

Электродинамика, микроволновая техника, антенны

УДК 621.396.42

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-2-46-54>

Вариант реализации интерактивного приложения для синтеза систем связи с антенными решетками

С. В. Кузьмин[✉], К. О. Коровин, Т. Р. Раимжанов

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

[✉]sergey-v-kuzmin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Современные системы радиолокации и связи содержат фазированные антенные решетки. Одной из задач синтеза указанных систем является формирование требований к входящим в их состав узлам, модулям и блокам. Для решения поставленной задачи необходимо построить зону действия и проанализировать влияние характеристик входящих устройств. Повысить качество анализа и синтеза столь сложных систем может применение интерактивной визуализации данных, которая требует достаточно быстрого вычисления характеристик.

Цель работы. Разработка интерактивного приложения для увеличения возможностей синтеза систем связи, содержащих антенные решетки, и улучшения характеристик синтезированных систем.

Материалы и методы. Для ускорения вычисления диаграмм направленности применено их представление для антенной решетки в форме, позволяющей использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для нахождения требуемых амплитудно-фазовых распределений применяются разложение в ряд Котельникова и генетический алгоритм.

Результаты. В разработанном приложении выводятся на экран амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности линейной эквидистантной решетки и зона действия. Возможно интерактивное изменение амплитудно-фазового распределения в излучателях и диаграммы направленности в заданных направлениях. При внесении изменений в диаграмму направленности меняется амплитудно-фазовое распределение и форма самой диаграммы направленности в направлениях, отличных от заданного. Зона действия перестраивается при изменении любой из характеристик. При необходимости ее отображение может быть отключено. В статье приведен пример использования приложения при синтезе системы связи с воздушным судном.

Заключение. Применение разработанного приложения позволяет расширить возможности и существенно сократить время анализа и синтеза систем связи и вторичной радиолокации с антенными решетками. Кроме того, приложение используется для подготовки специалистов для предприятий отрасли.

Ключевые слова: ФАР, антенная решетка, интерактивная визуализация, синтез систем связи, вторичная радиолокация, ряд Котельникова, генетический алгоритм

Для цитирования: Кузьмин С. В., Коровин К. О., Раимжанов Т. Р. Вариант реализации интерактивного приложения для синтеза систем связи с антенными решетками // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 2. С. 46–54. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-46-54

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.03.2020; принята к публикации после рецензирования 23.03.2020; опубликована онлайн 29.04.2020



An Implementation of Interactive Application for the Synthesis of Communication Systems with Antenna Arrays

Sergey V. Kuzmin✉, Konstantin O. Korovin, Tokhir R. Raimzhanov

Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University
of Telecommunications, St Petersburg, Russia

✉sergey-v-kuzmin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Modern radar and communications systems contain phased array antennas. One of the synthesis problems of such systems is the formulation of requirements for components, modules and units which are comprised in it. To solve this problem, one needs to build a coverage area and to analyze an impact of characteristics of its parts. The quality of analysis and synthesis of such complex systems can be enhanced by use of interactive data visualization, which requires a fairly quick calculation of characteristics.

Aim. Development of an interactive application for increasing the synthesis capabilities of communication systems containing antenna arrays and for improving the characteristics of systems of interest.

Materials and methods. To accelerate the calculation of radiation patterns, the antenna array pattern in a form suitable for the fast Fourier transform algorithm was used. To find the required amplitude-phase distributions, Kotelnikov series expansion and genetic algorithm were used.

Results. In the developed application, amplitude-phase distribution, directivity pattern of a linear equidistant array and coverage area were displayed. An interactive change of the amplitude-phase distribution at radiation elements and synthesized radiation patterns in given directions were possible. With introduction of changes to the radiation pattern, the amplitude-phase distribution and the array radiation pattern itself changed in directions other than the specified one. The coverage area was rebuilt when any of the characteristics changes. If necessary, the coverage area display could be turned off. The paper provides an example of using the application in the synthesis of a communication system with an aircraft.

Conclusion. The use of the developed application allows one to extend the capabilities and significantly reduce the analysis and synthesis time of the communication secondary radar systems with antenna arrays too. Besides, the application is used for training specialists for industry enterprises.

Keywords: PAA, antenna array, interactive visualization, communication system synthesis, secondary radar, Kotelnikov series, genetic algorithm

For citation: Kuzmin S. V., Korovin K. O., Raimzhanov T. R. An Implementation of Interactive Application for the Synthesis of Communication Systems with Antenna Arrays. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 46–54. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-2-46-54

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 04.03.2020; accepted 23.03.2020; published online 29.04.2020

Введение. Рассматриваемая в статье проблематика связана с возрастанием функциональной сложности радиоэлектронных средств и, как следствие, с необходимостью визуализации различных характеристик при решении задачи синтеза систем связи.

При построении сложных систем требуется анализ значительного объема разнородных данных, получаемых при математическом моделировании и в результате натуральных экспериментов. Для

этого полученные данные необходимо представить в удобном для анализа виде, а непосредственно при анализе желательно менять различные исходные параметры задачи. Производительность современных компьютеров позволяет применять метод интерактивной визуализации данных при разработке комплексных радиоэлектронных средств. Указанная методика имеет еще несколько полезных точек приложения. В частности, появляется возможность оперативного анализа

данных, например при настройке или эксплуатации аппаратуры.

Практически все современные системы автоматизированного проектирования (САПР) содержат инструменты интерактивной визуализации [1–3]. Некоторые из них позволяют решать конкретные задачи в определенной прикладной области, другие обеспечивают инструментарий для решения широкого круга задач, но требуют тщательной настройки и формирования собственных исходных математических моделей.

В настоящей статье представлена реализация программного обеспечения для решения задач, которые возникают при разработке систем радиосвязи с применением фазированных антенных решеток (АР). В основе концепции предложенного программного обеспечения лежит одновременное отображение всех относящихся к решению задачи данных и интерактивное управление ими [4].

Существует несколько программных продуктов, помогающих при синтезе систем связи. Основным достоинством системы AREPS (Advanced Refractive Effects Prediction System) [5] является учет особенностей распространения электромагнитных волн для получения зон действия радиоэлектронных средств. Аналогичными возможностями обладает пакет Systems Tool Kit (STK) [6].

Имеется достаточно большое количество коммерческих программ для расчета радиолиний и зон покрытия. В качестве примера можно привести САПР "Альбатрос" компании «Информационный космический центр "Северная Корона"» [7].

Указанные программные продукты (ПП), обладающие рядом полезных свойств, либо функционально избыточны и, следовательно, дороги, либо недоступны, в том числе по причине экспортного контроля. Поэтому задача создания ПП указанного типа остается актуальной. Кроме того, реализация инструментов интерактивной визуализации повышает эффективность учебного процесса, содействуя обучению студентов по профильным специальностям и позволяя обобщать, накапливать и продвигать знания.

Одним из ключевых моментов при проектировании систем с АР является необходимость нахождения амплитудно-фазового распределения (АФР) по заданной диаграмме направленности (ДН), т. е. решение обратной задачи.

После нахождения необходимого АФР оценивают влияние погрешности установки амплитуды и фазы в каналах антенны на ДН решетки. Отклонения АФР от расчетного могут быть вызваны как

минимум двумя причинами – дискретностью фазовращателей/аттенюаторов и неидентичностью их характеристик.

Фактор дискретности сравнительно легко учитывается, что реализовано, например, в программном модуле MatLab [8].

Фактор неидентичности связан с конструкцией элементов антенны и разбросом их параметров при изготовлении и монтаже в системе. После сборки и монтажа АР, особенно малоэлементной, осуществляется ее настройка или калибровка [9, 10].

В результате реальное АФР будет отличаться от требуемого. Представленный в настоящей статье инструмент позволяет оценить влияние погрешностей установки амплитуды и фазы в каналах решетки на ее ДН, а также на зону действия системы связи или радиолокации.

Методы. Существует два основных вида алгоритмов поиска необходимого АФР для синтеза ДН заданной формы – оптимизационные и прямые. Оптимизационные методы приближают ДН к заданной итерационно. Прямые методы позволяют найти АФР в результате решения уравнения. Они хорошо описаны в [11]. К сожалению, оба подхода имеют ряд многократно описанных в литературе недостатков и не позволяют сформулировать единую методику поиска АФР. Математическим ядром предлагаемого приложения стал алгоритм на основе генетического [12] и усовершенствованный прямой алгоритм на основе разложения ДН в ряд Котельникова [13–15].

Перед описанием особенности применения указанных алгоритмов отметим, что использование радиотехнических методов, хорошо описанное в [16, 17], а именно аппарата рядов Фурье, не позволяет решать задачи синтеза, поскольку в результате обратного преобразования существенные для формирования ДН значения АФР получаются в узлах, которые выходят за границы АР. Для решения задачи анализа ряд Фурье подходит с двух точек зрения. Во-первых, поскольку множитель решетки формируется преобразованием Фурье, возможно существенно ускорить вычисление ДН по известному АФР за счет применения алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Во-вторых, при наличии дифракционных максимумов синтез осуществляется только в области реальных углов, определяемой в результате преобразования Фурье. В оставшейся области углов пространственный спектр, описываемый модулем решетки, повторяется, что выражается в появлении дифракционных максимумов.

Использование БПФ существенно ускоряет применение оптимизационных методов. В частности, именно так формируются ДН на каждой итерации в алгоритме [9]. Однако в этом алгоритме не учитывались длина волны и шаг решетки, поэтому в него был добавлен масштабный сдвиг по углу:

$$\sin \vartheta_s = \frac{\lambda(1-u)}{f_s d} - \frac{\lambda(1-u_{cp})}{f_s d},$$

где ϑ_s – угловая координата, зависящая от длины волны λ и шага решетки d ; f_s – частота дискретизации; $u = 1, 2, \dots, f_s$ – обобщенная координата.

Ряд особенностей был выявлен при написании программы по алгоритму, рекомендованному в [13, 14]. К сожалению, при малом количестве излучателей и расстоянии между ними, при котором начинают появляться дифракционные максимумы, алгоритм работал неудовлетворительно. Поэтому было введено дополнение – пределы интегрирования брались из ДН, полученной при помощи БПФ. Стоит отметить, что алгоритм из [13, 14] имеет несколько большую функциональность, чем заявлено в названии, – он позволяет установить любое значение ДН, а не только сформировать ноль. Для этого нужно брать соответствующий уровень

вспомогательной ДН, который после вычитания из основной ДН даст желаемое значение. Последовательное, многократное применение усовершенствованного алгоритма позволяет не только формировать несколько нулей, но и синтезировать требуемую ДН, превращая алгоритм в оптимизационный.

Представленные в настоящей статье методы хорошо обоснованы физически, а также глубоко проработаны в вычислительном плане.

Результаты. Для демонстрации результатов работы программных модулей найдем АФР для АР 8×8 с возможностью сканирования в азимутальной плоскости и косекансной ДН в угломестной. Положим частоту равной 2.5 ГГц, а расстояние между излучателями – половине длины волны. В ходе более детального синтеза расстояние между излучателями необходимо подобрать.

На рис. 1 представлен интерфейс окна программы. Далее приведены только фрагменты этого окна, отображающие результаты работы программного модуля.

Начнем рассмотрение с угломестной плоскости. Вначале воспользуемся генетическим алгоритмом. Заданная огибающая (красные линии) и полученное АФР с ДН (синяя линия) показаны на рис. 2. Необходимо отметить, что алгоритм, как

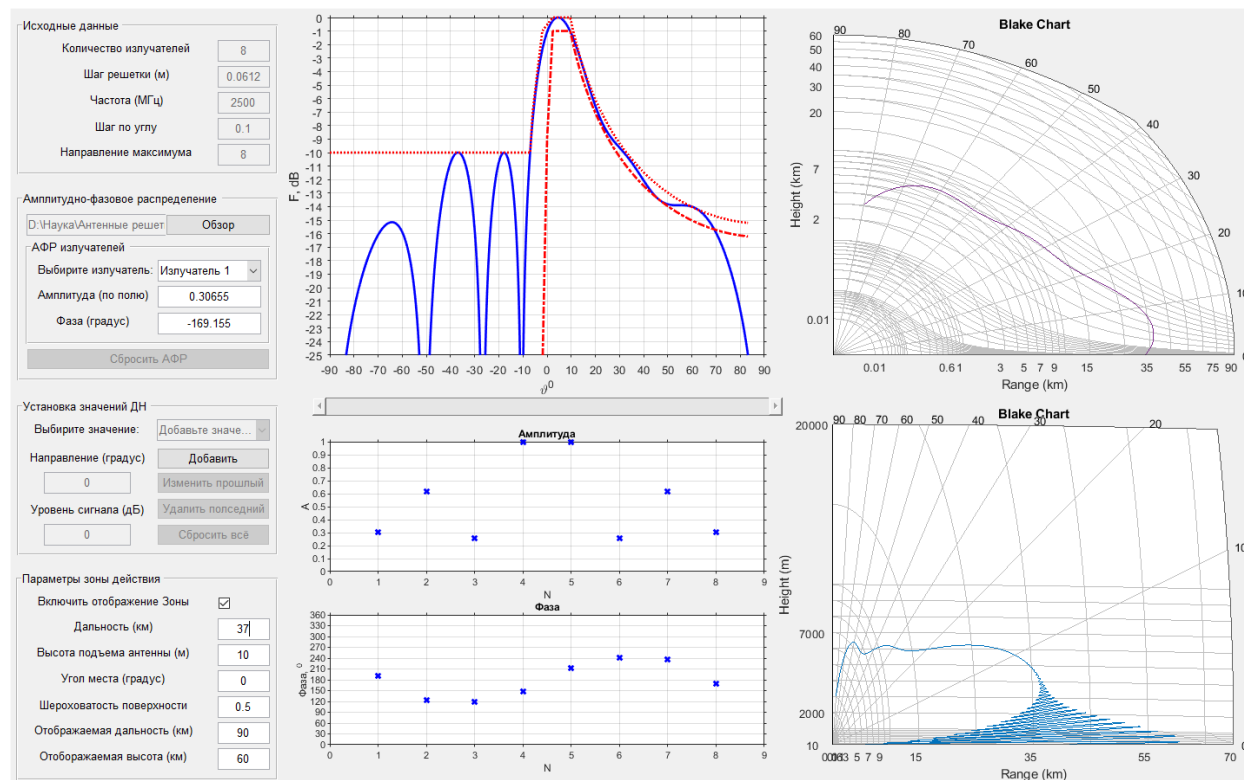


Рис. 1. Интерфейс программы

Fig. 1. Program interface

правило, сходится не сразу и каждый раз к новому АФР, немного отличному от предыдущего.

Если задать менее жесткие требования к огибающей и внести небольшие коррективы в алгоритм, то можно получить симметричное амплитудное и антисимметричное фазовое распределение, как показано на рис. 1.

Аналогичный результат получается, если применить прямой алгоритм несколько раз последовательно. На рис. 3 показана ДН и АФР, полученные после девятикратного применения алгоритма. В качестве исходного АФР бралось равноамплитудное с фазовым наклоном, соответствующим отклонению ДН на 8° от нормали. Звездочками на рис. 3 отмечены значения, которые подставлялись в качестве требуемых. Прямой алгоритм может быть усовершенствован и приспособлен для решения задач синтеза ДН заданной формы, в частности так, как показано в [14].

В итоге остановимся на антенне с симметричным амплитудным распределением и антисиммет-

ричным фазовым, поскольку это упрощает проектирование распределительной системы (см. рис. 1).

Соответствующая ДН и зона действия также показаны на рис. 1. Именно зона действия и является одним из важнейших конечных результатов синтеза системы связи и всегда должна отображаться на экране. Кроме того, изменяя такие параметры, как дальность (зависит от нескольких факторов) и свойства подстилающей поверхности, можно проследить изменение зоны действия и выдвинуть новые дополнительные требования к ДН.

Перейдем к синтезу ДН в азимутальной плоскости. Используем прямой алгоритм для формирования глубокого нуля в направлении 20° (рис. 4).

Используем приведенные на рис. 1 и 4 АФР для построения трехмерной ДН (рис. 5).

Отображение трехмерной ДН помогает оценить ее особенности и выбрать те сечения, в которых необходимо провести более тщательный анализ. В качестве примеров можно привести случаи расстановки излучателей в шахматном порядке,

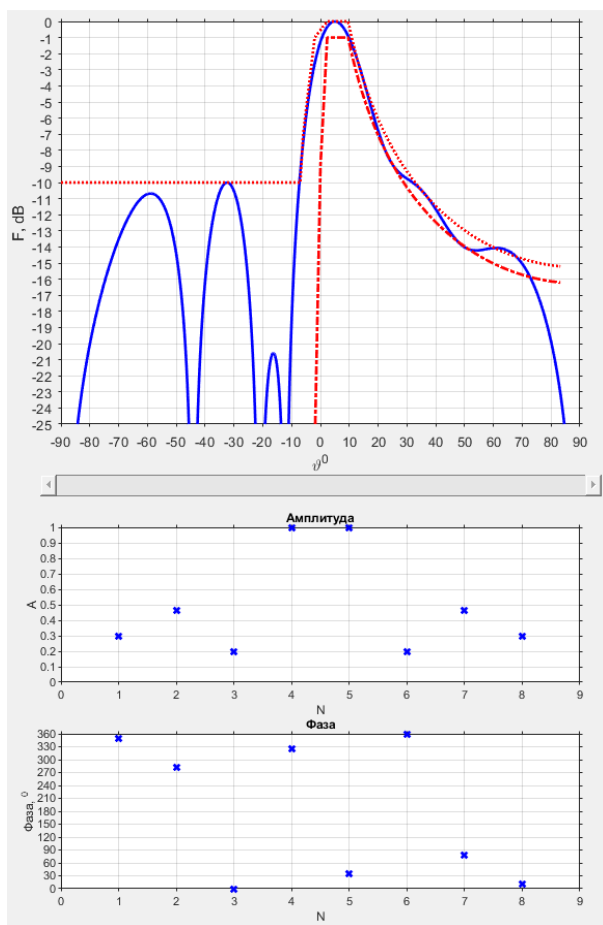


Рис. 2. Огибающая и результат работы генетического алгоритма

Fig. 2. Envelope and the result of a genetic algorithm optimization

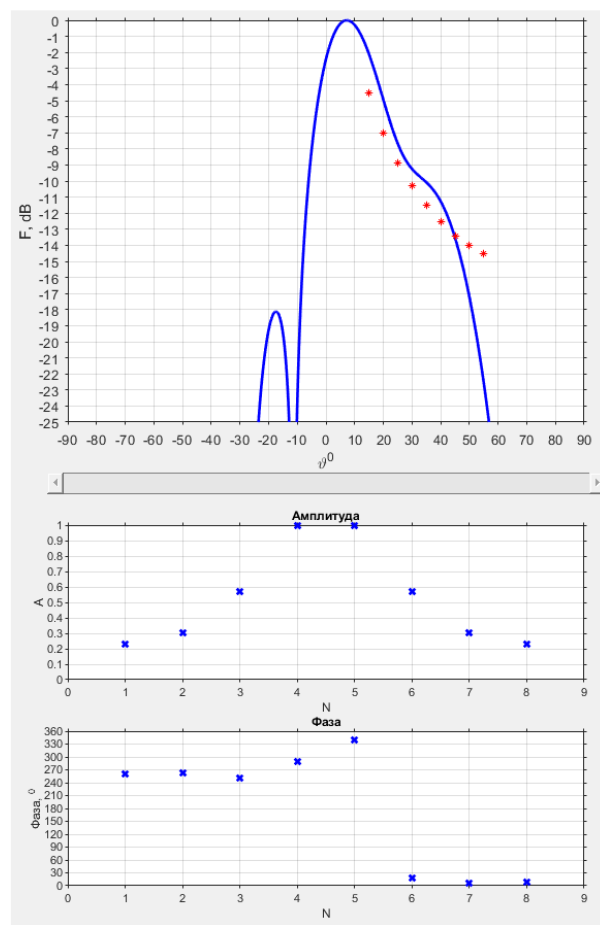


Рис. 3. ДН и АФР, полученные в результате девятикратного применения алгоритма прямого синтеза

Fig. 3. Radiation pattern and amplitude phase diagram as a result of the nine time application of the direct synthesis

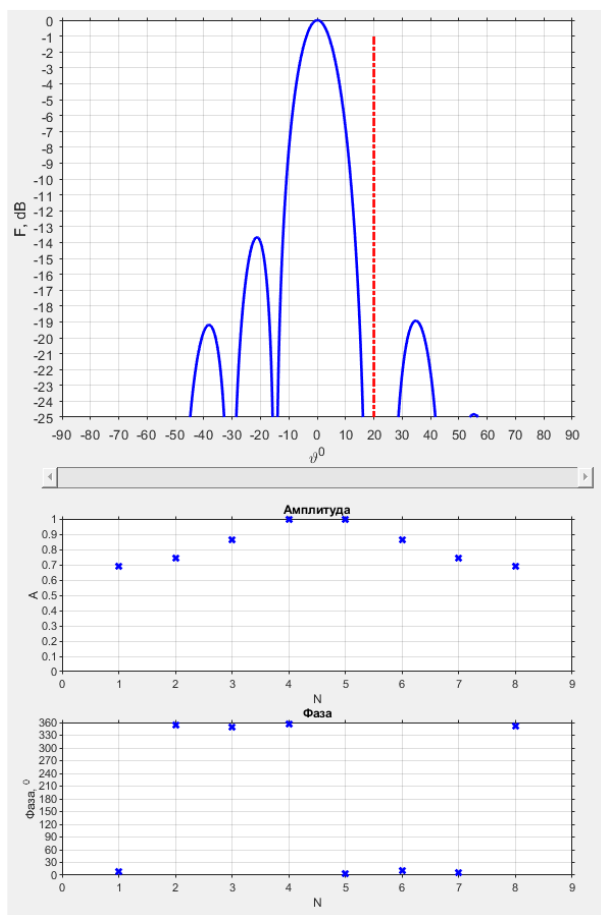


Рис. 4. ДН и АФР в азимутальной плоскости

Fig. 4. Radiation pattern and amplitude phase diagram in the azimuthal plane

когда дифракционные максимумы смещаются из главных плоскостей, или в ряде случаев свертывание ДН в воронку при сканировании.

Заключение. Представленный инструмент позволяет интерактивно:

- получать численные результаты, необходимые при синтезе систем связи и радиолокации с АР;
- оценивать влияние погрешностей установки амплитуды и фазы в каналах АР как на ДН антенны, так и на зону действия системы;
- визуализировать характеристики сложных систем, что способствует уменьшению вероятности ошибок при проектировании.

Предложения по направлению будущих исследований, в основном касающиеся увеличения функциональных возможностей программного модуля, состоят в следующем.

Изрезанность ДН в результате дифракции на носителе, в том числе электрически большом, существенным образом влияет на зону действия.

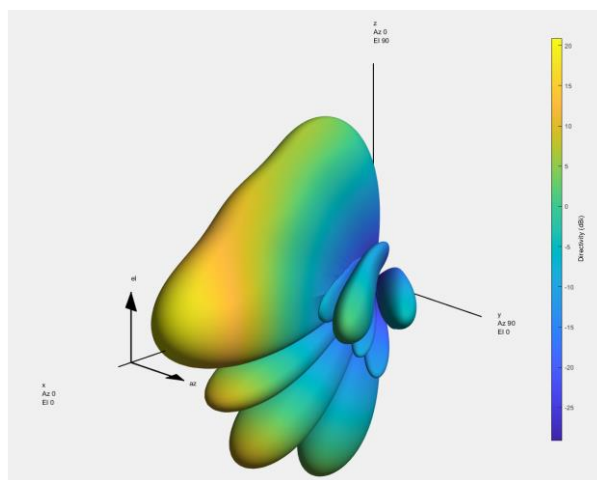


Рис. 5. Трехмерная ДН

Fig. 5. Three-dimensional radiation pattern

Поэтому при построении зоны действия необходимо учет ДН бортовой антенны.

В рассмотренном программном модуле ДН излучателя аппроксимируется определенной степенью косинуса. Для уточнения результатов можно применить эффективный классический подход: рассчитать или измерить ДН излучателя в присутствии соседей, нагруженных на согласованные нагрузки. Затем подставить полученную частичную ДН в качестве ДН излучателя.

Поскольку синтез ДН антенных решеток является задачей о построении пространственного фильтра, необходимо адаптировать все наработки, сделанные в цифровой обработке сигналов. Поэтому планируются к созданию дополнительные программные модули. Требуется отдельной проработки вопрос о пригодности представленных методов для поиска неисправных элементов в АР по результатам измерений в дальней зоне.

Для уточнения результатов расчетов планируется усложнение методик учета свойств подстилающей поверхности и факторов, влияющих на распространение радиоволн.

Наиболее перспективным направлением развития видится использование методов синтеза ДН для создания обучающей и тестовой последовательностей при обучении нейронной сети для решения задач адаптации [18].

Представленные материалы прошли апробацию на конференциях АПИНО 2017, АПИНО 2019, НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященных Дню радио (2019), "Электроника и микроэлектроника СВЧ" (2019), "Антенны и распределение радиоволн" (2019).

Список литературы

1. AWR Design Environment. URL: <https://www.awr.com/software/products/awr-design-environment> (дата обращения 12.04.2020)
2. Программное обеспечение PathWave Advanced Design System (ADS). Keysight. URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (дата обращения 12.04.2020)
3. Antenna Magnus. Antenna design software URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/antenna-magus/> (дата обращения 12.04.2020)
4. Васильев Е. Ю., Кузьмин С. В. Концепция программного обеспечения для синтеза диаграмм направленности фазированных антенных решеток с учетом уравнения радиолокации в совмещенных системах радиосвязи и вторичной радиолокации // VI Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. "Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании" (АПИНО 2017): сб. науч. ст.: в 4 т. СПб.: Изд-во СПбГУТ, 2017. Т. 1. С. 116–120.
5. Patterson W. L. Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS) // 2007 IEEE Radar Conf. Boston, MA, 17–20 Apr. 2007. Piscataway: IEEE, 2007. P. 891–895. doi: 10.1109/RADAR.2007.374337
6. AGI Engineering Tools. URL: <http://www.agi.com/products/engineering-tools> (дата обращения 09.04.2020)
7. Специализированное программное обеспечение САПР "АЛЬБАТРОС". URL: <http://www.spacecenter.ru/Software.htm> (дата обращения 09.04.2020)
8. Mathworks Phased Array System Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html> (дата обращения 09.04.2020)
9. Применение матрицы взаимных связей при настройке ФАР / А. Н. Жегалов, С. В. Кузьмин, А. Н. Морозов, М. И. Ривкин, И. И. Силуянов // V Всерос. науч.-техн. конф. "Радиолокация и радиосвязь", Москва, 21–25 нояб. 2011 г. / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2011. С. 216–220.
10. Коротецкий Е. В., Шитиков А. М., Денисенко В. В. Методы калибровки фазированных антенных решеток // Радиотехника. 2013. № 5. С. 95–104.
11. Зелкин Е. Г., Кравченко В. Ф. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. М.: ИПРЖР, 2002. 72 с.
12. Brown A. D. Electronically Scanned Arrays MATLAB Modeling and Simulation. Boca Raton, NW: CRC Press, 2012. 229 p.
13. Vendik O. G., Kozlov D. S. Phased Antenna Array with a Sidelobe Cancellation for Suppression of Jamming // IEEE Antennas and Wireless Propagation Lett. 2012. Vol. 11. P. 648–650. doi: 10.1109/LAWP.2012.2203780
14. 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.
15. Туральчук П. А., Вендик О. Г., Вендик И. Б. Расширение главного луча решетки Дольфа–Чебышева с использованием разложения по функциям Котельникова // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1, № 1. С. 213–216.
16. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. 2-е изд. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
17. Modern Antennas. / S. Drabowitch, A. Papiernik, H. D. Griffiths, J. Encinas, B. L. Smith. 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2005. 710 p.
18. Подавление шумовых помех в адаптивных антенных решетках на основе нейросетевых алгоритмов / О. С. Литвинов, Д. В. Муродьянц, В. С. Борута, Б. Е. Винтайкин // Антенны. 2018. № 2. С. 40–44.

Информация об авторах

Кузьмин Сергей Викторович – кандидат физико-математических наук (2004), доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор 38 научных работ. Сфера научных интересов – антенны; СВЧ-устройства; антенные решетки; синтез радиоэлектронных средств; пространственно-временная обработка сигналов; измерение антенн; ЭМС; математическое моделирование; распространение радиоволн; радиолокация; навигация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия

E-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5496-2702>

Коровин Константин Олегович – кандидат физико-математических наук (2008), заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – антенны; антенные решетки; пространственно-временная обработка сигналов; цифровая обработка сигналов; распространение радиоволн; радиолокация; навигация; ЭМС; математическое моделирование.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия

E-mail: konstkor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Раимжанов Тохир Рустамович – бакалавр по специальности "Конструирование и технология электронных средств" (2019), студент первого курса магистратуры по кафедре конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – устройства СВЧ; антенны; антенные решетки; пространственно-временная обработка сигналов; цифровая обработка сигналов; радиолокация; ЭМС; распространение радиоволн.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, Санкт-Петербург, 193232, Россия
E-mail: tokhir.fl@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4710-3384>

References

1. AWR Design Environment. Available at: <https://www.awr.com/software/products/awr-design-environment> (accessed 12.04.2020)
2. Software - PathWave Advanced Design System (ADS). Keysight. Available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (accessed 12.04.2020)
3. Antenna Magnus. Antenna design software. Available at: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/antenna-magnum/> (accessed 12.04.2020)
4. Vasil'ev E. Yu., Kuz'min S. V. The Concept of Software for the Synthesis of Radiation Patterns of Phased Antenna Arrays Taking into Account the Radar Equation in Combined Radio Communication Systems and Secondary Radar. VI intern. scien.-tech. and scien.-method. conf. "Actual Problems of Information and Telecommunications in Science and Education" (APINO 2017). SPb., *SPbGUT*, 2017, vol. 1, pp. 116–120. (In Russ.)
5. Patterson W. L. Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS). 2007 IEEE Radar Conf. Boston, MA, 17–20 April 2007. Piscataway, IEEE, 2007, pp. 891–895. doi: 10.1109/RADAR.2007.374337
6. AGI Engineering Tools. Available at: <http://www.agi.com/products/engineering-tools> (accessed 09.04.2020)
7. Specialized software. CAD "ALBATROS". Available at: <http://www.spacecenter.ru/Software.htm> (accessed 09.04.2020)
8. Mathworks Phased Array System Toolbox. Available at: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html> (accessed 09.04.2020)
9. Zhegalov A. N., Kuz'min S. V., Morozov A. N., Rivkin M. I., Siluyanov I. I. Application of the Matrix of Mutual Relations when Setting up the PAR. V All-Russ. Scien. and Tech. Conf. "Radar and Radio Communication", Moscow, 21–25 November 2011. Moscow, *IRE im. V. A. Kotelnikova RAN*, 2011, pp. 216–220. (In Russ.)
10. Korotetskii E. V., Shitikov A. M., Denisenko V. V. Methods of Phased Array Antenna Calibration. *Radioengineering*, 2013, no. 5, pp. 95–104. (In Russ.)
11. Zelkin E. G., Kravchenko V. F. *Zadachi sinteza antenn i novye metody ikh resheniya* [Antenna Synthesis Problems and New Methods for Solving Them]. Moscow, *IPRZhR*, 2002, 72 p. (In Russ.)
12. Brown A. D. Electronically Scanned Arrays MATLAB Modeling and Simulation. Boca Raton, NW, CRC Press, 2012, 229 p.
13. Vendik O. G., Kozlov D. S. Phased Antenna Array with a Sidelobe Cancellation for Suppression of Jamming. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2012, vol. 11, pp. 648–650. doi: 10.1109/LAWP.2012.2203780
14. Vendik O. G., Kalinin S. A., Kozlov D. S. Phased Array Antenna with Controlled Shape of the Directional Pattern. *J. of Tech. Physics*. 2013, vol. 83, no. 10, pp. 117–121. (In Russ.)
15. Tural'chuk P. A., Vendik O. G., Vendik I. B. Expansion of the Main Beam of the Dolph–Chebyshev Lattice Using the Kotelnikov Function Expansion. *Microwave Electronics and Microelectronics*. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 213–216. (In Russ.)
16. Khansen R. S. *Fazirovannye antennnye reshetki* [Phased Array Antennas]. 2nd ed. Moscow, *Tekhnosfera*, 2012, 560 p. (In Russ.)
17. Drabowitch S., Papiernik A., Griffiths H. D., Encinas J., Smith B. L. *Modern Antennas*. 2nd ed. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2005, 710 p.
18. Litvinov O. S., Murod'janc D. V., Boruta V. S., Vintajkin B. E. Suppression of Noise Interference in Adaptive Array Antennas via Neural Networks Algorithms. *Antennas*. 2018, no. 2, pp. 40–44. (In Russ.)

Information about authors

Sergey V. Kuzmin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2004), Associate Professor of the Department of Design and Production of Radioelectronic Facilities in Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 38 scientific publications. Area expertise: antennas; microwave devices; antenna arrays; synthesis of electronic equipment; space-time signal processing; antenna measurement; EMC mathematical modeling; radio wave propagation; radars; navigation.

Address: Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22 Bolshevikov Ave., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: sergey-v-kuzmin@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5496-2702>

Konstantin O. Korovin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2008), Associate Professor, Head of the Department of Radiosystems and Signal Processing in Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of more than 20 scientific publications. Area expertise: antennas; antenna arrays; space-time signal processing; digital signal processing; electromagnetic wave propagation; radars; navigation; EMC, mathematical simulation.

Address: Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22 Bolshhevikov Ave., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: konstkor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Tokhir R. Raimzhanov, Bachelor in "Design and Technology of Electronic Facilities" (2019), 1st year master degree student of the Department of Design and Production of Radio-Electronic Facilities of Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of one scientific publication. Area expertise: microwave devices; antennas; phased arrays; space-time signal processing; digital signal processing; radars, EMC, electromagnetic wave propagation.

Address: Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22 Bolshhevikov Ave., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: tokhir.fl@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4710-3384>
