

Изучение перспективных защищенных информационных систем на основе моделирования сигналов

Целью исследования является повышение эффективности управления информационной безопасностью за счет использования сетей 5G. Переход на сети пятого поколения не решает существующих проблем информационной безопасности и приводит к появлению новых угроз. Основная цель каждого метода модуляции сигналов заключается в обеспечении высокой пропускной способности, надлежащего качества передачи в условиях зашумленного канала связи, используя при этом минимальное количество энергии. Одним из самых эффективных показателей повышения уровня информационной безопасности в беспроводных сетях является квадратурная модуляция, которая используется в таких сетях как: LTE, WiMAX, McWill, DVB-T (T2), Wi-Fi и других сетях радиодоступа [1].

Одним из перспективных направлений развития сетей 5G является использование высших частотных диапазонов, таких как диапазон миллиметровых волн (от 30 до 300 ГГц) [2,3]. Особенностью миллиметрового диапазона волн является то, что они обеспечивают значительно более широкие спектральные полосы, давая возможность существенно повысить пропускную способность в каналах.

Таким образом, при изучении перспективных защищенных информационных систем, основанных на применении технологии сетей 5G целесообразно использовать моделирование сигналов канального уровня взаимодействия абонентов, которое позволяет на физическом уровне оценить основные параметры защищенности.

Материалы и методы исследования. Сети пятого поколения будут одновременно и похожи на любое предыдущее поколение мобильных сетей, и при этом заметно отличаться от них — и этому есть целый ряд объяснений, которые становятся очевиднее, если задуматься о том, каким образом эти изменения влияют на принципы обеспечения безопасности пользователей и оборудования сетей пятого поколения.

Широкое распространение в области передачи цифровой информации, включая сети 5G, получила комбинационная модуляция, получившая название квадратурной амплитудной модуляции. Большей спектральной эффективностью обладают многопозиционные сигналы, из которых наиболее часто используют четырехпозиционную фазовую модуляцию и шестнадцатипозиционную квадратурную амплитудную модуляцию.

Квадратурная амплитудная модуляция является разновидностью многопозиционной амплитудно-фазовой модуляции, помимо фазы амплитуда сигнала при заданном виде модуляции также будет нести в себе информацию. Это приводит к тому, что при заданной полосе частот возрастает количество передаваемой информации.

Представлен краткий обзор существующих подходов к построению модуляции OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing — ортогональное частотное разделение каналов с мультиплексированием) [4, 5] систем и методов формирования решений задач модуляции сигналов для построения таких систем.

Результаты. В настоящее время технология OFDM-систем широко применяется в современных системах беспроводного Интернета. Высокая скорость передачи информации в OFDM-системах достигается с помощью параллельной передачи информации по большому числу ортогональных частотных подканалов (поднесущих) [6].

Метод синтеза сигнально-кодowych конструкций с ортогональным частотным мультиплексированием предусматривает различные сценарии использования полуквадратурной модуляции в зависимости от требований защищенности от перехвата, а также балансирование между спектральной и энергетической эффективностью. Данный метод может использоваться в двух случаях: с альтернативной и согласованной передачами сигналов. В случае с альтернативной передачей, только одна из четырех поднесущих используется в течение одного канального интервала. Для эффективного использования пропускной способности, предложенный метод предполагает использование спектра трех других поднесущих для передачи данных в D2D каналах (это созданием связи между двумя пользовательскими устройствами, которые находятся в непосредственной близости), что позволяет дополнительно избежать интерференции между фиксированными каналами и каналами связи D2D.

Заключение. В настоящее время сети 5G можно считать одной из необходимых составных частей цифровой трансформации и цифровой экономики, при этом основной задачей при обеспечении безопасности в сотовой связи является защита от прослушивания. Однако в будущем мире смартфонов и интернета вещей, в окружениях с большим количеством механизмов, вероятность прослушивания, по всей видимости, отойдет на второй план. Вместо этого придется задуматься о таких вещах как атаки с манипуляцией данными, которые, к примеру, могут использоваться для того, чтобы отдавать командам команды на выполнение определенных действий (например, открыть дверь или перехватить управление беспилотным автомобилем). У операторов мобильных сетей, как и у производителей бытовой электроники, появится возможность предлагать «безопасность в виде сервиса», в результате чего поставщики приложений смогут при передаче отдельных видов данных применять дополнительные уровни безопасности поверх уже существующих защищенных каналов сети сотовой связи.[7]

За счет лучшей спектральной плотности, предложенный метод формирования сигнала дает возможность использовать прототипы оконных функций с лучшими свойствами пространственной локализации без нарушения условия ортогональности сигнальных базисов, и соответственно не требует использования циклических префиксов при формировании OFDM сигнала.

Ключевые слова: защищенные информационные системы, информационная безопасность, сети мобильной связи, математическая модель, сигнал, эффективность, цифровая информация

The study of promising secure information systems based on signal modeling

The aim of the study is to increase the effectiveness of information security management through the use of 5G networks. The transition to the fifth-generation network does not solve the existing problems of information security and leads to the emergence of new threats. The main objective of each modulation method of signals is to ensure high bandwidth, proper transmission quality in a noisy communication channel, using the minimum amount of energy. One of the most effective indicators of increasing the level of information security in wireless networks is quadrature modulation, which is used in such networks as: LTE, WiMAX, McWill, DVB-T (T2), Wi-Fi and other radio access networks [1].

One of the promising directions for the development of 5G networks is the use of higher frequency ranges, such as the range of millimeter waves (from 30 to 300 GHz) [2, 3]. A feature of the millimeter wave range is that they provide much wider spectral bands, making it possible to significantly increase the bandwidth in the channels.

Thus, when studying prospective protected information systems based on the use of 5G network technology, it is advisable to use a simulation of the signals of the channel-level interaction of subscribers, which allows you to evaluate the basic security parameters at the physical level.

Materials and research methods. Fifth generation networks will simultaneously look like any previous generation of mobile networks, and at the same time they will differ significantly from them – and there are a number of explanations that become more obvious if you think about how these changes affect the principles of user and equipment safety networks of the fifth generation.

Widespread in the field of digital information transmission, including 5G networks, has received combinational modulation, called quadrature amplitude modulation.

Multiposition signals have the greatest spectral efficiency, of which four-position phase modulation and sixteen-position quadrature amplitude modulation are most often used.

The quadrature amplitude modulation is a kind of multi-position amplitude-phase modulation, in addition to the phase, the amplitude of the signal for a given type of modulation will also carry information. This leads to the fact that for a given frequency band the amount of transmitted information increases.

A brief overview of the existing modulation approaches is presented OFDM (english. Orthogonal frequency-division multiplexing) [4,

5] systems and methods for forming solutions of signal modulation problems for building such systems/

Results. Currently, OFDM technology is widely used in modern wireless Internet systems. High data transfer rates in OFDM systems are achieved using parallel information transfer over a large number of orthogonal frequency subchannels (subcarriers) [6].

The method of synthesizing signal-code constructions with orthogonal frequency multiplexing provides for different scenarios for the use of semi-square modulation depending on the requirements for interception protection, as well as balancing between spectral and energy efficiency. This method can be used in two cases: with alternative and consistent transmission of signals. In the case of alternative transmission, only one of the four subcarriers is used during one channel interval. For efficient use of bandwidth, the proposed method involves the use of the spectrum of three other subcarriers for data transmission in D2D channels (this creates a connection between two user devices that are in close proximity), which allows you to further avoid interference between fixed channels and D2D communication channels.

Findings. At present, 5G networks can be considered as one of the necessary components of the digital transformation and digital economy, while the main task in ensuring security in cellular communications is protection against eavesdropping. However, in the future world of smartphones and the Internet of things, in environments with a large number of mechanisms, the probability of listening is likely to fade into the background. Instead, you have to think about such things as data manipulation attacks, which, for example, can be used to command the mechanisms to perform certain actions (for example, open the door or take control of an unmanned vehicle). Mobile network operators, like consumer electronics manufacturers, will be able to offer “security as a service,” with the result that application providers will be able to apply additional levels of security over existing secure cellular network channels when transferring certain types of data. [7] Due to the better spectral density, the proposed signal conditioning method makes it possible to use prototypes of window functions with the best spatial localization properties without violating the orthogonality condition of the signal bases, and accordingly does not require the use of cyclic prefixes when generating the OFDM signal.

Keywords: secure information systems, information security, mobile networks, mathematical model, signal, efficiency, digital information

Введение

OFDM-системы начали свое развитие в середине 60-х годов XX века [8–10] но оборудование, реализующее данный принцип работы (LTE, WiMAX, McWill, DVB-T (T2), Wi-Fi), стало доступным сравнительно недавно, и представлено в основном крупными производителями, такими как Intel, Fujitsu, Huawei.

Важной задачей создания отечественной OFDM системы является разработка эффективного алгоритма коррекции комплексной передаточной характеристики канала связи при построении защищенных информационных систем на базе сетей 5G с использованием моделирования сигналов.

Актуальность данной работы определяется тем, что сети мобильной связи стремительно развиваются в течение последнего десятилетия,

что обусловлено большой популярностью смартфонов и планшетов на рынке вычислительной техники. Эта тенденция ожидаемо будет сохраняться в ближайшем будущем, поскольку рынок беспроводных устройств постоянно расширяется, проникая во все сферы человеческой жизни. Соответственно, стремительный рост объемов трафика в сетях мобильной связи ставит новые требования к их пропускной способности. Ведущие компании на рынке технологии сетей мобильной связи согласовали требования относительно тысячекратного повышения информационной емкости в сетях пятого поколения.

Значительную роль в энергетической эффективности и обеспечении информационной безопасности беспроводных сетей передачи данных играет метод модуляции [9].

Одним из преимуществ миллиметровых волн является значительно более компактные разме-

ры передающих и приемных антенн, что дает возможность использовать более эффективные схемы пространственного мультиплексирования за счет увеличения количества антенн как на стороне базовой станции так и на стороне абонентского устройства.

Поэтому, важно разработать новые методы и алгоритмы передачи сигналов в радиоканалах, которые бы дали возможность обеспечить надлежащую защиту от несанкционированного вмешательства в системы двойного назначения. В частности, большое внимание уделяется именно методам модуляции сигналов и технологии OFDM-систем.

В соответствии с ФЗ от 26 июля 2017 г. № 187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации», к системам связи устанавливаются ряд требований, необходимых для их нормального функционирования [12].

В отличие от существующих решений, которые вынуждены жертвовать производительностью при использовании текущих беспроводных технологий, сети 5G создаются для реального массового внедрения «интернета вещей» и других требовательных к скорости сети и доступности сервисов. Данные технологии подвижной радиосвязи сети 5G, обладают колоссальными возможностями для развития всех отраслей экономики страны.

1. Математическая модель сигнала с квадратурно-амплитудной модуляцией

При использовании алгоритма шестнадцатипозиционной квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM – Quadrature Amplitude Modulation) передаваемый сигнал кодируется одновременными изменениями амплитуды синфазной (I) и квадратурной (Q) компонент несущего гармонического колебания, которые сдвинуты по фазе друг относительно друга. Результирующий сигнал S формируется при суммировании этих колебаний. Квадратурное представление сигналов является удобным и достаточно универсальным средством их описания.

Для данного алгоритма существенно, что при модулировании синфазной и квадратурной составляющей несущего колебания используется одно и то же значение шага изменения амплитуды.

Для случая квадратурно-амплитудной модуляции сигнал с ортогональным частотным мультиплексированием записывается следующим образом [13]:

$$S_{OFDM/QAM}(t) = \sum_{k=1}^N g_k(t) [A_{kI} \cos(\omega kt) - A_{kQ} \sin(\omega kt)] \quad (1)$$

где $g_k(t)$ – форма прототипного импульса, A_{kI} , A_{kQ} – синфазная и квадратурная амплитуда

символа, $\omega = 2\pi f$, где f – частота поднесущей, k – индекс поднесущей, N – количество поднесущих OFDM сигналов.

OFDM удовлетворяет требования по обеспечению высокоскоростной передачи дискретной информации по радиоканалам, поскольку в структуре сигнала есть особенности, обеспечивающие устойчивость к помехам, которые возникают в радиоканалах [14]. Высокая спектральная эффективность OFDM сигнала позволяет ограничить полосу частот, необходимую для обеспечения требуемой скорости передачи. Использование большого количества поднесущих частот определяет такие его свойства, как устойчивость к узкополосным помехам и частотно-селективным замираниям вследствие многолучевого распространения волн [15].

Математическое представление сигнала QAM записывается следующим образом [16]:

$$S_{QAM}(t) = g(t)A_I \cos(\omega t) - g(t)A_Q \sin(\omega t) \quad (2)$$

где $g(t)$ – форма прототипного импульса, A_I , A_Q – синфазная и квадратурная амплитуда символа, $\omega = 2\pi f$, где f – частота несущей.

Поскольку нисходящий канал связи в LTE использует мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM), математическая модель сигнала определяется формулой (1).

Мгновенная мощность сигнала в момент времени t определяется как:

$$P(t) = g_k^2(t) [A_{kI} \cos(\omega kt) - A_{kQ} \sin(\omega kt)]^2 \quad (3)$$

Поскольку прототипная функция является одинаковой для всех сигналов, энергия QAM сигнала вычисляется следующим образом:

$$E_{QAM} = g^2(t) \int_0^{66.7} [A_I \cos(\omega kt) - A_Q \sin(\omega kt)]^2 dt \quad (4)$$

Формула (4) определяет энергию QAM символа для одного ресурсного элемента. Однако, она не может быть вычислена путем простого интегрирования. Поэтому, мы используем интегрирование по частям для расчета полной энергии передаваемого сигнала. Поэтому, представим ее следующим образом:

$$E_{QAM} = g^2(t) \int_0^{66.7} (A_I^2 \cos^2(\omega t) - 2A_I A_Q \cos(\omega t) \sin(\omega t) + A_Q^2 \sin^2(\omega t)) dt \quad (5)$$

Представляя интеграл от суммы в виде суммы интегралов и вынося константы интегрирования, получаем:

$$E_{QAM} = g^2(t) \cdot \left[A_I^2 \int_0^{66.7} \cos^2(\omega t) dt - 2A_I A_Q \int_0^{66.7} \cos(\omega t) \sin(\omega t) dt + A_Q^2 \int_0^{66.7} \sin^2(\omega t) dt \right] \quad (6)$$

Для интегрирования по частям, вводится следующая подстановка переменных:

$$u = \cos(\omega t), du = -\sin(\omega t)dt, \cos^2(\omega t) = \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos(2\omega t)}{2}\right) \quad (7)$$

После этого, формула (6) будет записана в следующем виде:

$$E_{QM} = g^2(t) \cdot \left[A_I^2 \int_0^{66.7} \left(\frac{1}{2} + \frac{\cos(x)}{2}\right) dx - 2A_I A_Q \int_0^{66.7} u du + A_Q^2 \int_0^{66.7} \left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(x)}{2}\right) dx \right] = g^2(t) \cdot \left[\frac{A_I^2}{2} \int_0^{66.7} 1 dt + \frac{A_I^2}{2} \int_0^{66.7} \cos(x) dx - 2A_I A_Q \int_0^{66.7} u du + \frac{A_Q^2}{2} \int_0^{66.7} 1 dt - \frac{A_Q^2}{2} \int_0^{66.7} \sin(x) dx \right] \quad (8)$$

Вычислив каждый интеграл в (2) независимо получаем:

$$E_{QAM} = g^2(t) \cdot \left[\frac{A_I^2}{2} (\omega t) + \frac{A_I^2}{4} \sin(x) + u^2 A_I A_Q + \frac{A_Q^2}{2} \omega t - \frac{A_Q^2}{4} \sin(x) \right]_0^{66.7} \quad (9)$$

Возвращаясь к исходным переменным и упрощая выражение, получаем суммарную энергию одного квадратурно-амплитудно модулированного символа:

$$E_{QAM} = \frac{g^2(t)}{4} \cdot \left[2(A_I^2 + A_Q^2)\omega t + 4A_I A_Q \cos^2(\omega t) + (A_I^2 - A_Q^2)\sin(2\omega t) \right]_0^{66.7} \quad (10)$$

1.1. Математическая модель модифицированного сигнала с полуквадратурно-амплитудной модуляцией

Для повышения информационной безопасности процесса передачи данных в сетях мобильной связи предлагается метод полуквадратурно-амплитудной модуляции, который позволяет повысить сложность несанкционированного вторжения в радиоканалы связи. Это достигается за счет того, что в отличие от обычной QAM, в предложенном методе модулируется только одна компонента сигнала на передающей стороне. Однако, целевой приемник имеет возможность воспроизводит входной сигнал как двухкомпонентный, используя таблицу ассоциативности составляющих, которая известна только ему [17].

Для математического представления HQAM (Half QAM) сигнала исключим квадратурную составляющую:

$$S_{HQAM}(t) = g(t)A \cos(\omega t) \quad (11)$$

Тогда математическое представление OFDM/HQAM сигнала примет вид:

$$S_{OFDM/HQAM}(t) = \sum_{k=1}^N g_k(t)A_k \cos(\omega_k t) \quad (12)$$

Мгновенная мощность OFDM/HQAM сигнала вычисляется как:

$$P(t) = g^2(t)A^2 \cos^2(\omega t) \quad (13)$$

В этом случае полная энергия OFDM/HQAM сигнала будет определяться:

$$E_{HQAM} = g^2(t)A^2 \int_0^{66.7} \cos^2(\omega t) dt \quad (14)$$

Как видно из формулы (14), вся энергия сигнала HQAM на передающей стороне приходится только на одну компоненту. При этом, приемник воспроизводит данный сигнал как двухкомпонентный, что вдвое увеличивает эффективную энергию принятого сигнала. Это достигается путем передачи отдельных символов сигнального созвездия на различных поднесущих частотах. Качественный вид частотной структуры поднесущих OFDM-системы связи показан на рис. 1

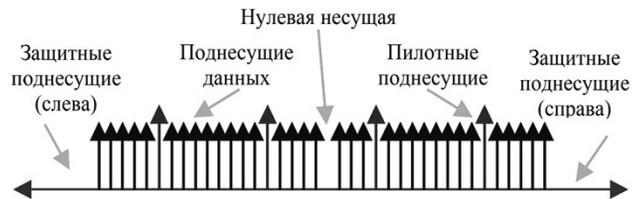


Рис. 1. Качественный вид частотной структуры поднесущих OFDM-системы

В этом случае четыре поднесущие OFDM сигнала передают символы, которые логически относятся к одному созвездия модуляции, однако физически передаются отдельно. Каждая поднесущая связана с уникальной для нее таблицей ассоциативности.

2. Повышение защищенности радиоканалов для различных типов квадратурно-амплитудной модуляции путем использования ассоциативности поднесущих

Более подробно рассмотрим предложенные типы полуквадратурно-амплитудной модуляции с альтернативным передачей и согласованным передачей для четырех поднесущих.

Для случая квадратурно-фазовой модуляции, в которой позиционность сигнального созвездия $M = 4$, передатчик передает только один символ AI с амплитудой равной $1/\sqrt{2}$ на одной из четырех поднесущих. Выбор одной поднесущей, из заданного набора из четырех поднесущих зависит от I-Q комбинации данного символа. Каждая точка созвездия HQPSK (Half QPSK) представлена своей поднесущей, а именно:

- первая поднесущая: AI = $1/\sqrt{2}$, AQ = $1/\sqrt{2}$;
- вторая поднесущая: AI = $1/\sqrt{2}$, AQ = $-1/\sqrt{2}$;
- третья поднесущая: AI = $-1/\sqrt{2}$, AQ = $1/\sqrt{2}$;
- четвертая поднесущая: AI = $-1/\sqrt{2}$, AQ = $-1/\sqrt{2}$.

Каждая поднесущая дает возможность представлять полученный символ как символ I-Q обычной QPSK модуляции. Таким образом,

скорость передачи битов предложенного метода такая же, как и для QPSK модуляции. Однако, использование таблиц ассоциативности поднесущих на передающей и приемной стороне вводит в заблуждение противника, поскольку физически сигнал в канале связи передается в виде обычного амплитудно-модулированного сигнала.

Полноценно информацию можно воспроизвести только при наличии полных таблиц ассоциативности, которые могут быть сформированы с использованием нескольких тысяч различных комбинаций несущих частот сигнала OFDM. Принцип ассоциации поднесущих при использовании полуквадратурно-фазовой модуляции представлен на рис. 2.

Сигнальное созвездие для HQPSK модуляции рассмотрен на рис. 3. Круговые области показывают соответствующие точки каждой поднесущей. Сплошная линия ограничивает точку первой поднесущей, штриховая – второй поднесущей, пунктирная – третьей поднесущей, и штрих-пунктирная линия – четвертая поднесущая, соответственно.

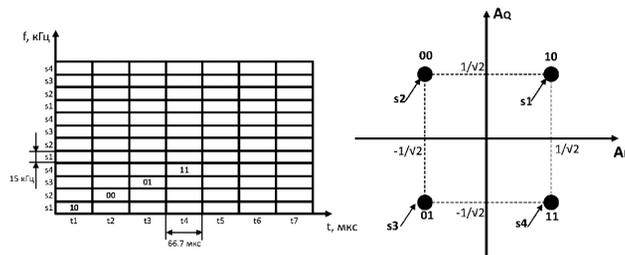


Рис. 2. Принцип ассоциации поднесущих OFDM сигнала с символами созвездия квадратурно-фазовой модуляции

Использование определенной поднесущей зависит от необходимой комбинации бит из множества {00, 01, 10, 11}. Таким образом, зная индекс поднесущей, на которой получен сиг-

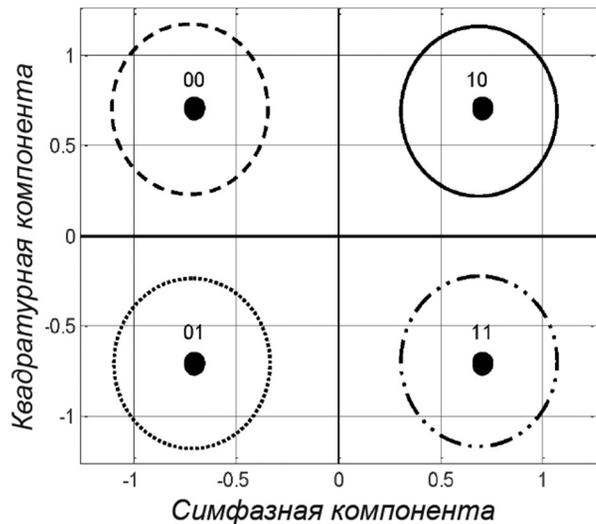


Рис. 3. Сигнальное созвездие полуквадратурно-фазовой модуляции

нал, приемник сравнивает амплитуду Q с амплитудой I согласно таблице ассоциативности. Этот метод является менее сложным на передающей стороне, более энергоэффективным, однако сложнее для детектирования, по сравнению с обычной QPSK модуляцией.

По аналогии, предложенный метод формирования сигнала с квадратурно-амплитудной модуляцией может быть масштабирован до произвольной позиционной зависимости модуляции. Для примера. Представим метод для 16-ти позиционной HQAM модуляции. Передатчик передает синфазные символы с амплитудами $\{-3/\sqrt{10}, -1/\sqrt{10}, 1/\sqrt{10}, 3/\sqrt{10}\}$. Таким образом, вместо двух компонент 16 QAM сигнала, физически передается только одна компонента. На приемной стороне приемник ассоциирует амплитуду квадратурной составляющей полученной синфазной составляющей согласно таблице ассоциативности (табл. 1), как символ I-Q в созвездии 16-QAM. Каждая поднесущая связана лишь с четырьмя символами вместо 16 (рис. 3). То есть, битовая скорость одной поднесущей такая же, как для 16-QAM, однако защищенность канала существенно выше.

Таблица 1

Таблица ассоциативности 16 HQAM

Индекс поднесущей	Синфазная амплитуда	Квадратурная амплитуда
1	$-3/\sqrt{10}$	$-3/\sqrt{10}$
	$-1/\sqrt{10}$	$-1/\sqrt{10}$
	$1/\sqrt{10}$	$1/\sqrt{10}$
	$3/\sqrt{10}$	$3/\sqrt{10}$
2	$-3/\sqrt{10}$	$3/\sqrt{10}$
	$-1/\sqrt{10}$	$1/\sqrt{10}$
	$1/\sqrt{10}$	$-1/\sqrt{10}$
	$3/\sqrt{10}$	$-3/\sqrt{10}$
3	$-3/\sqrt{10}$	$1/\sqrt{10}$
	$-1/\sqrt{10}$	$3/\sqrt{10}$
	$1/\sqrt{10}$	$3/\sqrt{10}$
	$3/\sqrt{10}$	$1/\sqrt{10}$
4	$-3/\sqrt{10}$	$-1/\sqrt{10}$
	$-1/\sqrt{10}$	$-3/\sqrt{10}$
	$1/\sqrt{10}$	$-3/\sqrt{10}$
	$3/\sqrt{10}$	$-1/\sqrt{10}$

Как видно из рис. 4а, каждый символ созвездия 16 HQAM представляет 4 бита, как и при обычной 16-QAM. Однако такой метод формирования сигналов повышает сложность его перехват противником. Линии на рисунке ограничивают области символов каждой поднесущей. Ассоциация поднесущих в наборе символов сигнального созвездия модуляции осуществляется аналогично (рис. 2), за исключением количества позиций сигнального созвездия. Кроме альтернативного метода передачи сигналов, предложен вариант модуляции 16 HQAM с согласованной передачей. Данный метод использует такую же таблицу ассоциативности, как и 16 HQAM с альтернативным передачей (табл. 1). Однако, при использовании согласо-

ванной передачи с четырьмя поднесущими одновременно, один символ представляет только два бита вместо четырех.

Соответственно, сложность детектирования такого сигнала есть еще выше, чем в методе с альтернативным передачей, поскольку кроме таблицы ассоциативности, приемник должен иметь информацию о последовательности символов поднесущих, которая динамически изменяется по закону, известному лишь для передающего и приемного устройства. Сигнальное созвездие для 16 HQAM с согласованным передачей представлено на рис. 4б.

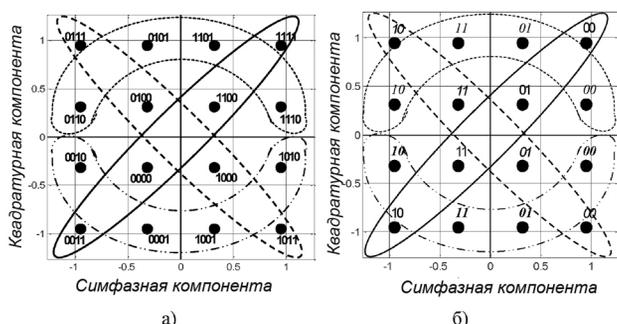


Рис. 4. Созвездие модуляции 16 HQAM: а) с альтернативной передачей; б) с согласованной передачей

На рис. 4б, каждый символ 16-HQAM созвездие представляет 2 бита вместо 4 бит. Тем не менее, четыре поднесущей передают одновременно четыре символа, которые не перекрываются, и общее количество переданных битов увеличивается до 8 бит на модулированный блок 4 поднесущей $\times 15\text{кГц} \times 66.7\text{мкс}$.

3. Исследование характеристик радиоканалов при использовании модифицированного метода модуляции с ортогональным частотным мультиплексированием

Предлагаемый метод предусматривает различные сценарии использования полуквадратурной модуляции в зависимости от требований защищенности от перехвата, а также балансирование между спектральной и энергетической эффективностью.

На рис. 5 представлено сравнение спектральной плотности модуляционных символов QAM и HQAM в частотно-временной матрицы сигналов.

Как видно из рис. 5, при формировании сигнала OFDM/HQAM символы QAM разделяются на две составляющие: действительную часть и мнимую, причем мнимая часть сдвигается во времени на величину $T_s/2$ относительно действительной. Соответственно, спектральная плотность сигнала OFDM/HQAM составляет $v_0 = 1$, $\tau_0 = 1/2$, тогда как для OFDM/QAM – $\tau_0 = v_0 = 1$. В таком случае удваивается символьная скорость, вдвое уменьшается количество информации на один модуляционный

символ при сохранении скорости передачи информации на физическом уровне.

Спектральная эффективность системы радиосвязи при использовании предложенного метода синтеза сигнально кодовых конструкций рассчитывается следующим образом [18]:

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \log_2 M}{\tau_0 v_0} \log_2 M \quad (15)$$

Следовательно, для системы OFDM/HQAM, спектральная эффективность выше, чем в системе OFDM/QAM. Это достигается за счет лучшей спектральной плотности, что дает возможность использовать прототипы оконных функций с лучшими свойствами пространственной локализации без нарушения условия ортогональности сигнальных базисов, и соответственно не требует использования циклических префиксов при формировании OFDM сигнала.

На рис. 6 показано сравнение спектральных характеристиках сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием при передаче двух соседних ресурсных блоков. Полученные результаты показывают существенное преимущество предложенного метода синтеза сигнала с ортогональным частотным мультиплексированием с точки зрения спектральных характеристик и локализации энергии сигнала. Преимуществом предложенного метода синтеза сигнала является мгновенный спад уровня боковых лепестков спектральной характеристики и их одинаковый уровень, что дает возможность повысить энергетическую и спектральную эффективность радиоканалов военного назначения [19].

Согласно предложенной методике было определено, что прямоугольная оконная функция имеет лучшие показатели частотно-временной локализации, что подтверждается значением параметра Гейзенберга 0.9762. Для аналогичных границ Δt и Δf , параметр Гейзенберга для прямоугольной оконной функции составляет 0.1546. Преимуществом функции Чебышева над другими функциями являются мгновенный спад боковых гармоник на уровень -100 дБ и их равномерный уровень по всей ширине спектра, как показано на рис.6б. Такое свойство функции Чебышева дает возможность повысить эффективность радиоканалов в гетерогенной сети,

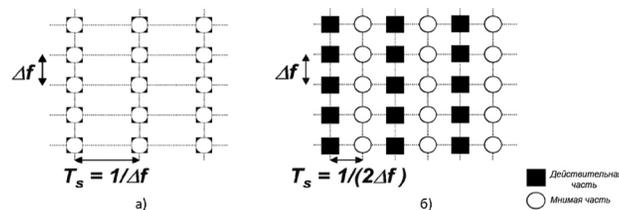


Рис. 5. Частотно-часовая матрица: а) OFDM/QAM; б) OFDM/HQAM

даже при значительном разбросе их частотно-временных параметров.

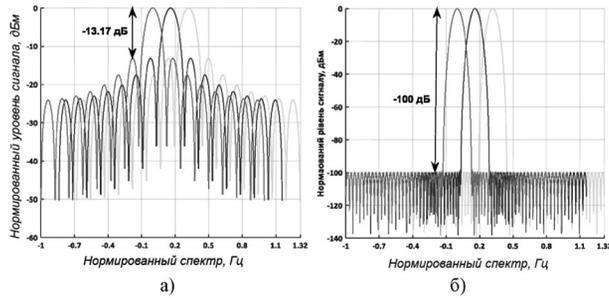


Рис. 6. Сравнение спектра сигнала OFDM для трех несущих: а) При прямоугольной оконной функции; б) функции Чебышева.

Кроме того, проведено моделирование коэффициента появления битовых ошибок от соотношения сигнал/шум для оценки предложенного метода в сравнении с существующими методами квадратурно-амплитудной модуляции. На рис. 7 показаны результаты моделирования для HQPSK и QPSK модуляции для Гауссовского и Релеевского канала.

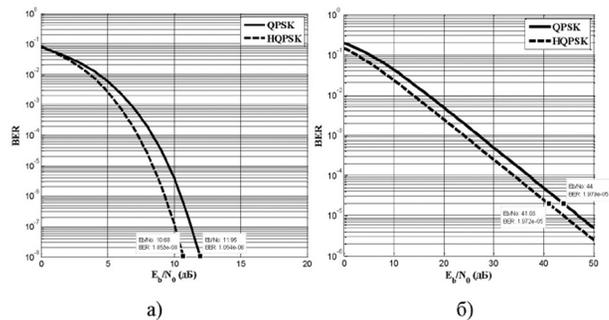


Рис. 7. Сравнительная зависимость коэффициента появления битовых ошибок от соотношения сигнал/шум для QPSK и HQPSK в условиях: а) Гауссовского канала; б) Релеевского канала.

Аналогичные результаты для 16 HQAM и 16 QAM приведены на рис 8.

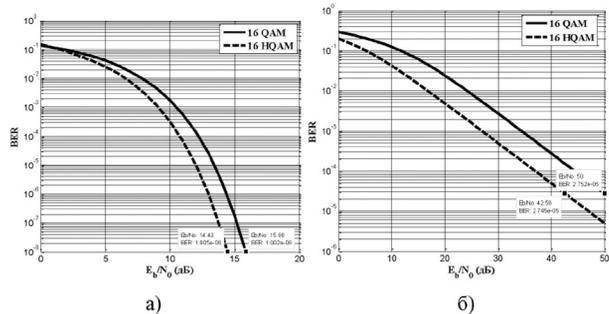


Рис. 8. Сравнительная зависимость коэффициента появления битовых ошибок от соотношения сигнал/шум для 16 QAM и 16 HQAM в условиях: а) Гауссовского канала; б) Релеевского канала

Аналогичные результаты для 64 HQAM и 64 QAM приведены на рис 9.

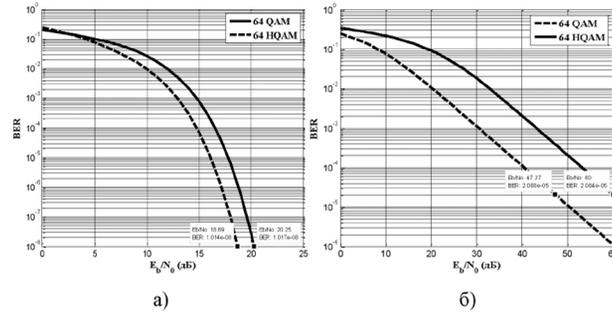


Рис. 9. Сравнительная зависимость коэффициента появления битовых ошибок от соотношения сигнал/шум для 64 QAM и 64 HQAM в условиях: а) Гауссовского канала; б) Релеевского канала

Предложенный метод синтеза сигнала обеспечивает высокую эффективность по сравнению с обычным методом синтеза сигнала от 8% до 10% для Гауссовского канала и от 15% до 25% для Релеевского канала. Выигрыш для Релеевского канала являются лучшими в связи с тем, что при многолучевом распространении волн характерны фазовые шумы и IQ-дисбаланс, которые эффективно устраняются за счет одноконтурной передачи модулированных символов.

Заключение

Опыт показал, что при построении защищенных информационных систем на базе сетей 5G с использованием моделирования сигналов, позволит повысить защищенность беспроводных каналов связи от перехвата данных в сетях 5G двойного использования. Такие сети обладают большей поверхностью атаки по сравнению с нынешними сетями сотовой связи, а это означает, что потенциальная «поверхность атаки» в мобильных сетях нового поколения будет иметь намного больше сходства с таковой в классическом предприятии, поскольку стандартные виртуализированные технологии более доступны и лучше известны, например – [20], чем проприетарные сетевые технологии, которые характерны для нынешних сетей сотовой связи.

В отличие от обычной QAM, в предложенном методе модулируется только одна компонента сигнала на передающей стороне. Однако, целевой приемник имеет возможность воспроизводить входной сигнал как двухкомпонентный, используя таблицу ассоциативности составляющих, которая известна только ему. Использование таблиц ассоциативности поднесущих на передающей и приемной стороне вводит в заблуждение противника, поскольку физически сигнал в канале связи передается в виде обычного амплитудно-модулированного сигнала.

Преимуществом OFDM сигнала является мгновенный спад уровня боковых лепестков спектральной характеристики и их одинаковый уровень, что дает возможность повысить энергетическую и спектральную эффективность радиоканалов назначения даже при значительном разбросе их частотно-временных параметров.

Литература

1. Малиничев Д.М., Резинин Д.А., Шорин А.О. Многофакторная имитационная модель обслуживания подвижных абонентов в мобильных системах связи // Радиотехника. 2016. № 5. С. 121–126.
2. Khan F., Pi Z., Rajagopal S. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication // In IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Oct. 2012. P. 1517–1523.
3. Rappaport T.S., Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Gutierrez F. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! // IEEE Access. 2013. № 1. P. 335–349.
4. Wang L., Tellambura C. An Overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM systems. Signal Processing and Information Technology, 2006. IEEE International Symposium. Aug. 2006. P. 840–845.
5. Van Nee R., Prasad R. OFDM in wireless multimedia communications. L.: Artech House, 2000. 260 p.
6. Максимюк Т.А., Пелишок А., Ратич А.Т., Брыч М.В. Повышение помехоустойчивости сигнальных конструкций в системах с ортогональным частотным мультиплексированием // Материалы научно-методической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций и подготовка специалистов в области телекоммуникаций». 2012. С. 41–44.
7. Time-Reversal Based Secure Transmission Scheme for 5G Networks over Correlated Wireless Multi-Path Channels // Wireless Pers Commun. 2018. P. 979–1001.
8. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. No. 4. P. 2474–2492.
9. Richard van Nee. Basics and History of OFDM – Woodside Networks. Breukelen, 2003.

References

1. Malinichev D.M., Rezinin D.A., Shorin A.O. Multi-factor simulation model of mobile subscriber service in mobile communication systems. Radiotekhnika = Radio engineering. 2016; 5: 121–126. (In Russ.)
2. Khan F., Pi Z., Rajagopal P. Millimeter-wave mobile broadband with large scale spatial processing for 5G mobile communication. In IEEE 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Oct. 2012: 1517–1523.
3. Rappaport T. , Sun S., Mayzus R., Zhao H., Azar Y., Wang K., Gutierrez F. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! IEEE Access. 2013; 1: 335–349.

10. Van Nee, R., Prasad R. OFDM in wireless multimedia communications. L.: Artech House, 2000. 260 p.
11. Goldsmith J. Wireless communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 1–560
12. Ф3 от 26 июля 2017 г. № 187-Ф3 «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».
13. Hua Z. Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications: Ph.D. thesis. Georgia Institute of Technology, 2004. 114 p.
14. Аветисян В.Г., Маркосян М.В., Григорян В.В. Многолучевой прием: эквивалентная модель и метод виртуальных антенн // Антенны. 2014. № 6 (205). С. 39–48.
15. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16 для диапазонов ниже 11 ГГц // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005. С. 46–52.
16. Maksymyuk T., Han L., Ge X., Chen H., Jo M. Quasi-quadrature Modulation Method for Power Efficient Video Transmission over LTE Networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2014. Vol. 63. №5. P. 2083–2092.
17. Галустов Г.Г., Мелешкин С.Н. Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением сигналов. ТТИ ЮФУ, 2012. 80 с.
18. Stryhalyuk V., Yaremko O., Maksymyuk T., Melnyk O. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes. Krakow, 2012. Vol. 1. № 3. P. 49–54.
19. Ahmad R., Bahai S., Burton R. Multi – Carrier Digital Communications. Theory and Applications of OFDM. Saltzberg: Wi-Fi Planet, 2002. 395 p.
20. Бабаш А.В., Сизов В.А., Микрюков А.А. Security Evaluation of a Brute-force Attack on a Cipher using a Statistical Criterion for Plaintext // Automatic Control and Computer Sciences. 2019. Vol. 53. No. 1. P. 39–44.

4. Wang L., Tellambura C. An Overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM systems. Signal Processing and Information Technology; 2006. IEEE International Symposium. Aug. 2006. P. 840–845.
5. Van Nee R., Prasad R. OFDM in wireless multimedia communications. L.: Artech House; 2000. 260 P.
6. Maksimyuk T.A., Pelishok A., Ratich A.T., Brych M. V Improving the noise immunity of signal structures in systems with orthogonal frequency multiplexing. Материалы научно-методической конференции «Современные проблемы телекоммуникаций и подготовка специалистов в области телекоммуникаций». 2012: 41–44. (In Russ.)
7. Time-Reversal Based Secure Transmission Scheme for 5G Networks over Correlated Wireless

Multi-Path Channels. *Wireless Pers Commun.* 2018; 979-1001.

8. Farhang-Boroujeny B., Moradi H. OFDM inspired waveforms for 5G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2016. Vol. 18. No. 4: 2474–2492.

9. Richard van Nee. *Basics and History of OFDM – Woodside Networks.* Breukelen; 2003.

10. Van Nee, R., Prasad R. *OFDM in wireless multimedia communications.* L.: Artech House; 2000. 260 P.

11. Goldsmith J. *Wireless communication.* Cambridge: Cambridge University Press; 2005: 1-560.

12. FZ от 26 iyulya 2017 g. N 187-FZ «O bezopasnosti kriticheskoy informatsionnoy infrastruktury Rossiyskoy Federatsii» = Federal law of July 26; 2017 N 187-FZ “On the security of the critical information infrastructure of the Russian Federation”. (In Russ.)

13. Hua Z. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications: Ph.D. thesis.* Georgia Institute of Technology; 2004. 114 P.

14. Avetisyan V.G., Markosyan M.V., Grigoryan V.V. Multi-path reception: the equivalent model and the method of virtual antennas. *Antenny = Antennas.* 2014; 6 (205): 39-48. (In Russ.)

15. Shakhnovich I. *IEEE 802.16 Broadband Ac-*

cess Standard for Bands Below 11 GHz. ELEKTRONIKA: NTB; 2005: 46-52. (In Russ.)

16. Maksymyuk T., Han L., Ge X., Chen H., Jo M. Quasi-quadrature Modulation Method for Power Efficient Video Transmission over LTE Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* 2014. Vol. 63; 5: 2083- 2092.

17. Galustov G.G., Meleshkin S.N. Orthogonal frequency division multiplexing. *TTI YuFU;* 2012. 80 P. (In Russ.)

18. Stryhalyuk B., Yaremko O., Maksymyuk T., Melnyk O. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal. *ECON-TEChMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes.* Krakow; 2012. Vol. 1; 3: 49-54.

19. Ahmad R., Bahai S., Burton R. *Multi – Carrier Digital Communications. Theory and Applications of OFDM.* Saltzberg: Wi - Fi Planet; 2002. 395 R.

20. Babash A.V., Sizov V.A., Mikryukov A.A. Security Evaluation of a Brute-force Attack on a Cipher using a Statistical Criterion for Plaintext. *Automatic Control and Computer Sciences.* 2019. Vol. 53. No. 1: 39–44.

Сведения об авторах

Валерий Александрович Сизов

*Д.т.н, профессор кафедры прикладной информатики и информационной безопасности Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
Эл. почта: sizovv_a@gmail.com*

Дмитрий Михайлович Малиничев

*К.э.н, доцент кафедры информационной безопасности Российский государственный социальный университет, Москва, Россия
Эл. почта: mmm_63@list.ru*

Хамзат Хакимович Кучмезов

*К.э.н, доцент кафедры бизнес-информатики Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия
Эл. почта: kuchmezovx@gmail.com*

Information about the authors

Valeriy A. Sizov

*Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Applied Informatics and Information Security Plekhanov Russian University of Economic, Moscow, Russia
E-mail: sizovv_a@gmail.com*

Dmitriy M. Malinichev

*Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of Information Security Department Russian State Social University, Moscow, Russia
E-mail: mmm_63@list.ru*

Khamzat K. Kuchmezov

*Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Business Informatics Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia
E-mail: kuchmezovx@gmail.com*