

В.Н. Домрачев*

Satbayev University, Алматы, Казакстан

*e-mail: vladimir.domrach@mail.ru

АНАЛИЗ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

Аннотация. В данной статье рассмотрены современное состояние науки о причинах искажений цифровых сигналов. Сотовая и радиорелейная связь, передача данных по компьютерным сетям, цифровое радиовещание и телевидение, представленные в различных и многообразных форматах, охватили все страны мира. Высокое качество связи, сравнительно низкие затраты на ее организацию и, поэтому, доступность для широких слоев населения всех стран, обеспечило этот успех. Современные системы цифровой связи используют все освоенные диапазоны частот, разные виды модуляции и способы обработки сигналов. Реальный канал беспроводной связи обладает частотно-временным рассеянием что приводит к межсимвольной (МСИ) и межканальной (МКИ) интерференциям. Само по себе это явление не ведет к большим проблемам, т.к. существуют достаточно много эффективных методов борьбы. На современном этапе для каналов с частотно-временным рассеянием лучшей считается мультиплексирование (уплотнение) с ортогональным частотным разделением (OFDM - Orthogonal Frequency Devision Multiplexing). В статье приведены методы борьбы с искажениями, помехоустойчивое канальное кодирование, использование OFDM, FBMC, UFMC.

Ключевые слова: цифровая связь, межсимвольная интерференция, искажения сигналов, многолучевая интерференция, компенсация межсимвольных искажений, OFDM, FBMC, UFMC.

Введение. В современном мире происходит бурный скачок в развитии цифровой связи. Сотовая и радиорелейная связь, передача данных по компьютерным сетям, цифровое радиовещание и телевидение, представленные в различных и многообразных форматах, охватили все страны мира.

Высокое качество связи, сравнительно низкие затраты на ее организацию и, поэтому, доступность для широких слоев населения всех стран, обеспечило этот успех. Число пользователей непрерывно увеличивается, поэтому необходимо совершенствовать системы цифровой связи, повышая их качество и снижая требования к ресурсам, обеспечивающим качественную передачу информации. Современные системы цифровой связи используют все освоенные диапазоны частот, разные виды модуляции и способы обработки сигналов.

Цели и задачи. Значительное повышение скорости передачи цифровой информации по линиям связи требует разработки новых путей повышения качества передачи информационных потоков по каналам передачи информации, что в свою очередь нуждается в создании программно-аппаратных средств для решения такой проблемы.

Качество передачи цифровой информации в значительной степени зависит от свойств и особенностей каналов передачи информации, так как полезный информационный сигнал искажается из за влияния шумов, помех, недостатка у системы связи энергетического потенциала, изменения свойств канала, многолучевости при распространении сигнала и по целому ряду других причин, влияющих на передаваемый сигнал и на оборудование системы передачи информации.

Одной из основных причин снижения достоверности приема цифровой информации является уменьшение отношения сигнал/шум на входе приемного устройства. Другая причина - это искажения сигнала, из-за замираний сигнала в канале связи и межсимвольной интерференции.

Эти причины снижения достоверности приема цифровой информации приводят к двум различным типам ошибок:

- стирание сигнала (пропадание посылок на выходе детектора)
- ошибочный прием посылок (прием вместо единичной посылки нулевой и наоборот).

В свою очередь ошибочный прием посылок разделяют на единичные (независимые) и пакетные ошибки. При пакетных ошибках искажены несколько подряд идущих в цифровом потоке посылок.

Методы исследования. Наиболее полно приближённые методы изложены в работах Баланиса А., положения которых, актуальные с практической точки зрения, внесены в рекомендации международного союза электросвязи (МСЭ-R P.1238-7, МСЭ-R P.526-13). Кондратьев А.В., Авдеев В.Б., Катруша А.Н. внесли вклад в развитие методологии расчёта многолучевости при их распространении.

Основная часть. Различные каналы связи обладают своими особенностями, но наиболее сложными являются многолучевые радиоканалы связи и каналы связи с мобильными системами. В таких каналах связи, кроме ослабления сигналов при распространении, из-за флуктуаций параметров атмосферы, многолучевости, смены климатических и погодных условий и ряда других причин возникают искажения передаточной функции канала, называемые замираниями.

Флуктуации огибающей принимаемого сигнала, вызываемые медленными замираниями, все исследователи описывают [1] логарифмически-нормальным законом распределения вероятностей.

Быстрые замирания сигнала чаще всего описывают релеевским законом распределения вероятностей. Однако многочисленные эксперименты на различных линиях коротковолновой и тропосферной связи показывают, что описание быстрых замираний сигнала законом Релея является упрощенным и более 30% времени сеансов связи наблюдаются [6, 7] замирания не соответствующие такому описанию.

Более точное многомерное описание быстрых замираний предложил Накагами [8], но многомерное описание оказалось слишком сложным для аналитических исследований. Кловский Д.Д. разработал [6] более простое описание быстрых замираний, получившее название четырехпараметрического закона замираний. Этот закон оказался достаточно удобным для моделирования каналов связи различного типа [7] и показал соответствие реальным изменениям передаточной функции.

В результате замираний сигнала, помех в канале связи, тепловых и переходных шумов на выходе приемника возникают как одиночные, так и групповые ошибки. И если соотношение сигнал/шум на входе приемника возможно увеличить, повышая энергетический потенциал системы связи, то для противодействия негативному влиянию помеховых сигналов этого часто недостаточно и без применения избыточных корректирующих кодов в таких случаях не обойтись.

Отметим, что применение избыточных корректирующих кодов технически и экономически более выгодно [10-12] для цифровых систем связи по сравнению с такими методами как увеличение мощности передатчиков, увеличение направленности антенн или повышение чувствительности приемных устройств.

Большинство алгоритмов исправления ошибок требует внесения избыточности в цифровой информационный поток, и платой за повышение достоверности передачи информации становится увеличение полосы пропускания, то есть снижение пропускной способности канала. Применение же методов решетчатого кодирования, не требующих расширения полосы частот, связано со значительным усложнением корректирующих алгоритмов и самой кодирующей аппаратуры [10,13].

Большой вклад в исследования систем передачи данных с разнесенным приемом/передачей внесли Л.М. Финк, И.О. Андронов и У.К. Ли, классифицировав виды разнесения и разработав различные алгоритмы объединения ветвей разнесения.

Исследования характеристик распространения радиоволн проводили многих ученые. Применительно к радиосвязи разработаны эмпирические модели свободного пространства Ли, Окамуры, Хата, Уолфиша-Икагами и др. Однако они не позволяют оценить влияние конкретных объектов и конструкций на рассеяние радиоволн. В работах Стреттона Дж.А., Менцера Дж.Р., Боровикова В.А., Кинбера В.Е., Бреховских Л.М., Уфимцева П.Я. изложены методы расчёта отражения радиоволн от различных преград, дифракции на телах с различной геометрией и прохождения через различные среды, как строгие, которые могут применяться с допущениями, так и приближённые, среди которых наиболее проработаны геометрическая оптика и геометрическая теория дифракции (вместе лучевое приближение), представляющие радиоволну в виде лучей, распространяющихся в пространстве вдоль определённых линий, т.е. трасс определённого типа, например, прямой, с отражением, с прохождением стены и т.д.

Для расчёта характеристик многолучевости в урбанизированных средах с помощью математического аппарата электродинамики в рамках лучевого приближения необходимо получить исходные данные, т.е. набор трасс распространения лучей и их характеристики (тип трассы, длина, углы падения). В отдельных работах (Ньян Лин Ч.Ч., Yun Z., Zhang Z., Rick T., Kuhlen T.) предлагается использовать фиксированный набор типов трасс. Такие модели подходят только для анализа частных задач (например, многолучевости в помещении).

Однако методология, позволяющая решать задачи общего порядка для урбанизированных сред на основе метода изображений, отсутствует. Таким образом, вопросы разработки теоретического и технического обеспечения определения характеристик распространения радиоволн вообще и конкретно побочного электромагнитного излучения применительно к урбанизированным средам требуют дальнейших исследований.

Наиболее часто в системах широкополосного радиодоступа используется технология ортогонального частотного разделения с мультиплексированием (OFDM). Однако тех характеристик, которые позволяет добиться технология OFDM в сетях 4G, уже недостаточно для удовлетворения высоких требований к сетям 5G.

Будущие сети мобильной связи 5G должны обеспечивать на порядок более высокие характеристики по сравнению с сетями LTE-Advanced, в том числе поддерживать скорость передачи данных до 20 Гбит/с, сетевые задержки – до 1 мс и возможность обслуживания до 1 млн. устройств на квадратный километр. Рост объема данных, передаваемых в мобильных сетях, и необходимость организации широкополосного доступа в сетях 5G в условиях ограниченности частотного ресурса требуют развития новых методов передачи данных, позволяющих повысить эффективность использования спектра.

Поэтому для сетей 5G рассматриваются такие новые перспективные технологии, как, например, многочастотная передача с гребенчатой фильтрацией FBMC (Filter Bank Multi Carrier) и многочастотная передача с универсальной фильтрацией UFMC. Благодаря применению дополнительных цифровых фильтров в технологиях FBMC и UFMC можно отказаться от использования защитного интервала с циклическим префиксом и тем самым повысить их спектральную эффективность по сравнению с технологией OFDM.

Технологии FBMC и UFMC более устойчивы к ошибкам оценки частотного и временного сдвигов, чем технология OFDM благодаря фильтрации, снижающей уровень боковых лепестков поднесущих и поэтому не требуют передачи дополнительных обучающих сигналов и сложных систем синхронизации. Также среди возможных вариантов для применения в стандартах связи рассматриваются спектрально эффективные сигналы SEFDM, которые отличаются от известных сигналов OFDM тем, что частотный разнос между поднесущими выбирается меньше, чем требуется для выполнения условия нулевой межсимвольной интерференции (МСИ). Ожидается, что потери на сложность реализации

алгоритма приема и энергетические потери, вызванные наличием МСИ, будут скомпенсированы значительным увеличением спектральной эффективности.

Выводы. 1. Основными причинами снижения качества приема цифровой информации и увеличения вероятности ошибок являются:

- уменьшение отношения сигнал/шум на входе приемного устройства;
- искажения сигнала из-за многолучевости, замираний сигнала в канале связи и межсимвольной интерференции.

2. Замирания сигналов в радиоканалах являются нестационарными процессами, в которых можно выделить интервалы локальной стационарности для конкретных типов замираний и создать математические описания замираний.

3. Медленные замирания описываются логарифмически-нормальным законом распределения вероятностей.

4. Быстрые замирания удобно описать четырехпараметрическим законом распределения вероятностей.

5. На основании анализа выбран наиболее эффективный метод для повышения качества передачи цифровой информации – применение помехоустойчивого кодирования.

6. Определена основная цель исследования – разработка комплекса верификации устройств помехоустойчивого кодирования.

Заключение. Основной задачей в современной телекоммуникации является построение моделей систем беспроводной связи, использующих различные сигналы с частотным мультиплексированием, и сравнительный анализ их поведения в различных каналах распространения с целью оценки возможности более широкого внедрения данных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

[1] 25 лет инфокоммуникационной революции. / Под ред. Л.Е. Варакина. – М.: Издание МАС. – 2006. – 264 с.

[2] Борисов, В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь. – 2000. – 384 с.

[3] Борисов, В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев и др. – М.: Радио и связь. – 2003. – 640 с.

[4] Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом «Вильямс». – 2004. – 1104 с.

[5] Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2004. – 126 с.

[6] HuF. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective / Fei Hu. – CRC Press, 2016. – 556 p.

[7] Farhang-Boroujeny B. Signal Processing Techniques for Software Radios /B. Farhang-Boroujeny-Lulu publishing house, 2015 -517p.

[8] MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB/ Yong Soo Cho [etc.]. - Wiley-IEEE Press, 2015. - 457p.

[9] Farhang-Boroujeny B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier / B. Farhang-Boroujeny// IEEE Signal Processing Magazine, -2011, -Vol. 28, № 3, -pp. 92-112.

[10] Isam S. Simple DSP-IDFT techniques for generating spectrally efficient FDM signals / S. Isam, I. Darwazeh// IEEE IET Int. Symp. Commun. Syst., Netw., Digital Signal Process. – 2016. – pp 20–24.

[11] Prasad R. OFDM for wireless communications systems / Ramjee Prasad. - Artech House, Inc.BoCIBn. – 2015.-291p.

[12] Darwazeh// IEEE IET Int. Symp. Commun. Syst., Netw., Digital Signal Process. – 2015. – pp 20–24.

[13] Xu T. FPGA implementations of real-time detectors for a spectrally efficient FDM system/ T. Xu, R.C. Grammenos, I. Darwazeh// 20th Int. Conf. on Telecommunications (ICT). –2017. – pp 1–5.

[14] Гельгор А.Л. Преодоление «барьера» Найквиста при использовании одночастотных неортогональных многокомпонентных сигналов / А.Л. Гельгор, А.И. Горлов, Е.А. Попов // Радиотехника- 2015. - №1. - С. 32-48.

[15] Farhang-Boroujeny B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier / B. Farhang-Boroujeny // IEEE Signal Processing Magazine, -2016, -Vol. 28, № 3, -pp. 92-112.

REFERENCES

[1] 25 let infokommunikacionnoj revoljucii. / Pod red. L.E. Varakina. – М.: Izdanie MAS. – 2006. – 264 s.

[2] Borisov, V.I. Pomehozashhishhenost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty. / V.I. Borisov, V.M. Zinchuk, A.E. Limarev i dr. – М.: Radio i svjaz'. – 2000. – 384 s.

[3] Borisov, V.I. Pomehozashhishhenost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov moduljaciej nesushhej psevdosluchajnoj posledovatel'nost'ju. / V.I. Borisov, V.M. Zinchuk, A.E. Limarev i dr. – М.: Radio i svjaz'. – 2003. – 640 s.

[4] Skljar, B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. / B. Skljar. –М.: Izdatel'skij dom «Vil'jams». – 2004. – 1104 s.

[5] Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Pomehoustojchivoje kodirovanie. Metody i algoritmy. Spravochnik. – М.: Gorjachaja linija. – Telekom, 2004. – 126 s.

[6] HuF. Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective / Fei Hu. – CRC Press, 2016. – 556 p.

[7] Farhang-Boroujeny B. Signal Processing Techniques for Software Radios /B. Farhang-Boroujeny-Lulu publishing house, 2015 -517p.

[8] MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB/ Yong Soo Cho [etc.]. - Wiley-IEEE Press, 2015. - 457p.

[9] Farhang-Boroujeny B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier / B. Farhang-Boroujeny// IEEE Signal Processing Magazine, -2011, -Vol. 28, № 3, -pp. 92-112.

[10] Isam S. Simple DSP-IDFT techniques for generating spectrally efficient FDM signals / S. Isam, I. Darwazeh// IEEE IET Int. Symp. Commun. Syst., Netw., Digital Signal Process. – 2016. – pp 20–24.

[11] Prasad R. OFDM for wireless communications systems / Ramjee Prasad. - Artech House, Inc.BoCIIIn. – 2015.-291p.

[12] Darwazeh// IEEE IET Int. Symp. Commun. Syst., Netw., Digital Signal Process. – 2015. – pp 20–24.

[13] Xu T. FPGA implementations of real-time detectors for a spectrally efficient FDM system/ T. Xu, R.C. Grammenos, I. Darwazeh// 20th Int. Conf. on Telecommunications (ICT). –2017. – pp 1–5.

[14] Gel'gor A.L. Preodolenie «bar'era» Najkvista pri ispol'zovanii odnochastotnyh neortogonal'nyh mnogokomponentnyh signalov / A.L. Gel'gor, A.I. Gorlov, E.A. Popov // Radiotekhnika- 2015. - №1. - S. 32-48.

[15] Farhang-Boroujeny B. OFDM Versus Filter Bank Multicarrier / B. Farhang-Boroujeny // IEEE Signal Processing Magazine, -2016, -Vol. 28, № 3, -pp. 92-112.

В.Н. Домрачев*

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*e-mail: vladimir.domrach@mail.ru

САНДЫҚ СИГНАЛДАРДЫҢ ҚАБІЛСІЗДІГІН АРТТЫРУ ТАЛДАУЫ

Андатпа. Бұл мақалада цифрлық сигналдардың бұрмалану себептері туралы ғылымның қазіргі жағдайы қарастырылған. Ұялы және радиорелелік байланыс, деректерді компьютерлік желілер арқылы беру, сандық радиохабар және теледидар түрлі және алуан түрлі форматтарда ұсынылған, әлемнің барлық елдерін қамтыды. Байланыстың жоғары сапасы, оны ұйымдастыруға салыстырмалы түрде төмен шығындар, сондықтан барлық елдердің жалпы тұрғындары үшін қол жетімділік бұл табысты қамтамасыз етті. Қазіргі заманғы сандық байланыс жүйелері барлық дамыған жиілік диапазондарын, модуляцияның әртүрлі түрлерін және сигналдарды өңдеу әдістерін қолданады. Нақты сымсыз байланыс арнасы жиілік - уақыт шашырауына ие, бұл таңбааралық (ісі) және

арнааралық (ісі) кедергілерге әкеледі. Бұл құбылыстың өзі үлкен проблемаларға әкелмейді күрестің көптеген тиімді әдістері бар. Қазіргі кезеңде жиіліктік - уақыттық шашырауы бар арналар үшін ортогональды жиілікті бөлу (OFDM - Orthogonal Frequency Devision Multiplexing) бар мультиплекстеу (тығыздау) ең жақсы болып саналады. Мақалада бұрмалауды бақылау әдістері, шуылға қарсы каналды кодтау, OFDM, FBMC, UFMC қолдану әдістері келтірілген.

Негізгі сөздер: цифрлық байланыс, символаралық интерференция, сигналдарды бұрмалау, көпсәулелік интерференция, символаралық бұрмаланудың орнын толтыру, OFDM, FBMC, UFMC.

V.N. Domrachev*

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: vladimir.domrach@mail.ru

ANALYSIS OF IMMUNITY INCREASE OF DIGITAL SIGNALS

Abstract. This article examines the current state of the science of the causes of digital signal distortion. Cellular and radio relay communications, data transmission over computer networks, digital radio broadcasting and television, presented in various and diverse formats, covered all countries of the world. The high quality of communication, relatively low costs for its organization and, therefore, accessibility to the general population of all countries, ensured this success. Modern digital communication systems use all the mastered frequency ranges, different types of modulation and signal processing methods. A real wireless communication channel has time-frequency scattering, which leads to inter-character (MSI) and inter-channel (MCI) interference. By itself, this phenomenon does not lead to big problems, because there are quite a lot of effective methods of fighting. At the present stage, for channels with time-frequency scattering, multiplexing (compaction) with orthogonal frequency division (OFDM - Orthogonal Frequency Devision Multiplexing) is considered the best. The article presents methods of combating distortion, noise-resistant channel coding, the use of OFDM, FBMC, UFMC.

Keywords: digital communication, inter-character interference, signal distortion, multipath interference, inter-character distortion compensation, OFDM, FBMC, UFMC.