



ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ НОВОГО УЧЕБНОГО КУРСА «ТЕХНОЛОГИИ УМНЫХ АНТЕНН 5G»

Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Аннотация—Интерес к технологиям умных антенн обусловлен развитием сверхплотных сетей пятого 5G и последующих B5G поколений диапазона миллиметровых волн, что подтверждается высокой публикационной активностью последних лет как в отечественном, так и в зарубежном научном сообществе. Вместе с научными публикациями в зарубежной литературе издаются и переиздаются учебные пособия по данному направлению. В то же время в отечественной научно-методической литературе на сегодняшний день отсутствует учебное пособие, раскрывающее новые подходы к изучению вопросов адаптивного диаграммообразования с использованием умных антенн применительно к сверхплотным сетям 5G и B5G. В настоящей работе выполняется анализ состояния проблемы в области интеллектуальных антенн и формулируется задача на разработку соответствующего учебного курса. **Предмет исследования.** Статья посвящена обзору современного состояния проблемы в области умных антенн на основе анализа отечественных источников. **Метод.** Анализ эволюции развития методов и средств технологий умных антенн. **Основные результаты.** Результатом настоящей работы является постановка задачи на разработку нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G». **Практическая значимость.** Проведенный анализ служит обоснованием актуальности и необходимости разработки нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G».

Ключевые слова—5G, антенные решетки, диаграммообразование, умные антенны.

Информация о статье

УДК 621.396.677

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 17.10.2022, принята к печати 20.12.2022.

Для цитирования: Фокин Г. А. Постановка задачи разработки нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G» // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Том 10. № 3. С. 60–73. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-60-73.



PROBLEM STATEMENT FOR THE DEVELOPING A NEW TRAINING COURSE «5G SMART ANTENNAS TECHNOLOGIES»

G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Corresponding author: grihafokin@gmail.com

Abstract—Interest in smart antenna technologies is due to the development of ultra-dense networks of the fifth 5G and subsequent B5G (*Beyond 5G*) generations of the millimeter-wave band (MMW, *millimeter-wave – mmWave*), which is confirmed by the high publication activity of recent years both in the native, and in foreign scientific community. Together with scientific publications in foreign literature, textbooks in this area are published and republished. At the same time, in the native scientific and methodological literature, there is currently no textbook that reveals new approaches to studying the issues of adaptive beamforming using smart antennas in relation to ultra-dense 5G and B5G networks. In this paper, an analysis of the state of the problem in the field of intelligent antennas is carried out and a task is formulated for the development of an appropriate training course. **Subject of study.** The article is devoted to a contemporary review of the state of the problem in the field of smart antennas based on the analysis of Russian sources. **Method.** Analysis of the evolution of the development of methods and means of smart antenna technologies. **Main results.** The result of this work is the setting of the task for the development of a new training course "Technologies of smart antennas 5G". **Practical significance.** The analysis carried out serves as a rationale for the relevance and necessity of developing a new training course "Technologies of smart antennas 5G".

Keywords—5G, antenna arrays, beamforming, smart antennas.

Article info

Article in Russia.

Received 17.10.2022, accepted 20.12.2022.

For citation: Fokin G.: Problem Statement for the Developing a New Training Course «5G Smart Antennas Technologies» // Telecom IT. 2022. Vol. 10. Iss. 3. pp. 60–73. DOI 10.31854/2307-1303-2022-10-3-60-73.



Введение

Интерес к технологиям умных антенн (*Smart Antennas*) обусловлен развитием сверхплотных сетей пятого и последующих поколений [1, 2, 3] диапазона миллиметровых волн (ММВ). Если для сетей 2G–4G диапазона дециметровых волн (ДМВ) изучались вопросы пространственно-временного кодирования и пространственного мультиплексирования [4], то с развитием сверхплотных сетей 5G, устройства которых работают в диапазоне ММВ с использованием узконаправленных лучей [5] в режиме адаптивного диаграммообразования (ДО) [6, 7, 8], новые учебно-методические вопросы построения и функционирования многоантенных систем целесообразно актуализировать и систематизировать в инновационном учебном курсе «Технологии умных антенн 5G», формализовав в рамках известного математического аппарата систем MIMO (Multiple Input – Multiple Output) [9] новые вопросы диаграммообразования устройств 5G [6, 7, 8], работающих узконаправленными лучами с использованием Smart антенн.

Адаптивная обработка сигналов с использованием цифровых антенных решеток (АР) известна уже достаточно давно [10, 11], однако широкого применения адаптивные антенные решетки [12, 13] в сетях подвижной радиосвязи общего пользования в период 2000–2010 не нашли, так как проектируемые и эксплуатируемые сети подвижной связи третьего 3G и четвертого 4G поколений, начиная с 2000-х и 2010-х годов соответственно, работали в диапазоне ДВМ [14]. При этом многоэлементные АР могли реализовываться преимущественно в оборудовании только стационарных базовых станций. Данное обстоятельство объясняется необходимым пространственным разнесом элементов антенных решеток, сопоставимым с длиной волны, что препятствовало реализации алгоритмов пространственной обработки в портативных пользовательских устройствах.

Направление пространственной обработки сигналов, известное в зарубежной литературе под термином MIMO системы [9], помимо адаптивного диаграммообразования [15], включает в себя достаточно широкий круг вопросов, в том числе, классический разнесенный прием, разнесенную передачу, пространственно-временное кодирование и пространственное мультиплексирование [4] и др. Данные вопросы образуют научно-методическую основу однопользовательских MIMO-систем SU-MIMO (*Single User MIMO*).

Проектируемые сверхплотные сети пятого поколения 5G работают в диапазоне миллиметровых волн и позволяют реализовать пространственную обработку сигналов как в оборудовании стационарных базовых станций, так и в портативных пользовательских устройствах [16, 17, 18], поэтому вопросы диаграммообразования умных антенн приобретают актуальность и востребованность уже не только в узкоспециализированных системах, но и в сетях общего пользования. Данное обстоятельство приводит к необходимости совершенствования научно-методического обеспечения и подтверждается переизданиями зарубежной литературы по умным антеннам (*Smart Antennas*), например [19, 20].

Однако в отечественной научно-методической литературе на сегодняшний день отсутствует актуальное учебное пособие, раскрывающее на основе ставшего уже классическим аппарата MIMO-систем новые вопросы адаптивного диаграммообразования с использованием умных антенн применительно к сверхплотным сетям пятого и последующих поколений. В то же у автора в данной области



уже есть существенный научный задел, в частности, по диаграммообразованию на основе позиционирования LAB (*Location-Aware Beamforming*) [21], что особенно актуально для сверхплотных сетей 5G и B5G.

Ожидаемым результатом изучения нового предлагаемого учебного курса «Технологии умных антенн 5G» являются компетенции для разработки алгоритмов пространственной обработки сигналов устройств сетей пятого и последующих поколений. Концепция учебного курса заключается в получении знаний и навыков анализа и синтеза новых алгоритмов как в пакете расширения Phased Array System Toolbox (PAST)¹, так и с использованием примитивных функций специального программного обеспечения (СПО) Matlab. Первый подход с использованием PAST позволяет оперативно верифицировать эффективность работы алгоритма как в отдельной радиолинии на физическом уровне в однопользовательском режиме SU-MIMO, так и на канальном уровне сети радиодоступа в многопользовательском режиме MU-MIMO (*Multi User MIMO*). Второй подход с использованием примитивных функций Matlab позволяет реализовать и отладить алгоритмы на языках низкого уровня. В качестве методического подхода, который отличает предлагаемый курс от существующих, планируется использовать хорошо зарекомендовавший себя ранее авторский подход с приведением скриптов Matlab по изучаемым вопросам. Данный подход успешно используется в зарубежных пособиях, например [19, 20], и уже апробирован в работах автора [4, 16, 18].

Актуальность нового учебного курса «Технологии умных антенн 5G» обусловлена рядом факторов. Во-первых, смена поколений подвижной связи в очередном десятилетии ознаменовала переход к сверхплотным сетям пятого и последующих поколений, когда на один квадратный метр может приходиться одно устройство [1, 2, 3]; в таких условиях актуальными становятся вопросы пространственного уплотнения одновременных передач SDMA (*Spatial Division Multiple Access*) за счет узконаправленных лучей, называемых pencil beams [5]. Во-вторых, переход в диапазон миллиметровых волн знаменует собой революционные изменения на уровне радиоинтерфейса за счет компактной реализации многоэлементных антенных решеток не только в стационарных базовых станциях, но и в портативных пользовательских устройствах; новые возможности пространственной обработки сигналов на физическом уровне приводят к появлению новых технических решений управлению лучом на канальном уровне [6]. В-третьих, наиболее перспективными и востребованными свойствами умных антенн является пространственная фильтрация полезного сигнала SOI (*Signal of Interest*) и помех SOI (*Signal not of Interest*), для практической реализации которой необходимо предварительное определение направлений их прихода DOA (*Direction of Arrival*) и ухода (*Direction of Departure*) и последующее адаптивное ДО [7, 8].

Инновационность образовательного подхода в новом учебном курсе заключается в практическом закреплении изученного материала с использованием модельно-ориентированного проектирования в среде Matlab. Востребованность нового учебного курса, как образовательного продукта, обоснована развитием

¹ Phased Array System Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html> (дата обращения: 27.12.2022).



зарубежных аналогов [19, 20] и отсутствием актуальных отечественных прототипов. Предлагаемый новый учебный курс дополняет и развивает содержание существующих пособий по MIMO системам [4, 9] и включает инновационную составляющую по актуальным вопросам ДО в сетях пятого и последующих поколений, в которых автором за последние годы наработан существенный научно-технический задел [5, 6, 7, 8].

Материал настоящей работы организован далее следующим образом. В разделе 0 выполняется анализ состояния проблемы по умным антеннам с использованием работ Слюсара В.И. [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38], который внес существенный вклад в развитие предметной области в русскоязычном научном сообществе. Раздел 0 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

Анализ состояния проблемы по «умным» антенным решеткам

Термин цифрового формирования диаграмм направленности антенн (ДНА) с помощью цифровых антенных решеток (ЦАР), или цифрового диаграммообразования (ЦДО), встречается в работах [22, 23].

Рис. 1 иллюстрирует структуру приемопередающей станции с цифровым ДО. Особенностью схемотехники приемопередающей диаграммообразующей схемы (ДОС) является наличие наряду с приемным сегментом аналогичной по составу передающей подсистемы, а также общей АР; цифровой передающий сегмент ДОС идентичен приемному с точностью до замены в нем аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и характеризуется инверсией алгоритмов обработки сигналов [16, 17, 18]. Приемник ДОС включает маломощный усилитель (МШУ) вместе с входным полосовым фильтром и АЦП, после которого сигнал поступает в блок цифровой обработки сигналов (ЦОС), где производится пространственная обработка сигнала (ПОС): весовая обработка с коэффициентами w_i при приеме и v_i при передаче, где $i = 1, \dots, N$ – индекс элемента АР. Передатчик ДОС включает ЦАП, усилитель мощности (УМ) вместе с выходным фильтром усиленного сигнала. В приемопередатчике используют однократное аппаратное преобразование частоты: при приеме с радиочастоты RF (*Radio Frequency*) в основную полосу информационных частот ВВ (*Baseband*); при передаче с RF в ВВ. ПОС в структуре радиостанции с ДО осуществляется в основной полосе частот ВВ в цифровом виде с применением умножения на коэффициенты w_i и v_i . При аналоговом ДО коэффициенты применяются к аналоговому сигналу на радиочастоте RF. Цифровое ДО является более эффективным, однако сложнее с точки зрения аппаратной реализации; аналоговое ДО проще в аппаратной реализации, однако обладает меньше гибкостью в формировании и управлении лучом.

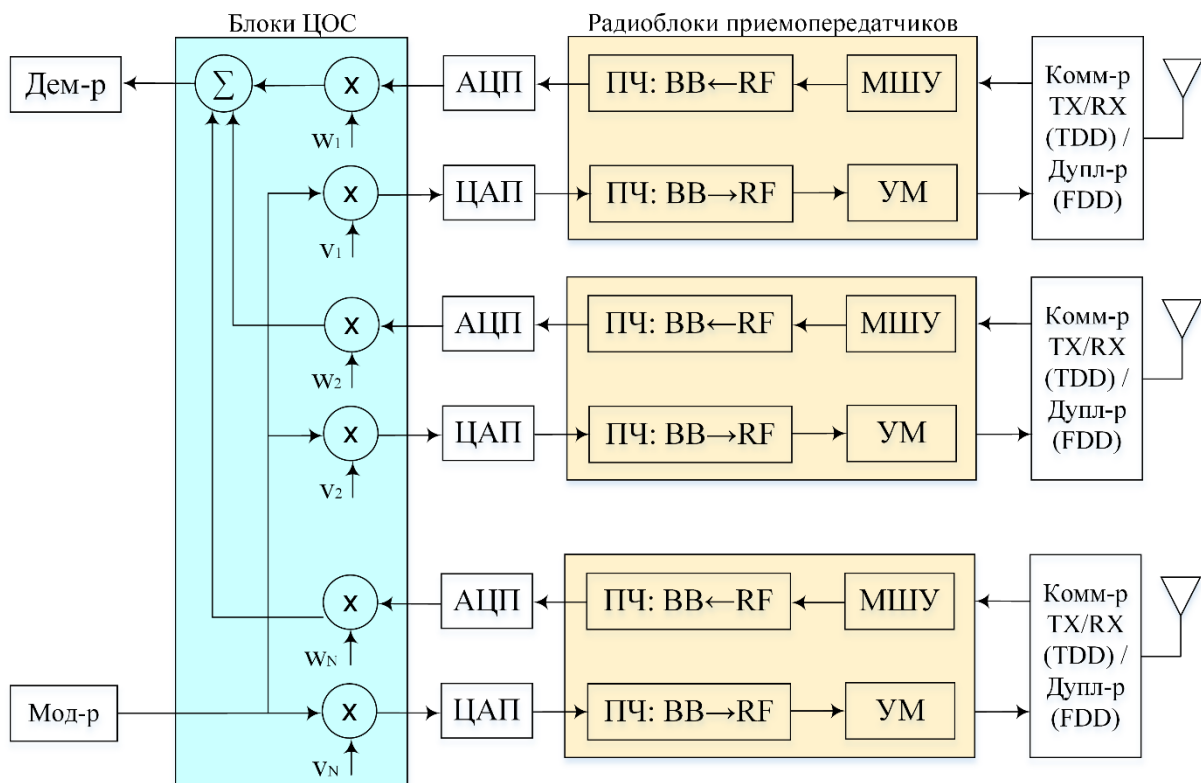


Рис. 1. Структура приемопередающей станции с цифровым ДО

Представленная ДОС, в общем случае, является многолучевой и позволяет, в принципе, формировать на передачу и/или на прием несколько парциальных лучей в заданных направлениях [23]. Среди преимуществ схем цифрового ДО выделяется возможность пространственной селекции с программным сопровождением подвижных объектов отдельными лучами, в том числе, возможность ориентации максимума ДН в направлении источников/приемников полезных сигналов SOI и минимумов или глубоких «провалов» ДН в направлении источников помех SNOI. Рис. 2 иллюстрирует сценарий пространственной фильтрации при цифровом формировании луча (ЦФЛ) для работы на передачу со стороны базовой станции (рис. 2а) и сценарий пространственной фильтрации при ЦФЛ для работы на прием со стороны пользовательского устройства (рис. 2б).

Гибкое управление ориентацией и количеством провалов в цифровых диаграммах направленности для режекции SNOI компенсирует проблему внутрисистемных помех, а также сужает зоны неустойчивого приема и существенно увеличивает дальность радиосвязи [24]. В сверхплотных сетях диапазона ММВ увеличение зоны радиопокрытия компенсирует затраты на реализацию систем с цифровым диаграммообразованием. При этом, благодаря «интеллектуальной» антенной системе (*Smart Antenna*) приемопередающие устройства могут формировать заданные лучи приема/передачи сигналов персонально для каждой радиолинии. Ранние эксперименты по сопровождению лучом подвижного устройства на фоне помех показали, что требуемое качество связи сохранялось лишь при угловых расстояниях между передатчиком и приемником свыше половины



ширины главного луча ДНА [24]; при этом время на формирование набора весовых коэффициентов, т. е. время ДО, исчислялось сотней наносекунд.

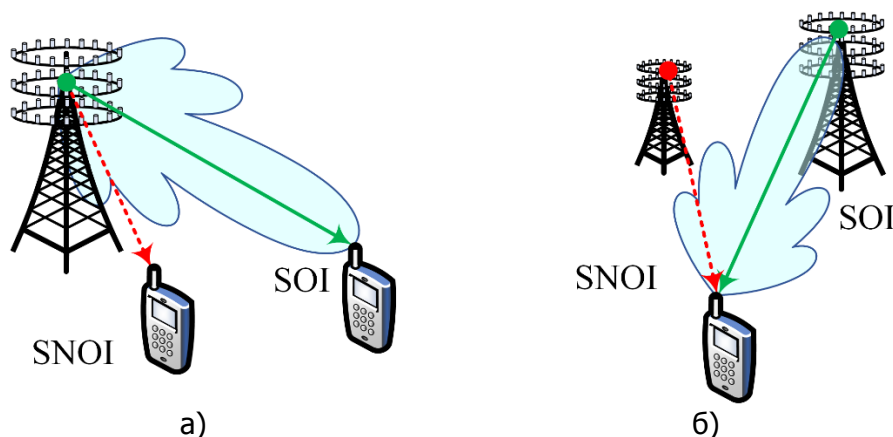


Рис. 2. Сценарии пространственной фильтрации SOI/SNOI:
 а) пространственная фильтрация при ЦФЛ на передачу у базовой станции;
 б) пространственная фильтрация при ЦФЛ на прием у пользовательского устройства

Приемопередающие цифровые антенные решетки и методы цифрового диаграммообразования представляют интерес не только для радиосвязи, но и для перспективных радиолокационных станций (РЛС) [25]: цифровое адаптивное диаграммообразование в активных АР обеспечивает оптимизацию уровня мощности зондирования и времени «контакта» с целью, необходимого для подавления помеховых отражений; формирователь ДН при этом может устанавливать «нули» в области боковых лепестков и на краях главного.

Помимо конструктива антенной решетки не менее важную роль в технологиях ЦДО играют модули многоканальной цифровой обработки сигналов [26]. Для аппаратной реализации диаграммоформирующих модулей обосновывается подход с использованием программируемых логических интегральных схем (ПЛИС, FPGA – *Field Programmable Gate Arrays*) Xilinx [27].

Особенности использования фазированной антенной решетки (ФАР) в системе спутниковой связи Thuraya рассмотрено в [28]. В бортовой приемопередающей ФАР космического аппарата (КА) Thuraya выполняется цифровое формирование лучей (ЦФЛ, *Digital Beamforming*); так, при 128 активных дипольных элементах L-диапазона бортовой комплект ЦОС позволяет формировать одновременно до 300 лучей в соответствии с числом наземных сот. ЦФЛ на борту КА позволяет эффективно реализовывать динамическую адаптацию обслуживаемой зоны радиопокрытия на поверхности Земли путем оперативного перенацеливания цифровых приемопередающих лучей на наземные соты, в том числе, при адаптации к изменениям в нагрузке и оптимизации трафика. В бортовой ФАР группа лучей, синтезируемая по алгоритмам быстрого преобразования Фурье (БПФ), является по сути, совокупностью «пространственно-частотных фильтров», каждый из которых пропускает строго определенный набор сигналов и подавляет остальные, одновременно принимаемые в широком пространственном секторе, как помехи [28]. Для реализации ЦФЛ в системе Thuraya пришлось пересмотреть традиционные подходы ФАР. С точки зрения приема, в отличие



от аналоговых ФАР, в каждом приемном канале ЦАР вместо фазовращателей устанавливают АЦП (рис. 1); при этом тактирование АЦП осуществляется от единого задающего генератора так, чтобы АЦП всех каналов работали синхронно по раскрытию ЦАР. Специфика функционирования блока ЦОС ЦАР заключается в том, что отсчеты сигналов поступают не в темпе АЦП, а с интервалом, необходимым для выполнения операций ЦДО; так, если темпы ДО исчисляются сотнями килогерц, то скорость АЦП может исчисляться сотнями мегагерц, поэтому в ЦАР используют согласование темпов ДО с периодом дискретизации АЦП. При работе на общую антенну приемный и передающий сегменты подключают к антенным элементам через коммутаторы (рис. 1).

Удешевление ЦАР с возможностями ЦДО в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн было отмечено еще в начале нулевых годов [29]. ЦДО при этом реализуется следующим образом: цифровые комплексные сигналы с информацией о мгновенном амплитудно-фазовом распределении электромагнитного поля на раскрытии АР поступают в схему ЦДО в виде отсчетов с АЦП, которые тактируются от общего генератора тактовых импульсов. На приеме ЦДО осуществляется программно посредством цифровых сигнальных процессоров DSP (*Digital signal Processor*) либо ПЛИС FPGA, реализующих синфазное взвешенное суммирование напряжений всех первичных приемных каналов для интересующих угловых направлений. На передаче ЦДО также осуществляется программно: полученный в DSP или FPGA массив цифровых напряжений сигнала поступает на ЦАП, с выходов которых после усиления мощности, фильтрации и переноса по частоте аналоговые сигналы подаются на соответствующие излучатели АР [29]. В частности, в [29] отмечается, что использование FPGA в отличие от DSP-схемотехники позволяет жестко синхронизировать пошаговое выполнение алгоритмов ЦОС в многоканальных системах ЦДО благодаря отказу от использования аппаратных прерываний, поэтому FPGA-направление в пространственной обработке сигналов существенно потеснило рынок DSP систем. Также в [29] отмечается, что наиболее узким местом современных технологий ЦДО является недостаточное быстродействие АЦП и ЦАП, а производительность FPGA и DSP опережают возможности ввода-вывода цифровых данных. Для РЛС, разработанных в 90-х годах, ЦДО реализовывалось следующим образом: классический метод БПФ, либо Бартлета [39] рассматривался как аппарат первичного, грубого углового обнаружения целей, по результатам которого в узких пространственных секторах далее было рекомендовано использовать методы сверхразрешения, среди которых наиболее известны процедуры Кейпона [40] и MUSIC [41].

В работе [30] рассмотрен алгоритм и методики коррекции амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) приемных каналов на примере плоской ЦАР с целью выравнивания комплексных коэффициентов передачи трактов при ЦФЛ на прием; после формирования коэффициентов коррекции по некоторому юстировочному сигналу текущие значения выходных напряжений подвергаются взвешиванию с использованием рассчитанных корректирующих коэффициентов. В работе [31] рассмотрен алгоритм и методики коррекции АЧХ передающих каналов на примере плоской активной ЦАР при ЦФЛ на передачу.



В работе [32] технологии ЦАР называют «венцом развития ... концепции программно реконфигурируемого радио (*Software Defined Radio*)» за счет возможности адаптивного ЦФЛ и их оперативного перенацеливания в зависимости от территориального распределения устройств (рис. 2). Процесс ЦДО можно представить посредством БПФ над отсчетами комплексных значений N приемопередающих каналов ЦАР в отдельный момент времени. Например, набор пространственных характеристик направленности $F_i(\varphi)$ для линейной эквидистантной антенной решетки можно представить как:

$$F_i(\varphi) = \frac{\sin \frac{N}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi - \frac{2\pi i}{N} \right)}{\sin \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \sin \varphi - \frac{2\pi i}{N} \right)} \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, N$ – индекс элемента АР, φ – азимут угла прихода/ухода; d – расстояние между элементами АР; λ – длина волны; N – общее число элементов АР. Алгоритм Кейпона [40], например, сводится к поиску локальных максимумов функции [32]:

$$H(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{F}^T(\varphi) \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F}(\varphi)} \quad (2)$$

где $\mathbf{F}(\varphi)$ – вектор известных значений ДНА каждого из каналов ЦАР с элементами $F_i(\varphi)$; корреляционная матрица откликов каналов ЦАР, сформированная по серии из K временных отсчетов, определяется:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k^* \quad (3)$$

где \mathbf{u}_k – вектор сигналов, полученный в результате БПФ над выходами первичных приемных каналов ЦАР. Известно, что алгоритм Кейпона обеспечивает достижение сверхрелеево-разрешающей способности по направлениям прихода сигналов φ для двух источников в линейной ЦАР [40]. Эксперименты подтверждают возможность подавления помехи в 8-элементной ЦАР более чем на 30 дБ не только по боковым лепесткам, но и в главном луче ДН при среднеквадратическом отклонении коэффициентов усиления аналоговых приемных каналов 0,5 дБ и величине фазовых ошибок не более 3° [32].

В работе [33] представлен анализ элементной базы и системо- и схемотехнических подходов к реализации ЦАР на середину нулевых годов, в том числе, идеология многоуровневого масштабирования. В [35] рассмотрены принципы построения ММО систем, а также особенности пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС) в устройствах стандарта IEEE 802.11. В [35] проанализированы преимущества использования ЦАР на борту КА в цифровой мобильной спутниковой связи и отмечена:

- а) большая степень свободы в выборе формы и направлений ДНА за счет программной смены весовых коэффициентов фазирования;
- б) возможность пространственной селекции при ориентации парциальных лучей на индивидуальные пользовательские устройства и/или группы устройств;



в) адаптивное формирование лучей, позволяющее повысить помехоустойчивость радиолиний посредством глубоких провалов ("нулей") в ДНА AP в направлении SNOI.

В [36] проанализированы особенности реализации ЦАР в мобильных терминалах спутниковой связи на примере проекта SANTANA (*Smart ANTenna termiNA*). Также рассмотрены вопросы ЦФЛ посредством альтернативной ЦАР концепции – использование активных антенных систем на основе метаматериалов, принцип действия которых заключается в сканировании пространства посредством изменения электромагнитных параметров материала антенны.

Итоги развития схмотехники и элементной базы ЦАР систематизированы в [37, 38], где условно выделяется четыре этапа.

Первый этап (начало 90-х годов) связан с использованием одноканальных микросхем АЦП и с реализацией цифровой обработки сигналов в приемных каналах на основе отдельно взятых микросхем сумматоров, регистров и умножителей [38].

Второй этап (начала 2000-х годов) связан с появлением на рынке промышленных компьютеров и интерфейсных плат стандартов ISA и PCI, что позволило использовать для каждого приемного канала ЦАР свой модуль DSP, конструктивно разграничив цифровой и аналоговый сегменты ЦАР [38]; однако необходимость жесткой синхронизации первичной цифровой обработки сигналов во всех приемных каналах ЦАР вынудила в дальнейшем отказаться от модулей DSP, заменив их на специально разработанные модули ПЛИС FPGA.

Третий этап связан с переходом к использованию стандартов VME и CompactPCI [37], а также применению 4- и 8-канальных микросхем АЦП в многоканальных модулях ЦОС. Основными принципами данного периода стала максимальная интеграция ЦОС с установкой на одной плате формата 6U до 32 и более каналов АЦП сигналов с использованием обработки их выходных отсчетов в FPGA. Главным недостатком схмотехники третьего этапа стала недостаточная пропускная способность интерфейсов VME и CompactPCI, ограничивавшая число каналов ЦАР и темп обновления данных по ее выходам.

Нынешний, четвертый этап, характеризуется переориентацией ЦАР на использование компьютерных модулей и интерфейсов стандартов PCI Express, а также АЦП и ЦАП от Analog Devices (ADI) и Texas Instruments (TI). Современные прототипы позволяют осуществлять синтез аналоговых сигналов непосредственно на несущей для диапазона частот сетей 4G, однако для диапазона MMB сетей 5G пока по-прежнему приходится использовать промежуточное преобразование частоты. В работе [38] отмечено, что вместе с переходом к массовой реализации систем Massive MIMO в сетях 5G получит *развитие тенденция к интеграции радарных и телекоммуникационных систем* в радарно-коммуникационные комплексы.

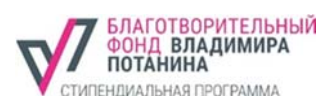
Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для современных и перспективных систем цифрового диаграммообразования сетей пятого и последующих поколений основные процедуры формирования, передачи, приема и об-



работки можно промоделировать посредством комплексных сигналов, содержащих полную информацию об амплитудно-фазовом распределении, используемом в схемах цифрового формирования луча на прием и передачу. Подобное моделирование целесообразно проводить в специальном программном обеспечении Matlab с использованием примитивных функций, а также с использованием специальных функции пакета расширения Phased Array System Toolbox для анализа работы как на физическом уровне отдельной радиолинии в однопользовательском режиме SU-MIMO, так и на канальном уровне сети радиодоступа в многопользовательском режиме MU-MIMO. Выполненный в настоящей работе анализ состояния проблемы в области умных антенн служит обоснованием для разработки соответствующего учебного курса.

Благодарность. Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей магистратуры 2021/2022 Стипендиальной программы Владимира Потанина.



Литература

1. Кучерявый А. Е. Сети связи ожидает блестящее наукоёмкое будущее // Электросвязь. 2022. № 1. С. 3–5.
2. Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 32–43. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
3. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. № 11. С. 52–56.
4. Фокин Г. А. Принципы и технологии цифровой связи. Основы расчетов: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2014. 151 с.
5. Фокин Г. А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31.
6. Фокин Г. А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием // Т-Сотт-Телекоммуникации и Транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 4–21.
7. Фокин Г. А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 1. Оценка помех // Первая Миля. 2021. № 3 (95). С. 66–73.
8. Фокин Г. А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 2. Оценка разности устройств // Первая Миля. 2021. № 4 (96). С. 66–73.
9. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 242 с.
10. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
11. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
12. Григорьев В. А., Щесняк С. С., Гулюшин В. Л., Распаев Ю. А., Лагутенко О. И., Щесняк А. С. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-х ч. Ч. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 179 с.
13. Григорьев В. А., Щесняк С. С., Гулюшин В. Л., Распаев Ю. А., Хворов И. А., Щесняк А. С. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-х ч. Ч. 2. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 118 с.
14. Вишневикий В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. Москва: Техносфера, 2005. 591 с.
15. Нечаев Ю. Б., Борисов Д. Н., Пешков И. В. Алгоритмы диаграммообразования адаптивных антенных решеток в условиях многолучевого распространения радиоволн // Экономика. Информатика. 2012. № 1 (120). С. 194–202.
16. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ. 2020. 558 с.



17. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13, 05.12.04 / Григорий Алексеевич Фокин. Санкт-Петербург, 2021. 499 с.
18. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком. 2021. 456 с.
19. Gross F. B. Smart antennas for wireless communications with MATLAB. McGraw Hills, 2005. 288 p.
20. Gross F. B. Smart Antennas with MATLAB. McGraw-Hill Education, 2015. 400 p.
21. Фокин Г. А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Карточка проекта, поддержанного РФФИ. URL: <https://rscf.ru/project/22-29-00528/> (дата обращения: 27.12.2022).
22. Слюсар В. И. Основные понятия теории и техники антенн. Антенные системы евклидовой геометрии. Фрактальные антенны. SMART-антенны. Цифровые антенные решетки (ЦАР). MIMO-системы на базе ЦАР. Особенности построения суперлинейных усилителей // Разделы 9.3-9.9 в книге «Широкополосные беспроводные сети передачи информации». М.: Техносфера, 2005. С. 498–569.
23. Слюсар В. И. Цифровое диаграммообразование–базовая технология перспективных систем связи // Радиоматор. 1999. № 8. С. 58–89.
24. Слюсар В. Цифровое формирование луча в системах связи: будущее рождается сегодня // Электроника: наука, технология, бизнес. 2001. № 1. С. 6–13.
25. Слюсар В. Цифровые антенные решетки–будущее радиолокации // Электроника: наука, технология, бизнес. 2001. № 3. С. 42–47.
26. Слюсар В. Схемотехника цифрового диаграммообразования. Модульные решения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2002. № 1. С. 46–53.
27. Слюсар В. И. Модульные решения в схемотехнике цифрового диаграммообразования // Радиоэлектроника. 2003. № 12. С. 48–62.
28. Слюсар В. И. Фазированная антенная решетка системы Thuraya // Сети и телекоммуникации. 2002. № 5. С. 54–58.
29. Слюсар В. И. Цифровые антенные решетки: аспекты развития // Специальная техника и вооружение. 2002. № 1-2. С. 17–23.
30. Слюсар В. И. Коррекция характеристик приемных каналов цифровой антенной решеткой по контрольному источнику в ближней зоне // Радиоэлектроника. 2003. № 1. С. 44–52.
31. Слюсар В. И., Титов И. В. Метод коррекции характеристик передающих каналов активной ЦАР // Радиоэлектроника. 2004. № 8. С. 14–20.
32. Слюсар В. Smart-антенны пошли в серию // Электроника: наука, технология, бизнес. 2004. № 2. С. 62–65.
33. Слюсар В. Схемотехника цифровых антенных решеток. Грани возможного // Электроника: наука, технология, бизнес. 2004. № 8. С. 34–40.
34. Слюсар В. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов // Электроника: наука, технология, бизнес. 2005. № 8. С. 52–59.
35. Слюсар В. Цифровые антенные решетки в мобильной спутниковой связи // Первая миля. 2008. № 4. С. 10–15.
36. Слюсар В. Перспективные технологии антенных решеток мобильных терминалов спутниковой связи // Технологии и средства связи. 2014. № 4. С. 32–36.
37. Слюсар В. Развитие схемотехники ЦАР: некоторые итоги. Часть 1 // Первая миля. 2018. № 1. С. 72–77.
38. Слюсар В. Развитие схемотехники ЦАР: некоторые итоги. Часть 2 // Первая миля. 2018. № 2. С. 74–78.
39. Bartlett, M.S. Periodogram analysis and continuous spectra // Biometrika. 1950. Vol. 37, No. 1-2, pp. 1–16.
40. Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. 1969. Vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418
41. Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34, no. 3, pp. 276–280.



References

1. Kucheryavy A. E. The communications network has a bright, science-intensive future // *Electrosvyaz*. 2022. No. 1. pp. 3-5.
2. Volkov A. N., Mutkhanna A. S. A., Kucheryavy A. E. Communication networks of the fifth generation: on the way to networks 2030 *Telecom IT*. 2020. Vol. 8. Iss. 2. pp. 32–43. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
3. Kucheryavy A.E., Borodin A.S., Kirichek R.V. Communication networks 2030 // *Elektrosvyaz*. 2018. No. 11. pp. 52–56.
4. Fokin G. A. Principles and technologies of digital communication. Fundamentals of calculations: textbook. St. Petersburg: SPbGUT, 2014. 151 p.
5. Fokin G. A. Beam alignment procedures for 5G NR devices // *Electrosvyaz*. 2022. No. 2. pp. 26–31.
6. Fokin G. A. Modeling of ultra-dense 5G radio access networks with beamforming // *T-Communications and Transport*. 2021. V. 15. No. 5. pp. 4–21.
7. Fokin G. Diagram formation models in superdense 5G radio access networks. Part 1. Evaluation of interference // *First Mile*. 2021. No. 3 (95). pp. 66–73.
8. Fokin G. A. Diagram formation models in ultra-dense 5G radio access networks. Part 2. Evaluation of device spacing // *First Mile*. 2021. No. 4 (96). pp. 66–73.
9. Bakulin M. G., Varukina L. A., Kreindelin V. B. MIMO technology: principles and algorithms. M.: Hotline-Telecom, 2014. 242 p.
10. Monzingo R. A., Miller T. W. Adaptive antenna arrays: an introduction to theory / per. from English. ed. V. A. Lexachenko. Moscow: Radio and communication, 1986. 448 p.
11. Widrow B., Stearns S. Adaptive signal processing. Moscow: Radio and communication, 1989. 440 p.
12. Grigoriev V. A., Schesnyak S. S., Gulyushin V. L., Raspaev Yu. A., Lagutenko O. I., Schesnyak A. S. Adaptive antenna arrays. Study guide in 2 parts. Part 1. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 179 p.
13. Grigoriev V. A., Schesnyak S. S., Gulyushin V. L., Raspaev Yu. A., Khvorov I. A., Schesnyak A. S. Adaptive antenna arrays. Study guide in 2 parts. Part 2. St. Petersburg: ITMO University, 2016. 118 p.
14. Vishnevsky V. M., Lyakhov A. I., Portnoy S. L., Shakhnovich I. V. Broadband wireless networks for information transmission. Moscow: Techno-sphere, 2005. 591 p.
15. Nechaev Yu. B., Borisov D. N., Peshkov I. V. Algorithms for diagram formation of adaptive antenna arrays under conditions of multipath propagation of radio waves // *Economics. Informatics*. 2012. No. 1 (120). pp. 194–202.
16. Fokin G. A. Network positioning technologies. SPb.: SPbGUT. 2020. 558 p.
17. Fokin G. A. A set of models and methods for positioning devices in fifth-generation networks. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.12.13, 05.12.04. St. Petersburg, 2021. 499 p.
18. Fokin G. A. 5G network positioning technologies. M.: Hot Line - Telecom. 2021. 456 p.
19. Gross F. B. Smart antennas for wireless communications with MATLAB. McGraw Hills, 2005. 288 p.
20. Gross F. B. Smart Antennas with MATLAB. McGraw-Hill Education, 2015. 400 p.
21. Fokin G. A. Location aware beamforming in mm-wave band ultra-dense radio access networks. Information about the project, supported by the Russian Science Foundation. URL: <https://rscf.ru/project/22-29-00528/> (27.12.2022).
22. Slyusar V. I. Basic concepts of the theory and technology of antennas. Antenna systems of Euclidean geometry. Fractal antennas. SMART antennas. Digital antenna arrays (DAR). MIMO systems based on DAR. Features of building superlinear amplifiers // Sections 9.3-9.9 in the book "Broadband wireless networks for information transmission". M.: Technosfera, 2005. pp. 498–569.
23. Slyusar V. I. Digital diagram formation is the basic technology of advanced communication systems // *Radioamator*. 1999. No. 8. pp. 58–89.
24. Slyusar V. Digital beamforming in communication systems: the future is born today // *Electronics: science, technology, business*. 2001. No. 1. pp. 6–13.



25. Slyusar V. Digital antenna arrays – the future of radar // Electronics: science, technology, business. 2001. No. 3. pp. 42–47.
26. Slyusar V. Digital Diagram Formation Circuitry. Modular solutions // Electronics: science, technology, business. 2002. No. 1. pp. 46–53.
27. Slyusar V. I. Modular solutions in digital diagramming circuitry // Radioelectronics. 2003. No. 12. pp. 48–62.
28. Slyusar V. I. Thuraya phased array antenna // Networks and telecommunications. 2002. No. 5. pp. 54–58.
29. Slyusar V. I. Digital antenna arrays: aspects of development // Special equipment and weapons. 2002. No. 1-2. pp. 17–23.
30. Slyusar V. I. Correction of the characteristics of the receiving channels of a digital antenna array by a control source in the near zone // Radioelectronics. 2003. No. 1. pp. 44–52.
31. Slyusar V. I., Titov I. V. Method for Correcting the Characteristics of Trans-mitting Channels of an Active CAR // Radioelectronics. 2004. No. 8. pp. 14–20.
32. Slyusar V. Smart antennas went into series // Electronics: science, technology, business. 2004. No. 2. pp. 62–65.
33. Slyusar V. Circuitry of digital antenna arrays. Limits of the possible // Electronics: science, technology, business. 2004. No. 8. pp. 34–40.
34. Slyusar V. MIMO systems: principles of construction and signal processing // Electronics: science, technology, business. 2005. No. 8. pp. 52–59.
35. Slyusar V. Digital antenna arrays in mobile satellite communications // First Mile. 2008. No. 4. pp. 10–15.
36. Slyusar V. Promising technologies of antenna arrays for mobile satellite communication terminals // Technologies and means of communication. 2014. No. 4. pp. 32–36.
37. Slyusar V. Development of DAR: some results. Part 1 // The first mile. 2018. No. 1. pp. 72–77.
38. Slyusar V. Development of DAR: some results. Part 2 // The first mile. 2018. No. 2. pp. 74–78.
39. Bartlett, M.S. Periodogram analysis and continuous spectra // Biometrika. 1950. Vol. 37, no. 1-2, pp. 1–16.
40. Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis // Proceedings of the IEEE. 1969. Vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418.
41. Schmidt, R. Multiple emitter location and signal parameter estimation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1986. Vol. 34, no. 3, pp. 276–280.

Фокин Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, профессор
Санкт-Петербургского государственного университета
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
grihafokin@gmail.com

Fokin Grigoriy A.

Doctor of Engineering Sciences, Docent, Professor
at the Department, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg
State University of Telecommunications,
grihafokin@gmail.com