
НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

УДК 621.396.67
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-677-684

**МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО СИНТЕЗА
ОБЪЕДИНЕННОЙ ФУНКЦИИ РАСКРЫВА
РАЗНЕСЕННЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК**

А. П. АЛЕШКИН¹, П. В. САВОЧКИН¹, А. В. ЧЕСТНЫХ², С. Н. БАЛАКИРЕВ^{1*}

¹*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*
^{*}*vka@mil.ru*

²*Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, Москва, Россия*

Аннотация. Представлена методика сужения диаграммы направленности антенны, базирующаяся на совместной пространственно-временной обработке сигналов, принимаемых в последовательные моменты времени разнесенными в пространстве приемными антенными решетками квазимоностатической декаметровой радиолокационной системы дальнего обнаружения. Применение методики позволяет повысить вероятность обнаружения объектов, находящихся за пределами прямой видимости, на фоне мощных мешающих помех, обусловленных как средой распространения, так и отражениями от подстилающей поверхности. Реализация методики позволит повысить достоверность определения объектов, лоцируемых декаметровыми радиолокационными системами.

Ключевые слова: антенная решетка, подстилающая поверхность, амплитудно-фазовое распределение, пространственно-временная обработка, диаграмма направленности, волновой фронт

Ссылка для цитирования: Аleshkin А. П., Савочкин П. В., Честных А. В., Балакирев С. Н. Модель пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрыва разнесенных антенных решеток // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 9. С. 677—684. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-677-684.

**MODEL OF SPATIAL-TEMPORAL SYNTHESIS
OF THE COMBINED APERTURE FUNCTION
OF SPACED ANTENNA ARRAYS**

A. P. Aleshkin¹, P. V. Savochkin¹, A. V. Chestnykh², S. N. Balakirev^{1*}

¹*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia,*
^{*}*vka@mil.ru*

²*Research Institute of Long-Range Radio Communication, Moscow, Russia*

Abstract. A technique for narrowing the antenna pattern based on joint spatial-temporal processing of signals received at successive moments of time by spatially separated receiving antenna arrays of a quasi-monostatic decimeter early warning radar system is presented. The technique application makes it possible to increase the probability of detecting objects located outside the line of sight against the background of powerful interfering interference caused by both the propagation medium and reflections from the underlying surface. The implementation of the methodology will improve the reliability of determining objects located by decimeter radar systems.

Keywords: antenna array, underlying surface, amplitude-phase distribution, spatial-temporal processing, radiation pattern, wave front

For citation: Aleshkin A. P., Savochkin P. V., Chestnykh A. V., Balakirev S. N. Model of spatial-temporal synthesis of the combined aperture function of spaced antenna arrays. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 9. P. 677—684 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-9-677-684.

Введение. На сегодняшний день особый интерес в области радиолокации представляют системы, способные осуществлять локацию объектов, находящихся за пределами горизонта, что имеет важное практическое значение в труднодоступных районах, где отсутствует необходимая инфраструктура для размещения радиолокационных средств прямой видимости.

Возрастающие требования к достоверности и точности получаемой радиолокационной информации об исследуемых объектах обуславливают необходимость применения новых подходов как к построению радиолокационных систем (РЛС), так и к обработке принимаемых сигналов.

Применение декаметровых РЛС позволяет наблюдать за объектами, которые расположены вблизи земной поверхности и находятся на значительных расстояниях, за счет отражения зондирующего сигнала и отраженного от ионосферы сигнала, что недоступно для РЛС прямой видимости. С другой стороны, вследствие используемого диапазона и значительной дальности лоцирования достоверность обнаружения объектов декаметровыми РЛС заметно снижается, как и разрешающая способность [1—4].

Особенностью загоризонтного обнаружения является большая зона облучения подстилающей поверхности, определяемая шириной диаграммы направленности (ДН) передающей антенной решетки (АР), которая может достигать десятков квадратных километров. Это приводит к тому, что в сложных условиях фоноцелевой обстановки без дополнительной информации, т.е. доплеровской обработки, и при уменьшении мощности отражаемого от подстилающей поверхности сигнала обнаружение объекта становится затруднительным. Наряду с этим ширина диаграммы направленности приемной АР определяет отношение сигнал/шум на ее входе, что также приводит к ухудшению достоверности обнаружения объектов лоцирования и снижению разрешающей способности по азимуту. Все это определяет необходимость поиска путей сужения диаграммы направленности приемной антенны [5—9].

Существует несколько способов решения данной задачи. Один из них — увеличение продольных размеров приемной АР. Рассматриваемая АР в силу специфики используемого диапазона длин волн имеет значительные продольные размеры, поэтому дальнейшее их увеличение приведет к росту экономических затрат и обострению проблемы обеспечения пространственной когерентности принимаемого сигнала.

Другой путь основан на применении методов сверхразрешения, таких как MUSIC, ESPRIT, MVDR и т.п., которые позволяют получить улучшенные вероятностные оценки лоцирования объектов. Однако эти методы чувствительны к искажениям волнового фронта принимаемого сигнала, которые в используемом диапазоне существенны и неизбежны из-за быстрой переменчивости состояния ионосферы [10—12].

Одним из альтернативных способов решения данной проблемы является переход от однопозиционной радиолокационной системы к квазимоностатической, позволяющей повысить достоверность локационных измерений за счет увеличения отношения сигнал/шум благодаря совместной обработке сигналов, принятых последовательно во времени на разнесенные в пространстве приемные позиции. Применение подобной архитектуры построения приемной антенны с использованием пространственно-временного синтеза объединенной функции раскрыва позволит рассматривать ее как единую АР [13—15].

Постановка задачи. Пусть на приемную антенну радиолокационной системы поступает совокупность сигналов, в которой присутствуют отраженный от лоцируемого объекта сигнал и сигналы от подстилающей поверхности и других объектов, окружающих цель. Кроме того, на приемную антенну воздействуют помехи и шумы естественного и искусственного происхождения. Площадь участка пространства, облучаемого зондирующим сигналом, в десятки раз превышает площадь лоцируемого объекта. В этих условиях отношение сигнал/шум в приемной АР РЛС всегда меньше единицы, и уровень шумов превышает уровень полезного сигнала на 40—60 дБ. Пусть объект находится на одинаковом удалении от фазовых центров раз-

несенных приемных АР при условии стационарности канала распространения сигнала, тогда падающий волновой фронт на элементы АР можно считать эквифазным. Если с определенной степенью точности, которая зависит от искажения этих эквифазных поверхностей, восстановить амплитудно-фазовое распределение между разнесенными в пространстве элементами приемной АР, то можно сформировать ДН с шириной, эквивалентной линейным размерам синтезированной АР.

Реализация модели пространственно-временного синтеза. Рассмотрим способ реализации предложенного подхода к построению квазимоностатической радиолокационной системы дециметрового диапазона. На рис. 1 представлен один из вариантов рассматриваемой системы. При такой конфигурации передающий модуль располагается посередине между приемными, находящимися друг от друга на удалении, при котором параметры среды распространения можно считать с определенной погрешностью идентичными, и выполняется условие пространственной когерентности принимаемого сигнала.

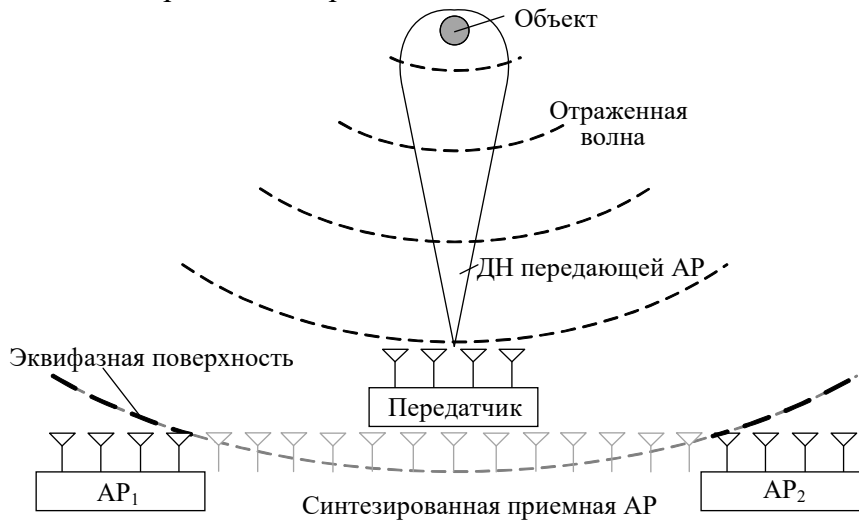


Рис. 1

Построение пространственно-когерентного квазимоностатического комплекса загоризонтного обнаружения позволяет рассматривать приемную систему в целом как единую АР. В этом случае появляется возможность сформировать узконаправленную виртуальную диаграмму направленности всего радиолокационного комплекса как результат совместной обработки массива данных, полученных последовательно во времени от каждой из приемных АР.

Пусть имеются две разнесенные АР (АР₁, АР₂), состоящие из n однотипных элементов i с расстоянием d между ними и расположенные вдоль оси x . Представим лоцируемый объект точечным источником, расположенным на одинаковом удалении от фазовых центров обеих АР. От объекта распространяется отраженный сигнал, представляющий собой плоскую монохроматическую волну, описываемую выражением

$$S(t, r) = a \exp[j(2\pi ft + \nu r)],$$

где a — случайная комплексная амплитуда; t — время; $r = xi + yj + zk$ — пространственная переменная, i, j, k — векторы направленности прихода сигнала; f — частота во временной области; $\nu = \nu_x i + \nu_y j + \nu_z k$ — волновой вектор (пространственная частота).

Эта волна распространяется со скоростью, пропорциональной

$$\nu = \frac{2\pi f}{|\nu|},$$

в направлении, характеризуемом волновым вектором. Данная волна принимается АР. Сигнал, принимаемый на элементах решетки, расположенных вдоль оси x , определяется следующим выражением:

$$S_x(t, x) = a \exp[j(2\pi ft + v_x x)].$$

Этот сигнал позволяет определить направление на его источник. Причем известно, что скорость распространения волны постоянна и является функцией от частоты. Соответственно волновое число можно определить по формуле

$$|v| = \frac{2\pi f}{v}.$$

На практике информация о параметрах среды распространения, например ионосфере, отсутствует и соответственно невозможно однозначно выяснить направление прихода волны.

Существует возможность определить угол наклона θ волнового фронта (рис. 2) и тем самым определить направление на объект:

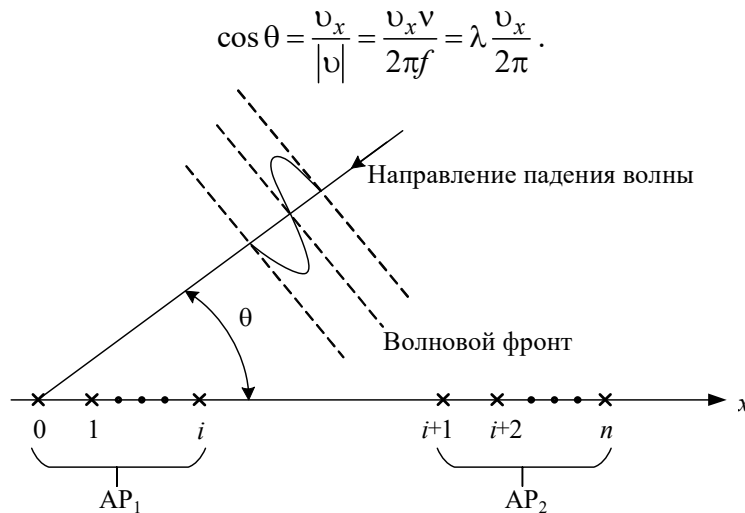


Рис. 2

Определить угол наклона волнового фронта на одной АР с достаточной точностью затруднительно из-за ее небольших энергетических характеристик. Если интерполировать волновой фронт между двумя приемными АР на основе амплитудно-фазового распределения (АФР) сигнала, принятого элементами этих решеток, то можно сформировать ДН синтезированной АР, линейные и соответственно энергетические характеристики которой будут определяться координатами $\{0, n\}$. Расстояние между самими решетками должно быть кратно расстоянию между элементами d . Тогда сигнал на выходе i -го элемента в каждый момент времени будет определяться выражением

$$f_x(id) = a \exp\left(\frac{2\pi nd \cos \theta}{\lambda}\right).$$

Совокупность пространственных выборок на выходах элементов АР представляет собой мгновенный отклик решетки на падающую электромагнитную волну с пространственной частотой

$$\omega_{\text{пр}} = v_x d = \frac{2\pi d \cos \theta}{\lambda}.$$

Оценка пространственной частоты при известном значении λ позволяет оценить направление прихода данной волны.

Применение пространственно-временного синтеза позволяет сформировать объединенную функцию раскрыва разнесенных АР (рис. 3). В результате можно сформировать три ДН: ДН АР₁, ДН АР₂ и ДН синтезированной АР. Это, в свою очередь, позволит снизить влияние шумов подстилающей поверхности на сигнал, отраженный от цели, за счет уменьшения областей совместной зоны засветки (рис. 4).

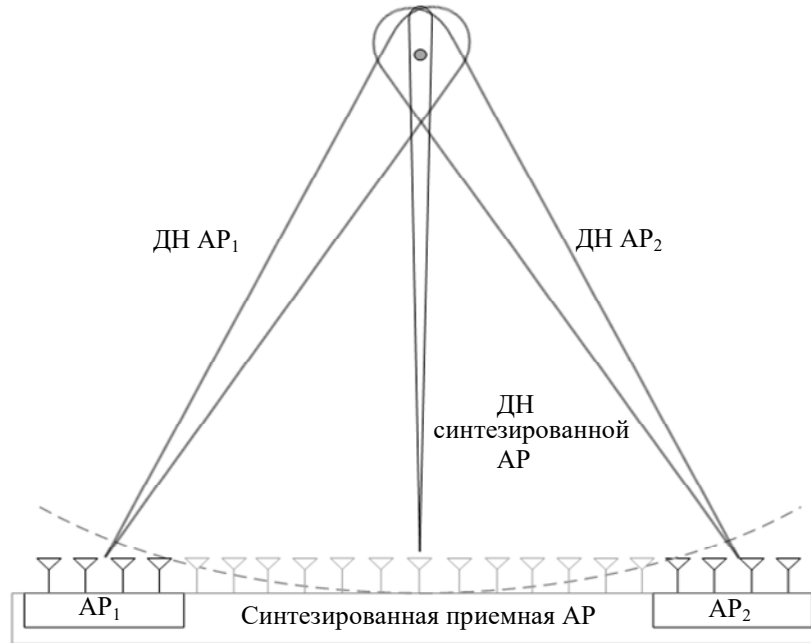


Рис. 3

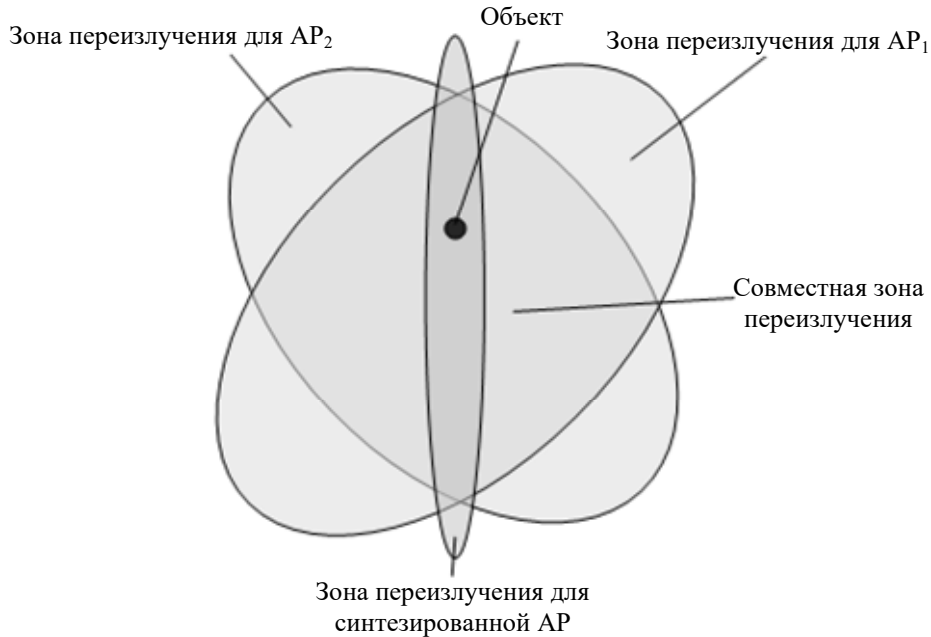


Рис. 4

Результаты моделирования. Математическое моделирование было организовано при следующих исходных данных: $\lambda=20$ м, $n=10$, $d=\lambda/2=10$ м, расстояние между фазовыми центрами антенных решеток — 40 км.

На рис. 5, а, б представлены ДН исходных антенных решеток АР₁ и АР₂ при квазимоностатическом построении радиолокационной системы коротковолнового диапазона при отсутствии шумов и угле фазирования, равном 0° и 10° соответственно.

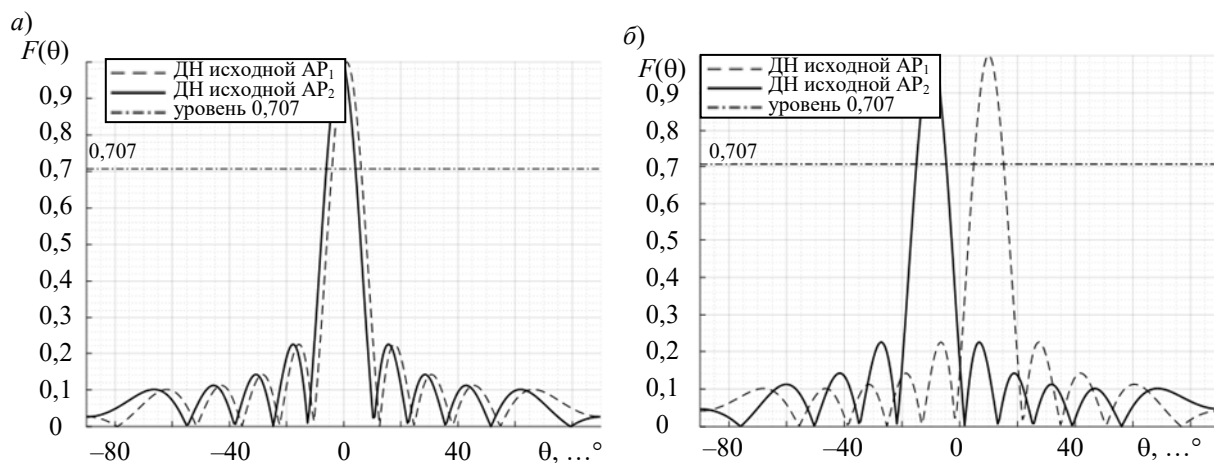


Рис. 5

Как видно из графиков, в результате пространственно-временного синтезирования АР ширина ДН сужается по уровню 0,707 с 10 до 0,5°, что, в свою очередь, повышает достоверность и точность получаемой радиолокационной информации об исследуемых объектах.

На рис. 6, а, б представлены ДН синтезированных АР, рассчитанные при угле фазирования 0° и 10° и при наличии шумов, которые имитируют искажения фазового распределения на элементах АР. СКО искажений было принято равным 5°. Анализ рисунков показывает, что предложенная методика работает даже при наличии шумов, выражающихся в искажении волнового фронта падающей электромагнитной волны на элементы приемной антенны.

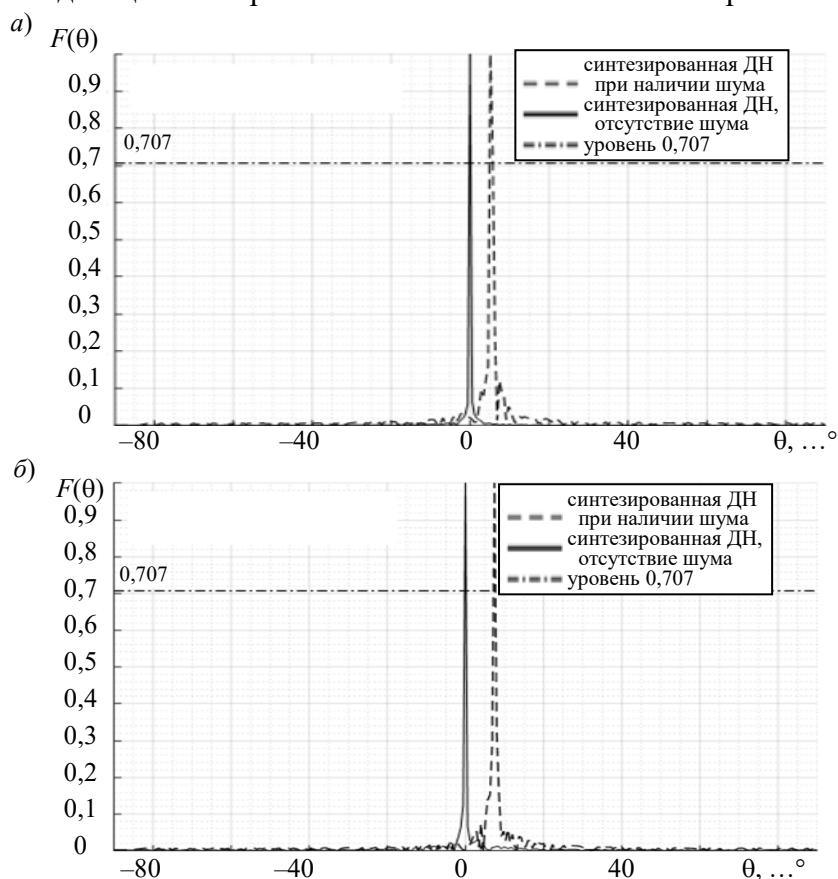


Рис. 6

Заключение. Построение приемной АР в виде разнесенных в пространстве модулей и совместная пространственно-временная обработка выполняемых ими измерений позволяет синтезировать АР с размерами, намного превышающими линейные размеры самих антенн. Это позволяет сузить ДН синтезированной АР, тем самым увеличить энергетические пара-

метры приемной антенны и повысить достоверность и точность получаемой радиолокационной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фабрицио Д. А.* Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / Пер. с англ.; Под ред. *С. Ф. Боева*. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
2. *Акимов В. Ф., Калинин Ю. К.* Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / Под ред. *С. Ф. Боева*. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
3. *Акимов В. Ф., Калинин Ю. К., Служкин Г. П.* Проблемы загоризонтного радиолокационного обнаружения и пути их преодоления // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия „Приборостроение“. 2012. № 3. С. 5—17.
4. *Алебастров В. А., Борсоев В. А., Шустов Э. И.* Развитие отечественной загоризонтной радиолокации М.: Новое время, 2016. 248 с.
5. *Ратынский М. В.* Адаптация и сверхразрешение антенных решеток. М.: Радио и связь, 2003. 197 с.
6. *Вендик О. Г., Калинин С. А., Козлов Д. С.* Фазированная антенная решетка с управляемой формой диаграммы направленности // ЖТФ. 2013. Т. 83, № 10. С. 117—121.
7. *Алешкин А. П., Владимиров В. В., Савочкин П. В.* Методика оценки влияния характеристик загоризонтной радиолокационной станции на результативность обнаружения наземной цели на фоне подстилающей поверхности // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2019. Вып. 671. С. 91—97.
8. *Чистяков В. А., Куприц В. Ю.* Сверхразрешение в антенных решетках // Решетневские чтения (Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники). 2016. Т. 1. С. 310—312.
9. *Алешкин А. П., Балакирев С. Н., Невзоров В. И., Савочкин П. В.* Повышение эффективности обнаружения загоризонтными РЛС с поверхностной волны надводных объектов на основе синтеза апертуры антенной системы // Информатика и автоматизация. 2021. №1 (20). С. 68—93.
10. Справочник по радиолокации / Пер. с англ.; Под ред. *М. И. Сколника*. М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. 680 с.
11. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / *А. А. Коростелев, Н. Ф. Клюев, Ю. А. Мельник, А. А. Веретягин, В. А. Губин, В. Е. Дулевич, Ю. С. Зиновьев, А. В. Петров*; Под ред. *В. Е. Дулевича*. М.: Сов. радио, 1978. 608 с.
12. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / *Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин, Г. А. Костин, В. Н. Манжос, Н. Н. Минервин, Б. В. Найденов, В. И. Поляков, А. С. Челпанов*; Под ред. *Я. Д. Ширмана*. М.: Сов. радио, 1970. 560 с.
13. *Порсев В. И., Гелесев А. И., Красько А. Г.* Угловое сверхразрешение сигналов с использованием „виртуальных“ антенных решеток // Вестн. Концерна ВКО „Алмаз — Антей“. 2019. № 4. С. 24—34.
14. *Дмитриев Д. Д., Карцан И. Н.* Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча // Решетневские чтения (Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники). 2016. Т. 1. С. 263—265.
15. *Лаговский Б. А.* Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками // Антенны. 2013. № 6 (193). С. 9—16.

Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Павел Владимирович Савочкин** — канд. техн. наук, доцент; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Александр Владимирович Честных** — Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи, научно-тематический центр-3; начальник; E-mail: achestnyh@niidar.ru
- Станислав Николаевич Балакирев** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 21.06.2022; одобрена после рецензирования 29.06.2022; принята к публикации 30.07.2022.

REFERENCES

1. Fabrizio D. *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, 2013.
2. Akimov V.F., Kalinin Yu.K. *Vvedeniye v proyektirovaniye ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* (Introduction to the Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars), Moscow, 2017, 492 p. (in Russ.)
3. Akimov V.F., Kalinin Yu.K., Slukin G.P. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2012, no. 3, pp. 5–17. (in Russ.)
4. Alebastrov V.A., Borsoyev V.A., Shustov E.I. *Razvitiye otechestvennoy zagorizontnoy radiolokatsii* (Development of Domestic Over-the-Horizon Radar), Moscow, 2016, 248 p., ISBN 978-5-9908744-8-0. (in Russ.)
5. Ratynskiy M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazresheniye antennoykh reshetok* (Adaptation and Superresolution of Antenna Arrays), Moscow, 2003, 197 p. (in Russ.)
6. Vendik O.G., Kalinin S.A., and Kozlov D.S. *Technical Physics*, 2013, no. 10(83), pp. 1507–1511.
7. Aleshkin A.P., Vladimirov V.V., Savochkin P.V. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2019, no. 671, pp. 91–97. (in Russ.)
8. Chistyakov V.A., Kuprits V.Yu. *Reshetnevskiy chteniya* (Reshetnev Readings), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016, vol. 1, pp. 310–312. (in Russ.)
9. Aleshkin A., Balakirev S., Nevzorov V., Savochkin P. *Informatics and Automation*, 2021, no. 1(20), pp. 68–93 (in Russ.)
10. Skolnik M. *Radar Handbook*, The McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 p.
11. Korostelev A.A., Klyuev N.F., Melnik Yu.A., Veretyagin A.A., Gubin V.A., Dulevich V.E., Zinoviev Yu.S., Petrov A.V. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1978, 608 p. (in Russ.)
12. Shirman Ya.D., Golikov V.N., Busygin I.N., Kostin G.A., Manzhos V.N., Minervin N.N., Naydenov B.V., Polyakov V.I., Chelpanov A.S. *Teoreticheskiye osnovy radiolokatsii* (Theoretical Foundations of Radar), Moscow, 1970, 560 p. (in Russ.)
13. Porsev V.I., Gelesev A.I., Krasko A.G. *Bulletin of the Concern VKO "Almaz-Antey"*, 2019, no. 4, pp. 24–34. (in Russ.)
14. Dmitriev D. D., Kartsan I. N. *Reshetnevskiy chteniya* (Reshetnev Readings), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2016, vol. 1, pp. 263–265. (in Russ.)
15. Lagovskiy B.A. *Antenny*, 2013, no. 6(193), pp. 9–16. (in Russ.)

Data on authors

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Pavel V. Savochkin** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Aleksander V. Chestnykh** — Research Institute of Long-Range Radio Communication, 3rd Scientific-Thematic Center, Head of the Center; E-mail: achestnykh@niidar.ru
- Stanislav N. Balakirev** — Adjunct; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Faculty of Radio-Electronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru

Received 21.06.2022; approved after reviewing 29.06.2022; accepted for publication 30.07.2022.