

АЛГОРИТМ СИНТЕЗИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ АПЕРТУРЫ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПУТЕМ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ФУНКЦИИ РАСКРЫВА НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

А. П. АЛЕШКИН, В. В. ВЛАДИМИРОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: v.vladimirov87@mail.ru*

Проведен анализ и представлены пути повышения обнаружительной способности радиолокационной станции с перспективной программно-аппаратной архитектурой. Обоснован и предложен в качестве оригинального решения принцип синтеза виртуальной апертуры, базирующийся на экстраполяции функции раскрыва антенной решетки применительно к решению задачи обнаружения стационарных объектов при формировании достоверной фоноцелевой обстановки. Подробно рассмотрен алгоритм синтеза виртуальной апертуры и представлен вариант его реализации. Приведены основные расчетные соотношения и представлены данные моделирования.

Ключевые слова: антенная решетка, фазовое распределение, линия задержки, синтезирование апертуры, раскрыв антенны, диаграмма направленности, комплексная амплитуда

Введение. При классическом подходе к пространственно-временной обработке сигналов ширина диаграммы направленности (ДН) полностью определяется размерами приемной части антенной системы или числом элементов антенной решетки (АР) при фиксированном расстоянии между ними. На практике это приводит к тому, что при условно недостаточных размерах апертуры ДН АР накрывает такой сектор подстилающей поверхности, в котором отклик от лоцируемого объекта незаметен из-за более высокого интегрального уровня отраженного фонового сигнала даже при меньшей эффективной площади рассеяния (ЭПР) фона, чем у цели.

Одним из путей сужения диаграммы направленности для повышения коэффициента направленного действия (КНД) АР является применение методов обработки сигнала, реализующих процедуры достижения сверхразрешения. К таким методам относятся Capon [1], MUSIC [2], RANSAC [2, 3] и ESPRIT [4]. Использование указанных методов позволяет повысить разрешение путем увеличения количества лучей в пределах исходной диаграммы направленности, однако на практике применение алгоритмов сверхразрешения ограничено вследствие невозможности управления процессом диаграммообразования из-за наличия потенциального предела разрешения для предложенных исходных данных.

Традиционным способом повышения энергетической эффективности радиолокационной станции (РЛС) (увеличения КНД антенны) путем сужения ее пространственной ДН является увеличение размеров антенной системы. Однако это не всегда оказывается возможным. Например, в станциях загоризонтного обнаружения увеличение габаритов антенной системы приводит к большим финансовым затратам и конструктивным сложностям. Эти факторы вынуждают разработчиков искать оригинальные решения, которые позволят обеспечить сужение ДН АР РЛС, работающих в декаметровом диапазоне [5, 6], и тем самым расширить их функциональные возможности по наблюдению неподвижных объектов путем повышения эффективности процесса когерентного накопления отраженных целью сигналов. Рассматриваемый класс РЛС в настоящее время используется лишь для обнаружения подвижных объектов, поскольку доплеровский сдвиг частот сигналов, отраженных от таких целей, ком-

пенсрует недостаточную энергетическую эффективность РЛС применительно к обнаружению стационарных объектов.

Принцип синтеза виртуальной апертуры. Пространственно-временная обработка сигнала в АР с использованием алгоритма синтеза виртуальной апертуры существенно отличается от принципа функционирования обычных АР [7] и радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) [8]. Алгоритм базируется на искусственном расширении реальной апертуры АР на основе последовательной обработки накопленного сигнала в цифровой форме [9]. Процесс функционирования АР при этом можно пояснить следующим образом.

Предположим, что источник отраженного сигнала характеризуется равномерной диаграммой обратного рассеяния. Тогда отраженный сигнал, приходящий на апертуру АР, соответствует лишь части волнового фронта, равномерно заполняющего окружающее пространство [10]. При этом в ближайшей окрестности реальной апертуры АР этот фронт будет плоским, а по мере удаления от нее более корректной будет его аппроксимация квадратичной зависимостью.

В рассматриваемом диапазоне волн при реализации процедуры когерентного накопления сигнала вряд ли возможно обеспечить увеличение уровня сигнала от лоцируемого объекта относительно фона при ширине ДН, соответствующей реальной апертуре АР. Для парирования отклика фона следует сфокусировать луч АР в направлении цели таким образом, чтобы фоновое отражение в существенно меньшей степени попадало в створ ДН.

Предположим, что реальная апертура имеет увеличенные размеры. Тогда не перехватываемое до этого излучение будет приниматься увеличенной апертурой, что приведет к сужению ДН за счет использования дополнительной информации, содержащейся в принятом волновом фронте и позволяющей фокусироваться на источнике этого излучения [11].

Рассмотрим вопрос, можно ли воспроизвести сигнал от наблюдаемой с иного ракурса цели, фактически не меняя позиции и не прибегая к увеличению размеров апертуры. Вероятно, для этого необходимо, чтобы трасса распространения сигнала была прогнозируемой. Иными словами, если диаграмма обратного рассеяния цели равномерна, то фронт отраженной волны имеет в известных пределах прогнозируемый (плоский и при большом удалении параболический) характер. Таким образом, если выдвинуть гипотезу о местонахождении цели, то можно аналитически синтезировать фронт отраженной ею волны. Если гипотеза верна, то синтезирование виртуальной апертуры с корректной функцией раскрытия даст возможность фокусировки луча ДН в заданную область пространства — область предполагаемого местонахождения цели.

Предположим, что последовательно во времени излучаются два зондирующих импульсных сигнала. Тогда реальная апертура может быть использована для когерентного приема обоих отраженных сигналов в соответствии с известными алгоритмами [12]. Но в выбранном диапазоне волн отклик фона будет накапливаться „не менее когерентно“ [13]. Для устранения влияния фонового излучения неизбежно следует сужать ДН АР. Для этого предложим следующую процедуру. Выполним „поворот“ фазы (задержку во времени) принятого элементами АР первого импульса таким образом, чтобы к моменту приема второго импульса сложилась картина, отображающая, например, что первый импульс принят на добавленную (путем задержки во времени) апертуру, а второй — на реальную. В зависимости от типа цели и ее ЭПР производится расчет необходимого числа импульсов — синтезируемых и впоследствии „склеиваемых“ апертур, чтобы обеспечить доминирование отклика цели над фоновым отражением.

Таким образом, при наличии априорных сведений о местоположении лоцируемого объекта выполняется экстраполяция фазового фронта волны, падающей на реальную апертуру, путем последовательной задержки принимаемого отраженного сигнала для обеспечения его когерентного сложения. При этом когерентное сложение осуществляется посредством

фокусировки максимума ДН в конкретную точку просматриваемой поверхности для парирования фонового излучения. Если же априорные сведения о позиции отсутствуют, то следует организовать процедуру направленного перебора различных вариантов продолжения реального фазового фронта, например, по принципу телевизионной развертки. Дополнительные временные и вычислительные затраты являются своеобразной обоснованной платой за достижение положительного эффекта фокусировки луча ДН в направлении объекта, не обнаруживаемого реальной апертурой.

В цифровых антенных решетках процедура обнаружения неподвижных целей может выполняться на этапе постобработки записываемых сигналов [14].

При необходимости принятия решения о наличии стационарной цели в зоне ответственности загоризонтной РЛС в масштабе времени, близком к реальному, следует организовать многоканальную обработку по принципу многолучевой АР.

Известно, что ДН АР формируется в результате когерентного сложения радиоволн, принимаемых отдельными элементами антенны [15]. Антенная решетка (рис. 1) состоит из N приемных элементов, и сигналы, принимаемые каждым элементом, когерентно суммируются. Ширина формируемой ДН при этом зависит от количества приемных элементов при фиксированном расстоянии между ними. Если искусственно увеличить размер апертуры и добиться когерентного сложения сигнала, то такую антенну можно рассматривать как гипотетическую АР, имеющую больший размер. Следовательно, сужение ДН возможно путем когерентного суммирования принятых сигналов искусственно созданной апертурой АР РЛС для гипотетического фазового фронта, формируемого в соответствии с принятой гипотезой о местонахождении цели.

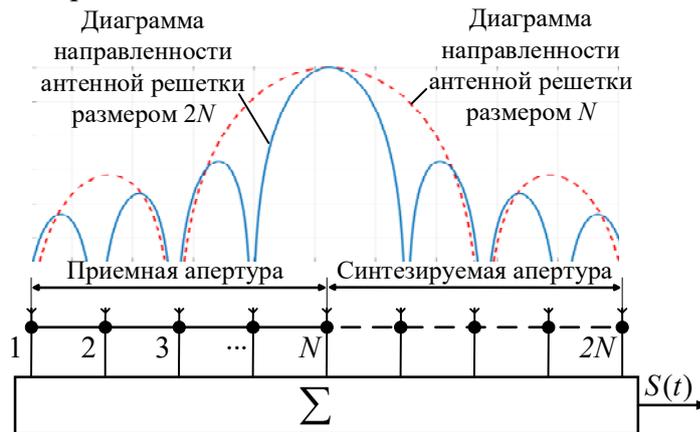


Рис. 1

Принцип действия АР с применением алгоритма синтеза виртуальной апертуры основан на 1) приеме и последовательном накоплении серии пространственно-временных реализаций отраженной от цели электромагнитной волны (ЭМВ), 2) формировании, например за счет использования линий задержки, массива значений ее комплексных амплитуд и 3) оригинальной обработке элементов сформированного массива. Целенаправленное объединение массивов значений принимаемого сигнала в соответствии с рассматриваемой гипотезой позволяет искусственно создать продолжение фазового распределения (спектра пространственных частот) на раскрытие виртуальной АР. Размер синтезированной виртуальной апертуры АР может быть рассчитан по формуле

$$N_c = NdM,$$

где N — количество приемных элементов антенной решетки, M — количество регистраций измерений, d — расстояние между приемными элементами на АР.

Применение алгоритма синтеза виртуальной апертуры сужает ДН АР в разы по сравнению с результатами традиционной пространственно-временной обработки сигнала. Но чтобы использовать данный алгоритм, необходимо затратить время на накопление отражен-

ного сигнала, эквивалентное в некотором смысле длине синтезированной апертуры.

Алгоритм синтеза виртуальной апертуры АР. Запишем разработанный алгоритм синтеза виртуальной апертуры АР путем экстраполяции функции раскрыва на основе последовательной обработки отраженных сигналов.

Шаг 1. Осуществляется прием элементами антенной решетки зондирующего сигнала, отраженного как от точечной цели, так и от подстилающей поверхности:

$$S_N = \sum_{i=1}^N A_i e^{jkR_i},$$

где A_i — амплитуда принимаемого сигнала, k — волновое число, R_i — расстояние от точечной цели до приемного элемента.

Шаг 2. Регистрируются значения комплексных амплитуд сигнала в цифровом виде с шагом дискретизации x , принятого i -м элементом АР при поступлении j -го импульса:

$$\dot{S}_{ij} = A_{ij} e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda} dx_{ij} \sin \hat{\alpha}_0\right)},$$

где dx_{ij} — расстояние от начала АР до приемного элемента, $\hat{\alpha}_0$ — априорное направление прихода отраженного сигнала, λ — длина волны зондирующего сигнала.

Результатом регистрации принимаемого на интервале T сигнала является сформированный массив значений, представленный на рис. 2.

\dot{S}_{11}	\dot{S}_{i1}	...	\dot{S}_{N1}
\dot{S}_{1j}	\dot{S}_{ij}	...	\dot{S}_{Nj}
...
\dot{S}_{1M}	\dot{S}_{iM}	...	\dot{S}_{NM}

Рис. 2

Шаг 3. Осуществляется расчет временного интервала t_{ij} , в соответствии с которым производится задержка зарегистрированных значений комплексных амплитуд сигнала, принятого с выхода каждого приемного элемента антенной решетки. Время задержки рассчитывается в соответствии с выражением

$$t_{ij} = \frac{dx_{ij} \sin \hat{\alpha}_0}{c},$$

где c — скорость света.

От точного расчета временной задержки зависят форма и направление формируемого луча ДН АР при дальнейшей обработке.

Шаг 4. Формируется массив значений (рис. 3), зарегистрированных на временном интервале синтеза N элементами антенной решетки. Значения регистрируются в запоминающем устройстве в виде массива с N_c ячейками. Количество сформированных массивов определяется количеством накопленных импульсов M , каждый массив имеет сдвиг по времени, равный длительности распространения сигнала между двумя приемными элементами АР.

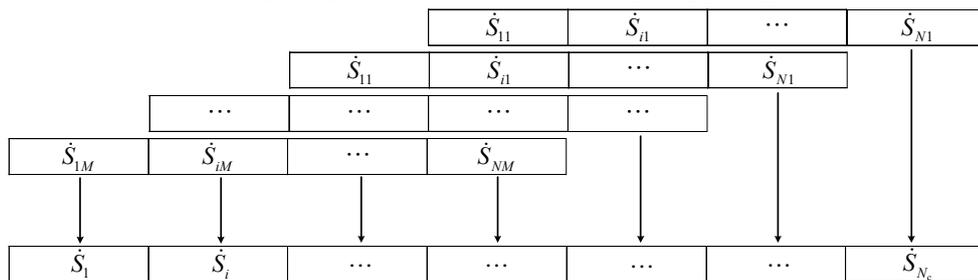


Рис. 3

Шаг 5. Производится объединение сформированных массивов зарегистрированных значений комплексных амплитуд принятого сигнала на всем интервале виртуального синтеза апертуры:

$$\dot{S}_{NM} = \dot{S}_{N1} \cup \dot{S}_{N\dots} \cup \dot{S}_{NM}.$$

Формируются новые приемные элементы, расположение которых рассчитано с необходимой точностью и привязано к определенным координатам.

На рис. 4 представлено фазовое распределение на раскрыве классической АР и АР с синтезированием виртуальной апертуры (по оси абсцисс L — длина апертуры).

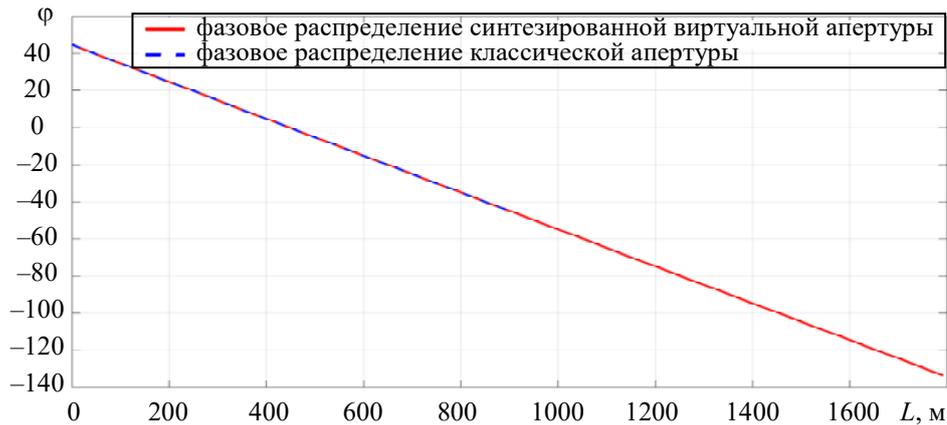


Рис. 4

Шаг 6. Формируется результирующая ДН АР. Диаграмма направленности рассчитывается в соответствии с выражением [6]

$$F(\hat{\alpha}_0) = \sum_{i=1}^{N_c} A_i e^{j\left(\frac{2\pi}{\lambda} dx_i \sin \hat{\alpha}_0\right)}.$$

Сформированная ДН представлена на рис. 5 (по оси абсцисс τ — угол падения ЭМВ). Сплошная линия соответствует ДН АР, полученной при использовании алгоритма синтеза виртуальной апертуры; она имеет более узкую ширину по отношению к ДН классической АР (соответственно у такой ДН точность измерений по угловым координатам будет выше).

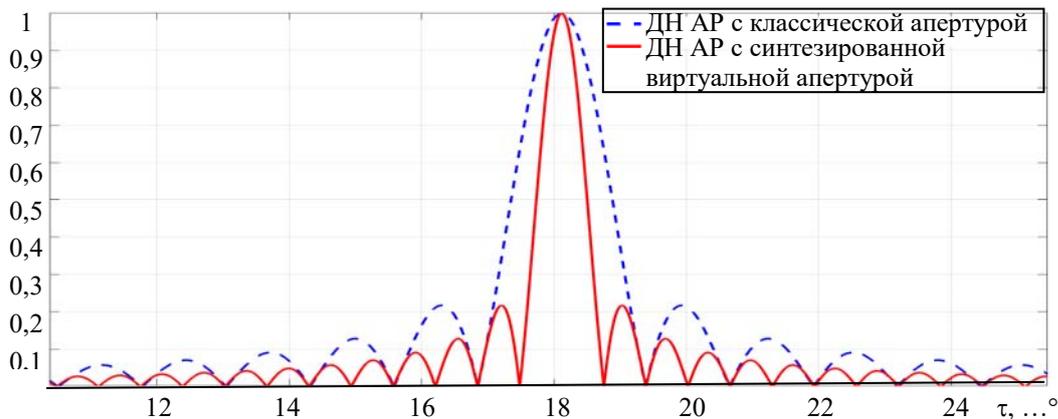


Рис. 5

Использование предложенного алгоритма синтеза виртуальной апертуры, схема которого приведена на рис. 6, изменяет ширину луча ДН АР в горизонтальной плоскости, что, в свою очередь, приводит к увеличению КНД АР.

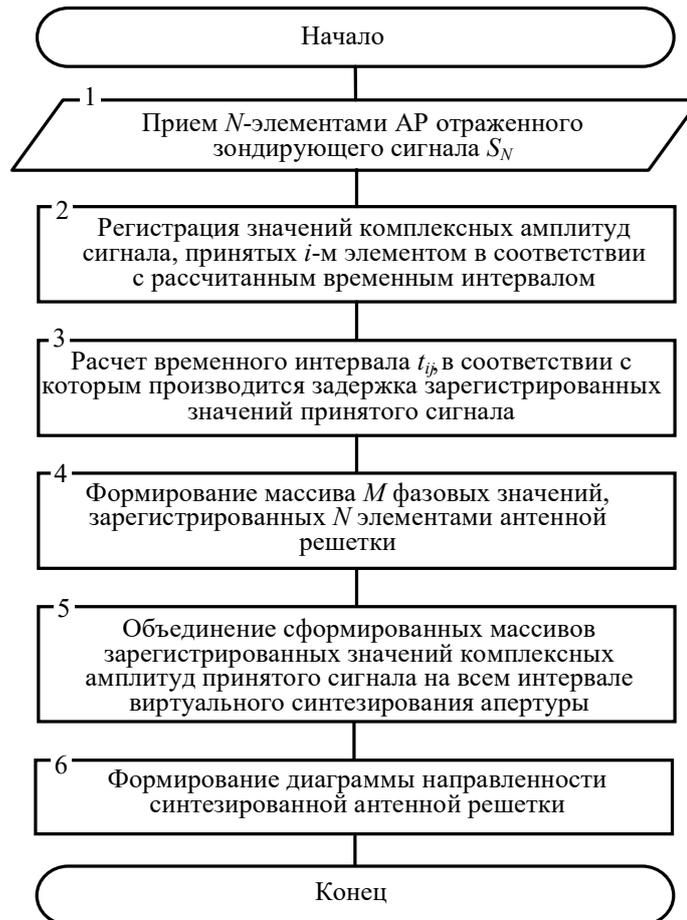


Рис. 6

Заключение. Рассмотрены особенности применения разработанного алгоритма синтеза виртуальной апертуры АР. Использование алгоритма целесообразно в РЛС, работающих в коротковолновом диапазоне длин волн. Показано, что применение алгоритма синтеза апертуры АР путем экстраполяции функции раскрыва на основе последовательной обработки отраженных зондирующих сигналов позволило сузить диаграмму направленности, что, в свою очередь, обеспечивает эффективное когерентное накопление сигнала от подстилающей поверхности выбранного участка местности путем фокусировки на него луча ДН без изменения размера реальной апертуры антенной системы РЛС. Рассмотренный подход позволяет путем направленного перебора изменять фазовый фронт отраженной электромагнитной волны в предположении, что при совпадении гипотезы о местонахождении цели с ее реальным положением будет достигнуто превышение суперпозиции накопленных сигналов над откликом фонового излучения. Иными словами, формирование виртуальной апертуры основано на теореме перемножения для системы излучателей, в соответствии с которой управление множителем решетки тем или иным способом позволяет обеспечить сужение главного лепестка ДН АР. В предлагаемом алгоритме эта возможность используется для поиска сектора в пространстве, отражение от которого будет свободно от фонового излучения в такой степени, что полезный сигнал от цели окажется более мощным, чем сигнал от подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Манохин Г., Гельцер А., Рогожников Е. Увеличение разрешающей способности радиолокационной системы за счет параметрических методов обработки сигналов // Вестн. СибГУТИ. 2015. № 1. С. 15—23.
2. Djurovic I., Zhang Y. Accurate parameter estimation of over-the-horizon radar signals using RANSAC and MUSIC algorithms // Progress in Electromagnetics Research M. 2018. Vol. 67. P. 85—93.

3. Djurovic I. QML-RANSAC: PPS and FM signals estimation in heavy noise environments // Signal Processing. 2017. Vol. 130. P. 142—151.
4. Aliyazicioglu Z., Hwang H., Grice M., Yakovlev A. Sensitivity analysis for direction of arrival estimation using a root-MUSIC algorithm // Engineering Letters. 2008. Vol. 16, N 3. P. 353—360.
5. Barabanov N. Antenna array super-resolution method for moving signals // Proc. of the Intern. Conf. on Information Engineering, 1—2 Nov. 2013. Hong Kong, P. 431—440.
6. Орошук И., Сучков А. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне // Вестн. Инженерной школы Дальневост. фед. ун-та. 2015. № 2 (23). С. 17—26.
7. Jeffrey T. Phased-Array Radar Design: Application of Radar Fundamentals. Raleigh, USA: Scitech Publ. Inc., 2009. 324 p.
8. Lu J. Design Technology of Synthetic Aperture Radar. N. Y.: John Wiley & Sons Inc., 2019. 329 p.
9. Алешкин А. П., Владимиров В. В., Невзоров В. И., Савочкин П. В. Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов // Информационно-управляющие системы. 2020. № 2 (105). С. 37—45.
10. Сколник М. И. Справочник по радиолокации / Пер. с англ.; Под общей ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. Кн. 2. 680 с.
11. Balanis C. A. Modern Antenna Handbook. N. Y.: John Wiley & Sons Inc., 2008. 1680 p.
12. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. N. Y.: John Wiley & Sons Inc., 1997. 941 p.
13. Фабрицио Д. А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
14. Cong Y., Wang G., Qi Z. A pattern synthesis method for large planar antenna array // Progress in Electromagnetics Research. 2015. Vol. 43. P. 147—156.
15. Гостюхин В. Л., Трусов В. Н., Гостюхин А. В. Активные фазированные антенные решетки. М.: Радиотехника, 2011. 304 с.

Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского;
E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Владислав Владимирович Владимиров** — ВКА им. А. Ф. Можайского; научный сотрудник;
E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

Поступила в редакцию
07.04.2021 г.

Ссылка для цитирования: Алешкин А. П., Владимиров В. В. Алгоритм синтезирования виртуальной апертуры антенной решетки путем экстраполяции функции раскрыва на основе последовательной обработки сигналов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 720—727.

ALGORITHM FOR SYNTHESIZING VIRTUAL ANTENNA ARRAY APERTURE BY EXTRAPOLATING THE APERTURE FUNCTION BASED ON SEQUENTIAL SIGNAL PROCESSING

A. P. Aleshkin, V. V. Vladimirov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

The ways of increasing a radar station detecting ability are analyzed and a promising software and hardware architecture are presented. As an original solution, a principle of synthesizing a virtual aperture is substantiated. The principle is based on extrapolation of the antenna array aperture function as applied to solving the problem of detecting stationary objects in condition of reliable background and target setting. The algorithm for virtual aperture synthesizing is considered in detail and a variant of its implementation is described. The main calculation ratios are formulated, and simulation data are presented.

Keywords: antenna array, phase distribution, delay line, aperture synthesis, antenna aperture, radiation pattern, complex amplitude

REFERENCES

1. Manokhin G.O., Geltser A.A., Rogozhnikov E.V. *Vestnik SIBGUTI*, 2015, no. 1, pp. 15–23. (in Russ.)
2. Djurovic I., Zhang Y. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2018, vol. 67, pp. 85–93.
3. Djurovic I. *Signal Processing*, 2017, vol. 130, pp. 142–151.
4. Aliyazicioglu Z., Hwang H., Grice M., Yakovlev A. *Engineering Letters*, 2008, no. 3(16), pp. 353–360.
5. Barabanov N. *International Conference on Information Engineering*, 2013, pp. 431–440.
6. Oroshchuk I.M., Suchkov A.N. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2015, no. 2(23), pp. 17–26. (in Russ.)
7. Jeffrey T. *Phased-Array Radar Design: Application of Radar Fundamentals*, Raleigh, Scitech publishing, Inc, 2009, 324 p.
8. Lu J. *Design Technology of Synthetic Aperture Radar*, NY, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2019, 329 p.
9. Aleshkin A.P., Vladimirov V.V., Nevzorov V.I., Savochkin P.V. *Information and Control Systems*, 2020, no. 2(105), pp. 37–45. (in Russ.)
10. Skolnik M. *Radar Handbook*, The McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 p.
11. Balanis C.A. *Modern Antenna Handbook*, NY, Published by John Wiley & Sons, Inc, 2008, 1680 p.
12. Balanis C.A. *Antenna Theory: Analysis and Design*, NY, Published by John Wiley & Sons, Inc, 1997, 941 p.
13. Fabrizio Dr. Giuseppe, *High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications*, 2013.
14. Cong Y., Wang G., Qi Z. *Progress in Electromagnetics Research*, 2015, vol. 43, pp. 147–156.
15. Gostyukhin V.L., Trusov V.N., Gostyukhin A.V. *Aktivnyye fazirovannyye antennyye reshetki (Active Phased Array Antennas)*, Moscow, 2011, 304 p. (in Russ.)

Data on authors

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy;
E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Vladislav V. Vlaimirov** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Researcher;
E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

For citation: Aleshkin A. P., Vladimirov V. V. Algorithm for synthesizing virtual antenna array aperture by extrapolating the aperture function based on sequential signal processing. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 9. P. 720–727 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-720-727