

УДК 621.396.2

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ПИЛОТНЫЕ ПОДНЕСУЩИЕ OFDM-СИГНАЛА СТАНДАРТА IEEE 802.11n

К. Д. Титов, О. Н. Завалишина

Воронежский государственный университет,
394018, Воронеж, Университетская площадь, 1

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2019 г.

Аннотация. В работе проанализировано влияние помех на беспроводной канал передачи данных на примере широко применяемого в настоящее время стандарта IEEE 802.11n, основанного на использовании технологии OFDM. Рассмотрены особенности стандарта, заключающиеся в типе, количестве и частотном положении поднесущих сигнала, режиме передачи данных и формируемых при этом пакетах данных, а также алгоритмах синхронизации сигналов во временной и частотной областях. Для оценки помехоустойчивости непосредственно самого стандарта IEEE 802.11n была исследована структура битового потока, формируемого при передаче информации по беспроводному каналу на канальном и физическом уровнях, без учёта верхних уровней (без привязки к типу передаваемой информации) сетевой модели OSI. С помощью имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink получена зависимость вероятности битовой ошибки от отношения помеха/сигнал при воздействии на пилотные и информационные поднесущие. Проведена оценка влияния искажения пилотных поднесущих на качество функционирования беспроводного канала передачи данных. Установлено, что искажение пилотных поднесущих приводит к срыву грубой и точной временной и частотной синхронизаций, а также невозможности оценки и коррекции параметров канала. В частности, это приводит к невозможности определения начала OFDM-символа, частотного и временного рассогласования, передаваемого и принимаемого сигналов, а также смещения по частоте с точностью до расстояния между поднесущими.

Ключевые слова: помехоустойчивость, беспроводной канал, вероятность битовой ошибки, синхронизация.

Abstract. In this work the influence of interference on the wireless data transmission channel is analyzed on the example of the widely used standard IEEE 802.11n, based on the use of OFDM technology. Features of the standard are investigated, consisting in the type, number and frequency position of the signal subcarriers, the mode of data transmission and the data packets formed at the same time, as well as algorithms for signal synchronization in the time and frequency domains. To assess the noise immunity of the IEEE 802.11n standard itself, the structure of the bitstream formed during the transmission of information over the wireless channel at the channel and physical levels, without taking into account the upper levels (without reference to the type of information transmitted) of the OSI network model was studied. Using the simulation in MATLAB Simulink, the dependence of the bit error probability on the noise-to-signal ratio when exposed to pilot and information subcarriers is obtained. The influence of distortion of pilot subcarriers on the quality of functioning of the wireless data transmission channel is estimated. It is established that the distortion of pilot subcarriers leads to the failure of rough and exact time and frequency synchronizations, as well as the impossibility of estimating and correcting the channel parameters. In particular, this leads to the inability to determine the beginning of the OFDM symbol, frequency and time mismatch, transmitted and received signals, as well as frequency offset with the accuracy to the distance between the subcarriers.

Key words: noise immunity, correction capability, wireless link, bit error rate, synchronization.

Введение

В настоящее время в современных и перспективных стандартах беспроводной передачи данных широко используется технология OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением) [1-3]. Использование данной

технологии позволяет повысить помехозащищённость систем связи при передаче информации через канал с многолучевым распространением, применять различные схемы модуляции для каждой поднесущей, а также эффективно использовать полосу канала. Однако имеется и ряд недостатков, основным из которых является необходимость точной синхронизации передатчика и приёмника. В современных стандартах беспроводной передачи данных важную роль в оценке радиоканала и синхронизации приёмо-передающих устройств занимает служебная информация, содержащаяся в заголовке передаваемого пакета, а также передача пилотных поднесущих совместно с информационными [4-8]. Искажение служебной информации пакета передаваемых данных или пилотных поднесущих может привести к дезорганизации линии связи. Однако влияние различного рода помех на элементы служебной информации до сих пор остаётся в значительной степени неизученным. В связи с этим актуальной задачей является оценка помехоустойчивости стандартов передачи данных семейства IEEE 802.11 с учётом структуры пакета передаваемых данных, решение которой позволит получить качественные и количественные оценки помехоустойчивости стандартов передачи данных.

В данной работе проанализировано влияние помех на беспроводной канал передачи данных, на примере широко применяемого в настоящее время стандарта IEEE 802.11n, основанного на использовании технологии OFDM. С помощью имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink получена зависимость вероятности битовой ошибки от отношения помеха/сигнал при воздействии на пилотные и информационные поднесущие.

Основные результаты работы были доложены на XIII Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь".

1. Особенности стандарта IEEE 802.11n

Современные стандарты передачи данных основаны на технологии OFDM, в соответствии с которой информация передаётся по нескольким поднесущим

частотам, образующим канал передачи данных. В стандарте IEEE 802.11n предусмотрена поддержка традиционных режимов передачи (L – Legacy) и режимов с высокой пропускной способностью (HT – High Throughput) [4, 5]. В традиционном режиме реализованы каналы с шириной полосы 5, 10 и 20 МГц, каждый информационный символ (OFDM-символ) объединяет 52 модулированные поднесущие, где 48 – информационные, 4 – пилотные и 12 – защитные (всего 64 поднесущих). Для режима с высокой пропускной способностью используются как стандартные каналы с шириной полосы 20 МГц, так и расширенные до 40 МГц. Для канала с шириной полосы в 20 МГц каждый OFDM-символ включает 56 модулированных поднесущих, где 52 – информационные, 4 – пилотные и 8 – защитные (всего 64 поднесущих), а для 40 МГц – 114 поднесущих, из них 108 информационных, 6 пилотных и 14 защитных (всего 128 поднесущих). Перед тем как демодулировать поднесущие, приёмному устройству необходимо решить две задачи: определить границы OFDM-символа, а также оценить и скорректировать сдвиг несущей частоты принятого сигнала. Успешное решение этих задач позволяет в значительной степени повысить помехоустойчивость приёмника, благодаря эффективной борьбе с межсимвольной интерференцией и интерференцией между поднесущими. В стандартах семейства IEEE 802.11 анализ принимаемого сигнала осуществляется в двух областях: во временной и частотной. Анализ сигнала во временной области реализуется за счёт использования преамбулы (участок сигнала в начале кадра с заранее известной структурой), а в частотной – за счёт использования фиксированного, определённого стандартом, положения пилотных поднесущих в OFDM-символах.

2. Анализ OFDM-сигнала во временной и частотной областях

Для оценки помехоустойчивости непосредственно самого стандарта IEEE 802.11n исследована структура битового потока, формируемого при передаче информации по беспроводному каналу на канальном и физическом уровнях, без

учёта верхних уровней (без привязки к типу передаваемой информации) сетевой модели OSI. На физическом уровне стандартом IEEE 802.11n могут использоваться три типа режимов работы – традиционный (non-HT), смешанный (HT Mixed) и режим с высокой пропускной способностью (HT), так называемое “Зеленое” (чистое) поле “Green Field” [5].

Структура кадров физического уровня стандарта передачи данных IEEE 802.11n состоит из заголовка, включающего в себя преамбулу и поля данных (рис. 1). Все поля заголовка передаются с наименьшей возможной скоростью, а поле данных с любой заданной скоростью. Для синхронизации во временной области в структуре преамбулы для каждого режима предусматриваются короткие и длинные настроечные последовательности: для традиционного режима – L-STF и L-LTF, и режима с высокой пропускной способностью – HT-STF и HT-LTF.

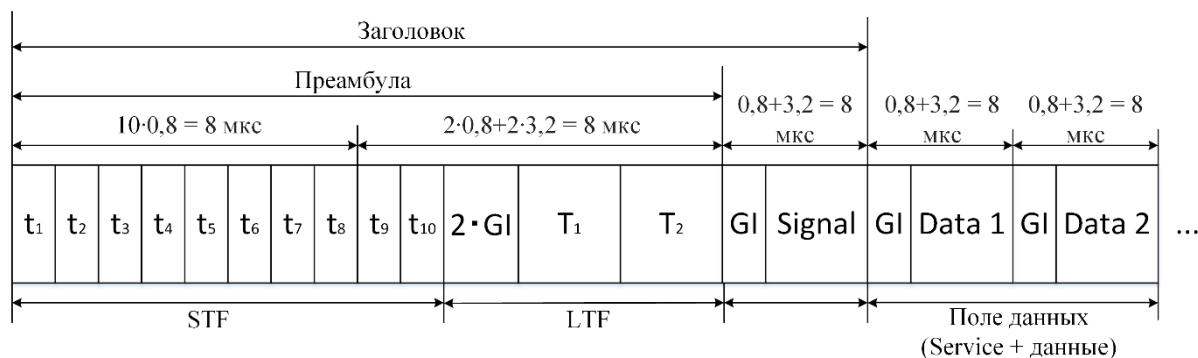


Рис. 1. Последовательность передаваемых данных стандарта IEEE 802.11n для традиционного режима.

В традиционном режиме преамбула состоит из 12 OFDM-символов: 10 коротких настроечных последовательностей и две длинные последовательности (как в стандарте IEEE 802.11a). Короткая настроечная последовательность использует 12 поднесущих (используется каждая четвертая поднесущая с номерами $\pm 4, \pm 8, \pm 12, \pm 16, \pm 20, \pm 24$) с модуляцией QPSK. Длительность символа короткой настроечной последовательности составляет 0,8 мкс, при этом между символами не используется защитный интервал. Короткие настроечные последовательности предназначены для обнаружения кадра физического уровня, автоматической регулировки усиления сигнала, а также

грубой временной и грубой частотной синхронизации. Длинные настроечные последовательности используют 53 поднесущие (в том числе используется центральная) с модуляцией BPSK. Каждый символ длинной настроечной последовательности имеет длительность, равную 3,2 мкс и отделён от символов короткой последовательности двумя защитными интервалами. Длинные последовательности используются для оценки канала, точной временной синхронизации и точной частотной синхронизации. Высокоскоростной режим стандарта передачи данных аналогичен традиционному, за исключением количества используемых поднесущих.

Наличие в эфире узкополосной помехи, попадающей в спектр полезного сигнала, не будет оказывать существенного влияния на помехоустойчивость канала связи из-за используемых в передатчике алгоритмов перемежения, вследствие чего, искажение только заголовков служебной информации помехой на одной частоте маловероятно. Однако, каждый кадр физического уровня содержит короткие и длинные настроечные последовательности, служащие для грубой и точной частотной и временной синхронизации. Частоты передачи настроечных последовательностей стандартов семейства IEEE 802.11n определены в спецификации [5] и наличие узкополосных помех на частотах передачи коротких настроечных последовательностей приводит к дезорганизации линии связи. Для получения количественных оценок помехоустойчивости системы связи стандарта IEEE 802.11n проанализируем синхронизацию в частотной области.

Анализ сигнала в частотной области в стандарте IEEE 802.11n основан на использовании фиксированного местоположения пилотных поднесущих в каждом OFDM-символе (рис. 2) [3].

Пилотные поднесущие содержат параметры, заранее известные на приёмной стороне и позволяют оценить качество канала передачи и синхронизации передающего и приёмного устройства. Для работы приёмного устройства пилотные поднесущие передаются совместно с информационными. Известные значения частот, фаз и амплитуд пилотных поднесущих

используются для фазовой автоподстройки опорной частоты и оценки состояния радиоканала, что позволяет предотвратить смещение спектра демодулированного сигнала.

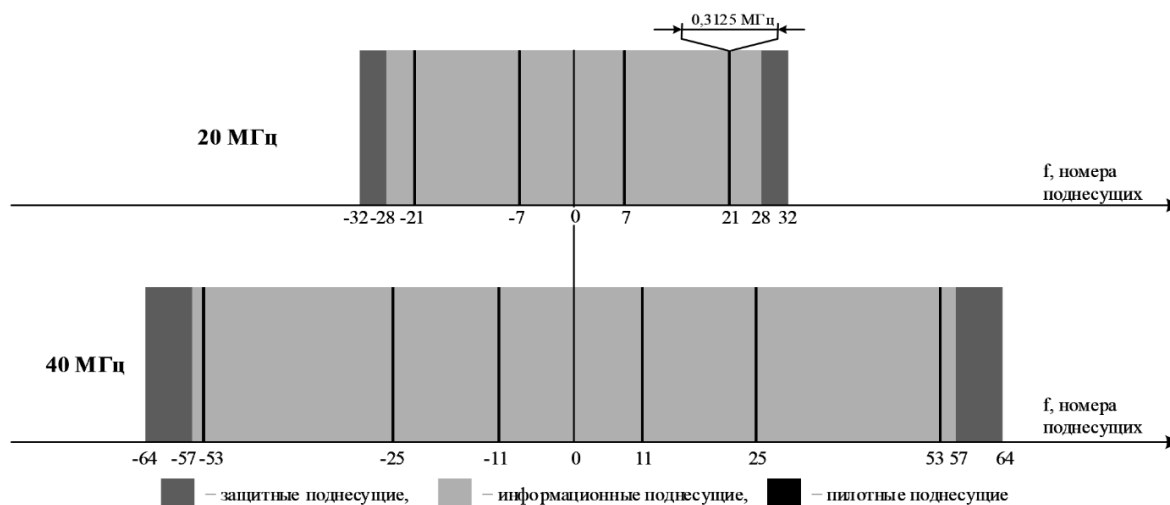


Рис. 2. Распределение пилотных поднесущих относительно несущей частоты OFDM-сигнала при ширине спектра 20 и 40 МГц для высокоскоростного режима.

3. Имитационная модель беспроводного канала стандарта IEEE 802.11n

Для проверки достоверности аналитических расчётов была проанализирована имитационная модель в среде MATLAB Simulink в условиях воздействия помех на информационные и пилотные поднесущие (рис. 3). Передатчик формирует пакет данных и передаёт в канал, где с помощью системы MIMO делится на два пространственных потока. Блоком аддитивного белого гауссовского шума (AWGN) устанавливается определенный уровень шума в канале. Генератором помех формируется мешающий сигнал с заданной спектральной плотностью мощности. При воздействии на пилотные поднесущие ширина спектра помехи устанавливалась равной ширине спектра пилотных поднесущих. С помощью сумматора сформированная помеха накладывается на аддитивную смесь полезного сигнала и шума. Сформированная реализация поступает на вход приёмника. Часть искажённой информации вследствие воздействия помех восстанавливается свёрточным кодером, который формирует последовательность принятых бит. Далее

исходный сигнал и сигнал, прошедший через канал с шумом и помехами, поступает на блок визуализации результатов моделирования, где при сравнении исходной последовательности и последовательности после воздействия помех производится подсчёт количества искажённых бит и расчёт значения вероятности битовой ошибки (BER). С помощью блока сигнального созвездия отображаются значения комплексных амплитуд и фаз сигнала в текущий момент времени, что позволяет визуально оценить степень искажения полезного сигнала.

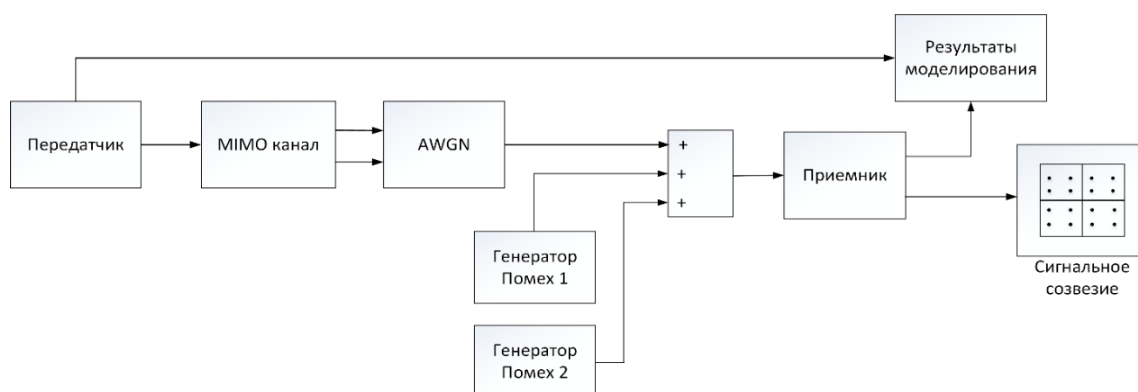


Рис. 3. Структурная схема имитационной модели стандарта IEEE 802.11n в среде MATLAB Simulink.

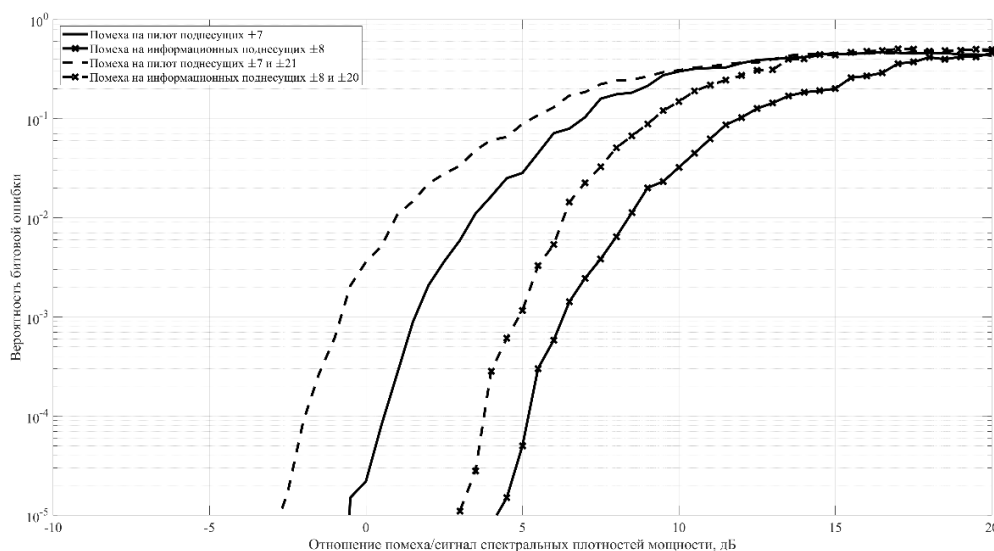


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения спектральных плотностей мощности помехи и сигнала при воздействии на пилотные и информационные поднесущие.

По результатам моделирования была получена зависимость вероятности битовой ошибки от отношения спектральных плотностей мощности помехи и

сигнала при воздействии помех отдельно на пилотные и информационные поднесущие (рис. 4).

Сплошная кривая описывает воздействие помех на две пилотные поднесущие с номерами ± 7 , сплошная кривая с маркерами – на две информационные поднесущие с номерами ± 8 , пунктирная кривая – на четыре пилотные поднесущие с номерами ± 7 и ± 21 , пунктирная кривая с маркерами – на четыре информационные поднесущие с номерами ± 8 и ± 20 .

Из рисунка 4 видно, что при воздействии помех на пилотные поднесущие одинаковые значения вероятности битовой ошибки достигаются при меньшем отношении спектральных плотностей мощности помехи и сигнала, чем при воздействии на информационные. Превышение вероятности битовой ошибки на уровне 10^{-3} [9] для 2(4) пилотных поднесущих происходит при отношении спектральных плотностей мощности помехи и сигнала, равном 2(-1) дБ, в то время как для 2(4) информационных поднесущих – 7(5) дБ. Из проведённого анализа можно сделать вывод, что воздействие помех на пилотные поднесущие приводит к дезорганизации системы передачи данных при меньшей в 3-4 раза энергетике помех, чем в случае воздействия помех на информационные поднесущие.

Заключение

Разработанная методика позволяет оценить помехоустойчивость современных и перспективных систем связи и передачи данных. По результатам моделирования были установлены уязвимости открытых стандартов передачи данных на примере стандарта IEEE 802.11n, которыми, в частности, могут являться пилотные поднесущие OFDM-сигнала и настроечные последовательности. Например, система передачи данных с модуляцией BPSK 1/2 может быть дезорганизована ($BER=10^{-3}$), широкополосной помехой с $\Delta f = 20$ МГц, при отношении спектральных плотностей мощности помехи и сигнала -4 дБ; при воздействии по двум пилотным поднесущим узкополосных помех с $\Delta f = 0,3125$ МГц каждая – при отношении спектральных плотностей

мощности помехи и сигнала 2 дБ, по четырём пилотным поднесущим – не менее -2 дБ. То есть при воздействии помех на 4 пилотные поднесущие функционирование системы передачи данных может быть нарушено аналогично заградительной помехе (согласованной по спектру с сигналом), энергетика которой должна быть выше на 9 дБ. Искажение пилотных поднесущих приводит к срыву грубой и точной временной и частотной синхронизаций, а также невозможности оценки и коррекции параметров канала. В частности, это приводит к невозможности определения начала OFDM-символа, частотного и временного рассогласования, передаваемого и принимаемого сигналов, а также смещения по частоте с точностью до расстояния между поднесущими.

Системы связи и передачи данных с OFDM-сигналами наиболее чувствительны к сдвигу несущей частоты. Сдвиг несущей частоты, кратный расстоянию между подканалами, делает демодуляцию невозможной, так как неправильно извлекается информация из подканалов, а сдвиг, не кратный расстоянию между подканалами, приводит к потере ортогональности и возникновению межканальной интерференции, что существенно ухудшает качество принимаемого сигнала. Серьёзность такого рода искажений вызвана ещё и тем, что невозможно снизить их уровень или полностью устранить увеличением мощности передатчика, так как источником помех является уже сам сигнал.

Проведённый анализ показывает крайнюю уязвимость пилотных поднесущих OFDM-сигнала в стандартах с открытой архитектурой. Для повышения помехоустойчивости систем передачи данных, например, может быть использована программная перестройка рабочей частоты пилотных поднесущих по псевдослучайному закону.

Литература

1. Van Nee, R., Prasad R. OFDM in wireless multimedia communications / L.: Artech House, 2000. 260 p.

2. Петренко Б. П. Оценка помехоустойчивости OFDM сигналов в системах передачи информации при воздействии дестабилизирующих факторов. // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 31 с.
3. Nezami M. K. RF Architectures and Digital Signal Processing Aspects of Digital Wireless Transceivers, 2003. 513 p.
4. IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks Specific – requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2007.
5. IEEE Standard for Information technology – Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput, 2009.
6. Matthew S. Gast. 802.11ac: A Survival Guide. O'Reilly Media, 2013, 154 p.
7. Cisco «IEEE 802.11ax: The Sixth Generation of Wi-Fi», Technical White Paper, 2018.
8. Rohde & Schwarz «802.11ad – WLAN at 60 GHz. A Technology Introduction», White Paper, 2017.
9. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006. 288 с.

Для цитирования:

Титов К.Д., Завалишина О.Н. Оценка влияния помех на пилотные поднесущие OFDM-сигнала стандарта IEEE 802.11n. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/6/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.6