

# Сравнительный анализ моделей канала связи с замираниями

Н. К. Елисеев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

eliseevnic.sci@gmail.com

**Аннотация.** Одним из актуальных вопросов теории связи является потенциальная помехоустойчивость приёма сигнальных конструкций, подверженных влиянию аддитивных и мультипликативных помех. Потенциальное качество приёма определяется по вероятности битовой ошибки и основывается на двух подходах: аналитическом и имитационном моделировании каналов связи. В статье описаны классические законы распределения замираний, предложена имитационная программная модель канала связи, способная моделировать плоские, а также частотно-селективные замирания, приведены результаты сравнительного анализа моделей каналов связи с различными законами распределения замираний при когерентном приёме многопозиционных сигнальных конструкций на основе оценки вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум в канале. Представленные результаты могут быть использованы при анализе помехоустойчивости сигнально-кодowych конструкций, устойчивых к замираниям в канале связи.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость; моделирование; канал связи; плоские замирания; частотно-селективные замирания; сигнально-кодowych конструкции

## I. ВВЕДЕНИЕ

К диапазону коротких волн (КВ) относятся радиоволны, лежащие в диапазоне частот от 3 до 30 МГц. Короткие волны распространяются в виде как поверхностных (земных), так и пространственных (ионосферных) радиоволн. В связи со значительным поглощением в полупроводящей поверхности Земли земные волны способны распространяться на сравнительно небольшие расстояния. Пространственные волны способны огибать Земной шар, распространяясь на большие расстояния за счёт череды последовательных отражений от слоёв ионосферы и поверхности Земли, претерпевая при этом заметное поглощение.

Для наземных радиолиний, работающих за счёт отражения радиоволн от ионосферы, характерен так называемый многолучевой приём, при котором в точку приёма приходит несколько волн, распространяющихся по различным траекториям. В качестве помех чаще всего выступают сигналы других радиосредств, работающих в том же диапазоне, что обусловлено сравнительно малым частотным ресурсом – 30 МГц, а также большой дальностью распространения сигналов. Таким образом, КВ-канал является каналом со случайными параметрами, что обусловлено особенностями отражения сигнала от слоёв атмосферы. Параметры сигнала могут изменяться в широком диапазоне значений. На входе приёмника формируется смесь полезного сигнала и его копий, сдвинутых во времени. Качество приёма зависит от статистических свойств сигнала, а также от характера и уровня помех в канале связи.

Развитие систем связи в КВ диапазоне связано, прежде всего, с повышением помехоустойчивости систем связи за счёт совершенствования алгоритмов обработки сигналов, позволяющих увеличить скорость передачи данных. Для увеличения пропускной способности канала в большинстве случаев применяют алгоритмы многопозиционной фазовой или амплитудно-фазовой манипуляции сигнала (ФМ, КАМ), сигнально-кодowych конструкции, пространственно-временное кодирование. Однако, как было отмечено, КВ-сигналы характеризуются наличием замираний и, как следствие, низкой помехоустойчивостью, что существенно осложняет задачу демодуляции принятого сигнала.

## II. МОДЕЛЬ КАНАЛА СВЯЗИ

Предположим, что для передачи цифровой информации используется  $M$  сигналов конечной энергии:  $s_r(t)$ ,  $r = 0, M - 1$ , передаваемых на символьном интервале времени  $T$ . Математическая модель канала связи представляется выражением

$$y(t) = \mu(t)s_r(t) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где  $y(t)$  – принятый сигнал,  $\mu(t)$  – коэффициент передачи канала,  $s_r(t)$  – переданный сигнал и  $n(t)$  – белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью шума  $N_0$ . В математической модели канала связи (1) выделяются 2 наиболее важных случая:

- классический канал с аддитивным белым гауссовским шумом:  $\mu(t) = 1, 0 \leq t \leq T$ ;
- канал с неселективными по частоте (плоскими) замираниями:  $\mu(t) = \mu, 0 \leq t \leq T$ ,

где  $\mu$  – случайная величина. В этом случае предполагается, что замирания настолько медленны, что возможно оценить фазу сигнала по принимаемому сигналу без ошибок.

Существует множество аналитических законов распределения замираний для аппроксимации искажений сигнала, происходящих в реальных каналах связи.

### A. Распределения Релея и Райса

При рассмотрении канала связи с плоскими замираниями и белым шумом при когерентном приёме традиционно рассматриваются законы распределения вероятностей случайного коэффициента передачи канала  $\mu$  Релея и Райса. Данные распределения являются частными случаями обобщённой гауссовской плотности распределения вероятностей замираний  $\omega$  – четырёхпараметрического распределения [1, стр. 301]:

$$\omega(\mu_c, \mu_s) = \frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_s} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_c^2}(\mu_c - m_c)^2 - \frac{1}{2\sigma_s^2}(\mu_s - m_s)^2\right],$$

где  $\mu = \sqrt{\mu_c^2 + \mu_s^2}$  – коэффициент передачи канала;  $m_c$  и  $m_s$  – математические ожидания квадратурных составляющих  $\mu_c$  и  $\mu_s$ ;  $\mu_0 = \sqrt{m_c^2 + m_s^2}$  – регулярная составляющая коэффициента передачи;  $\sigma_c^2$  и  $\sigma_s^2$  – дисперсии квадратурных составляющих  $\mu_c$  и  $\mu_s$ . Данная зависимость справедлива для каналов связи с плоскими замираниями. Однако в большинстве случаев в каналах связи наблюдаются частотно-селективные замирания, для моделирования которых используют модель ионосферного ВЧ канала с гауссовым рассеянием – модель Ваттерсона [2].

### В. Модель Ваттерсона

Моделирование коротковолнового канала с частотно-селективными замираниями в модели Ваттерсона выполняется с помощью многоотводной линии задержки с отводами для каждого разделённого во времени пути распространения сигнала (рис. 1).

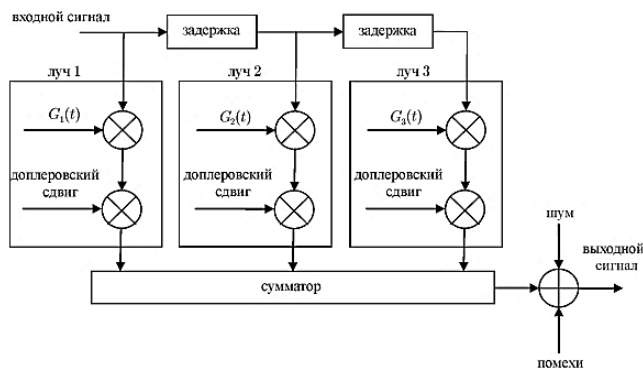


Рис. 1. Схема модели Ваттерсона

Управление характеристиками отводов производится путём модуляции каждого -го отвода по амплитуде и фазе случайной комплексной функцией времени  $G_i(t)$ , формируемой генераторами случайных процессов, коррелированных с процессами замирания сигнала на моделируемой трассе связи [3]:

$$G_i(t) = G_{ia}(t) \exp(jv_{ia}t) + G_{ib}(t) \exp(jv_{ib}t), \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – компоненты двух лучей магнитоионного расщепления,  $G_{ia}(t)$  и  $G_{ib}(t)$  – независимые комплексные гауссовские эргодические случайные процессы, каждый из которых имеет нулевое среднее и независимую действительную и мнимую части с равными среднеквадратическими значениями, которые вызывают рэлеевские замирания. Экспоненциальные функции в уравнении (2) необходимы для обеспечения требуемых частотных (доплеровских) сдвигов  $v_{ia}$  и  $v_{ib}$ . В большинстве случаев магнитоионное расщепление не учитывается, т.е. каждый луч представляется одним слагаемым из (2). Задержанные и модулированные сигналы путей распространения суммируются с аддитивным шумом и/или помехами для формирования выходного сигнала, подверженного воздействию частотно-селективных замирания в радиоканале.

### III. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ

Исследование характеристик помехоустойчивости сигналов, подверженных искажающему воздействию замирания в различных каналах связи, производилось с помощью реализованной программной модели, основанной на [4, стр.439], с оригинальным блоком моделирования замирания. Схема реализованной модели для исследования помехоустойчивости сигналов ФМ-8 представлена на рис. 2.

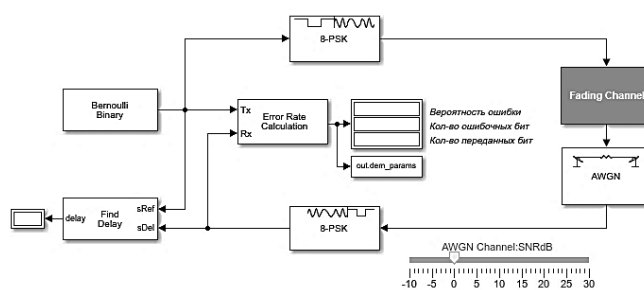


Рис. 2. Структурная схема модели

В качестве источника сообщений выступает блок генерации псевдослучайных бит, распределённых по закону Бернулли (*Bernoulli Binary*) с одинаковой частотой появления нулей и единиц: период генерации пачки бит: 1 мкс; количество бит в пачке: 600; скорость передачи данных: 600 Мбит/с. В качестве модулятора используется блок *M-PSK*, формирующий сигнальное созвездие фазовой модуляции (манипуляции) с 8 точками, что соответствует сигналу ФМ-8 (8-PSK), также используется кодировка Грея. Для моделирования замирания в канале связи применяется разработанный блок *Fading Channel*, построенный на основе модели Ваттерсона. Данная модель предполагает, что большинство нестационарных по частоте и по времени каналов в небольшой полосе частот (менее 12 кГц) и на достаточно коротком интервале времени (менее 10 минут) могут быть описаны стационарной моделью [5]. После блока моделирования замирания искажённый сигнал суммируется с аддитивным шумом, распределённым по гауссовскому закону, в блоке *AWGN* для формирования «принятого» сигнала.

В качестве критерия помехоустойчивости сигналов использовалась оценка вероятности битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) принятого сигнала при заданном отношении сигнал/шум в канале связи. Для определения BER использовался блок *Find Delay*, определяющий задержку прохождения сигнала по схеме, и блок *Error Rate Calculation*, вычисляющий отношение неправильно принятых битов к общему числу бит.

### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование характеристик помехоустойчивости сигнала при различных законах распределения замирания и отношения сигнал/шум в канале связи выполнено методом имитационного моделирования системы связи с помощью описанной в предыдущей части работы программной модели, учитывающей особенности распространения сигналов в КВ диапазоне.

Для каждой модели канала связи с различными значениями параметров замирания была проведена серия испытаний, включающих в себя модуляцию битового потока, воздействие на модулированный сигнал имитатора канала связи, устранение воздействия канала

связи, демодуляция битового потока, расчёт вероятности битовой ошибки (BER). Время моделирования передачи данных – 0,1 секунды.

По результатам моделирования формировались зависимости вероятности битовой ошибки от отношения энергии сигнала, приходящейся на 1 бит принимаемого сообщения  $E_b$ , к энергетической спектральной плотности шума  $N_0$ . Отношение сигнал/шум  $E_b/N_0$  (ОСШ) – метрика качества, применяемая в цифровых системах передачи данных для расчёта вероятности ошибки при различной модуляции сигнала без учёта пропускной способности канала.

#### А. Моделирование плоских замираний

Для подтверждения корректности результатов работы реализованной модели канала связи, произведено сравнение теоретических и практических зависимостей вероятности битовых ошибок сигнала от отношения сигнал/шум. Теоретические зависимости средней вероятности битовых ошибок для сигнала ФМ-8 при коде отображения Грея и когерентном приёме в канале с детерминированными параметрами и белым шумом приведены в [1, стр. 191]. Теоретические кривые помехоустойчивости и экспериментальные кривые, полученные по результатам моделирования каналов связи с параметрами, соответствующими теоретическим, представлены на рис. 3.

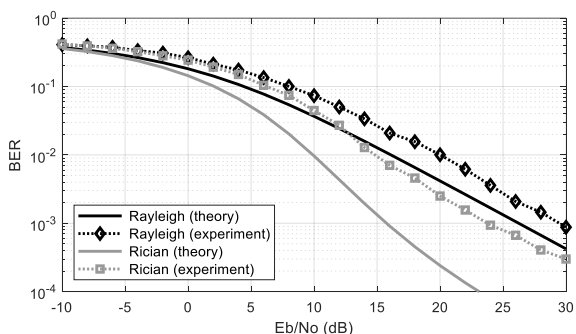


Рис. 3. Кривые BER для замираний Релея (чёрный) и Райса (серый)

Из графиков видно, что формы экспериментальных кривых вероятности битовой ошибки в достаточной степени аппроксимируют теоретические кривые стандартных распределений, что подтверждает корректность спроектированной модели канала связи. Абсолютные значения BER достигают сравнимого теоретического уровня при большем ОСШ в среднем на 3 дБ для замираний Релея и 6 дБ – для замираний Райса. Расхождение в абсолютных значениях может быть связано с вероятностным характером исследуемых зависимостей (минимально возможной теоретической вероятностью при данном ОСШ), а также программными ограничениями моделирования.

Теоретические кривые и семейства характеристик помехоустойчивости сигнала 8-PSK для каналов связи с плоскими замираниями, распределёнными по законам Релея и Райса ( $K=5$ ), с различными значениями среднеквадратического отклонения  $\sigma$  (СКО), представлены на рис. 4, 5. Коэффициент  $K$  определяет отношение мощности прямого пути распространения к мощности всех остальных путей.

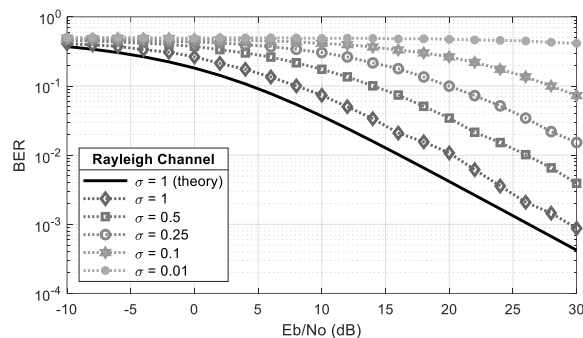


Рис. 4. Помехоустойчивость канала Релея при различном СКО

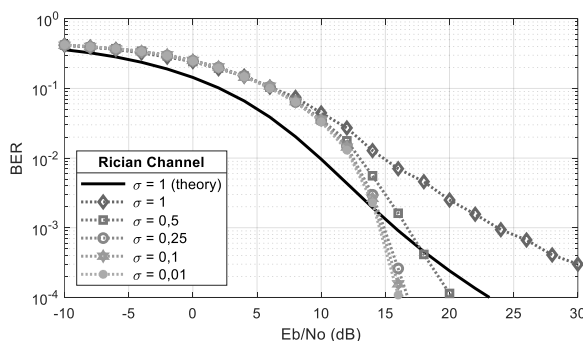


Рис. 5. Помехоустойчивость канала Райса при различном СКО

При увеличении параметра СКО исследуемых законов распределения замираний помехоустойчивость сигнала изменяется. Из графиков видно, что наибольшей помехоустойчивостью обладают сигналы, подверженные замираниям: по закону Релея с СКО, стремящемуся к единице, и по закону Райса с СКО, стремящемуся к нулю, что соответствует теоретическому описанию.

#### В. Моделирование частотно-селективных замираний

Представленные графики зависимостей вероятности битовой ошибки сигнала от отношения  $E_b/N_0$  справедливы для каналов с плоскими замираниями, распределёнными по законам Релея и Райса (ширина полосы приблизительно равна 200 Гц) [3]. В контексте исследования помехоустойчивости сигналов, подверженных влиянию многолучевого распространения в КВ канале, актуальным является исследование моделей канала связи с частотно-селективными замираниями. Для исследования помехоустойчивости сигналов, подверженных частотно-селективным замираниям, в систему добавлена модель ионосферного ВЧ канала с гауссовым рассеянием (модель Ваттерсона).

Моделирование частотно-селективных замираний в канале связи осуществлялось с помощью линии задержки с 4 отводами. В ходе исследования были получены оценки вероятности битовой ошибки сигнала от отношения  $E_b/N_0$  при различном количестве отводов, имитирующих ширину полосы частот от 0,2 кГц до 0,8 кГц. Весовые коэффициенты линии задержки распределены по экспоненциальному закону.

На рис. 6, 7 представлены результаты исследования помехоустойчивости сигнала ФМ-8 в каналах связи с частотно-селективными замираниями, распределёнными по закону Релея и Райса ( $K=5$ ).

На рис. 6 представлены характеристики помехоустойчивости тестовых сигналов, подверженных замираниям, с восстановлением на приёмной стороне посредством эквалайзера типа ZF (Zero-Forcing). Из графиков BER видно, что межсимвольные искажения (МСИ) вносят существенный вклад в ухудшение помехоустойчивости: BER при ОСШ 20 дБ перестаёт уменьшаться и флуктуирует вокруг значения 0,07.

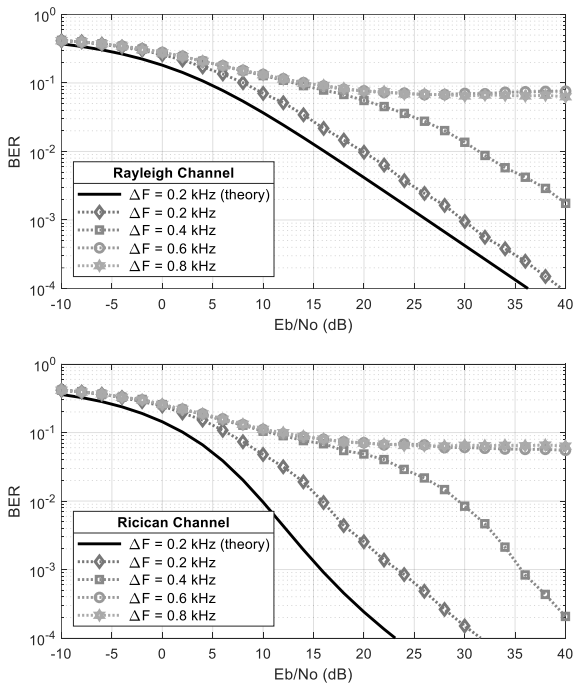


Рис. 6. BER в канале связи с частотно-селективными замираниями (ZF эквалайзер)

Для компенсации МСИ в тракт обработки на приёмной стороне модели добавлен адаптивный фильтр, работающий по алгоритму RLS (Recursive Least Square).

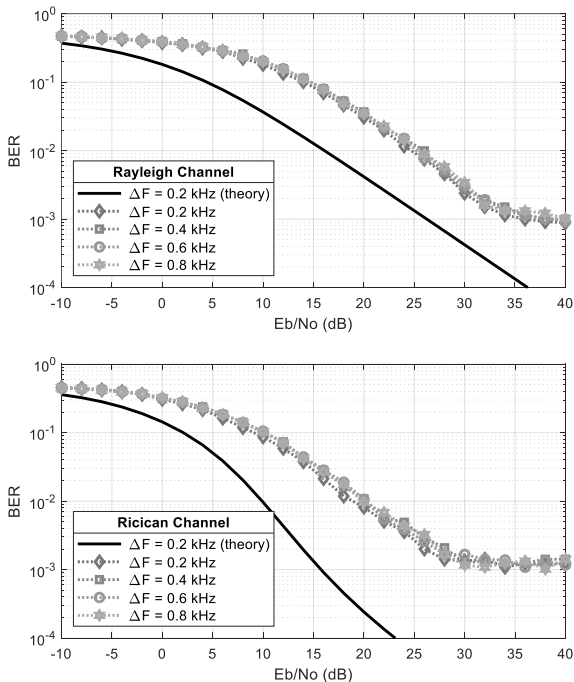


Рис. 7. BER в канале связи с частотно-селективными замираниями (RLS эквалайзер)

Из графиков на рис. 6 видно, что вне зависимости от закона распределения замираний в канале связи помехоустойчивость сигнала, подверженного частотно-селективным замираниям, ухудшается до неприемлемого уровня при ширине полосы больше 0,4 кГц. Применение адаптивного фильтра на приёмной стороне, например, работающего по алгоритму RLS (рис. 7), позволяет в достаточной степени скомпенсировать влияние межсимвольной интерференции, достичь сравнимой помехоустойчивости для сигналов, подверженных влиянию частотно-селективных замираний с различной шириной полосы частот. При этом сравнительный анализ моделей канала связи показывает, что помехоустойчивость сигнала ФМ-8 при частотно-селективных замираниях Релея и Райса в среднем на 4 дБ ниже, чем при сравнимых плоских замираниях.

В результате исследования сделан вывод, что частотно-селективные замирания в канале связи оказывают наиболее сильное воздействие на сигнал из рассмотренных. Помехоустойчивость ФМ сигналов, подверженных частотно-селективным замираниям, при наличии адаптивного фильтра в тракте обработки, устраняющего вносимые каналом связи искажения, практически не зависит от количества отводов (ширины полосы).

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования проанализированы теоретические зависимости, описывающие процессы замираний, происходящие с сигналами в каналах связи; предложена программная модель радиоканала связи, позволяющая моделировать замирания сигнала, в том числе частотно-селективные; представлены результаты сравнительного анализа моделей наиболее часто встречающихся каналов радиосвязи на основе оценки вероятности битовой ошибки сигналов ФМ-8 от отношения сигнал/шум.

Реализованная модель позволяет получить оценку характеристики помехоустойчивости сигналов, в том числе в каналах со сложной помеховой обстановкой. По результатам исследования можно сделать вывод о высокой степени достоверности результатов предложенной системы моделирования замираний.

Модель может быть использована для анализа помехоустойчивости и исследования направлений совершенствования сигнально-кодовых конструкций в канале связи с переменными параметрами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Савиценко Н.В. Специальные интегральные функции, применяемые в теории связи. СПб.: ВАС, 2012. 560 с.
- [2] Watterson C., Juroshek J., Bensema W. Experimental Confirmation of an HF Channel Model // IEEE Transactions on Communication Technology, 1970. vol. 18, no. 6. pp. 792-803.
- [3] ITU-R Recommendation F.1487. Testing of HF modems with bandwidth of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators. ITU, 2000. 13 p.
- [4] Типикин А.А. Моделирование систем связи в MATLAB с помощью пакета расширения Communications Toolbox. Практическое руководство по применению. М.: СОЛОН-Пресс, 2021. 694 с.
- [5] Метелёв С.А. Модификация модели Ватерсона ионосферного канала коротковолновой радиосвязи для адаптивного пространственно-разнесённого приёма // Известия вузов. Радиофизика, 2012. Т. LV, вып. 4. С. 266-279.