

Особенности пятого поколения мобильной связи. SEFDM модуляция

С. Р. Тадевосян*

Российско-Армянский университет,
кафедра телекоммуникации
Армения, Ереван, ул. О. Эмина, д. 123

(Статья поступила 22.08.2019; Подписана в печать 28.10.2019)

В данной работе были изучены преимущества пятого поколения мобильной связи, рассмотрены проблемы, связанные с потерями мощности сигнала и способы их решения. Рассмотрены технологии реализации сетей 5G. Проведено сравнение потерь мощности в свободном пространстве на различных частотах и расстояниях. Исследованы основные направления развития систем связи следующего поколения.

PACS: 84.40.Ua

УДК: 621.376.3

Ключевые слова: 5G, Массив MIMO, mmWave технология, спектральная эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Востребованность мобильной связи в различных сферах деятельности требует дальнейшего развития беспроводных технологий - от новых стандартов, таких как 802.11ax и Wi-Gig, до 5G [1]. В первую очередь это связано с увеличением числа пользователей и требованием повышения скорости передачи. На Рис.1 приведён график роста скорости со сменой поколений сетей, а также предположительный рост, который потребуется в 5G. Уже это традиционное требование ставит перед разработчиками сложные технические проблемы. Теснота в эфире требует освоения новых, причём высокочастотных радиодиапазонов, учитывая повышение скорости передачи. При этом, сильное затухание волн миллиметрового диапазона требует повышения мощности передатчиков, что неприемлемо как с технической, так и экономической точек зрения. Поэтому резко встал вопрос разработки прогрессивных технологий передачи сигналов, в частности, внедрения новых методов модуляции и принципов пространственной селекции. Для достижения целей 5G требуются новые технологии как на физическом, так и на уровне MAC (Media Access Control) [1].

Вместе с тем, современный этап развития сетей отличается тем, что предполагает скачок в технологиях конвергенции сетей, а также некоторых приложений, не свойственных беспроводным сетям. Это эфирное вещание через беспроводные сети, прямая связь между техническими устройствами, в том числе мобильными, системы телеуправления, сбора данных с систем мониторинга и многое другое. Для обслуживания подобных приложений сотовый стандарт 5G должен обеспечить повышение пропускной способности системы, значительное улучшение времени отклика (задержки цифрового сигнала) и, в то же время, снижение энергопотребления.

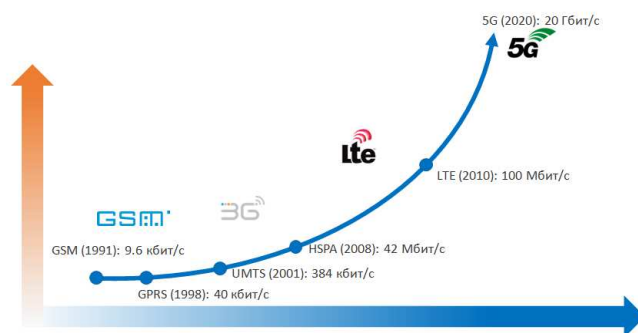


Рис. 1: Эволюция мобильных сетей

Существует еще много предположений о том, какая именно производительность будет для устройств в каждом из вариантов использования. В целом, сетевые провайдеры и мобильные операторы оценивают примерно в 10 000 раз больше трафика, срока автономной службы батареи до 10 лет и задержки менее 1 мс.

1. КЛЮЧЕВЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ 5G

МСЭ (Международный союз электросвязи) и теперь 3GPP определили три ключевых приложения для 5G, представленных на рисунке ниже, которые включают мобильную широкополосную связь [1]. В верхней части рисунка показано, что мобильная широкополосная связь (Enhanced Mobile Broadband) фокусируется на расширении пользовательского интерфейса. Предполагается увеличение пользовательского трафика в 10,000 раз, достижения скорости 100 Мбит/с, а также обеспечение гигабитных скоростей для специальных приложений. Внизу слева представлено направление развития сетей M2M (Machine-to-Machine) [2], то есть устройств, использующих беспроводную связь для взаимодействия внутри сети и с другими сетями. Предполагается, что эти устройства не требуют обслуживания, то есть работают в автономном режиме. Такими устройствами могут быть датчики, камеры наблюдения

*E-mail: tad.sus.94@gmail.com

или иные устройства, осуществляющие сбор информации, а также осуществляющие дистанционное взаимное управление. Для устойчивой работы таких систем необходимо обеспечить бесперебойное электропитание сроком не менее 10 лет.

Правая часть на рис. 2 справа — это область применения 5G для критически важных приложений, где требуется сверхнадежность и низкая задержка. Это может быть дистанционная система мониторинга или управления наземным или воздушным транспортом. К примеру, международная систем ГМССБ или GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System) использующая современные наземные, спутниковые и судовые системы радиосвязи, предполагает использовать 5G для усовершенствования способов аварийной связи.



Рис. 2: Сферы применения 5G

Требования 5G приводят к значительным изменениям, таким как технология использования миллиметровых волн для достижения более высокой пропускной способности, более низкие ценовые показатели для обеспечения IoT (Internet of Things) и более высокая надежность для обеспечения критически важных беспроводных приложений [2]. Основные положения по стандартизации 5G разрабатывает 3GPP (3rd Generation Partnership Project) — консорциум, организованный в 1998 г. для разработки спецификации для мобильной телефонии.

2. ЧАСТОТЫ

В своем последнем выпуске МСЭ обновил список частот для мобильной связи. Однако регулирование не является основным ограничением выбора диапазона mmWave. На Рис.3 представлен спектр поглощения радиоволн при распространении в свободном пространстве. Как видно из рисунка, атмосферное поглощение ограничивает использование некоторых полос (пики поглощения). Сочетание правил МСЭ и практических измерений поглощения отражает следующие

полосы для сетей следующего поколения: 25,25-29,5 ГГц, 37-40 ГГц и 66-76 ГГц. Однако даже в рекомендуемых диапазонах есть основные и второстепенные спецификации, которые необходимо учитывать.

	850MHz	2.4GHz	3.6GHz	28GHz	38GHz	60GHz	76GHz
10m	51.03	60.04	63.57	81.38	84.04	88.0	90.06
100m	71.03	80.04	83.57	~40dB	104.04	108.0	110.06
500m	85.01	94.02	97.55	10,000x	118.02	121.98	124.04
1km	91.03	100.04	103.57	121.38	124.04	128.0	130.06
10km	111.03	120.04	123.57	141.38	144.04	148.0	150.06

Рис. 3: Потери в свободном пространстве

На рис. 4 показаны потери свободного распространения, рассчитанные для разных частот и на разных расстояниях: от 850 МГц до 76 ГГц и от 10 м до 10 км. Фактически некоторые из частот, для которых рассчитывается потеря свободного распространения, находятся в существующих спецификациях некоторых стандартов. Остальные частоты, такие как 38 ГГц или 76 ГГц, являются частотами кандидатов для сети следующего поколения. Сравнивая потери для 850 МГц и 76 ГГц, мы видим, что разница составляет почти 40 дБ, т.е. в 10 000 раз. Очевидно, что повышение мощности не может являться решением данной проблемы. Первый шаг к решению данного вопроса состоит в уменьшении размеров сот и тем самым в сокращении расстояния между базовыми станциями. Однако этого не достаточно. Здесь требуется применение таких технологий, как Массив ММО [3], направленные антенны [3], спектрально-эффективные сигналы [4] и другие способы, оптимизирующие соотношение между мощностью, шириной полосы и помехоустойчивостью сигнала. Только совместные меры могут дать требуемую энергетическую эффективность.

3. ТЕХНОЛОГИИ Массив ММО и MMWAVE

На Рис. 4 представлены направления развития систем связи следующего поколения. Например, такие технологии, как Массив ММО и mmWave, обеспечивают более высокую пропускную способность и более высокую эффективность использования сети. Технология Массив ММО позволяет достичь целей расширенного использования мобильного широкополосного доступа. Кроме того, новые Multi-Rat технологии улучшают использование полосы пропускания.

Мобильные сети первого поколения и последующие поколения используют многоканальные и ММО-варианты антенн. Например, сети GSM применяют сигнальную антенну, а современные системы LTE теоретически могут использовать до 8 передающих и 8 приемных антенн. Сегодня прототипы Массив ММО используют 128 каналов и более. Хотя еще точно нельзя сказать, сколько антенн будет задействовано в си-

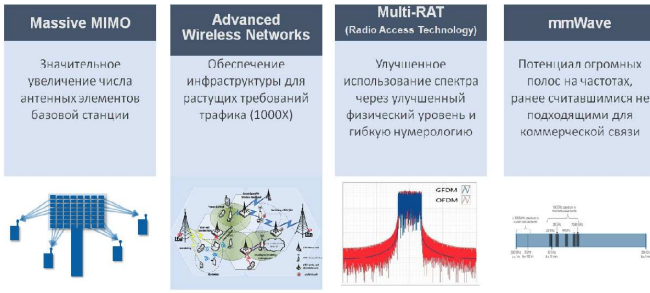


Рис. 4: Направления развития систем связи следующего поколения

стемах 5G в будущем, но наиболее вероятным является использование 64 и 128 антенн [5]. Рассмотренные технологии оказывают наибольшее влияние на радиооборудование будущих беспроводных систем [3].

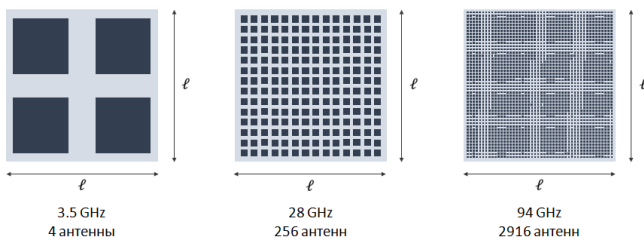


Рис. 5: Фазированная антенная решетка

Применение фазированной антенной решетки (ФАР) и высокой частоты передачи данных имеет то преимущество, что по мере увеличения частоты длина волны становится меньше и, соответственно уменьшаются и размеры антенн (рис. 5). Последнее приводит к возможности разместить в одну и ту же область больше антенн по сравнению с их количеством при меньших частотах. Большое число антенн повышает помехоустойчивость связи в варианте MIMO, а также позволяет получить лучшую диаграмму направленности. Кроме того, при меньшей длине волны и при том же размере области размещения антенн получаем более узкие лучи. Тем самым мы получаем энергетический выигрыш, компенсирующий потери в свободном пространстве.

Прототипы технологий Массив MIMO и mmWave (рис. 6) были разработаны и изготовлены в Армении и были представлены на выставке DigiTecExpo 2017–2018 гг. [6]

4. SEFDM МОДУЛЯЦИЯ

Задачей данного раздела является ознакомление читателя с SEFDM модуляцией и принципом ее построения. SEFDM (Spectrally Efficient Frequency Division Multiplexing) — спектрально эффективные сигналы с частотным уплотнением рассмотрены на-

равне с OFDM, как один из методов модуляции в сетях связи 5G. Главным преимуществом SEFDM, является его большая спектральная эффективность, которая достигается не ортогональностью его поднесущих. Спектральная эффективность SEFDM-сигнала может быть в 2–3 раза больше по сравнению с сигналами используемые в предыдущих сетях связи [7]. Способ SEFDM модуляции обеспечивает высокую помехоустойчивость, свойственную OFDM-сигналам. SEFDM символ можно записать следующим образом:

$$s_A^n = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} C_N^n(k) e^{2j\pi k \Delta f t}, \tag{1}$$

где N — количество используемых поднесущих, n — номер SEFDM символа, k — модулирующий символ k -й поднесущей n -го FDM символа, Δf — промежуток между соседними частотами.

Главной характеристикой данных сигналов является коэффициент частотного уплотнения α поднесущих частот, который выражается как произведение длительности SEFDM символа T на Δf : $\alpha = \Delta f T$. По значению данной характеристики можно судить о спектральной эффективности используемого метода. В случае OFDM $\alpha = 1$, для рассматриваемого метода SEFDM $\alpha < 1$. Спектральная эффективность достигается благодаря тому, что поднесущие являются не ортогональными, т.е. нарушается условие ортогональности, тем самым разность между поднесущими частотами меньше чем $1/T$. Следовательно, происходит перекрытие поднесущих [8]. Так же экспериментально была представлена SEFDM модуляция в E-диапазоне и было достигнута 50% улучшенная спектральная эффективность по сравнению с OFDM [9].

Данный метод модуляции имеет также серьезные недостатки связанные с правильным восстановлением SEFDM сигнала, искаженного интерференцией между поднесущими. Но данный вопрос может быть решен либо построением соответствующих детекторов, либо объединить применяемые частоты в блоки и производить декодирование независимо и восстановить соответствующий сигнал. Данный метод называется B-SEFDM, т.е. блоковое SEFDM. Поскольку каждая полоса имеет ограниченное количество поднесущих, такая система может эффективно удалять внеполосные помехи и использовать оптимальные алгоритмы обнаружения в каждой полосе. В данном случае, коэффициент частотного уплотнения обозначается как β [8].

Формирование SEFDM сигнала осуществляется аналогично формированию OFDM-сигнала. Как и в случае OFDM-сигнала, вводится защитный интервал, для уменьшения межсимвольной интерференции.

Во всех алгоритмах формирования SEFDM-сигналов используется обратное дискретное преобразование Фурье (ОДПФ). Различие данных алгоритмов заключатся в различной вычислительной сложности и сложности их реализации на практике.

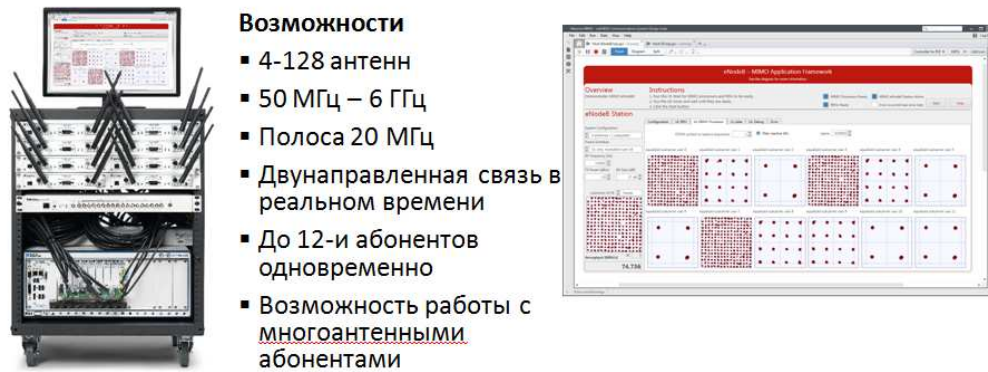


Рис. 6: Прототип системы Массив МИМО

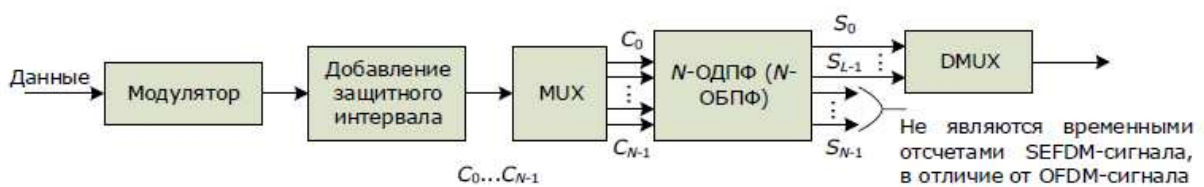


Рис. 7: Схема формирования SEFDM-сигнала

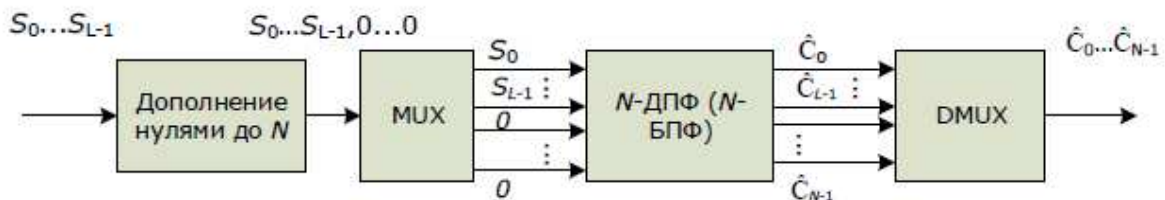


Рис. 8: Схема приема SEFDM-сигнала

Формирование SEFDM-сигнала состоит в том, что символы каждой поднесущей отправляются на блок ОБПФ размерности N_c , затем из выходной последовательности размерности N_c отсекают до L поднесущих, таким образом получая временные отсчеты SEFDM-сигнала. Данный алгоритм представлен на рис. 7. По своей структуре данная схема формирования SEFDM-сигналов наиболее близка к схеме формирования OFDM-сигналов. Как можно увидеть, что единственное отличие данного метода в количестве передаваемых временных отсчетов. Количество передаваемых временных отсчетов SEFDM-сигналов меньше, чем у OFDM. При этом разность между количеством отсчетов привязана к параметру α .

Прием же SEFDM-сигналов осуществляется следующим образом: принятый сигнал, размерность которой равняется L , дополняется нулями до размерности N . Далее дополненный сигнал, подается на блок БПФ [9]. Структурная схема приема SEFDM-сигналов показана на рис. 8.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ SEFDM В СРЕДЕ LABVIEW

Для подтверждения выше изложенных теоретических данных, были разработаны и собраны модуляторы как для OFDM так и для SEFDM модуляции. Симуляция была проведена в программной среде разработки LabView communications system design suite. Адекватной моделью для случайной двоичной последовательности, каковой является информационный сигнал, является так называемая псевдослучайная последовательность ПСП. Псевдослучайный сигнал хорошо отражает свойства информационной последовательности реальной системы связи и, в частности его спектральные свойства. ПСП не является идеальным случайным сигналом. А именно, последовательность повторяется с определённым периодом N , так что реально такой сигнал имеет период равный N , так что частоты всех его гармоник кратны $1/N$. Поэтому, чем больше период последовательности, тем его спектр ближе к непрерывному. Блок-схема модулятора представлена на рис. 9.

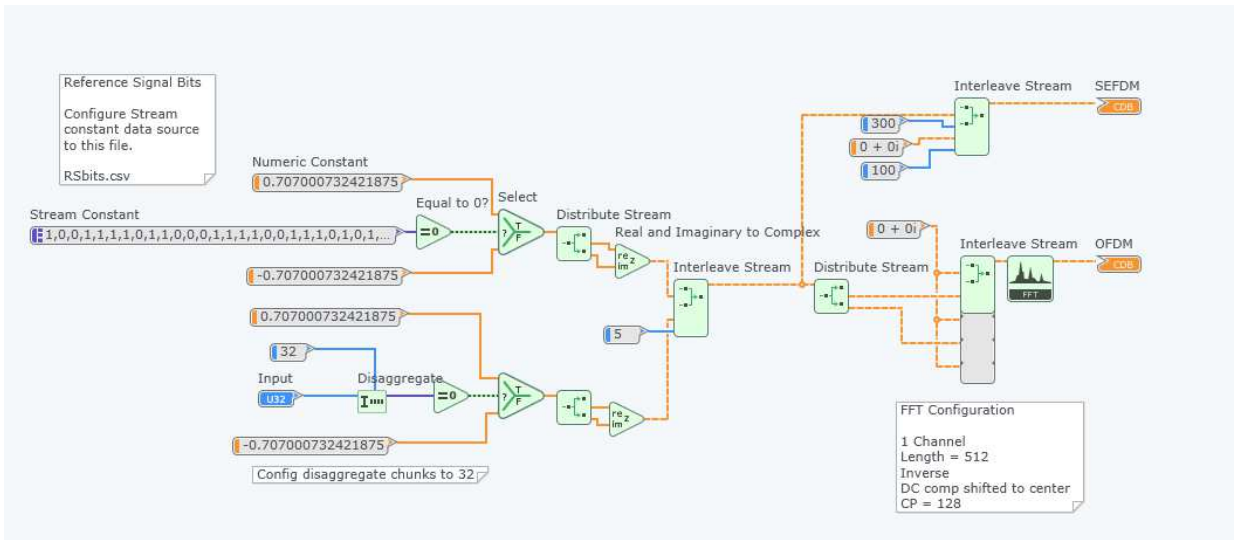


Рис. 9: Блок-схема модуляторов для OFDM и SEFDM

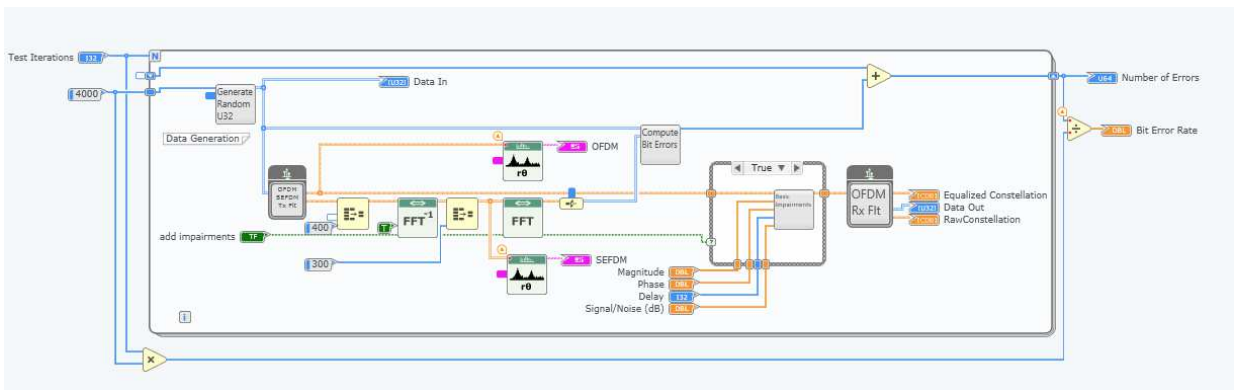


Рис. 10: Блок-схема программы передачи и приема SEFDM и OFDM

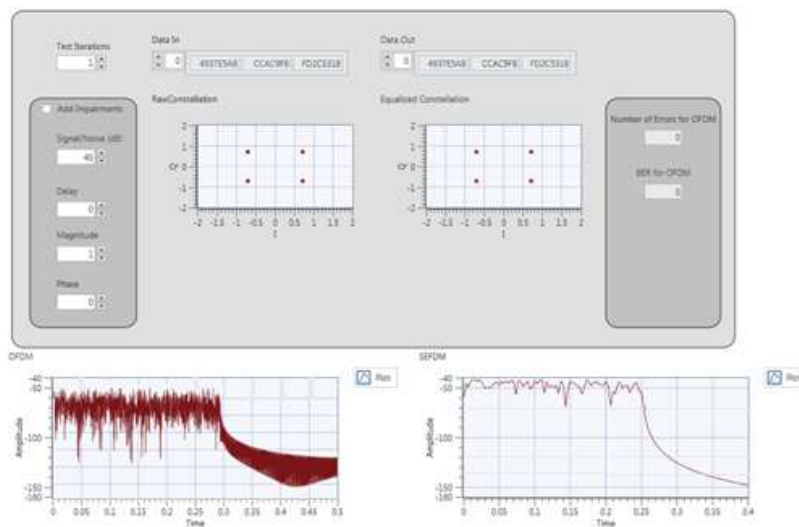


Рис. 11: Спектры OFDM и SEFDM сигналов для $\alpha = 0.75$

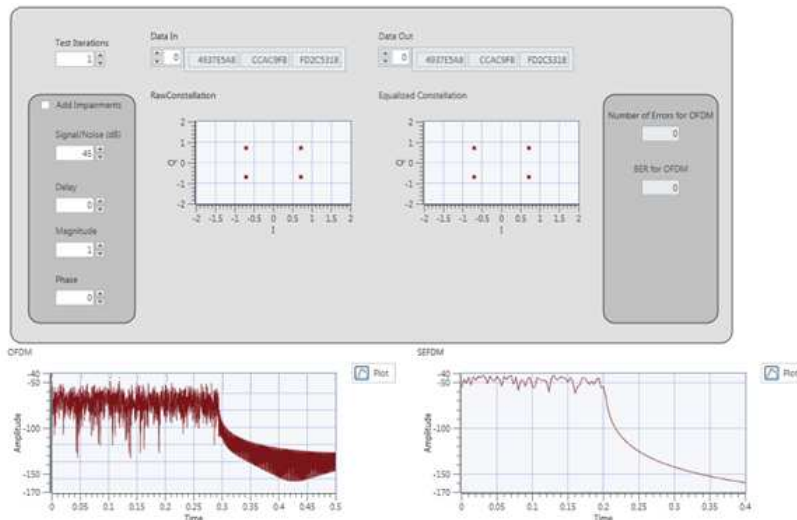


Рис. 12: Спектры OFDM и SEFDM сигналов для $\alpha = 0.7$

На рис. 9 производится квадратурная фазовая модуляция QPSK, представляя единицы и нули соответственно 0.707 и -0.707 . Данная замена подразумевает умножение исходных данных на $\cos 45$ и $\sin 135$, т.е. на синфазную и квадратурную составляющие сигнала [10]. Далее к промодулированным данным добавляются опорные биты.

В случае OFDM, т.е. нижняя часть рис. 9, полученные данные подаются на обратное дискретное преобразование Фурье, с длиной циклического префикса равного 128 бит.

Формирование же SEFDM, проводится аналогично рис. 7. Как уже упоминалась, для формирования SEFDM, необходимо чтобы определенное количество несущих были бы нулевыми. Количество нулевых несущих, можно рассчитать по следующей формуле [9].

$$L = \frac{1 - \alpha}{\alpha} N_c \quad (2)$$

где N_c — количество информационных поднесущих. При $N_c = 300$ и $\alpha = 0.7$ $L = 129$. При $N_c = 300$ и $\alpha = 0.75$ $L = 100$. Учитывая все выше сказанное, была написана программа, блок-схема, которой представлена на рис. 10.

Первый блок генерирует псевдослучайную последовательность, второй — выполняет QPSK модуляцию и ОПФ. Следующие блоки выполняют прием SEFDM. То есть выделяют из всех поднесущих только информационные и уже их подают на ППФ. Предпоследний блок при необходимости добавляет помехи в сигнал. Блок OFDM RX выполняет прием OFDM сигнала. Так же рассчитывается количество неверно принятых бит

и величина BER для OFDM. В результате получаем следующие спектры для OFDM и SEFDM.

Как можно увидеть из спектров, в случае $\alpha = 0.75$ спектр SEFDM примерно на 20% уже, чем у OFDM сигнала, а для $\alpha = 0.7$ на 30% уже. Таким образом приходим к тому, что тот же объем информации передается в более узкой полосе частот. Повышение спектральной эффективности сопровождается потерей мощности меньше 1 дБ [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье были рассмотрены задачи возникающие в системах связи пятого поколения, представлены способы их решения. Изучены сферы применения сетей 5G и требования к ним. Так же был рассмотрен метод модуляции SEFDM предлагаемый для сетей 5G. Для подтверждения были разработаны и собраны модуляторы как для OFDM так и для SEFDM модуляции. Симуляция была проведена в программной среде разработки LabView communications system design suite. Анализ спектров сигналов SEFDM и OFDM показал, что спектр сигнала SEFDM уже. Расчет показал также, что при уменьшении значения α , тот же объем информации передается в более узкой полосе частот чем при больших его значениях. Но при этом получаем потери в мощности.

Автор выражает благодарность профессору, доктору физ.-тех. наук В. Г. Аветисяну; доценту, канд. физ.-тех. наук А. В. Дарьяну.

[1] Эл. источник: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/2005-ran_r16_schedule

[2] Эл. источник: <http://www.ni.com/white-paper/53095/en/>

- [3] Эл. источник: [http://www.ni.com/white-paper/52382/en/# ref2](http://www.ni.com/white-paper/52382/en/#ref2)
- [4] Тадевосян С. Р. // *Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та*. 2018. № 4. 1841101.
- [5] Эл. источник: <http://anel.am/5g-mimo>
- [6] Эл. источник: <https://www.digitec.am/gallery>
- [7] Эл. источник: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7041067>
- [8] Эл. источник: [http://www.ni.com/white-paper/52382/en/# ref2](http://www.ni.com/white-paper/52382/en/#ref2)
- [9] Ghannam H. et al. // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019. **67**,N 5. P. 1911.
- [10] Isam S., Darwazeh I. Simple DSP-IDFT Techniques for Generating Spectrally Efficient FDM Signals. *CSNDSP*. 2010.
- [11] Ghannam H., Darwazeh I. A Proposal for Scalable 5G New Radio Frames with Enhanced Throughput // 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019–Spring). IEEE. 2019. P. 1–6.

Features of the fifth generation of mobile communications. SEFDM modulation

S. Tadevosyan

¹*Department of telecommunication, Russian–Armenian University. Yerevan, Armenia
E-mail: tad.sus.94@gmail.com*

In this work, the advantages of the fifth generation of mobile communications, as well as some issues related to the loss of signal power and how to solve them are studied. The technology implementation of 5G networks are reviewed. A comparison of power losses in free space at various frequencies and distances has been made. The main development vectors of the next generation communication systems are investigated.

PACS: 84.40.Ua.

Keywords: 5G, Massive MIMO, mmWave technology ,spectrum efficiency.

Received 22 August 2019.

Сведения об авторе

Тадевосян Сусанна Рафиковна — аспирант Российско–Армянского университета; радиоинженер «YEA Engineering»; тел.: (374) 94-808-809, e-mail: tad.sus.94@gmail.com.
