

9. Treshnikov V.N., Nanij O.E. Pat. 2532562 RF. Raspredeennyj datchik akusticheskikh i vibrationnyh vozdeystvij. – 2014.
10. Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A. Perspektivy primeneniya kombinirovannyh vnutriskvazhinnyh volokonno-opticheskikh izmeritel'nykh sistem / Feofilaktov S.V., Cherepanov D.A. // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. – 2014. – N 4.
11. [Electronic resource] <http://www.halliburton.com/en-US/ps/pinnacle/fiber-optic-monitoring/distributed-temperature-sensing.page?node-id=hu6k6bib>
12. [Electronic resource] http://lscom.ru/en_wells.html
13. [Electronic resource] http://www.forcphotonics.ru/ru/sensor_systems/sensor%20systems/1/82
14. [Electronic resource] http://ru.mouser.com/Sensors/Optical-Sensors/Fiber-Optic-Sensors/_/N-axgfb?Ns=Pricing%7c0
15. [Electronic resource] <http://www.rusnanonet.ru/products/47025/>

УДК 621.391

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ OFDM В МНОГОЛУЧЕВЫХ КАНАЛАХ

Леммле Дмитрий Валерьевич, аспирант, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, 87, e-mail: dilemm1@yandex.ru.

В статье описаны результаты исследований устойчивости системы приема и передачи сигналов с использованием OFDM-технологии к влиянию шума в канале и межсимвольной интерференции в условиях многолучевого распространения. Использована математическая модель, созданная в системе Simulink, данные которой обрабатываются в программе, написанной на встроенном в MATLAB языке программирования. С помощью вычислительных экспериментов на данной модели оценивается вероятность появления ошибочных битов в переданном сигнале. Приводятся результаты моделирования для случайного рэлеевского многолучевого канала с аддитивным гауссовским шумом. Получены серии графиков зависимостей вероятности ошибок от различных параметров канала распространения и характеристик сигналов с OFDM модуляцией. Полученные результаты позволяют оценить степень влияния различных параметров канала на вероятность ошибок получения сигнала в приемнике. Предложены направления дальнейшего развития работы в виде динамического управления параметрами OFDM сигнала.

Ключевые слова: вероятность ошибки, многолучевое распространение, межсимвольная интерференция, рэлеевские замирания, ортогональное мультиплексирование, отношение сигнал/шум, задержка распространения, доплеровский сдвиг, математическая модель

CHARACTERISTICS OF SIGNAL TRANSMISSION IN MULTIBEAM CHANNELS

Lemml Dmitriy V., post-graduate student, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 87 Gorkiy St., Vladimir, 600000, Russian Federation, e-mail: dilemm1@yandex.ru

The article presents the research of stability of system for receiving and transmission OFDM signals to influence of noise in the channel, and intersymbol interference because of multipathing. Mathematical model in Simulink system was used for modeling, data from it is processed in Matlab. Bit error probability is valued with help of simulator. There are results of modeling for random Rayleigh multibeam channel and Gaussian noise channel. We got series of graphs of dependence error probability from different parameters of propagation channel and characteristics of OFDM signals. Results help us value influence different parameters

ters of channel on bit error ratio in receiver. Also the article proposes ways of future development as dynamic control parameters of OFDM signal.

Keywords: Bit error probability, multipath propagation, intersymbol interference, Rayleigh fading, OFDM, signal to noise ratio, transmission delay, Doppler shift, mathematical model

Введение. Современные системы связи используют, как правило, цифровую форму представления сигналов. При передаче цифровых сигналов по каналам связи возможно наложение различных помех. В типовых случаях влияние помех на характеристики каналов хорошо изучено. Однако некоторые специальные вопросы такой передачи остаются исследованными недостаточно полно. К их числу относится, в частности, передача сигналов с использованием технологии OFDM в многолучевых каналах. Поэтому целью настоящей работы является попытка устранить указанный недостаток.

Общая характеристика проблематики работы. Одной из важнейших характеристик качества в системах цифровой связи является зависимость вероятности появления ошибочного бита BER (Bit Error Probability) от отношения сигнал/шум E_s/N_0 [5, с.70]. Именно этот параметр (т.е. E_s/N_0) позволяет сравнивать качество различных систем связи – отношение E_s/N_0 считается мерой запаса устойчивости цифровых сигналов к помехам.

Следует заметить, что вероятность битовой ошибки (BER) и коэффициент битовых ошибок (Bit Error Rate — BER) — несколько разные понятия. Но их содержательные значения весьма близки и, говоря про BER, всегда подразумевают BER, так как это физическая величина, регистрируемая измерительными приборами.

Поскольку понятие спектральной плотности мощности шума N_0 входит в нормированный параметр E_s/N_0 , то имеет смысл дать понятие мощности шума в общем виде. Наиболее широко используемым в качестве модели случайного (хаотического) процесса является шум, описываемый нормальным (гауссовским) распределением. Он возникает в результате одновременного воздействия многих независимых случайных источников. В моделях исследования каналов связи белый гауссов шум добавляется к сигналу, при этом его уровень задается отношением E_s/N_0 .

В системах мобильной радиосвязи сигнал может передаваться от передатчика к приемнику по множеству отражательных путей. Такое явление, называемое многолучевым распространением, может вызывать флуктуации амплитуды, фазы и угла прибытия полученного сигнала – это определило название «замирание вследствие многолучевого распространения» [8, с.964]. Данный вид помех особенно характерен для эфирного приема в городах из-за переотражений радиосигнала от зданий и сооружений. Рэлеевские замирания, обусловленные интерференцией достаточно большого числа рассеянных сигналов и сильным ослаблением прямого сигнала, являются наиболее глубокими и приводят к значительным ошибкам при передаче информации [2, с.3]. Кроме эффекта многолучевости при реализации систем подвижной связи порой возникают доплеровские сдвиги частоты, обусловленные перемещением абонента в процессе сеанса – при этом величина сдвига прямо пропорциональна скорости движения абонента, и вычисляется по формуле:

$$f_d = (f_0 v \cos \alpha) / c. \quad (1)$$

где f_d – доплеровский сдвиг частоты; f_0 – частота сигнала; v – скорость движения приемника; α – угол между направлением на передатчик и направлением движения приёмника; c – скорость распространения электромагнитных волн.

Описанная ситуация обуславливает риски неверного приема сигнала, которые в свою очередь могут иметь негативные последствия – в т.ч. в отношении приема и реализации решений если по каналам передаются голосовые сообщения.

Радикальным решением указанной проблемы является применение технологии ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM), которая специально разработана для борьбы с влиянием многолучевого приема. В рамках технологии OFDM последовательный цифровой поток преобразуется в большое число параллельных субпоток, каждый из которых передается на отдельной несущей частоте.

Из-за того, что используется большое число параллельных потоков, запас в скорости передачи позволяет задать длительность символа в потоках существенно больше, чем в последовательном потоке данных. Это позволяет задержать оценку значений принятых символов в декодере на время, в течение которого изменения параметров радиоканала из-за действия эхо-сигналов прекратятся, и канал станет стабильным.

Сочетание высокой скорости передачи с эффективным противодействием многолучевому распространению является главным преимуществом модуляции OFDM. Эта технология не устраняет многолучевого распространения, но исключает влияние межсимвольной интерференции. Неотъемлемой частью технологии OFDM является охранный интервал (Guard Interval, GI) — циклическое повторение окончания символа, присоединяемое в начале символа (рисунок 1). Охранный интервал является избыточной информацией и поэтому снижает полезную (информационную) скорость передачи. Однако именно он служит защитой от возникновения межсимвольной интерференции. Эта избыточная информация добавляется к передаваемому символу в передатчике и отбрасывается при приеме символа в приемнике. Наличие охранного интервала создает временные паузы между отдельными символами, и в результате при межсимвольной интерференции «поражается» информация в интервале, а не полезная информация.

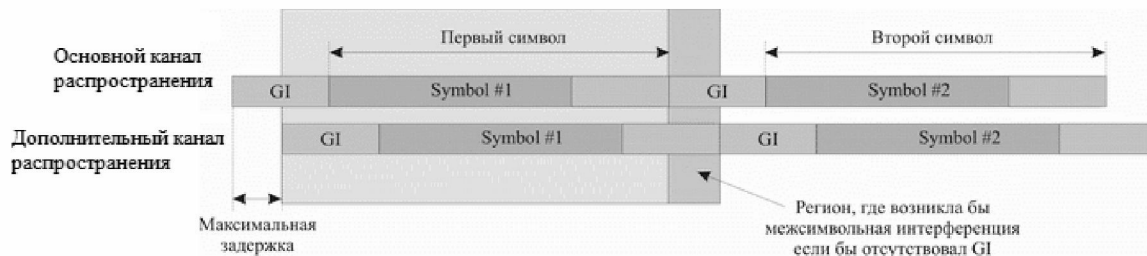


Рис. 1. Избегание межсимвольной интерференции за счет использования охранных интервалов

Спектральная эффективность OFDM системы:

$$\frac{R}{W} = \frac{m}{1 + \alpha}, \quad (2)$$

где R – результирующая скорость передачи информации; W – ширина спектра сигнала; m – количество бит в одном символе; α – доля защитного интервала в длительности символа. Таким образом, спектральная эффективность определяется числом бит в модуляционном символе m , добавляются лишь небольшие потери из-за введения охранного интервала.

Планирование и проведение вычислительных экспериментов. Целью экспериментов является получение серии графиков зависимостей вероятности ошибок от характеристик канала и параметров системы OFDM. Также должен быть определен параметр канала распространения, оказывающий наибольшее влияние на появление ошибок.

В данной статье будет рассмотрена двухлучевая модель распространения сигнала (рис. 2). Для упрощения модели было принято, что сигнал в основном канале распространяется без задержки, так как важно получить задержку в дополнительном канале относительно основного.

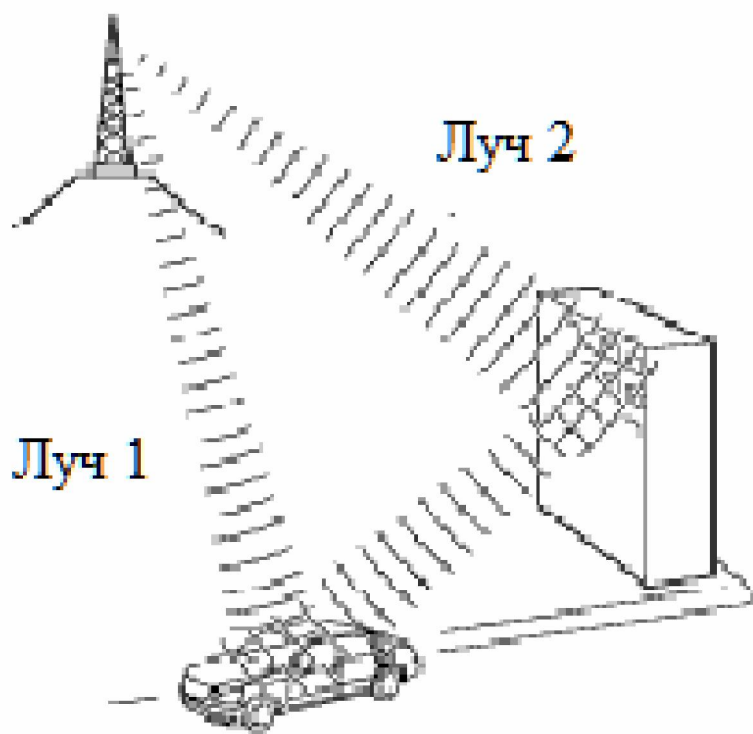


Рис. 2. Многолучевое распространение сигнала за счет отражения от различных объектов

Разработанная структурная схема системы OFDM, представлена на рисунке 3.

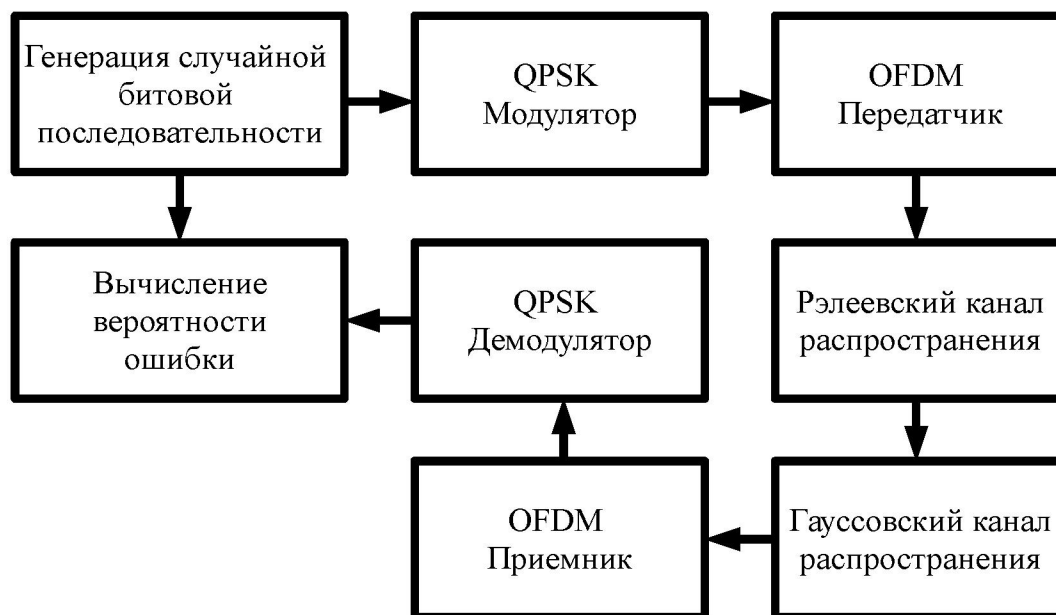


Рис. 3. Структурная схема модели

Данная схема была реализована в виде модели с помощью программы Simulink из пакета программ Matlab. На основе этой модели было проведено имитационное моделирование работы системы связи.

В рамках использования модели генерируется случайная двоичная последовательность, которая модулируется квадратурным фазовым (QPSK) модулятором, где биты кодируются изменением фазы сигнала. Такая QPSK модуляция строится на основе кодирования двух бит передаваемой информации одним символом. При этом символьная скорость в два раза ниже скорости передачи информации. Кодирование одним символом двух битов изображено на рисунке 4.

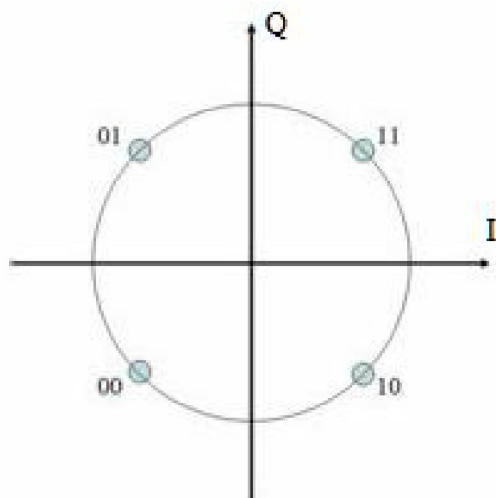


Рис. 4. Векторная диаграмма QPSK сигнала

Числа на окружности соответствуют битам модулируемого потока. Кодирование осуществляется следующим образом: битовый поток разбивается на четные и нечетные биты, тогда будет кодировать четные биты, а – нечетные. Два последовательно идущих друг за другом бита информации кодируются одновременно синфазным $I(t)$ и квадратурным $Q(t)$ сигналами. Это наглядно показано на осциллограммах, приведенных на рисунке 5 для информационного потока «1100101101100001».

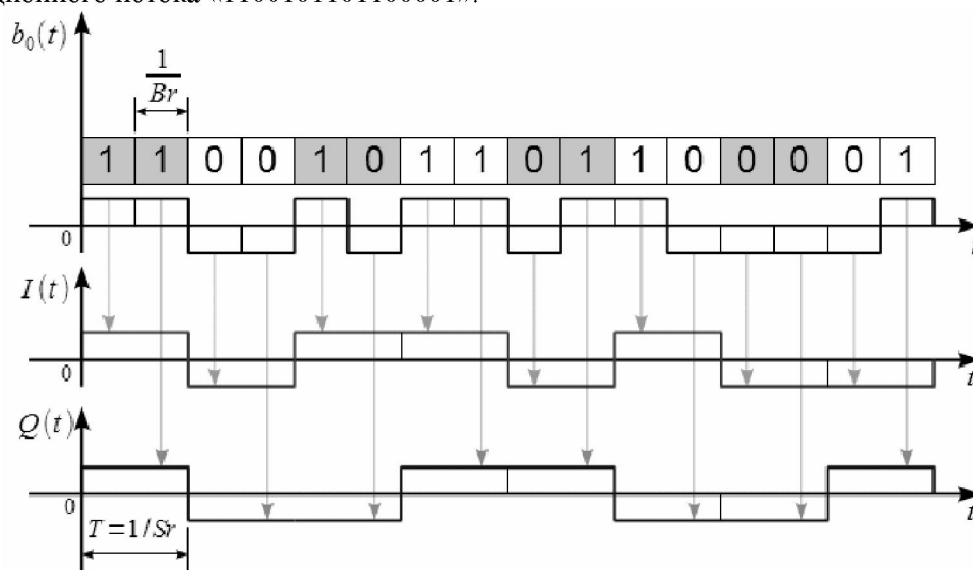


Рис. 5. Синфазная и квадратурная составляющие QPSK сигнала

Вид фазовой огибающей для информационного потока 1100101101100001» показан на рисунке 6.

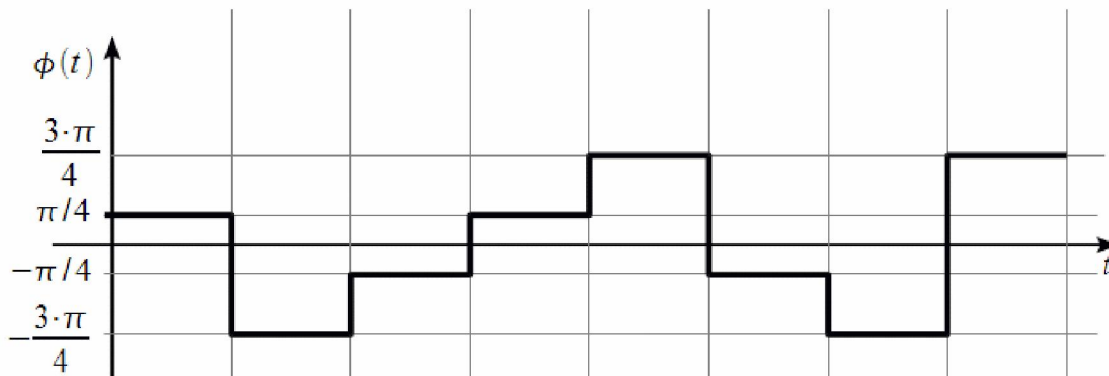


Рис. 6. Фазовая огибающая QPSK сигнала

Далее исходный битовый поток делится на подпотоки, предназначенные для передачи на отдельных несущих частотах. Биты на каждой поднесущей группируются в символы нужного размера, затем эти символы отображаются в точки используемых сигнальных созвездий. Обратное быстрое преобразование Фурье превращает набор комплексных амплитуд в частотной области в набор отсчетов OFDM-символа во временной области [7, с.70]. После этого к сформированному символу добавляется охранный интервал, и полученный набор отсчетов последовательно отправляется в виртуальный канал с рэлеевскими замираниями и гауссовым шумом.

Частотно-селективные замирания в канале имитируются в рэлеевском канале распространения. При моделировании изменяются следующие его параметры: максимальный доплеровский сдвиг, задержка и ослабление каждого луча. Тепловой шум в канале имитируется в гауссовом канале распространения, при этом изменяется отношение сигнал/шум.

Приемник OFDM сигнала имеет зеркальную по отношению к передатчику структуру. Сигнал «нарезается» на символы, затем удаляется циклический префикс и вычисляется прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ). Полученные комплексные амплитуды разных поднесущих делятся на имеющиеся оценки комплексного коэффициента передачи канала связи на соответствующих частотах. Далее для скорректированных таким образом комплексных амплитуд ищутся ближайшие точки используемых сигнальных созвездий. Затем демодулированные битовые комбинации объединяются, образуя итоговый принятый битовый поток [7, с. 70].

Кратко рассмотрим количественные характеристики OFDM-сигнала. Пусть имеется N поднесущих, частотное расстояние между которыми составляет ΔF . Ширина спектра сигнала, таким образом, будет

$$W = N(\Delta F).$$

Длительность одного символа с учетом охранный интервала составляет

$$T' = \frac{1}{\Delta F} (1 + \alpha). \quad (3)$$

При компьютерном моделировании изменялись такие характеристики OFDM сигнала, как количество поднесущих и длина охранный интервала.

В модели, которая рассматривается в данной статье, используются следующие параметры: количество поднесущих – 30; длина циклического префикса – 26; максимальный доплеровский сдвиг – 100 Гц; ослабление сигнала по дополнительному каналу – -8дБ; задержка-

ка сигнала по дополнительному каналу – 3мс. Один из параметров попеременно изменяется в заданных пределах (в серии вычислительных экспериментов), другие же остаются постоянными.

Полученные результаты и их обсуждение. Величина доплеровского сдвига значительно влияет на вероятность ошибок при отношении сигнал/шум больше 20дБ (рис. 7).

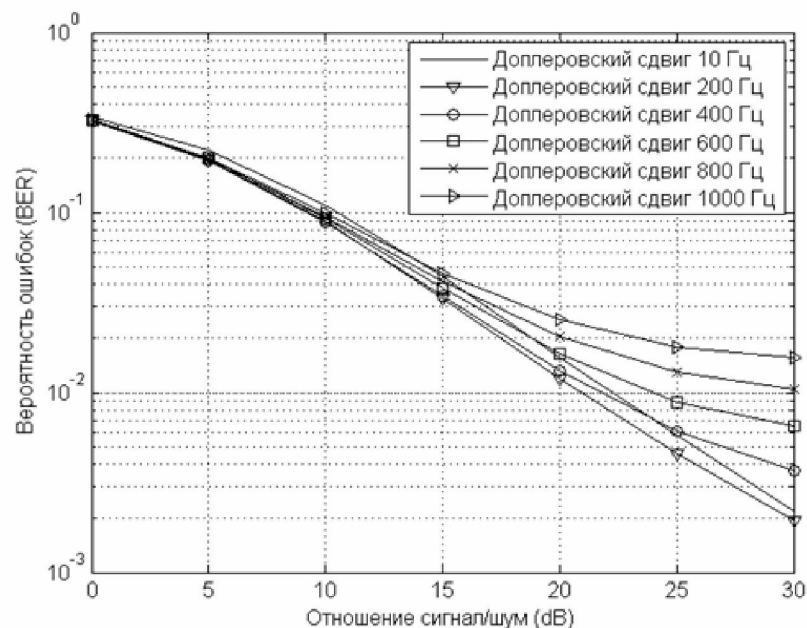


Рис. 7. Зависимость BER от E_s/N_0 при различных значениях доплеровского сдвига

При увеличении задержки распространения в дополнительном канале вероятность ошибки возрастает довольно резко (рисунок 8). Видно, что при появлении даже небольшой задержки в 10мкс вероятность ошибок в результате межсимвольной интерференции увеличивается практически в 3 раза.

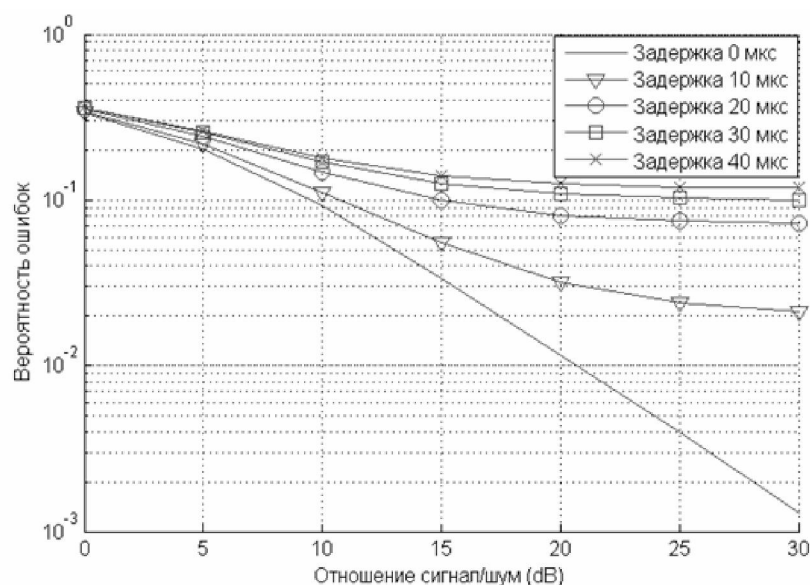


Рис. 8. Зависимость BER от E_s/N_0 при различных значениях задержки распространения по второму каналу (лучу)

Судя по результатам проведенных вычислительных экспериментов, ослабление сигнала в дополнительном канале не оказывает значительного влияния на вероятность появления ошибок (рис. 9).

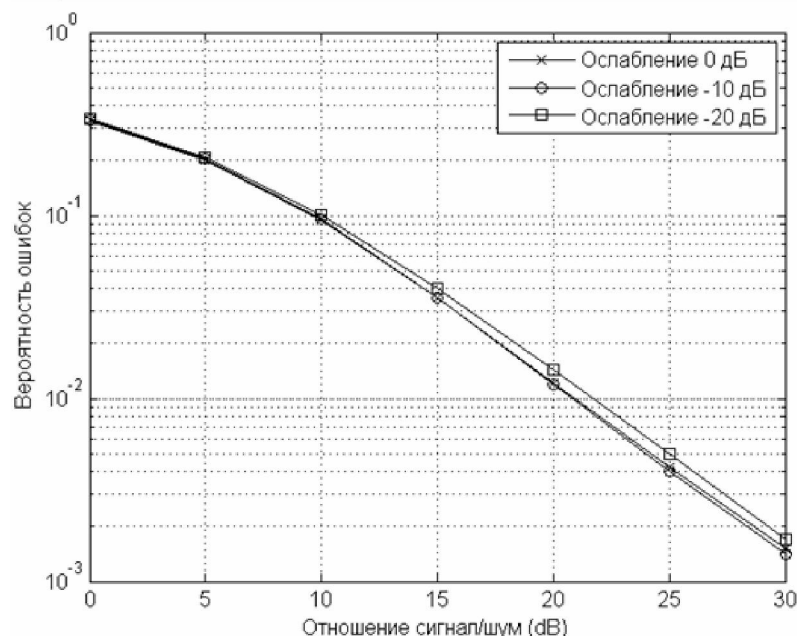


Рис. 9. Зависимость BER от E_s/N_0 при различных значениях ослабления сигнала по второму каналу (лучу)

Уменьшение длины охранного интервала требует увеличения отношения сигнал/шум для обеспечения необходимой вероятности ошибки (рисунок 10). Видно, что при длине интервала больше 16 тактов, вероятность ошибки уже практически не изменяется. Тем самым показано, что когда превышена задержка по времени во втором канале, межсимвольная интерференция не возникает.

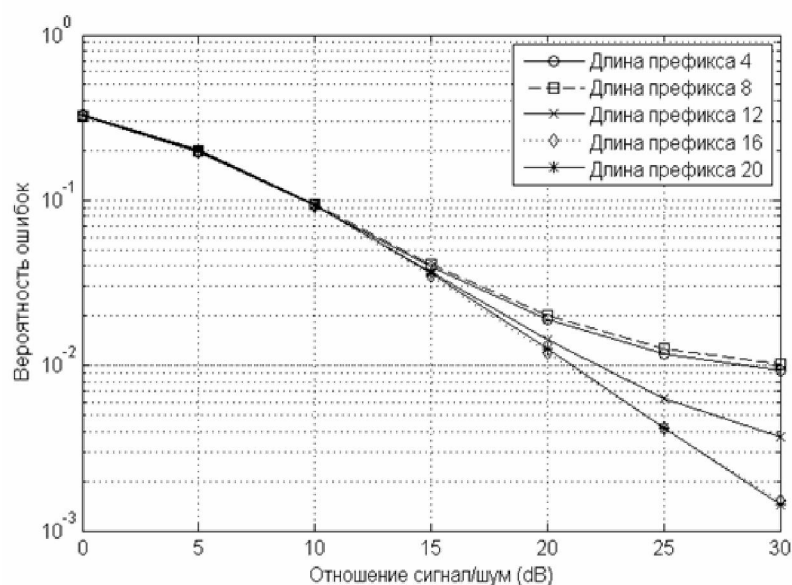


Рис. 10. Зависимость BER от E_s/N_0 при различных значениях длины охранного интервала

Выводы. 1. Наиболее сильное влияние на вероятность ошибок в канале передачи информации оказывает величина межсимвольной интерференции, связанная с задержкой по времени распространения сигнала во втором канале распространения. 2. При этом ослабление сигнала в нем не оказывает заметного влияния на качество приема. 3. Для исследованной модели с конкретными значениями параметров определено необходимое максимальное значение величины охранного интервала. 4. Возможно динамическое изменение данного параметра в зависимости от параметров канала распространения, так как охранный интервал является избыточной информацией. 5. В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность динамического изменения мощности передатчика для обеспечения необходимого соотношения сигнал/шум на основе перманентного мониторинга параметров канала распространения.

Список литературы

1. Артюшенко, В.М., Воловач, В.И. Экспериментальное исследование параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от протяженного объекта. / В.М. Артюшенко // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. – 2012. – №3 – С. 10-17.
2. Ермолаев, В.Т., Флакман, А.Г. Адаптивная пространственная обработка сигналов в системах беспроводной связи. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006.
3. Нестеренко, А.Н. Математическая модель MIMO-OFDM сигнала. // Наукоедение. – 2014, № 4.
4. Нечаев, Ю.Б., Борисов, Д.Н., Пешков, И.В. Алгоритмы диаграммообразования адаптивных антенных решеток в условиях многолучевого распространения радиоволн./Ю.Б. Нечаев //Научные ведомости Белгородского государственного университета. – 2012. №1-1. -С. 1-12.
5. Песков, С.Н., Ищенко, А.Е. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи. / С.Н. Песков // Теле-Спутник. – 2010. – № 11. – С. 70-75.
6. Поздняков, В.А., Позднякова, Л.В., Карпов, И.В., Коробов, Д.С. Особенности коррекции комплексной передаточной характеристики по преамбуле OFDM сигнала. / В.А.Поздняков // Проектирование и технология электронных средств. – 2013. – №2. – С. 5-9.
7. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. – 758 с.
8. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
9. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink. СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
10. Шабалина, Н.А. Анализ особенностей среды распространения сигналов в телекоммуникационных каналах подземных сооружений. /Н.А. Шабалина //Телекоммуникации и транспорт. – 2013. №8. – С. 157-160.
11. Шпенст, В.А., Шабалина, Н.А. Оценка возможностей аналитических моделей телекоммуникационных каналов с замираниями при распространении сигнала в подземном сооружении. / В.А. Шпенст // Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – №4 – С. 25-26.

References

1. Artjushenko V.M., Volovach V.I. Eksperimental'noe issledovanie parametrov spektra doplerovskogo signala, otrazhennogo ot protjazhennogo ob'ekta. [Experimental research of parameters of doppler signal spectrum reflected from the extended object]. Prikaspijskij zhurnal. Upravlenie i nauchnye tehnologii [Caspian journal of management and High Technology], 2012, no. 3, pp. 10-17.
2. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Adaptivnaja prostranstvennaja obrabotka signalov v sistemah besprovodnoj svyazi [Adaptive spatial signal processing in wireless communications systems], Nizhny Novgorod, NNSU Publ., 2006. 100p.
3. Nesterenko A.N. Matematicheskaja model' MIMO-OFDM signala. [Mathematical model of MIMO-OFDM signal], Naukovedenie Publ., 2014, no. 4.
4. Nechaev Ju.B., Borisov D.N., Peshkov I.V. Algoritmy diagrammoobrazovanija adaptivnyh antennyh reshetok v usloviyah mnogoluchevogo rasprostraneniya radiovoln [Algorithms beamforming adaptive

array antenna in a multipath propagation], Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta [Scientific statements Belgorod State University], 2012, no. 1, pp. 1-12.

5. Peskov S.N., Ishhenko A.E. Raschet veroyatnosti oshibki v cifrovyyh kanalakh svyazi. [Calculating the probability of errors in the digital communication channels], Telesputnik, 2010, no. 11, pp. 70-75.

6. Pozdnjakov V.A., Pozdnjakova L.V., Karpov I.V., Korobov D.S. Osobennosti korrektsii kompleksnoy peredatochnoy harakteristiki po preamble OFDM signala. [Features of the complex transfer characteristic correction on the preamble of OFDM signal]. Proektirovanie i tehnologiya elektronnykh sredstv [Design and technology of electronic devices], 2013, no. 2, pp. 5-9.

7. Sergienko A.B. Cifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing], St. Petersburg, Piter Publ., 2002, 758p.

8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications», 2001, 1104p.

9. Chernyh I.V. Modelirovanie elektrotehnicheskikh utrojstv v Matlab, SimPowerSystem i Simulink [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystem and Simulink], St. Petersburg, Piter Publ, 2008, 288p.

10. Shabalina N.A. Analiz osobennostey sredy rasprostraneniya signalov v telekommunikatsionnykh kanalakh podzemnykh sooruzhenij [An analysis of propagation characteristics of the environment in the telecommunication channels of underground structures]. Telekomunikatsii i transport [T-Comm], 2013 no. 8, pp. 157-160.

11. Shpenst V.A., Shabalina N.A. Ocenka vozmozhnostey analiticheskikh modelej telekommunikatsionnykh kanalov s zamiraniyami pri rasprostranении signala v podzemnom sooruzhenii [Evaluate analytical models of telecommunication channels with fading signal propagation in underground facilities], Telekomunikatsii i transport [T-Comm], 2014, no. 4, pp. 25-26.