

Институту магистратуры СПбГУТ 5 лет

УДК 621.396.67

Современное состояние и перспективы развития адаптивных антенных комплексов в радиотехнических системах

Глушанков Е. И. ✉, Коровин К. О., Бойко И. А., Борисов М. Г.

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

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения помехоустойчивости радиотехнических систем, функционирующих в условиях воздействия различных пространственно-разнесенных от полезного сигнала помех, подавление которых возможно за счет формирования адаптивной диаграммы направленности многоэлементных антенн. **Результаты:** в первой части работы проведен анализ и предложены варианты построения антенных систем СВЧ-диапазона, используемые для построения антенных решеток с управляемыми диаграммами направленности. Показано, что наиболее целесообразно создавать антенные решетки с гибридным управлением лучом, то есть полностью активным управлением, с возможностью адаптивного управления по одному из направлений сканирования, и возможностью переключения лучей/многолучевой работы в другом. Во второй части работы рассматриваются прямые методы адаптации антенн и алгоритмы прекодирования. Приведено математическое описание процедур адаптивной обработки сигналов, а также представлены результаты анализа и реализации исследуемых алгоритмов на программируемых логических интегральных схемах в различных ситуациях сигнально-помеховой обстановки при разных угловых рассогласованиях между сигналом и помехами и различных их энергетических характеристиках. Приведены результирующие диаграммы направленности антенной решетки, измеренные в безэховой камере и обеспечивающие адаптивную обработку сигналов. Результаты проведенных натурных экспериментов показали приемлемое совпадение теоретических и экспериментальных данных. **Практическая значимость:** результаты работы могут быть использованы при разработке адаптивных антенных комплексов для радиотехнических систем различного функционального назначения, при анализе и практической реализации алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов на программируемых логических интегральных схемах и при исследовании адаптивных алгоритмов в безэховой камере.

Ключевые слова: антенные решетки, адаптивные антенные решетки, алгоритмы адаптации

Особенности построения антенных комплексов в СВЧ-радиолиниях

Антенные системы, применяемые в радиотехнических системах, прошли громадный путь за более, чем столетие развития. В то время как первые антенны являлись одним или несколькими простейшими излучателями, современные антенные системы, особенно в диапазоне СВЧ (3-30ГГц), как правило, представляют собой антенные решетки – сложнейшие комплексы, включающие не только из-

Библиографическая ссылка на статью:

Глушанков Е. И., Коровин К. О., Бойко И. А., Борисов М. Г. Современное состояние и перспективы развития адаптивных антенных комплексов в радиотехнических системах // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 1. С. 8. EDN: AKVWWB

Reference for citation:

Glushankov E., Korovin K., Boyko I., Borisov M. The Current State and Prospects for the Development of Adaptive Antenna Complexes in radio Engineering Systems // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 1. P. 8. EDN: AKVWWB

лучающие элементы, но и фидеры, устройства формирования луча (beamformer), процессоры для расчета требуемого амплитудно-фазового распределения и многое другое.

Впервые антенные решетки были использованы Гульельмо Маркони в 1901 г. для увеличения усиления антенн при передаче сигналов азбуки Морзе через Атлантику [1]. Г. Маркони использовал четыре башенные антенны высотой 61 м, расположенные в виде кольцевой решетки в Полдху (Англия), для передачи сигнала, обозначающего букву «S», на расстояние 3 425 км в Сигнал-Хилл (Сент-Джон, о. Ньюфаундленд, Канада). Еще одна попытка использовать несколько антенн была предпринята К. Ф. Брауном, продемонстрировавшим преимущества, достижимые с помощью фазированных антенных решеток в 1905 г. В 1909 году Г. Маркони и К. Ф. Браун получили Нобелевскую премию по физике за «признание их вклада в развитие беспроводной телеграфии» [2].

В настоящее время антенные решетки применяются в различных радиотехнических системах – радиолокационных, пеленгаторных – для определения координат объекта, связанных – в системах мобильной и космической связи, в радиоастрономии. Антенные решетки являются одним из наиболее перспективных направлений развития антенных систем. Можно выделить два основных типа: классические и смарт решетки. Классические антенные решетки, в которых основной луч направляется в заданном направлении, называются фазированными антенными решетками, решетками с управлением лучом или сканирующими решетками. Управление лучом осуществляется с помощью фазовращателей либо линий задержки, обеспечивающих требуемый сдвиг фаз на радиочастоте. Данный подход к изменению фазы называется электронным управлением лучом, так как фаза тока изменяется непосредственно на каждом антенном элементе. Смарт антеннами называются антенные решетки, в которых диаграмма направленности (ДН) формируется в соответствии с определенными оптимальными критериями. Классификация смарт антенн, представленная в работе [3], приведена на рисунке 1.

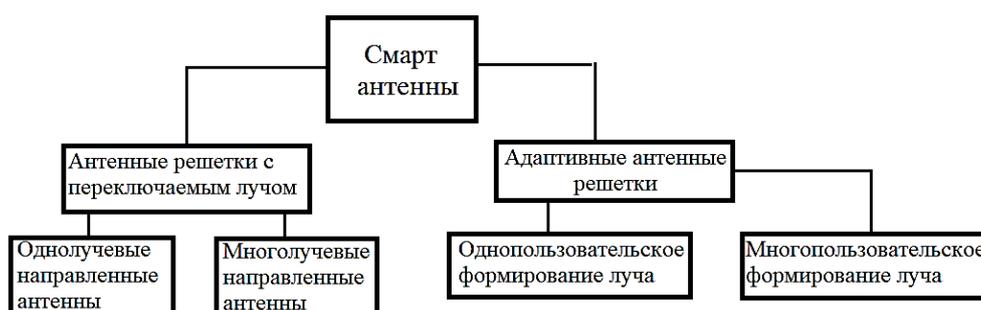


Рис. 1. Классификация смарт антенн

В первой части данной работы предполагается рассмотреть варианты конструктивной реализации и построения фазированных антенных решеток и антенных смарт решеток с переключаемым лучом. Во второй части предполагается рассмотреть алгоритмы адаптации, используемые в современных адаптивных антенных решетках.

Сканирование антенной решетки

Принцип фазового сканирования линейной эквидистантной антенной решетки приведен на рисунке 2. Отклонение главного лепестка антенной решетки может обеспечиваться заданием разности фаз $\Delta\phi$ и временной задержки между излучателями решетки Δt . Выбор между заданием временной Δt или фазовой $\Delta\phi$ задержки для реализации необходимого возбуждения излучателей определяется особенностями практической реализации. Для аналоговых схем чаще используют фазовращатели, поскольку они меньше, легче и дешевле, чем блоки временной задержки. Для цифровых схем временная задержка легко реализуется программно для двух или более сигналов. Преимуществом использования временной задержки является инвариантность относительно частоты, что позволяет обеспечить более широкую рабочую полосу частот.

В случае прямоугольной плоской антенной решетки с прямоугольным расположением элементов сканирование луча обеспечивается заданием требуемого фазового распределения (или временных задержек) независимо вдоль рядов (горизонтально) и колонок (вертикально) антенной решетки.

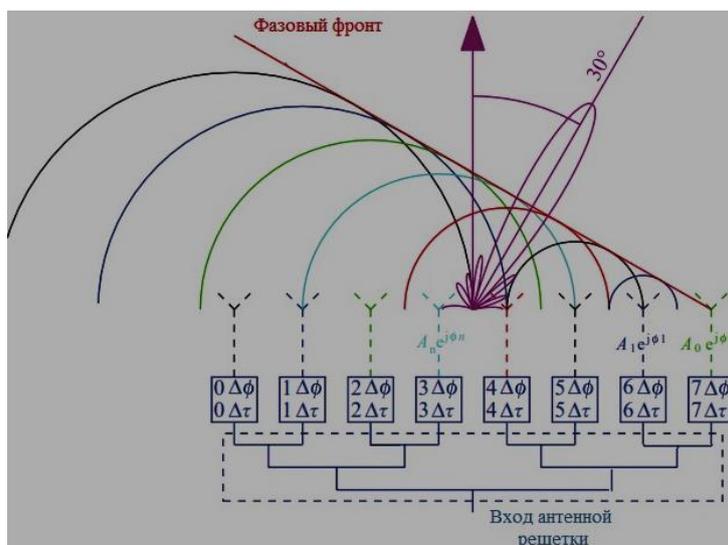


Рис. 2. Сканирование линейной эквидистантной фазированной антенной решетки заданием разности фаз $\Delta\phi$ или задержки $\Delta\tau$

Диаграммообразующие схемы

Для формирования (в общем случае) амплитудно-фазового распределения могут использоваться различные диаграммообразующие схемы (ДОС): beamformers (BF) – в случае активных фазированных антенных решеток или beamforming networks (BFN) – в случае фазированной антенной решетки. При многолучевых антенных решетках ДОС представляет собой многополюсник, количество входов которого соответствует количеству формируемых лучей, а выходов – количеству элементов антенной решетки, где элемент может представлять собой как одиночный излучатель, в случае линейной антенной решетки, так и несколько излучателей, для прямоугольной решетки или подрешетки. Этот вариант является весьма перспективным для создания так называемых гибридных антенных решеток, когда формирование луча в одном направлении сканирования производится цифровым методом, при помощи BF, а в другом направлении – при помощи схемы (BFN) [4–5].

Вариант ДОС в виде аналоговой схемы выполняется из пассивных элементов: направленных ответвителей, мостов, фиксированных фазовращателей, отрезков линии передачи, делителей мощности и т. д и служит для реализации требуемого амплитудно-фазового распределения, соответствующего различным лучам. Имеется несколько вариантов построения ДОС, однако наибольшее распространение получили параллельная (матрица Батлера [6]) и последовательная (матрица Бласса [7]) схемы.

Матрица Батлера является аналоговой реализацией быстрого преобразования Фурье для обеспечения нескольких лучей ДН при подаче сигналов на входные порты. Ввиду наличия ответвителей и фазовращателей в матрице Батлера имеются потери (не меньше 0,5 дБ на одном делителе/фазовращателе), возрастающие с увеличением размера матрицы, поэтому матрицы размером больше 16×16 не рассматриваются. Матрица имеет N входов (порты, соответствующие различным лучам) и N выходов (антенные порты), которые объединяются и комбинируются с требуемыми фазовыми сдвигами для обеспечения нескольких лучей, причем $N = 2^k$, где k – целое число. Матрица является взаимной, т.е. обеспечивает несколько лучей ДН, как при передаче, так и при приеме. Простейший вариант матрицы Батлера 2×2 представлен на рисунке 3а. Одним из примеров практического применения является спутник Iridium, использующий 16-лучевой формирователь луча на основе матрицы Батлера по углу возвышения и 8-лучевой матричный формирователь луча на основе матрицы по азимуту [8]. В настоящее время активно рассматривается возможность использования матриц Батлера различной размерности для систем мобильной связи в диапазонах Sub-6GHz и mmWave [9–12].

Матрица Бласса [7] является более сложной, позволяющей обеспечить произвольное число одновременных лучей. Она имеет N входов и M выходов (входные и антенные порты, соответственно) и $N \times M$ -ответвителей, коэффициент деления которых меняется. Он также включает нагрузки для поглощения неиспользуемой мощности сигнала. Входы комбинируются в разных соотношениях с различной длиной пути для создания нескольких лучей одновременно. Пример матрицы Бласса приведен на

рисунке 3б. Матрица Бласса обладает большей гибкостью, чем матрица Батлера, без ограничения по количеству входов/выходов $M = N = 2^k$. Однако для этого требуются сложные делители/сумматоры мощности, кроме того, часть мощности поглощается согласованными нагрузками, что влечет за собой некоторую потерю эффективности. Направление и форма луча определяются временной задержкой/сдвигом фазы и амплитудными весами, обеспечиваемыми коэффициентами деления.

Практически важным вариантом реализации ДОС является матрица Нолена, впервые описанная в докторской диссертации Дж. К. Нолена, опубликованной в 1965 г. Схема матрицы приведена на рисунке 4.

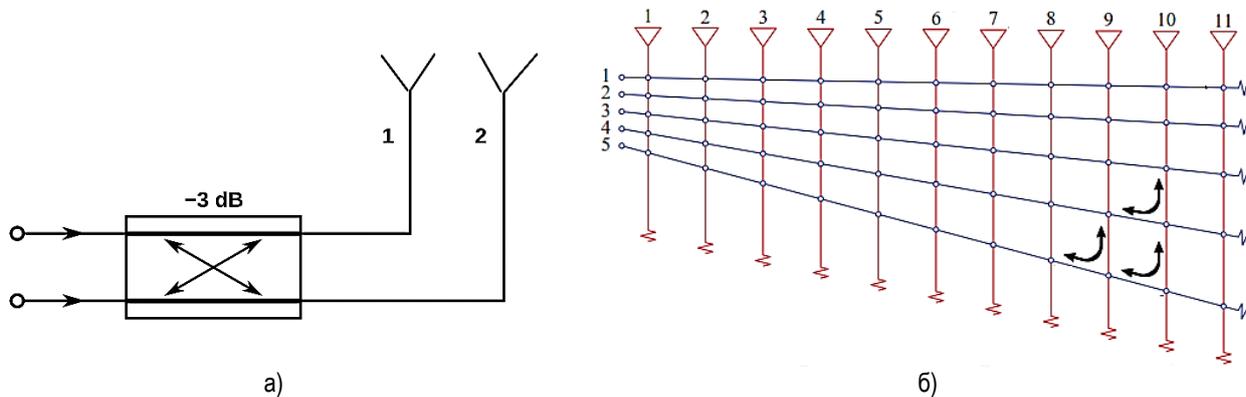


Рис. 3. Матрица Батлера 2×2 (а) и матрица Бласса 5×11 (б)

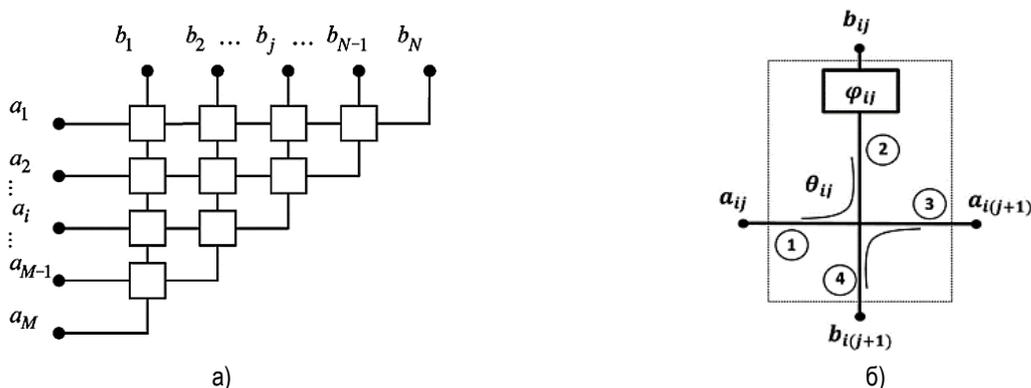


Рис. 4. Матрица Нолена (а) и детали узла (б) [13]

Матрица Нолена является общей формой ортогональной BFN, основанной на последовательной топологии, аналогичной матрице Бласса. В. С. Каммингс описал итеративную процедуру проектирования для определения всех ответвителей и фазовращателей, составляющих матрицу Нолена [14]. Он также показал, что матрица Нолена может быть упрощена и в конечном итоге сведена к матрице Батлера, для случая, когда количество портов равно целой степени 2. Таким образом, матрицу Нолена можно рассматривать как реализацию общего дискретного преобразования Фурье, аналогично матрице Батлера, представляющую собой быстрое преобразование Фурье [15]. Будучи ортогональной ДОС, матрица Нолена размерности $N \times N$ будет иметь тот же набег фазы, что и матрица Батлера, однако ограничения на возможные значения N отсутствуют.

Практически важным вариантом пространственной реализации ДОС (в виде устройства) являются линза Ротмана. Схематическое изображение линзы Ротмана приведено на рисунке 5. В отличие от рассмотренных выше матриц Батлера, Бласса и Нолена, линза Ротмана является устройством с временной задержкой, что обеспечивает значительно больший диапазон рабочих частот. Принцип работы линзы Ротмана заключается в том, что расстояния, которые проходит RF-сигнал при распространении от входных до выходных портов, различны и подобраны таким образом, что обеспечивают требуемое распределение временных задержек сигнала по выходным портам. В настоящее время благодаря указанным свойствам линза Ротмана рассматривается в качестве одного из основных вариантов реализации BFN для гибридных антенных решеток [16–19].

где R_{xx} – автокорреляционная матрица входного воздействия; R_{dx} – матрица взаимной корреляции между входным воздействием и образцовым сигналом.

Недостатком алгоритма Винера является высокая вычислительная сложность, связанная с необходимостью расчета обратной корреляционной матрицы на каждой итерации. В интересах уменьшения вычислительной сложности используют итерационные алгоритмы поиска оптимального винеровского решения [26, 27]. Одними из простейших итерационных алгоритмов является класс алгоритмов LMS с целевой функцией минимума квадрата ошибки:

$$F(w_k) = e_k^2 = (d_k - w_k^T x_k)^2 \rightarrow \min_w.$$

В случае, если сигнал не является стационарным, то есть его энергия изменяется во времени, используют нормированный алгоритм LMS (NLMS) с рекуррентной формулой ВВК:

$$\hat{w}_{k+1} = \hat{w}_k + \mu_k e_k x_k,$$

где $e_k = z_k - y_k = z_k - w_k^T x_k$ – сигнал ошибки; μ_k – нормализованный шаг адаптации:

$$\mu_k = \frac{\mu_0}{x_k^T x_k + \varepsilon},$$

где $x_k^T x_k$ – мгновенная энергия сигнала; μ_0 – фиксированное значение шага, влияющее на сходимость алгоритма; ε – параметр, определяющий максимальное значение шага при нулевом входном сигнале.

Вторая большая группа алгоритмов ПВОС – прекодирование или предварительное кодирование, которое заключается во внесении предыскажений в передаваемый сигнал:

$$x = Pd,$$

где d – вектор полезных сигналов; P – прекодирующая матрица такая, что на приемной стороне:

$$y = H^T x + n = H^T P d + n.$$

Другими словами, алгоритмы прекодирования осуществляют предобработку сигналов на передающей стороне с целью минимизации влияния канала связи на приемной стороне [28]. Для работы алгоритмов прекодирования необходима информация о состоянии канала, получаемая с помощью пилот-сигналов от абонентов по нисходящей линии [29].

Для алгоритмов прекодирования оптимальным является алгоритм обращения в нуль (Zero-Forcing):

$$P = H^* G^{-1}, \quad G = H^T H^*, \\ y = H^T P d + n = H^T H^* (H^T H^*)^{-1} d + n = d + n.$$

Недостатком данного алгоритма является трудоемкая операция обращения матрицы G , поэтому на практике чаще всего используют итерационные алгоритмы.

Одним из простейших итерационных алгоритмов прекодирования является алгоритм Ньютона, который обеспечивает сходимость оценки обратной матрицы \hat{G}^{-1} к истинному значению:

$$\hat{G}^{-1} = X_k = X_{k-1} (2I - G X_{k-1}).$$

Другим итерационным алгоритмом является алгоритм Чебышева, обеспечивающий большую скорость сходимости, однако имеющий большую вычислительную сложность:

$$\widehat{G}^{-1} = X_k = X_{k-1}[3I - GX_{k-1}(3I - GX_{k-1})].$$

Компромиссом между вычислительной сложностью и скоростью сходимости будет обладать модифицированный алгоритм Ньютона, обладающий меньшей вычислительной сложностью при обеспечении скорости сходимости не хуже, чем у алгоритма Чебышева [30]. Повышение скорости сходимости обеспечивается за счет введения переменного шага адаптации:

$$\widehat{G}^{-1} = X_k = X_{k-1}[(\lambda_k + 1)I - \lambda_k GX_{k-1}],$$

где λ_k постепенно уменьшается с каждой итерацией:

$$\lambda_k = \lambda_{k-1}(1 - \varepsilon),$$

ε – константа, влияющая на уменьшение шага адаптации.

На рисунке 6 приведено сравнение скорости сходимости алгоритмов Ньютона, Чебышева и модифицированного Ньютона. На рисунке 7 показаны зависимости сходимости прекодирующей матрицы к оптимальным значениям от параметров λ_0 и ε .

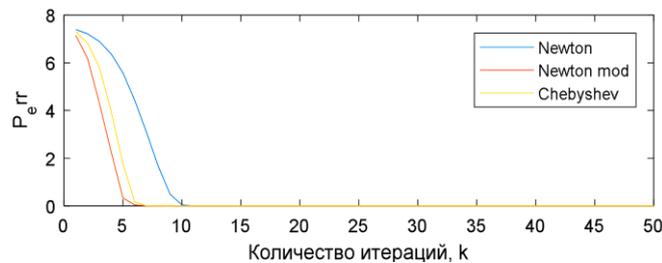


Рис. 6. Скорость сходимости прекодирующей матрицы к оптимальным значениям

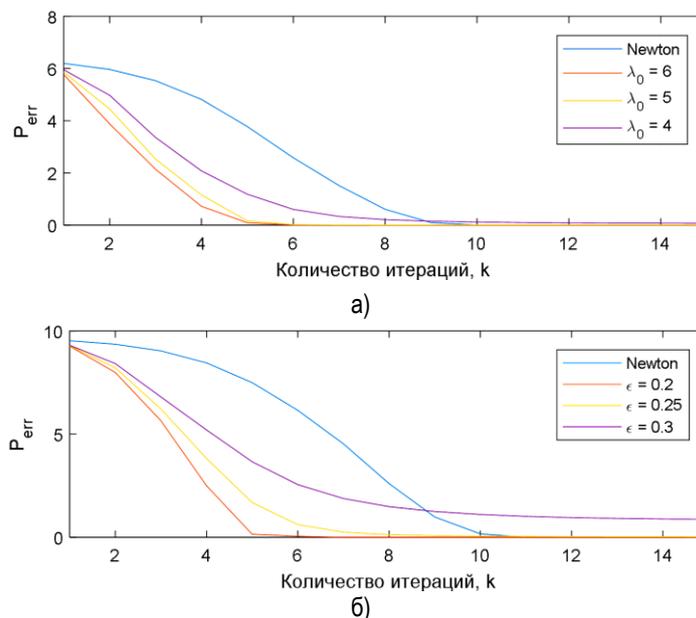


Рис. 7. Графики сходимости прекодирующей матрицы в зависимости от начального шага адаптации λ_0 (а) и параметра ε (б)

Моделирование и реализация алгоритмов ПВОС

Для реализации алгоритмов адаптивной обработки сигналов был создан макет 8-элементной адаптивной антенной решетки [31]. В качестве устройства, на котором были реализованы исследуемые адаптивные алгоритмы, использовалась отладочная плата RF-SoC HiTech Global HTG-ZRF8-28 [32].

Измерения на прием проводились в ближнем поле, где ДН не сформирована до конца, а мощность излучения сильно зависит от расстояния между передающей антенной, служащей макетом источника полезного сигнала, и приемной адаптивной 8-элементной цифровой антенной решетки (рисунок 8). В качестве передающей антенны источника сигнала использовалась антенна Вивальди с рабочим диапазоном частот 2300–2620 МГц. При проведении натурных испытаний в безэховой камере (БЭК) выбранная частота источника сигнала – 2350,289 МГц. В качестве передающих антенн источников помех использовались разработанные антенные элементы с кросс-поляризацией. Выбранная частота на излучения помех – 2350,4 МГц (рисунок 9).

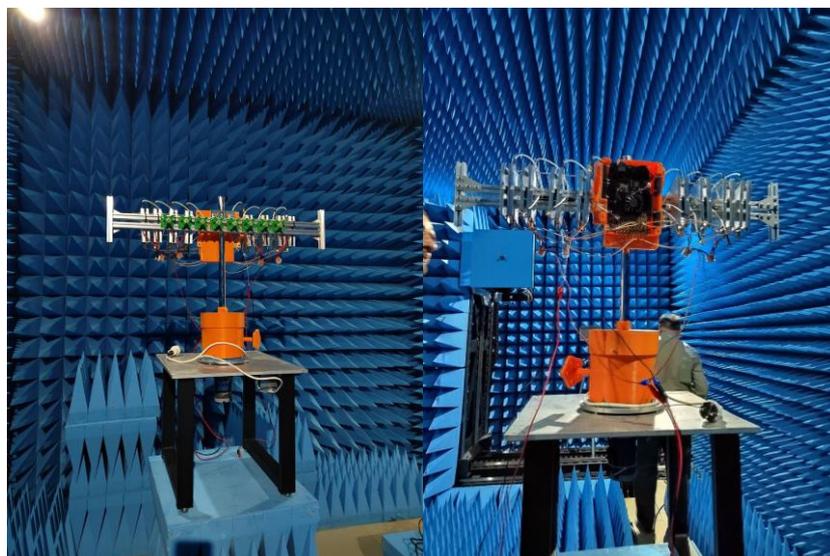


Рис. 8. Адаптивная антенная решетка в безэховой камере

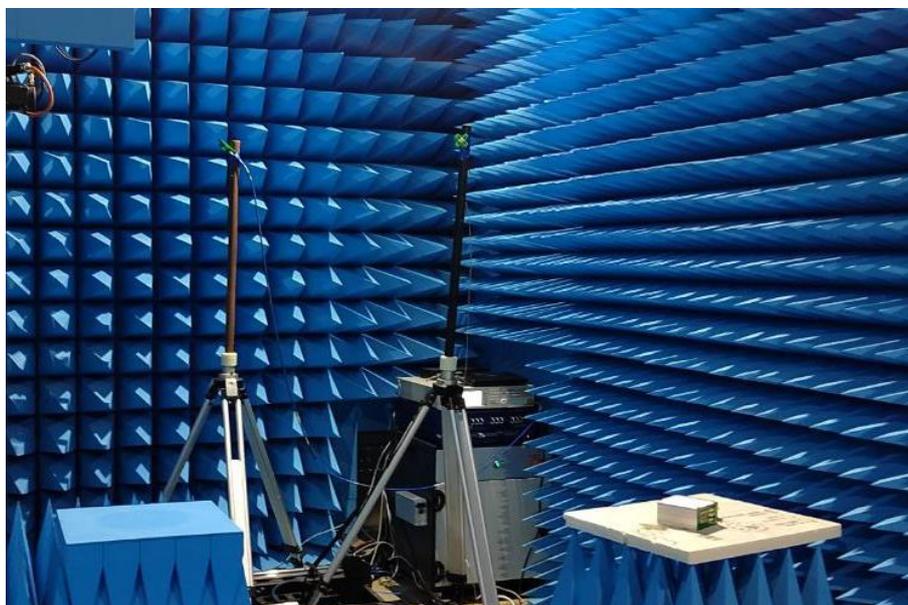


Рис. 9. Антенны, используемые для излучения полезного сигнала (слева) и помехи (справа)

На рисунке 10 приведено сравнение ДН математической модели и реальной, полученной при измерении в БЭК для работы алгоритма с обращением корреляционной матрицы в многосигнальном режиме работы на прием (при угле прихода сигнала – 0° , аттенюация помехи соответствует -5 дБ). На рисунке 11 приведены результаты сравнения ДН математической модели и реальной, полученной при измерении в БЭК для работы итерационного алгоритма NLMS в односигнальном режиме работы на прием (при у при угле прихода сигнала – 10° , 20° , 30° , 40° , аттенюация помехи соответствует 0 дБ на графиках 11а–11г и -5 дБ на графиках 11д–11к).

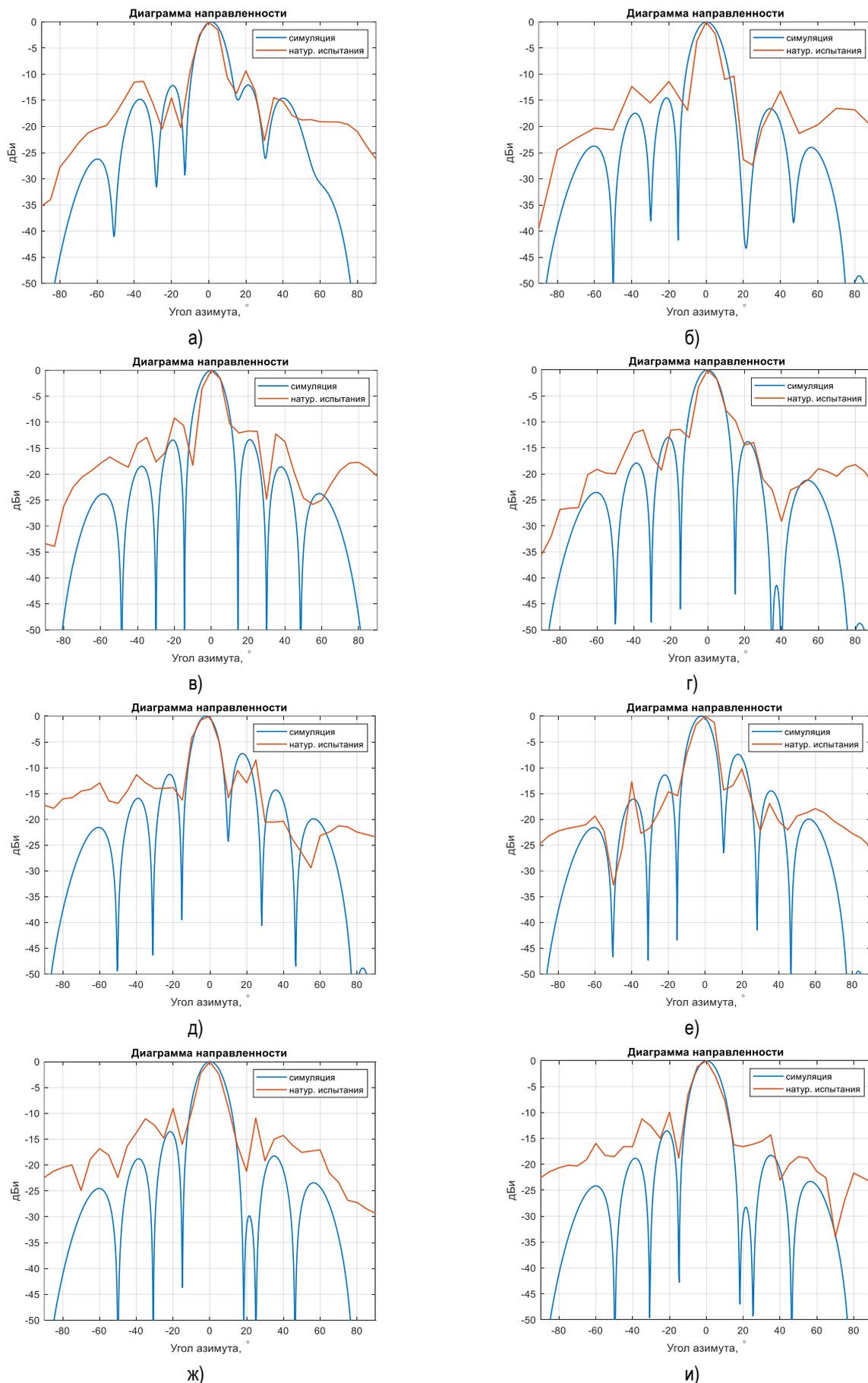


Рис. 10. Диаграмма направленности адаптивной антенной решетки при угле прихода помехи – 10° (а), 20° (б), 30° (в), 40° (г), 10° и 20° (д), 10° и 30° (е), 20° и 30° (ж), 30° и 40° (и)

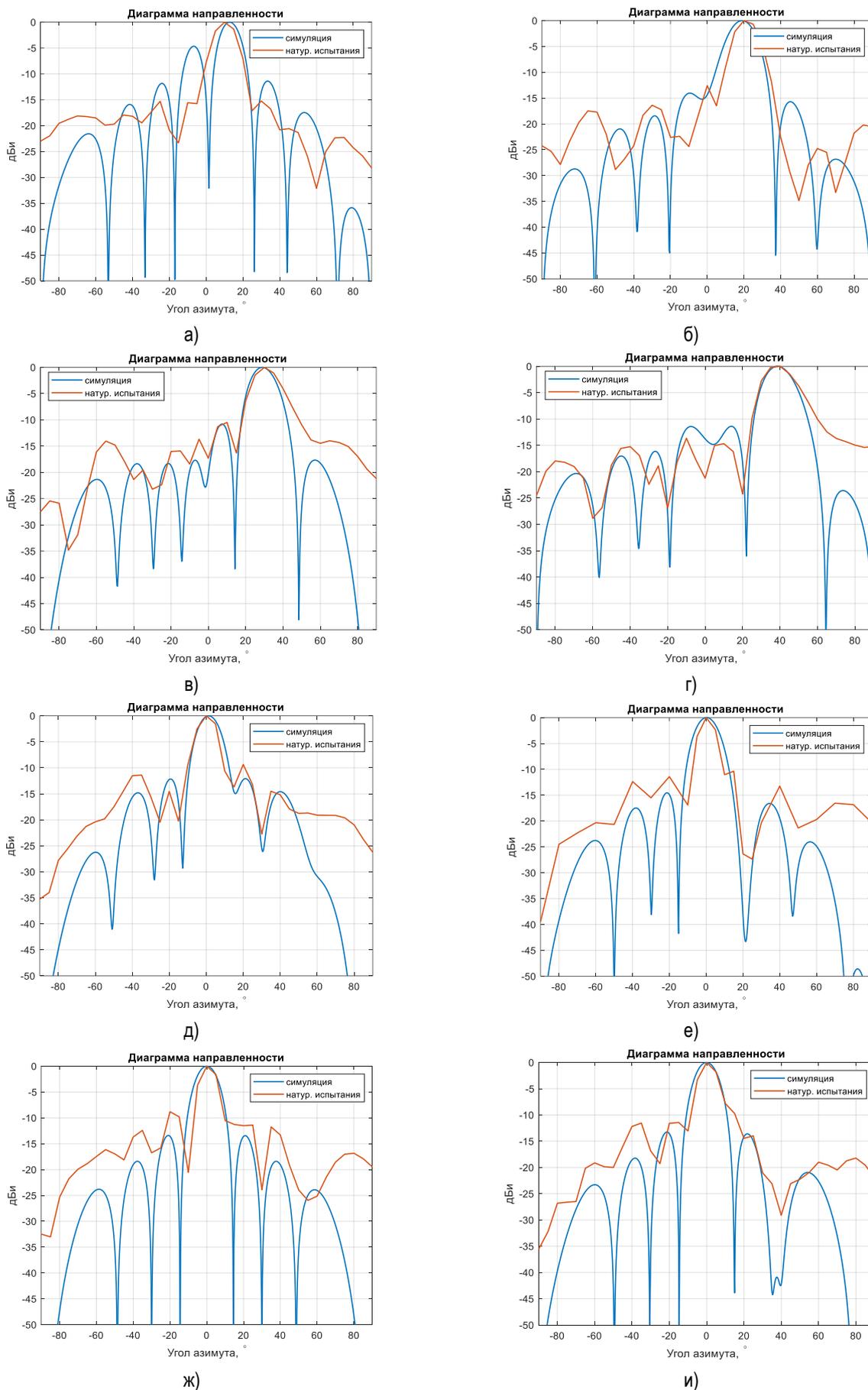


Рис. 11. Диаграмма направленности адаптивной антенной решетки, аттенуация сигнала 0 дБ (а–г), при угле прихода сигнала -0° , аттенуация помехи -5 дБ (д–и)

На рисунке 12 приведено сравнение ДН математической модели и реальной, полученной при измерении в БЭК для работы модифицированного алгоритма Ньютона в режиме работы на передачу (аттенюация сигнала соответствует 0 дБ).

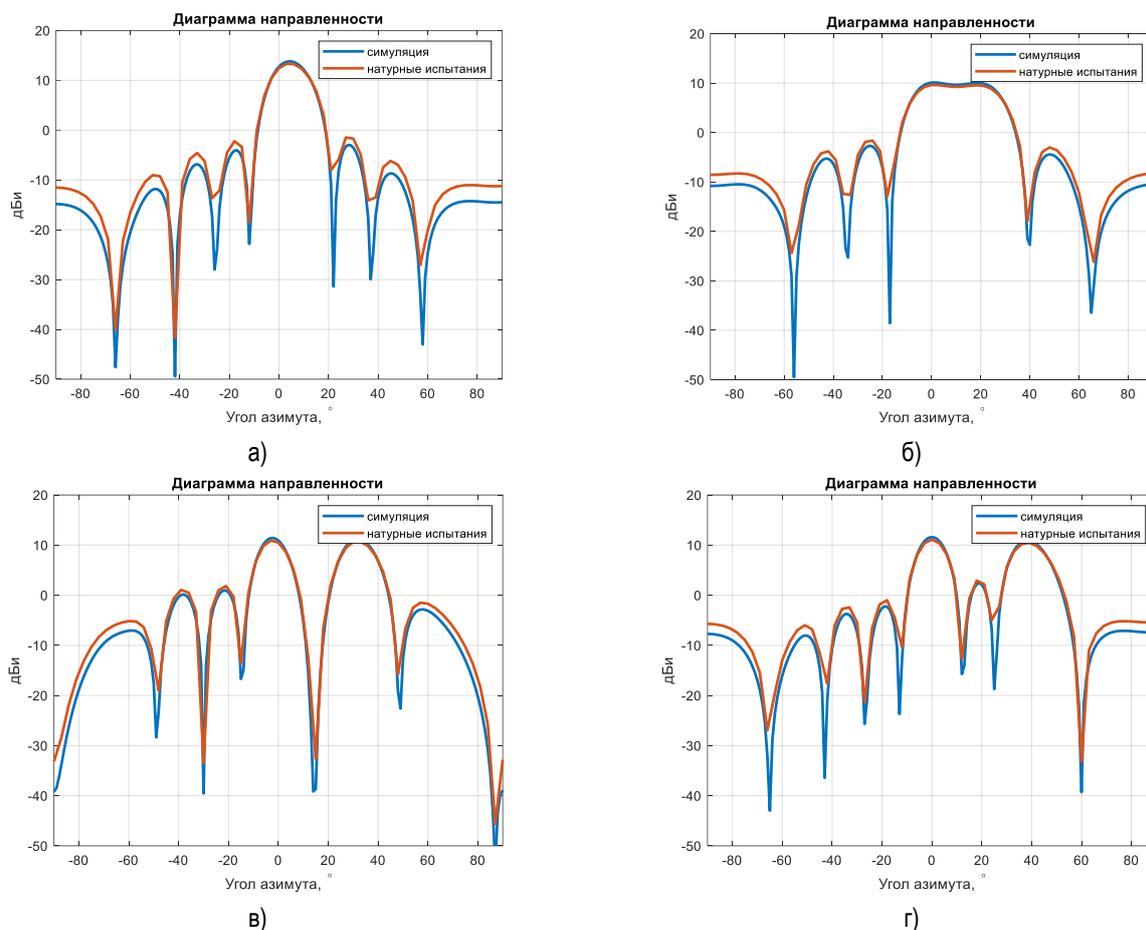


Рис. 12. Диаграмма направленности адаптивной антенной решетки при требуемых углах передачи сигнала -0° и 10° (а), 0° и 20° (б), 0° и 30° (в), 0° и 40° (г)

Заключение

Натурные испытания исследуемых алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов подтвердили ухудшение характеристик в направлениях, отличных от направлений на источники сигнала и помех, в режиме работы на прием. Измеренные в безэховой камере диаграммы направленности адаптивной 8-элементной антенны, работающей на прием, имеют практически те же характеристики, что и теоретические диаграммы направленности. При увеличении угла азимута излучения источника помехи способность к подавлению снижается.

При проведении натурных испытаний алгоритма прекодирования в режиме работы на передачу произошло ухудшение характеристик в направлениях, отличных от направлений приемников сигнала. При увеличении аттенюации полезного сигнала с 0 до 20 дБ происходит увеличение максимального и среднего уровня боковых лепестков на 2–4 и 6 дБ, соответственно. В случае, если приемники сигнала расположены друг к другу менее чем на 30° , происходит увеличение максимального и среднего уровня боковых лепестков на 2 и 5 дБ, соответственно. В случае, если приемники сигнала расположены друг к другу более чем на 30° , происходит увеличение максимального и среднего уровня боковых лепестков на 6 и на 10 дБ, соответственно. Несмотря на ухудшение в направлениях, отличных от направлений приемников сигнала, адаптация диаграммы направленности позволяет усиливать полезный сигнал вне зависимости от его углов излучения.

Литература

1. Bondyopadhyay P. K. The first application of array antenna // Proceedings of the IEEE Conference on Phased Array Systems and Technology (Dana Point, USA, 21–25 May 2000). IEEE, 2000. DOI: 10.1109/PAST.2000.858903
2. The Nobel Prize in Physics 1909 // Nobel Media AB. 2019. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/summary> (Accessed 17/04/2024)
3. Srivastava G., Singh N., Kumar S. Smart Antennas for Contemporary Wireless Communication Systems: Concepts, Challenges, and Performance // In: Advances in Antenna, Signal Processing, and Microelectronics Engineering. CRC Press, 2019. DOI:10.1201/9781003006190-9
4. Han S., Lin C. I., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. Iss. 1. PP. 186–194. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7010533
5. Huang X., Guo Y. J., Bunton J. D. A hybrid adaptive antenna array // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2010. Vol. 9. Iss. 5. PP. 1770–1779. DOI: 10.1109/TWC.2010.05.091020
6. Butler J. Beam forming matrix simplifiers design of electrically scanned antennas // Electronic Design. 1961. Vol. 9. PP. 170–173.
7. Blass J. Multidirectional antenna - A new approach to stacked beams // Proceedings of the 1958 IRE International Convention Record (New York, USA). IEEE, 1960. PP. 48–50. DOI: 10.1109/IRECON.1960.1150892
8. Pattan B. The versatile ButlerMatrix // Microwave Journal. 2004. Vol. 47(11). PP. 126–135.
9. Shallah A. B., Zubir F., Rahim M. K. A., Jizat N. M., Basit A., Assaad M., et al. A Miniaturized Metamaterial-Based Dual-Band 4×4 Butler Matrix With Enhanced Frequency Ratio for Sub-6 GHz 5G Applications // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 32320–32333. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3371027
10. Vallappil A. K., Rahim M. K. A., Khawaja B. A., Iqbal M. N. A Miniaturized Metamaterial-Loaded Switched-Beam Antenna Array System With Enhanced Bandwidth for 5G Applications // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 6684–6697. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3351475
11. Hussein Y. M., Rahim M. K. A., Murad N. A., Hanoosh H. O. Low Loss Wideband 4×4 Butler Matrix Networks Based on Substrate Integrated Waveguide for 5G Applications // IEEE Access. 2024. Vol. 12. PP. 7896–7910. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3342713
12. Borhani-Kakhki M., Abdellatif A. S., Pothula H. K., Wessel D. A Wideband 16x16 Butler Matrix for Millimeter-Wave Beam-Switching Applications // Proceedings of the 53rd European Microwave Conference (EuMC, Berlin, Germany, 19–21 September 2023). IEEE, 2023. PP. 637–640. DOI: 10.23919/EuMC58039.2023.10290684
13. Fonseca N. J. G. Discussion on Reciprocity, Unitary Matrix and lossless Multiple Beam Forming Networks // International Journal of Antennas and Propagation. 2015. Vol. 2015. P. 946289. DOI: 10.1155/2015/946289
14. Cummings W. C. Multiple beam forming networks. Tech. Note 1978-9, Apr. Lexington: MIT Lincoln Lab., 1978.
15. Fonseca N. J. G. An Investigation of Blass and Nolen Matrices. CNES technical note 152. Toulouse: CNES Toulouse Space Center, 2007.
16. Gao Y., Khaliel M., Zheng F., Kaiser T. Rotman Lens Based Hybrid Analog–Digital Beamforming in Massive MIMO Systems: Array Architectures, Beam Selection Algorithms and Experiments // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 10. PP. 9134–9148. DOI: 10.1109/TVT.2017.2714693
17. Zhang H., Shamim A. Wideband and Wide Beam Scanning Dual-Polarized Phased Array Antenna-in-Package Design for 5G Applications // IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2024. Vol. 5. Iss. 1. PP. 140–152. DOI: 10.1109/OJAP.2023.3336762
18. Deng J.-Y., Liu Y.-B., Chen Z., Lin W. Compact Multibeam Antenna Using Miniaturized Slow-Wave Substrate-Integrated Waveguide Rotman Lens for Satellite-Assisted Internet of Vehicles // IEEE Internet of Things Journal. 2024. Vol. 11. Iss. 4. PP. 6848–6856. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3313309
19. Mujammami E. H., Sebak A. Analog Beamforming System Using Rotman Lens for 5G Applications at 28 GHz // Proceedings of the International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (Atlanta, USA). IEEE, 2019. PP. 153–154. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888493

20. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 446 с.
21. Журавлев А. К., Хлебников В. А., Родимов А. П., Глушанков Е. И. и др. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. С. 544.
22. Анашкин Р. В., Глушанков Е. И., Колосов Л. В., Яцук В. В. Использование специальной фазовой модуляции сигналов в конфликтных условиях решения задач помехозащиты и создания помех // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. № 10. С. 1968–1975.
23. Григорьев В. А., Щесняк С. С., Гулюшин В. Л., Распаев Ю. А., Хворов И. А., Щесняк А. С. Адаптивные антенные решетки. Часть 2 / под ред. В.А. Григорьева. СПб: Университет ИТМО, 2016. 118 с.
24. Глушанков Е. И., Колесников А. Н. Оценка потенциальной эффективности пространственно-временной обработки сигналов в линиях подвижной радиосвязи с ППРЧ // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 1990. Т. 33. № 12. С. 66–70.
25. Глушанков Е. И., Колесников А. Н., Ушаков В. В. Пространственно-временная обработка сигналов с ППРЧ в линиях спутниковой связи с подвижными объектами // Пространственно-временная обработка сигналов в системах радиосвязи. Приложение к журналу «Радиотехника». 1992. С. 59–65.
26. Бойко И. А., Глушанков Е. И., Рылов Е. А. Моделирование градиентного алгоритма адаптации антенной решетки в среде MATLAB // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. № 1(45). С. 55–61. DOI: 10.24412/2221-2574-2022-1-55-61. EDN: KKBSHM
27. Boyko I. A., Glushankov E. I., Kirik D. I., Korovin K. O., Rylov E. A. Algorithms for Multiple Signals Adaptive Processing in Radio Engineering Systems Antenna Arrays // Proceedings of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Kaliningrad, Russia, 30 June 2021 – 02 July 2021). IEEE, 2021. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488370
28. Albreem M. A., Habbash A. H. Al., Abu-Hudrouss A. M., Ikki S. S. Overview of Precoding Techniques for Massive MIMO // IEEE Access. 2021. Vol. 9. PP. 60764–60801. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073325
29. Glushankov E. I., Boyko I. A., Kirik D. I., Korovin K. O. Channel Vector Estimation Using Covariance Matrices Regularization Method // Proceedings of the Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Arkhangelsk, Russia, 29 June 2022 – 01 July 2022). IEEE, 2022. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840964
30. Glushankov E. I., Boyko I. A., Kirik D. I., Korovin K. O. Development of a Modified Newton Iteration Algorithm for massive MIMO systems with precoding and its study in MATLAB environment // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2291. P. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/2291/1/012011
31. Глушанков Е. И., Кирик Д. И., Коровин К. О., Царик И. В., Бойко И. А., Казьмин О. Ю. Реализация алгоритма адаптивного диаграммообразования на ПЛИС // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2023. Т. 11. № 1(40). С. 19–20. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.025 EDN: JMTNCV
32. HiTech Global ZYNQ UltraScale+™ RFSoc Development Platform. HTG-ZRF8 User Manual // HiTech Global. 2018. URL: https://www.rfsoc-pynq.io/pdf/HTG-ZRF8_UG.pdf (дата обращения 17.04.2024)

Статья поступила 11 марта 2024 г.

Одобрена после рецензирования 03 апреля 2024 г.

Принята к публикации 08 апреля 2024 г.

Информация об авторах

Глушанков Евгений Иванович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: glushankov.ei@sut.ru

Коровин Константин Олегович — кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. E-mail: korovin.ko@sut.ru

Бойко Игорь Андреевич – аспирант кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. E-mail: boiko.ia@sut.ru

Борисов Максим Геннадьевич – магистрант 1 курса (направление 11.04.01 Радиотехника) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. E-mail: maximka.borisov3@gmail.com

The Current State and Prospects for the Development of Adaptive Antenna Complexes in radio Engineering Systems

Glushankov E. ✉, Korovin K., Boyko I., Borisov M.

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

The relevance of the work is due to the need to increase the noise immunity of radio engineering systems operating under the influence of various interference spatially separated from the useful signal, the suppression of which is possible due to the formation of an adaptive directional pattern of multi-element antennas. **Results:** in the first part of the work, an analysis was carried out and options for constructing microwave antenna systems used to build antenna arrays with controlled radiation patterns were proposed. In the second part of the work, direct antenna adaptation methods and precoding algorithms are considered. The mathematical description of adaptive signal processing procedures is given, as well as the results of the analysis and implementation of the studied algorithms on programmable logic integrated circuits in various situations of signal-interference conditions with different angular mismatches between the signal and interference and their various energy characteristics. The resulting radiation patterns of the antenna array, measured in an anechoic chamber and providing adaptive signal processing, are presented. The results of the field experiments showed an acceptable coincidence of theoretical and experimental data. **Practical significance:** the results of the work can be used in the development of adaptive antenna complexes for radio engineering systems of various functional purposes, in the analysis and practical implementation of algorithms for spatiotemporal signal processing on programmable logic integrated circuits and in the study of adaptive algorithms in an anechoic chamber.

Keywords: antenna arrays, adaptive antenna arrays, adaptation algorithms

Information about Authors

Evgeny Glushankov – D.Sc. of Engineering Sciences, Professor at the Department of Radio Systems and Signal Processing (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: glushankov.ei@sut.ru

Konstantin Korovin – Ph.D. of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Systems and Signal Processing (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: korovin.ko@sut.ru

Igor Boyko – Postgraduate at the Department of Radio Systems and Signal Processing (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: boiko.ia@sut.ru

Maxim Borisov – a 1st year master's student (field of study 11.04.01 Radiotechnics) (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: maximka.borisov3@gmail.com