



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

С. В. КОЗЛОВ, Д. А. КОВАЛЕВИЧ, Н. И. ЛИСТОПАД

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 30.01.2024*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** В статье обобщены наиболее значимые результаты исследований по созданию антенных систем средств подвижной радиосвязи и радиолокации, проведенных на кафедре информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники за последнее десятилетие. Рассмотрены новые алгоритмы функционирования антенных согласующих устройств средств подвижной радиосвязи ВЧ-диапазона длин волн, особенности построения субапертурных антенных решеток средств радиолокации с широкополосными зондирующими сигналами и алгоритмы обработки сигналов обнаружителей-измерителей угловых координат воздушных объектов с многоканальной антенной системой. Предложены перспективные направления исследований по указанной тематике.

**Ключевые слова:** апертура, антенная решетка, многоканальная антенная система, широкополосный сигнал, цифровое диаграммообразование, согласующее устройство, импеданс, временная задержка.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Козлов, С. В. Основные результаты и направления исследований по созданию антенных систем перспективных радиоэлектронных средств / С. В. Козлов, Д. А. Ковалевич, Н. И. Листопад // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 32–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41>.

## MAIN RESULTS AND DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE CREATION OF ANTENNA SYSTEMS FOR ADVANCED RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

SERGEI V. KOZLOV, DMITRY A. KOVALEVICH, NIKOLAI I. LISTOPAD

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 30.01.2024*

**Abstract.** The review article summarizes the most significant results of research on the creation of antenna systems for mobile radio communications and radar, carried out at the Department of Information Radio Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics over the last decade. New algorithms for the functioning of antenna matching devices for mobile radio communications in the VHF wavelength range, features of the construction of sub-aperture antenna arrays for radar equipment with broadband probing signals, and algorithms for processing signals in detectors-measurers of the angular coordinates of air objects with a multi-channel antenna system are considered. Promising areas of research on this topic are proposed.

**Keywords:** aperture, antenna array, multi-channel antenna system, wideband signal, digital beamforming, matching device, impedance, time delay.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kozlov S. V., Kovalevich D. A., Listopad N. I. (2024) Main Results and Directions of Research on the Creation of Antenna Systems for Advanced Radio-Electronic Equipment. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 32–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-32-41> (in Russian).

## Введение

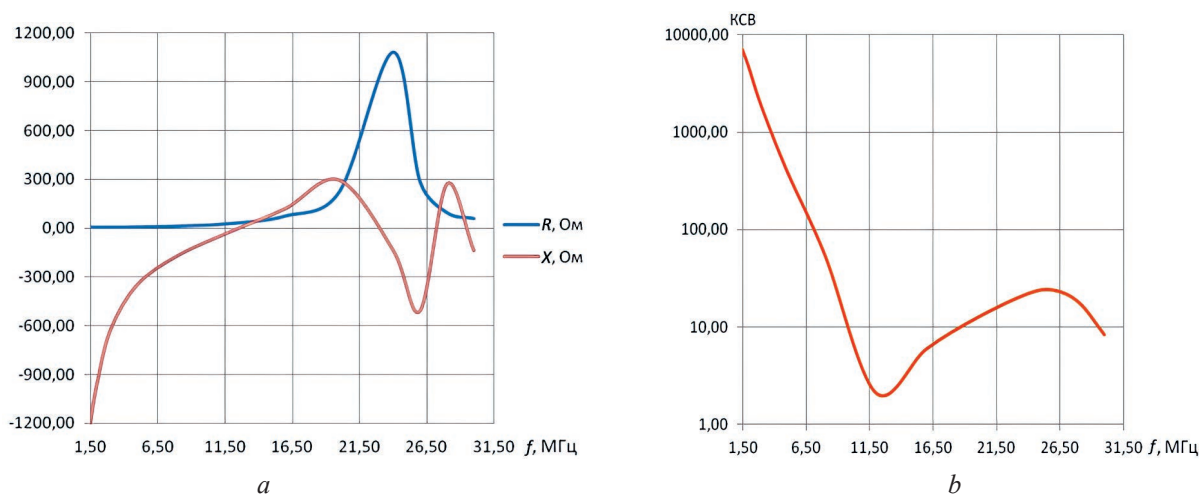
Одним из основных путей увеличения информационных возможностей и улучшения технических характеристик радиоэлектронных средств (РЭС) является совершенствование их антенных систем. Наиболее актуальны на настоящем этапе направления, связанные с созданием антенн ВЧ-диапазона для подвижных средств радиосвязи и широкополосных многоканальных антенных систем с цифровым диаграммообразованием (ЦДО) при электронном и механическом сканировании для средств радиолокации и радиомониторинга. Проблемные вопросы при создании указанных средств связаны с обеспечением быстродействующего согласования антенн с выходным каскадом передатчика или входным каскадом приемника средств радиосвязи, работающих в широкой полосе частот. Рассмотрены вопросы реализации алгоритмов ЦДО системы основных приемных каналов с устранением временных задержек широкополосного сигнала по апертуре с одновременной пространственной компенсацией мешающих источников излучения (МИИ) и обоснованием способов совместного обнаружения-измерения угловых координат радиосигналов в многоканальной приемной системе. В статье приведены отдельные результаты, полученные сотрудниками кафедры информационных радиотехнологий БГУИР по указанным направлениям.

## Разработка автоматических согласующих устройств

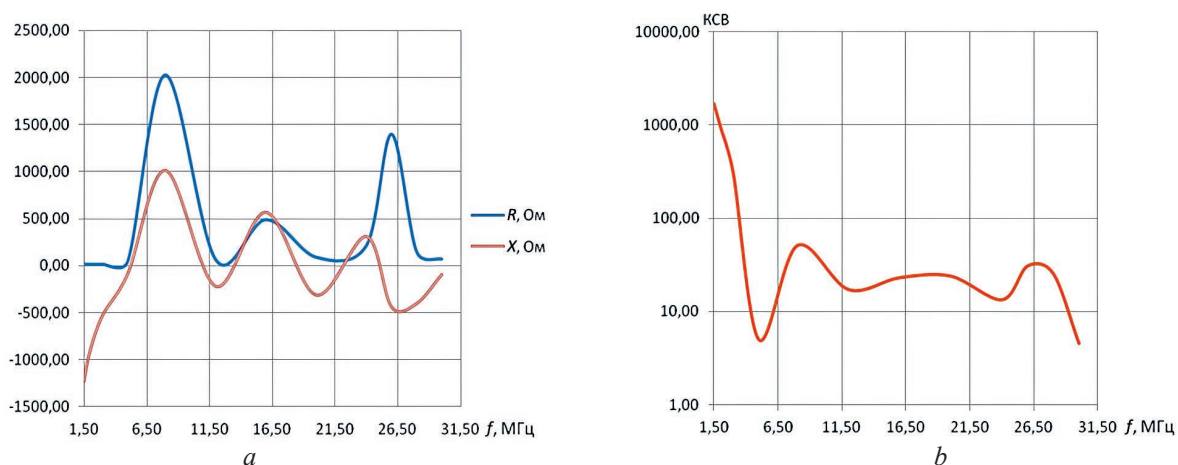
Особое место при проектировании РЭС занимают антенны ВЧ-диапазона, широко применяемые в подвижных средствах радиосвязи. Эти антенны могут работать как в движении, так и в стационарном режиме. Антенны для работы в движении могут устанавливаться непосредственно на подвижных объектах, способных изменять свое географическое местоположение: антенны судовых радиостанций, самолетные антенны, антенны, размещаемые на корпусе бронетехники, и антенны мобильных тактических радиостанций. Антенны для работы в стационарном режиме имеют более высокую эффективность, но, как правило, обладают значительными линейными размерами. Анализ [1–3] позволяет выделить следующие основные виды мобильных антенн, используемых для работы в ВЧ-диапазоне: штыревая, типа «наклонный луч», наклонный симметричный вибратор (диполь), Т-образная, наклонная V-образная, антенна зенитного излучения, бегущей волны,  $\lambda$ -образная. Такое количество антенн обусловлено спецификой применения каждой из них – диаграммой направленности, эффективностью функционирования и размерами [3].

Одним из главных элементов, обеспечивающих эффективное функционирование антенной системы РЭС, является согласующее устройство между самой антенной и основным трактом РЭС. Для эффективной передачи/приема информации согласующие устройства должны быть идеально согласованы как с самой антенной системой, так и с устройствами формирования/приема радиосигналов. При проектировании согласующих устройств важные требования – тип используемых антенн, зависимости их импеданса и коэффициента стоячей волны (КСВ) от частоты. Именно эти требования обуславливают выбор согласующей цепочки и номиналы входящих в состав антенны элементов.

Зависимости импедансных характеристик и КСВ от частоты для штыревой антенны, как наиболее распространенной для радиостанций ВЧ-диапазона, представлены на рис. 1, а на рис. 2 – для антенны типа «наклонный луч». Более подробную информацию о частотных характеристиках других типов антенн можно найти в [4]. В результате анализа основных параметров различных мобильных антенн ВЧ-диапазона можно сделать вывод, что зависимости входного сопротивления (активного и реактивного), а также КСВ от частоты имеют сложный вид. Поэтому использование таких антенн без согласующих устройств (СУ) не представляется возможным. Именно СУ, учитывающие изменения в работе РЭС с учетом условий эксплуатации, наиболее эффективны при функционировании радиосредств ВЧ-диапазона. В рамках исследований сформулирована следующая гипотеза: существует практическая возможность реализации процесса автоматического согласования передатчика (приемника) с антенной в беспойсковом режиме за счет проведения соответствующих вычислений и наличия априорной информации о параметрах радиотехнических элементов, входящих в состав согласующего устройства [5].



**Рис. 1.** Зависимость активного и реактивного сопротивлений (a) и коэффициента стоячей волны (b) антенны АШ-4 от частоты  
**Fig. 1.** Dependence of active and reactive resistance (a) and standing wave ratio (b) of the ASh-4 antenna on frequency



**Рис. 2.** Зависимость активного и реактивного сопротивлений (a) и коэффициента стоячей волны (b) антенны типа «наклонный луч» от частоты  
**Fig. 2.** Dependence of the active and reactive resistance (a) and standing wave ratio (b) of type “slant beam” from frequency

При проектировании любого СУ стоит задача выбора способа автоматического согласования. Именно он определяет множество эксплуатационных параметров СУ, таких как качество согласования, время настройки, ресурс устройства. Выбор того или иного метода определяет требования к аппаратной части устройства. От него зависят динамический диапазон и погрешность измерителей, сложность и производительность вычислительной части управляющего устройства, необходимый объем априорной информации об элементах согласующей цепи (СЦ).

Наиболее широкое распространение получили способы настройки поискового типа. Обосновать такое распространение можно следующим образом. Во-первых, использование данного подхода не предъявляет высоких требований к измерителям электрических параметров. Во-вторых, вычислительная часть управляющего устройства настолько упрощается, что может быть реализована даже без применения микроконтроллера. Для поискового метода качество согласования достигает предельного возможного значения, определяемого точностью (дискретностью) установки номиналов элементов СЦ.

Однако поисковые способы обладают и недостатками, самым существенным из которых является большая длительность процесса согласования. В случае, если радиостанция поддерживает работу в сетях с автономным установлением связи (АУС) и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), настройка антенны при развертывании антенного поля подвижного пункта связи поисковым способом становится проблематичной, так как время настройки может превос-

ходить время ведения связи. В этой ситуации применение комбинированного метода (поискового и расчетного) с целью ограничения диапазона изменения номиналов реактивных элементов СЦ позволяет уменьшить время поиска в несколько раз, но все же выигрыш может быть получен не для всех нагрузок и рабочих частот. Например, для электрически коротких антенн в нижней части коротковолнового диапазона нельзя исключить ни старшие разряды элементов СЦ, так как рабочая частота достаточно низкая, ни младшие, поскольку добротность антенны довольно велика [4].

На основании проведенного анализа наибольший интерес представляет расчетный метод согласования. Скорость настройки антенны на текущей рабочей частоте при его использовании ограничена только временем однократной смены состояния дискретного набора, что в случае применения электромагнитных реле численно равно их времени переключения из одного состояния в другое. В случае же осуществления предварительной настройки антенны на наборе частот (для каналов АУС либо ППРЧ) скорость настройки будет определяться только временем, необходимым на перестройку частоты, осуществление измерений и выполнение расчетов.

Основными механизмами, ограничивающими качество согласования при использовании аналитического расчета номиналов элементов СЦ, являются: ошибки измерения параметров антенны, ошибки установки рассчитанных значений номиналов элементов СЦ, наличие неучтенных в расчетах паразитных параметров элементов СЦ. Решить проблему точности установки номиналов можно применением следующего подхода: фактические значения номиналов разрядов дискретных наборов элементов СЦ определяются при помощи встроенных измерителей СУ после сборки устройства и сохраняются в энергонезависимой памяти, а установка номиналов осуществляется с учетом фактических значений емкости и индуктивности разрядов. Основные паразитные параметры элементов, которые снижают результативность расчетного метода согласования, – это активные потери в индуктивных элементах СЦ, емкость между катушками индуктивности и корпусом СУ, индуктивность подключения конденсаторов. Именно наличие паразитных параметров, не учтенных в расчетах номиналов элементов СЦ, не позволяет достичь требуемого качества согласования. Учет их в расчетах потребует решения системы дифференциальных уравнений численными методами, что предъявляет высокие требования к производительности управляющего устройства, входящего в состав СУ. Это обуславливает необходимость поиска новых эффективных подходов и методов автоматического согласования.

Для оценки работоспособности какой-либо сложной системы до момента ее реализации часто используется моделирование, что значительно ускоряет и удешевляет процесс разработки. Такой подход неоднократно применялся при анализе качественных показателей проектируемых СУ [5]. Поскольку качество согласования с применением различных реализаций итерационного поиска достаточно высокое, существует возможность смоделировать такой процесс согласования [4] с применением его результатов для управления состоянием дискретных элементов СЦ – при каждой смене состояния производится оценка результативности СЦ при помощи схемотехнической модели, т. е. предлагается новый подход к согласованию – виртуальный поиск [5]. Он позволяет существенно снизить время настройки (приблизительно в 21 раз для антенны типа АШ-4), при этом незначительно проигрывая в качестве по сравнению с поразрядным поиском.

Для практического применения предложенного подхода необходимо разработать схемотехническую модель аппаратной части СУ, используя схемы замещения элементов СЦ. Необходимость создания подобной модели обусловлена тем, что при конструировании СУ применяются не идеальные, а реальные реактивные элементы. В рамках такой модели можно изменять состояние дискретных наборов катушек индуктивности и конденсаторов, тем самым изменяя эквивалентную схему четырехполюсника, образованную элементами СЦ. На ее основании можно рассчитывать результирующий иммитанс на входе СУ по известному иммитансу антенны [4, 5].

Предлагается решение, использующее трансформирующий элемент при проведении измерений для уменьшения реактивного сопротивления (проводимости) антенны и, как следствие, позволяющее снизить требования к точности измерителей до необходимого уровня. При возникновении ситуации, когда измеренный иммитанс антенны не дает возможности использовать полученное значение в расчетах из-за погрешности измерителя, производится предварительный расчет номинала трансформирующего элемента и включение необходимого числа старших разрядов дискретного набора в соответствии с выражениями, представленными в [5]. После чего определяется состояние оставшихся младших разрядов, при этом состояние старших уже не изменяется. Рассматриваемый метод учета погрешности измерителей [5] пригоден для любого рас-

четного способа согласования. В случае использования виртуального поиска предлагается интегрировать этот механизм в сам способ согласования. Выполнена экспериментальная проверка различных способов согласования с применением аппаратного макета СУ и эквивалента антенны типа АШ-4 [5], которая подтвердила, что предложенный подход к согласованию в виде виртуального поиска обладает достоинствами поискового и расчетного способов согласования, при этом лишен их недостатков.

### Особенности решения задачи цифрового диаграммообразования в широкополосных субапертурных антенных решетках

Одним из важных направлений повышения информационных возможностей радиолокационных средств является повышение разрешающей способности по дальности за счет увеличения ширины спектра зондирующих сигналов (ЗС). Наиболее характерным примером являются радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования, ширина  $\Delta f_0$  спектра ЗС которых в настоящее время может достигать 300 МГц с тенденцией увеличения до 1200 МГц [6]. Использование широкополосного сигнала резко увеличивает вероятность нарушения электромагнитной совместимости с другими радиоэлектронными средствами, играющими роль МИИ. Поскольку доля широкополосных (сотни мегагерц) РЭС в настоящее время невелика, а подавляющая часть РЭС использует относительно узкополосные сигналы с шириной спектра  $\Delta f_{\text{МИИ}} = 1\text{--}10$  МГц, то для сигналов таких МИИ условие пространственно-временной узкополосности будет выполняться. Это создает предпосылки для эффективного использования методов компенсации сигналов в пространственной области.

Основные требования к антенным системам современных и перспективных средств радиолокации включают обеспечение высокого коэффициента усиления, реализацию широкоугольного электронного сканирования на передачу и прием при использовании широкополосного зондирующего сигнала и эффективных процедур режекции помех в пространственной и (или) поляризационных областях. Эти требования противоречивы: высокий коэффициент усиления достигается при соответствующих размерах антенны, что затрудняет электронное сканирование как с учетом широкополосности полезных сигналов, так и с учетом известного явления «ослепления» фазированной антенной решеткой, когда реактивная составляющая ее импеданса на определенных углах наблюдения и (или) частотах резко возрастает [7]. Основным вариантом преодоления указанного противоречия является переход к субапертурным (модульным) антенным решеткам (АР). Такие решетки конструктивно выполнены из подрешеток (субапертур, модулей), размеры  $L_{\text{пр}}$  которых по соответствующей координате выбираются исходя из выполнения условий пространственно-временной узкополосности  $L_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{max}} / c \ll 1 / \Delta f_0$ , где  $\theta_{\text{max}}$  – максимальный угол наблюдения по отношению к нормали подрешетки, а также исходя из отсутствия явления «ослепления». Для всей АР, состоящей из  $N_{\text{пр}}$  подрешеток, условия пространственно-временной узкополосности не выполняются:  $N_{\text{пр}} L_{\text{пр}} \sin \theta_{\text{max}} / c \approx 1 / \Delta f_0$ . Характерным примером являются крупноапертурные решетки космических РСА, типовая геометрия наблюдения в которых приведена на рис. 3.

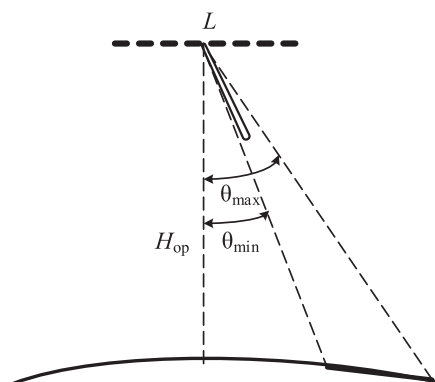


Рис. 3. Геометрия наблюдения в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры космического базирования  
Fig. 3. Observation geometry in space-based synthetic aperture radar stations

Высота орбиты РСА составляет  $H_{ор}$ , нормаль AP ориентирована в надир, угол  $\theta$  отклонения от надира может принимать значения от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  справа и слева от линии пути, что обеспечивает двусторонний обзор без поворота корпуса космического аппарата. Длина AP в угломестной плоскости составляет  $L$ , что приводит к разности задержек сигнала между крайними точками AP при распространении сигнала в одном направлении на величину  $\Delta\tau = L\sin\theta/c$ , где  $c$  – скорость света. В частности, при  $L = 0,7$  м и  $\theta = 45^\circ$  получим  $\Delta\tau = 1,7$  нс. Для ЗС с шириной спектра 600 МГц ширина главного лепестка функции рассогласования также составит 1,7 нс, т. е. условия пространственно-временной узкополосности не выполняются. Это приводит к «размыванию» огибающей широкополосного сигнала на выходе согласованного фильтра (СФ) и уменьшению амплитуды сигнала. Данная ситуация приведена на рис. 4, где показаны амплитудные огибающие сигнала от точечной цели на выходе СФ при наличии выравнивания временных задержек (сплошная кривая), выравнивания задержек только на передачу (точечная кривая) и при отсутствии выравнивания (пунктирная кривая) при  $L = 0,7$  м, числе подрешеток  $M = 8$ ,  $H = 500$  км,  $\theta = 50^\circ$ .

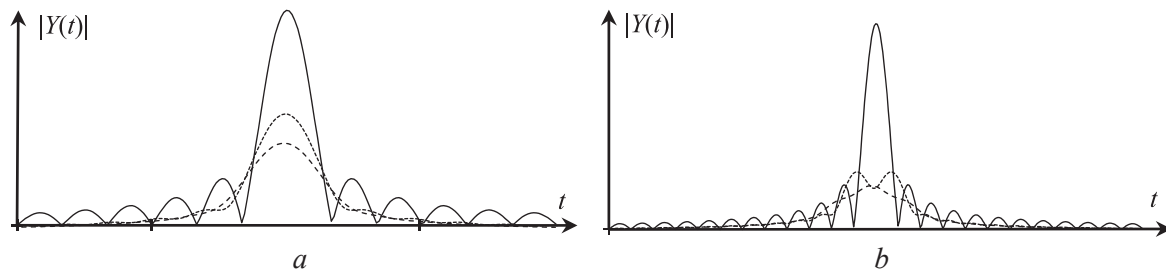


Рис. 4. Амплитудная огибающая сигнала при  $\Delta f_0$ : а – 600 МГц; б – 1200 МГц  
Fig. 4. Amplitude envelope signal at  $\Delta f_0$ : а – 600 МГц; б – 1200 МГц

Предложенный в [8, 9] способ ЦДО для субапертурных решеток [4] с одновременной компенсацией МИИ на прием основан на использовании реализуемых средствами цифровой обработки сигналов управляемых линий задержки, выравнивающих временные сдвиги выходных сигналов подрешеток для направления прихода полезного сигнала, в сочетании с классическим фазовым методом управления угловым положением луча (рис. 5). Устранение временных задержек по апертуре и последующее ЦДО на прием с компенсацией сигналов МИИ выполняются в спектральной области. Для этого над отсчетами выходных сигналов подрешеток осуществляется операция быстрого преобразования Фурье, для заданного направления наблюдения вычисляются временные сдвиги полезного сигнала по апертуре и выполняется их компенсация на основе теоремы о сдвиге путем умножения спектров сигналов каждой подрешетки на соответствующие фазовые множители. При этом соответствующие временные сдвиги получают и сигналы МИИ на выходах подрешеток, что приводит к некоторому снижению эффективности их последующей пространственной компенсации. Однако, поскольку сигналы МИИ предполагаются относительно узкополосными, т. е.  $\tau \ll 1/\Delta f_{МИИ}$ , снижение эффективности пространственной компенсации будет незначительным. Оценка векторов весовых коэффициентов (ВВК) для формирования системы основных приемных каналов (суммарного и разностных или интерферометрических с разнесенными фазовыми центрами) может проводиться любым из известных методов с использованием критериев максимума отношения сигнал/шум или линейно-ограниченных алгоритмов адаптации.

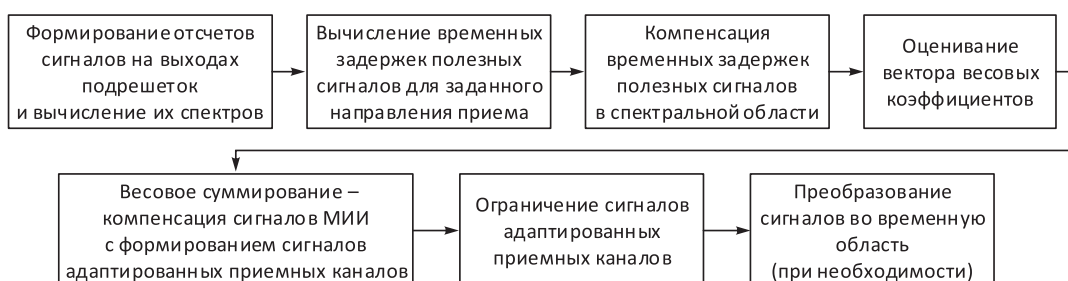


Рис. 5. Блок-схема алгоритма обработки сигналов  
в широкополосной субапертурной антенной решетке на прием

Fig. 5. Block diagram of the signal processing algorithm in a broadband sub-aperture antenna array for reception

Ограничение сигналов адаптированных приемных каналов после ЦДО является специфической особенностью широкополосных приемных систем. Его необходимость связана с тем, что длительность фронта сигнала МИИ может быть сравнима с временной задержкой сигнала между подрешетками. В этом случае на выходе ЦДО при большой (на 40–50 дБ выше уровня собственных шумов) мощности МИИ возникнет сильный, но кратковременный нескомпенсированный выброс сигнала МИИ. Включение ограничителя устраняет указанный выброс аналогично схеме ШОУ – «широкополосное усиление – ограничение – узкополосное усиление». Устранение временных задержек в подрешетках на передачу существенно проще и реализуется в процессе прямого цифрового синтеза (DDS) ЗС за счет расчета временных задержек для заданной геометрии наблюдения и коррекции временного представления сигнала в схемах DDS подрешеток.

Приведенный на рис. 5 способ обработки является конкурирующим как минимум с двумя известными способами обработки. В первом из них узкополосный сигнал (или сигналы) МИИ может быть режектирован в частотной области путем оценивания его спектральных параметров (центральной частоты и ширины спектра) и настройки соответствующих режекторных фильтров, что, очевидно, является достаточно трудоемким и не решает проблемы устранения временных задержек полезного сигнала между подрешетками. Во втором, классическом, способе обработки вся полоса частот полезного сигнала разбивается на субполосы исходя из условия пространственно-временной узкополосности с последующим ЦДО в каждой из субполос и объединением результатов, что также весьма трудоемко. Результаты [8, 9] моделирования предложенного способа свидетельствуют о возможности эффективного ЦДО в широкополосной субапертурной антенной решетке с широкоугольным сканированием с одновременной компенсацией мешающих источников излучений.

#### Квазиоптимальные алгоритмы совместного обнаружения-измерения угловых координат в многоканальной приемной системе с механическим сканированием

В радиолокационных средствах и некоторых средствах радионавигации и радиомониторинга широко используется механическое вращение (сканирование) антенной системы. Для защиты от помех применяются многоканальные антенные системы, состоящие из основной передающей антенны с коэффициентом усиления  $G_0$  и  $l = \overline{1, L}$  дополнительных (компенсационных) антенн с коэффициентами  $G_l \ll G_0$ . Для такой многоканальной приемной системы для сигналов с постоянной амплитудой могут быть использованы оптимальные алгоритмы совместного обнаружения-измерения угловых координат целей, предполагающие перебор с заданной дискретностью всех возможных гипотез об угловой координате  $\alpha$  цели, вычисление оптимальных ВВК и решающих статистик с их последующей максимизацией. Такие алгоритмы очень трудоемки, в связи с чем особый интерес представляют квазиоптимальные алгоритмы обработки. Общая идея построения таких алгоритмов основана на «обелении» помех в пространственной области путем адаптивного ЦДО в пределах каждого периода повторения безотносительно к возможному угловому положению цели  $\alpha$ , на последующем «обелении» сформированной реализации во временной области и согласованной фильтрации измененного в процессе компенсации помех полезного сигнала [10, 11].

Пусть в пределах  $i = \overline{1, I}$  периодов повторения сформированы ВВК приемных каналов  $\omega_i$  и отсчеты сигналов адаптированного канала для ожидаемого времени задержки отраженного сигнала

$$\dot{Y}_{ai} = \omega_i^+ y_i = \omega_i^+ (y_{сш_i} + y_{п_i}) + \omega_i^+ y_{с_i}, \quad (1)$$

где  $y_i = y_{сш_i} + y_{п_i} + y_{с_i}$  – вектор отсчетов сигналов приемных каналов, включающий векторы собственных шумов, помех и полезного сигнала соответственно.

Мощность взвешенных внутренних шумов и нескомпенсированных остатков внешних помех запишется в виде

$$P_{ш+п_i} = \omega_i^+ \left( \sigma_{сш}^2 \mathbf{I} + \Phi_{п_i} \right) \omega_i, \quad (2)$$

где  $\sigma_{сш}^2$  – мощность внутренних шумов приемных каналов;  $\Phi_{п_i} = \overline{y_{п_i} y_{п_i}^+}$  – корреляционная матрица (КМ) внешних помех.

Мощность  $P_{ш+п_i}$  не стационарна из-за сканирования антенны. Взвешенные шумы и нескомпенсированные остатки помех являются некоррелированными от периода к периоду. В соответствии с принципами обработки на фоне «небелого» шума формирование функции правдоподоб-

бия предполагает операции «обеления» суммы мощности взвешенных шумов и некомпенсированных остатков помех во временной области путем деления отсчетов на величину  $\sqrt{P_{\text{ш+п}_i}}$  с последующей согласованной обработкой измененного полезного сигнала. В качестве оценки мощности взвешенных шумов и некомпенсированных остатков помех принимается величина

$$\hat{P}_{\text{ш+п}_i} = \mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i, \quad (3)$$

где  $\hat{\Phi}_i$  – оценка КМ процессов на выходах приемных каналов.

Для классифицированной выборки формула (3) является оценкой максимального правдоподобия, для неклассифицированной – формула (3) смещена на величину доли мощности полезного сигнала, попадающей в КМ. После операции «обеления» во временной области имеем

$$\dot{Z}_i = \frac{\dot{Y}_{ai}}{\sqrt{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}. \quad (4)$$

Отсчеты измененного опорного сигнала с произвольной амплитудой  $U$  и нулевой начальной фазой, принимаемого с направления  $\alpha$ , будут иметь вид

$$\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha) = \frac{U \dot{F}_0^*(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)}{\sqrt{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}, \quad (5)$$

где  $\alpha_{ai}$  – угловое положение антенны в  $i$ -м периоде повторения.

Согласно (5), цели, находящиеся на различных угловых направлениях  $\alpha$ , порождают на выходе системы обработки различные последовательности отсчетов (сигналы)  $\mathbf{z}_{\text{оп}}(\alpha) = (\dot{Z}_{\text{оп}_1}(\alpha), \dot{Z}_{\text{оп}_2}(\alpha), \dots, \dot{Z}_{\text{оп}_I}(\alpha))^T$ . В этой связи задачу оптимальной оценки азимута цели можно трактовать как задачу различения непрерывного континуума гипотез о наличии в принимаемой реализации сигналов (последовательности отсчетов) со случайной начальной фазой и формой (5). Для упрощения структуры решающего устройства потребуем, чтобы мощности опорных сигналов были фиксированы  $\sum_i |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2 = \text{const}$ , откуда для условной оценки амплитуды опорных сигналов получим:

$$U(\alpha) = \left( \sqrt{\sum_{i=1}^I |\dot{Z}_{\text{оп}_i}(\alpha)|^2} \right)^{-1}. \quad (6)$$

С использованием классического решения задачи различения произвольного числа сигналов со случайной начальной фазой функция правдоподобия запишется как

$$\Psi(\alpha) = \frac{\left| \sum_{i=0}^I \frac{\dot{F}_0^*(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{y}_i \mathbf{s}^+(\alpha_{ai} - \alpha) \mathbf{\omega}_i}{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i} \right|}{\sqrt{\sum_{i=0}^I \frac{|\dot{F}_0(\alpha_{ai} - \alpha)|^2 |\mathbf{\omega}_i^+ \mathbf{s}(\alpha_{ai} - \alpha)|^2}{\mathbf{\omega}_i^+ \hat{\Phi}_i \mathbf{\omega}_i}}} \quad (7)$$

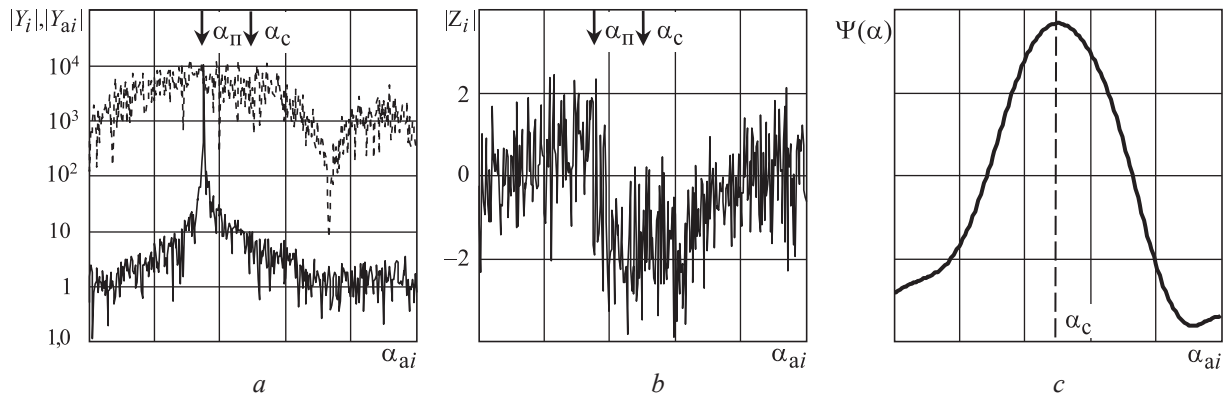
с оценкой угловой координаты

$$\hat{\alpha} = \arg \max_{\alpha} \Psi(\alpha). \quad (8)$$

Иллюстрация процессов при преобразовании сигнала для квазиоптимального алгоритма для одной из реализаций приведена на рис. 6. Зависимости построены при нормированном к ширине главного лепестка основного канала различии угловых положений цели  $\alpha_c$  и помехи  $\alpha_n$  0,5, максимальных отношениях сигнал/шум по одному импульсу пачки и помеха/шум 8,4 и 50,0 дБ соответственно. Определение факта наличия и углового положения полезного сигнала по реализациям до и после пространственной компенсации внешних помех невозможно. После операции временного «обеления» наличие полезного сигнала и его ориентировочные угловые координаты достаточно хорошо определяются визуально.

Приведенный подход к квазиоптимальной обработке был развит для случаев сигнала с флуктуирующей по закону Релея амплитудой и двухэтапной обработкой с предварительным оцениванием параметров мешающих отражений и дополнительным учетом изменений их фазовой структуры в процессе ЦДО [10].





**Рис. 6.** Иллюстрация квазиоптимального алгоритма: *a* – модули сигналов на выходе основной антенны (пунктир) и после цифрового диаграммообразования (сплошная кривая); *b* – синфазный компонент сигнала на выходе цифрового диаграммообразования после временного «обеления»; *c* – решающая статистика

**Fig. 6.** Illustration of the quasi-optimal algorithm: *a* – signal modules at the output of the main antenna (dotted line) and after the central distribution center (solid curve); *b* – in-phase component of the signal at the output of the digital dispenser after temporary “whitening”; *c* – decisive statistic

### Заклучение

1. В результате проведенных исследований систематизированы различные подходы к проектированию согласующих устройств и выявлена их универсальная структура, позволяющая решить задачу согласования для типовых антенных систем ВЧ-диапазона.

2. Разработан новый беспойсковый метод автоматического согласования антенны с выходом передатчика (входом приемника), базирующийся на использовании схемотехнической модели согласующих устройств для осуществления итерационного поиска оптимального состояния элементов согласующей цепи с последующим использованием результатов моделирования для управления аппаратной частью устройства и позволяющий существенно снизить время настройки.

3. Полученные результаты могут быть использованы для построения антенных устройств перспективных радиоэлектронных средств. Планируемые основные направления дальнейших исследований по указанной тематике состоят:

- в обосновании быстродействующих многополосных согласующих устройств для антенн средств радиосвязи ВЧ-диапазона при изменении условий их функционирования с использованием методов адаптивного регулирования и нейронных сетей;
- в разработке методик совместной оптимизации согласующих устройств, способов цифрового диаграммообразования и обработки сигналов в антенных системах широкополосных радиоэлектронных средств;
- в разработке антенных элементов и получении практически реализуемых алгоритмов адаптивного цифрового диаграммообразования и пеленгации источников полезных сигналов в антенных системах с изменяемыми поляризационными характеристиками.

### Список литературы

1. Листопад, Н. И. Оптимизация параметров мобильных антенн ВЧ-диапазона / Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич // Доклады БГУИР. 2018. № 6. С. 73–79.
2. Листопад, Н. И. Методика синтеза согласующих устройств для мобильных систем связи КВ-диапазона / Н. И. Листопад, Д. А. Ковалевич // Новости науки и технологий. 2020. № 4. С. 17–25.
3. Ковалевич, Д. А. Способ автоматического согласования антенны и выходных каскадов передатчика / Д. А. Ковалевич // Доклады БГУИР. 2021. № 3. С. 31–39.
4. Ковалевич, Д. А. Синтез требований к измерителю иммитанса для согласующих устройств расчетного типа / Д. А. Ковалевич // Новости науки и технологий. 2021. № 3. С. 29–38.
5. Ковалевич, Д. А. Использование расчетного способа согласования антенны с учетом конечной точности измерителя иммитанса / Д. А. Ковалевич // Известия Гомельского государственного университета имени Франциска Скорины. 2021. № 6. С. 134–140.
6. Алексева, А. М. О построении активных фазированных антенных решеток для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения / А. М. Алексева, Т. М. Лепехина, В. Г. Поль // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2022. № 1. С. 44–50.

7. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен. М.: Техносфера, 2012.
8. Козлов, С. В. Цифровое диаграммообразование с компенсацией мешающих источников излучений в крупно-апертурной антенной решетке и широкополосном зондировании / С. В. Козлов, М. А. Лобан, В. В. Радионович // Новости науки и технологии. 2021. № 3. С. 14–22.
9. Козлов, С. В. Особенности цифрового диаграммообразования в субапертурных антенных решетках высокоинформативных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры / С. В. Козлов, В. В. Радионович // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 70–74. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74>.
10. Козлов, С. В. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Доклады БГУИР. 2019. № 4. С. 48–56.
11. Козлов, С. В. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / С. В. Козлов, Ву Тхань Ха // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 11. С. 1–29. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.10.

## References

1. Listopad N. I., Kovalevich D. A. (2018) Optimization of Parameters of Mobile Antennas in the HF Range. *Doklady BGUIR*. (6), 73–79 (in Russian).
2. Listopad N. I., Kovalevich D. A. (2020) Methodology for the Synthesis of Matching Devices for HF Mobile Communication Systems. *News of Science and Technology*. (4), 17–25 (in Russian).
3. Kovalevich D. A. (2021) A Method for Automatically Matching the Antenna and Transmitter Output Stages. *Doklady BGUIR*. (3), 31–39 (in Russian).
4. Kovalevich D. A. (2021) Synthesis of Requirements for an Immittance Meter for Calculation-Type Matching Devices. *News of Science and Technology*. (3), 29–38 (in Russian).
5. Kovalevich D. A. (2021) Using a Calculation Method for Matching the Antenna Taking into Account the Final Accuracy of the Immittance Meter. *News of Gomel State University named after Francis Skaryna*. (6), 134–140 (in Russian).
6. Alekseeva A. M., Lepehina T. M., Pol V. G. (2022) On the Construction of Active Phased Array Antennas for High-Resolution Synthetic Aperture Space Radars. *Bulletin "NPO named after S. A. Lavochkin"*. (1), 44–50 (in Russian).
7. Hansen R. S. (2012) *Phased Array Antennas*. Moscow, Tekhnosphere Publ. (in Russian).
8. Kozlov S. V., Loban M. A., Radionovich V. V. (2021) Digital Beamforming with Compensation of Interfering Radiation Sources in Large-Aperture Antenna Arrays and Broadband Sensing. *News Science and Technologies*. (3), 14–22 (in Russian).
9. Kozlov S. V., Radionovich V. V. (2023) Features of Digital Beamforming in Sub-Aperture Antenna Arrays of Highly Informative Space Radars with Synthetic Aperture. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 70–74. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74> (in Russian).
10. Kozlov S. V., Vu Thanh Ha (2019) Estimation of Angular Coordinates in Surveillance Radar Stations with Spatial Interference Compensation Subsystems. *Doklady BGUIR*. (4), 48–56 (in Russian).
11. Kozlov S. V., Vu Thanh Ha (2019) Algorithms for Signal Processing in Radar Angular Coordinate Meters with a Scanning Multichannel Antenna System. *Journal of Radio Electronics*. (11), 1–29. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.10 (in Russian).

## Сведения об авторах

**Козлов С. В.**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

**Ковалевич Д. А.**, канд. техн. наук, доц. каф. информационных радиотехнологий, БГУИР

**Листопад Н. И.**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных радиотехнологий, БГУИР

## Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-17  
E-mail: listopad@bsuir.by  
Листопад Николай Измайлович

## Information about the authors

**Kozlov S. V.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at Information Radiotechnologies Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

**Kovalevich D. A.**, Cand. of Sci., Associate Professor at Information Radiotechnologies Department, BSUIR

**Listopad N. I.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of Information Radiotechnologies Department, BSUIR

## Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-17  
E-mail: listopad@bsuir.by  
Listopad Nikolai Izmailovich