

Автоматизированный комплекс для измерения пространственно-временных характеристик канала беспроводной связи в замкнутых помещениях

Р. Ф. Халиуллин[✉], А. И. Сулимов

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Институт физики, Казань, Россия

[✉] sven456634@gmail.com

Аннотация. Представлен автоматизированный программно-аппаратный комплекс зондирования и измерения пространственно-временных характеристик многолучевых радиоканалов малой протяженности в условиях замкнутых помещений. Посредством сверхширокополосного зондирования для тестового помещения размером 6 × 7 м измерены частотные и импульсные характеристики канала беспроводной связи, а также функции их пространственной корреляции. Измерения проведены для диапазонов частот 2.0...3.0 и 5.3...6.3 ГГц в условиях наличия и отсутствия прямой видимости (LoS/NLoS) в 1680 пространственных точках, равномерно распределенных по площади 1200 × 1200 мм. Измеренные частотные характеристики канала выявили наличие частотно-селективных замираний глубиной до 30 дБ. Измеренные импульсные характеристики канала выявили доминирующий компонент прямой видимости с задержкой 8...10 нс и многочисленные переотражения с задержками до 40 нс, что согласуется с геометрией тестового помещения. Построены трехмерные карты пространственной корреляции характеристик канала, при переходе от условий LoS к NLoS наблюдалось снижение коэффициента пространственной корреляции на 15–25 %.

Ключевые слова: беспроводная связь, многолучевой эффект, частотно-селективные замирания, импульсная характеристика канала, пространственная корреляция, системы MIMO

Для цитирования: Халиуллин Р. Ф., Сулимов А. И. Автоматизированный комплекс для измерения пространственно-временных характеристик канала беспроводной связи в замкнутых помещениях // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 6. С. 5–17. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-5-17.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» Казанского (Приволжского) федерального университета.

Original article

Automated Measurements Setup for Investigating Space-Temporal Characteristics of Indoor Wireless Channels

R. F. Khaliullin[✉], A. I. Sulimov

Kazan Federal University, Institute of Physics, Kazan, Russia

[✉] sven456634@gmail.com

Abstract. An automated hardware-software system for probing and measuring the spatiotemporal characteristics of short-range multipath radio channels in indoor environments is presented. Using ultra-wideband channel sounding in a test room of approximately 6 × 7 m square, the frequency and impulse responses of the wire-

less channel as well as their spatial correlation functions were measured. Measurements were performed in the 2.0...3.0 and 5.3...6.3 GHz frequency bands under line-of-sight (LoS) and non-line-of-sight (NLoS) conditions at 1680 spatial observation points uniformly distributed over a 1200 × 1200 mm area. The measured frequency re-sponses revealed frequency-selective fading with depths of up to 30 dB. The measured impulse responses identified a dominant line-of-sight component with a delay of 8...10 ns and numerous reflections with delays of up to 40 ns, consistent with the geometry of the test room. Three-dimensional spatial correlation maps of the channel characteristics were constructed; the transition from LoS to NLoS conditions resulted in a 15–25 % reduction in the spatial correlation coefficient.

Keywords: wireless communications, multipath propagation, frequency-selective fading, channel impulse response, spatial correlation, MIMO systems

For citation: Khaliullin R. F., Sulimov A. I. Automated Measurements Setup for Investigating Space-Temporal Characteristics of Indoor Wireless Channels // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 6. P. 5–17. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-6-5-17.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Funding: The work was carried out at the expense of the Priority-2030 Strategic Academic Leadership Program at Kazan Federal University.

Введение. Современные системы беспроводной связи начиная с пятого поколения предъявляют высокие требования к точности оценки характеристик канала. В частности, технологии массивного MIMO (Multiple Input Multiple Output) опираются на динамическое адаптивное формирование диаграммы направленности антенн с пространственным мультиплексированием абонентов, что требует знания не только временных и частотных, но и пространственных характеристик канала [1], [2]. Ввиду малой протяженности радиотрассы, задача особенно усложняется в условиях замкнутых помещений, где необходимое временное разрешение при обработке тестовых пилотных сигналов достигает 1 нс, что требует применения специализированных измерительных комплексов с прецизионным позиционированием антенн. Современные методы исследования каналов систем связи 5G сочетают использование векторных анализаторов цепей (ВАЦ) с виртуальными фазированными антенными решетками (ВФАР) [1]. При этом существующие экспериментальные исследования в диапазоне 2...6 ГГц преимущественно ограничены малой полосой частот зондирования (до 50 МГц), что не позволяет проводить комплексные исследования пространственной корреляции смежных каналов и спектральной эффективности систем MIMO, функционирующих в замкнутых помещениях.

Помимо этого, теоретический анализ и оптимизация систем MIMO основывается на применении мощных математических моделей канала, учитывающих форму волнового фронта радиоволны и особенности статистической динамики

кластеров рассеивателей [2]. Однако такие модели в основном опираются на недостаточно обоснованные теоретические предположения и нуждаются в экспериментальной верификации, особенно для замкнутых помещений, в которых в диапазоне частот до 6 ГГц многолучевой эффект выражен особенно ярко в силу малой дальности распространения.

Известные экспериментальные работы по сверхширокополосному зондированию каналов в помещениях можно условно разделить на два направления. К первому относятся исследования, выполненные в миллиметровом диапазоне длин волн. В [3] проведены измерения в диапазонах 2...4, 14...16 и 28...30 ГГц в условиях прямой видимости (LoS) и затенения (O-LoS) с использованием ВАЦ и равномерной кольцевой ВФАР. Авторы получили профили мощность–угол–задержка для парциальных лучей и установили, что за счет диффузного рассеяния на нижних частотах наблюдается более богатая многолучевая картина. Вместе с тем, анализ пространственной корреляции канала не проводился.

Масштабные измерения каналов массивного MIMO в помещении офисного типа на частотах 11, 16, 28 и 38 ГГц выполнены в [4] с использованием ВАЦ и прямоугольных ВФАР размером от 51 × 51 до 121 × 121 элементов. Свойства пространственной взаимной корреляции на частотах 11 и 38 ГГц исследованы в [5], где показано, что корреляционные функции существенно зависят от направления разнесения антенн и быстрее спадают на более высоких частотах. В [6] выполнены измерения характеристик канала в помещении больших размеров на частоте 26 ГГц.

Ко второму направлению относятся исследования в диапазоне частот до 6 ГГц. В частности, пространственная корреляция в системах распределенного MIMO формата 7×7 исследована в [7] на частоте 3.52 ГГц в полосе зондирования 40 МГц. Установлено, что корреляция может быть значительной даже при разнесениях антенн до 7 м, особенно в помещениях коридорного типа. В [8] пространственная корреляция исследована в помещениях промышленного типа на частоте 2.61 ГГц. На передатчике использовалась 64-элементная планарная ФАР, на приеме – мобильные роботы. Показано, что при разнесениях более 1 м корреляция пренебрежимо мала. К сожалению, исследования [7], [8] характеризуются ограниченным числом точек измерения и недостаточно плотной пространственной дискретизацией, которая необходима для построения детальных карт корреляции.

Анализ рассмотренных публикация [3]–[8] позволяет выявить следующие пробелы. Во-первых, подавляющее число исследований массивного MIMO выполнено либо в миллиметровом диапазоне длин волн [4]–[6], либо на одной несущей частоте с малой полосой зондирования [7], [8] для интересующего нас диапазона до 6 ГГц. В известных публикациях практически не представлен сравнительный анализ характеристик канала в двух различных поддиапазонах 2...6 ГГц при сверхширокополосном (1 ГГц) зондировании канала. Во-вторых, отсутствуют работы, сочетающие результаты плотной пространственной дискретизации (более 1000 точек) на площади порядка 1.5 м^2 с шагом, сопоставимым с длиной волны, с построением трехмерных карт пространственной корреляции. В-третьих, недостаточно полно освещены вопросы проектирования автоматизированных измерительных комплексов, сочетающих возможности ВАЦ с прецизионной системой позиционирования антенн.

Целью данной статьи служит разработка и реализация методики экспериментального пространственно-распределенного измерения импульсной характеристики многолучевого радиоканала в диапазоне частот 0.9...8.0 ГГц с временным разрешением до 1 нс в условиях замкнутых помещений для радиотрасс протяженностью менее 10 м. Цель достигается использованием ВАЦ, обеспечивающего когерентное сверхширокополосное зондирование канала методом последовательной перестройки частоты.

К основным результатам относится разработка автоматизированного измерительного стенда с системой двухкоординатного прецизионного (ошибка не более 0.04 мм) позиционирования антенн с микрошаговым управлением. В отличие от систем [4]–[6], стенд обеспечивает проведение измерительных циклов продолжительностью до нескольких часов без участия оператора с произвольным шагом пространственной дискретизации и оптимизирован для диапазона частот 2...6 ГГц. Разработано программное обеспечение для многопоточной обработки и комплексного анализа измеренных данных с временным стробированием и пространственной привязкой к точке измерения. Проведены экспериментальные исследования пространственно-временных характеристик радиоканала в тестовом помещении размерами $6 \times 7 \text{ м}$ в диапазонах частот 2.5 и 5.8 ГГц для условий LoS/NLoS, получены количественные оценки радиуса корреляции. На основании измерений в 1680 точках, распределенных по площади $1200 \times 1200 \text{ мм}$, построены трехмерные карты корреляции отклика канала. Установлено, что при переходе от условий LoS к NLoS (отсутствие прямой видимости) коэффициент корреляции снижается на 15–25 %.

Статья организована следующим образом. Первая ее часть содержит описание аппаратной части измерительного комплекса. Во второй части рассмотрена методика обработки измеренных данных, в третьей представлены результаты проведенных экспериментов. Заключение обобщает главные результаты и намечает направления дальнейших исследований.

Измерительный комплекс. Система двухкоординатного позиционирования антенны. Измерение пространственно-временных характеристик радиоканала в замкнутых помещениях требует аккуратного и воспроизводимого размещения передающей антенны в наборе заданных точек пространства $\{\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n\}$. Кроме того, для поддержания фиксированного объема выборки желательна надежная синхронизация системы позиционирования с радиочастотным измерительным трактом. Указанным требованиям удовлетворяла автоматизированная система позиционирования, использованная в [9]. В рамках настоящей статьи данная система была существенно модифицирована и адаптирована для решения задач по зондированию радиотрассы малой протяженности. Модернизация затронула обеспечение совместной работы с ВАЦ, разра-

ботку специализированного программного обеспечения для управления процессом измерений и обработки измеренных данных.

Система автоматического перемещения и установки передающей антенны представляет собой несущий каркас из анодированных алюминиевых профилей с длиной направляющих 1500 мм. Перемещение вдоль координатных осей X и Y осуществляется шаговыми двигателями стандарта NEMA 17 с удерживающим моментом $0.4 \text{ Н} \cdot \text{м}$ посредством зубчато-ременных передач. Опытная оценка точности позиционирования показала, что фактическое среднеквадратичное отклонение положения каретки от заданных координат составляет не более 0.04 мм , что составляет не более 0.1% от длины волны в целевых частотных диапазонах зондирования $2 \dots 6 \text{ ГГц}$. Все металлические компоненты конструкции гальванически соединены между собой и подключены к общей шине заземления измерительного комплекса для минимизации влияния паразитных помех и сторонних наводок на результаты измерений. Шаговые двигатели управляются отдельным микроконтроллером на базе ATmega328P с загруженной микропрограммой GRBL версии 1.1. Взаимодействие микроконтроллера с управляющей ЭВМ осуществляется через последовательный интерфейс UART, который эмулируется USB-соединением посредством интегральной микросхемы-преобразователя CH340G со скоростью передачи данных 115.2 Кбод . В процессе отладки системы были эмпирически определены следующие рабочие параметры: скорость перемещения антенны – 1000 мм/мин ($\sim 16.7 \text{ мм/с}$), линейное ускорение – не более 25 мм/с^2 .

Подсистема радиочастотных измерений и синхронизации. Измерение характеристик канала связи осуществляется методом сверхширокополосного зондирования с последовательной перестройкой частоты. Центральным элементом установки служит векторный анализатор цепей Rohde & Schwarz ZVA8, рабочий диапазон частот которого охватывает полосу от 300 КГц до 8 ГГц . Прибор позволяет регистрировать матрицу комплексных S -параметров исследуемого радиоканала, на основе которой восстанавливается его передаточная частотная функция $H(f)$ и, посредством обратного дискретного преобразования Фурье, импульсный отклик $h(\tau)$ [10], [11].

Помимо ВАЦ, в измерительную установку входят следующие компоненты:

- коаксиальная линия передачи длиной $L = 11.77 \text{ м}$, вносящая групповую задержку $\tau_{\text{каб}} = 49 \text{ нс}$, предназначенная для соединения портов анализатора с антеннами;

- два комплекта полуволновых дипольных антенн: первый комплект настроен на резонансную частоту 2.5 ГГц и работает в полосе $2.0 \dots 3.0 \text{ ГГц}$, второй – на частоту 5.8 ГГц с рабочей полосой $5.3 \dots 6.3 \text{ ГГц}$. Для обоих комплектов антенн коэффициент усиления составляет $G = 3 \text{ дБи}$ при КСВ (коэффициент стоячей волны) не более 2;

- металлический экран из фольгированного стеклотекстолита (толщина медного слоя 350 мкм) с апертурой $0.4 \times 0.4 \text{ м}$ для реализации условий распространения в отсутствии прямой видимости (NLoS);

- комплект коаксиальных адаптеров SMA(f)–SMA(f) и N(m)–SMA(m), обеспечивающих механическое и электрическое сопряжение элементов радиочастотного тракта.

Дистанционное управление ВАЦ осуществляется посредством интерфейса Ethernet по протоколу TCP/IP; обмен командами выполняется в соответствии со спецификацией SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) на основе программной архитектуры VISA (Virtual Instrument Software Architecture). Совокупность параметров, задающих режим работы ВАЦ, приведена в табл. 1.

Табл. 1. Параметры конфигурации векторного анализатора цепей

Tab. 1. Vector network analyzer configuration parameters

Параметр	Значение
Диапазон зондирующих частот, ГГц	(2...3)/(5.3...6.3)
Количество зондирующих поднесущих частот N	1601
Шаг дискретизации поднесущих по частоте Δf , кГц	625
Ширина полосы прозрачности фильтра промежуточной частоты, кГц	1
Уровень мощности на выходе передающего порта P , дБм	-10/+10
Число циклов когерентного усреднения измерений, n	3
Закон перестройки частоты	Линейный

Важной задачей при осуществлении измерений служит согласование во времени работы механической подсистемы перемещения антенны и радиочастотного тракта. Последнее реализовано следующим образом: после установки антенн в

нужную позицию управляющий микроконтроллер переходит в состояние готовности («Idle»), программно вводится принудительная пауза длительностью $T_{ож} = 0.5$ с, по истечении которой инициируется цикл зондирования канала.

Управляющее программное обеспечение комплекса реализовано на языке Python 3 с использованием библиотек NumPy и SciPy. Программный модуль контроля отвечает за формирование и передачу команд контроллеру позиционирования антенны по последовательному интерфейсу UART. Модуль интерфейса осуществляет взаимодействие управляющей ЭВМ с ВАЦ, транслируя высокоуровневые запросы в набор команд. Численная обработка результатов измерений включает в себя расчет импульсных характеристик и оценку статистических параметров канала. Управление экспериментом выполняется по локальной компьютерной сети посредством графического веб-интерфейса оператора, реализованного на базе фреймворка Streamlit. Поскольку полный цикл измерений может занимать до нескольких часов, в программном обеспечении реализована многопоточная модель исполнения, распараллеливающая потоки ввода-вывода и вычислительной обработки данных. После каждого цикла зондирования измеренные данные сохраняются в файл формата JSON с иерархической структурой, что гарантирует возможность возобновления эксперимента в случае его непредвиденного прерывания.

Обработка и анализ измеренных данных.

Первичные данные, регистрируемые векторным анализатором цепей, представляют собой массив комплексных значений S -параметров канала $S_{21}(f_i, r_i)$ для каждой комбинации зондирующей поднесущей f_i и пространственной координаты измерительной антенны \bar{r}_i . Оценка импульсной характеристики выполняется путем применения обратного преобразования Фурье к измеренной частотной характеристике канала [10], [11]:

$$h(\tau) = \sum_i^N S_{21}(f_i, \bar{r}_i) e^{j2\pi f_i \tau}, \quad (1)$$

где τ – временная задержка парциальной компоненты. Временное разрешение определяется шириной полосы зондирования B по формуле $\delta t = 1/B$. Для рабочих диапазонов частот 2.0...3.0 и 5.3...6.3 ГГц с шириной полосы $B = 1$ ГГц, обеспечивает временное разрешение $\delta t = 1$ нс и

соответствующее пространственное разрешение $c\Delta t = 0.3$ м, где c – скорость света; Δt – минимальная разность времен задержек парциальных компонент сигнала.

Особое внимание уделялось оценке пространственной корреляционной структуры отклика канала. Знание радиуса пространственной когерентности поля имеет принципиальное значение для проектирования систем с пространственно-распределенными антенными кластерами (систем ММО). Импульсные характеристики канала $h(\tau, \bar{r}_1)$ и $h(\tau, \bar{r}_2)$, измеренные в двух близких точках пространства, обладают сильной корреляцией. Однако с увеличением разнесения $\Delta r = |\bar{r}_2 - \bar{r}_1|$ наблюдаемая временная и угловая структура многолучевого отклика начинает различаться. Для каналов с гауссовской статистикой степень зависимости импульсных характеристик канала в двух разнесенных антеннах исчерпывающе описывается нормированным коэффициентом взаимной корреляции [12]. Пусть $h(\bar{r})$ обозначает импульсную характеристику канала, если передающая антенна размещена в точке \bar{r} . Тогда коэффициент пространственной корреляции определяется следующим образом:

$$\rho(\bar{r}_1, \bar{r}_2) = \frac{E\{(h(\bar{r}_1) - \bar{h}(\bar{r}_1))(h(\bar{r}_2) - \bar{h}(\bar{r}_2))\}}{\sqrt{E\{|h(\bar{r}_1) - \bar{h}(\bar{r}_1)|^2\}} E\{|h(\bar{r}_2) - \bar{h}(\bar{r}_2)|^2\}},$$

где $E\{\cdot\}$ – оператор статистического усреднения.

В ходе экспериментов наблюдалась зависимость коэффициента корреляции ρ от разнесения $(\bar{r}_2 - \bar{r}_1)$ антенн как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Эксперимент и результаты. План эксперимента. Проверка работоспособности разработанного измерительного комплекса и корректности методов обработки измеренных данных проводилась в тестовом лабораторном помещении размерами 5.83 × 6.81 м. План эксперимента схематично изображен на рис. 1. Измерения выполнялись в двух частотных диапазонах: 2.0...3.0 ГГц (центральная частота 2.5 ГГц, полоса зондирования $B = 1$ ГГц) и 5.3...6.3 ГГц (центральная частота 5.8 ГГц, полоса зондирования $B = 1$ ГГц) как в режиме прямой видимости между антеннами (LoS = Line-of-Sight), так и в отсутствии прямой видимости (NLoS = Non-Line-of-Sight).

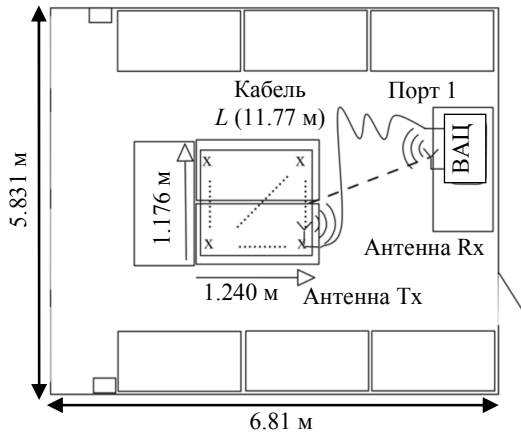


Рис. 1. План эксперимента: Tx – передающая антенна; Rx – приемная антенна; ZVA8 – векторный анализатор цепей; черная рамка – система позиционирования антенны
Fig. 1. Test setup: Tx is transmitter antenna; Rx – receiver antenna; ZVA8 – vector network analyzer; black rectangle – antenna positioning system

Передающая антенна Tx, установленная на каретке автоматизированной системы позиционирования, перемещалась в горизонтальной плоскости, сканируя область размером 1240×1176 мм с шагом 30 мм ($\sim 0.25\lambda$ на частоте 2.5 ГГц и $\sim 0.58\lambda$ на частоте 5.8 ГГц), где λ – длина волны в свободном пространстве на соответствующей частоте. Сканирование обеспечило получение $K = 40 \times 42 = 1680$ пространственных точек измерения импульсной характеристики канала. Средняя длина радиотрассы (относительно центра рамки) составляла 3.0 м. В каждой точке размещения Tx-антенны зондирование выполнялось в течение 5 с, когда осуществлялась последовательная перестройка по $N = 1601$ поднесущим частотам. Общая продолжительность одного полного цикла измерений составляла приблизительно 2.5 ч.

Частотные и импульсные характеристики канала. На рис. 2 представлены примеры амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристик канала, измеренных на $N = 1601$ поднесущих в диапазоне 2.0...3.0/5.3... 6.3 ГГц. Измеренные частотные характеристики выявляют наличие частотно-селективных замираний, что свойственно многолучевому характеру распространения сигнала.

Анализ АЧХ в диапазоне 2.0...3.0 ГГц (рис. 2, а, врезка 2460...2550 МГц) выявляет следующие характерные особенности. Средний уровень амплитуды передаточной функции канала варьируется приблизительно от -45 до -50 дБ в области плато (2200...2800 МГц), что согласуется с суммарными потерями на радиотрассе длиной 3.0 м. Наблюдаются выраженные частотно-селективные замирания глубиной до 25...30 дБ относительно среднего уровня, наиболее глубокие из которых локализованы на частотах 2050 МГц (до -91 дБ), 2100 МГц (до -85 дБ) и 2850 МГц (до -80 дБ). Неравномерность АЧХ в полосе 2200...2700 МГц не превышает 8...10 дБ, что указывает на умеренную частотную селективность канала в данном поддиапазоне. Спад уровня мощности на краях рабочей полосы (ниже 2100 МГц и выше 2850 МГц) обусловлен частотными свойствами используемых антенн.

Фазочастотная характеристика (рис. 2, а) демонстрирует приблизительно линейный набег фазы с периодическими скачками на $\pm 180^\circ$ в точках глубоких амплитудных замираний. На врезке, охватывающей диапазон 2460...2550 МГц, отчетливо видна пилообразная структура ФЧХ с периодом приблизительно 12...15 МГц, что соответ-

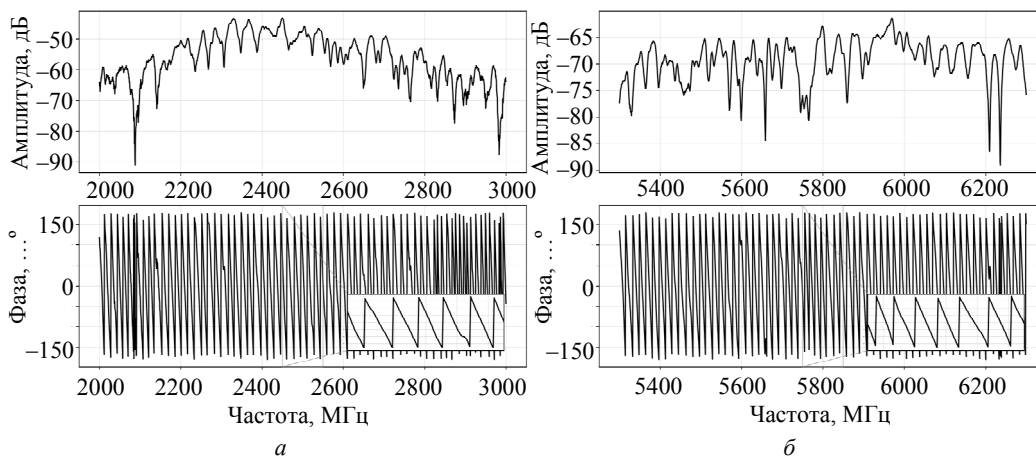


Рис. 2. Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики радиоканала при разных диапазонах, ГГц: а – 2.0...3.0; б – 5.3...6.3

Fig. 2. Amplitude-frequency and phase-frequency responses of the radio channel for different frequency bands, GHz: а – 2.0...3.0; б – 5.3...6.3

стует интервалу между соседними нулями интерференционной картины двух доминирующих лучей с разностью хода $\Delta d \approx \frac{c}{\Delta f} \approx 20 - 25$ м, где

Δf – интервал между нулями интерференционной картины, МГц. Данное значение согласуется с геометрией тестового помещения, задержкой антенного кабеля и характерными длинами путей переотражений от стен.

Частотные характеристики канала, измеренные в диапазоне 5.3...6.3 ГГц (см. рис. 2, б), демонстрируют аналогичную картину, но с некоторыми количественными отличиями. В частности, средний уровень амплитуды передаточной функции снизился до –63...–70 дБ, что отражает факт увеличения потерь на трассе на 15...20 дБ при переходе от диапазона 2.5 ГГц к диапазону 5.8 ГГц, обусловленное более высоким поглощением в материале стен и перегородок. Глубина частотно-селективных замираний составила до 15...25 дБ; наиболее глубокие замирания зафиксированы на частотах 5750 МГц (до –85 дБ) и 6250 МГц (до –89 дБ). Плотность замираний (число провалов на единицу полосы частот) также увеличилась, что свидетельствует о более сложной интерференционной картине отклика канала с большим числом значимых лучей.

Анализ ФЧХ в диапазоне 5.8 ГГц (рис. 2, б, врезка 5760...5840 МГц) обнаруживает более сложную нерегулярную структуру по сравнению с диапазоном 2.5 ГГц. Период пилообразных осцилляций фазы составляет приблизительно 8...12 МГц, что указывает на увеличение числа значимых переотражений с различными задержками. Нерегулярность ФЧХ, особенно заметная вблизи глубоких амплитудных замираний, по-видимому, является следствием наложения не-

скольких лучей сопоставимой мощности, конкурирующих за доминирование в результирующей интерференционной картине.

На рис. 3 представлены эмпирические импульсные характеристики канала $h(t)$ для обоих частотных диапазонов зондирования, вычисленные по формуле (1). Импульсная характеристика (ИХ) получена путем применения обратного быстрого преобразования Фурье (IFFT) к измеренным комплексным передаточным частотным характеристикам $S_{21}(f)$ с последующей нормировкой амплитуды на максимальное значение.

Импульсная характеристика канала в диапазоне 2.0...3.0 ГГц (кривая 1 на рис. 3) содержит ярко выраженный доминирующий луч с задержкой $\tau_1 \approx 8...9$ нс, которая соответствует суммарной длине пути распространения зондирующего сигнала вдоль луча прямой видимости и кабельных трактов. Вслед за основным пиком наблюдается серия вторичных максимумов с амплитудами 0.50...0.55 (при $\tau \approx 10...11$ нс), 0.30...0.35 (при $\tau \approx 12...13$ нс) и 0.10...0.12 (при $\tau \approx 15...20$ нс), обусловленных переотражениями от стен, пола и потолка помещения. Отчетливо выделяется группа парциальных компонент с задержками $\tau \approx 33...40$ нс и амплитудами 0.10...0.22, которые соответствуют двукратному отражению от противоположных стен. Такой вывод сделан на основании сопоставления дополнительной длины пути $\sim 7.5...9.6$ м этих компонент и геометрических размеров помещения. Эффективное расширение импульсной характеристики (интервал, содержащий 90 % энергии отклика) составляет приблизительно 45...50 нс.

Общая структура импульсной характеристики канала в диапазоне 5.3...6.3 ГГц (кривая 2 на рис. 3) повторяет кривую импульсной характери-

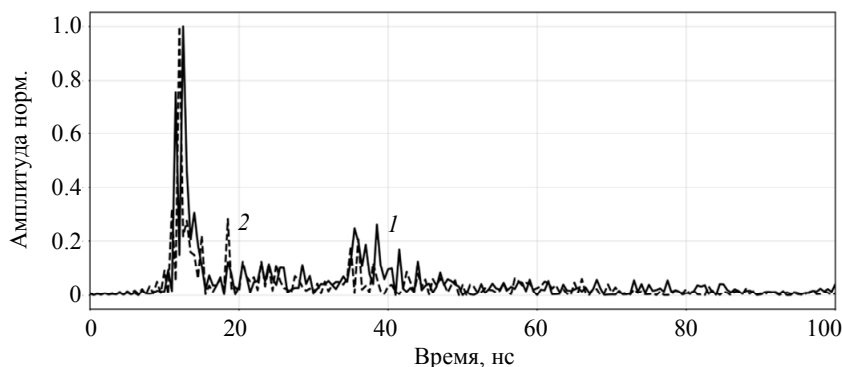


Рис. 3. Нормированная импульсная характеристика радиоканала в диапазоне частот, ГГц: 1 – 2.0...3.0; 2 – 5.3...6.3

Fig. 3. Normalized impulse response of radio channel GHz band: 1 – 2.0...3.0; 2 – 5.3...6.3

стики в диапазоне 2.0...3.0 ГГц, но с рядом количественных отличий. При той же полосе зондирования ($B = 1$ ГГц) и той же задержке канала доминирующий луч имеет более узкий временной профиль. Вторичные максимумы при $\tau \approx 10...25$ нс имеют более высокие амплитуды (0.12...0.20), что указывает на более равномерное распределение энергии между лучом прямой видимости и переотражениями. Группа вторичных переотражений с задержками $\tau \approx 33...40$ нс по-прежнему уверенно выявляется и в диапазоне 5.3...6.3 ГГц.

Пространственно-корреляционные характеристики канала. Посредством автоматического перемещения передающей антенны Tx с шагом 30 мм по заданной прямоугольной сетке местоположений размером 40×42 ($N_x = 42$ позиции вдоль продольной оси OX, $N_y = 40$ позиций вдоль поперечной оси OY) была измерена импульсная характеристика канала в $n = 1680$ точках наблюдения. Полученная сетка регистраций позволила построить детальные трехмерные карты пространственной корреляции импульсного отклика канала (рис. 4, 5), где в качестве опорной точки использовался центр сетки. Измерения были выполнены для следующих четырех комбинаций условий эксперимента: случаи LoS/NLoS, частотные диапазоны зондирования 2500/5800 МГц.

На рис. 4, а представлена трехмерная карта пространственной корреляции импульсной характеристики канала в режиме распространения LoS в диапазоне частот зондирования 2...3 ГГц (далее – диапазон 2500 МГц). Наблюдается протяженная область высокой корреляции ($\rho > 0.5$) вдоль центральной оси OY измерительной рамки,

ориентированной преимущественно в поперечном направлении (перпендикулярно линии, соединяющей передатчик и приемник). Максимальные значения коэффициента корреляции в соседних точках наблюдения ($\rho = 0.5...0.6$) сосредоточены в зоне размером приблизительно 800×400 мм вблизи опорной точки (центра системы позиционирования антенны, далее – просто центра измерительной рамки), тогда как периферийные области апертуры характеризуются значениями $\rho = 0.1...0.3$. Соблюдается приблизительная симметрия значений корреляции относительно оси радиолинии Tx-Rx, которая ориентирована под некоторым углом относительно сторон рамки.

В диапазоне зондирования 5.3...6.3 ГГц (далее – диапазоне 5800 МГц, рис. 4, б) наблюдается аналогичная картина, но с более выраженной пространственной локализацией области высокой корреляции. Максимальные значения коэффициента корреляции достигали $\rho = 0.6...0.7$ и были сосредоточены в компактной зоне размером приблизительно 500×300 мм относительно центра рамки. По сравнению с диапазоном 2500 МГц, область высокой корреляции ($\rho > 0.5$) занимала меньшую площадь, что объясняется уменьшением длины волны ($\lambda_{5800} \approx 52$ мм против $\lambda_{2500} \approx 125$ мм) и, как следствие, более быстрой пространственной декорреляцией фазы поля. Вместе с тем, в области больших разнесений от опорной точки ($|\Delta r| > 600$ мм) значения корреляции составили $\rho = 0.05...0.15$, что в 2–3 раза ниже соответствующих значений в диапазоне 2500 МГц.

В отсутствии прямой видимости (рис. 5) корреляционная структура импульсного отклика канала претерпела значительные изменения. Вместо

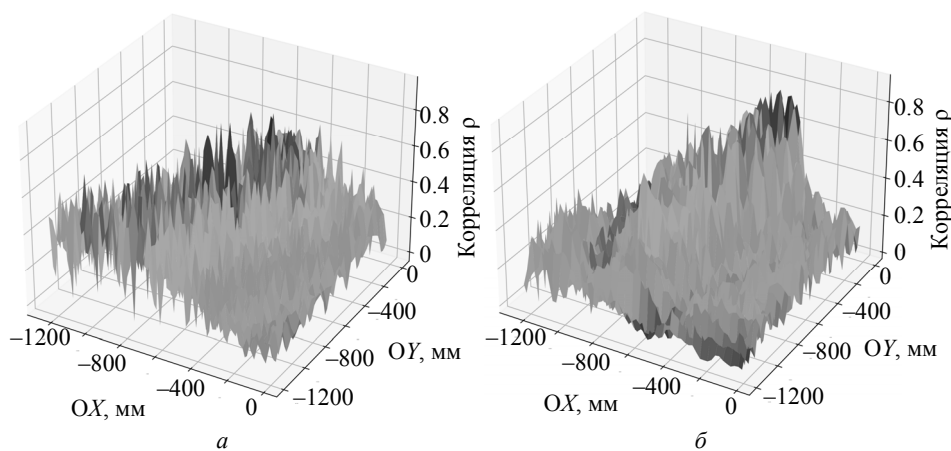


Рис. 4. Трехмерная карта пространственной корреляции импульсного отклика канала (LoS) при разных диапазонах, ГГц: а – 2.0...3.0; б – 5.3...6.3

Fig. 4. Three-dimensional spatial correlation map of the channel impulse response (LoS) for different frequency bands, GHz: а – 2.0...3.0; б – 5.3...6.3

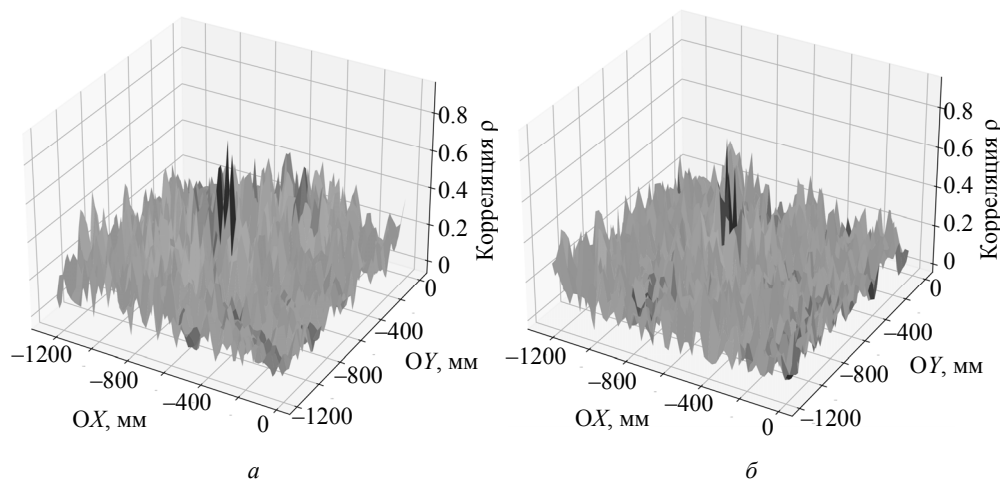


Рис. 5. Трехмерная карта пространственной корреляции импульсного отклика канала (NLoS) при разных диапазонах, ГГц: *a* – 2.0...3.0; *б* – 5.3...6.3

Fig. 5. Three-dimensional spatial correlation map of the channel impulse response (NLoS) for different frequency bands, GHz: *a* – 2.0...3.0; *б* – 5.3...6.3

протяженной области высокой корреляции (сравните с рис. 4) наблюдался локализованный пик с максимумом $\rho \approx 0.45 \dots 0.50$, окруженный зоной умеренной корреляции ($\rho = 0.2 \dots 0.35$). Характерные масштабы области значимой корреляции ($\rho > 0.3$) сократились до 400×300 мм. Кроме того, наблюдалась фрагментация корреляционной структуры с появлением множественных локальных максимумов ($\rho = 0.25 \dots 0.35$) на разнесениях $400 \dots 800$ мм от опорной точки, обусловленных переотражениями от доминирующих рассеивателей. По сравнению с режимом LoS, средний уровень корреляции по апертуре рамки снизился на 20–25 %.

Еще более выраженным оказался спад корреляции (по сравнению с режимом LoS) в диапазоне частот 5800 МГц (рис. 5, *б*). Максимальная корреляция в опорной точке (при разнесении $|\Delta r| = 30$ мм) составила всего лишь $\rho \approx 0.40 \dots 0.50$, а за пределами окрестности $|\Delta r| > 100$ мм она быстро спадала до $\rho = 0.10 \dots 0.20$. Область значимой корреляции ($\rho > 0.3$) была ограничена радиусом $150 \dots 200$ мм от опорной точки. Фоновый уровень корреляции на периферии апертюры составил $\rho = 0.05 \dots 0.15$, что близко к уровню статистической погрешности для объема выборки 1600 измерений. Столь быстрая декорреляция свидетельствует о формировании практически изотропного рассеяния в условиях тестового помещения, что благоприятно для создания систем MIMO, основанных на пространственном мультиплексировании каналов.

Для более детального количественного анализа из двумерной функции пространственной корреляции $\rho(|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|_x, |\bar{r}_2 - \bar{r}_1|_y) = \rho(\Delta x, \Delta y)$ были

выделены усредненные одномерные срезы вдоль осей OX и OY. В отличие от трехмерных карт (рис. 4, 5), где в качестве опорной использовалась центральная точка сетки, для построения одномерных срезов применялось усреднение по всем параллельным линиям измерительной сетки. Для оси OX усредненная функция корреляции вычислялась как среднее по $N_y = 40$ поперечным рядам сетки (каждый ряд содержал $N_x = 42$ точки наблюдения):

$$\rho(\Delta x) = \frac{1}{N_y} \sum_{j=1}^{N_y} \rho(\Delta x, y_j),$$

где y_j – поперечная координата j -го ряда. Аналогично, для оси OY усредненная поперечная функция корреляции вычислялась как среднее по $N_x = 42$ продольным столбцам:

$$\rho(\Delta y) = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \rho(x_i, \Delta y),$$

где x_i – продольная координата i -го столбца. На рис. 6 и 7 представлены соответствующие результаты для всех четырех комбинаций условий эксперимента. На основе полученных одномерных срезов по пороговому уровню $\rho = 0.5$ оценивался радиус корреляции.

На рис. 6 представлены усредненные кривые пространственной корреляции вдоль оси OX. В режиме LoS на частоте 2500 МГц (кривая 1 на рис. 6) пороговый уровень $\rho = 0.5$ достигался при разнесении $d_X = 300$ мм, а при максимальном разнесении $d_{X \max} = 1200$ мм корреляция составила $\rho = 0.18$. При этом в режиме NLoS на частоте

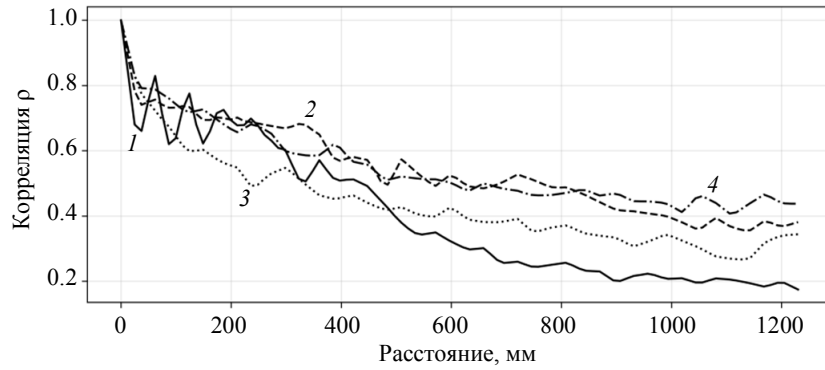


Рис. 6. Эмпирическая функция корреляции импульсного отклика канала вдоль оси OX при 2500 МГц: 1 – LoS, 2 – NLoS; при 5800 МГц: 3 – LoS, 4 – NLoS
Fig. 6. Measured spatial correlation function of channel impulse response along OX -axis for 2500 MHz: 1 – LoS, 2 – NLoS; for 5800 MHz: 3 – LoS, 4 – NLoS

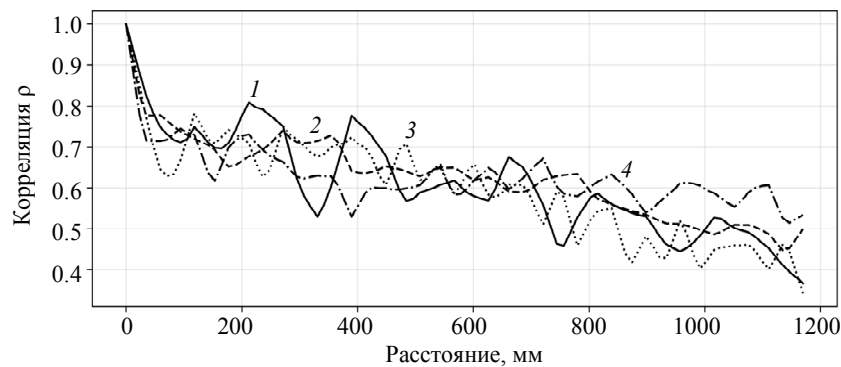


Рис. 7. Эмпирическая функция корреляции импульсного отклика канала вдоль оси OY при 2500 МГц: 1 – LoS, 2 – NLoS; при 5800 МГц: 3 – LoS, 4 – NLoS
Fig. 7. Measured spatial correlation function of channel impulse response along OY -axis for 2500 MHz: 1 – LoS, 2 – NLoS; for 5800 MHz: 3 – LoS, 4 – NLoS

те 2500 МГц (кривая 2 на рис. 6) корреляция спадала медленнее: пороговый уровень $\rho = 0.5$ достигался при $d_X = 480$ мм, а при максимальном разнесении $\rho(d_{X \max}) = 0.37$. На первый взгляд, эти результаты противоречат интуитивным представлениям, согласно которым при наличии в отклике канала детерминированной компоненты радиус корреляции должен возрастать. Однако этот эффект имеет объяснение, так как в режиме LoS луч прямой видимости создает детерминированную пространственную структуру поля с быстро осциллирующей фазой, которая и приводит к декорреляции на масштабах, сопоставимых с размерами ближней зоны. В режиме NLoS многолучевое поле принимает более диффузную конфигурацию с плавно меняющейся в пространстве огибающей.

На частоте зондирования 5800 МГц аналогичная тенденция проявлялась в еще более выраженной форме. В режиме LoS (кривая 3 на рис. 6) пороговый уровень $\rho = 0.5$ достигался при продольном разнесении $d_X = 280$ мм, а при макси-

мальном разнесении d_{\max} корреляция снизилась до $\rho = 0.30$. В режиме NLoS (кривая 4 на рис. 6) радиус корреляции составил $d_X = 370$ мм, а при максимальном разнесении значение корреляции не опускалось ниже $\rho(d_{X \max}) = 0.42$.

Усредненная функция корреляции вдоль оси OY (рис. 7) во всех случаях демонстрировала более медленный спад по сравнению с корреляцией вдоль оси OX , что служит характерным признаком канала с выраженным лучом прямой видимости. В режиме LoS на частоте 2500 МГц (кривая 1 на рис. 7) радиус корреляции составил $d_Y = 630$ мм, а при максимальном разнесении $d_{Y \max} = 1170$ мм корреляция не опускалась ниже $\rho(d_{Y \max}) = 0.38$. При этом на частоте 5800 МГц в режиме LoS (кривая 3 на рис. 7) пороговый уровень $\rho = 0.5$ достигался при $d_Y = 510$ мм, а при максимальном разнесении $\rho(d_{Y \max}) = 0.30$. В режиме NLoS на частоте 2500 МГц (кривая 2 на рис. 7) радиус корреляции составил $d_Y = 720$ мм при $\rho(d_{Y \max}) = 0.45$ на максимальном разнесе-

Табл. 2. Эмпирические оценки радиуса пространственной корреляции в условиях LoS и NLoS (порог $\rho = 0.5$)
 Tab. 2. Empirical estimates of the spatial correlation radius for LoS and NLoS conditions (threshold $\rho = 0.5$)

Параметр	LoS	NLoS	LoS	NLoS
	2500 МГц	2500 МГц	5800 МГц	5800 МГц
d_X , мм	300	480	280	370
d_Y , мм	630	720	510	560
$\rho(d_{X \max})$	0.18	0.37	0.30	0.42
$\rho(d_{Y \max})$	0.38	0.45	0.30	0.35

нии. Наконец, в режиме NLoS при 5800 МГц (кривая 4 на рис. 7) радиус корреляции достигал $d_Y = 560$ мм при $\rho(d_{Y \max}) = 0.35$. Кроме того, в режиме NLoS наблюдались характерные осцилляции с пространственным периодом 100...200 мм, обусловленные интерференцией лучей от доминирующих рассеивателей. Эмпирические оценки радиуса корреляции сведены в табл. 2.

Заключение. Разработан автоматизированный программно-аппаратный комплекс зондирования и исследования пространственно-временных характеристик канала беспроводной связи на трассах малой (менее 10 м) протяженности в условиях замкнутых помещений с временным разрешением до 1 нс. Комплекс содержит систему двухкоординатного прецизионного (погрешность не более 0.04 мм) позиционирования передающей антенны и векторный анализатор цепей, функционирующие под управлением специализированного программного обеспечения с модульной архитектурой. Многопоточная организация управляющей программы обеспечивает проведение цикла непрерывных измерений длительностью до 3 ч без участия оператора. Работоспособность комплекса продемонстрирована на примере тестового помещения размерами примерно 6×7 м.

Для тестового помещения методом сверхширокополосного зондирования в диапазонах частот 2.0...3.0 и 5.3...6.3 ГГц выполнены измерения частотных и импульсных характеристик канала в сетке 1680 пространственных точек наблюдения с шагом 30 мм. Выявлены частотно-селективные замирания глубиной до 25...30 дБ (в диапазоне

2.5 ГГц) и до 30...35 дБ (в диапазоне 5.8 ГГц). Выявленные луч прямой видимости с задержкой 8...9 нс и группа переотражений от граничных поверхностей с задержками 35...40 нс согласуются с геометрией тестового помещения. Среднеквадратичный разброс задержки парциальных лучей составлял 15...22 нс и не зависел от частотного диапазона и режима распространения сигнала (LoS/NLoS).

Построены трехмерные карты пространственной корреляции импульсного отклика канала. При переходе от условий прямой видимости к условиям ее отсутствия уровень корреляции снижался на 15–25 %. Для режима LoS оценки радиуса корреляции вдоль оси OX (по уровню $\rho = 0.5$) составили: $d_X = 300...350$ мм (на частоте 2500 МГц) и $d_X = 250...350$ мм (на частоте 5800 МГц). Радиус корреляции вдоль оси OY составлял $d_Y = 500...700$ мм. В режиме NLoS корреляция спадала медленнее, чем в режиме LoS, что, в отсутствие доминирующего луча прямой видимости, объясняется формированием диффузного поля с медленно меняющейся в пространстве огибающей.

Полученные результаты важны для разработки систем с антенными кластерами ММО в условиях замкнутых помещений. Измеренные радиусы корреляции определяют шаг разнесения антенн, обеспечивающий эффективное пространственное мультиплексирование каналов. Дальнейшее развитие разработанного комплекса ориентировано на расширение частотного диапазона в область миллиметровых волн, а также реализацию трехмерного сканирования с управляемой высотой передающей антенны.

Список литературы

1. A survey of 5G channel measurements and models / C.-X. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang, M. Zhang // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, no. 4. P. 3142–3168. doi: 10.1109/COMST.2018.2862141.

2. A general 3D non-stationary 5G wireless channel model / S. Wu, C.-X. Wang, M. Aggoune el-H., M. M. Alwakeel, X. You // IEEE Trans. on Commun. 2018. Vol. 66, no. 7. P. 3065–3078.

3. Measured wideband characteristics of indoor channels at centimetric and millimetric bands / W. Fan, I. Carton, J. Ø. Nielsen, K. Olesen, G. F. Pedersen // EURASIP J. on Wireless Commun. and Networking. 2016. Vol. 2016, no. 58. P. 1–13. doi: 10.1186/s13638-016-0548-x.

4. Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems / J. Huang, C.-X. Wang, R. Feng, J. Sun, W. Zhang, Y. Yang // IEEE J. on Selected Areas in Commun. 2017. Vol. 35, no. 7. P. 1591–1605.

5. Spatial cross-correlation properties of mmWave massive MIMO channels / R. Feng, J. Huang, J. Sun, Y. Tan, C.-X. Wang, S. Zhou // Proc. IEEE/CIC Intern. Conf. on Communications in China (ICCC). Qingdao, China: IEEE, 2017. P. 1–5.

6. On indoor millimeter wave massive MIMO channels: measurement and simulation / B. Ai, K. Guan, R.-S. He, J.-Z. Li, G.-K. Li, D. He, Z.-D. Zhong, K. M. S. Huq // IEEE J. on Selected Areas in Communications. 2017. Vol. 35, no. 7. P. 1678–1690. doi: 10.1109/JSAC.2017.2698780.

7. Measurement-based spatial correlation and capacity of indoor distributed MIMO system / Y. Zhang, L. Xiao, Sh. Zhou, J. Wang // Intern. J. of Antennas and Propagation. 2013. Vol. 2013(12). Art. 596347. 7 p. doi: 10.1155/2013/596347.

8. Spatial correlation in indoor massive MIMO: measurements and ray-tracing / S. Shikhantsov, A. Guevara, A. Thielens, G. Vermeeren, P. Demeester, L. Martens, G. Torfs, S. Pollin, W. Joseph // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2021. Vol. 20, no. 6. P. 903–907. doi: 10.1109/LAWP.2021.3066607.

9. Экспериментальная установка для измерения электромагнитного излучения от излучающей структуры в ближней зоне / И. В. Скворцов, Р. Р. Латыпов, О. Н. Шерстюков, Р. Ф. Бабаев // Журн. радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 1–13. doi: 10.30898/1684-1719.2019.11.13.

10. Novel device reproduce in-vehicle wireless multipath radio channels / A. Bel Hadj Mabrouk, H. Boulzaen, M. Klingler, M. Heddebaut // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, no. 12. P. 7216–7223. doi: 10.1109/tap.2018.2873403.

11. RMS delay spread vs. coherence bandwidth from 5G indoor radio channel measurements at 3.5 GHz band / W. Debaenst, A. Feys, I. Cuinas, M. G. Sanchez, J. Verhaevert // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 750. doi: 10.3390/s20030750.

12. Калачиков А. А., Щелкунов Н. И. Экспериментальное измерение и анализ параметров MIMO радиоканала // Докл. АН ВШ РФ. 2017. № 2(35). С. 43–52. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-43-52.

Информация об авторах

Халиуллин Реваз Фархатович – аспирант кафедры радиофизики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, ул. Кремлевская, 16а, Казань, 420111, Россия.
E-mail: sven456634@gmail.com

Сулимов Амир Ильдарович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиофизики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, ул. Кремлевская, 16а, Казань, 420111, Россия.
E-mail: Amir.Sulimov@kpfu.ru

References

1. A survey of 5G channel measurements and models / C.-X. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang, M. Zhang // IEEE Commun. Surveys & Tutorials. 2018. Vol. 20, no. 4. P. 3142–3168. doi: 10.1109/COMST.2018.2862141.

2. A general 3-D non-stationary 5G wireless channel model / S. Wu, C.-X. Wang, M. Aggoune el-H., M. M. Alwakeel, X. You // IEEE Trans. on Commun. 2018. Vol. 66, no. 7. P. 3065–3078.

3. Measured wideband characteristics of indoor channels at centimetric and millimetric bands / W. Fan, I. Carton, J. Ø. Nielsen, K. Olesen, G. F. Pedersen // EURASIP J. on Wireless Commun. and Networking. 2016. Vol. 2016, no. 58. P. 1–13. doi: 10.1186/s13638-016-0548-x.

4. Multi-frequency mmWave massive MIMO channel measurements and characterization for 5G wireless communication systems / J. Huang, C.-X. Wang, R. Feng, J. Sun, W. Zhang, Y. Yang // IEEE J. on Selected Areas in Commun. 2017. Vol. 35, no. 7. P. 1591–1605.

5. Spatial cross-correlation properties of mmWave massive MIMO channels / R. Feng, J. Huang, J. Sun,

Y. Tan, C.-X. Wang, S. Zhou // Proc. IEEE/CIC Intern. Conf. on Commun. in China (ICCC). Qingdao, China: IEEE, 2017. P. 1–5.

6. On indoor millimeter wave massive MIMO channels: measurement and simulation / B. Ai, K. Guan, R.-S. He, J.-Z. Li, G.-K. Li, D. He, Z.-D. Zhong, K. M. S. Huq // IEEE J. on Selected Areas in Commun. 2017. Vol. 35, no. 7. P. 1678–1690. doi: 10.1109/JSAC.2017.2698780.

7. Measurement-based spatial correlation and capacity of indoor distributed MIMO system / Y. Zhang, L. Xiao, Sh. Zhou, J. Wang // Intern. J. of Antennas and Propagation. 2013. Vol. 2013(12). Art. 596347. 7 p. doi: 10.1155/2013/596347.

8. Spatial correlation in indoor massive MIMO: measurements and ray-tracing / S. Shikhantsov, A. Guevara, A. Thielens, G. Vermeeren, P. Demeester, L. Martens, G. Torfs, S. Pollin, W. Joseph // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2021. Vol. 20, no. 6. P. 903–907. doi: 10.1109/LAWP.2021.3066607.

9. Jeksperimental'naja ustanovka dlja izmerenija jektmagnitnogo izluchenija ot izluchajushhej struktury v blizhnej zone / I. V. Skvorcov, R. R. Latypov, O. N. Shershtjukov, R. F. Babaev // Zhurn. radioelektroniki. 2019. № 11. S. 1–13. doi: 10.30898/1684-1719.2019.11.13. (In Russ.).

10. Novel device reproduce in-vehicle wireless multipath radio channels / A. Bel Hadj Mabrouk, H. Boulzazen, M. Klingler, M. Heddebaut // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, no. 12. P. 7216–7223. doi: 10.1109/tap.2018.2873403.

11. RMS delay spread vs. coherence bandwidth from 5G indoor radio channel measurements at 3.5 GHz band / W. Debaenst, A. Feys, I. Cuinas, M. G. Sanchez, J. Verhaevert // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 3. P. 750. doi: 10.3390/s20030750.

12. Kalachikov A. A., Shhelkunov N. I. Jeksperimental'noe izmerenie i analiz parametrov MIMO radiokanala // Dokl. AN VSh RF. 2017. № 2(35). S. 43–52. doi: 10.17212/1727-2769-2017-2-43-52. (In Russ.).

Information about the authors

Revaz F. Khaliullin – postgraduate student, Department of Radiophysics, Kazan Federal University, Institute of Physics, 16a Kremlyovskaya St., Kazan, 420111, Russia.

E-mail: sven456634@gmail.com

Amir I. Sulimov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Radiophysics, Kazan Federal University, Institute of Physics, 16a Kremlyovskaya St., Kazan, 420111, Russia.

E-mail: Amir.Sulimov@kpfu.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2026; принята к публикации после рецензирования 31.03.2026; опубликована онлайн 29.06.2026.

Submitted 25.02.2026; accepted 31.03.2026; published online 29.06.2026.
