

УДК 621.396.677

Шифр специальности ВАК: 2.2.13

Н.В. Шеремет, Г.А. Фокин

Экспериментальная апробация SDR-демонстратора технологии диаграммообразования

Актуальность. Технологии диаграммообразования (управления лучом) являются ключевыми для перспективных стандартов мобильной связи, однако, несмотря на обилие имитационных исследований в этой области, экспериментальная апробация на базе программно-конфигурируемого радио (SDR) сдерживается высокой стоимостью многоканальных решений и сложностью синхронизации, что делает актуальной разработку доступного SDR-демонстратора. **Цель исследования.** Построение и экспериментальная апробация системы на базе программно-конфигурируемого радио для исследования технологии диаграммообразования. Данный подход требует как наличия дорогостоящих SDR плат с несколькими трактами приема и передачи, так и достаточно высоких компетенций по организации такого эксперимента. **Научная новизна.** В настоящей работе впервые предлагается способ объединения пары двухканальных плат USRP B210 в демонстратор диаграммообразования с четырехэлементной антенной решеткой посредством отечественных устройств частотно-временной синхронизации Метроном. **Методы.** Раскрывается программно-аппаратная реализация предлагаемого способа: описывается макет четырехэлементной линейной антенной решетки, формализуются программные модули на основе UHD-драйвера, обеспечивающие необходимую точность частотной и временной синхронизации двух отдельных SDR-устройств для амплитудно-фазовой обработки радиосигналов при диаграммообразовании. **Результаты.** Приводятся результаты экспериментальной апробации разработанного SDR-демонстратора технологии диаграммообразования при работе на прием. В первом приближении показана работоспособность разработанного SDR-демонстратора на примере частного эксперимента по оценке разрешающей способности пространственного разрешения двух источников алгоритмом MUSIC. Теоретическая значимость заключается в научном обосновании возможности объединения нескольких SDR-устройств с требуемой для диаграммообразования частотной и временной синхронизацией. **Практическая значимость.** Предложен способ экспериментальной апробации алгоритмов диаграммообразования без необходимости приобретения дорогостоящих многоканальных SDR-устройств. **Ключевые слова:** диаграммообразование, антенная решётка, 5G, SDR. **DOI:** 10.21293/1818-0442-2026-29-1-27-39

Введение

Современные и перспективные стандарты мобильной связи пятого 5G и последующего 6G поколений для соответствия постоянно растущим требованиям к ключевым показателям функционирования KPI широко используют антенные решетки (АР) и технологии диаграммообразования в диапазоне миллиметровых волн (ММВ) [1]. Например, стандарт 5G в соответствии с 15-м релизом спецификации 3GPP TR 22.261 [2] предусматривает максимальную скорость до 3 Гбит/с в диапазоне 25–39 ГГц.

Диапазон ММВ из-за высоких потерь при распространении радиоволн (РРВ) имеет малую дальность распространения. Данный фактор приводит к увеличению плотности размещения базовых станций. Рост числа абонентов, происходящий за счёт компонентов систем интернета вещей, умного города и промышленных систем, также увеличивает плотность абонентов внутри сети. Антенные решётки за счёт настройки диаграммы направленности (ДН) позволяют компенсировать потери РРВ [3], а также повысить показатели абонентской емкости сети за счёт пространственного разделения сигналов [4].

Несмотря на достаточное число отечественных и зарубежных публикаций в данной предметной области за последние годы [5–7], большинство из них опирается на средства имитационного моделирования. В работе [5] исследуется передающий тракт базовой станции стандарта пятого поколения и устанавливаются

ливаются типы модуляции, допустимые при указанной мощности передатчика в соответствии с величиной вектора ошибки, определённой спецификациями. В [6] для стандартов 4/5G производится расчёт ослаблений сигнала на трассе; результаты моделирования показывают, что дальность связи в сети четвёртого поколения в среднем на 9,3% выше, чем в сети пятого поколения. Перспективные методы машинного обучения для управления лучом в 5G также исследуются средствами имитационного моделирования в [7].

Помимо моделирования перспективным направлением исследований вопросов диаграммообразования (ДО) является их экспериментальная апробация с использованием устройств программно-конфигурируемого радио SDR (Software Defined Radio).

На сегодняшний день доступных SDR-устройств диапазона ММВ достаточно мало, а их стоимость является серьезным препятствием для приобретения. В то же время на рынке достаточно SDR устройств диапазона до 6 ГГц, на которых также можно апробировать алгоритмы диаграммообразования [8], оценки угла прихода сигналов [9] и использовать при прототипировании радиолиний 5G [10]. В [11] предлагается многоантенная SDR-система диапазона до 6 ГГц для оценки канальных характеристик и эффективности управления лучом в сетях 4G.

В [12] устройства программно-конфигурируемого радио применяются для экспериментальной апробации нормированного алгоритма выбора ан-

тенны в MIMO (Multiple Input Multiple Output, множественные входы и множественные выходы) системах при прототипировании 5G. В [13] SDR устройства используются для верификации виртуальных измерений характеристик MIMO канала при связи между автомобилем и базовой станцией.

Работа [14] посвящена задаче сканирования спектра средствами программно-конфигурируемого радио в условиях высокоподвижных радиосистем с использованием MIMO. В [15] приводится система на базе SDR для оценки канальных характеристик в сетях радиодоступа диапазона до 6 ГГц, применяемых в железнодорожной инфраструктуре. В [16] проводится измерение угла прихода сигнала для технологии LoRa (Long Range – дальнее действие) с использованием одной двухканальной платы USRP B210 [17]. Использование только двух каналов ограничивает потенциальную точность оценки угла прихода и угловой сектор оценки.

Работа [18] рассматривает построение восьмиканальной системы оценки угла прихода сигналов на основе плат NI USRP 2945R, устройства обработки сигналов NI PXIe 8880 и соединительного устройства NI CPS-8910 – сложного и дорогостоящего оборудования. В работе [19] предложен способ построения четырехканальной системы на основе двух плат USRP B210 и комплексной подсистемы исправления фазовых сдвигов в реальном времени для медицинской томографии. Данная работа отличается от [19] используемым методом калибровки фазовых сдвигов, оборудованием синхронизации и задачами применения.

Проведенный анализ состояния проблемы [8–16, 18, 19], кратко изложенный в табл. 1, показывает, что задача экспериментальной апробации технологий ДО

с использованием SDR-устройств является актуальной и востребованной, в том числе в контексте развития сетей 5/6G.

В настоящей работе, насколько известно авторам, впервые предлагается и раскрывается программно-аппаратный способ объединения пары двухканальных плат USRP B210 в демонстратор диаграммообразования с применением устройств Метроном для частотной и временной синхронизации двух отдельных SDR-плат при четырехканальной амплитудно-фазовой обработке радиосигналов.

Целью работы является повышение ключевых показателей функционирования современных и перспективных сетей радиодоступа посредством разработки SDR-демонстратора технологии диаграммообразования. Задачей работы является научное обоснование возможности объединения нескольких устройств программно-конфигурируемого радио с требуемой для диаграммообразования частотной и временной синхронизацией посредством экспериментальной апробации оценки угла прихода сигнала четырехэлементной антенной решёткой.

Материал настоящей работы организован далее следующим образом. Раздел «Технологии диаграммообразования в современных и перспективных сетях радиодоступа» описывает сценарии применения антенных решёток для реализации технологий диаграммообразования. Раздел «Постановка задачи объединения SDR-плат в демонстраторе технологии ДО» раскрывает аппаратную часть SDR-демонстратора, обеспечивающую синхронный приём сигналов четырьмя каналами двух синхронизированных от внешнего источника плат программно-конфигурируемого радио.

Таблица 1

Анализ состояния проблемы				
Статья	Эксперимент	SDR оборудование	Число каналов (приём или передача)	Метод синхронизации
8	Диаграммообразование с использованием нескольких SDR	NI USRP 2945R × 4	4	Опорные сигналы тактирования и калибровочный сигнал
9	Оценка угла прихода сигнала	USRP B210	2	–
10	Прототипирование радиолинии 5G	NI USRP 2944R	2	Опорные сигналы тактирования и калибровочный сигнал
11	Прототипирование радиолинии 4G	NI USRP 2953R × 8	16	Опорные сигналы тактирования и калибровочный сигнал
12	Прототипирование радиолинии 5G	NI USRP 2943R × 4	8	Опорные сигналы тактирования
13	Эмуляция MIMO-канала	NI USRP 2943R	2	–
14	Зондирование спектра MIMO-канала	NI USRP 2954R	2	–
15	Оценка MIMO-канала 4G	NI USRP 2954 × 4	8	Синхронизация по сигналу глобальной навигационной системы
16	Оценка угла прихода LoRa	USRP B210	2	–
18	Оценка угла прихода	NI USRP 2945R × 4	8	Опорные сигналы тактирования и калибровочный сигнал
19	Медицинская томография	USRP B210 × 2	4	Опорные сигналы тактирования и собственная система калибровки
Данная работа	Апробация программно-аппаратного комплекса	USRP B210 × 2	4	Опорные сигналы тактирования и калибровочный сигнал

В разделе «Постановка задачи разработки специального программного обеспечения SDR-демонстратора ДО» обосновывается создание оригинального специального программного обеспечения и проводится анализ существующих альтернатив. Раздел «Структура и возможности специального программного обеспечения SDR-демонстратора ДО» описывает архитектуру и возможности специального программного обеспечения, позволяющего управлять SDR-оборудованием демонстратора и проводить обработку сигналов алгоритмами диаграммообразования. Заключительный раздел посвящён экспериментальной апробации SDR-демонстратора технологии диаграммообразования посредством измерения разрешающей способности алгоритма оценки угла прихода MUSIC.

Технологии диаграммообразования в современных и перспективных сетях радиодоступа

Ключевой характеристикой антенны является ДН, отражающая зависимость коэффициента усиления (КУ) от направления передачи или приёма сигнала. При этом диаграмма направленности взаимна и справедлива как для приёма, так и для передачи. Для повышения КУ, а также плотности базовых станций и пользовательских устройств применяются направленные антенны, которые могут усиливать сигнал в одном и ослаблять в другом направлении [20].

Формирование диаграммы направленности в AP осуществляется посредством внесения фазовых задержек в изначальный передаваемый или принимаемый сигнал [21]. Цифровое диаграммообразование позволяет использовать сложные адаптивные алгоритмы пространственно-временной обработки, подавления выбранных направлений, многолучевого приёма и передачи.

Антенные решётки способны формировать множество узких лучей в реальном времени для адаптации к условиям среды и задаче. Отдельные лучи позволяют переиспользовать между собой частотный, временной и кодовый ресурсы сети, тем самым реализуя множественный доступ с пространственным разделением (Spatial Division Multiple Access – SDMA) для значительного повышения спектральной эффективности и ёмкости сети связи [22].

Одной из важнейших характеристик AP является ширина главного лепестка диаграммы направленности – угол, внутри которого коэффициент усиления

уменьшается не более чем вдвое относительно максимума, то есть не более чем на 3 дБ. На данном этапе становится важным рост возможного числа элементов AP при переходе на более высокие частоты (чем больше в решётке антенн, тем уже главный лепесток и меньше относительно него боковые, хотя и больше их количество). Диаграммы направленности при разном количестве элементов линейной AP, полученные при моделировании, показаны на рис. 1. Более узкий луч обеспечивает больший КУ и меньший уровень внутрисистемных помех.

Методы имитационного моделирования позволяют проводить оценку характеристик любых конфигураций антенных решёток, исследовать свойства алгоритмов диаграммообразования и оценки угла прихода сигналов. Следующим после моделирования этапом является проведение практических экспериментов по апробации, что требует создания макета системы AP с реальными радиотрактами.

Постановка задачи объединения SDR-плат в демонстраторе технологии ДО

В прототипировании систем AP и на предприятиях реального сектора экономики, и в академической среде широкое распространение получили средства программно-конфигурируемого радио. Наиболее распространенные и доступные SDR-платы USRP имеют два радиочастотных канала, что позволяет макетировать системы MIMO 2×2. Однако такая размерность не позволяет полноценно исследовать алгоритмы диаграммообразования или оценки угла прихода из-за слишком широкого луча, низкой точности оценки и невозможности применения некоторых алгоритмов. Объединение нескольких SDR-устройств для создания антенных решёток из большого числа элементов если и поддерживается платформой, то требует синхронизации по времени и по частоте.

Диаграмма направленности антенной решётки создаётся из суперпозиции сигналов отдельных её элементов, смещённых друг относительно друга во времени или эквивалентно по фазе. Отсчёт внутреннего времени устройств SDR осуществляется по тактовому генератору частоты. Генераторы несвязанных плат в силу естественной нестабильности (из-за температуры, старения) будут возвращать отсчёты в разные моменты времени и, что самое главное, с изменяющейся разницей фаз.

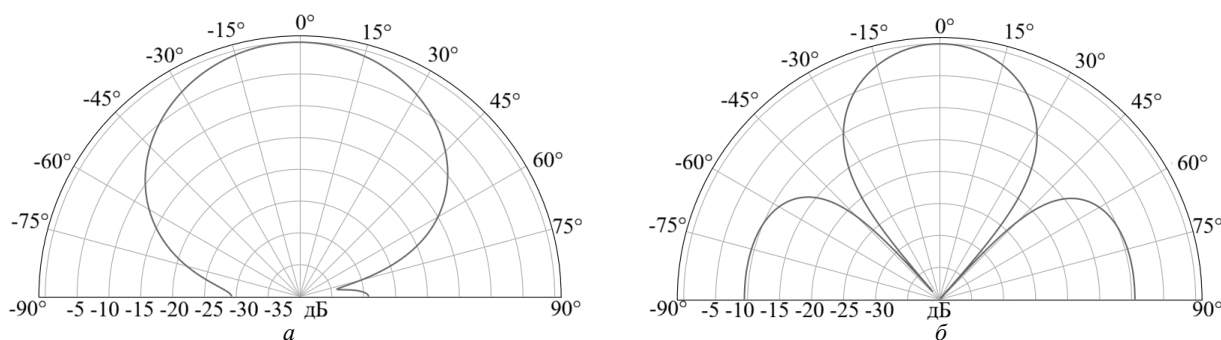


Рис. 1. Диаграмма направленности антенной решётки при разном числе элементов: двухэлементная решётка – а; четырёхэлементная решётка – б

Фазовый сдвиг между генераторами, а следовательно, и между каналами антенной системы приведёт к искажениям диаграммы направленности, и из-за постоянного изменения его будет невозможно компенсировать в реальном времени. Поэтому тактовые генераторы устройств программно-конфигурируемого радио при их объединении для построения AP нужно синхронизировать.

Для обеспечения статичного и компенсируемого фазового сдвига тактовый генератор каждой из плат подстраивается от общего внешнего высокостабильного генератора, обеспечивающего также соответствие частот во избежание межканальной интерференции (частотная синхронизация).

Временная синхронизация требует также подачи тактового сигнала от общего источника, задающего общую временную шкалу, гарантирующую начало выполнения операций приёма/передачи в один и тот же момент времени на разных устройствах.

Для прототипирования систем AP, апробации алгоритмов формирования луча, адаптивного диаграммообразования и оценки угла прихода в умных антеннах 5G в настоящей работе представлен разработанный SDR-демонстратор технологии диаграммообразования (рис. 2) [23].

Ядром демонстратора являются две платы программно-конфигурируемого радио USRP (Universal Software Radio Peripheral – универсальное программное радиопериферийное устройство) модели B210. Платформа B210 за счёт наличия двух радиочастотных трактов позволяет проводить макетирование систем MIMO размерности 2×2 .

В качестве источника сигналов синхронизации для плат выступает сервер точного времени «Metronom-PTP-1U-V2» [24].

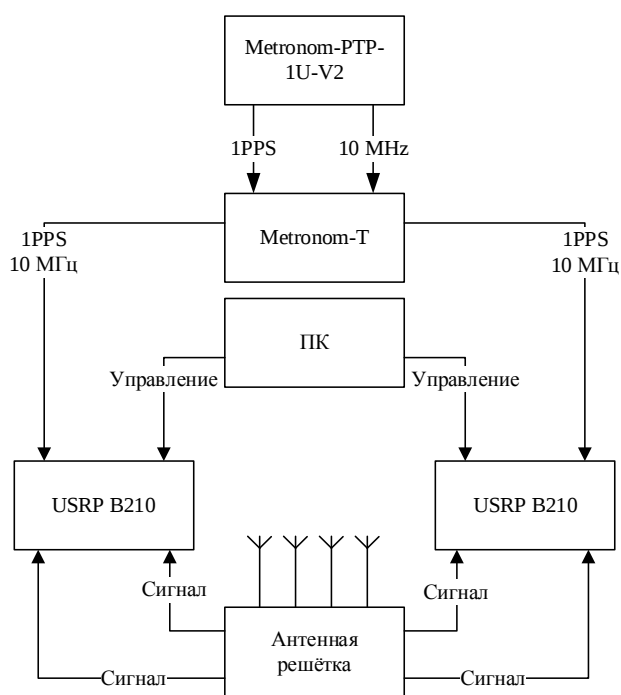


Рис. 2. Схема SDR-демонстратора технологии диаграммообразования

Генерируемый сервером прямоугольный сигнал с частотой 10 МГц используется для частотной синхронизации. Сигнал 1PPS (One Pulse Per Second – один импульс в секунду) также представляет собой прямоугольный импульс и служит для временной синхронизации. Сервер точного времени аппаратной версии 6.3 имеет по одному порту вывода требуемых сигналов, поэтому для их передачи на несколько устройств используется транслятор «Метроном-Т» [25], позволяющий передавать пары этих сигналов на четыре устройства максимум. Для передачи сигналов от «Metronom-PTP-1U-V2» к «Метроном-Т» и от «Метроном-Т» к двум USRP B210 используются SMA кабели длиной 1 м каждый.

Платы USRP B210 были выбраны за широкую распространённость и относительно низкую цену. Перед созданием SDR-демонстратора было проведено сравнение плат USRP различных моделей и семейств для оценки их потенциального применения в многоканальной MIMO-системе как для приёма при оценке угла прихода сигнала, так и для передачи при формировании луча. При сравнении ключевыми параметрами были приняты: количество радиочастотных каналов, диапазон частот, максимальная ширина полосы, интерфейс подключения к управляющему устройству (хосту), поддерживаемые возможности синхронизации и цена. В табл. 2 рассмотрены платы с публично доступными ценами: USRP B200mini [26], USRP B210, USRP X300 [27], USRP N320 [28], USRP N321 [29] и USRP X410 [30].

Цена двух плат USRP B210 составляет 357 094 руб., что меньше, чем цены на SDR-платы других моделей в количествах, необходимых для построения четырёхканальной системы. В описываемом в данной работе SDR-демонстраторе для синхронизации плат используются устройства Метроном, однако их цена недоступна публично, поэтому в рамках сравнения будет использоваться аналогичный генератор опорных сигналов OctoClock-G CDA-2990 [31]. Данное устройство имеет по 8 выходов сигналов 10 МГц 1PPS, цена составляет 310 794 руб. (по курсу рубля к доллару на 03.05.2026).

Цена связки из двух плат USRP B210 и генератора OctoClock-G CDA-2990 составляет 667 889 руб., что меньше цены альтернативных решений, не требующих отдельного генератора опорных сигналов (N320, N321, X410).

Приведённое сравнение характеристик и цен показывает отсутствие необходимости в покупке дорогостоящих платформ для прототипирования многоканальных систем.

Внешний вид подсистемы частотно-временной синхронизации на базе устройств Метроном SDR-демонстратора показан на рис. 3. Общий вид SDR-демонстратора технологии диаграммообразования показан на рис. 4.

Антенная решётка, показанная на рис. 5, состоит из четырёх антенн Уда-Яги с центральной частотой 2400 МГц и шириной главного лепестка диаграммы направленности 60° .

Сравнение характеристик SDR-платформ

Платформа	Радиочастотные каналы	Диапазон частот	Полоса пропускания	Интерфейс подключения	Возможности синхронизации	Цена, руб. ¹	Цена на 4 канала, руб.
USRP B200mini	1 TX ² / 1 RX ³	70 МГц – 6 ГГц	56 МГц	USB ⁴ 3.0	10 МГц и 1PPS	112 424	449 696
USRP B210	2 TX / 2 RX	70 МГц – 6 ГГц	56 МГц	USB 3.0	10 МГц и 1PPS	178 547	357 094
USRP X300	2 Слота для дочерних плат	До 6 ГГц	160 МГц	PCIe ⁵ x4, Dual 10 GigE ⁶ , Dual 1 GigE;	10 МГц и 1PPS, GPSDO ⁷	704 616	1 409 232 + дочерние платы
USRP N320	2 TX / 2 RX	3 МГц – 6 ГГц	200 МГц	2× SFP ⁸ , 1× QSFP ⁹ (1/10 GigE, Aurora);	10 МГц и 1PPS, GPSDO, Ввод сигнала тактового генератора	1 774 031	3 548 062
USRP N321	2 TX / 2 RX	3 МГц – 6 ГГц	200 МГц	2× SFP+, 1× QSFP+ (1/10 GigE, Aurora);	10 МГц и 1PPS, GPSDO, Ввод и вывод сигнала тактового генератора	1 995 589	3 991 178
USRP X410	4 TX / 4 RX	1 МГц – 7,2 ГГц	400 МГц	2× QSFP28 (10/100 GbE, Aurora), 2× iPass+ zHD (PCIe10 Gen3 x8);	10 МГц и 1PPS, GPSDO, Ввод и вывод сигнала тактового генератора	2 469 896	2 469 896

¹ Цены приведены по курсу рубля к доллару на 03.05.2026. ² Передающий канал. ³ Принимающий канал.

⁴ Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина. ⁵ Peripheral Component Interconnect Express – экспресс-соединение периферийных компонентов. ⁶ Gigabit Ethernet – гигабитный Ethernet.

⁷ Global Positioning System Disciplined Oscillator – Определяемый глобальной навигационной системой генератор.

⁸ Small Form-factor Pluggable – подключаемые устройства малого форм-фактора.

⁹ Quad Small Form-factor Pluggable – четверные подключаемые устройства малого форм-фактора.



Рис. 3. Подсистема частотно-временной синхронизации на базе устройств Метроном

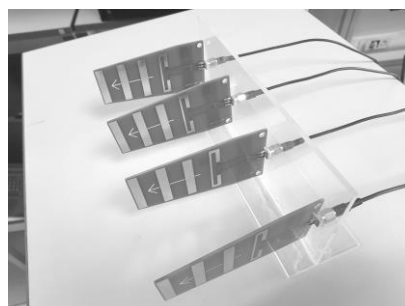


Рис. 5. Антенная решётка SDR-демонстратора



Рис. 4. Общий вид SDR-демонстратора технологии ДО

Антенны размещены на расстоянии, равном половине длины волны их центральной частоты 0,0625 м и соединены с соответствующими портами плат SDR-кабелями SMA-длиной по 3 м каждый.

Описанная аппаратная часть обеспечивает корректный приём/передачу сигналов для осуществления ДО или оценки угла прихода, однако их обработка соответствующими алгоритмами требует специализированного программного обеспечения.

Постановка задачи разработки специального программного обеспечения SDR-демонстратора ДО

При работе с платами программно-конфигурируемого радио возникает необходимость выбора специализированного программного обеспечения (СПО) для взаимодействия с SDR-устройством. Данный выбор должен осуществляться в соответствии с решаемыми задачами.

Во-первых, СПО должно поддерживать как работу известных алгоритмов, так и их модификацию с целью проверки новых подходов. Во-вторых, необходимо обеспечить в СПО возможность моделировать работу известных и модифицированных алгоритмов

для установления теоретических пределов и первичной оценки их эффективности.

В-третьих, после имитационного моделирования для дальнейшей проверки в радиоэфире СПО должно поддерживать экспериментальную апробацию с использованием отдельных плат в составе SDR-демонстратора в условиях лабораторных и полевых испытаний. Проведение таких экспериментов в радиоэфире требует от СПО выполнения расчётов и взаимодействия с SDR-платами в реальном времени.

В-четвертых, если в дальнейшем потребуется использовать другие платы программно-конфигурируемого радио для масштабирования демонстратора на большее число каналов, то необходимо предусмотреть работу в составе СПО прикладного программного интерфейса (Application Programming Interface, API) для различных устройств. В заключение с точки зрения академической деятельности с перспективой внедрения в учебный процесс СПО должно быть наглядным для демонстрации и иметь понятный и информативный интерфейс. Таким образом, ключевыми требованиями к программному обеспечению демонстратора являются: возможность моделирования, поддержка работы с различными SDR-устройствами на основе общего интерфейса и наглядность.

Для плат USRP существует аппаратный драйвер UHD (USRP Hardware Driver) [32], доступный в библиотеках C/C++ API и Python API. Этот драйвер позволяет конфигурировать платы, вести передачу, приём и т.д., однако в него не входят алгоритмы обработки сигналов или визуализация. Для плат USRP он будет лежать в основе любого СПО, но требуется оболочка для реализации остального функционала.

Перед принятием решения о самостоятельной разработке СПО на базе UHD, соответствующего сформулированным выше требованиям, были рассмотрены среды MatLab и GNU Radio.

MatLab – проприетарное программное обеспечение, платформа для программирования, математических вычислений, анализа и визуализации с широким спектром возможностей во множестве областей [33]. MatLab содержит большое количество модулей, позволяющих генерировать сигналы реальных стандартов беспроводной связи, моделировать алгоритмы диаграммообразования, работу антенных решёток. Поддерживается и работа с платами USRP посредством пакета «Communications Toolbox Support Package for USRP Radio» [34] на основе UHD, однако на этапе работы с SDR оборудованием возникают многочисленные трудности.

Во-первых, для конфигурации доступны не все свойства плат, функционал изначального драйвера урезан. Во-вторых, полноценная синхронизация в систему AP возможна только для плат типа USRP 2 с Ethernet-интерфейсом подключения при подаче сигналов 10 МГц и 1PPS. Поддержка давно существующей синхронизации некоторых плат USRP посредством специального MIMO кабеля [35] стала доступна только с версией MatLab R2024. И, в-третьих, поддержки синхронизации для составления единого

виртуального устройства для плат с USB-интерфейсами, как B200 и B210, на данный момент нет.

С учётом проприетарности и растущих требований к производительности среды MatLab целесообразно рассмотреть альтернативные средства СПО.

GNU Radio – свободная экосистема с открытым исходным кодом, предоставляющая многочисленные инструменты для работы с программно-конфигурируемым радио и обработки сигналов [36].

GNU Radio использует систему блоков для построения пользовательских сценариев работы, а модули алгоритмов обработки могут быть написаны на C++ или Python и составлены как самим пользователем, так и загружены из библиотеки. Присутствует поддержка многочисленных платформ SDR, в том числе USRP, однако главная часть программы, управляющей SDR-устройством, а именно реализация синхронизированной системы AP, требует написания собственных скриптов, включая процедуру синхронизации SDR-устройств, калибровку фаз их каналов и предварительную обработку сигналов с отдельных плат.

Недостатки и ограничения рассмотренных сред MatLab и GNU Radio привели к необходимости разработки собственного СПО SDR-демонстратора технологий диаграммообразования.

Структура и возможности специального программного обеспечения SDR-демонстратора ДО

Разработанное программное обеспечение предоставляет возможность проводить как моделирование алгоритмов, так и их работу в радиоэфире на приём и передачу. СПО написано на языке Python, обладающем внушительной библиотекой модулей для работы с комплексными радиосигналами и алгоритмами их обработки. В качестве библиотек графического интерфейса используются PySide6 и PyQtGraph, что позволяет обеспечить визуализацию при сохранении производительности.

Структура СПО показана на рис. 6, его интерфейс – на рис. 7.

Модуль «Процессор» позволяет выполнять заданный сценарий работы с оборудованием и сигналами. Для обеспечения стабильной работы и исключения перегрузок плат приём ведётся не непрерывно, а раз в определённый промежуток времени. Это позволяет обеспечить требуемую производительность при постоянной необходимости производить сложные вычисления алгоритмов в реальном времени.

Инициализация включает в себя создание программных объектов устройств, задание частот тактовых генераторов отдельных плат и их синхронизацию.

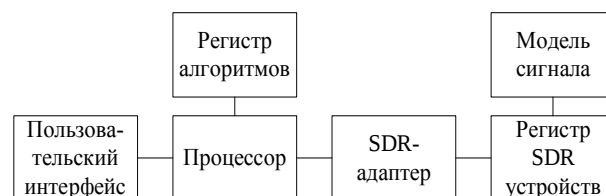


Рис. 6. Структура разработанного СПО

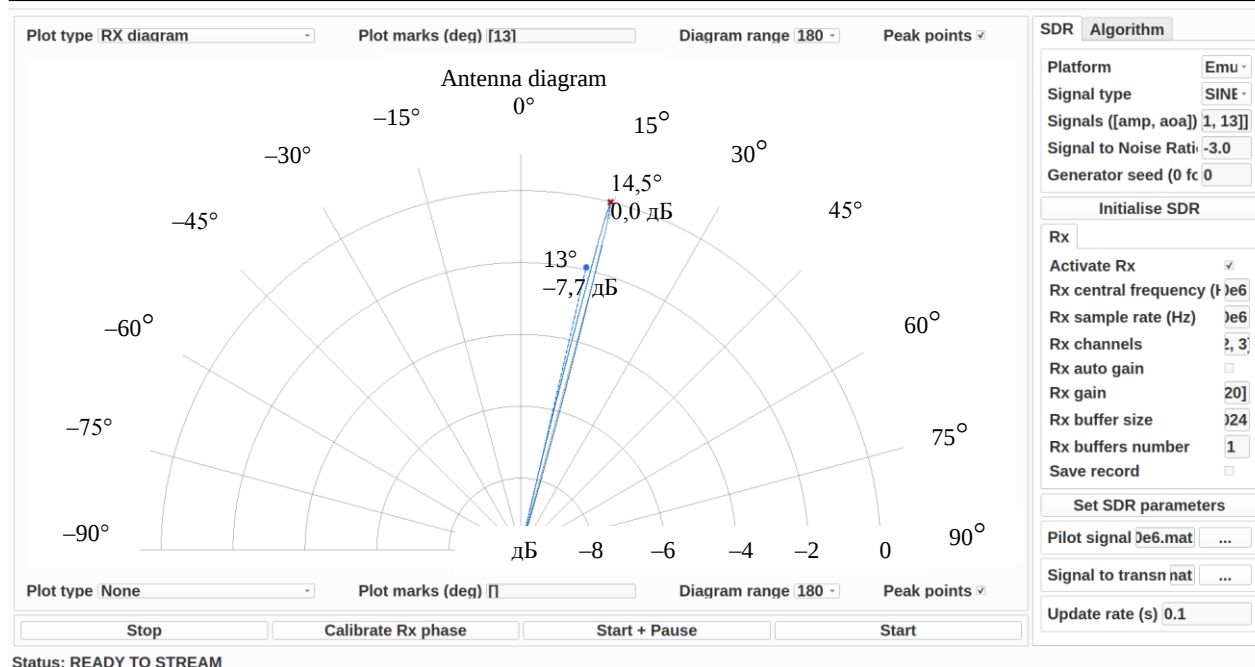


Рис. 7. Интерфейс разработанного СПО

Обработка сигнала, принятого от SDR-платы, начинается с отсечения небольшого числа отсчётов в начале и конце, для устранения пустых отсчётов, соответствующих тем промежуткам времени, когда поток передачи данных открыт, а реального сигнала нет.

Синхронизация по тактовым сигналам обеспечивает стабильный и неизменный фазовый сдвиг между каналами, выражающийся в постоянном смещении оценки угла прихода сигнала. Для устранения данного сдвига необходима калибровка. Калибровка производится программно по приходящему из направления 0° радиосигналу.

Первым этапом является фазовая калибровка. Для принятого сигнала производится вычисление мгновенной разности фаз между нулевым каналом и остальными для каждого отсчёта. Затем извлекается средняя разность для каждого канала. Так как сдвиг в силу синхронизации постоянен во времени, то дисперсия разницы фаз достаточно низкая, чтобы её можно было компенсировать одним средним значением для каждого канала.

Амплитудная калибровка производится по тому же сигналу. Сначала из сигналов на всех каналах удаляется постоянная составляющая, смещение нулевого уровня сигнала. Затем определяется амплитуда как средний модуль всех отсчётов для каждого канала. По средним амплитудам вычисляются множители, на которые нужно умножить сигнал, чтобы его средняя амплитуда стала равна максимальной среди всех каналов. Множители переводятся в децибелы и прибавляются к текущим усилениям каналов плат.

Процедура калибровки проводится один раз после инициализации плат и требуется повторно только при повторной инициализации. После выполненной калибровки стабильность работы демонстратора определяется характеристиками источника сигналов

частотной и временной синхронизации Metronom-PTP-1U-V2 [24].

Далее к сигналу применяется указанный алгоритм оценки угла прихода или диаграммообразования.

Модуль «Регистр алгоритмов» содержит реализацию алгоритмов и инструкции по передаче их параметров. По алгоритмам диаграммообразования, которые в качестве результата возвращают набор комплексных весовых коэффициентов для каналов, например, LCMV (Linearly Constrained Minimum Variance – линейно ограниченный минимум вариации) [37], могут быть построены спектры сигнала до и после применения весовых коэффициентов и диаграммы направленности антенной решётки, как показано на рис. 8 и 9 соответственно.

По результатам работы алгоритмов оценки угла прихода сигналов, например, MUSIC (Multiple Signal Classification – классификация множественных сигналов), строятся графики псевдоспектра (рис. 10).

Применение языка Python для реализации алгоритмов позволяет использовать широкий спектр готовых библиотек обработки сигналов и анализа данных, что в дальнейшем способствует включению модулей машинного обучения для адаптивного ДО.

Модуль «Регистр SDR» с помощью модуля «SDR-адаптер» предоставляет общий интерфейс плат программно-конфигурируемого радио, через который осуществляется взаимодействие с API платы. Платы USRP на уровне UHD имеют разные структуры управления в зависимости от типа подключения: платы с интерфейсом Ethernet, например, NI USRP 2932 [38], могут быть объединены в одно виртуальное устройство [39], а платы с USB-интерфейсом, такие как B200 и B210, должны обрабатываться как отдельные виртуальные устройства, что требует разных настроек при создании потоков данных и разных процедур синхронизации.

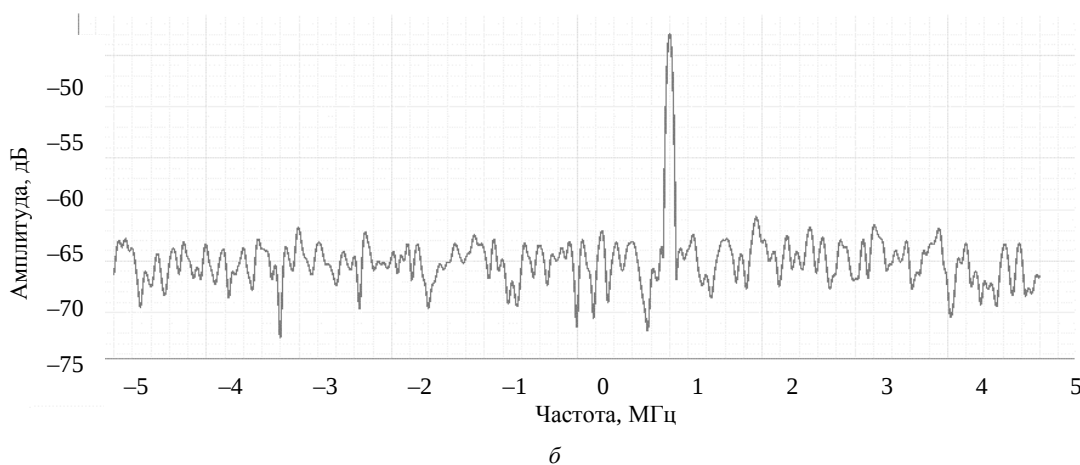
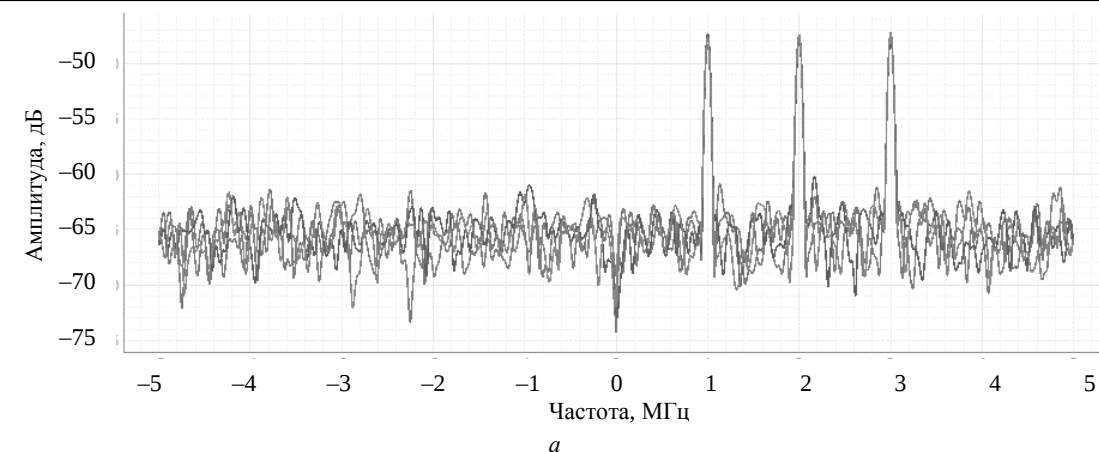


Рис. 8. Спектрограммы сигналов от трёх источников: принятый сигнал – а; сигнал, обработанный алгоритмом LCMV с подавленными двумя источниками, – б

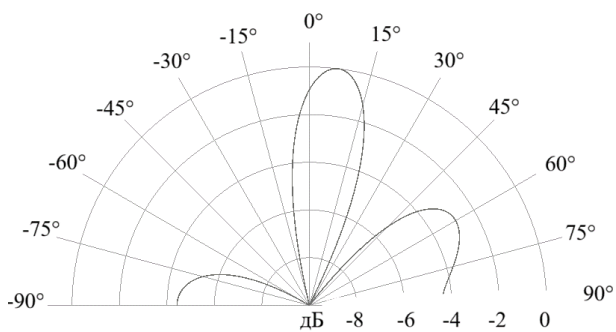


Рис. 9. Диаграмма направленности алгоритма LCMV с наведёнными главным лучом и нулями, провалами

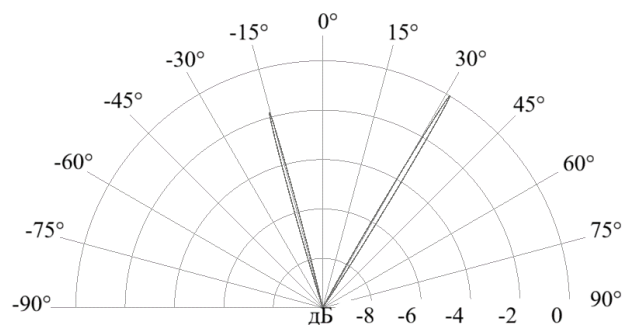


Рис. 10. Псевдоспектр оценки угла прихода, построенный алгоритмом MUSIC для сигналов с углами прихода -15° и 30°

Модуль «Модель сигнала» позволяет генерировать разные типы сигналов для имитации приёма, а также использовать готовые, например, в качестве пилотных последовательностей для согласования приёма и передачи некоторых алгоритмов. Сгенерированные сигналы проходят модель канала, за счёт чего становится возможным моделирование их приёма данной антенной решёткой с разных направлений. Данный модуль лежит в основе эмуляции SDR-устройства, входящей в «Регистр SDR».

Общий интерфейс SDR-устройств требует от наследующих его экземпляров API плат реализации методов инициализации устройств, синхронизации каналов, установки параметров, приёма и передачи.

Ключевой процедурой SDR-устройства при построении системы AP является частотно-временная синхронизация. В рамках разработанного СПО она производится в ходе инициализации и установки частот тактовых генераторов отдельных плат; изменение этих частот приводит к сбросу синхронизации плат, после чего необходима проверка физических соединений и повторная инициализация. Для достижения синхронной работы плат USRP B210 по сигналам 10 МГц и 1PPS необходимо несколько шагов. Сначала каждое из SDR-устройств производит фиксацию внешнего тактового сигнала 10 МГц с небольшой задержкой для стабилизации собственных генераторов.

Затем производится сброс внутреннего времени плат, что при наличии корректного сигнала 1 PPS приводит к синхронизации времени по следующему его фронту. Ожидание импульса требует задержки в одну секунду. При работе нескольких каналов необходимо запретить запуск потока по готовности и указать общее время запуска потока вручную.

Для проверки наличия фактической синхронизации и оценки её степени по принятым каналами плат сигналам может быть построена корреляционная функция, сопоставляющая сигналы всех каналов с первым из них. По пикам данной функции можно определить смещение сигналов во времени вплоть до обратной частоты дискретизации. Данная опция позволяет быстро выявить рассинхронизацию радиочастотных каналов по приёму, например, вследствие разных длин антенных кабелей. Рассинхронизация тактовых генераторов плат по причинам отсутствия требуемых опорных сигналов или неисправностей оборудования будет обнаружена на этапе синхронизации в процессе инициализации. Для описанной конфигурации оборудования подтверждена синхронизация каналов вплоть до 100 нс. Пример измеренной на реальном сигнале из эфира корреляционной зависимости показан на рис. 11.

Созданное для SDR-демонстратора технологии диаграммообразования СПО соответствует сформулированным ранее требованиям. Оно поддерживает моделирование работы разнообразных алгоритмов и просмотр результатов в реальном времени. Прямое применение драйвера UHD позволяет использовать весь доступный функционал плат USRP для создания многоканальной системы AP, а модуль «SDR-адаптер» позволяет просто перейти на другое оборудова-

ние. Разработанное СПО будет применяться для исследования и апробации алгоритмов диаграммообразования в современных и перспективных сетях радиодоступа и демонстрации их работы.

Экспериментальная апробация SDR-демонстратора ДО

В качестве показательного эксперимента для апробации разработанного SDR-демонстратора технологии диаграммообразования было проведено измерение разрешающей способности алгоритма оценки угла прихода MUSIC при работе с двумя источниками сигналов. Данное измерение проводится для подтверждения возможности оценки угла прихода предлагаемым программно-аппаратным комплексом.

Разрешающая способность — минимальный угол, на котором для алгоритма становятся различимы два источника сигналов, т.е. для них на псевдоспектре формируются различные и корректные пики, соответствующие фактическим углам прихода от отдельных источников.

В ходе эксперимента производится измерение азимутального угла прихода, поэтому антенная решётка и источники сигналов должны находиться в одной плоскости. Передающие антенны должны располагаться в дальней зоне приёмной AP. Для описанной антенной решётки на частоте 2400 МГц дальняя зона R составляет 0,56 м; антенны передатчиков расположены на расстоянии 0,6 м, чтобы соответствовать условию. В качестве передатчиков использованы две платы USRP NI 2932 и две штыревые антенны диапазона 2400 МГц. Измерения производились в помещении.

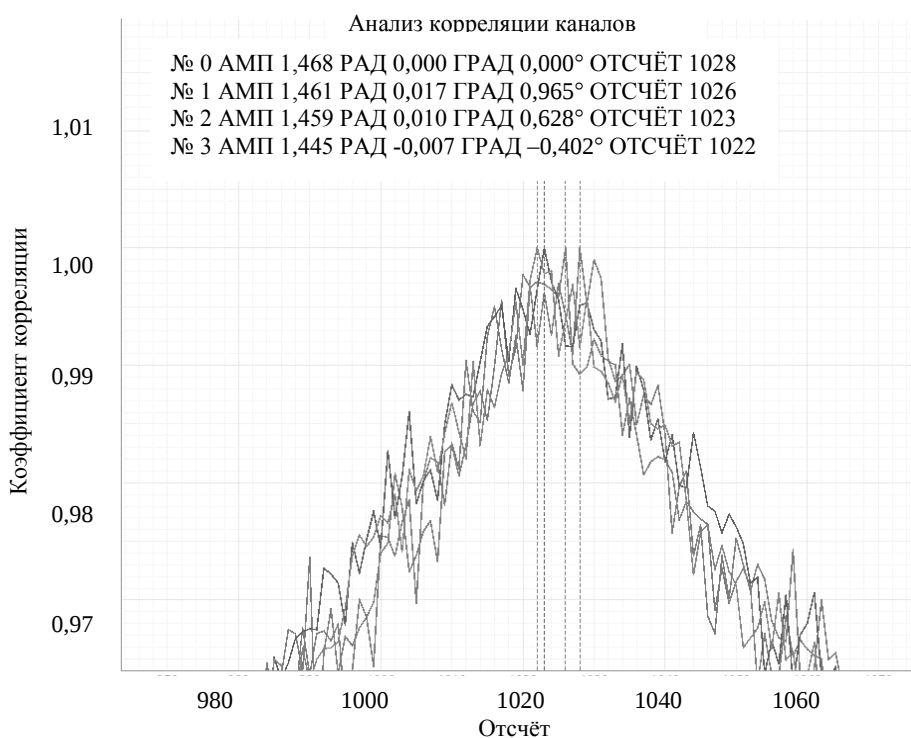


Рис. 11. График корреляции сигналов разных каналов

В ходе эксперимента первый источник был фиксирован и находился в направлении 0° перпендикулярно антенной решётке; второй источник двигался от 0° в положительном направлении по часовой стрелке.

В качестве сигнала фиксированный источник передавал синусоиду на частоте 2400 МГц с частотой дискретизации 10 МГц. Подвижный источник передавал синусоиду на частоте 2401 МГц с частотой дискретизации 10 МГц.

Приём антенной решёткой осуществлялся на центральной частоте 2400 МГц с частотой дискретизации и шириной канала равными 10 МГц. Каждый расчёт псевдоспектра алгоритма MUSIC производился по 1 024 отсчётам. Данное значение соответствует оптимальному размеру буфера приёма плат USRP B210.

Отношение сигнал/шум в ходе эксперимента лежало в диапазоне от 5 до 10 дБ.

Схема эксперимента показана на рис. 12.

Угол, при котором оба пика были минимум на 3 дБ (в два раза) выше уровня шума псевдоспектра и корректно (с ошибкой не более 1°) указывали углы прихода (т.е., угловое разрешение системы в первом приближении), составил $16,1^\circ$. Соответствующий угловому разрешению псевдоспектр представлен на рис. 13.

Таким образом, в настоящей работе был описан демонстратор технологии диаграммообразования на базе программно-конфигурируемого радио с синхронизацией радиотрактов отдельных устройств посредством внешних сигналов. Показанный способ построения системы из нескольких SDR-плат за счёт поддержки масштабирования и обеспечения достаточной для применения в диаграммообразовании степени синхронизации каналов является перспективным для решения задач прототипирования, валидации и апробации алгоритмов и методов управления лучом в современных и перспективных сетях радиодоступа.

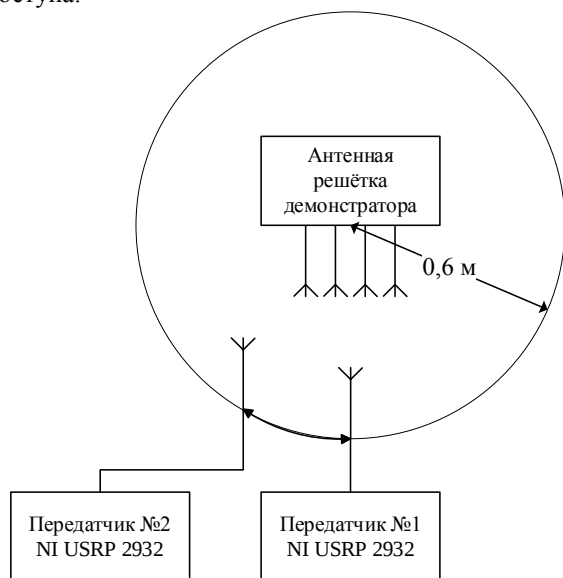


Рис. 12. Схема эксперимента по измерению разрешающей способности алгоритма MUSIC

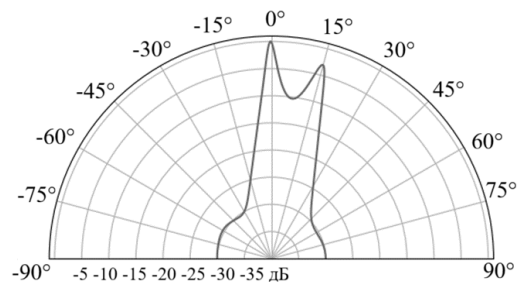


Рис. 13. Псевдоспектр MUSIC для двух сигналов с углами прихода 0° и $16,1^\circ$

Описано разработанное специализированное программное обеспечение, управляющее демонстратором, и решаемые его модулями задачи обработки сигналов и представления результатов. В качестве экспериментальной апробации демонстратора была измерена разрешающая способность алгоритма MUSIC, которая составила $16,1^\circ$, что показывает состоятельность аппаратно-программного комплекса. Определение точности и стабильности оценки угла прихода, формирование луча, апробация и сравнение различных алгоритмов при реализации на SDR-демонстраторе являются темами будущих исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01263, <https://rscf.ru/project/25-29-01263/>

Литература

1. Singh N. Array antennas for 5G mm wave spectrum: a comparative review / N. Singh, A. Verma, S. Patil // 2024 International Conference on Communication, Computing and Energy Efficient Technologies (I3CEET). – Gautam Buddha Nagar, India: IEEE, 2024. – P. 578–583.
2. 3GPP TR 22.261 V15.9.0 (2021-10). Service requirements for the 5G system (Release 15). [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107> (дата обращения: 04.05.2026).
3. Фокин Г.А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2009. – 144 с.
4. Бабков В.Ю. Оценка вероятности успешного радиоприема в самоорганизующихся пакетных радиосетях на основе радиостанций с направленными антеннами / В.Ю. Бабков, Г.А. Фокин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – № 4 (82). – С. 77–84.
5. Имитационная модель передающего тракта базовой станции 5G / А.К. Мовчан, Е.В. Рогожников, Э.М. Дмитриев, С.А. Новичков, Д.В. Лаконцев // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 38–44.
6. Расчет ослабления сигнала сетей сотовой связи 5G для частот диапазона FR1 / А.К. Мовчан, Е.В. Рогожников, Э.М. Дмитриев, С.А. Новичков, Д.В. Лаконцев // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 17–23.
7. A machine learning adaptive beamforming framework for 5G millimeter wave massive MIMO multicellular networks / S. Lavdas, P.K. Gkonis, Z. Zinonos, P. Trakadas, L. Sarakis, K. Papadopoulos // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 91597–91609.
8. Experimental evaluation of a beamforming-capable system using NI USRP software defined radios / C. Codau, B. Rares, T. Palade, A. Pastrav, P. Dolea, R. Simedroni // 2019

18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet). – Galati, Romania, 2019. – P. 1–6.

9. Wachowiak M. Angle of arrival estimation in a multi-antenna software defined radio system: impact of hardware and radio environment / M. Wachowiak, P. Kryszkiewicz // *Wireless Networks*. – 2022. – Vol. 28. – P. 3537–3548.

10. Verdecia-Peña R. Performance evaluation of a proposed two-hop D&F co-operative 5G network using SDR platform / R. Verdecia-Peña, J.I. Alonso // 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring). – Helsinki, Finland, 2022. – P. 1–5.

11. Izydorczyk T. A USRP-based multi-antenna testbed for reception of multi-site cellular signals / T. Izydorczyk, F.M.L. Tavares, G. Berardinelli, P. Mogensen // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 162723–162734.

12. Design of reconfigurable SDR platform for antenna selection aided MIMO communication system / P. Zhang, J. Xu, S. Zhong, H. Feng, L. Huang, T. Yuan // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – P. 169267–169280.

13. Implementation of a MIMO channel emulator for over-the-air LTE testing using software defined radio / A. Schwind, P. Berlt, M. Lorenz, C. Schneider, M.A. Hein // 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC). – Freiburg, Germany, 2018. – P. 307–310.

14. Thameur H.B. SDR Implementation of a Real-Time Testbed for Spectrum Sensing Under MIMO Time-Selective Channels for Cognitive Radio Applications / H.B. Thameur, I. Dayoub // *IEEE Sensors Letters*. – 2021. – Vol. 5, No. 8. – Art no. 7002704.

15. Sub-6 ГГц MIMO channel sounders for railway environments / A. Sabra, M. Berbineau, P. Pajusco, J.E. Amghar, A. Abdelghany, C. Maye // *Journées d'études Propagation Radioélectrique 2023*. – Rennes, France, 2023. – P. 1–4 [Электронный ресурс]. – URL: <https://hal.science/hal-04705606v1> (дата обращения: 20.01.2026).

16. SYLOIN: measuring angle of arrival of LoRa signals using software defined radio / Z. Hussein, S. Francois, B. Oumaya, V. Thierry // 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). – Lloret de Mar, Spain, 2021. – P. 1–8. DOI: 10.1109/IPIN51156.2021.9662518.

17. USRP B210 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (дата обращения: 20.01.2026).

18. Experimental evaluation of AoA algorithms using NI USRP software defined radios / B. Rares, C. Codau, A. Pastre, T. Palade, H. Hedesiu, B. Balaut // 2018 17th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet). – Cluj-Napoca, Romania, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ROEDUNET.2018.8514133.

19. A 4-channel, vector network analyzer microwave imaging prototype based on software defined radio technology / P. Meaney, A. Hartov, S. Bulumulla, T. Reynolds, C. Davis, F. Schoenberger, S. Richter, K. Paulsen // *Review of Scientific Instruments*. – 2019. – Vol. 90, No. 4. – Art. No. 044708. DOI: 10.1063/1.5083842.

20. Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 542 с.

21. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design* / 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – P. 285–318.

22. Özyurt S. A hybrid uplink multiple access method based on NOMA and SDMA / S. Özyurt, E.P. Simon, M. Torlak // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 89265–89276. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3305959.

23. Шеремет Н.В. Четырёхэлементная антенная решётка на базе SDR-платформ с наносекундной синхронизацией / Н.В. Шеремет, Г.А. Фокин // *Науч.-техн. конф.*

Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. – № 1 (80). – С. 136–140.

24. Metrotek. Сервер точного времени. Метроном-PTP-1U [Электронный ресурс]. – URL: <https://metrotek.ru/?p=4209> (дата обращения: 20.01.2026).

25. Metrotek. Трансляторы Радиус-50-Т, Метроном-Т [Электронный ресурс]. – URL: <https://kbmetrotek.ru/metronom-t/> (дата обращения: 20.01.2026).

26. USRP B200mini [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/> (дата обращения: 20.01.2026).

27. USRP X300 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/x300-kit/> (дата обращения: 20.01.2026).

28. USRP N320 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-n320/> (дата обращения: 20.01.2026).

29. USRP N321 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-n320/> (дата обращения: 20.01.2026).

30. USRP X410 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-x410/> (дата обращения: 20.01.2026).

31. OctoClock-G CDA-2990 [Электронный ресурс]: Ettus Research. – URL: <https://www.ettus.com/all-products/octoclock-g/> (дата обращения: 20.01.2026).

32. UHD Python API [Электронный ресурс]. – URL: https://kb.ettus.com/UHD_Python_API (дата обращения: 20.01.2026).

33. MatLab [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения: 20.01.2026).

34. Communications Toolbox Support Package for USRP Radio [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mathworks.com/help/comm/usrpradio/ug/install-support-package-for-usrp-radio.html> (дата обращения: 20.01.2026).

35. Synchronization and MIMO capability with USRP devices [Электронный ресурс]. – URL: https://kb.ettus.com/Synchronization_and_MIMO_Capability_with_USRP_Devices (дата обращения: 20.01.2026).

36. GNU Radio [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gnuradio.org/> (дата обращения: 20.01.2026).

37. Gross F.B. *Smart antennas for wireless communications with Matlab*. – New York: McGraw-Hill, 2005. – 187 p.

38. USRP-2932 Specifications [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.farnell.com/datasheets/3752197.pdf> (дата обращения: 20.01.2026).

39. Фокин Г.А. Постановка задачи экспериментальной апробации многоантенных систем на основе программно-конфигурируемого радио / Г.А. Фокин, Н.В. Шеремет // Подготовка профессиональных кадров в магистратуре в эпоху цифровой трансформации (ПКМ–2024): сборник лучших докладов V Всерос. науч.-техн. и науч.-метод. конф. магистрантов и их руководителей: в 2 т. – СПб., 2025. – Т. 1. – С. 125–131.

Шеремет Никита Викторович

Аспирант каф. беспроводных технологий и систем (БТС) Санкт-Петербургского государственного ун-та телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича (СПбГУТ) Большевиков пр-т, 22, к. 1, г. Санкт-Петербург, Россия, 193232
ORCID: 0009-0006-7694-3445
Тел.: +7-928-848-43-54
Эл. почта: sheremet.nv@sut.ru

Фокин Григорий Алексеевич

Д-р техн. наук, доцент, зав. каф. БТС СПбГУТ
 Большевиков пр-т, 22, к. 1, г. Санкт-Петербург,
 Россия, 193232
 ORCID: 0000-0002-5358-1895
 Тел.: +7-812-305-12-68
 Эл. почта: fokin.ga@sut.ru

Поступила в редакцию: 23.01.2026.

Принята к публикации: 04.05.2026.

Sheremet N.V., Fokin G.A.

Experimental Validation of an SDR Demonstrator for Beamforming Technology

Relevance. Beamforming technologies are critical for advanced mobile communication standards. However, despite numerous simulation studies in this field, experimental validation using Software-Defined Radio (SDR) is hindered by the high cost of multi-channel solutions and synchronization complexity. This makes the development of an affordable SDR demonstrator highly relevant. **Purpose of the study** is to construct and experimentally validate a system based on software-defined radio for investigating beamforming technology. This approach requires both expensive SDR platforms with multiple transmit and receive chains and sufficiently high competencies in organizing such experiments. **Novelty.** This paper proposes for the first time a method of combining a pair of two-channel USRP B210 boards into a four-element antenna array beamforming demonstrator using domestic Metronome frequency-time synchronization devices. **Methods.** The hardware and software implementation of the proposed method is described, including the layout of a four-element linear antenna array and the formalization of software modules based on the UHD driver. These modules provide the necessary frequency and time synchronization accuracy for two separate SDR devices to enable amplitude-phase processing of radio signals in beamforming. **Results.** Experimental validation results of the developed SDR demonstrator for beamforming technology in receive mode are presented. As a first approximation, the operability of the developed SDR demonstrator is shown using a particular experiment to estimate the spatial resolving capability for two sources with the MUSIC algorithm. The theoretical significance lies in the scientific substantiation of the possibility of combining several SDR devices with the frequency and time synchronization required for beamforming. **Practical significance.** The proposed method enables experimental validation of beamforming algorithms without the need to purchase expensive multichannel SDR devices.

Keywords: beamforming, antenna array, 5G, SDR.

Funding. This research was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 25-29-01263, <https://rscf.ru/project/25-29-01263/>.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-27-39

References

1. Singh N., Verma A., Patil S. Array Antennas for 5G mm Wave Spectrum: A Comparative Review. 2024 International Conference on Communication, Computing and Energy Efficient Technologies (I3CEET), Gautam Buddha Nagar, India, IEEE, 2024, pp. 578–583.
2. 3GPP TR 22.261 V15.9.0 (2021-10) Service requirements for the 5G system (Release 15). Available at: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3107> (accessed: 20 January 2026).

3. Fokin G.A. *Upravlenie samoorganizuyushchimsya paketnymi radiosetymi na osnove radiostantsiy s napravlennymi antennami* [Control of self-organizing packet radio networks based on radio stations with directional antennas]. Diss. ... kand. tekhn. nauk. Saint Petersburg, 2009, 144 p. (in Russ.).
4. Babkov V.Yu., Fokin G.A. *Otsenka veroyatnosti uspehnogo radiopriema v samoorganizuyushchikhsya paketnykh radiosetakh na osnove radiostantsiy s napravlennymi antennami* [Estimation of successful radio reception probability in self-organizing packet radio networks based on directional antenna radios]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2009, no. 4(82), pp. 77–84 (in Russ.).
5. Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A. [Simulation model of 5G base station transmitting path]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2020, vol. 23, no. 3, pp. 38–44 (in Russ.).
6. Movchan A.K., Rogozhnikov E.V., Dmitriev E.M., Novichkov S.A., Lakontsev D.V. [Calculation of signal attenuation of 5G cellular networks for FR1 frequencies]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 17–23 (in Russ.).
7. Lavdas S., Gkonis P.K., Zinonos Z., Trakadas P., Sarakis L., Papadopoulos K. A machine learning adaptive beamforming framework for 5G millimeter wave massive MIMO multicellular networks, Athens, Greece. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 91597–91609.
8. Codau C., Rares B., Palade T., Pastrav A., Dolea P., Simeadroni R. Experimental evaluation of a beamforming-capable system using NI USRP software defined radios. 2019 18th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet), Galati, Romania, 2019, pp. 1–6.
9. Wachowiak M., Kryszkiewicz P. Angle of arrival estimation in a multi-antenna software defined radio system: impact of hardware and radio environment. *Wireless Networks*, 2022, vol. 28, pp. 3537–3548.
10. Verdecia-Peña R., Alonso J.I. Performance evaluation of a proposed two-hop D&F co-operative 5G network using SDR platform. 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Spring), Helsinki, Finland, 2022, pp. 1–5.
11. Izydorczyk T., Tavares F.M.L., Berardinelli G., Mogenssen P. A USRP-based multi-antenna testbed for reception of multi-site cellular signals. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 162723–162734.
12. Zhang P., Xu J., Zhong S., Feng H., Huang L., Yuan T. Design of reconfigurable SDR platform for antenna selection aided MIMO communication system, Aalborg, Denmark. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 169267–169280.
13. Schwind A., Berlt P., Lorenz M., Schneider C., Hein M.A. Implementation of a MIMO channel emulator for over-the-air LTE testing using software defined radio. 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC), Freiburg, Germany, 2018, pp. 307–310.
14. Thameur H.B., Dayoub I. SDR Implementation of a Real-Time Testbed for Spectrum Sensing Under MIMO Time-Selective Channels for Cognitive Radio Applications, Valenciennes, France. *IEEE Sensors Letters*, 2021, vol. 5, no. 8, Art. no. 7002704.
15. Sabra A., Berbinau M., Pajusco P., Amghar J.E., Abdelghany A., Maye C. Sub-6ГГц MIMO channel sounders for railway environments. *Journées d'études Propagation Radioélectrique 2023*, Rennes, France, 2023, pp. 1–4. Available at: <https://hal.science/hal-04705606v1> (дата обращения: 20.01.2026).
16. Hussein Z., Francois S., Oumaya B., Thierry V. SYLOIN: measuring angle of arrival of LoRa signals using

- software defined radio. 2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Lloret de Mar, Spain, 2021, pp. 1–8.
17. USRP B210. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (accessed: 20 January 2026).
18. Rares B., Codau C., Pastrav A., Palade T., Hedesiu H., Balauta B. Experimental evaluation of AoA algorithms using NI USRP software defined radios. 2018 17th RoEduNet Conference: Networking in Education and Research (RoEduNet), Cluj-Napoca, Romania, 2018, pp. 1–6.
19. Meaney P., Hartov A., Bulumulla S., Raynolds T., Davis C., Schoenberger F., Richter S., Paulsen K. A 4-channel, vector network analyzer microwave imaging prototype based on software defined radio technology. *Review of Scientific Instruments*, 2019, vol. 90, no. 4, pp. 1–14.
20. Vishnevskiy V.M., Lyakhov A.I., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii* [Broadband wireless information networks]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 542 p. (in Russ.).
21. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2016, pp. 285–318.
22. Özyurt S., Simon E.P., Torlak M. A hybrid uplink multiple access method based on NOMA and SDMA, Ankara, Turkey. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 89265–89276.
23. Sheremet N.V., Fokin G.A. *Chetyrekhlementnaya antennaya reshyotka na baze SDR platform s nanosekundnoy sinkhronizatsiei* [Four-element antenna array based on SDR platforms with nanosecond synchronization]. *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya Sankt-Petersburgskogo NTO RES im. A.S. Popova, posvyashchennaya Dnyu radio* [Scientific and technical conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day], St. Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2025, no. 1(80), pp. 136–140 (in Russ.).
24. *Metrotek. Server tochnogo vremeni Metronom-PTP-1U* [Metrotek. Precision time server Metronom-PTP-1U] (in Russ.). Available at: <https://metrotek.ru/?p=4209> (accessed: 20 January 2026).
25. *Metrotek. Translyatory Radius 50-T. Metronom-T* [Metrotek. Radius-50-T, Metronom-T translators] (in Russ.). Available at: <https://kbmetrotek.ru/metronom-t/> (accessed: 20 January 2026).
26. USRP B200mini. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-b200mini/> (accessed: 20 January 2026).
27. USRP X300. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/x300-kit/> (accessed: 20 January 2026).
28. USRP N320. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-n320/> (accessed: 20 January 2026).
29. USRP N321. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-n320/> (accessed: 20 January 2026).
30. USRP X410. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/usrp-x410/> (accessed: 20 January 2026).
31. OctoClock G CDA 2990. Ettus Research. Available at: <https://www.ettus.com/all-products/octoclock-g/> (accessed: 20 January 2026).
32. UHD Python API. Available at: https://kb.ettus.com/UHD_Python_API (accessed: 20 January 2026).
33. MatLab. Available at: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (accessed: 20 January 2026).
34. Communications Toolbox Support Package for USRP Radio. Available at: <https://www.mathworks.com/help/comm/usrpradio/ug/install-support-package-for-usrp-radio.html> (accessed: 20 January 2026).
35. Synchronization and MIMO Capability with USRP Devices. Available at: https://kb.ettus.com/Synchronization_and_MIMO_Capability_with_USRP_Devices (accessed: 20 January 2026).
36. GNU Radio. Available at: <https://www.gnuradio.org/> (accessed: 20 January 2026).
37. Gross F.B. *Smart antennas for wireless communications with Matlab*. New York, McGraw-Hill, 2005, 187 p.
38. USRP-2932 Specifications. Available at: <https://www.farnell.com/datasheets/3752197.pdf> (accessed: 20 January 2026).
39. Fokin G.A., Sheremet N.V. *Postanovka zadachi eksperimentalnoy aprobatsii mnogoantennykh sistem na osnove programmno konfiguriruemogo radio* [Problem statement for experimental testing of multi-antenna systems based on software defined radio]. *Podgotovka professionalnykh kadrov v magistrature v epokhu tsifrovoy transformatsii (PKM-2024): sbornik luchshikh dokladov V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy i nauchno-metodicheskoy konferentsii magistrantov i ikh rukovoditeley* [Training of master's degree professionals in the era of digital transformation: Proceedings of the 5th All-Russian scientific-technical and scientific-methodical conference of master's students and their supervisors], in 2 vols, St. Petersburg, 2025, vol. 1, pp. 125–131 (in Russ.).

Nikita V. Sheremet

Postgraduate student, Department of Wireless Technologies and Systems, Saint Petersburg State University of Telecommunications
named after Prof. M.A. Bonch-Bruевич (SPbSUT)
22/1 Bolshevikov Ave., Saint Petersburg, Russia, 193232
ORCID: 0009-0006-7694-3445
Phone: +7-928-848-43-54
Email: sheremet.nv@sut.ru

Grigory A. Fokin

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head, Department of Wireless Technologies and Systems SPbSUT
22/1 Bolshevikov Ave., Saint Petersburg, Russia, 193232
ORCID: 0000-0002-5358-1895
Phone: +7-812-305-12-68
Email: fokin.ga@sut.ru

Received: 23.01.2026.

Accepted: 04.05.2026.