи энергетического ресурса канала как СП, характеристики которого определяются параметрами замираний и техническими возможностями используемых радиосредств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные радиосвязные устройства: учебник для слушателей и курсантов ВВУЗов ВВС / под ред. В.И. Тихонова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986. 442 с.
2. Ермаков Е.К. Авиационные системы связи: учебник. Часть II. Системы и средства связи. Монино: ВВА им. Ю.А. Гагарина, 1992. 284 с.
3. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр [и др.] : пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
4. Теория электрической связи: учебник для ВУЗов / А.Г. Зюко и др.; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1998. 432 с.
5. Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В. Системы и сети передачи информации: учебное пособие для ВУЗов. М.: Радио и связь, 2001. 334 с.
6. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. М.: Связь, 1971. 183 с.
7. Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н. Статистическая теория радиотехнических устройств: учебник для слушателей инженерных ВВУЗов ВВС. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1978. 420 с.
8. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учебное пособие для высших учебных заведений. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.
9. Долуханов М.П. Распространение радиоволн: учебник для вузов. М: Связь, 1972. 336 с.
10. Серков В.П. Распространение радиоволн и антенные устройства. Ленинград: ВАС им. С.М. Буденного, 1981. 468 с.
11. Элементы теории передачи дискретной информации / Л.П. Пуртов и др. М.: Связь, 1972. 232 с.
12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.