

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 004.94
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в САПР РЛС

М.Ю. Конопелькин[®],
С.В. Петров,
Д.А. Смирнягина

Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Москва, 121471 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru

Резюме

Цели. В 2020 г. завершилась опытно-конструкторская работа по созданию российской системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС). Отличительной особенностью САПР РЛС являются богатые возможности для создания имитационных моделей и имитационного моделирования, что позволяет отрабатывать аппаратную часть и комплекс боевых алгоритмов РЛС с учетом конкретных условий боевого применения, средств воздушно-космического нападения и фоно-целевой обстановки. Цель настоящей статьи – обзор и демонстрация возможностей САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов.

Методы. В работе использовался математический аппарат линейной алгебры. Анализ характеристик алгоритмов проведен методом имитационного моделирования.

Результаты. В визуальном функциональном редакторе САПР РЛС создана имитационная модель РЛС секторного обзора с цифровой антенной решеткой. В состав пассивного канала входили следующие алгоритмы: алгоритм обнаружения стохастических сигналов; алгоритм оценивания числа стохастических сигналов; алгоритм пеленгации источников стохастических сигналов; алгоритм адаптивной пространственной фильтрации. В процессе имитационного моделирования алгоритмы обнаружения и оценивания числа выдавали корректный признак обнаружения и оценку числа сигналов. Алгоритм пеленгации оценивал угловое положение источников с точностью до долей градусов. Алгоритм адаптивной пространственной фильтрации подавлял сигналы мешающих сигналов до уровня ниже мощности собственных шумов антенны.

Выводы. Обширные возможности по разработке моделей функционирования РЛС, имеющиеся в российской САПР РЛС, позволяют детально моделировать процессы обработки различных видов сигналов. По результатам моделирования получены координаты целей и приведена оценка эффективности работы алгоритмов. Полученные результаты полностью соответствуют теоретическому прогнозу. Продемонстрированные в настоящей работе возможности САПР РЛС могут быть использованы специалистами в области радиолокации и обработки сигналов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, алгоритм обработки радиолокационной информации, система автоматизированного проектирования, радиолокационная станция, адаптивная пространственная фильтрация

• Поступила: 05.05.2022 • Доработана: 15.07.2022 • Принята к опубликованию: 02.09.2022

Для цитирования: Конопелькин М.Ю., Петров С.В., Смирнягина Д.А. Реализация алгоритмов обработки стохастических сигналов в САПР РЛС. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):49–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Implementation of stochastic signal processing algorithms in radar CAD

Maxim Yu. Konopel'kin @,
Sergey V. Petrov,
Daria A. Smirnyagina

"Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation, Moscow, 121471 Russia

@ Corresponding author, e-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru

Abstract

Objectives. In 2020, development work on the creation of a Russian computer-assisted design system for radars (radar CAD) was completed. Radar CAD provides extensive opportunities for creating simulation models for developing the hardware-software complex of radar algorithms, which take into account the specific conditions of aerospace environment observation. The purpose of the present work is to review and demonstrate the capabilities of radar CAD in terms of implementing and testing algorithms for processing stochastic signals.

Methods. The work is based on the mathematical apparatus of linear algebra. Analysis of algorithms characteristics was carried out using the simulation method.

Results. A simulation model of a sector surveillance radar with a digital antenna array was created in the radar CAD visual functional editor. The passive channel included the following algorithms: algorithm for detecting stochastic signals; algorithm for estimating the number of stochastic signals; direction finding algorithm for stochastic signal sources; adaptive spatial filtering algorithm. In the process of simulation, the algorithms for detecting and estimating the number of stochastic signals produced a correct detection sign and an estimate of the number of signals. The direction-finding algorithm estimated the angular position of the sources with an accuracy of fractions of degrees. The adaptive spatial filtering algorithm suppressed interfering signals to a level below the antenna's intrinsic noise power.

Conclusions. The processing of various types of signals can be simulated in detail on the basis of the Russian radar CAD system for the development of functional radar models. According to the results of the simulation, coordinates of observing objects were obtained and an assessment of the effectiveness of the algorithms was given. The obtained results are fully consistent with the theoretical prediction. The capabilities of radar CAD systems demonstrated in this work can be used by specialists in the field of radar and signal processing.

Keywords: simulation modeling, radar information processing algorithm, computer-aided design system, radar station, adaptive spatial filtering

• Submitted: 05.05.2022 • Revised: 15.07.2022 • Accepted: 02.09.2022

For citation: Konopel'kin M.Yu., Petrov S.V., Smirnyagina D.A. Implementation of stochastic signal processing algorithms in radar CAD. *Russ. Technol. J.* 2022;10(5):49–59. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-5-49-59>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. завершилась опытно-конструкторская работа по созданию системы автоматизированного проектирования (САПР) радиолокационных станций (РЛС), радиолокационных комплексов и радиолокационных систем, а также их компонентов [1–10]. Большие возможности САПР РЛС в области создания имитационных моделей и имитационного моделирования позволяют отрабатывать аппаратную часть и комплекс боевых алгоритмов РЛС с учетом конкретных условий боевого применения, средств воздушно-космического нападения и фоно-целевой обстановки. Одним из важнейших применений разработанной САПР является отработка алгоритмов обработки радиолокационной информации по результатам проведения сквозного комплексного имитационного моделирования на основе требований к образцам вооружений и военной техники, а также принципов их боевого применения.

Настоящая статья демонстрирует возможности САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов.

1. ИНСТРУМЕНТАРИЙ САПР РЛС

1.1. Визуальный функциональный редактор

В САПР РЛС для создания имитационных моделей используется подход, известный под названием «программирование потоков данных». Пользователь с помощью визуального конструктора составляет граф вычислений из блоков, конфигурирует параметры каждого блока и соединения между ними. По нажатию кнопки запуска вычисления происходит обход графа и вычисление выходных данных каждого блока на основе входных данных и параметров блока.

Преимущества данной парадигмы – естественное визуальное представление (в виде графа вычислений) и поддержка параллелизма. В рамках САПР РЛС разработан визуальный функциональный редактор, обеспечивающий возможность создания и расчета графа потоковых вычислений. Графический интерфейс пользователя представляет собой классический *Simulink*-подобный интерфейс для визуального проектирования потоковой обработки данных,

состоящий из параметризуемых блоков, соединенных между собой (рис. 1).

1.2. Среда инженерных расчетов и моделирования

Одной из ключевых особенностей разработанной САПР является возможность не только автоматизации процесса разработки РЛС, но и достаточно широкого и объемлющего моделирования поведения РЛС в боевых условиях. В частности, при проектировании инженеру предоставляется возможность задать сценарий. При отправке сценария на расчет проводится полное, приближенное к реальности, моделирование поведения РЛС в боевых условиях. Производится имитация налета на РЛС, включающая в себя моделирование движения различных воздушных целей. При этом на основе построенной модели РЛС моделируется работа антенны РЛС, которая сканирует пространство. При взаимодействии электромагнитной волны, пришедшей от луча антенны локатора, и воздушной цели проводится моделирование отражения электромагнитной волны от данной цели, на основе чего рассчитываются параметры сигнала, пришедшего в приемный канал локатора, где далее моделируется его обработка. На пришедший сигнал накладываются шумы, возникающие, в т.ч. за счет отражения от поверхности Земли. Также при моделировании прохождения луча через атмосферу учитываются различного рода осадки.

Организацию процесса моделирования обеспечивает диспетчер имитационного моделирования (ДИМ). Создание и редактирование сценариев имитационного моделирования реализовано в среде инженерных расчетов и моделирования (рис. 2), входящей в состав САПР РЛС.

2. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РЛС

2.1. Параметры имитационной модели РЛС

Для демонстрации возможностей САПР РЛС в части реализации и отработки алгоритмов обработки стохастических сигналов создана имитационная модель РЛС обзора воздушного

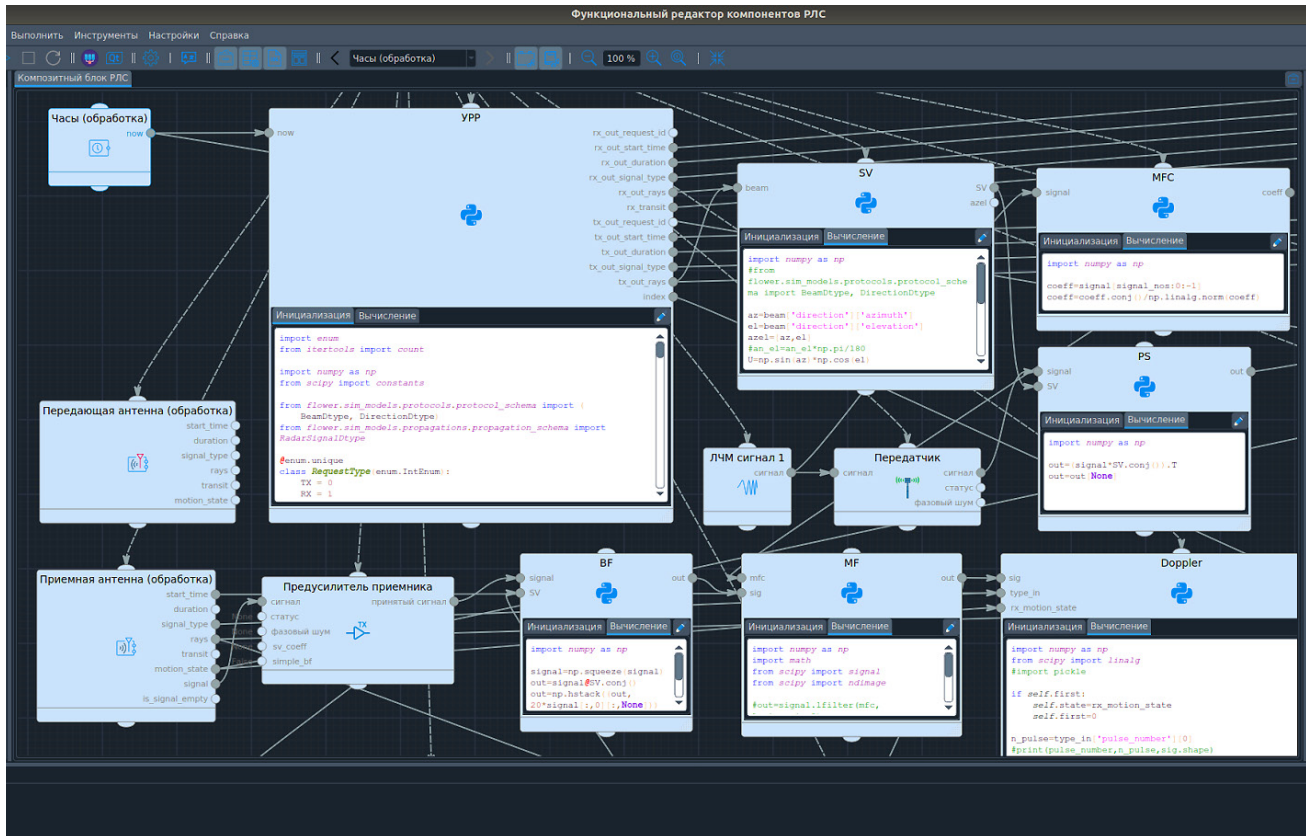


Рис. 1. Визуальный функциональный редактор и блоки модели РЛС

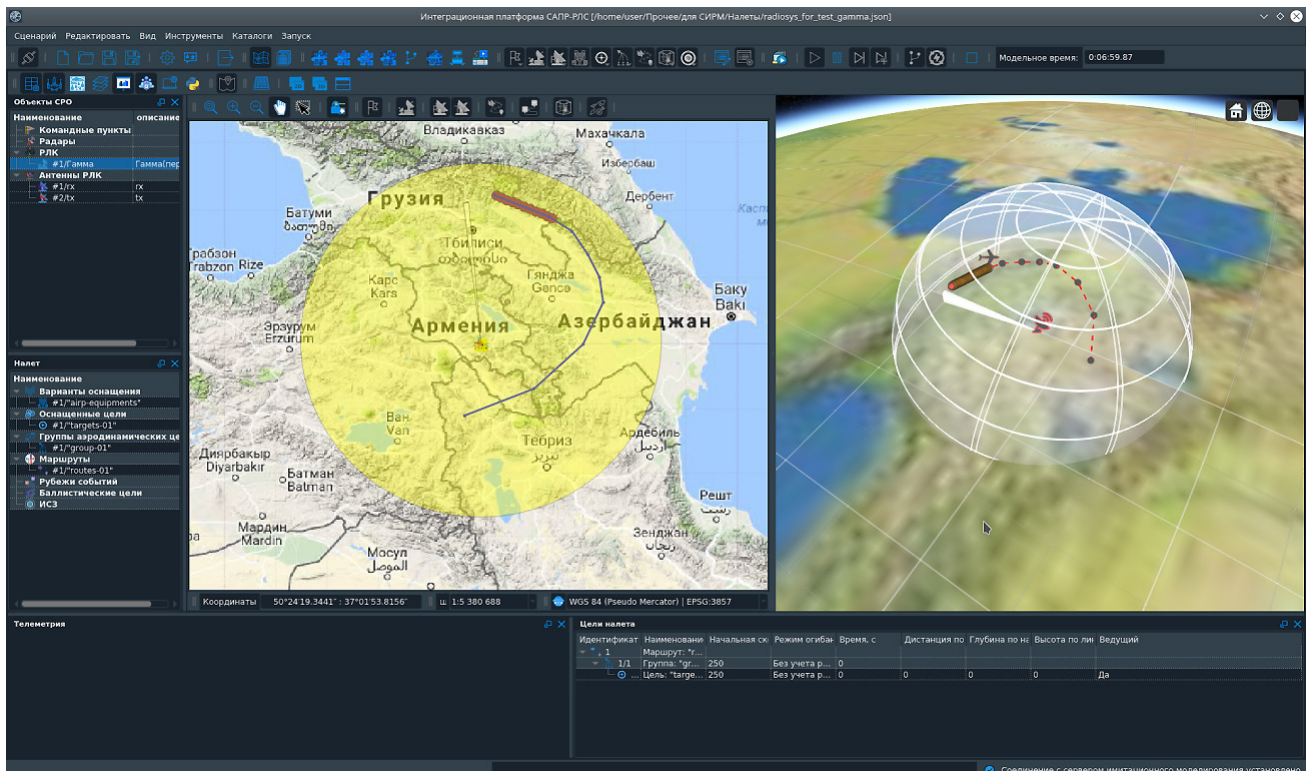


Рис. 2. Интерфейс среды инженерных расчетов и моделирования

пространства. На рис. 3 представлена ее структурная схема, включающая в себя передающую и приемную части: радиопередающее устройство генерирует импульсы с заданными параметрами модуляции, а радиоприемные устройства совместно с системой первичной обработки информации и пассивным каналом обеспечивают усиление, преобразование и оптимальную обработку принятых антенной сигналов на фоне внутренних шумов и внешних помех.

Тип РЛС – активная, однопозиционная, секторного обзора с электронным сканированием лучом.

Параметры сигнала выбраны типичными для РЛС управления воздушным движением [11]:

- тип сигнала – линейная частотная модуляция (ЛЧМ);
- несущая частота – 3 ГГц;
- полоса частот сигнала – 1 МГц;
- длительность импульса – 67 мкс;
- период следования импульсов – 0.67 мс;
- импульсная мощность – 2.3 кВт.

Параметры антенны:

- тип антенны – цифровая антенная решетка (ЦАР);
- размер в элементах – 12×12 ;
- шаг элементов – 0.5 длины волны;
- коэффициент усиления – 32 дБ;

- сектор сканирования по азимуту – $(-45^\circ) - (+45^\circ)$;
- сектор сканирования по углу места – $0^\circ - 30^\circ$;
- наклон антенны к горизонту – 15° .

В модели РЛС реализован пассивный канал для обработки стохастических сигналов от внешних источников. При этом используются обучающие данные с ЦАР длиной $K = 256$ временных отсчетов.

2.2. Алгоритмы модели

Алгоритм обнаружения стохастических сигналов

В модели реализован асимптотически оптимальный алгоритм обнаружения стохастических сигналов, использующий решающую статистику, полученную из обобщенного критерия отношения правдоподобия [12]:

$$Q_D = \frac{N\hat{\lambda}_1}{Tr\hat{\mathbf{R}}}, \quad (1)$$

где N – число элементов ЦАР; $\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K} \mathbf{X}\mathbf{X}^H$ – выборочная оценка корреляционной матрицы; \mathbf{X} – обучающий пакет данных; Tr – след матрицы; $\hat{\lambda}_1$ – максимальное собственное значение матрицы $\hat{\mathbf{R}}$.



Рис. 3. Структурная схема РЛС

Алгоритм оценивания числа стохастических сигналов

В модели реализован асимптотически оптимальный алгоритм оценивания числа стохастических сигналов

$$\hat{M} = \arg \min_n (Q_n < d_n(\alpha)) - 1, n = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $d_n(\alpha)$ – порог, рассчитываемый по заданному уровню ложной тревоги α ; Q_n – решающая статистика, полученная из обобщенного критерия отношения правдоподобия [13]:

$$Q_n = \frac{(N - n + 1) \hat{\lambda}_n}{\sum_{i=n}^N \hat{\lambda}_i}, \quad (3)$$

где $\hat{\lambda}_i$ – i -е по величине собственное значение матрицы $\hat{\mathbf{R}}$.

Алгоритм пеленгации источников стохастических сигналов

Для пеленгации источников стохастических сигналов реализован алгоритм Кейпона, использующий расчет пространственного спектра [14, 15]:

$$Q_C = \frac{1}{\mathbf{V}^H \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{V}}, \quad (4)$$

где \mathbf{V} – вектор-гипотеза; $(\cdot)^H$ – символ эрмитовой сопряженности.

Алгоритм адаптивной пространственной фильтрации (АПФ)

В модели реализован расчет адаптивного весового вектора по формуле [14, 15]:

$$\mathbf{W} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{S}, \quad (5)$$

где \mathbf{S} – управляющий вектор.

Все вышеперечисленные алгоритмы реализованы в блоках модели РЛС на языке Python с использованием модулей NumPy и SciPy.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

3.1. Сценарий имитационного моделирования

Для проведения моделирования была создана модель РЛС секторного обзора с электронным сканированием лучом, которая включает пассивный канал, реализующий обработку стохастических

сигналов от внешних источников. Модель РЛС размещалась в районе г. Санкт-Петербург. Были заданы две разнесенные по азимуту аэродинамические цели (рис. 4) с возможностью установки на них источников стохастических сигналов. В части их наличия моделировались три сценария:

- 1) нет источников стохастических сигналов;
- 2) один источник стохастических сигналов;
- 3) два источника стохастических сигналов.

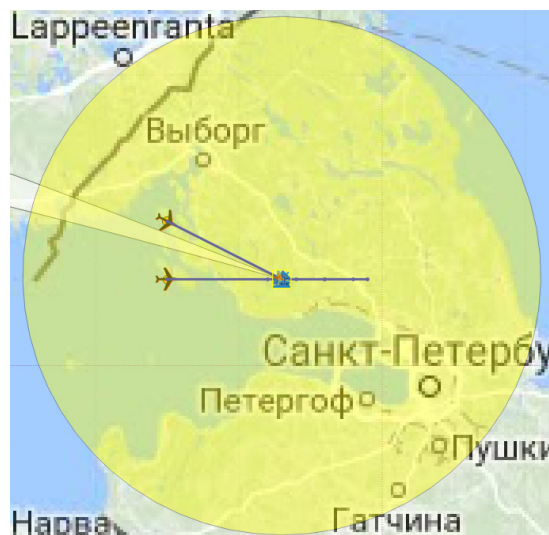


Рис. 4. Положение РЛС и целей

3.2. Результаты работы алгоритмов обнаружения и оценивания числа

В первом сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа показали ожидаемые результаты – признак обнаружения и оценка числа равны нулю. На рис. 5 показан результат работы этих алгоритмов в течение нескольких тактов работы РЛС – циклов излучения и приема.

Во втором сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа показали ожидаемые результаты – признак обнаружения и оценка числа равны единице (рис. 6).

В третьем сценарии алгоритмы обнаружения и оценивания числа также показали ожидаемые результаты – признак обнаружения равен единице, оценка числа – двум (рис. 7).

3.3. Результаты работы алгоритма пеленгации

В первом сценарии результаты отсутствуют, т.к. алгоритм пеленгации запускается только если признак обнаружения равен единице.

Во втором сценарии запеленгован один источник стохастических сигналов. На рис. 8 показан пеленгационный рельеф в обобщенной биконической

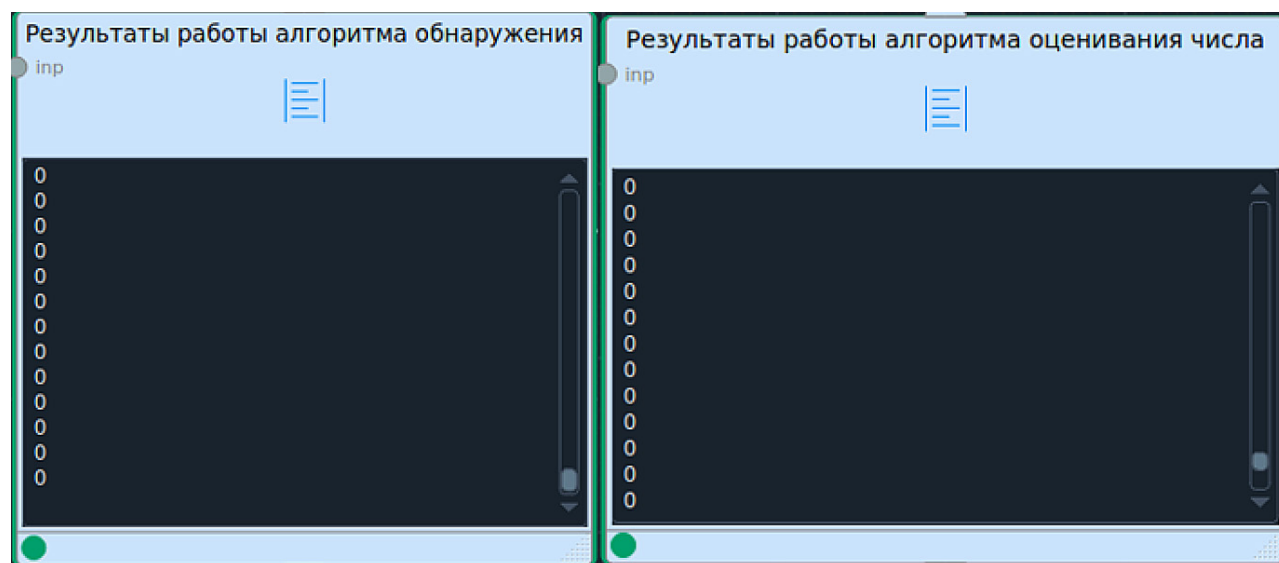


Рис. 5. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 1

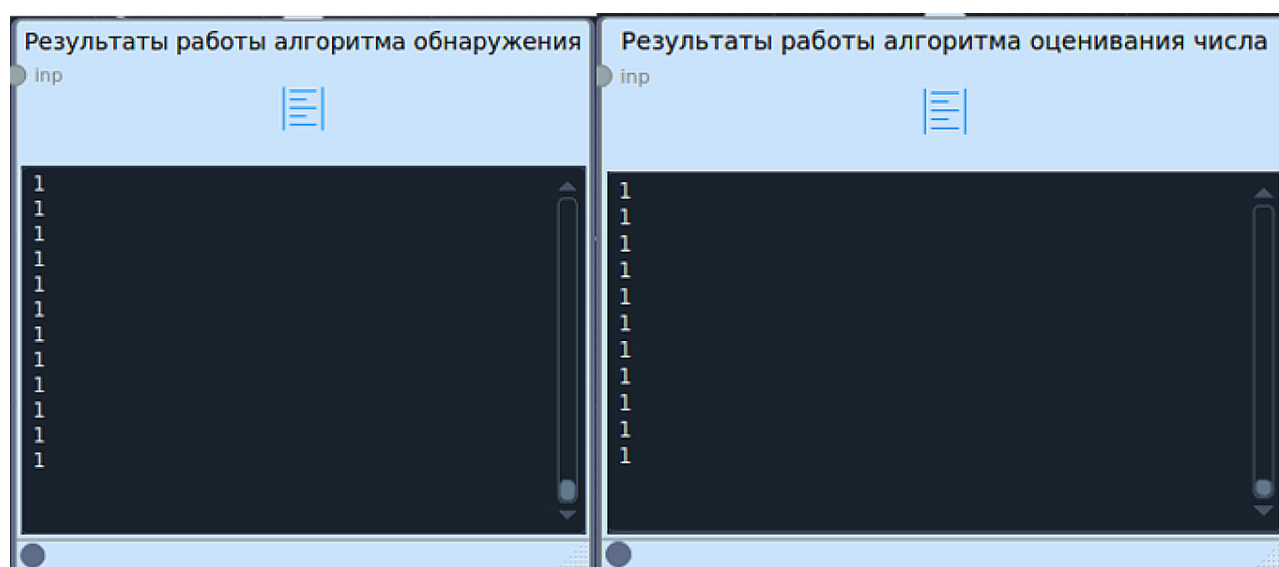


Рис. 6. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 2

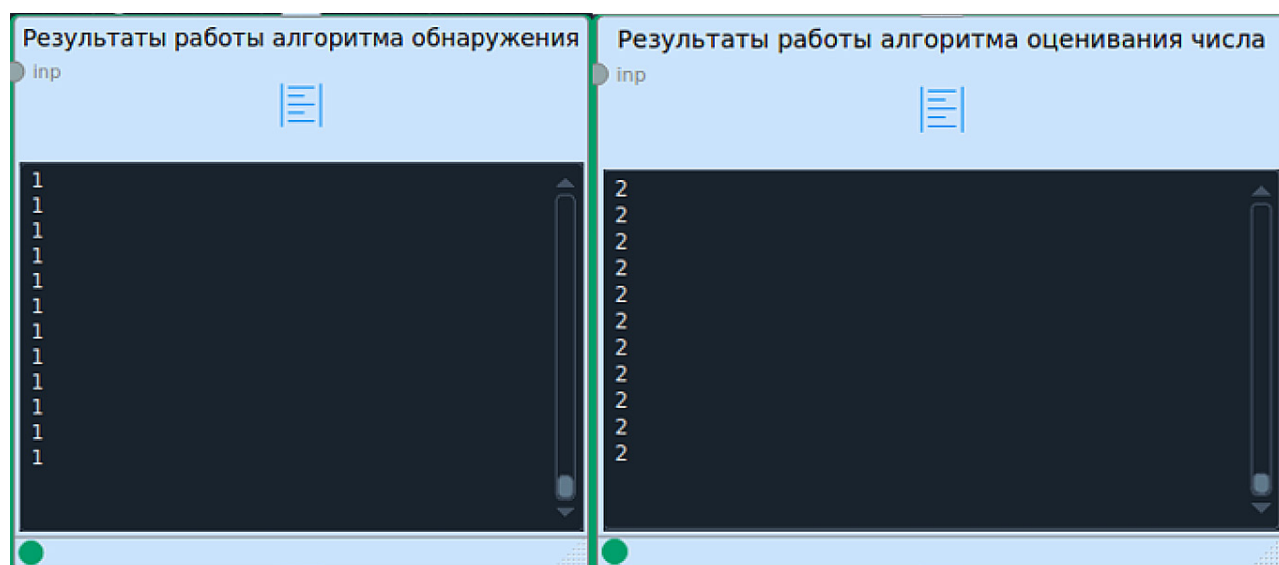


Рис. 7. Выход алгоритмов обнаружения и оценивания числа в сценарии 3

системе координат (ОБСК) (горизонтальная ось – азимут, вертикальная – угол места), построенный по результатам работы алгоритма.

В третьем сценарии запеленгованы два источника стохастических сигналов. На рис. 9 показан пеленгационный рельеф в ОБСК (горизонтальная ось – азимут, вертикальная – угол места), построенный по результатам работы алгоритма.

Оценки угловых координат источников стохастических сигналов в сферической системе координат следующие:

- 1-й источник – $(1.3^\circ; 0.3^\circ)$, истинное положение – $(1.8^\circ; -0.2^\circ)$;
- 2-й источник – $(27.5^\circ; 0.3^\circ)$, истинное положение – $(27.2^\circ; -0.2^\circ)$.

Как можно видеть, оценки совпадают с истинным положением источников с точностью до долей градуса. Дальнейшее повышение точности оценки возможно при использовании для построения пеленгационного рельефа сетки углов с меньшим дискретом.

3.4. Результаты работы алгоритма АПФ

В отсутствии мешающих сигналов обе цели были обнаружены, по ним выданы отметки (желтые маркеры на рис. 10). В этом сценарии при отсутствии мешающих сигналов (признак обнаружения равен нулю) алгоритм АПФ не задействовался, на прием формировался неадаптивный луч.

При наличии одного источника мешающего сигнала, размещенного на правой цели, была обнаружена центральная цель, по ней были выданы отметки (желтые маркеры на рис. 11, синие маркеры – истинное положение целей). Цель с источником мешающего сигнала обнаружена не была, т.к. алгоритм АПФ не может подавить мешающий сигнал, угловое направление на который совпадает с направлением на полезный сигнал.

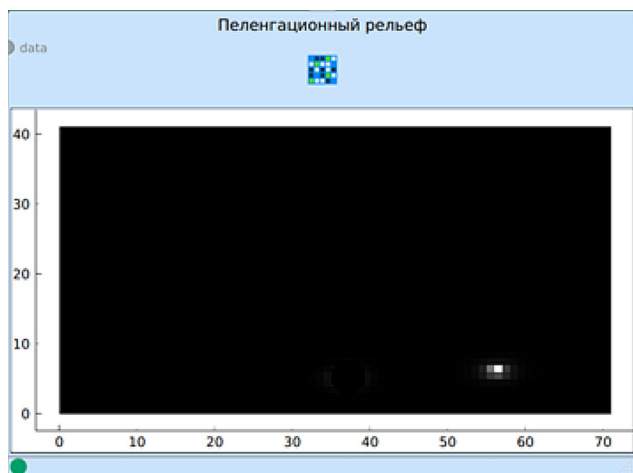


Рис. 8. Выход алгоритма пеленгации в сценарии 2

При наличии двух мешающих сигналов цели не были обнаружены.

Оценим эффективность работы алгоритма АПФ по результатам проведенного моделирования. Для этого необходимо найти значения следующих величин до и после адаптации [16]:

- мощности полезного сигнала на выходе решетки;
- выходного отношения помеха/шум по мощности (ОПШ);
- выходного отношения сигнал/(помеха + шум) по мощности (ОСПШ).

Для расчета указанных величин были вычислены следующие параметры:

- выходная мощность полезного сигнала

$$P_S = \sigma_S^2 \|\mathbf{W}^H \mathbf{V}_S\|^2, \quad (6)$$

где σ_S^2 – мощность сигнала в элементе решетки; \mathbf{W} – весовой вектор; \mathbf{V}_S – вектор амплитудно-фазового распределения поля от полезного сигнала в раскрыве решетки;

- выходная мощность помех и шумов

$$P_{JN} = \mathbf{W}^H \hat{\mathbf{R}} \mathbf{W} = \frac{1}{K} \|\mathbf{W}^H \mathbf{X}\|^2, \quad (7)$$

где $\|\cdot\|$ – евклидова норма вектора;

- мощность собственных шумов на выходе решетки

$$P_N = \sigma_N^2 \|\mathbf{W}\|^2, \quad (8)$$

где σ_N^2 – мощность собственных шумов в элементе решетки.

Для получения более корректной оценки при расчете выходной мощности помех и шумов использовался пакет данных \mathbf{X} , отличный от пакета, по которому рассчитывался адаптивный весовой вектор. Результаты оценки приведены в таблице. Как следует из представленных результатов, помеха была подавлена практически полностью, до уровня ниже собственных шумов антенной решетки.

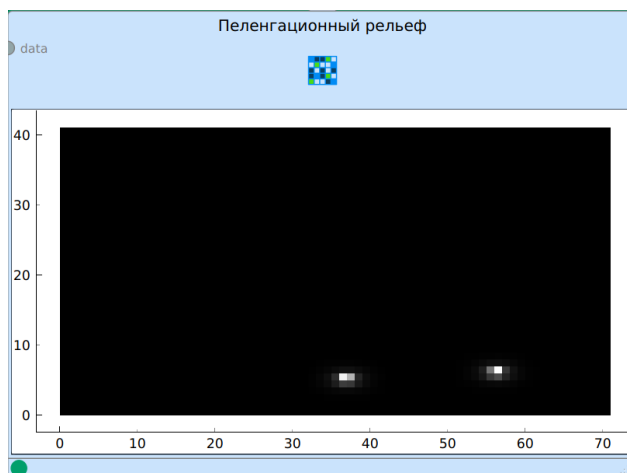


Рис. 9. Выход алгоритма пеленгации в сценарии 3

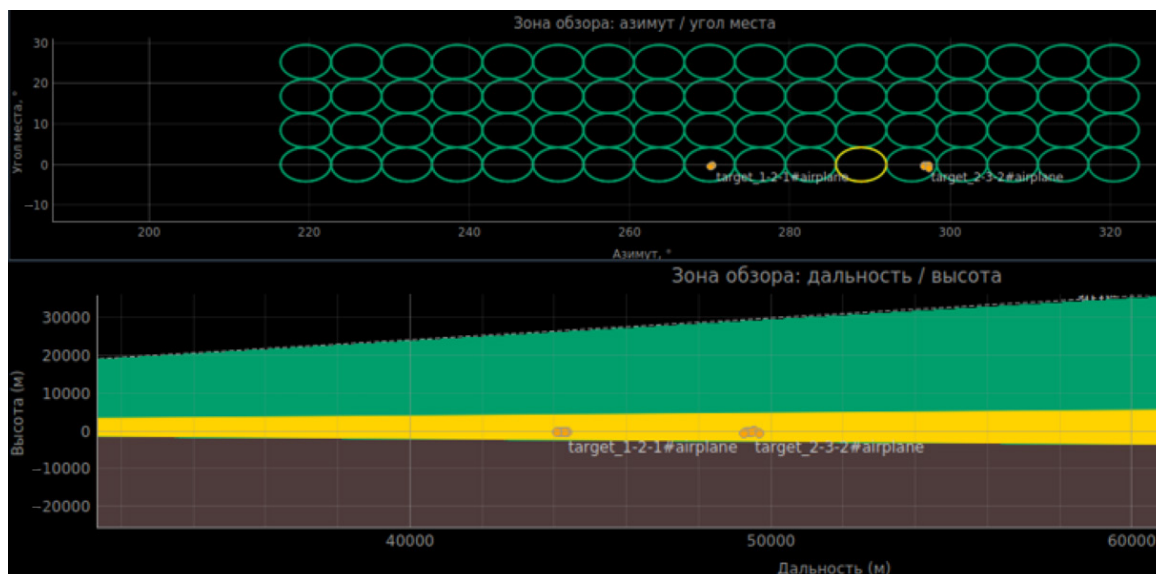


Рис. 10. Индикаторы «азимут – угол места» и «дальность – высота» в сценарии 1

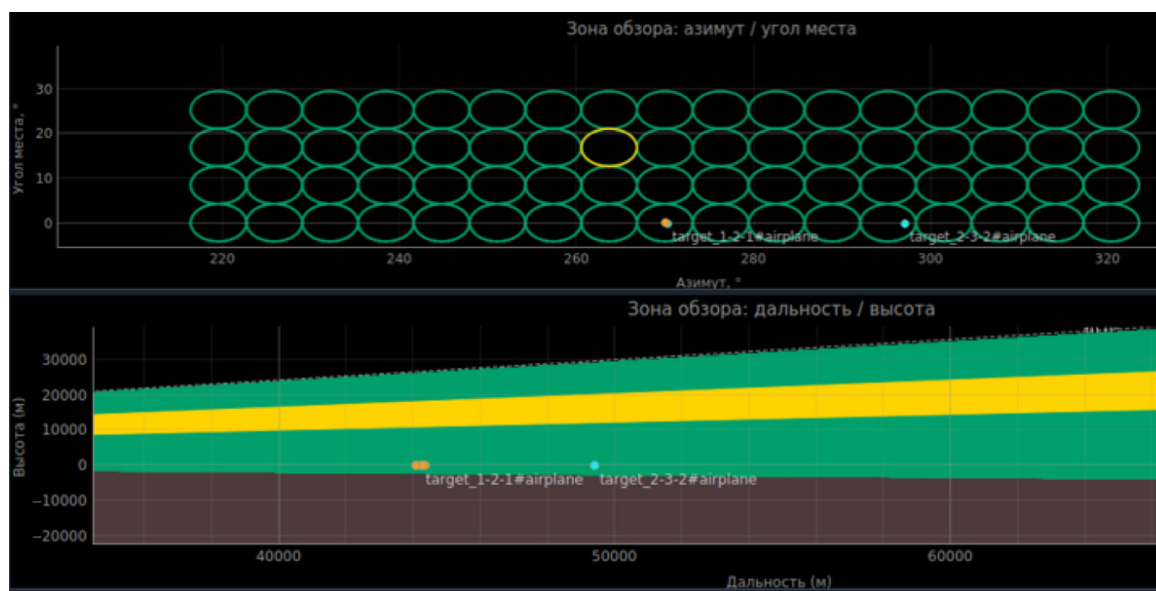


Рис. 11. Индикаторы «азимут – угол места» и «дальность – высота» в сценарии 2

Таблица. Результаты оценки эффективности АПФ

Оцениваемые величины	До АПФ	После АПФ
P_S , дБ	-94.4	-94.4
P_{JN} , дБ	-85.0	-118.0
P_N , дБ	-118.1	-118.1
ОПШ, дБ	33.1	-16.4
ОСПШ, дБ	-9.4	23.6

Для иллюстрации работы алгоритма на рис. 12 показан срез диаграммы направленности ФАР в сценарии 2. Как можно видеть, в диаграмме направленности в направлении на помеху сформировался глубокий провал, что подтверждает корректную работу алгоритма.

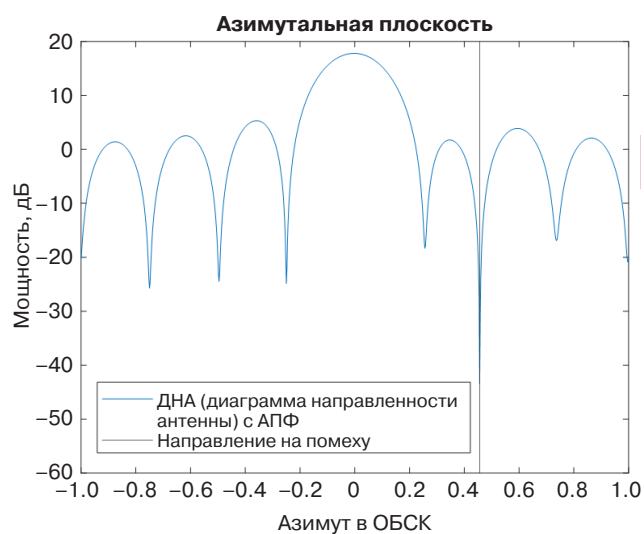


Рис. 12. Срез диаграммы направленности ФАР

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В российской САПР РЛС имеются богатые возможности по разработке моделей функционирования РЛС, позволяющие детально моделировать процессы обработки различных видов сигналов. Для этого используется визуальный функциональный редактор, в котором модель РЛС собирается из набора блоков. Среда инженерных расчетов и моделирования позволяет разместить созданную модель РЛС на местности и задать сценарий налета. Для демонстрации этих возможностей была создана модель РЛС секторного обзора с электронным сканированием лучом, в которой реализован пассивный канал, реализующий обработку стохастических сигналов от внешних источников. Проведено имитационное моделирование в трех сценариях фоно-целевой обстановки. Результаты работы алгоритмов полностью соответствуют теоретическому прогнозу.

Вклад авторов

М.Ю. Конопелькин – проведение исследования, настройка шаблонов модели РЛС, постановка тактической задачи, настройка помехо-целевой обстановки, редактирование статьи.

С.В. Петров – адаптация алгоритмов для использования в САПР РЛС и их реализация, разработка сценариев и проведение имитационных экспериментов, подготовка текста статьи.

Д.А. Смирнягина – реализация алгоритмов, проведение имитационных экспериментов, анализ полученных результатов, подготовка текста статьи.

Authors' contributions

M.Yu. Konopel'kin – conducting research, configuring radar model templates, setting a tactical task, setting up a noise/signal environment, and editing the text of the article.

S.V. Petrov – adaptation of the algorithms for using in a CAR radar and their implementation, script development, conducting simulation experiments, and writing the text of the article.

D.A. Smirnyagina – implementing the algorithms, conducting simulation experiments, analyzing the results obtained, and writing the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Созинов П.А., Коновальчик А.П., Саушкин В.П. Актуальные вопросы создания отечественной САПР для проектирования РЛС. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2019;3(23):106–119.
2. Созинов П.А., Коновальчик А.П. Основные подходы к разработке отечественной системы автоматизированного проектирования радиолокационных станций и текущие результаты. *Радиотехника*. 2020;84(7–13):62–74. [https://doi.org/10.18127/j00338486-202007\(13\)-08](https://doi.org/10.18127/j00338486-202007(13)-08)
3. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Щирий А.О., Арутюнян А.А. Этапы проектирования перспективных радиолокационных станций в специализированной САПР. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2020;4(28):111–119.
4. Коновальчик А.П. Система автоматизированного проектирования радиолокационных станций: принципы построения процесса проектирования. *Вестник воздушно-космической обороны*. 2021;2(30):52–64.
5. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Постановка задачи разработки и предварительная архитектура отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2017;20:127–130.
6. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Концепция многоуровневого проектирования РЛС в разрабатываемой САПР РЛС полного сквозного цикла. *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2017;17(4):889–892.

REFERENCES

1. Sozinov P.A., Konoval'chik A.P., Saushkin V.P. Relevant questions of indigenous CAD development for radar engineering. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2019;3(23):106–119 (in Russ.).
2. Sozinov P.A., Konoval'chik A.P. Basic approaches to the development of a domestic system of automated design of radar stations and current results. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2020;84(7–13):62–74 (in Russ.). [https://doi.org/10.18127/j00338486-202007\(13\)-08](https://doi.org/10.18127/j00338486-202007(13)-08)
3. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Yu., Shchiryi A.O., Arutyunyan A.A. Stages of designing advanced radar stations in specialized domestic CAD system. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2020;4(28):111–119 (in Russ.).
4. Konoval'chik A.P. Computer-aided design of radar stations: principles for constructing the design process. *Vestnik vozduшно-kosmicheskoi oborony = Aerospace Defense Herald*. 2021;2(30):52–64 (in Russ.).
5. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Yu., Plaksenko O.A., Shchiryi A.O. Statement of the task of development and preliminary architecture of the domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*. 2017;20:127–130 (in Russ.).
6. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryi A.O. The concept of multi-level design of radars in the developed CAD radar of a full end-to-end cycle. *Fundamental'nyye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya = Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrumentation*. 2017;17(4):889–892 (in Russ.).

7. Коновальчик А.П., Конопелькин М.Ю., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Отечественная система автоматизированного проектирования радиолокационных систем, комплексов и станций с учетом средств воздушно-космического нападения. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2018;10(1):40–47.
8. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Функции имитации боевых действий в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Вопросы радиоэлектроники*. 2018;3:30–34.
9. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Реализация имитационного моделирования в разрабатываемой отечественной САПР РЛС полного сквозного цикла. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2018;21:290–293.
10. Коновальчик А.П., Плаксенко О.А., Щирий А.О. Обоснование облика перспективных радиолокационных станций посредством разрабатываемой отечественной системы автоматизированного проектирования. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2019;11(1):4–11.
11. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. Third Edition. McGraw-Hill; 2008. 1328 p.
12. Петров С.В. Синтез и анализ алгоритмов обнаружения стохастических сигналов в системах с многоэлементной антенной решеткой. *Антенны*. 2015;7:29–36.
13. Петров С.В. Синтез и анализ алгоритма оценивания числа стохастических сигналов в системах с многоэлементной антенной решеткой. *Антенны*. 2015;9:15–22.
14. Ратынский М.В. *Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках*. М.: Радио и связь; 2003. 200 с.
15. Van Trees H.L. *Detection, estimation and modulation theory. Part IV. Optimum array processing*. Wiley; 2002. 1443 p.
16. Ратынский М.В. Оценка эффективности адаптивной пространственной фильтрации. *Радиотехника*. 2013;8:38–44.
7. Konoval'chik A.P., Konopel'kin M.Y., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Domestic system for computer-aided design of radar systems, complexes and stations, taking into account the means of aerospace attack. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Research*. 2018;10(1):40–47 (in Russ.).
8. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Functions of simulating combat actions in the developed domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Voprosy radioelektroniki = Issues of Radio Electronics*. 2018;3:30–34 (in Russ.).
9. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Implementation of simulation modeling in the developed domestic CAD radar of a full end-to-end cycle. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New Information Technologies in Automated Systems*. 2018;21:290–293 (in Russ.).
10. Konoval'chik A.P., Plaksenko O.A., Shchiryy A.O. Substantiation of the appearance of promising radar stations using the developed domestic computer-aided design system. *Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli = H&ES Research*. 2019;11(1):4–11 (in Russ.).
11. Skolnik M.I. *Radar Handbook*. Third Edition. McGraw-Hill; 2008. 1328 p.
12. Petrov S.V. Synthesis and analysis of stochastic signal detection algorithms in the multi-element antenna array systems. *Antenny = Antennas*. 2015;7:29–36 (in Russ.).
13. Petrov S.V. Synthesis and analysis of the algorithm for estimating the number of stochastic signals in systems with a multi-element antenna array. *Antenny = Antennas*. 2015;9:15–22 (in Russ.).
14. Ratynskii M.V. *Adaptatsiya i sverkhrazreshenie v antennoykh reshetkakh (Adaptation and Superresolution in Antenna Arrays)*. Moscow: Radio i svyaz'; 2003. 200 p. (in Russ.).
15. Van Trees H.L. *Detection, estimation and modulation theory. Part IV. Optimum array processing*. Wiley; 2002. 1443 p.
16. Ratynskiy M.V. On the evaluation of adaptive spatial filtering efficiency. *Radiotekhnika = Radioengineering*. 2013;8:38–44 (in Russ.).

Об авторах

Конопелькин Максим Юрьевич, начальник отдела, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru. SPIN-код РИНЦ 6660-4641, <https://orcid.org/0000-0002-0654-3845>

Петров Сергей Викторович, к.т.н., ведущий программист, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: sv.petrov@almaz-antey.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5370-9898>

Смирнягина Дарья Алексеевна, техник, Акционерное общество «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» (121471, Россия, Москва, ул. Вереysкая, 41). E-mail: ponyoo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7237-2511>

About the authors

Maxim Yu. Konopel'kin, Head of Department, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: m.konopelkin@almaz-antey.ru. RSCI SPIN-code 6660-4641, <https://orcid.org/0000-0002-0654-3845>

Sergey V. Petrov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Programmer, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: sv.petrov@almaz-antey.ru. <https://orcid.org/0000-0001-5370-9898>

Daria A. Smirnyagina, Technician, "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation (41, Vereyskaya ul., Moscow, 121471 Russia). E-mail: ponyoo@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-7237-2511>