



Научная статья

УДК 621.396.677

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189155>

EDN: <https://www.elibrary.ru/IWCNNA>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ПОЛОТНА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АФАР

Н.В. Самбуров✉

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод «Тайфун» г. Калуга, Россия

✉ samburov.n.v@yandex.ru

Цитирование: Самбуров Н.В. Проектирование излучающего полотна многофункциональной АФАР // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189155>

Аннотация. На основе сформированного ранее технического облика многофункциональной АФАР проводится проектирование излучающего полотна. Для чего, с целью подтверждения возможности сканирования в широкой полосе, проводится электродинамический анализ антенного полотна, оценивается уровень согласования излучателей и потери усиления. Формулируются принципы управления и синтеза специализированных диаграмм направленности многофункциональной АФАР. Приводится описание специализированного программного обеспечения собственной разработки, с помощью которого осуществлен синтез диаграмм направленности АФАР, с использованием ограниченного количества излучателей полотна, то есть имеет место неэквилидистантное возбуждение решетки. Приводятся результаты синтеза и исследований устойчивости в процессе сканирования при статистическом разбросе параметров элементов управления.

Ключевые слова: многофункциональная антенна; активная фазированная антенная решетка; широкополосная антенная решетка; неэквилидистантная антенная решетка; синтез диаграммы направленности; программное обеспечение.

ENGINEERING DESIGN OF THE RADIATING STRUCTURE IN A MULTIFUNCTIONAL APAA

N.V. Samburov✉

Joint-Stock Company Research and Production Enterprise «Kaluga-based Instrument-Making Plant «TYPHOON», Kaluga, Russia

✉ samburov.n.v@yandex.ru

Abstract. Based on the previously developed technical concept of a multifunctional active phased array antenna (APAA), the design of the radiating array is carried out. To confirm the feasibility of scanning over a wide bandwidth, an electrodynamic analysis of the antenna array is performed, and the matching level of the radiators and gain losses are evaluated. The principles of control and synthesis of specialized radiation patterns (RP) for the multifunctional APAA are formulated. A description is provided of proprietary specialized software used to synthesize RPs using a limited number of APAA radiators — that is, non equidistant array excitation. The results of RP synthesis and studies of its stability during the scanning process under statistical variation of control element parameters are presented.

Keywords: multifunctional antenna; active phased antenna array; broadband antenna array; non-equidistant antenna array; radiation pattern synthesis; software.

Введение

Различные аспекты построения многофункциональных антенных решеток рассматриваются в ряде работ [1-4]. В дополнение к этому, так как многофункциональные решетки обычно являются широкополосными, близкими по тематике можно считать работы по исследованиям широкополосных фазированных антенных решеток (ФАР) с широкоугольным сканированием [5-8], активных ФАР [9] и излучателей ФАР [10,11]. Конечные антенные решетки малой размерности обладают специфическими характеристиками, обусловленными краевыми эффектами и чувствительности к отклонению параметров. Размеры (размерность) апертуры антенны для практических высокоприоритетных задач в большинстве случаев ограничиваются техническими (архитектурными) возможностями конкретного носителя, поэтому рассмотрение вопросов проектирования многофункциональных антенных устройств для подвижных носителей является актуальным.

Целью статьи является рассмотрение вопросов проектирования многофункциональной корабельной активной фазированной решетки (АФАР) L диапазона.

Многофункциональная АФАР

Вопросы разработки многофункциональных полотен для случая бортовой линейной антенной решетки подробно рассматриваются в [12]. Корабельные антенные устройства обладают иными требованиями, связанными с особенностями функционирования, такими как [13]: воздействие морской корабельной качки, влияние архитектурно-конструктивных особенностей корабля, воздействие морской климатической среды, механические воздействия от корпуса корабля, влияние организационно-технических особенностей эксплуатации корабля. Данные требования формируют соответствующие подходы к формированию облика антенн.

За основу АФАР примем облик корабельного антенного устройства, сформулированный в [13]. Структура диаграммообразующих устройств многофункциональной (МФ) АФАР состоит из делителя мощности, набора приёмо-передающих модулей (ППМ) (рисунок 1) и в целом соответствует классическому построению АФАР с пассивным диаграммообразующим устройством (делителем). Делитель распределяет сигналы на ППМ, в которых происходит усиление и преобразование амплитуды и фазы сигнала в соответствии сигналами системы управления лучом (не показаны). Антенные выходы набора ППМ соединены с соответствующими излучателями антенной решетки.

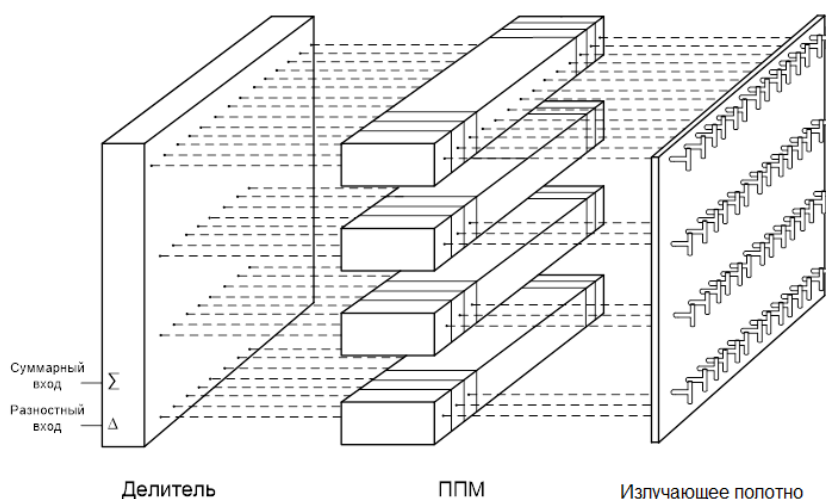


Рисунок 1 — Структурное построение МФ АФАР

Ниже будут рассмотрены следующие вопросы проектирования МФ АФАР:

- исследование эффективности конечной широкополосной фазированной антенной решетки как излучающего полотна АФАР,
- исследование особенностей диаграммообразования конечной АФАР,
- обоснование необходимости использования и описание вспомогательных программного обеспечения анализа и синтеза диаграмм направленности (ДН),
- исследование результатов синтеза ДН.

Электродинамическое исследование конечной антенной решетки

Исследование возможности широкоугольного и широкополосного согласования антенной решетки является необходимым этапом (условием) построения многофункциональной АФАР. В рамках этого был осуществлен электродинамический анализ конечной ФАР (см. рисунок 2). В качестве базового элемента ФАР использовался широкополосный диполь (конструкция которого синтезирована в [14]), оптимизированный для бесконечной ФАР [15].

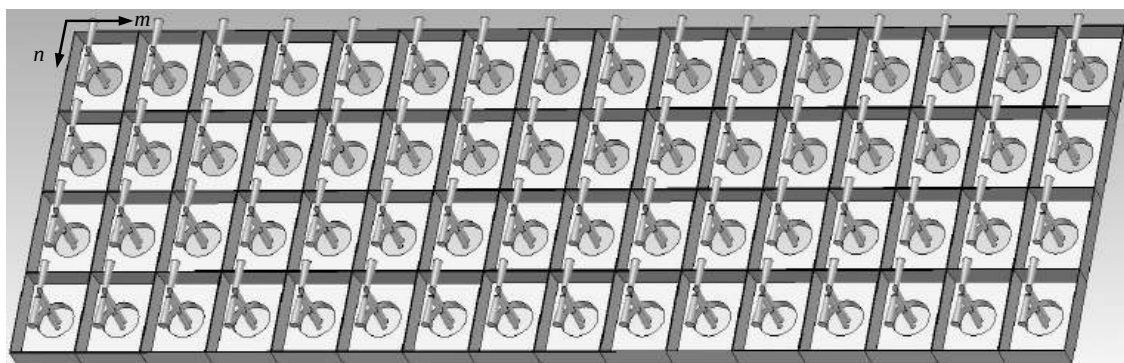


Рисунок 2 — Модель конечной ФАР

Размерность конечной решетки ($m \times n$) примем 16×4 (нумерация показана на рис. 2). Данная размерность, удачно согласующаяся со структурой бинарных делителей (соответствует числам бинарного ряда со знаменателем 2), выбрана как минимальная (наихудшая) с учетом необходимости исследования возможности диаграммообразования при наличии краевых эффектов. С учетом ряда ограничений и эффектов в процессе сканировании бесконечной решетки относительный рабочий диапазон частот следует ограничить величиной не менее 1:1,5, а зону сканирования в Е- и Н- плоскостях — 30 и 45 градусами, соответственно. При этом с целью анализа частотной устойчивости технических

решений частотная область исследования превышала рабочую с небольшим запасом: $0,95 f_0 \dots 1,55 f_0$, где f_0 - частота нормирования

На рисунках 3, 4 и 5 показаны результаты электродинамического анализа ДН конечной ФАР в пакете HFSS при сканировании в Е-, Н- и D- плоскостях, соответственно [16]. Исследование проведено для крайних частот: $0.95 f_0$ и $1.55 f_0$ (обозначены красным и зеленым цветом, соответственно). Анализ ДН показал, что критические искажения формы ДН на графиках отсутствуют.

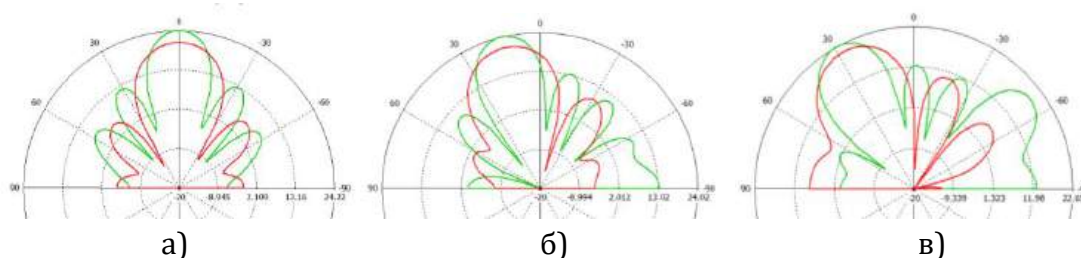


Рисунок 3 — Форма ДН ФАР при сканировании в Е-плоскости на крайних частотах при различных углах сканирования: а) $\varphi = 0^\circ$, б) $\varphi = 15^\circ$, в) $\varphi = 30^\circ$

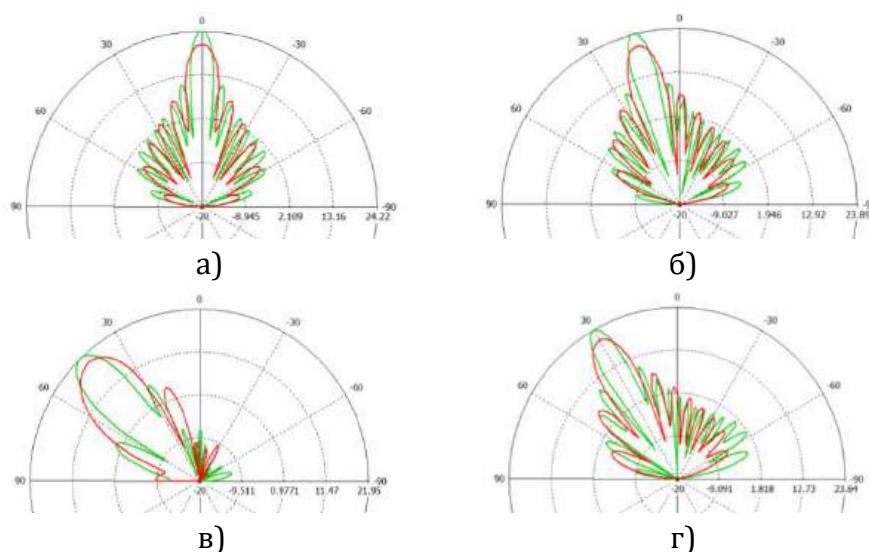


Рисунок 4 — Форма ДН ФАР при сканировании в Н-плоскости на крайних частотах при различных углах сканирования: а) $\varphi = 0^\circ$, б) $\varphi = 15^\circ$, в) $\varphi = 30^\circ$, г) $\varphi = 45^\circ$

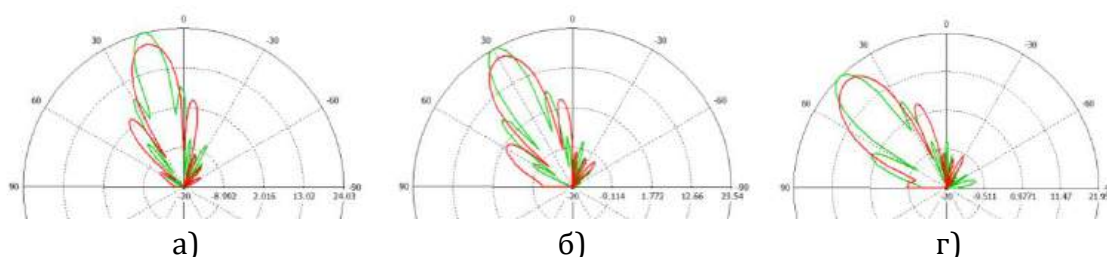


Рисунок 5 — Форма ДН ФАР при сканировании в D-плоскости на крайних частотах при различных углах сканирования: а) $\varphi = 15^\circ$, б) $\varphi = 30^\circ$, в) $\varphi = 45^\circ$

На рисунке 6 показаны зависимости величины коэффициента усиления (КУ) ФАР G от нормированной частоты f/f_0 при сканировании в различных плоскостях [16]. Для анализа величины потерь усиления в частотной и пространственных областях сформулируем функционал, условно характеризующий предельную величину КНД для апертуры с физическими размерами $a \times b$: $D_\theta = 4\pi \frac{ab}{\lambda^2} \cos \theta$. Таким образом, наибольшие потери КУ (G) в процессе сканирования (относительно значения функционала D_θ) наблюдаются на частотах выше $1,3 f_0$ при предельных значениях углов сканирования. Данные потери имеют величину не более 0,7...1,6 дБ (в среднем — 0.5...1 дБ), что приемлемо с учетом того, что 56% излучателей находятся в условиях воздействия краевых эффектов решетки.

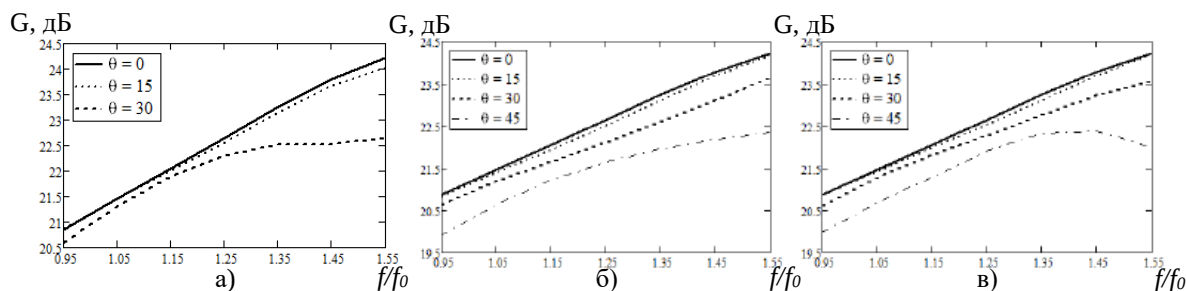


Рисунок 6 — Частотные зависимости коэффициента усиления G при сканировании в: а) Е-плоскости; б) Н-плоскости; в) D-плоскости

Помимо значения величины КУ практический интерес представляют характеристики согласования излучателей в составе конечной ФАР. На рисунке 7 показаны частотные зависимости уровня согласования для всех 64 излучателей (каждый излучатель своим цветом). Причем в данном случае, с целью снижения объема излагаемого материала и повышения наглядности анализа, нет необходимости конкретизировать излучатель (его номер) — достаточно оценить общий «интегрированный» уровень и его угло- частотную тенденцию. Из рисунка 7 видно, что даже при нормальном положении луча уровень согласования части элементов хуже –10 дБ, так как данные излучатели, расположенные по периметру ФАР и находятся в условиях, далеких от бесконечной ФАР. Наибольшее рассогласование наблюдается на предельных углах сканирования в Н-плоскости, однако при этом общее количество излучателей с уровнем $|S_{11}|$ более -10 дБ

(КСВН>1,9) является незначительным. Из чего можно сделать вывод, что в ФАР отсутствуют заметные потери на рассогласование.

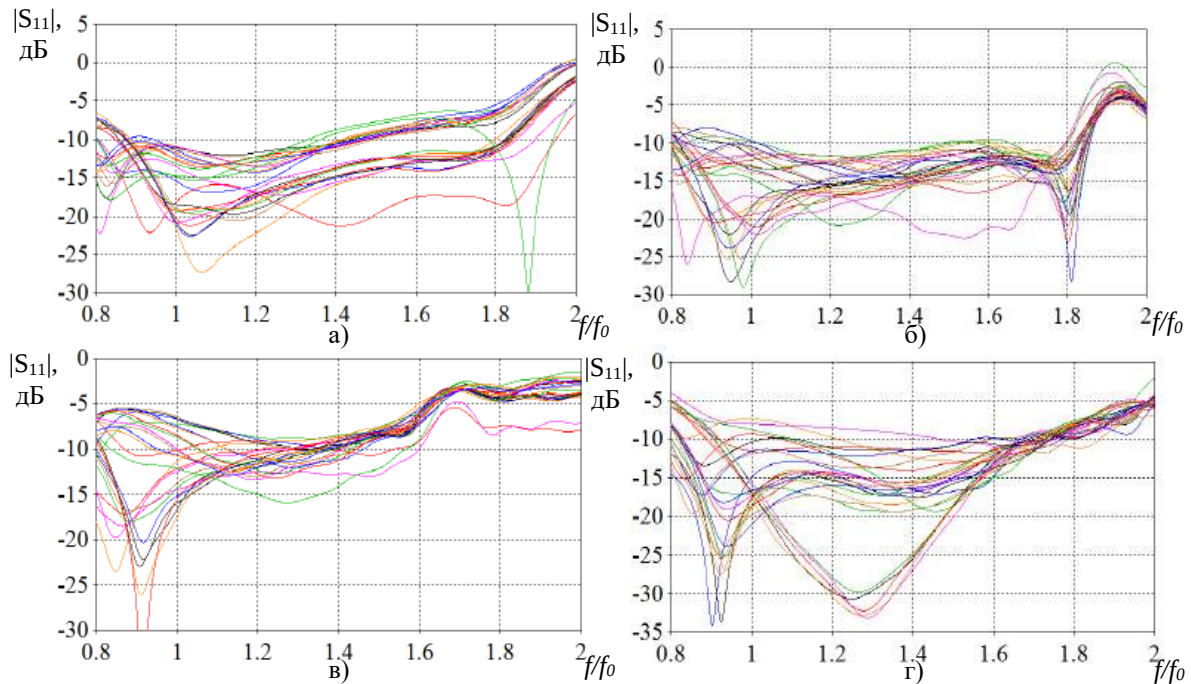


Рисунок 7 — Частотная зависимость модуля коэффициента отражения излучателей S_{11} (параметром цвета условно обозначен номер элемента) в составе конечной ФАР для неотклоненного луча (а) и при отклонении главного лепестка ДН от нормали в плоскостях: в Е-плоскости — на 30° (б), в Н-плоскости — на 45° (в), в D-плоскости — на 45° (г).

Так на рисунке 8 приведены зависимости суммарных потерь на рассогласование, рассчитанные на основе выражения $P_n = \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^{16} 1 - |(S_{11})_{nm}|^2$, где $(S_{11})_{nm}$ — коэффициент отражения от излучателя с индексами n, m [16]. Анализ графиков показал, что общий уровень потерь P_n при сканировании не опускается ниже 0,8 дБ и в среднем составляет 0,2...0,4 дБ. Если сравнить данные значения с потерями КУ, характеризуемых величиной $\frac{D_\theta}{G}$ (приведены выше), можно заключить, что вклад непосредственно рассогласования излучателей в величину потерь КУ незначительный и с увеличением размерности он будет только снижаться.

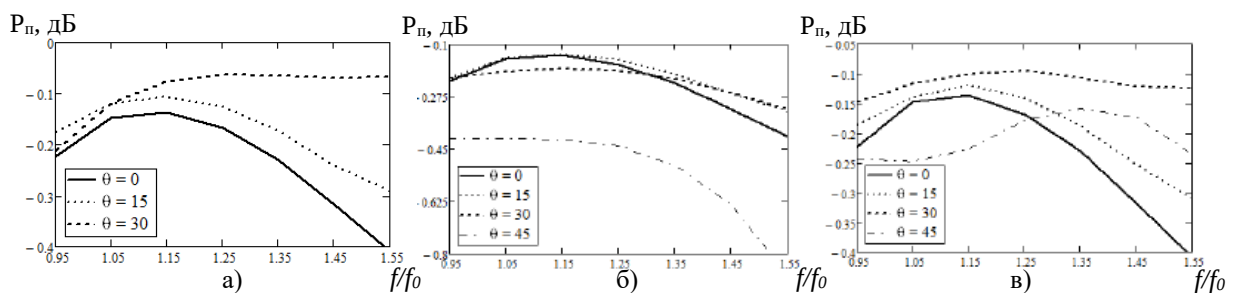


Рисунок 8 — Частотная зависимость величины потерь на рассогласование P_n при различных углах отклонения луча на θ (градусов) от нормали: а — в Е-плоскости, б — в Н-плоскости, в — в D-плоскости

Особенности диаграммообразования МФ АФАР

Выше была исследована конечная антенная решетка. В процессе исследования рассматривался случай равномерного амплитудного распределения по полотну, что определяет наихудший случай для согласования, а значит — возможности диаграммообразования антенной решетки. Однако стоит проанализировать ограничения присущие синтезу ДН для рассматриваемого случая МФК АФАР [13].

В активной и вторичной радиолокации ключевым параметром, характеризующим дальность обнаружения, является энергетический потенциал станции, максимально реализуемый (для фиксированного физического размера антенного полотна) при равномерном амплитудном и фазовом распределении сигнала по апертуре. Однако в активной радиолокации особую важность имеет величина уровня боковых лепестков (УБЛ) антенны (в том числе в режиме излучения), которая для равномерного распределения составляет достаточно высокую величину –13,2 дБ. В некоторой степени величина равная произведению величин УБЛ в режиме «на передачу» и «на прием» характеризует защищенность РЛС от помех, а также точность пеленгации и способность обнаруживать малозаметные цели на фоне крупных (что крайне важно в морской радиолокации).

По аналогичным причинам для вторичных РЛС обеспечение минимальной величины УБЛ антенны также является важным условием функционирования. В дополнение к этому одной из ключевых характеристик таких станций является величина перекрытия пространственных каналов (диаграмм направленности) антенны запросчика [3]. Для достижения максимального значения коэффициента перекрытия излучающая антенна основного канала должна иметь минимальный уровень боковых и фоновых лепестков, что также обеспечивается плавно спадающим амплитудным распределением.

Для реализации амплитудного распределения, спадающего по раскрыву апертуры, в эквидистантной АФАР потребуется:

- либо применение вППМ идентичных усилителей мощности с ослаблением сигнала с помощью управляемых аттенюаторов (или сложными схематическими методами [17]),

- либо применение в конструкции АФАР широкой номенклатуры ППМ с несколькими (фиксированными) выходными мощностями для использования в определенном месте апертуры,

- либо использованием на выходе ППМ пассивных антенных подрешеток, формирующей требуемое амплитудное распределение (использование одного ППМ для запитки нескольких излучателей АФАР).

Первый вариант приводит к снижению КПД, а остальные противоречат самой идеологии АФАР — требованию идентичности усилителей (и ППМ) как необходимого условия для экономически выгодного массового производства, а также требованию надёжности АФАР как сложной квазиизбыточной системы. Стоит заметить, что внешнеуправляемая регулировка усиления выходных усилителей мощности ППМ редко используется в практических конструкциях, так как это снижает КПД усилителей ППМ. Выходные транзисторные усилители ППМ обычно работают в нелинейном режиме (насыщения) либо (например, с целью снижения себестоимости или обеспечения защиты от функционального поражения ЭМ оружием) в выходных каскадах используются электровакуумные приборы, что также подразумевает постоянную выходную мощность усилителя мощности.

Альтернативой является использование (на передачу) ограниченного количества ППМ (с идентичным уровнем сигнала на выходах модулей). Это имеет аналогию с ФАР образованной «прорежением» периодически расположенных излучателей, то есть вариант решетки со спадающим уровнем пространственной плотности расположения излучателей. При этом в РЛС сохраняется возможность формирования луча с максимальным энергетическим потенциалом (так называемого «прожигающего» луча в условиях РЭБ), а при выходе из строя отдельных каналов – корректировка неэквидистантного распределения либо без, либо с минимальными искажениями формы ДН на передачу.

Таким образом в процессе формирования амплитудно-фазового распределения для специализированных ДН МФ АФАР используются следующие принципы управления, приведенные в таблице 1:

Принципы управления и синтеза специализированных ДН

Режим работы каналов АФАР	Формируемое распределение по апертуре АФАР	
	Амплитудное	Фазовое
Передача	Манипуляция излучением (включение-выключение)	Управление фазой сигнала
Прием	Управление амплитудой сигнала	Управление фазой сигнала

Далее в процессе рассмотрения особенностей формирования специализированных ДН в МФ АФАР будут использоваться данные принципы управления и формирования ДН.

Специализированное ПО анализа и синтеза ДН ФАР

В настоящее время широко распространены программы электродинамического моделирования антенных решеток (HFSS, MMANA, CST и др.). Данные коммерческие программные продукты характеризуются универсальностью и точностью расчетов. Однако для принятия технически обоснованного и оптимального решения разработчику требуется исследование большого числа вариантов построения (получаемых в том числе итерационным методом), конечное количество которых на ранних стадиях разработки слабо поддается учету. В этом случае формирование и корректировка электродинамической 3D модели ФАР составляет значительную часть времени исследования. В дополнение к этому в пакетах программ электродинамического моделирования затруднен статистический учет – например учет конструктивно-технологического разброса для конкретной конструкции устройства.

Более узкоспециализированное программное обеспечение (ПО) собственной разработки (в частности, описанное в [18]), обладающее с одной стороны некой функциональной простотой, а с другой — дополнительными возможностями, может являться средством принятия ключевых конструктивно-технических решений. По сравнению с универсальным ПО электродинамического моделирования, данное ПО не обладает универсальностью и потенциально уступает по точности результатов моделирования (например, может не учитывать эффекты внешнего и внутреннего взаимодействия излучателей [9]). Однако оно имеет преимущество при проведении предварительных расчетов, в т. ч. в условиях

дефицита времени на принятие комплексного технического решения в процессе формирования облика. Что касается эффектов взаимодействия излучателей, то внутреннее взаимодействие (в большинстве случаев) является нежелательным (методы борьбы закладываются разработчиком). Внешнее же взаимодействие излучателей в большинстве своем также является нежелательным, а возможность использования данных эффектов для целей согласования излучателя в составе решетки ограничены (в частности – диапазонами рабочих частот и углов сканирования луча ФАР).

Стоит также отметить, что МФ АФАР является составной частью радиотехнических станций, поэтому при оценке качества технических решений следует использовать такие характеристики антенны, форма представления которых согласуются с конечными параметрами станции. Так зона обзора и другие характеристики обзорных радиолокационных станции описывается в системе координат «угол места на азимуте» (так называемая «система координат наблюдателя»). Значительная часть внутренней обработки радиотехнической (радиолокационной) информации также осуществляется в данной системе координат (с последующей проекцией на наземную плоскость при формировании выходной вторичной информации). Поэтому параметры ДН антенных устройств, сформированные именно в системе координат наблюдателя, имеют высшую актуальность для корабельной радиолокационной станции, а значит представляют технический интерес. В связи с чем необходимо использовать систему координат «угол места на азимуте» («азимут-угол места») с углами отсчитываемые от нормали к решетке $(\varphi_{az}, \varphi_{el})$, а не сферическую систему координат (θ, φ) , принятую в классической теории антенн [19]. Таким образом углы сканирование и главные сечения ДН также необходимо формировать в данных плоскостях. Данное преобразование координат может учитываться в процессе анализа ДН непосредственно в специализированном ПО [20,21].

Временные затраты на разработку специализированного ПО (собственной разработки), в связи с их относительной простотой, достаточно малы и сравнимы, в частности, со временем формирования нескольких моделей в коммерческих средах электродинамического моделирования. В дополнение к этому данное ПО может быть использовано и в других схожих по тематике проектах и предпроектных работах.

ПО синтеза неэквидистантной антенной решётки

Рассмотрим одну из программ собственной разработки для целей анализа и синтеза АФАР: «Синтез неэквидистантных ФАР» [18]. Данное ПО позволяющее определять количество и расположение излучателей, располагаемых в периодических узлах антенной решётки, для заданного амплитудного распределения по апертуре.

В качестве математической основы метода используется «метод моментов токов» [22], позволяющий по заданному распределению «эталонного» непрерывного амплитудного распределения рассчитать положение элементов неэквидистантной решетки. Основой метода моментов токов является воспроизведение необходимого амплитудного распределения решетки с помощью изменения плотности расположения излучателей в ней. Для этого площадь под кривой амплитудного распределения разделяется на ряд полос (концентрических окружностей) одинаковой площади, число которых равно выбранному количеству элементов равномерно возбуждаемой неэквидистантной решетки.

Интерфейс программы и результаты синтезирования плоских неэквидистантных антенных решёток представлены на рисунке 9.

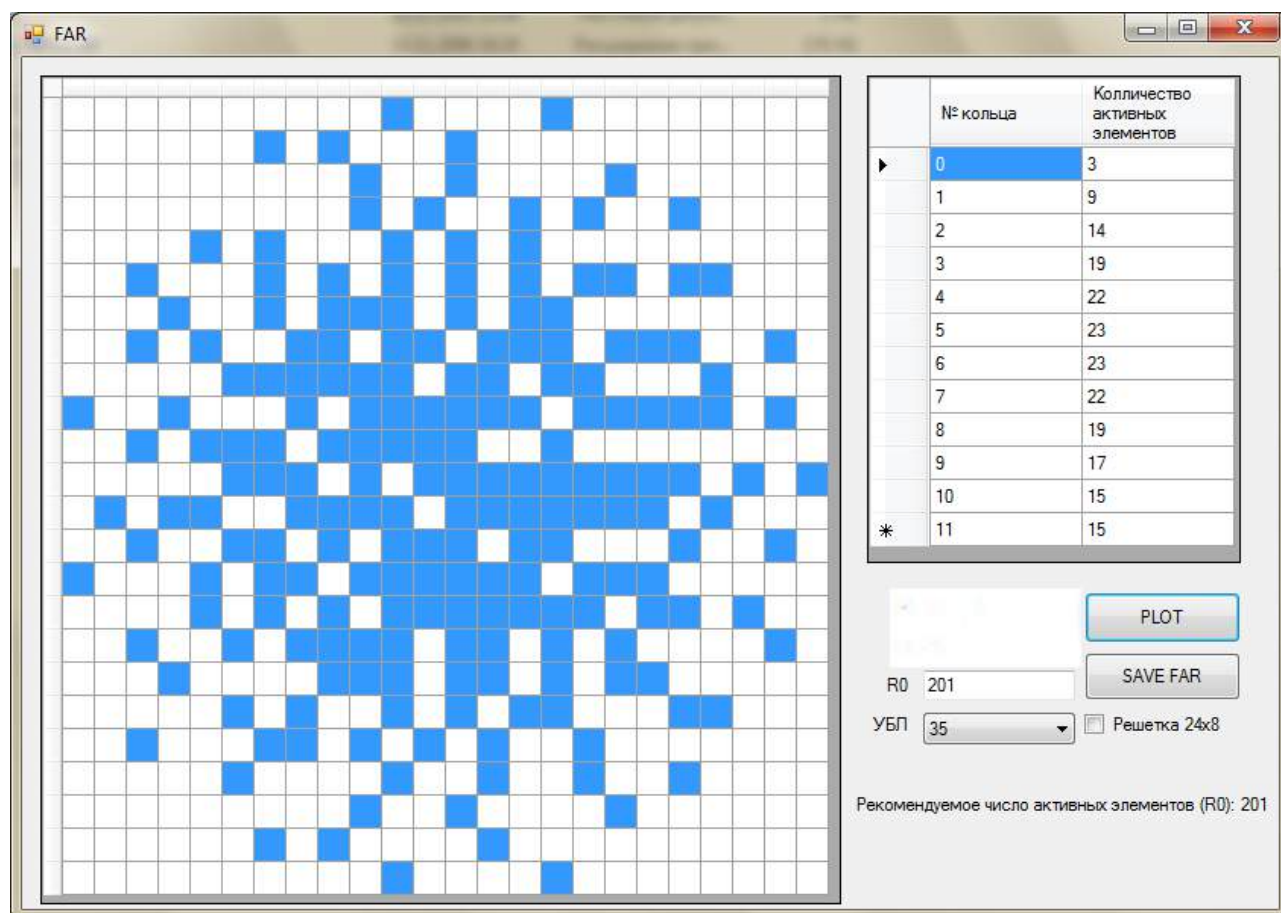


Рисунок 9 — ПО «Синтез неэквидистантных ФАР». Результаты работы модуля синтеза плоской разреженной ФАР (с круглым раскрывом)

Данная программа позволяет:

- решать задачу синтеза линейных и двумерных неэквилидистантных АФАР, т. е. осуществлять расчёт количества и положения излучателей решётки по заданному амплитудному распределению методом моментов токов,
- оперативно и наглядно контролировать диаграммообразование линейных и двумерных неэквилидистантных АФАР с учётом конструктивных элементов решёток (заданием неразрешённых зон),
- оперативно прогнозировать предельно реализуемые параметры линейных и двумерных неэквилидистантных антенных решёток и производить оценку их параметров в сравнении с параметрами эквилидистантных решёток.

Результаты синтеза ДН АФАР

С использованием ряда программных продуктов (приведены выше и в [18]) были осуществлены предварительные исследования и произведен синтез ряда ДН МФ АФАР конечной размерности. Отдельные результаты исследований, а также результаты проработки возможности синтеза специализированных ДН МФ АФАР будут приведены ниже.

Для синтеза ДН основного канала на передачу (далее — $\Sigma_{\text{прд}}$) было использовано ПО «Синтез неэквилидистантных ФАР». На рисунке 10 показан вариант неэквилидистантного расположения излучателей, реализующий УБЛ в Н-плоскости для неотклоненного луча порядка $-(22...23)$ дБ. Причем КНД данной решетки отличается от решетки с равномерным распределением на 1,2 дБ. На рисунках 11 и 12 приведена форма пространственной диаграммы направленности $\Sigma_{\text{прд}}$ на частоте $1,5 f_0$ в системе координат «азимут-угол места» ($\varphi_{\text{аз}}, \varphi_{\text{ел}}$).

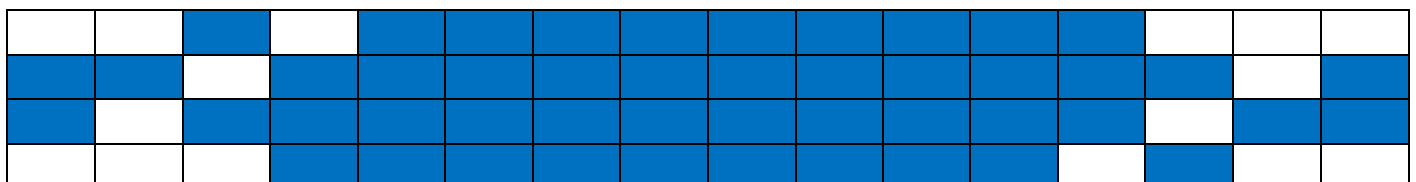


Рисунок 10 — Места расположения излучающих модулей по полотну АФАР для синтеза ДН $\Sigma_{\text{прд}}$ (обозначены цветом)

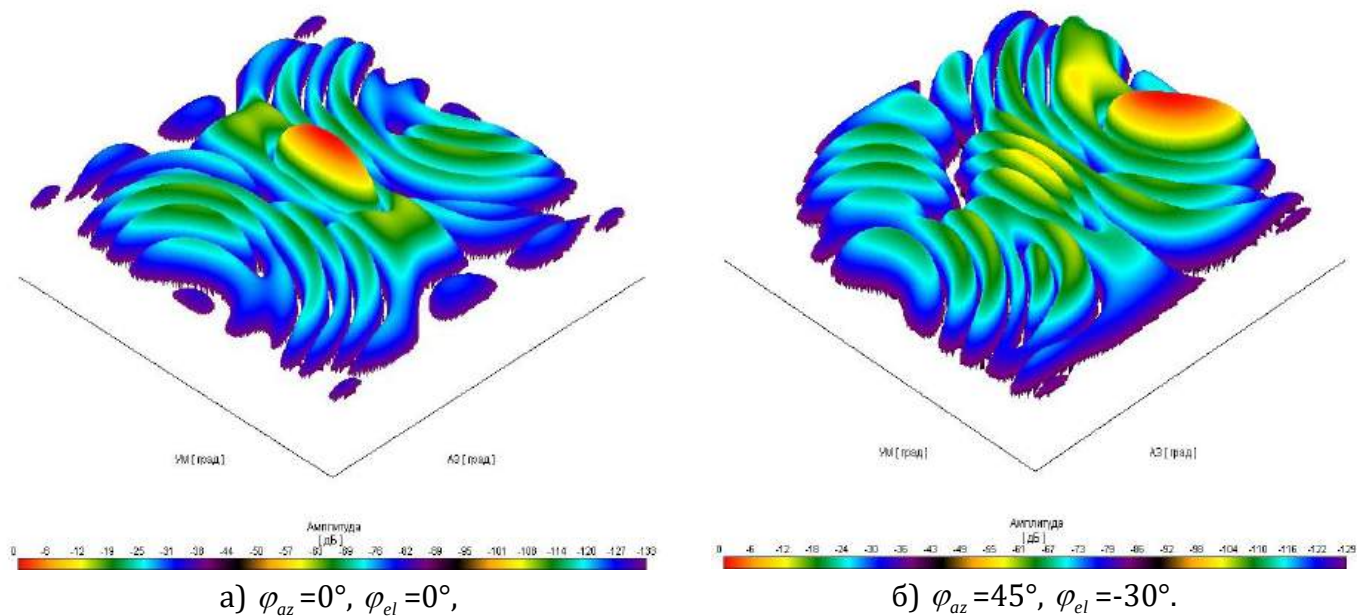


Рисунок 11 — Трехмерное представление ДН $\Sigma_{\text{прд}}$. Относительная амплитуда показана цветом согласно шкале цветов, величины АЗ и УМ откладываются в прямоугольной системе координат (координатные оси условно не показаны)

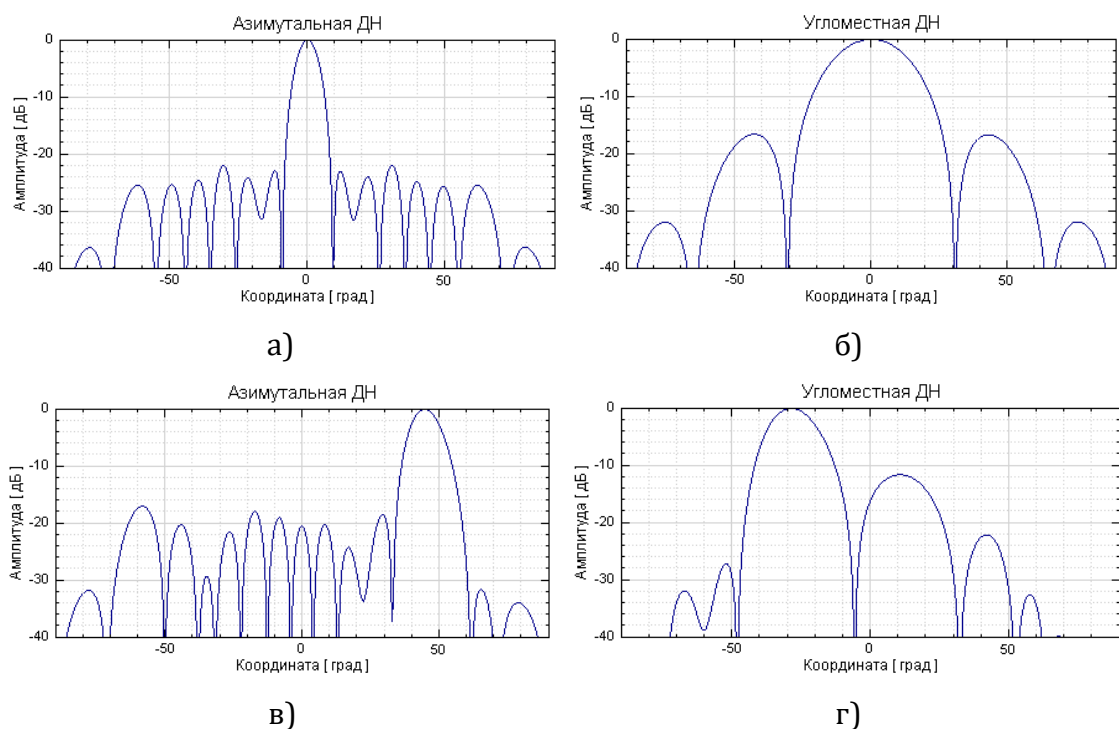


Рисунок 12 — ДН $\Sigma_{\text{прд}}$ в азимутальной (а,в) и угломестной (б,г) плоскостях для направления луча $(\varphi_{az}, \varphi_{el})$: а и б – $(0^\circ, 0^\circ)$, в и г – $(45^\circ, -30^\circ)$

Одним из недостатков неэквидистантных ФАР является нестабильность параметров ДН в процессе сканирования, в частности величин УБЛ, ШДН. Таким образом для оценки качества технического решения необходим тщательный учет

параметров в процессе сканирования. Результаты исследования решетки в процессе сканирования ($\varphi_{az} = -45^0 \dots +45^0$, $\varphi_{el} = -30^0 \dots +30^0$) сведены в таблицы 2-3 (для частоты f_0) и 4-5 (для частоты $1,5 f_0$):

Таблица 2

Величина УБЛ в АЗ плоскости на частоте f_0 (дБ)

Направление ДН в УМ плоскости, градус	Направление ДН в АЗ плоскости, градус						
	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45
-30	-16,78	-20,05	-21,8	-22,52	-21,8	-19,02	-15,46
-15	-19,11	-20,88	-22,09	-22,84	-22,5	-21,15	-19,38
0	-19,7	-21,1	-22,4	-23,1	-22,4	-21,15	-19,68
+15	-19,38	-21,15	-22,51	-22,82	-22,08	-20,88	-19,11
+30	-15,45	-19,0	-21,78	-22,51	-21,61	-20,03	-16,77

Таблица 3

Величина ШДН в АЗ плоскости на частоте f_0 (градус)

Направление ДН в УМ плоскости, градус	Направление ДН в АЗ плоскости, градус						
	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45
-30	16,14	14,2	12,64	12,05	12,63	14,16	16,06
-15	15,37	12,94	11,61	11,19	11,6	12,9	15,34
0	14,87	12,46	11,26	10,9	11,27	12,46	14,8
+15	15,33	12,93	11,6	11,19	11,61	12,93	15,36
+30	16,05	14,15	12,62	12,04	12,63	14,19	16,13

Таблица 4

Величина УБЛ в АЗ плоскости на частоте $1,5 f_0$ (дБ)

Направление ДН в УМ плоскости, градус	Направление ДН в АЗ плоскости, градус						
	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45
-30	-15,7	-18,4	-19,9	-18,9	-19,6	-20,25	-16,87
-15	-19,2	-21,29	-21,3	-20,61	-21,2	-21,06	-19,49
0	-20,9	-21,5	-21,7	-21,9	-21,8	-20,56	-20,9
+15	-19,5	-20,07	-21,2	-20,6	-21,3	-21,3	-19,24
+30	-17,33	-20,64	-19,53	-18,91	-20,04	-18,48	-15,7

Величина ШДН в АЗ плоскости на частоте $1,5 f_0$ (градус)

Направление ДН в УМ плоскости, градус	Направление ДН в АЗ плоскости, градус						
	-45	-30	-15	0	+15	+30	+45
-30	12,06	10,57	8,8	8,35	8,85	10,63	12,11
-15	11,14	8,94	7,85	7,55	7,85	8,93	11,12
0	9,97	8,39	7,55	7,29	7,54	8,38	9,97
+15	11,1	8,93	7,85	7,54	7,85	8,39	11,13
+30	11,93	10,53	8,79	8,35	8,86	10,65	12,05

Анализ результатов показал следующие характеристики разреженной решетки при сканировании в азимутальной плоскости до 45 градусов на частотах f_0 и $1,5 f_0$, соответственно:

- максимальный разброс величины УБЛ (в зависимости от угломестной плоскости сканирования): 3,4...7 дБ и 1,3...3,2 дБ (при этом среднеарифметическая величина разброса в процессе сканирования составила: 4 дБ и 0,7 дБ),

- нестабильность величины ШДН, нормированной к неотклонённой: (-5...+2)% и (-3...+10)% (при этом среднеарифметическая величина нормированной ШДН в процессе сканирования составила: 1,6% и 4,7%).

Стоит отметить, что приведенные величины не учитывают технологический разброс параметров (погрешность) при практической реализации амплитудно-фазового распределения по апертуре АФАР. Введение минимального разброса параметров (тип распределения — нормальное с величинами СКО: 0,25 дБ — по амплитуде и $5,625^\circ$ — по фазе) в зависимости от реализации может ухудшать УБЛ на величину не более 2 дБ, а ШДН — изменяется на 2%. Максимальное значение КНД ДН ($\Sigma_{\text{прд}}$) найденное расчетным методом составляет: 19 дБ и 22,3 дБ (для крайних частот диапазона).

Заключение

На примере ранее сформированного облика антенного устройства рассмотрен ряд вопросов проектирования многофункциональной АФАР. Результаты электродинамического моделирования излучающего полотна показали стабильность формы ДН и минимальный уровень потерь на

рассогласование в процессе сканирования. С использованием специализированного ПО проведен синтез направленной ДН, учитывающий особенностей диаграммообразования АФАР малой размерности. Результаты моделирования показали отсутствие критических отклонений формы ДН в процессе сканирования в широкой полосе частот.

Таким образом продемонстрирована возможность построения эффективного антенного полотна АФАР на основе конечной периодической фазированной решетки L диапазона размерностью 16x4 с неэквидистантным способом формирования ДН. В процесс проектирования отдельное внимание уделялось программной автоматизации процессов поиска и анализа технических решений, а именно — процессов синтеза и анализа диаграмм направленности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Многофункциональные полотна антенных решеток / Д. И. Воскресенский, Ю. В. Котов, Ю. Я. Харланов, Е. В. Овчинникова // Антенны. 2006. № 9(112). С. 5–23.
2. Кондратьева, С. Г. Многофункциональная бортовая антенная решетка интегрированного радиоэлектронного комплекса / С. Г. Кондратьева // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29560>.
3. Многофункциональная бортовая активная фазированная антенная решетка L-диапазона / П. А. Агеев, А. И. Синани, Г. Ф. Мосейчук, Т. А. Ломовская // Антенны. 2021. № 4(272). С. 63–72. DOI: [10.18127/j03209601-202104-08](https://doi.org/10.18127/j03209601-202104-08).
4. Исследование характеристик многофункциональной антенной решетки / М. Р. Бибарсов, В. А. Волошина, С. В. Землянский [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2012. № 2. С. 3–9.
5. Семенихин, А. И. Низкопрофильная двухполяризационная антенная решетка сильно связанных диполей С-Х-диапазонов / А. И. Семенихин, Д. В.

Семенихина, Ю. В. Юханов // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 12. – С. 14. DOI: [10.30898/1684-1719.2020.12.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.6).

6. *Gevorkyan, A. V.* 5.11:1 Bandwidth Dual Polarized Dipole Antenna / *A. V. Gevorkyan, Y. V. Yukhanov* // 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, RADIO 2018, Wolmar, 15–18 октября 2018 года. – Wolmar, 2018. – P. 8572299.

7. *Цветков, В. А.* Оптимизация широкополосной фазированной антенной решётки с вибраторными излучателями / *В. А. Цветков, С. Г. Кондратьева* // Труды МАИ. – 2019. – № 108. – С. 6. – DOI: [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6).

8. *A. Neto and J. J. Lee*, “Ultrawide-band properties of long slot arrays”, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 54, no. 2, Feb. 2006, pp. 534–543.

9. Тепликова В. И., Сенцов А. А., Ненашев В. А., Поляков В. Б. Анализ диаграммы направленности плоской многоэлементной активной фазированной антенной решетки // Труды МАИ, 2022, №125. URL: http://mai.ru/upload/iblock/b13/6yssvwufljgle9gprotp4ow09tge3lla/17.Teplikova_Sentsov_Nenashev_Polyakov.pdf. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17).

10. Самбуров Н.В., Бут Р.О. Излучатели широкополосной широкоугольной АФАР L-диапазона // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2020. Т.18. №2. С.16–23

11. Зыков Л. С. Многодиапазонные излучатели для активных фазированных антенных решёток (обзор) // Труды МАИ, 2015, №82. URL: http://mai.ru/upload/iblock/b91/zykov_rus.pdf.

12. Широкополосные системы излучения для антенных систем с электронным управлением лучом многофункциональных радиоэлектронных комплексов / *А. Ю. Гринев, Д. В. Багно, Г. Ф. Мосейчук, А. И. Синани* // Антенны. – 2013. – № 3(190). – С. 3–13.

13. Самбуров, Н. В. Формирование технического облика комплексированного корабельного антенного устройства / *Н. В. Самбуров* // Труды МАИ. – 2025. – № 144. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186308>.

14. Обуховец, В. А. Синтез конструкции широкополосного согласования дипольного излучателя / *В. А. Обуховец, Н. В. Самбуров* // Известия ЮФУ.

Технические науки. – 2025. – № 1(243). – С. 237–247. – DOI: [10.18522/2311-3103-2025-1-237-247](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-1-237-247).

15. Самбуров Н.В., Обуховец В.А. Конструктивный синтез дипольного излучателя для широкополосной ФАР // Антенны. 2026. № 2. С. 17–27. DOI: [10.18127/j03209601-202602-02](https://doi.org/10.18127/j03209601-202602-02).

16. Баландович С.В., Костиков Г.А., Любина Л.М., Сугак М.И., Самбуров Н.В. Характеристики широкополосной вибраторной фазированной антенной решетки дециметрового диапазона // Изв. Вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып.4. С. 65–70.

17. Королев, А. В. Энергоэффективное управление мощностью СВЧ-усилителей в передающих трактах импульсных РЛС: возможности и ограничения / А. В. Королев, Н. А. Кушнерев, М. В. Родин // Радиотехника. – 2025. – Т. 89, № 12. – С. 173–188. – DOI: [10.18127/j00338486-202512-18](https://doi.org/10.18127/j00338486-202512-18).

18. Рыбаков Д.Ю., Николаев П.В., Самбуров Н.В. Набор специализированного программного обеспечения анализа и синтеза АФАР // Радиопромышленность. 2018. №1. С. 33–41.

19. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

20. Шацкий Н.В. Алгоритм оценки характеристик направленности антенной решетки с электрическим сканированием в системе координат наблюдения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 4–10. – DOI: [10.36724/2072-8735-2021-15-10-4-10](https://doi.org/10.36724/2072-8735-2021-15-10-4-10).

21. Балашов Е. В., Сенцов А. А. Моделирование движения диаграммы направленности антенны при коническом сканировании в условиях угловых эволюций носителя // Труды МАИ, 2024, №135. URL: http://mai.ru//upload/iblock/972/62nu82unvz496oka41mzl6gbbcaudd5b/23_Balashov_Sentsov_korr.pdf.

22. Neustadter S. F. The second moment sum method and space-tapered arrays. IEEE Trans., 1963, v. AP-11, №6, p. 706.

References

1. Voskresensky D.I., Kotov Yu.V., Kharlanov Yu.Ya., Ovchinnikova E.V. *Antenny*, 2006, no. 9, pp. 5–23.
2. Kondrat'eva S. G. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2012, no. 52, available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29560>.
3. Ageev P.A., Sinani A.I., Moseychuk G.F., Lomovskaya T.A. *Antenny*, 2021, no. 4, pp. 63–72. DOI [10.18127/j03209601-202104-08](https://doi.org/10.18127/j03209601-202104-08).
4. Bibarsov M.R., Voloshina V.A., Zemlynsky S.V., Manuilov B.D., Shatsky V.V., Shatsky N.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij Rossii. Radioelektronika*, 2012, no. 2, pp. 3–9.
5. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Yu.V. *Zhurnal radioelektroniki*, 2020, no. 12, pp. 14, available at: [10.30898/1684-1719.2020.12.6](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.6).
6. Gevorkyan, A. V. 5.11:1 Bandwidth Dual Polarized Dipole Antenna / A. V. Gevorkyan, Y. V. Yukhanov // 2018 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean, RADIO 2018, Wolmar, 15–18 октября 2018 года. – Wolmar, 2018. – P. 8572299.
7. Tsvetkov V. A., Kondrat'eva S. G. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2019, no. 108. DOI [10.34759/trd-2019-108-6](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-6).
8. A. Neto and J. J. Lee, "Ultrawide-band properties of long slot arrays", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, Feb. 2006, pp. 534–543.
9. Teplikova V. I., Sentsov A. A., Nenashev V. A., Polyakov V. B. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2022, no. 125, available at: http://mai.ru/upload/iblock/b13/6yssvwufljgle9gprotp4ow09tge3lla/17.Teplikova_Sentsov_Nenashev_Polyakov.pdf. DOI: [10.34759/trd-2022-125-17](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-17).
10. Samburov N.V., But R.O. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushhie sistemy*, 2020, no. 2, pp. 16–23.
11. Zykov L. S. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2015, no. 82, available at: http://mai.ru/upload/iblock/b91/zykov_rus.pdf.
12. Grinev A. YU., Bagno D. V., Moseychuk G. F., Sinani A. I. *Antenny*, 2013, no. 3, pp. 3–13.
13. Samburov N.V. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2025, no. 144, available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186308>.

14. Obukhovets V. A., Samburov N. V. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2025, no. 1, pp. 237–247, available at: https://izv-tn.tti.sfedu.ru/index.php/izv_tn/ru/article/view/1054/1231. DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-237-247.
15. Samburov N. V., Obukhovets V. A., *Antenny*, 2026, no. 2, pp. 17–27. DOI <https://doi.org/10.18127/j03209601-202602-02>.
16. Balandovich S.V., Kostikov G.A., Lyubina L.M., Sugak M.I., Samburov N.V. *Izvestiya Vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2015, no. 4, pp. 65–70.
17. Korolev A. V., Kushnerev N. A., Rodin M. V. *Radiotekhnika*, 2025, no. 12, pp. 173–188. DOI 10.18127/j00338486-202512-18.
18. Rybakov D.Yu., Nikolaev P.V., Samburov N.V. *Radiopromyshlennost'*, 2018, no. 1, pp. 33–41.
19. Sazonov D. M. *Antenny i ustrojstva SVCH* (Antennas and microwave devices), Moscow, Vysshaya shkola, 1988, 432 p.
20. Shatskiy N.V. *T-Comm*, 2021, vol. 15, no. 10, pp. 4–10. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-10-4-10.
21. Balashov E. V., Sentsov A. A. *Elektronnyi zhurnal "Trudy MAI"*, 2024, no. 135, available at: http://mai.ru/upload/iblock/972/62nu82unvz496oka41mzl6gbbcaudd5b/23_Balashov_Sentsov_korr.pdf.
22. Neustadter S. F. The second moment sum method and space-tapered arrays. *IEEE Trans.*, 1963, v. AP-11, №6, p. 706.

Информация об авторах

Николай Викторович Самбуров, начальник отдела, АО «Научно-производственное предприятие «Калужский приборостроительный завод «Тайфун», г. Калуга, Россия; e-mail: samburov.n.v@yandex.ru

Information about the authors

Nikolai V. Samburov, Head of department, «Research and Production Enterprise «Kaluga-based Instrument-Making Plant «TYPHOON» Joint-Stock Company, Kaluga, Russia; e-mail: samburov.n.v@yandex.ru