

Технологии 5G в системе профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ

О.А. Шорин, Московский технический университет связи и информатики, профессор, д.т.н.; oshorin@gmail.com
Г.О. Бокк, ООО «НИРИТ-СИНВЭЙ Телеком Технолоджи», директор по науке, д.т.н., bgo@nxtt.org

УДК 621.391

DOI: 10.34832/ELSV.2023.40.2.002

Аннотация. На текущем этапе развития систем связи происходит активный переход от поколения 4G к 5G. Ряд свойств и методов, присущих системе широкополосной профессиональной радиосвязи технологии МАКВИЛ, в той или иной мере соответствуют технологиям 5G. Несмотря на то, что для критических коммуникаций допустимо применение только проприетарных сетей (к которым относится МАКВИЛ) и не допускаются решения на основе сетей общего использования NR(5G), представляется полезным провести сравнение их рабочих характеристик. В предлагаемой статье подробно рассматриваются основные отличительные признаки 5G и их аналоги, реализованные в МАКВИЛ.

Ключевые слова: МАКВИЛ, 5G, NB-IoT, OFDM, FBMC, GFDM, UFMC, mMIMO, адаптивная антенна.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс развития сетей радиосвязи привел к тому, что в сегменте систем связи общего использования в настоящий момент наметился переход от поколения 4G к 5G. Естественно, что новые технические решения, услуги и способы обработки сигналов, составившие ядро систем радиосвязи 5G, отличаются от применяемых в 4G, иначе бы новое поколение не возникло. Но если обратиться к системе широкополосной профессиональной радиосвязи с брендовым наименованием технологии МАКВИЛ, отвечающей ГОСТ Р 58166-2018 [1–3], а также подробно описанной в [4, 5], то нельзя не отметить, что она обладает рядом особенностей по отношению к системам 4G. Поэтому ряд свойств и методов МАКВИЛ оказался в той или иной мере соответствующим технологиям 5G. Несмотря на то, что для критических коммуникаций допустимо применение только проприетарных сетей (к которым относится МАКВИЛ) и не допускаются решения на основе сетей общего использования NR(5G), обладающих широким перечнем позиций, уязвимых к внешним воздействиям [6], все равно представляется полезным сравнить их рабочие характеристики. В данной статье подробно рассматриваются основные отличительные признаки 5G и их аналоги, реализованные в технологии МАКВИЛ.

Сети связи 5G обладают выраженными отличиями от систем предыдущих поколений:

1) по группам основных услуг [7–12], которые включают: eMMB (Enhanced mobile broadband – услуги расширенной мобильной широкополосной связи), mMTC (massive Machine Type Communications –

служба множественной межмашинной связи) и URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications – организация сверхнадежных соединений с ультрамалыми задержками);

2) в новых методах модуляции [13–16], которые включают технологии: F-OFDM (fast orthogonal frequency-division multiplexing – быстрое ортогональное мультиплексирование с частотным разделением каналов), FBMC (Filter-Bank Multi-Carrier Modulation – частотное мультиплексирование с множеством несущих с использованием банка частотных фильтров), GFDM (generalized frequency-division multiplexing – мультиплексирование на основе обобщенного частотного преобразования) и UFMC (universal filtered multicarrier – многочастотная передача с универсальной фильтрацией);

3) в усовершенствовании методов пространственной обработки радиосигналов и технологий MIMO [13, 17], которые включают: Beamforming (формирование лучей диаграмм направленности антенн на источники сигналов), mMIMO (Massive MIMO), MU-MIMO (Multi-user MIMO);

4) в усовершенствованной организации стека протоколов и архитектуры соединений в сети [18, 19].

Также следует отметить системы 4G+, возникшие на промежуточном этапе развития к 5G, получившие название NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) [20, 21], отличающиеся малыми размерами элементарного ресурсного блока радиоканала, который используется для организации каналов межмашинного обмена данными.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАКВИЛ И 5G

Проведем сопоставление услуг, методов модуляции и технологий пространственной обработки, поддерживаемых МАКВИЛ, с 5G по приведенному выше перечню.

1. Группа основных услуг

1.1. eMVB (услуги расширенной мобильной широкополосной связи)

Согласно спецификации [22] (п. 5.3.2) в сетях 5G в частотных диапазонах до 5 ГГц максимальная рабочая полоса составляет 50 МГц для случаев работы с сигналами OFDM с разносом поднесущих 15 кГц и до 100 МГц – для разносов поднесущих 30 или 60 кГц. Рабочие полосы до 400 МГц допустимы только для диапазонов миллиметровых волн.

В сетях МАКВИЛ при использовании базовых станций (БС) Fiber BTS XW5400 допускается в единой стойке блоковая организация из модулей XW5400-03 (340 МГц), XW5400-40 (400 МГц), XW5400-18 (1800 МГц), XW5400-21 (2100 МГц) и XW5400-33 (3300 МГц). При этом максимальные рабочие полосы модулей составляют: 20 МГц (для XW5400-03), 30 МГц (XW5400-40), 20 МГц (XW5400-18), 30 МГц (XW5400-21) и 100 МГц (XW5400-33). Что в сумме составляет 200 МГц.

Так как технология МАКВИЛ использует режим доступа с временным разделением каналов (TDD), то показатель 200 МГц в данном случае будет соответствовать показателю 100 МГц для режима с частотным разделением каналов (FDD, стандартный для 5G), где принято полосу указывать, привязываясь к одной линии связи (Down или Up) в спектре.

Таким образом, технически система МАКВИЛ способна поддерживать те же характеристики рабочей полосы в диапазонах до 5 ГГц, что и сети 5G.

1.2. mMTC (служба множественной межмашинной связи)

В МАКВИЛ посредством линейки устройств, представляющих собой модемы (CPE368W, U28D), может быть организована связь между любыми оконечными устройствами, поддерживающими стандартный протокол обмена TCP/IP. Поэтому сети 5G не имеют каких-либо преимуществ перед МАКВИЛ по этой услуге.

Преимущество 5G по сравнению 4G состоит в возможности поддержки вариантов распределения ресурса радиоканала с уменьшенным размером элементарного блока, соответствующим NB-IoT, LPWAN [20, 21]. На рис. 1 в едином масштабе показаны возможные варианты уменьшенных элементарных ресурсных блоков для 5G и элементарные ресурсные блоки системы МАКВИЛ [1, 4, 5].

Можно видеть, что во всех вариантах элементарный ресурсный блок МАКВИЛ меньше, чем в 5G. И более того, во всех вариантах, кроме одночастотных, спектральный ресурс элементарного блока МАКВИЛ меньше.

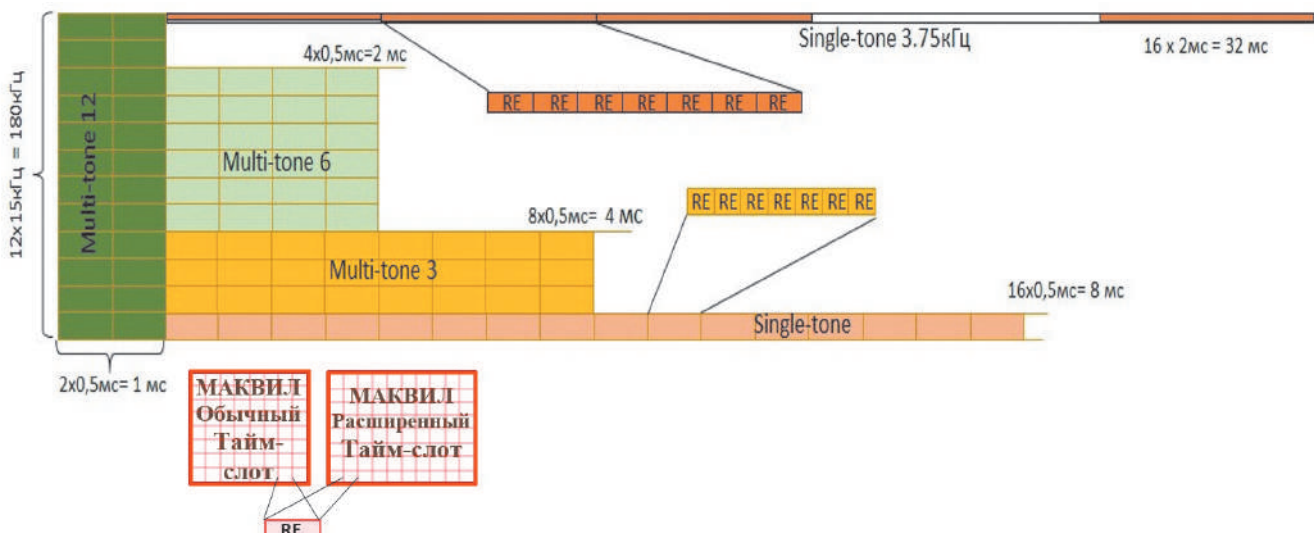
Поэтому при одинаковых ресурсах радиоканала сеть МАКВИЛ может обслуживать большее число устройств с низкоскоростным межмашинным обменом, чем 5G.

1.3. URLLC (организация сверхнадежных соединений с ультранизкими задержками)

Согласно [10–12] самые высокие требования по надежности и задержке передачи возникают для соединений 5G в приложениях URLLC, связанных с автоматизацией процессов критических производств. Вероятность ошибочного приема в расчете на пакет данных размером 32 байта не должна превышать 10^{-6} , а задержки – 2 мс. Самые высокие требования

Рисунок 1

Уменьшенные варианты элементарных ресурсных блоков 5G (4G+) и элементарные ресурсные блоки МАКВИЛ



исключительно по задержке передачи 0,5–2 мс возникают для систем тактильного управления, конвоирования роем дронов, автоматизированных служб сферы общественной безопасности критических ситуаций. Но в последних случаях требования к надежности уменьшаются на порядок.

Для всех других приложений, включая управление производством с низкой и средней динамикой процессов, управление беспилотным автомобильным транспортом, передачу аудио- и видеoinформации, допустимыми считаются задержки 5–10 мс при сохранении надежности примерно на том же уровне, что и для критических производств.

Сети МАКВИЛ поддерживают два режима организации связи TDD [1, 4, 5] с периодом кадров физического уровня 10 и 5 мс, как показано на рис. 2.

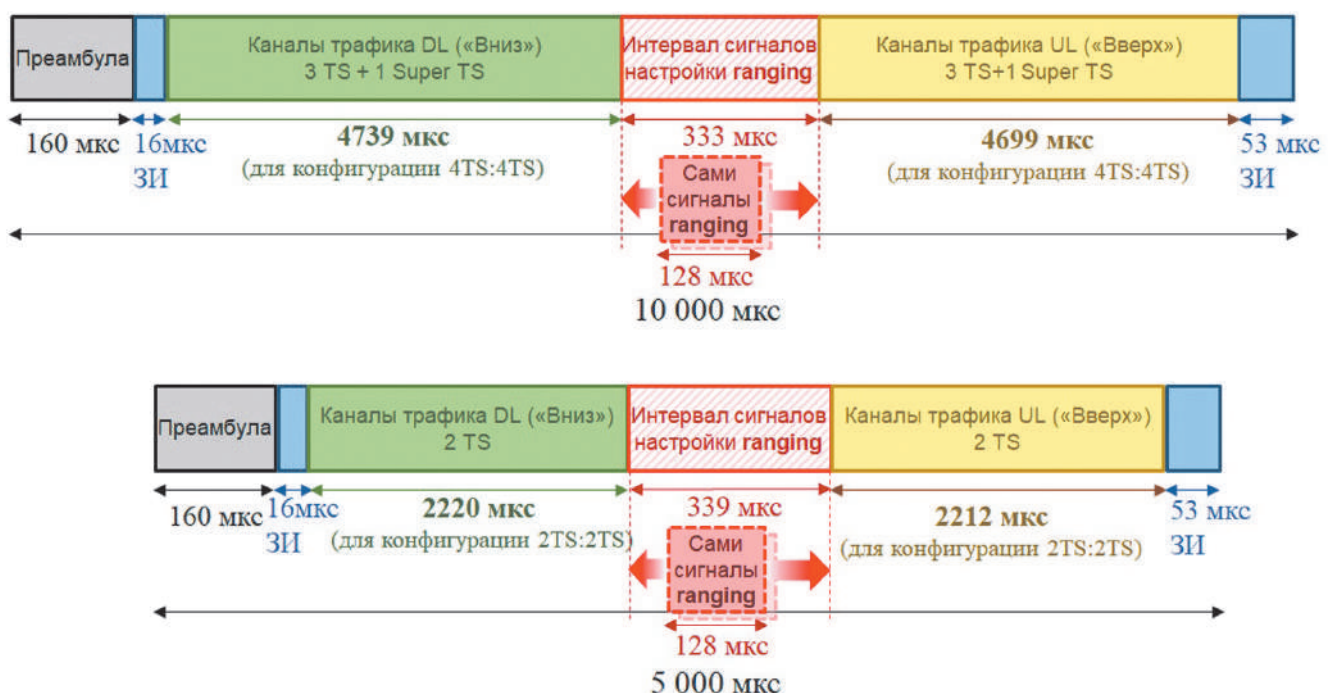
В соответствии с этим задержка ответа на доставку сообщения при обычном формате кадра (10 мс) может составить до 5,2 мс (без учета задержки распространения). А в режиме укороченного кадра (5 мс) – до 2,687 мс (без учета задержки распространения). Поэтому для всех приложений, исключая указанные выше критические, задержки передачи в системе МАКВИЛ удовлетворяют требованиям 5G. Переход на режим с укороченным кадром позволяет практически вплотную приблизиться к характеристикам задержек, требуемым для автоматизации процессов критических производств. Последнее обстоятельство было подтверждено успешным применением системы МАКВИЛ в системах автоматического

контроля на атомных электростанциях, а также в системах управления движением скоростных поездов в Китае.

Высокая надежность передачи информации в МАКВИЛ обеспечивается повышенными порогами таблицы CQI (Channel Quality Indicator – показатель качества канала), содержащей минимально допустимые отношения сигнал/шум, используемые при управлении. Так МАКВИЛ устанавливает соединения с QPSK модуляцией только при условии уровня сигнал/шум в канале выше 10 дБ, а для каналов с модуляцией QAM16 – выше 17 дБ. В результате вероятность прохождения ошибочного пакета данных физического уровня со стандартным для МАКВИЛ размером 106 бит (возникает в ситуациях с тремя и более ошибками) составляет $6,6 \cdot 10^{-4}$ для модуляции QPSK и $2,7 \cdot 10^{-4}$ – для QAM16. На следующем этапе обработки, на MAC подуровне, корректность принятых пакетов проверяется 16-битовыми проверочными CRC-кодами, что снижает вероятность прохождения искаженных пакетов до 10^{-8} (каналы с QPSK) и до $4,1 \cdot 10^{-9}$ (каналы с QAM16). Таким образом, достоверность данных на выходе MAC-подуровня в МАКВИЛ, даже при предельно низких допустимых значениях сигнал/шум, удовлетворяет требованиям по надежности URLLC. Это нельзя назвать удивительным, поскольку МАКВИЛ является профессиональной системой связи, в которой показатель надежности является приоритетным.

Рисунок 2

Форматы кадров физического уровня МАКВИЛ



2. Новые методы модуляции

2.1. F-OFDM (технология быстрого мультиплексирования)

Указанная технология предполагает использование в два раза меньшего шага разноса поднесущих для сигналов OFDM при сохранении длительности символов. В основу метода положено свойство ортогональности \cos (или \sin) сигналов на интервалах $1/(2\Delta f)$, где Δf – шаг разноса поднесущих. Но поскольку свойство ортогональности на таких интервалах не наблюдается для сочетаний \cos – \sin , то оказывается возможным ее использование только для одноквадратурных модуляций типа BPSK и ASK [23]. Это находится в полном согласии с теорией информации, устанавливающей точные границы информационной производительности канала с ограниченной полосой. С широко утвердившейся практикой применения квадратурных законов модуляции данная технология входит в противоречие. Кроме того, сигналы F-OFDM обладают низкой устойчивостью к фазовым искажениям в радиоканале. Их рабочие характеристики заметно деградируют в условиях многолучевого распространения. Поэтому для применения указанной технологии требуются дополнительные теоретические разработки фундаментального свойства. В перечень решений 5G эта технология входит только как потенциально возможная и только потому, что на ее основе, как показывает теория, можно добиться некоторого снижения уровня внеполосного излучения.

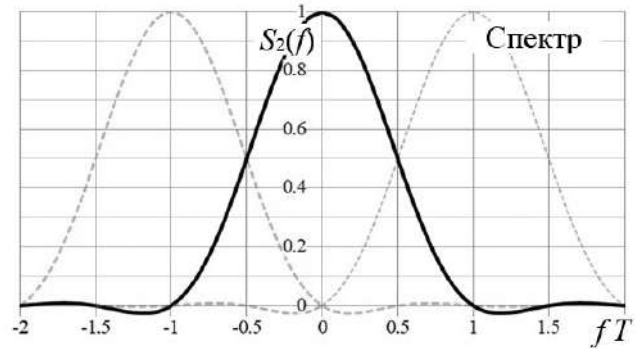
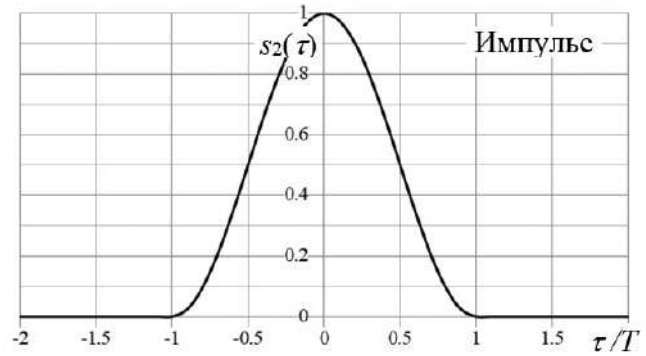
В сетях МАКВИЛ она не используется.

2.2. FBMC (технология частотного мультиплексирования с множеством несущих с использованием банка фильтров)

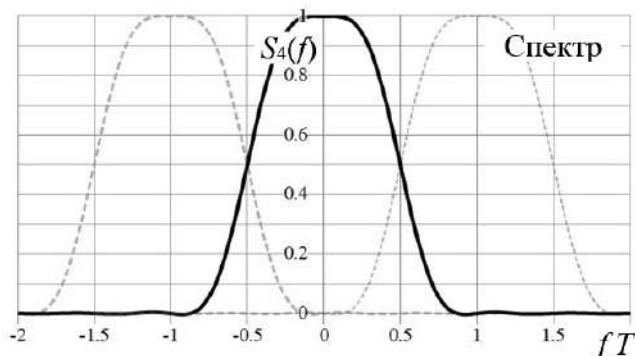
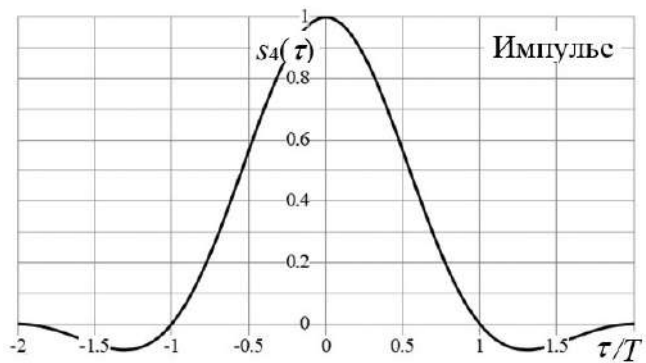
Указанная технология предполагает устранение защитных интервалов между символами OFDM внутри информационных блоков и применение формирующего фильтра специального вида для генерации импульсных реакций для сигналов на каждой поднесущей OFDM. Импульсная реакция формирующего фильтра отлична от нуля на интервале времени двух, трех или четырех символов OFDM и представляет собой взвешенную сумму единичного уровня с одной, двумя или тремя гармониками [14]. Показатель, равный числу гармоник импульсной реакции плюс 1, называют коэффициентом перекрытия K (overlapping factor). На рис. 3 показаны импульсные реакции и спектры, формируемые при приеме сигнала отдельной поднесущей при коэффициентах перекрытия $K=2$ и $K=4$, где τ – это задержка; f – частота; $s_2(\tau)$ и $S_2(f)$ – соответственно нормированная импульсная реакция и ее спектр для FBMC сигнала при коэффициенте перекрытия $K=2$; $s_4(\tau)$ и $S_4(f)$ – нормированная импульсная реакция и ее спектр при коэффициенте перекрытия $K=4$.

Рисунок 3

Вид и спектр сигнального отклика на отдельной поднесущей, формируемого на приеме по технологии FBMC: (а) $K=2$; (б) $K=4$



а)



б)

Можно видеть, что технология FMBC обеспечивает подавление межсимвольных искажений для соседних символов OFDM на выделенных поднесущих и частотную селекцию поднесущих при взаимной отстройке на две позиции и больше. А возникающие из-за перекрытия спектров соседних поднесущих межсимвольные искажения удается подавить за счет перехода к модуляциям OQAM и OQPSK [14]. Но это влечет за собой одно негативное обстоятельство: у каждого символа OFDM возникают «хвосты» длительностью $0,5(K-1)T$, где T — длительность символа OFDM. Поэтому при многолучевом распространении неизбежно появляются межсимвольные искажения, для устранения которых необходимо использовать эквалайзеры [14]. Последнее повышает требования к производительности процессоров цифровой обработки сигнала. Также, несмотря на устранение защитных интервалов внутри блоков данных, оказывается необходимым на их краях использовать расширенные защитные интервалы, длительностью не менее $0,5T$, что для услуг коротких сообщений сводит на нет все их преимущества.

Так, для системы МАКВИЛ, поддерживающей элементарный ресурсный блок из восьми последовательных символов OFDM [1, 4, 5], суммарная длительность защитных интервалов между символами $8 \times 9,5$ мкс = 76 мкс. Применение технологии FMBC позволило бы исключить указанные защитные интервалы, но взамен потребовало бы введения в конце блока символов защитного интервала длительностью не менее $T/2 = 64$ мкс (в случае коэффициента перекрытия $K=2$) или $3T/2 = 192$ мкс (при $K=4$). В первом случае итоговый выигрыш по ресурсу составил бы 1,2%, а во втором был бы проигрыш —11,3%. Поэтому, даже если не принимать во внимание отмеченные выше недостатки и технические трудности реализации, то следует отметить, что эффект от применения FMBC в МАКВИЛ незначителен.

Кроме того, есть еще одно обстоятельство, препятствующее использованию FMBC. Единичный ресурсный блок МАКВИЛ формируется не как множество соседних поднесущих, а в виде блока поднесущих, равномерно распределенных в сегменте спектра размером 1 МГц [1, 4, 5]. Это позволяет более эффективно решать задачи синхронизации и позиционирования, обеспечивает повышенную защищенность от сосредоточенных помех. Поэтому соседние поднесущие в МАКВИЛ обычно используются разными абонентами. В такой ситуации реализация FMBC требует решения трудной задачи юстировки фазочастотных характеристик абонентских каналов на соседних поднесущих, в которых наблюдаются различные доплеровские сдвиги частоты, ошибки синхронизации, замирания, уровни сигналов и варианты многолучевого распространения.

2.3. GFDM (технология мультиплексирования на основе обобщенного частотного преобразования)

Указанная технология возникла как результат усовершенствования FMBC путем применения [24–26]:

1) цифровых FIR-фильтров (finite impulse response — конечная импульсная характеристика) специальной формы, отличной от используемой FMBC, для улучшенной частотной селекции символов на поднесущих, отстоящих в спектре более чем на одну позицию;

2) процедуры Pinching (придания специальной сглаженной формы) для фронтов сигнала на границах блоков символов, передаваемых на поднесущей, с целью уменьшения уровня внеполосных излучений.

В FMBC даже самый простой вариант фильтров с перекрытием $K=2$ обеспечивает подавление взаимных помех от сигналов поднесущих, разнесенных более чем на одну позицию, на 35 дБ [14]. Поэтому переход на цифровые FIR-фильтры технологии GFDM (например, RaisedCos (RC), RootRaisedCos (RRC) [14], обобщенные RRC [25, 26], Бартлетта-Хеннинга, Кумара, Моттаги-Каштибана, Ракшита, Мартина-Мартина и т.д. [24]), доводящие указанное подавление до 50–65 дБ, имеет практический смысл, только начиная с модуляции QAM256. В [26, рис. 8] на примере случая с модуляцией QAM16 показано, что даже по отношению к простому OFDM выигрыш от применения фильтров GFDM не превышает 1 дБ в выражении эффективного значения сигнал/шум.

В системах подвижной связи, работающих в условиях многолучевого распространения в диапазонах волн до сантиметров включительно, модуляцию сложности выше QAM64 применить на практике не удастся. Препятствием выступают технологические ограничения качества работы схем эквалайзеров и синхронизации. Поэтому, если только система связи не работает в диапазонах миллиметровых волн, использование FIR-фильтров из набора GFDM не будет приносить преимуществ.

Кроме того, ограничение физической природы не позволяет достигнуть эффективного подавления (в некогерентном режиме) взаимных помех поднесущих, разнесенных более чем на одну позицию, при использовании фильтров с длительностью импульсной реакции менее двух символов ($2T$). Это относится как FIR-фильтрам GFDM, так и к фильтрам FMBC. Поэтому для технологии МАКВИЛ использование блоков символов GFDM, точно так же, как и блоков символов FMBC, не приводит к значимому сокращению ресурсов, затрачиваемых на защитные интервалы ресурсного блока. На этом основании в МАКВИЛ решения GFDM, относящиеся к FIR-фильтрам, не применяются.

Техника Pinching для подавления внеполосного излучения в МАКВИЛ используется. Только она

осуществляется не на границах ресурсных блоков, как в GFDM [24, 26], а на границах каждого символа OFDM. Для этого каждый защитный интервал символа OFDM длительностью 9,5 мкс разбивается на два фрагмента. В первом, длительностью 1,9 мкс, уровень трансляции сохраняется постоянным, таким же, как и на рабочей части символа OFDM. Он обеспечивает устойчивость при многолучевом распространении сигналов и к возникающим ошибкам синхронизации по времени. Во втором фрагменте, длительностью 7,6 мкс, производится выключение трансляции сигнала путем постепенного уменьшения амплитуды транслируемого сигнала по закону RRC с показателем сглаживания Roll-off Factor=12%. Указанный показатель сглаживания специально выбран так, чтобы в момент полного выключения, осуществляемого на правой границе второго фрагмента, совпадающей с концом защитного интервала, закон RRC пересекал нулевое значение. Это обеспечивает наилучшие показатели подавления внеполосного излучения. На рис. 4 показана характеристика RRC с Roll-off Factor=12%, используемая в МАКВИЛ для подавления внеполосного излучения, а также спектральные характеристики (АЧХ) сигналов двух соседних рабочих полос МАКВИЛ с шириной 1 МГц. Между указанными рабочими полосами используется стандартная в МАКВИЛ защитная частотная полоса шириной 125 кГц, которую показывает двойная стрелка между характеристиками зеленого и красного цвета в нижней части рис. 4.

В верхней части рис. 4 синим цветом показана импульсная реакция $h(t)$ (формирующий импульс) закона RRC12%, используемого в МАКВИЛ для подавления

внеполосного излучения по технологии GFDM. В овале с увеличением показано как именно в МАКВИЛ реализуется ограничение длительности импульсной реакции. АЧХ $A(f)$, показанные в нижней части рис. 4, являются спектрами сигналов импульсной реакции $h(t)$ для соседних рабочих полос. Они представлены в логарифмическом масштабе со шкалой в единицах дБ. Поэтому по вертикальной оси нижнего графика отложены значения $20\lg|A(f)|$.

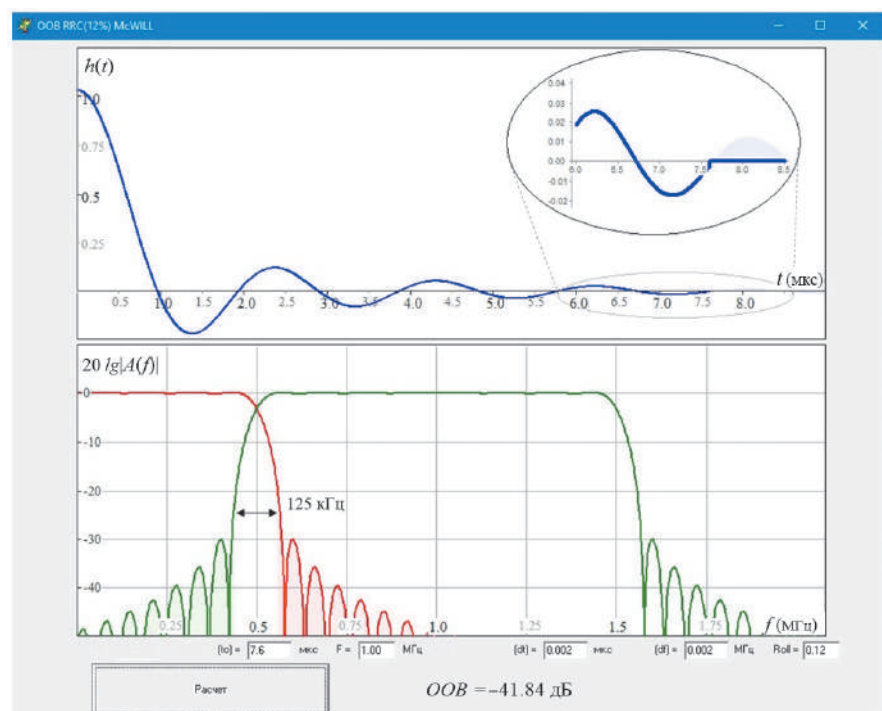
Участки спектральных характеристик, порождающие внеполосное излучение, проникающие за защитную полосу в соседний канал, окрашены на рис. 4 светло-красным и светло-зеленым цветами (области под зависимостями красного и зеленого цветов в зонах боковых лепестков спектральных характеристик).

Также по середине, в самой нижней части рис. 4 показано обеспечиваемое значение уровня внеполосного излучения OOB (out of band), проникающего за защитную полосу 125 кГц. В относительных единицах к общей мощности трансляции в полосе 1 МГц оно составляет $-41,84$ дБ.

Если обратиться к результатам работы [26, рис. 6b], то можно видеть, что технология GFDM в 5G при длительности интервала процедуры Pinching порядка $0,5T$ для лучших вариантов управления (которыми являются законы RC, и обобщенный RC₄ [24, 25]) может обеспечить уровень подавления OOB порядка 78–79 дБ. В системе МАКВИЛ, если сложить фрагменты защитных интервалов, используемые для процедуры Pinching в отдельном элементарном ресурсном блоке, получим значение $0,47T$. Это обстоятельство позволяет для сравнения обратиться к вышеприведенным результатам, относящимся к 5G. И мы видим, что уровень подавления внеполосного излучения в МАКВИЛ примерно на 30 дБ хуже, чем у GFDM 5G. Но такой вывод не совсем верен, так

Рисунок 4

Импульсная реакция и спектральные характеристики закона RRC12%, используемого в МАКВИЛ для подавления внеполосного излучения по технологии GFDM



как в МАКВИЛ для подавления внеполосного излучения и частотной селекции на приеме дополнительно к технологии GFDM еще используется технология UFMC. Ниже показано, что в результате суммарный эффект по подавлению внеполосного излучения в МАКВИЛ оказывается соизмеримым с показателями, указанными выше для вариантов GFDM 5G.

2.4. UFMC (технология многочастотной передачи с универсальной фильтрацией)

Указанная технология отличается от GFDM тем, что частотная фильтрация в ней осуществляется для групп поднесущих, а не для каждой поднесущей в отдельности [27, 28]. Для этого в UFMC предложено использовать цифровые фильтры, построенные на основе весового окна Дольфа-Чебышева длиной 80 отсчетов [27]. Хотя иногда обсуждаются и другие варианты окон размером в 40, 74 и 100 отсчетов [28].

В МАКВИЛ также используется техника частотной селекции для групп поднесущих. Она в динамическом режиме управления настраивается на полосы 1, 3 или 5 МГц. Для этого в приемном и передающем трактах применяются цифровые FIR-фильтры размером в 128 отсчетов, работающие на тактовых частотах 4, 8 и 16 МГц.

Специально разработанный для МАКВИЛ RF-чип, применяемый в каналообразующей аппаратуре, объединяет в себе аналоговые блоки (МШУ/УМ, переноса/преобразования частоты, предварительной фильтрации в ТИА (transimpedance amplifier)/ВВ (baseband) фильтрах) и модули цифровой обработки (схемы АЦП/ЦАП, каскады цифровых фильтров, подавляющие паразитные спектральные составляющие, возникающие на частотах, кратных тактовой, FIR-фильтры). При этом управление аналоговыми цепями RF-чипа производится цифровым методом. Сам RF-чип поддерживает режим внутреннего

контроля с замерах температуры. При необходимости он производит повторные калибровки в автоматическом режиме. Поэтому весовые коэффициенты FIR-фильтров настраиваются с учетом параметров аналоговых фильтров ТИА и ВВ. В основу положен критерий минимума для максимального уровня боковых лепестков за пределами рабочей полосы при заданных характеристиках крутизны скатов. Поэтому цифровой фильтр МАКВИЛ формирует АЧХ вида, близкого к амплитудному распределению Дольфа-Чебышева, но с корректировками, компенсирующими искажения аналоговых цепей.

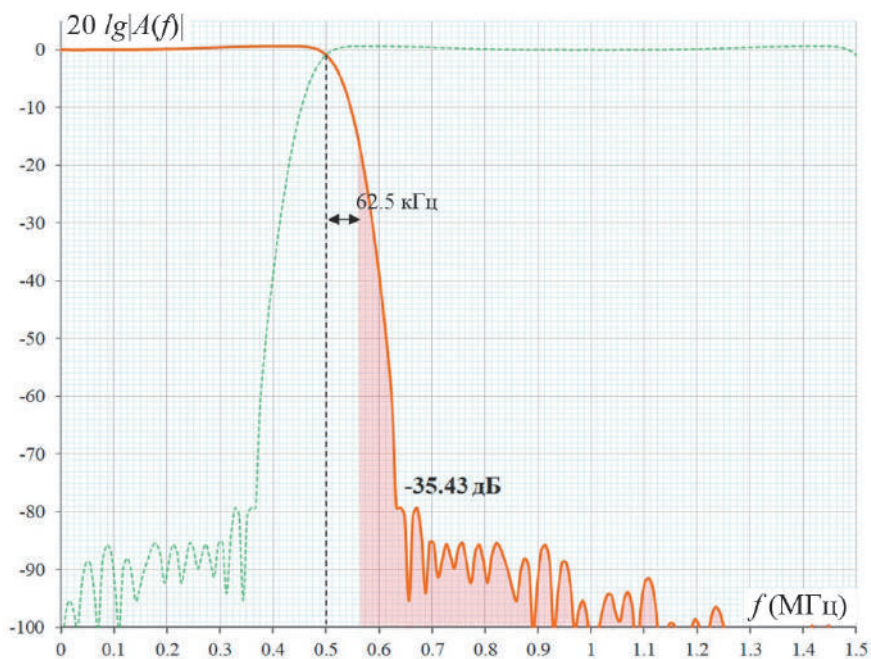
На рис. 5 для примера показана АЧХ для каскада аналоговых и цифровых фильтров, наблюдаемая для режима с радиополосой 1 МГц (поэтому на видеочастоте ширина полосы составляет 0,5 МГц). Уровень подавления фильтрами излучения, проникающего в поддиапазон соседней группы поднесущих, составляет $-35,43$ дБ.

Коричневая и зеленая зависимости показывают АЧХ каскада фильтров FIR+ВВ+ТИА, работающих в соседних рабочих полосах системы МАКВИЛ. Вертикальной штриховой линией показана граница спектра, разделяющая рабочие полосы. Полоса 62,5 кГц показывает на рис. 5 область, охватываемую защитным интервалом в части спектра, расположенного выше разделяющей границы диапазонов. Область, закрашенная светло-красным цветом, показывает уровень проникновения через боковые лепестки системы фильтров сигналов из верхней рабочей полосы в нижнюю.

Учитывая, что (см. рис. 4) уровень ООВ составляет $-41,84$ дБ, получаем для общего подавления проникающего в соседний поддиапазон излучения показатель $-41,84$ дБ $-35,43$ дБ $= -77,27$ дБ. Это значение практически совпадает с показателями лучших вариантов GFDM [26]. Следует отметить, что селективные свойства UFMC и GFDM достаточно близки [29]. Поэтому вывод относительно эквивалентности соответствующих характеристик МАКВИЛ и технологии UFMC остается в силе.

Рисунок 5

Спектральные характеристики, обеспечиваемые фильтрами FIR+ВВ+ТИА, в МАКВИЛ для селекции групп поднесущих по технике UFMC



Важно указать, что подавление внеполосного излучения более чем на -60 дБ (см. [30, табл. 2]), обеспечиваемое на входе антенны передающего тракта, не имеет практического смысла. Из-за нелинейных искажений в схемах переноса на радиочастоту и в усилителе мощности возникают побочные излучения заметно более высоких уровней.

Для аппаратуры массового производства современный этап развития технологий не дает экономически целесообразных решений, позволяющих справиться с этим эффектом. Поэтому GFDM 5G, UFMC 5G и МАКВИЛ обеспечивают определенный запас по подавлению внеполосного излучения с расчетом на перспективу развития радиопередающих систем.

3. Усовершенствованные методы пространственной обработки радиосигналов

3.1. Beamforming (формирование лучей диаграмм направленности антенн на источнике сигналов)

В МАКВИЛ, так же как и в сетях 5G, реализован режим сопровождения абонентов (источников радиосигнала) лучами индивидуальных диаграмм направленности (ДН), формируемых цифровым способом в антенных решетках БС. МАКВИЛ поддерживает доступ с временным разделением каналов TDD [1, 4, 5], поэтому трансляция и прием производится на тех же частотах. Это позволило применить алгоритм DoA (Direct of Arrival). То есть, в каждом временном окне приема на БС производится настройка весовых коэффициентов, которые формируют ДН нужной формы. В последующем временном окне, выделенном для передачи, БС использует те же весовые коэффициенты для управления передающей ДН, которая, согласно теореме взаимности, имеет ту же форму, что и ДН приема.

Антенные решетки на БС МАКВИЛ состоят из восьми, четырех или двух элементов. В принципе элементы могут размещаться произвольным образом в пределах площадки, но стандартными промышленными являются кольцевая и линейная формы из восьми элементов, показанные на рис. 6. Поэтому пространственная селекция сигналов теоретически позволяет поднять коэффициент повторного использования единицы спектрально-временного ресурса в МАКВИЛ до восьми раз. На практике цифра получается чуть ниже: до 5–6 раз.

Системы 5G, ориентированные на работу в диапазонах 2,4 ГГц и выше [17, 31], предполагают использование антенных систем БС, содержащих до 64 элементов. Но при этом для антенной решетки используют исключительно квадратную геометрию 8×8 [31], как показано на рис. 7.

Такая геометрия при селекции в азимутальной плоскости эквивалентна по своим возможностям (степеням свободы) восьмиэлементным антеннам МАКВИЛ, показанным на рис. 6. Дополнительные возможности заключаются исключительно в селек-

ции по углам места. Поэтому дополнительный положительный эффект от антенн $5G 8 \times 8$ по сравнению с антеннами МАКВИЛ в режиме формирования лучей будет иметь место только в случаях:

1) ультраурбанистической застройки (когда массы абонентов распределены в большом диапазоне высот);

2) микросот, работающих в миллиметровом диапазоне волн или выше, когда позиции блестящих точек переотражения лучей, наблюдаемые с позиции БС, могут сильно отличаться по углу места.

Но для последнего случая система МАКВИЛ не предназначена, а ультраурбанистическая застройка пока довольно редко встречается, и для нее существуют другие методики организации покрытия (например, с расположением панельных антенн «на боку»). Поэтому можно утверждать, что в диапазонах 300–2000 МГц восемь элементов для антенных

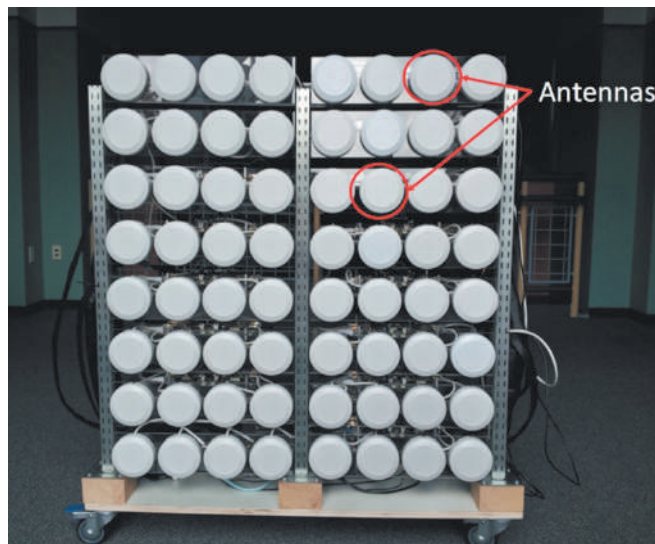
Рисунок 6

Адаптивные антенные решетки БС МАКВИЛ диапазонов 340 и 1800 МГц, состоящие из восьми элементов (один дополнительный канал – для калибровки)



Рисунок 7

Антенная решетка ARGOS для БС сетей 5G



решеток БС является естественным ограничением, преодолевать которое имеет смысл только при переходе в более высокие частоты.

3.2. mMIMO (Massive MIMO), MU-MIMO (Multi-user MIMO)

Режим MIMO в системах 5G претерпел модернизацию путем объединения с функцией Multi-User transmission [27]. В сетях 4G работа MIMO была построена на основе алгоритмов Аламути (Siavah Alamouti) и Тароха (Vahid Taroh), отличающихся предельной простотой. Применяемые в них пространственно-временные сигнальные передачи реализуют тривиальный режим передачи сигнала с последовательным переключением по существующим лучам трасс. В результате рабочие характеристики дают показатели, усредненные на множестве трасс. Строгая информационная теория показывает, что оптимальным является выбор из существующих трасс нескольких (иногда даже одной) с наилучшими характеристиками сигнал/шум, сопровождающийся последующим перераспределением мощности трансляции. Но такой алгоритм требует поддержки обратного канала управления. Поэтому на первых этапах освоения техники MIMO им не пользовались. В сетях 5G оптимальное правило было реализовано в режимах mMIMO и MU-MIMO. Как результат возникло сочетание техники сопровождения абонентов несколькими лучами с поддержкой каналов информационного обмена по таким лучам.

В МАКВИЛ режим, подобный MIMO, используется в других целях. На его основе решается задача оптимального распределения ресурсов радиоканала между абонентами путем составления бесконфликтных пространственно-частотно-временных расписаний доступа [32]. При этом критерием оптимальности является не обеспечение максимальной скорости информационного обмена отдельного абонента, как в MIMO, а поддержка доступа к сети для максимального числа абонентов при заданных ограничениях на скорость обмена. Это правило в МАКВИЛ включено в режим хэндовера типа «N=1», как «справедливый алгоритм» распределения ресурсов. При этом отдельные лучи используются для возможности работы в одном частотно-временном ресурсе радиоканала разных абонентов, которые имеют достаточные различия по комплексному показателю, зависящему от: дифференциации углов прихода лучей; затуханий сигналов на трассах (разница расстояний); корреляции Pilot-врезок (референсных сигналов). Порог допустимого различия задается установками хэндовера «N=1», которые зависят от запаса по показателю сигнал/шум, обеспечиваемому на границах зон покрытия, геометрии антенных систем БС, допустимой загруженности частотно-времен-

ного ресурса, в который планируется подключение нового абонента [32].

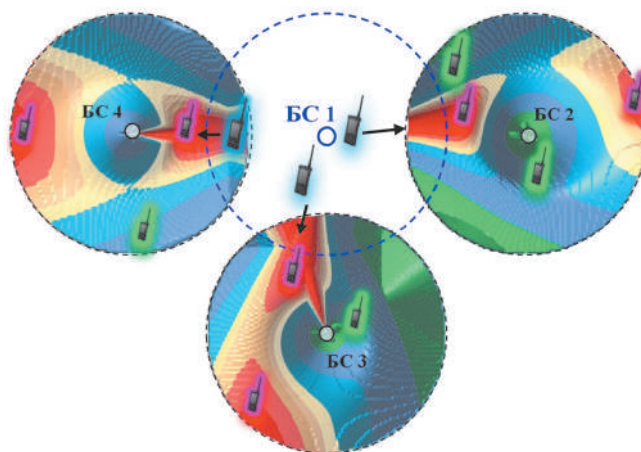
На рис. 8 показан пример формирования зон размещения абонентов МАКВИЛ, обслуживаемых соседними БС, допускающих и запрещающих работу в совмещенном частотно-временном ресурсе, для ситуации трасс прямой видимости. Геометрия восьмиэлементной антенной системы соответствует кольцу радиуса $\lambda/2$, где λ – длина волны несущего колебания. Энергетический запас на краю сот составляет 10 дБ. Расчет производится с учетом сопровождения лучами. На рис. 8 видно, что чем ближе выделенный абонент к границе соты, тем больше расчетная запретная зона, порождаемая им в соседних сотах.

На рис. 8 показаны зоны размещения абонентов в соседних сотах, допускающие использование совместного радиочастотного ресурса при работе с сигналами модуляций: QAM64 (зеленый цвет), QAM16 (синий и голубой) и QPSK (светло-коричневый и песочный). Зоны, запрещающие работу в совмещенном ресурсе, показаны красным цветом.

Если в MIMO лучи с низкими показателями сигнал/шум отключают, то в МАКВИЛ такие лучи помечают ребром графа запретов совмещенной работы, формируемом на множестве абонентов. Оптимизированное распределение формируется «справедливым алгоритмом» на основе теории графов, как решение задачи правильной раскраски вершин.

Так же, как и в MIMO, в алгоритме хэндовера «N=1» на основе данных об уровнях сигналов и типах используемой модуляции формируется управление включением/отключением лучей для организации работы абонентов в совмещенном частотно-временном ресурсе.

Рисунок 8
Формирование запрещенных (красный цвет) и разрешенных зон расположения абонентов МАКВИЛ для работы в совмещенном радиочастотном ресурсе



4. Усовершенствованная организация стека протоколов и архитектуры соединений в сети

В 5G впервые в практике сотовых сетей введено разделение функций сетевого уровня (L3) на верхний (Upper Network Layer) и нижний (Lower Network Layer) подуровни, как показано на рис. 9.

Раньше практика разделения применялась только для канального уровня (L2), в котором выделяли нижний (MAC) подуровень. Это позволило к одному IP-адресу привязывать множество оконечных устройств с разными MAC-адресами.

В сетях 5G деление уровня L3 позволило реализовать архитектуру БС (gNB), содержащую модуль gNB-CU (Central Unit) с множеством подключенных к нему узлов gNB-DU (Distributed Unit) [18], как показано на рис. 10. Последние организуют связь с абонентами на уровне L2, а модуль gNB-CU осуществляет обмен данными и локальные функции управления уровня L3 без подключения к ядру системы (5GC). В результате удалось повысить скорость выполнения ряда процедур (например, хэндовера), а также скорость обмена между IP устройствами в локальных зонах.

В сети МАКВИЛ модернизация функций уровня L3 не применяется, но есть два режима работы БС, ориентированных на управление структурой стека протоколов с целью обеспечения более высоких показателей скорости обмена и управления в особых ситуациях:

- 1) peer to peer bridging (одноранговое прямое соединение);
- 2) weak fault switch (переключение в ситуациях отказов).

Первый режим предназначен для межмашинного обмена или обмена данными между модемами, когда они подключены к сети МАКВИЛ через одну БС. В этом случае поток данных не выходит за пределы обслуживаемой БС МАКВИЛ, что повышает скорости обмена и управления.

Второй режим включается на БС при аварийной потере соединения с ядром системы или с отдельными модулями ядра (например, HLR (Home Location Register) или шлюзом агрегации серверов (SAG3000/5000)). В этом случае БС переходит на автономную работу с подключенными к ней абонентами. Если это обмен данными, то по технологии peer to peer bringing, а если речь — то методом прямой коммутации потоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате активных усилий, приложенных сообществом ученых, разработчиков и операторов средств связи для осуществления перехода к поколению систем 5G, появилось много новых интересных подходов, решений и методов, относящихся к обработке сигналов, методам модуляции, управления ресурсами радиоканала, обработки, осуществляемой

Рисунок 9

Модернизация стека протоколов, установленных для открытых взаимодействующих систем рекомендациями OSI X.200, в сетях 5G

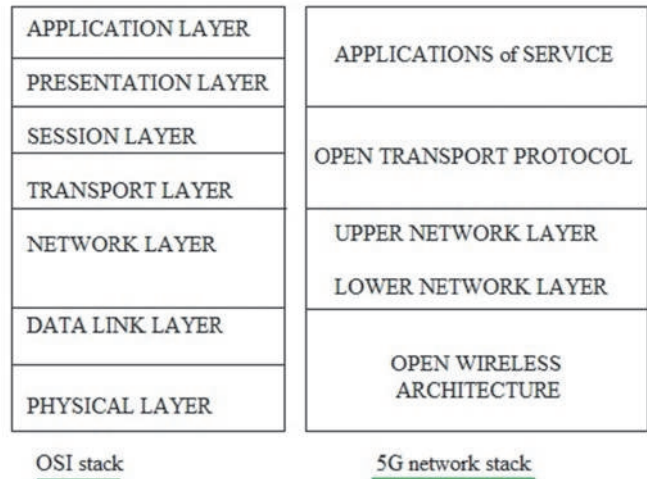
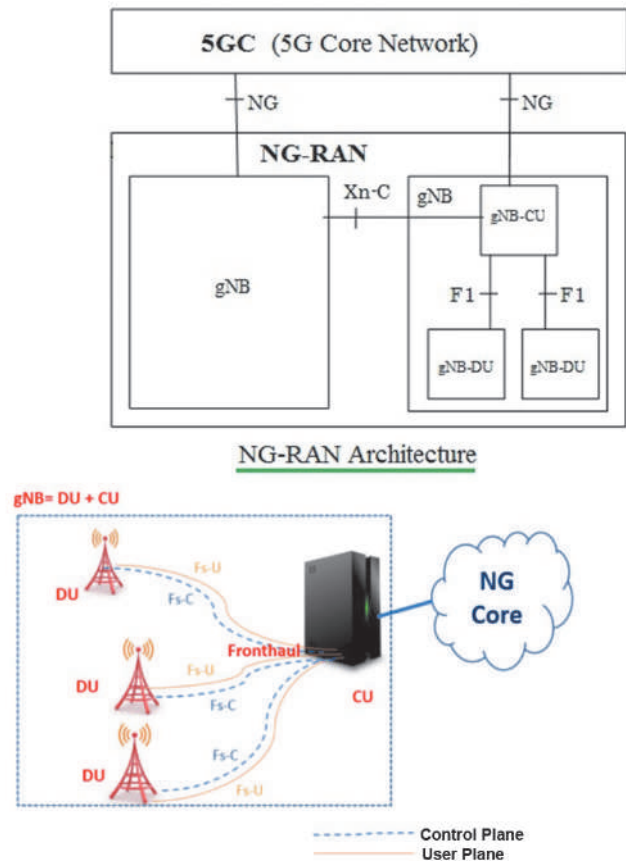


Рисунок 10

Архитектура БС сети 5G, содержащей узел gNB-CU и множество узлов gNB-DU [18, 19]



с помощью адаптивных антенн. С другой стороны, система профессиональной радиосвязи с брендовым наименованием технологии МАКВИЛ, разработанная в соответствии с национальным стандартом РФ ГОСТ Р 58166-2018, хоть и является типичным представителем поколения 4G, но возникла как индивидуальный проект, обладающий рядом уникальных оригинальных технических решений. Поэтому возник естественный вопрос, насколько известные решения 5G превосходят по показателям результаты, демонстрируемые соответствующими технологиями МАКВИЛ.

Представленный материал содержит сопоставительный анализ ряда значимых новых решений, появившихся в системах 5G, с решениями, реализованными в МАКВИЛ. Рассмотрены свойства и характеристики:

- 1) группы основных услуг;
- 2) новых методов модуляции;
- 3) усовершенствованных методов пространственной обработки;
- 4) организации стека протоколов и архитектуры соединений.

Показано, что по всем четырем направлениям сопоставления технология МАКВИЛ поддерживает решения, более или менее отвечающие концепции 5G. И если точного совпадения нет, то соответствующие решения если и уступают 5G, то незначительно. А в части методов пространственной обработки можно утверждать, что МАКВИЛ находится на лидирующих позициях, так как техника составления бесконфликтных пространственно-частотно-временных расписаний в 5G еще не используется.

Также важно отметить, что для организации систем профессиональной связи критических коммуникаций допустимо использование только проприетарных сетей. Применение решений на основе сетей массового использования, к которым относятся системы стандартов LTE и NR (5G), недопустимо. Отсутствие контроля над неограниченным доступом при широком перечне позиций, уязвимых к внешним воздействиям, а также отсутствие сквозного контроля производства оборудования, выпускаемого за рубежом, может привести к катастрофическим последствиям. Поэтому преимущества систем NR(5G) для критических коммуникаций условны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58166-2018. Технические требования к радиоинтерфейсу широкополосной подвижной радиосвязи (ШПР). Организация протоколов и алгоритмов работы на канальном и физическом уровнях. Основные параметры и технические требования. – М.: Стандартинформ, 2018. – 142 с.
2. Шорин, О.А. Снижение негативного влияния высоких значений пик-фактора сигналов в системе McWiLL / О.А. Шорин, Г.О. Бокк // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1 (11). – С. 9-13.
3. Шорин, О.А. Алгоритмические особенности организации связи и устойчивость к неравномерности ГВЗ системы связи McWiLL / О.А. Шорин, Р.С. Аверьянов // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1 (11). – С. 3-9.
4. Аверьянов, Р.С. Транкинговая система широкополосного доступа МАКВИЛ: монография; под ред. О.А. Шорина / Р.С. Аверьянов, Г.О. Бокк, Е.Е. Володина и др. – М.: Медиа Паблишер, 2021. – 196 с.
5. Лохвицкий, М.С. Мобильная связь: стандарты, структуры, алгоритмы, планирование / М.С. Лохвицкий, А.С. Сорокин, О.А. Шорин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2018. – 264 с.
6. Бокк, Г.О. Обеспечение безопасности систем профессиональной радиосвязи в критических инфраструктурах / Г.О. Бокк, А.О. Шорин // Электросвязь. – 2021. – № 6. – С. 25-31.
7. Кашкаров, Д.В. Модель и метод использования множественных связей для реализации сверхнадежных соединений в сети 5G / Д.В. Кашкаров, А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов // Электросвязь. – 2021. – № 8. – С. 16-22.
8. ITU-R M.2410-0. Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). Electronic Publication. – Geneva, 2017. – <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2410>.
9. 3GPP TR 22.862, Rel-14 V.14.1.0. Feasibility study on new services and markets technology enablers for critical communications; Stage 1.
10. Bennis, M. Ultrareliable and Low-Latency Wireless Communication: Tail, Risk, and Scale / M. Bennis, M. Debbah, H.V. Poor // Proceedings of IEEE. – 2018. – Vol. 106, Issue 10. – P. 1834-1853. – DOI: 10.1109/JPROC.2018.2867029.
11. 3GPP TS 37.340. NR; Multi-connectivity; Overall description; Stage 2 (Release 15).
12. Pokhrel, S.R. Towards Enabling Critical mMTC: A Review of URLCC within mMTC / S.R. Pokhrel, J. Ding, J. Park et al. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 131796-131813. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010271.
13. Бочечка, Г.С. Повышение эффективности сетей мобильной связи 5G – мировая гонка исследований / Г.С. Бочечка, Е.Е. Девяткин, М.В. Иванкович, И.В. Кузнецов // Электросвязь. – 2021. – № 6. – С. 55-60.
14. FBMC physical layer: a primer – PHYDYAS Project. – <https://pdf4pro.com/view/fbmc-physical-layer-a-primer-phydyas-project-28e004.html>.
15. Farhang-Boroujeny, B. Filter Bank Multicarrier Modulation: A Waveform Candidate for 5G and Beyond / B. Farhang-Boroujeny // Advances in Electrical Engineering. – Vol. 2014. – Article ID 482805. – <https://downloads.hindawi.com/archive/2014/482805.pdf>.
16. Шорин, О.А. Улучшенные сигнальные структуры FBMC (5G) для систем критических коммуникаций: повышение помехоустойчивости в условиях многолучевого распространения / О.А. Шорин, Г.О. Бокк, В.О. Шорин // Экономика и качество систем связи. – 2022. – № 3(25). – С. 22-37.
17. Larsson, E.G. Massive MIMO for next generation wireless systems / E.G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, T.L. Martezza // IEEE Communications Magazine. – 2014. – Vol. 52, Issue 2. – P. 186-195.

18. 3GPP TS 138.401. 5G; NG-RAN; Architecture description (Release 16). 2021.

19. 5G NR gNodeB Functional Split: CU DU split. – <https://www.5g-networks.net/5g-technology/gnodeb-gnb-cu-du-split>.

20. Кучерявый, А.Е. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности / А.Е. Кучерявый, А.И. Парамонов, Е.В. Тонких // Электросвязь. – 2020. – № 1. – С. 44-48.

21. Standardization of NB-IOT completed. – <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/nb-iot-complete>.

22. 3GPP TS 38.104, V16.5.0 (2020-11). 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.

23. Слюсарь, В.И. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. Часть 1 / В.И. Слюсарь // Технологии и средства связи. – 2013. – № 5. – С. 61-65.

24. Jiang, L. An Overview of FIR Filter Design in Future Multicarrier Communication Systems / L. Jiang, H. Zhang, Sh. Cheng et

al. // Electronics. – 2020. – Vol. 9(4). – 599. – DOI: 10.3390/electronics9040599.

25. Xia, X. A family of pulse-shaping filters with ISI-free matched and unmatched filter properties / X. Xia // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45, Issue 10. – P. 1157–1158.

26. Michailow, N. Generalized Frequency Division Multiplexing for 5th Generation Cellular Networks / N. Michailow, M. Matthé, I.S. Gaspar et al. // IEEE Transactions on Communications. – 2014. – Vol. 62, Issue 9. – P. 3045-3061.

27. 5G Waveform Candidate Selection. 5GNOW. D3.1. – <https://api.is-wireless.com/wp-content/uploads/2015/07/5GNOW-Deliverables-5G-Waveform-Candidate-Selection.pdf>.

28. Бочечка, Г.С. Сравнительный анализ использования технологий UFMC и OFDM в сетях 5G / Г.С. Бочечка, И.В. Ворожищев, В.О. Тихвинский // Электросвязь. – 2017. – № 11. – С. 18-23.

29. Gerzaguet, R. The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance / R. Gerzaguet, L.G. Batlar, N. Bartzoudis et al. // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2017. – Article number 13. – DOI: 10.1186/s13638-016-0792-0.

30. Recommendation ITU-R SM.329-12 (09/2012). Unwanted emissions in the spurious domain.

31. Shepard, C. Argos: Practical Many-Antenna Base Stations / C. Shepard, H. Yu, N. Anand et al. // Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom'12). – 2012. – P. 53-64. – <https://doi.org/10.1145/2348543.2348553>.

32. Аверьянов, Р.С. Алгоритм хэндовера системы МАКВИЛ в режиме устранения конфликтов распределения ресурсов канала связи / Р.С. Аверьянов // Электросвязь. – 2021. – № 6. – С. 39-46.

Получено 03.02.23

СТОЛЕТИЕ НИКОЛАЯ ДЕРЮГИНА



8 марта 2023 года исполнилось 100 лет со дня рождения видного ученого в области техники телевизионного вещания, представителя когорты ученых отрасли «Связь» и НИИР – начальника лаборатории, кандидата технических наук Николая Георгиевича Дерюгина.

Н.Г. Дерюгин вошёл в плеяду ученых-телевизионщиков, чьи достижения в этой области науки в совокупности с научными результатами коллег по профессии сформировали отечественную и мировую основу техники вещательного телевидения.

Николай Георгиевич родился в 1923 году в Москве. После окончания в 1949 году Московского института инженеров связи одновременно с М.И. Кривошеевым начал свою трудовую деятельность в Москов-

ском телевизионном центре. С мая 1954 года началась его научная деятельность в Институте Радио Минсвязи СССР, где он успешно трудился более 30 лет.

Им был проведен ряд фундаментальных исследований в области теории телевидения. Впервые в СССР Н.Г. Дерюгин выполнил исследования возможностей сокращения избыточности ТВ сигнала и опубликовал в журнале «Электросвязь» № 7 за 1957 год ставшую классической статью по расчету спектра мощности и функции корреляции телевизионного сигнала, а в 1958 году им были проведены теоретические исследования по сокращению полосы частот, занимаемой ТВ сигналом.

Большой объем теоретических и экспериментальных исследований в сфере телевизионного вещания позволил Н.Г. Дерюгину подготовить и успешно защитить в 1958 году кандидатскую диссертацию.

С 1968 года Н.Г. Дерюгин возглавил научную лабораторию в отделе «Т», руководителем которого в то время был профессор М.И. Кривошеев.

Важным направлением работ, объединявшим в разные годы усилия многих специалистов под руководством Н.Г. Дерюгина, была научная организация эксплуатации действующих передающих ТВ-станций совместно с РТПЦ, а также разработка технологии вещания без постоянного присутствия обслуживающего персонала. Под его руководством была создана отечественная электронная таблица цветного телевидения, которая активно применялась при переходе нашей страны

на систему цветного телевидения SECAM-IV в 1965 году.

При участии Дерюгина Н.Г. были разработаны:

- система централизованного управления многопрограммными ТВ и РВ центрами республиканского и областного значения, в частности, в 1981 году в Волгоградской области под его руководством был создан опытный участок автоматизированной передающей телевизионной сети, что позволило определить требования к передающим средствам автоматизированной передающей ТВ-сети и системе телеуправления и телесигнализации;
- первый свод основных правил для радиопередающей сети ТВ Советского Союза – «Правила технической эксплуатации средств вещательного телевидения» (ПТЭ СВТ), которые были изданы массовым тиражом в издательстве «Радио и связь»;
- допуски на параметры полного тракта цветного ТВ вещания;
- передвижной измерительный ТВ комплекс.

В составе делегации специалистов Министерства связи СССР Н.Г. Дерюгин внес большой вклад во внедрение системы цветного телевидения SECAM в Республике Куба.

Дерюгин Н.Г. был постоянным автором научных статей в журналах «Электросвязь», «Техника кино и телевидения», «Вестник связи», имел ряд авторских свидетельств. За большой вклад в развитие техники телевизионного вещания Н.Г. Дерюгину было присвоено звание «Мастер связи».