

# ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ДЛЯ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В РЕАЛЬНЫХ СЦЕНАРИЯХ ГОРОДСКИХ УСЛОВИЙ

При переходе систем связи 5G и 6G в диапазон миллиметровых волн (mmWaves) будут доступны не только новые полосы частот с высокой пропускной способностью, но и поддержка многих новых концепций, предусмотренных для будущих приложений беспроводной связи.

Однако потери при распространении и замирания, характерные для таких коротких электромагнитных волн, и намного большее число подключенных мобильных устройств создают проблемы для новых технологий сотовой связи. Решить некоторые из этих проблем может использование антенных системы ММО и формирование луча диаграммы направленности. Но данное решение должно иметь возможность адаптироваться к динамическим переключениям каналов при перемещении устройств между сотами и взаимодействии сигналов с людьми и движущимися транспортными средствами.

Для того чтобы оценить производительность канала с учетом ожидаемого в условиях городской среде распространения волны и влияние доплеровского сдвига частотного спектра, а также оценить воздействие динамического канала на формирование луча ММО поможет моделирование трассы распространения сигнала.<sup>1</sup>

Для того чтобы удовлетворить потребность в значительно более высоких скоростях передачи данных и постоянно увеличивающемся количестве подключенных пользователей, поставщики беспроводных услуг начали использовать часть спектра, доступного в диапазоне миллиметровых волн. Однако распространение таких коротких электромагнитных волн не только предоставляет явные преимущества, но и создает специфические проблемы [2]. Основные из них — увеличенные потери на трассе в свободном пространстве и большее затухание дифрагированных лучей по сравнению с полосами частот, лежащих ниже частоты 7 ГГц. Для сокращения таких потерь на трассе используются антенны с высоким коэффициентом усиления для одного или обоих концов линии связи. На базовой станции исключительно высокий коэффициент усиления достигается за счет многоэлементных фазированных активных антенных решеток (massive ММО, mMIMO) [3], образующих каналы связи с пользователями. Применение антенн со столь высоким коэффициентом уси-

ления, в свою очередь, требует адаптивного управления лучом в мобильных сценариях, что создает дополнительные проблемы [4].

## АДАПТАЦИЯ К ДИНАМИЧЕСКОМУ КАНАЛУ

Поскольку при динамическом сценарии задержка между получением информации о состоянии канала (channel state information, CSI) (при выборе луча и/или зондировании канала он постоянно меняется), то использование адаптированного луча для передачи данных дает пропускную способность, которая по сравнению с пропускной способностью, достижимой в статическом сценарии, ухудшается. Это может особенно заметно проявляться в сценариях с высокой мобильностью и с препятствиями, блокирующими динамические соединения, поскольку для миллиметровых волн затухание и радиотень довольно резко выражены. По этим причинам точное прогнозирование производительности линии связи в мобильной среде требует знания временных характеристик канала и понимания соответствующих задержек.

Помимо проблем, связанных с адаптивным формированием луча, в канале миллиметрового диапазона из-за более короткой длины волны также происходит более быстрое замирание сигнала по сравнению с каналами, работающими ниже частоты 7 ГГц. Таким образом, время когерентности короче, а соответствующая доплеровская полоса частот шире. Для сигналов мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM), используемых в новом радио пятого поколения — 5G New Radio (NR), увеличенная доплеровская полоса частот приводит к интерференции между поднесущими, что в итоге вызывает дальнейшее ухудшение пропускной способности канала. (Качество и надежность непосредственно самой передачи в сети 5G на миллиметровых волнах были продемонстрированы в мобильной сети в тестовых системах во время Олимпийских игр в Сеуле и на скоростях выше 200 км/ч на гоночной трассе, поэтому структура кадра 5G пригодна для переключений в условиях даже экстремального доплеровского сдвига [2]. Однако проверка

<sup>1</sup> Публикация перевода осуществляется на основе эксклюзивного разрешения журнала Microwave Journal, предоставленному переводчику. Оригинал статьи [1] впервые опубликован в Microwave Journal November 2021. Все желающие могут бесплатно подписаться на <https://www.microwavejournal.com/user/new>.

не проводилась для большого числа мобильных терминалов и условий городской застройки. — *Прим. пер.*)

### ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для того чтобы проиллюстрировать возможные нарушения из-за мобильности, рассмотрим вариант предоставления сервисов расширенной мобильной широкополосной связи (enhanced mobile broadband, eMBB) движущемуся транспортному средству в густонаселенной городской среде и в присутствии других движущихся транспортных средств. Реалистичные прогнозы изменяющихся во времени каналов выполняются с помощью пакета для моделирования и анализа распространения радиоволн в различных условиях Wireless InSite® компании Remcom [5], позволяющего проводить моделирование для распространения радиоволн для ряда плотно расположенных временных шагов.

Система Wireless InSite строит и запоминает наборы лучей распространения, в которые при изменении числа или положения антенн вносятся соответствующие коррективы, что позволяет значительно сократить время анализа. Изменения, не связанные с геометрией исследуемой территории, например частотные диапазоны, диаграммы направленности антенн и материалы объектов, также не влекут за собой пересчета набора лучей распространения. Недавно компания Remcom представила новые функции в Wireless InSite — своем ПО для моделирования и анализа распространения радиоволн в сетях 5G и MIMO мм-диапазона. Пока 5G определяет развитие в сторону более высоких частот миллиметрового диапазона, моделирование диффузного рассеяния продолжает повышать точность, представляя пересечения траекторий с различными поверхностями и структурами и объясняя влияние таких пересечений на мощность сигнала. MicroApps компании Remcom продемонстрировал преимущества нового предиктивного инструмента для моделирования FD-MIMO. MicroApps доступен на сайте компании Remcom.

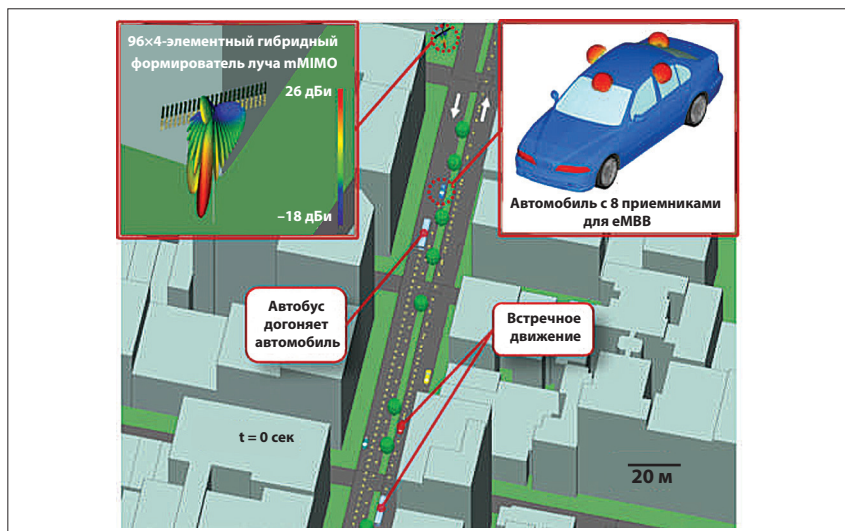
Моделирование показывает, что установленные на транспортном средстве приемники (Rx) обнаруживают замирание, когда транспортное средство движется по своему маршруту, и иллюстрируют пример доплеровского сдвига, возникающего в результате движения транспортного средства, принимающего сигнал, и других транспортных средств вокруг него. Затем рассматривается ухудшение отношения сигнала к сумме интерференции и шума (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR), появляющееся из-за задержки между

измерением и использованием CSI для адаптивного формирования диаграммы направленности. По сравнению со случаем, когда мобильность игнорируется, эта задержка сама по себе обеспечивает снижение SINR на 5–8 дБ для параметров задержки, предлагаемых стандартом 5G NR [7–9].

Рассматриваемый в статье конкретный сценарий eMBB представляет собой гибридное формирование диаграммы направленности четырех потоков данных для мобильного транспортного средства. Этот сценарий появился после недавнего полевого испытания 5G NR5, в котором скорость передачи данных 11 Гбит/с была продемонстрирована для четырех потоков данных при 732 МГц совокупной полосе пропускания для транспортного средства, движущегося со скоростью 30 км/ч и обменивающегося данными с базовыми станциями mMIMO с гибридным формированием диаграммы направленности, работающими на частоте 28 ГГц. Для увеличения скорости 100 км/ч пропускная способность была снижена до 8 Гбит/с. Полевые испытания проводились в среде, свободной от городской застройки, а в контексте моделирования был развернут аналогичный интерфейс между транспортными средствами и сетью (vehicle-to-network, V2N) в условиях мегаполиса и в присутствии дополнительных движущихся транспортных средств (рис. 1).

Легковой автомобиль, который получает сервисы eMBB, оснащен в общей сложности восемью приемниками: по два перекрестно поляризованных приемника в каждом из четырех мест, как показано на верхней правой вставке рис. 1. Кроме того, легковой автомобиль снабжен четырьмя радиочастотными модулями основной полосы частот и может декодировать четыре потока данных

от четырех приемников с наивысшим уровнем сигнала. Базовая радиостанция 5G Node B (next generation Node B, gNB) (подробно о базовых станциях этой технологии см. [6]) расположена в центре в верхней части рис. 1 и детально показана на левой верхней вставке. В решении использован гибридный формирователь луча в частотном диапазоне 28 ГГц, состоящий из четырех цифровых радиочастотных модулей основной полосы частот. Каждый модуль управляет 96-элементной фазированной решеткой, оснащенной аналоговым формирователем луча. Каждая такая 96-элементная панель представляет собой прямоугольную матрицу, охватывающую четыре элемента в вертикальном направлении и 24 элемента в горизонтальном измерении с полуволновым ( $\lambda/2$ ) шагом. Сами элементы представляют собой патч-антенны с усилением 6 дБи. Две панели расположены вместе, но с элементами, имеющими ортогональную поляризацию под углом  $\pm 45^\circ$  относительно вертикали. Второй набор из двух панелей совмещен аналогичным образом, но расположен вертикально над первым. Сборка из четырех панелей наклонена вниз на  $10^\circ$ , чтобы увеличить охват пользователей, находящихся на улице. Каждая панель оснащена аналоговым формирователем луча, который позволяет управлять лучом под 32 углами в горизонтальном направлении, равномерно распределенными по сектору в  $120^\circ$ . Эти 32 направленных луча сконфигурированы в матрице предварительного кодирования, которая может быть запрошена пользовательским оборудованием (user equipment, UE), то есть приемником легкового автомобиля. Один такой луч, создаваемый одной панелью, показан на левой верхней вставке рис. 1. Общая выходная радиочастотная мощность че-



▲ Рис. 1. Гибридный формирователь луча микроволнового диапазона, передающий четыре потока данных на легковой автомобиль (седан), едущий в центре Манхэттена

тырехпанельной антенной системы составляет 27 дБм.

Имея четыре цифровых радиочастотных модуля основной полосы частот, базовая станция gNB может одновременно передавать четыре потока данных на пользовательском оборудовании. Базовая станция делает это путем цифрового формирования луча с использованием одного луча из каждой панели, выбранной из матрицы антенной решетки с помощью предварительного кодирования. С этими четырьмя аналоговыми лучами цифровой формирователь луча определяет оптимальные комплексные весовые коэффициенты для передачи каждого из четырех потоков данных отдельному Rx на пользовательском оборудовании, применяя регуляризованное принуждение к нулю (regularized-zero-forcing, RZF) [11] и одновременно минимизируя помехи для трех других активных Rx, не связанных с заданным потоком данных.

В рассматриваемой ситуации транспортное средство (здесь: носитель пользовательского оборудования) движется по Парк-авеню с постоянной скоростью 14,75 м/с. По маршруту он обгоняет автобус, движущийся со скоростью 7 м/с по соседней полосе, и приближается к встречному потоку, автомобилю (14 м/с) и автобусу (13 м/с). На рис. 1 изображен сценарий в начальный момент времени  $t = 0$  с, где желтые точки, которые проходят перед движущимся транспортным средством, обозначают путевые точки через равные интервалы времени для данного маршрута.

### ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА

Прежде чем анализировать влияние временной задержки на формирование луча, сначала рассмотрим для нашего сценария общие характеристики каналов с замираниями. Для оценки каналов распространения выполним трассировку лучей для каждой из пар элементов  $384 \times 8$  между gNB mMIMO и приемниками UE с помощью ПО Wireless InSite компании Remcom [5]. Трассировка лучей осуществляется в интервале времени от  $t = 0$  до 5,5 с на каждой из близко расположенных серий временных шагов с интервалом 2,5 мс.

Новые функции мобильности, уже доступные в инструменте распространения Wireless InSite [5], облегчают моделирование при движении в общем потоке с другими транспортными средствами пользовательского оборудования, так что любая геометрия, способная повлиять на канал распространения, точно учитывается на каждом временном шаге. Траектории луча, соединяющие пару элементов передачи-приема (Tx-Rx),

могут включать до шести отражений, одну дифракцию и учитывать ослабление листвой. Кроме того, учитывается и диффузное рассеяние от поверхности, асфальта и близлежащих построек. Линейная интерполяция параметров траектории луча (например, длина пути, потери на пути и фазовый сдвиг) между временными шагами позволяет надежно моделировать свойства на трассе распространения радиоволны в произвольные моменты времени. Параметры для каждого пути луча в произвольный момент времени могут затем использоваться для вычисления комплексного усиления пути и когерентным суммированием по всем комплексным коэффициентам усиления пути, то есть комплексного усиления канала для каждой пары элементов Tx-Rx.

### ЗАТУХАНИЕ И ЗАТЕНЕНИЕ СИГНАЛА (РАДИОТЕНЬ)

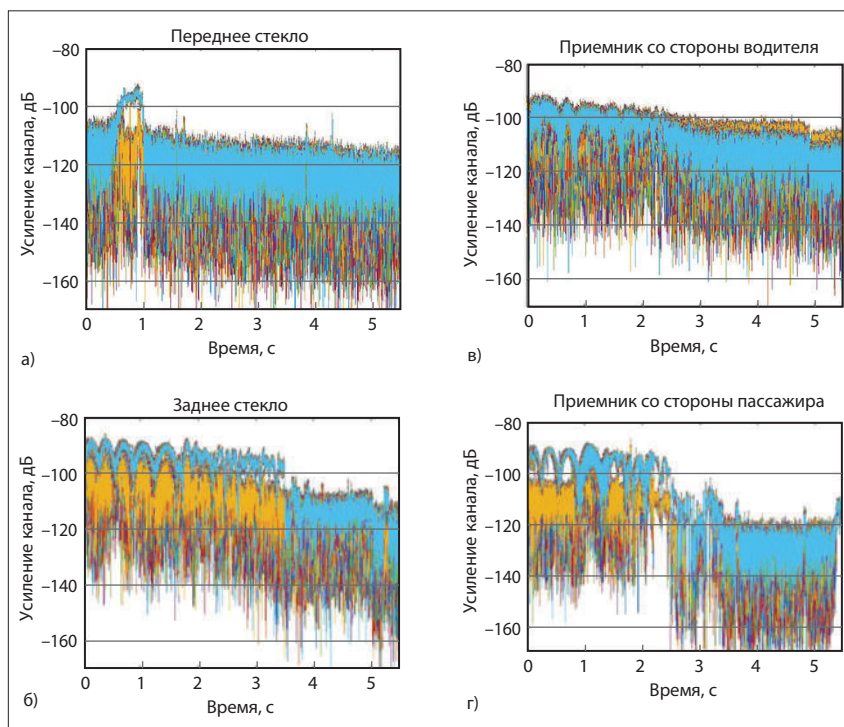
Результаты, полученные в ходе моделирования трассы, используются для прогнозирования замирания канала для каждой пары элементов Tx-Rx как функции времени. На рис. 2 показана величина усиления канала на всем маршруте для каждого из 384 элементов mMIMO к четырем репрезентативным Rx на оборудовании пользователя.

**Переднее стекло** (рис. 2а). В большинстве случаев этот приемник не имеет сильного пути от какого-либо элемента mMIMO, но обычно имеет коэффициент усиления канала, определяемый суммой нескольких вкладов диффузного рассеяния, поступающих из множества на-

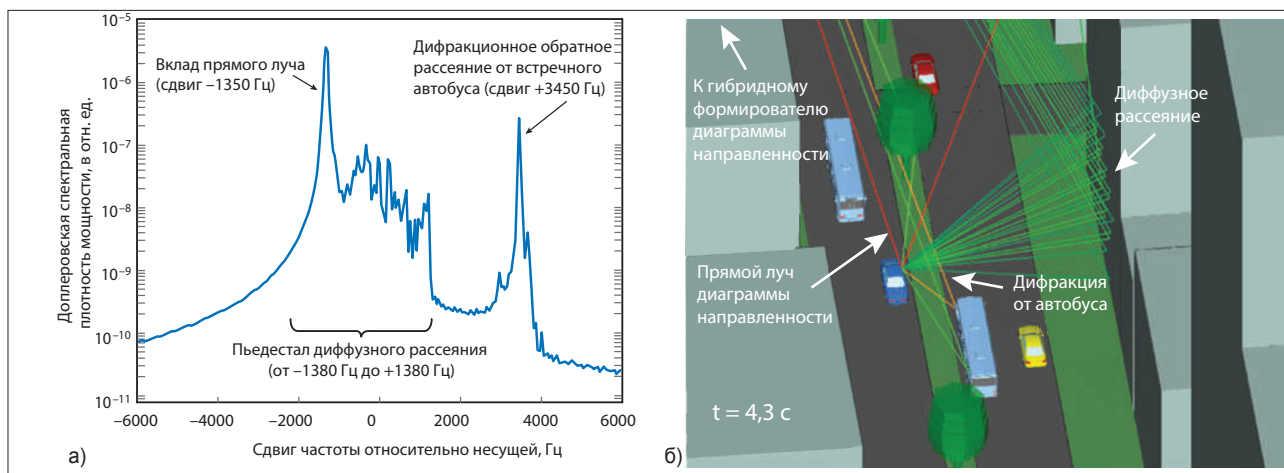
правлений. В результате в течение большей части времени для него наблюдается очень быстрое замирание с быстрыми колебаниями усиления канала. Однако существует период от  $t \approx 0,5$  до 1,0 с, когда усиление канала относительно велико для элементов mMIMO одной поляризации. Это происходит из-за сильного отражения от медленно движущегося автобуса, и сигнал, который приемник пользовательского оборудования Rx получает в течение этого периода, может иметь довольно-таки высокий уровень.

**Заднее стекло** (рис. 2б). Для этого приемника пользовательского оборудования автомобиля Rx характеристики замирания примерно для первых 3,5 с заметно отличаются от Rx переднего лобового стекла, поскольку затем усиление значительно увеличивается и вносит небольшой вклад в общее замирание, причем в более медленном временном масштабе. Это связано с тем, что в данный период приемник находится в условиях прямой видимости (line-of-sight, LOS) и на него попадет один или несколько отраженных лучей. Но начиная с 3,5 с их затеняет один или оба автобуса.

**Приемники со стороны водителя** и **пассажира** (рис. 2в-г). Эти приемники Rx демонстрируют поведение, подобное Rx заднего окна, поскольку они также находятся в условиях прямой видимости и более сильных многолучевых компонентов, достигающие Rx на начальной части маршрута. Приемник пользовательского оборудования автомобиля Rx со стороны пассажира резко затеняется в момент  $t \approx 2,5$  с, в этот момент автомо-



▲ **Рис. 2.** Затухание приемника на переднем стекле (а), заднем стекле (б), стороне водителя (в) и стороне пассажира (г) для движущегося автомобиля в течение 5,5 с



▲ Рис. 3. Доплеровский сдвиг в приемнике на стороне водителя (а), демонстрирующий эффекты дифракции от встречного автобуса (б)

бил обгоняет автобус со стороны пассажира.

**Ситуация, общая для всех приемников в целом.** Для всех приемников пользовательского оборудования автомобиля Rx из-за потерь на трассе в свободном пространстве, когда автомобиль удаляется от базовой станции, наблюдается медленное замирание от короткого до длительного.

#### ДОПЛЕРОВСКИЕ СДВИГИ

Еще одна интересная величина — распределение частотных сдвигов, которые возникают из-за эффекта Доплера, поскольку такие сдвиги вносят интерференцию между поднесущими в сигнал OFDM и тем самым ухудшают канал связи. Спектральная плотность мощности доплеровских сдвигов частоты относительно несущей задается спектральной плотностью мощности зависящего от времени комплексного усиления канала в заданном интервале.

Типичный доплеровский спектр показан на рис. 3а, где спектральная плотность мощности высчитывается за период 20 мс при времени моделирования  $t = 4,3$  с. Показанный спектр является средним по всем элементам mMIMO для одного Rx на стороне водителя легкового автомобиля. Есть несколько примечательных особенностей, объясненных со ссылкой на рис. 3б, где показаны 25 лучей наивысшей мощности (из 500), которые вносят вклад в принимаемый сигнал для репрезентативного элемента mMIMO.

Доминирующий пик в доплеровском спектре возникает в основном из-за пути луча прямой видимости, с меньшим вкладом от несколько более слабых отраженных лучей. Поскольку рассматриваемое транспортное средство движется почти прямо от базовой станции со скоростью  $|\vec{v}| = 14,75$  м/с, то ожидаемый сдвиг частоты для вклада этого луча близок к максимальному сдвигу  $\Delta f_{\max} = |\vec{v}|/\lambda = 1,38$  кГц. Наблюдаемый сдвиг

величиной 1,35 кГц уменьшается, потому что траектория движения автомобиля не проходит прямо от базовой станции, а значит, и отраженные лучи вносят свой вклад, пусть и с несколько уменьшенными сдвигами. Отрицательный знак сдвига ожидается, поскольку автомобиль удаляется и принимает сигнал по прямому лучу с более низкой частотой, чем у несущей. Этот доминирующий пик находится на вершине широкого пьедестала, который простирается от  $-\Delta f_{\max}$  до  $+\Delta f_{\max}$  и является результатом вкладов диффузного рассеяния в спектральную плотность мощности, поступающих со всех направлений относительно скорости  $|\vec{v}|$  автомобиля.

Наконец, изолированный пик со сдвигом частоты +3,45 кГц — это результат лучей, которые сначала попадают на встречный автобус, затем рассеиваются от автобуса и возвращаются на сторону водителя Rx. Размер этого сдвига вполне существенный. Когда автобус приближается к базовой станции со скоростью  $\vec{v}_{\text{bus}}$ , а автомобиль и автобус приближаются друг к другу с относительной скоростью  $\vec{v}_{\text{bus}} - \vec{v}$ , то ожидаемый доплеровский сдвиг будет  $(2|\vec{v}_{\text{bus}}| + |\vec{v}|)/\lambda = 3,8$  кГц. С учетом того, что эти объекты не движутся прямо навстречу друг другу, ожидается уменьшение сдвига до 3,45 кГц.

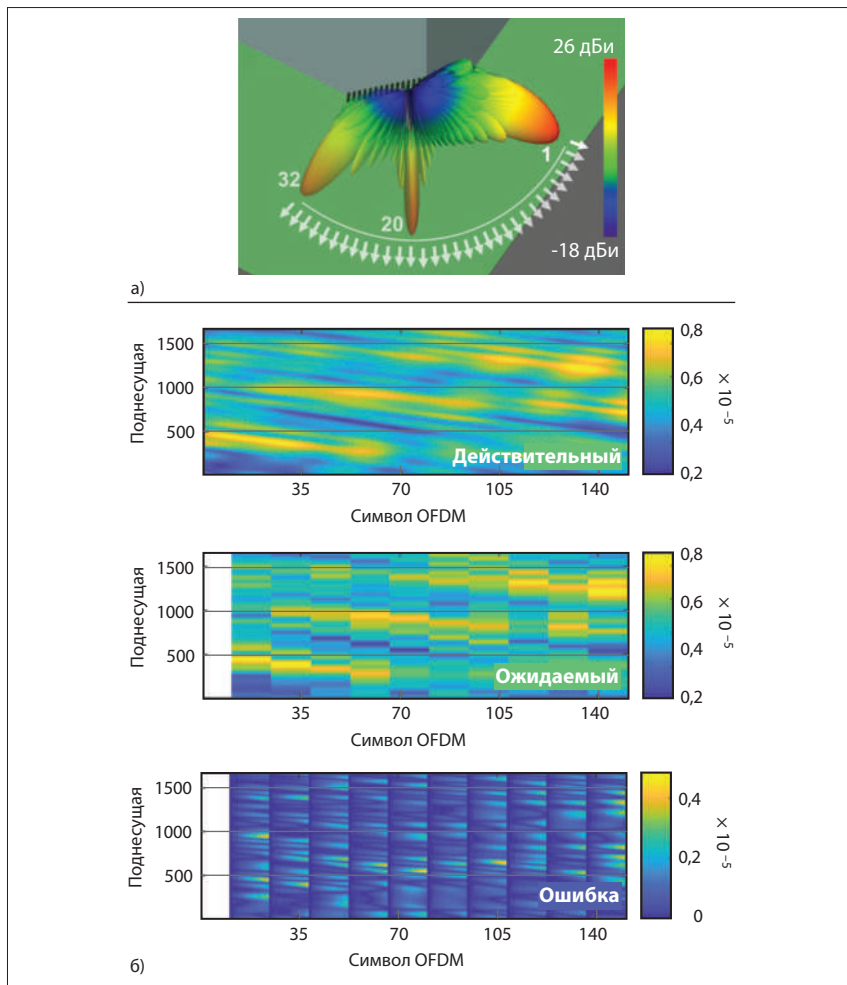
Примечательно, что этот репрезентативный доплеровский спектр значительно отличается от часто используемой статистической модели, представленной в [12, 13], которая предполагает плотную, однородную среду рассеяния и игнорирует сильные изолированные вклады, возникающие из-за прямой видимости или зеркальных траекторий лучей. Доплеровские спектры для детерминированного канала, смоделированного здесь, напротив, включают вклады от прямой видимости и зеркальных лучей, определяющих доминирующие особенности в доплеровском спектре, подчеркивая ценность моделирования детерминированной трассировки лучей.

Кроме того, зависящие от времени параметры траектории луча, предоставленные этим моделированием, могут использоваться для построения зависящей от времени импульсной характеристики канала (channel impulse response, CIR), из которой может быть определено явное ухудшение канала связи, вызванное межканальными помехами (InterChannel Interference, ICI), что определяется, например, в [14], но с использованием детерминированного, а не статистического CIR.

#### ДЕГРАДАЦИЯ ЛУЧЕВОГО ФОРМИРОВАНИЯ ИЗ-ЗА ЗАДЕРЖКИ

Рассмотрим теперь SINR для четырех потоков данных нисходящей линии связи к активным приемникам Rx на стороне пользовательского оборудования, достигаемое с помощью цифрового формирования луча RZF с использованием четырех сформированных аналоговым путем лучей, каждый из которых выбирается из таблицы предварительного кодирования. Как известно, задержки, существующие между измерением канала и формированием диаграммы направленности, ухудшают характеристики.

Четыре активных Rx из восьми на пользовательском оборудовании и индексы матрицы предварительного кодирования (precoding matrix indices, PMI), запрошенные пользовательским оборудованием, выбираются после пакета блоков сигналов синхронизации (synchronization signal block, SSB), которые являются частью сигнала 5G NR и могут ожидать один раз каждые 20 мс [9, 15]. Во время передачи пакета SSB базовая станция сканирует сектор, передавая 64 SSB, последовательно используя каждый из 32 аналогово сформированных лучей для каждой из двух панелей антенн с ортогональной поляризацией (рис. 4а). Во время передачи пакетов SSB пользовательское оборудование определяет четыре приемника Rx из восьми, которые имеют наивысший уровень сигнала от одного из 64 SSB.



▲ Рис. 4. Секторное сканирование во время пакета синхронизации сигнала (а) с оценкой канала на основе зондирующего опорного сигнала (б)

Поскольку пользовательское оборудование имеет только четыре цифровых приемника, для определения четырех активных Rx требуются два последовательных пакета SSB. Таким образом, пользовательское оборудование с периодом 40 мс выбирает активный набор Rx и сообщает базовой станции о четырех уникальных PMI, создавших самые высокие уровни сигнала. Далее они используются для генерации четырех лучей для аналогового этапа гибридного формирования луча. Затем CSI, необходимая для этапа цифрового формирования луча, получается из зондирующих опорных сигналов (sounding reference signal, SRS), предоставляемых пользовательским оборудованием по восходящей линии связи (предполагается взаимность каналов). Согласно спецификациям 3GPP 2, SRS может предоставляться один раз на слот, что для разнеса поднесущих 60 кГц составляет период 250 мкс.

Задержка, связанная как с аналоговым, так и с цифровым этапами оценки канала при формировании диаграммы направленности, снижает производительность. Например, в случае выбора набора PMI + Rx движение пользовательского терминала или других транспортных средств в непосредственной близости может при-

вести к резкому затенению одного или нескольких активных приемников Rx от одного или нескольких лучей, сформированных базовой станцией. Однако станция будет продолжать использовать данный скомпрометированный набор PMI + Rx для формирования луча до тех пор, пока в дальнейшем не будет выбран другой набор, что происходит один раз за 40 мс, несмотря даже на значительное ухудшение SINR за этот период.

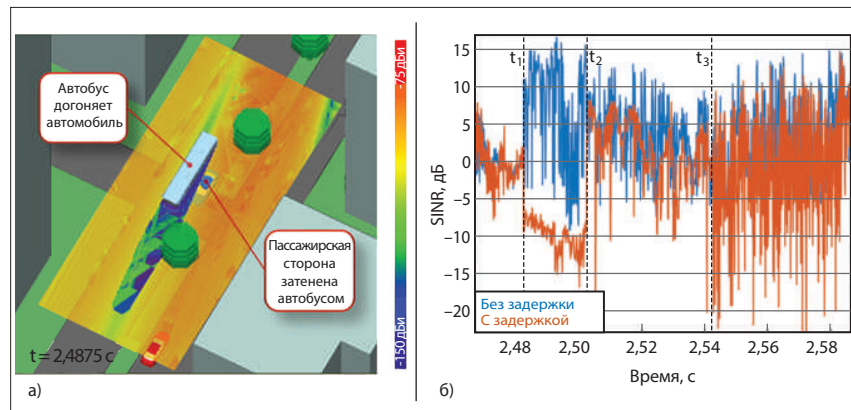
В случае оценки канала на основе SRS расхождение между измеренной

и фактической CSI возрастают из-за непрерывного изменения канала между измерениями SRS. Пример этого показан на рис. 4б, где на верхней панели представлена величина фактического усиления канала в полосе пропускания  $\approx 100$  МГц (при разнесении поднесущих 60 кГц) как функция времени. Этот CSI выбирается и сохраняется базовой станцией (средняя панель) один раз на слот, где один слот = 14 символов = 250 мкс. В течение одного слота ошибка между сохраненной и фактической CSI непрерывно растет от нуля. На рис. 4 показан CSI для Rx со стороны водителя к репрезентативному элементу mMIMO в течение 40 мс, начиная с  $t = 2,5$  с.

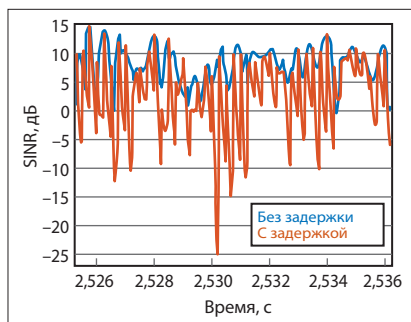
Явные примеры ухудшенного SINR в результате каждого рассмотренного выше варианта легко найти в моделировании. Например, на рис. 5 показано SINR (красный график на рис. 5б) для потока данных по каналу № 4 за период, который включает момент ( $t_1 = 2,483$  с), когда Rx со стороны пассажира быстро затеняется автобусом. До этого момента при  $t_0 = 2,463$  с набор PMI/Rx для потока № 4 был выбран для включения приемника Rx на стороне пассажира. Однако когда этот Rx затеняется в момент времени  $t_1$ , SINR значительно ухудшается по сравнению с тем, которое могло бы быть достигнуто, если бы аналоговые и цифровые лучи были сформированы на основе мгновенных измерений канала (синяя кривая).

В этом случае, когда задержка игнорируется, PMI/Rx устанавливает выбранное в момент времени  $t_1$  для потоков № 3 и № 4 переключение на использование приемника Rx на стороне водителя, имеющих прямую видимость с базовой станцией. В реалистичном случае, с учетом задержки, базовая станция продолжает попытки формировать лучи для Rx на стороне пассажира до тех пор, пока наборы PMI/Rx не обновятся после пакета SSB в  $t_2 = 2,503$  с.

Например, на рис. 5а показана попытка базовой станции сформировать луч на стороне приемника Rx пассажира



▲ Рис. 5. Сценарий управления (а) с ухудшением SINR из-за временной задержки на этапе аналогового формирования луча диаграммы направленности (б)



▲ **Рис. 6.** Ухудшение SINR из-за задержки на этапе цифрового формирования луча

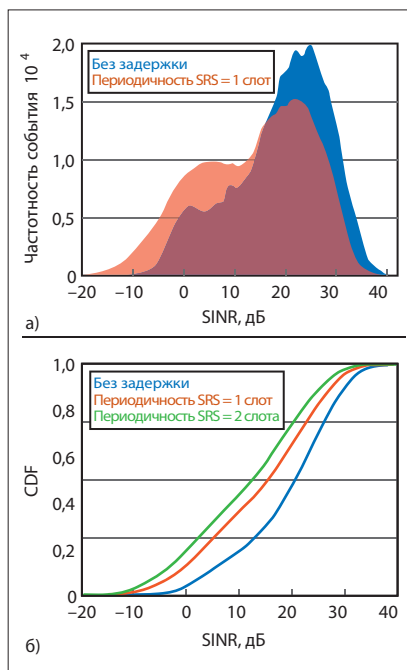
в момент времени между  $t_1$  и  $t_2$ , даже если он в этот период затенен. Фактически даже в момент  $t_2$  обновленный активный набор Rx все еще содержит один из Rx на стороне пассажира, потому что уровень сигнала, записанный для этого Rx, был измерен во время пакета SSB непосредственно перед его затенением в  $t_1$ . Таким образом, только когда наборы PMI/Rx обновляются снова в  $t_3 = 2,543$  с, оба Rx на стороне пассажира исключаются из активного набора приемников.

Типичная временная последовательность, демонстрирующая ухудшенное SINR из-за задержки в оценке канала на основе SRS, показана на рис. 6. Красная кривая отображает SINR для потока № 3, связанного с Rx на стороне водителя. Этот SINR периодически изменяется от большого значения сразу после каждого измерения SRS до низкого значения непосредственно перед ее последующим измерением. Периодическое ухудшение SINR — результат разницы между фактическим CSI и CSI, периодически фиксируемым базовой станцией, как это показано на рис. 4б. Для сравнения: синяя кривая на рис. 6 показывает значение SINR, которое было бы достигнуто, если бы базовая станция все время использовала фактическое значения CSI для формирования луча, то есть игнорируя задержку.

### ИТОГОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы измерить общее влияние задержки на формирование диаграммы направленности для рассматриваемого здесь сценария eMBB, SINR для описанного выше сценария, который включает задержку на основе стандартов 5G NR, сравнивается с тем же сценарием, но без учета влияния задержки. То есть выполняется выбор набора PMI/Rx, а для формирования луча на каждом временном шаге используется текущее значение CSI. SINR для обоих сценариев вычисляются между  $t = 22,5$  мс и  $3,5$  с с шагом по времени 25 мкс. По истечении последнего шага  $3,5$  с приемник пользователя сильно затеняется.

Гистограмма результатов по всем четырем потокам данных показана на рис. 7а.



▲ **Рис. 7.** Влияние задержки на формирование луча: гистограмма по четырем потокам данных (а) и соответствующие функции CDF (б)

Соответствующие кумулятивные функции распределения (cumulative distribution function, CDF) показаны на рис. 7б, где добавлен дополнительный результат CDF для сценария, в котором измерения SRS выполняются один раз в два слота. Среднее значение SINR составляет 20,5; 15,4 и 12,4 дБ для случая, который игнорирует задержку, и случаев, которые включают все эффекты задержки, но используют периодичность SRS в один и два слота соответственно. Таким образом, комбинированные эффекты задержки, включая выбор набора PMI/Rx и измерения CSI, приводят к ухудшению среднего SINR на 5,1 дБ, когда используется периодичность SRS в один слот, и на 8,1 дБ для периодичности SRS в два слота.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доступ к широкой полосе пропускания, предоставляемой миллиметровыми волнами (mmWaves), требует использования методов адаптивного управления лучом с учетом ухудшения характеристик в мобильной среде из-за задержки. Чтобы оценить влияние на производительность для реалистичных сценариев, в статье приведен вариант использования eMBB в динамическом городском сценарии с помощью моделирования трассировки лучей, что позволило предоставить для анализа зависимость от времени детерминированную модель канала.

Влияние одной задержки, оцениваемое здесь, может быть значительным, приводя к потере 5–8 дБ в SINR для реально возможных параметров среды. Количественное влияние других эффектов мобильности на канал связи, таких как

доплеровские сдвиги, которые вводят ICI, здесь не учитывались, но они будут еще больше ухудшать характеристики канала. Тем не менее все основные эффекты могут быть рассчитаны детерминированно с использованием в качестве входных данных зависимых от времени CIR, построенных на основе моделирования трассировки лучей. Моделирование трассировки лучей может обеспечить основу для точной оценки производительности канала в мобильной среде, включая все эффекты, снижающие качество обслуживания. ●

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kenneth M. O'Hara. *mmWave Beamforming in Dynamic, Urban Environments*. [www.microwavejournal.com/articles/37112-mmwave-beamforming-in-dynamic-urban-environments](http://www.microwavejournal.com/articles/37112-mmwave-beamforming-in-dynamic-urban-environments)
2. Рентюк В. 5G и миллиметровые волны//СВЧ-электроника. 2019. № 4.
3. Рентюк В. От структуры сигналов к ММО: пять важных моментов для понимания проблем 5G New Radio//Беспроводные технологии. 2020. № 1.
4. Дурнан Г., Анусич З., Ахмед Абдулрахман М. С. Перевод и дополнения: Рентюк В. Требования к широкополосным усилителям мощности, используемым в mMIMO-приложениях//СВЧ-электроника. 2020. № 2.
5. Wireless InSite 3D Wireless Prediction Software. [www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software](http://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software)
6. Константинов А., Пивак А. Анализ процедуры тестирования базовых станций на соответствие стандарту 5G NR//Беспроводные технологии. 2020. № 2.
7. *Physical Channels and Modulation*. Release 15, 3GPP TS 38.211, V.15.4.0, January 2019.
8. *Multiplexing Channel Coding*. Release 15, 3GPP TS 38.212, V.15.4.0, January 2019.
9. *Physical Layer Procedures for Control*. Release 15, 3GPP TS 38.213, V.15.4.0, January 2019.
10. *Success with 5G Communications Using 'Vehicle Glass Mounted Antenna' for 5G Connected Car*. GC Incorporated and NTT DOCOMO Incorporated, July 2018. [www.agc.com/en/news/detail/1197413\\_2814.html](http://www.agc.com/en/news/detail/1197413_2814.html)
11. Peel C. B., Hochwald B. M., Swindlehurst A. L. *A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multiantenna Multiuser Communication — Part I: Channel Inversion and Regularization*//IEEE Transactions on Communications. 2005, Vol. 53. No. 1.
12. Clarke R. H. *A Statistical Theory of Mobile Radio Reception*//The Bell System Technical Journal. July-August 1968. Vol. 47.No. 6,
13. Jakes W. C. *Microwave Mobile Communications*. Wiley, New York, 1974.
14. Wang T., Proakis J. G., Masry E., Zeidler J. R. *Performance Degradation of OFDM Systems Due to Doppler Spreading*//IEEE Transactions on Wireless Communications. June 2006. Vol. 5. No. 6.
15. *Radio Resource Control Protocol Specification*. Release 15, 3GPP TS 38.331, V.15.4.0, January 2019.