



ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОТКРЫТОГО КАНАЛА СВЯЗИ

В статье рассмотрены вопросы применения адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР) для повышения помехоустойчивости беспроводных сетей передачи и защиты данных по открытому каналу связи. Естественные помехи и постановщики помех представляют угрозу целостности данных, передаваемых по открытому каналу связи. Предложенная антенная система с адаптивной фазированной решеткой использует интеллектуальные методы формирования диаграммы направленности (ДН) антенны, имеющей узкий луч в направлении информационного источника сигнала, глубокие нули ДН в направлении постановщиков помех, а также низкий фон боковых лепестков ДН, снижающих воздействие помех с произвольных направлений. Низкий фон боковых лепестков ДН задаётся подобранными по критериям оптимальности весовыми коэффициентами распределения на элементах АФАР.

Ключевые слова: адаптивная фазированная антенная решетка, амплитудное весовое распределение, вектор весовых коэффициентов, разностная диаграмма направленности, суммарная диаграмма направленности, открытый канал связи, помехоустойчивость.

THE USE OF AN ADAPTIVE PHASED ARRAY ANTENNA FOR DATA PROTECTION WHEN USING AN OPEN COMMUNICATION CHANNEL

The article discusses the use of adaptive phased array antennas (AFAR) to increase the noise immunity of wireless transmission networks and data protection over an open communication channel. Natural interference and jammers pose a threat to the integrity of data transmitted over an open communication channel. The proposed antenna system with an adaptive phased array uses intelligent methods for generating a directional pattern (DN) of an antenna having a narrow beam in the direction of the information signal source, deep zeros of the DN in the direction of the jammers, as well as a low background of the side lobes of the DN, reducing the impact of interference from arbitrary directions. The low background of the side lobes of the bottom is set by the weight distribution coefficients selected according to the optimality criteria on the AFAR elements.

Keywords: adaptive phased array antenna, amplitude weight distribution, vector of weight coefficients, differential radiation pattern, total radiation pattern, open communication channel, noise immunity.

Введение

В условиях быстрого роста сетей беспроводной связи и развития технологии IoT обеспечение безопасности передаваемых данных стало критически важной задачей. Данные открытого канала связи подвергаются воздействию помех от различных источников, таких, например, как пользовате-

ли соседнего и совмещенного каналов, атмосферные условия и внешние электромагнитные сигналы, внешние постановщики преднамеренных помех и т.д. Эти помехи могут нарушать целостность пакетов, передаваемых данных, ухудшать качество сигнала, затрудняя своевременный прием данных [1,2].

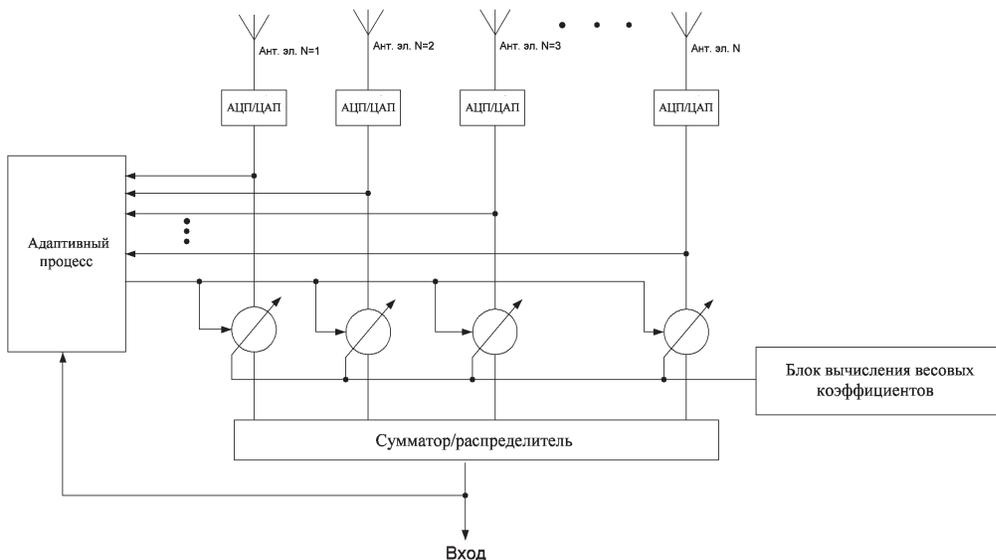


Рис. 1. Функциональная схема АФАР

ВВК w_{opt} по критериям оптимальности

Критерий оптимальности	w_{opt}
Оптимальное с общей шириной лепестков	$w_{opt} = \frac{\sin(\pi n / N)}{(\pi n / N)}$
Оптимальное с минимальной боковой лепестковой энергией	$w_{opt} = \exp\left\{-\frac{[\sin(\pi n / N)]^2}{2\sigma^2}\right\}$
Оптимальное с минимальной суммой квадратов пьедесталов	$w_{opt} = \begin{cases} 1, & \text{если } n = 0; \\ \sin\left[\frac{(\pi n / N) / 2}{[(\pi n / N) / 2]}\right], & \text{если } n > 0 \end{cases}$
Оптимальное с минимальной площадью под кривой диаграммы направленности	$w_{opt} = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right)$
Оптимальное с минимальным количеством несовпадений фаз	$w_{opt} = \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)$
Оптимальное с наименьшей мощностью на пьедестале	$w_{opt} = \sqrt{\frac{2}{N}} \cdot \cos\left(\frac{\pi n}{N}\right) \cdot \exp\left\{-j \cdot \sin\left(\frac{\pi n}{N}\right)\right\}$

где n – порядок весового распределения;

σ – стандартное отклонение весовой функции, характеризующее разброс весов элементов антенной решетки;

N – количество элементов линейной фазированной антенной решетки (ЛФАР).

Известны несколько методов защиты от воздействия радиопомех: организационный, энергетический, сигнальный и пространственный [3-5].

Организационный метод основывается на достижении необходимого уровня электромагнитной совместимости между источниками радиоизлучения (ИРИ). Однако этот метод исчерпал своё применение в условиях большой насыщенности ИРИ и ограниченности радиочастотного диапазона.

Энергетический метод борьбы с помехами предусматривает увеличение мощности передатчика до уровня, который гарантированно подавляет возможные помехи. Недостатком метода является повышение затрат на энергоресурсы передатчика ИРИ.

Сигнальный метод борьбы с помехами основывается на фильтрации сигнала путем ограничения полосы пропускания. Это обеспечивается использованием фильтров для удаления нежелательных частот и шума из сигнала. Недостатком метода является способность ослаблять или удалять полезные компоненты сигнала, если они попадают в пределы фильтруемой полосы пропускания. Это может привести к потере информации или ухудшению качества сигнала. К сигнальному методу также можно отнести технологии помехоустойчивого кодирования.

Перспективным методом защиты от помех является пространственная обработка сигналов с помощью адаптивных фазированных антенных решеток (АФАР). АФАР — это антенная система, которая включает в себя массив из нескольких антенн и алгоритма адаптивной обработки сигналов. Метод пространственной обработки автоматически формирует диаграмму направленности АФАР для улучшения приема информационного сигнала на фоне различных помех (рис. 1).

Формирование оптимального амплитудного распределения на элементах адаптивной фазированной антенной решетки

Формирование распределений амплитуд на основе их критериев оптимальности позволяет снизить уровень боковых лепестков и уменьшить ширину главного лепестка ДН. Это способствует увеличению помехозащищенности открытого канала связи. Изменение вектора весовых коэффициентов (ВВК) от исходного состояния до оптимального (w_{opt}) зависит от выбранного критерия оптимальности [6-8].

Выбор критерия оптимальности тесно связан с показателем, количественно изменяющим качество приема полезного сигнала

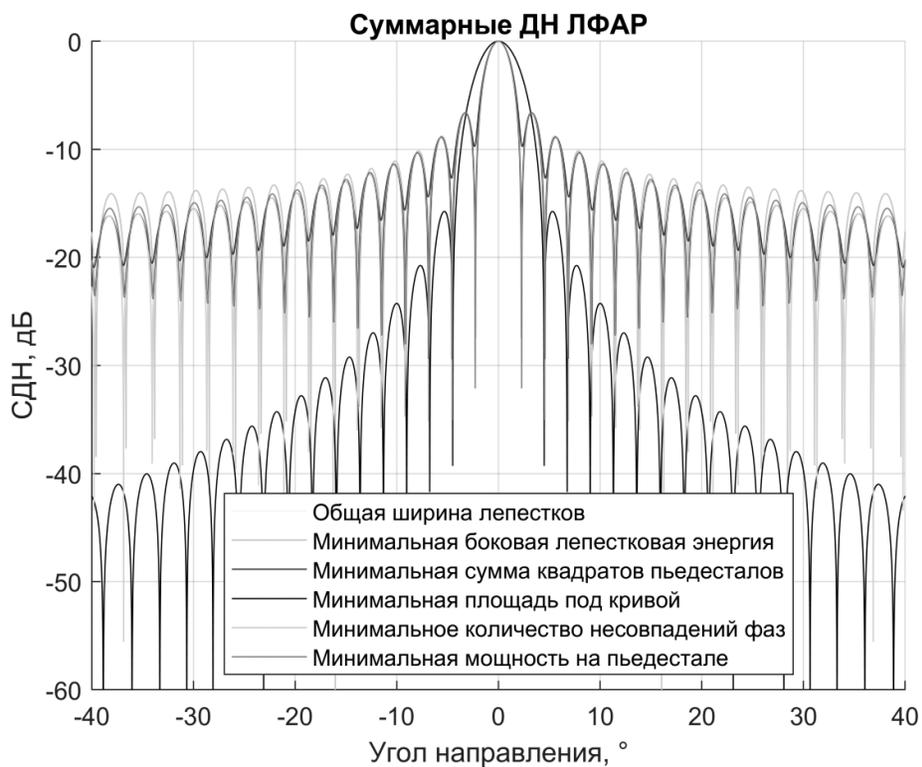


Рис. 2. Результаты расчётов суммарных ДН ЛФАР по критериям оптимальности амплитудных распределений

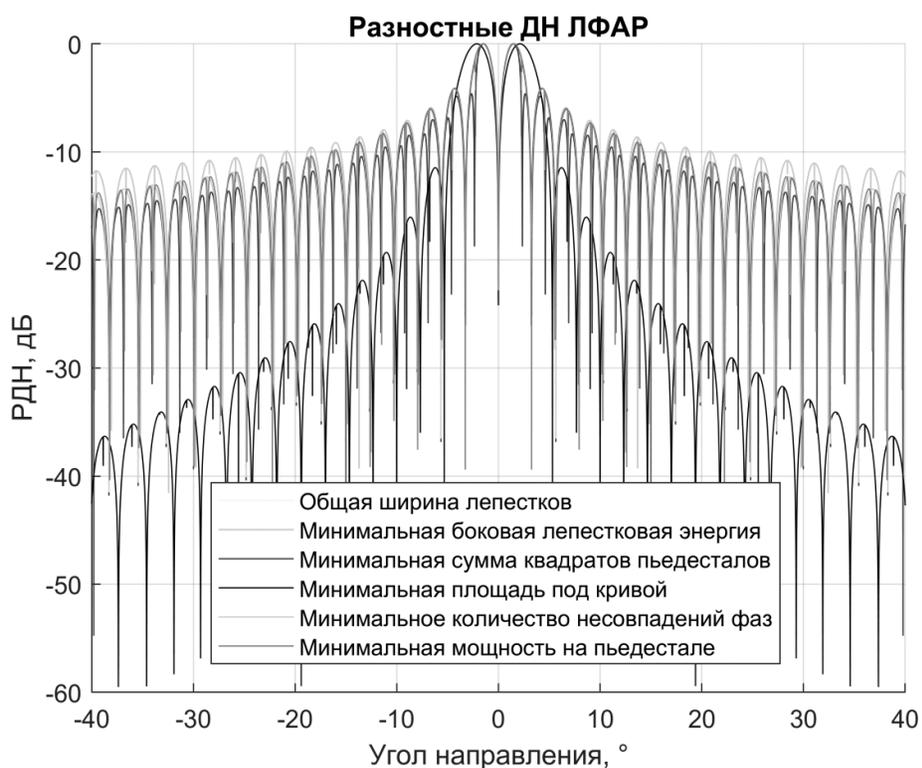


Рис. 3. Результаты расчётов суммарных ДН ЛФАР по критериям оптимальности амплитудных распределений

Сравнение амплитудных распределений

Оптимальные амплитудные распределения	Ширина главного лепестка, град.	Уровень боковых лепестков СДН, дБ	Уровень боковых лепестков РДН, дБ
Оптимальное с общей шириной лепестков	2,1	-8,78	-5,9
Оптимальное с минимальной боковой лепестковой энергией	2,15	-8,77	-5,9
Оптимальное с минимальной суммой квадратов пьедесталов	2,35	-8,89	-7,03
Оптимальное с минимальной площадью под кривой диаграммы направленности	3,5	-15,74	-11,6
Оптимальное с минимальным количеством несовпадений фаз	2,22	-8,89	-6,05
Оптимальное с наименьшей мощностью на пьедестале	2,18	-8,86	-6,01

на фоне помех. Целевая функция описывает, как изменяется показатель качества в зависимости от значений весовых амплитудных коэффициентов. Экстремум целевой функции представляет собой критерий оптимальности, которого можно достичь за счет оптимизации функции весовых коэффициентов.

В таблице 1 определены оптимальные ВВК (w_{opt}) в зависимости от критерия оптимальности.

На рисунках 2, 3 приведены расчеты суммарных и разностных диаграмм направленности (СДН, РДН) для ранее не представленных оптимальных амплитудных распределений.

Анализ результатов, отображённых на рисунках 2, 3 обобщён в таблице 2.

По данным таблицы 2, наиболее эффективным оптимальным амплитудным распределением является то, что формирует минимальную площадь под кривой диаграммы направленности. Это означает, что такое распределение имеет низкий уровень боковых лепестков СДН и РДН.

Боковые лепестки представляют собой области, где сигнал имеет значительную амплитуду, но не находится в фазе с основным сигналом. Это может привести к помехам и ухудшению качества сигнала. Поэтому оптимальное амплитудное распределение с минимальной площадью под кривой диаграммы направленности обеспечивает низкий уровень боковых лепестков, что позволяет уменьшить влияние помех на канал связи.

Таким образом, данное оптимальное амплитудное распределение является наиболее эффективным для обеспечения помехозащищенности канала связи.

Формирование глубоких нулей в суммарной диаграмме направленности адаптивной фазированной антенной решеткой в направлении помех

Формирование глубоких нулей в ДН АФАР заключается в оценке и определении направления на полезный и мешающие ИРИ. Путем адаптации амплитудных распределений на элементах АФАР возможно достижение повышенной помехозащищенности канала связи от преднамеренных помех.

1) Формирование нулей в СДН АФАР в направлении помех определяется выражением (1):

$$СДН = S_n - \frac{S_n S_M S_M^H}{N}, \quad (1)$$

где S_n – полезный сигнал;

S_M – мешающий сигнал;

$N = 16$ – количество элементов в

ЛФАР (условие моделирования).

Увеличение количества элементов в системе может привести к сужению ширины луча и уменьшению уровней боковых лепестков. При изменении угла падения в большую сторону ДН будет двигаться вправо, в меньшую сторону влево. Но при различных условиях моделирования взаимосвязь между распределениями амплитуд должна оставаться постоянной [9].

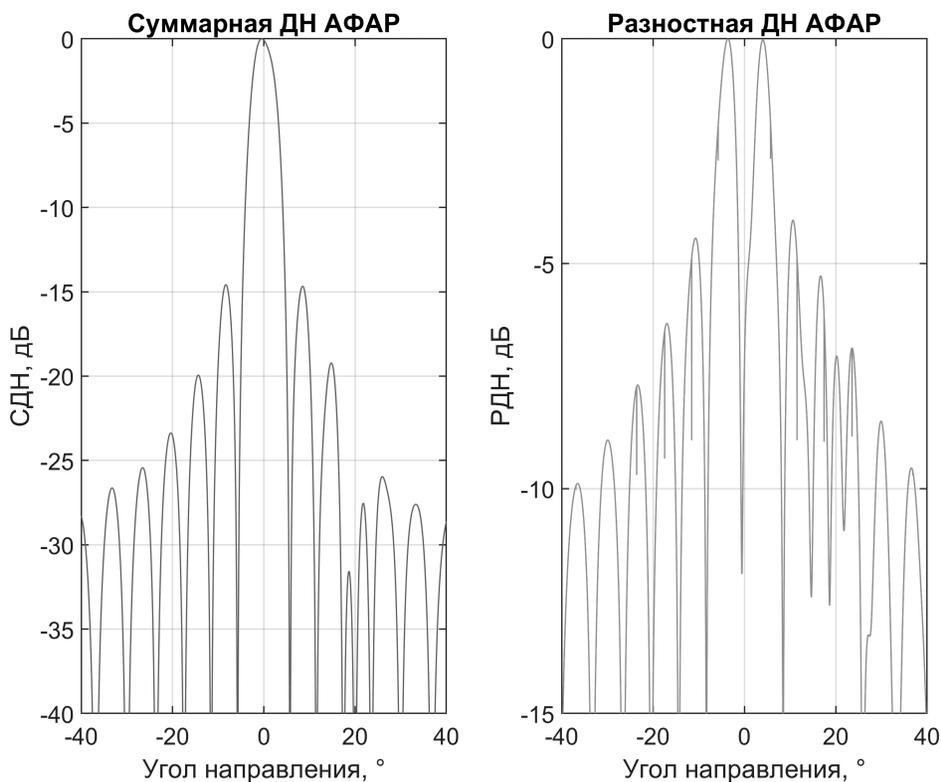


Рис. 4. Результаты расчётов СДН и РДН с нулем в направлении помехи

Определение полезного и мешающего сигнала осуществляется с использованием системы «свой-чужой». Для достижения этой цели в приемном устройстве применяется спектральный анализатор АФАР, который обеспечивает возможность выделения полезных сигналов от мешающих. Такой подход позволяет повысить точность и эффективность обработки сигналов, что критически важно для обеспечения надежности работы системы в условиях наличия преднамеренных помех.

На рис. 4 приведены результаты расчётов СДН, РДН с нулями в направлении помех по критериям оптимальности на элементах ЛФАР.

По результатам моделирования на СДН (рис.4) определены полезный сигнал в направлении $S_n = 0^\circ$ и мешающий сигнал, поставленный преднамеренной помехой в направлении $S_m = 20^\circ$. Метод формирования глубоких нулей эффективно подавил преднамеренную помеху, подав в данном направлении ноль. Это свидетельствует о сохранении целостности передаваемой информации по открытому каналу связи. Изменение мешающего и полезного сигнала не повлияют на результат моделирования.

Формирование широких провалов в суммарной диаграмме направленности адаптивной фазированной антенной решеткой в направлении помех

Широкие провалы в СДН в направлении помех формируются в АФАР путем использования алгоритмов адаптивной обработки сигналов. С помощью алгоритмов адаптивной обработки сигналов производится настройка фаз и амплитуд элементов АР в соответствии с направлением подавления помех в заданном широком угловом секторе. Для моделирования выбран сектор в направлении $[-80^\circ; 30^\circ]$. Изменения данного сектора не влияют на результаты моделирования.

На рис. 5 приведены результаты расчётов СДН и РДН с широкими провалами в направлении помех при амплитудном распределении по критериям оптимальности на элементах АФАР.

На основании результатов моделирования, выполненного с использованием СДН, (см. рис. 5), были определены полезный сигнал в направлении $S_n = 0^\circ$ и мешающие сигналы, создаваемые преднамеренными помехами в угловом секторе $S_m = [-80^\circ; 30^\circ]$. В результате взятия производной от СДН,

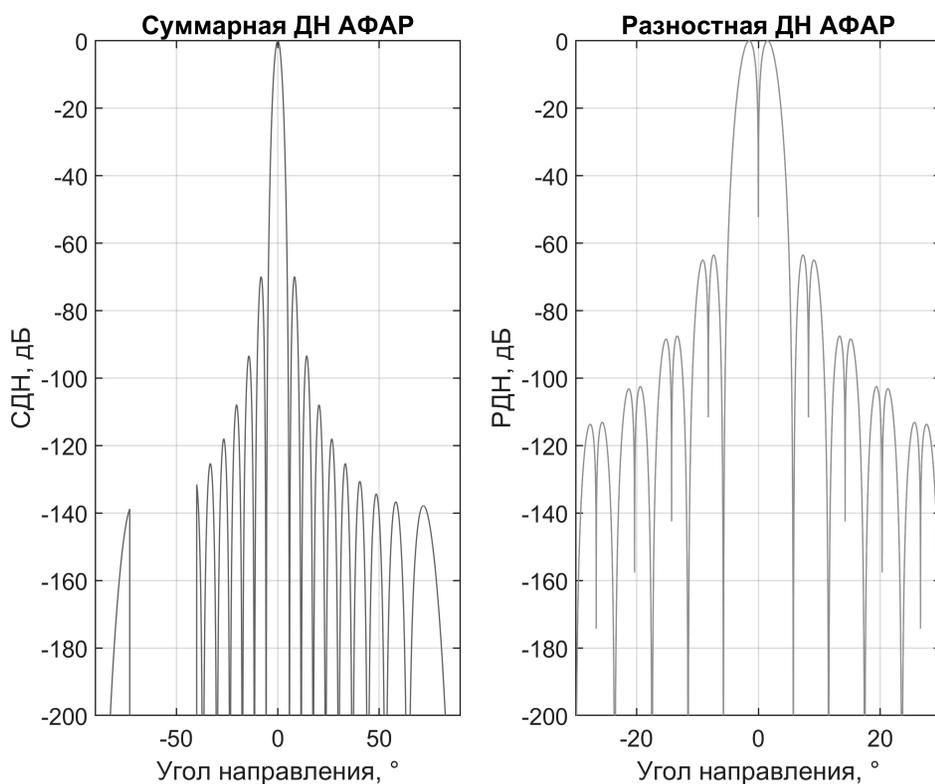


Рис. 5. Результаты расчётов СДН и РДН с широкими провалами в направлении помех

получена РДН, которая демонстрирует более низкий уровень боковых лепестков, по сравнению с методом глубоких нулей (рис. 4). Это свидетельствует о повышенной помехоустойчивости канала связи, при воздействии на него сразу несколько источников помех.

По результатам моделирования, представленного рисунками 4 – 5, наиболее эффективным является комплексный подход в подавлении помех. Это метод формирования широких провалов в направлении помех по критериям оптимальности (рис.5), который обеспечивает минимальную площадь под кривой амплитудного распределения. Метод имеет наименьший уровень боковых лепестков, которые отвечают за помехозащищенность, и может обеспечить подавление нескольких преднамеренных помех в одном направлении (угловом секторе).

Заключение

В ходе исследований установлено, что технология АФАР имеет значительный потенциал в обеспечении целостности информации при ее передаче по открытым каналам связи. Путем проведения моделирования и анализа полученных результатов продемонстрирована эффективность метода адаптивного формирования луча с целью уменьшения помех и повышения защиты данных. По результатам анализа данных, приведённых в таблице 2, на рисунках 2 – 5 можно сделать вывод о том, что метод формирования широких провалов в направлении помех по критериям оптимальности (рис. 5), который обеспечивает минимальную площадь под кривой амплитудного распределения и реализует качественную адаптацию АФАР в борьбе с помехами, что позволяет устранить угрозу целостности данных, передаваемых по открытому каналу связи.

Литература

1. Швырев Б.А. Технический канал утечки информации за счет имитации легального канала стандарта IEEE 802.11 // Швырев Б.А., Цимбал В.Н., Антонов А.С. // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. № 3(49) /2023. С. 81–89.
2. Баимов Р.И., Рагозин А.Н. Применение адаптивной фазированной антенной решетки для защиты данных при использовании открытого канала связи / В сборнике: Безопасность информационного пространства. Сборник трудов XXII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Челябинск, 2024. С. 89-95.
3. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 228 с.
4. Электромагнитная совместимость и помехозащищённость РЭС: учебное пособие / А.П. Пудовкин, Ю.Н. Панасюк, Т.И. Чернышова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ГТТУ», 2013.
5. Гурина Л.А. Электромагнитные помехи и методы защиты от них: Учебное пособие. / Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2006.
6. Рагозин А.Н., Баимов Р.И. Повышение точности пеленгования источника радиоизлучения за счет выбора оптимального амплитудного весового распределения антенной решетки в составе радиогломерной посадочной системы / журнал «Приборы» №8, 2024.
7. Баимов Р.И., Рагозин А.Н. Выбор оптимального весового распределения на элементах фазированной антенной решетки для повышения точности пеленгации источника радиоизлучения/ В сборнике: Автоматизированные системы управления и информационные технологии. Материалы всероссийской научно-технической конференции. Пермь, 2023. С. 232-238.
8. Григорьев В.А., Щесняк С.С., Гулюшин В.Л., Распаев Ю.А., Лагутенко О.И., Щесняк А.С. //Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. Часть 1. Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2016. С. 45-46.
9. Баимов Р. И. Выбор весового окна амплитудного распределения на элементах линейной фазированной антенной решетки по критерию ширина луча - уровень боковых лепестков диаграммы направленности / Р. И. Баимов, А. Н. Рагозин // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики: Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 25–26 января 2023 года / Под редакцией В.П. Шувалова, сост. М.П. Карачарова. – Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2023. – С. 72-77.

References

1. Shvyrev B.A. Tekhnicheskiy kanal utechki informatsii za schet imitatsii legal'nogo kanala standarta IEEE 802.11 // Shvyrev B.A., Tsimbal V.N., Antonov A.S. // Vestnik UrFO. Bezopasnost' v informatsionnoy sfere. № 3(49) /2023. S. 81–89.
2. Baimov R.I., Ragozin A.N. Primeneniye adaptivnoy fazirovannoy antennoy reshetki dlya zashchity dannykh pri ispol'zovanii otkrytogo kanala svyazi / V sbornike: Bezopasnost' informatsionnogo prostranstva. Sbornik trudov XXII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh. Chelyabinsk, 2024. S. 89-95.
3. Yefanov V.I., Tikhomirov A.A. Elektromagnitnaya sovmestimost' radioelektronnykh sredstv i sistem. Uchebnoye posobiye. – Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, 2012. – 228 s.
4. Elektromagnitnaya sovmestimost' i pomekhozashchishchonnost' RES: uchebnoye posobiye / A.P. Pudovkin, YU.N. Panasyuk, T.I. Chernyshova. – Tambov: Izd-vo FGBOU VPO «GTU», 2013.
5. Gurina L.A. Elektromagnitnyye pomekhi i metody zashchity ot nikh: Uchebnoye posobiye. / Blagoveshchensk: Amurskiy gos. un-t, 2006.
6. Ragozin A.N., Baimov R.I. Povysheniye tochnosti pelengovaniya istochnika radioizlucheniya za schet vybora optimal'nogo amplitudnogo vesovogo raspredeleniya antennoy reshetki v sostave radiouglomernoy posadochnoy sistemy / zhurnal «Pribory» №8, 2024.
7. Baimov R.I., Ragozin A.N. Vybora optimal'nogo vesovogo raspredeleniya na elementakh fazirovannoy antennoy reshetki dlya povysheniya tochnosti pelengatsii istochnika radioizlucheniya/ V sbornike: Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii. Materialy vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Perm', 2023. S. 232-238.
8. Grigor'yev V.A., Shchesnyak S.S., Gulyushin V.L., Raspayev YU.A., Lagutenko O.I., Shchesnyak A.S. // Adaptivnyye antennoye reshetki. Uchebnoye posobiye v 2-ukh chastyakh. Chast' 1. Sankt-Peterburg: SPb: Universitet ITMO, 2016. S. 45-46.

9. Baimov R. I. Vybor vesovogo okna amplitudnogo raspredeleniya na elementakh lineynoy fazirovannoy antennoy reshetki po kriteriyu shirina lucha - uroven' bokovykh lepestkov diagrammy napravlenosti / R. I. Baimov, A. N. Ragozin // Infokommunikatsionnyye tekhnologii: aktual'nyye voprosy tsifrovoy ekonomiki: Sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Yekaterinburg, 25–26 yanvarya 2023 goda / Pod redaktsiyey V.P. Shuvalova, sost. M.P. Karacharova. – Yekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya, 2023. – S. 72-77.

СОКОЛОВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Защита информации» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: sokolovan@susu.ru

БАИМОВ Роман Ирекович, студент кафедры радиоэлектроники и систем связи федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, д. 76. E-mail: baimov.roman@internet.ru

SOKOLOV Alexander Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Information Security Department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (National Research University)”. 454080, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 76. E-mail: sokolovan@susu.ru

BAIMOV Roman Irekovich, student Department of Radio Electronics and Communication Systems, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (National Research University)”. 454080, Chelyabinsk, Lenin Avenue, 76. E-mail: baimov.roman@internet.ru