

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>



УДК 621.396

Научно-технические пути уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли)

И. Е. Мухин¹✉, А. Н. Попов¹, А. В. Хмелевская²

¹ АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова
ул. Запольная, д. 47, г. Курск 305040, Российская Федерация

² Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: okb@aviaavtomatika.ru

Резюме

Цель исследования – разработка научно-технических путей уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) на фоне пассивной помехи.

Методы. При исследовании определены методы и основанные на них технические решения, позволяющие повысить эффективность функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех. Предложен метод расширения спектра сигнала до 1 ГГц путем уменьшения разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций. Определено, что с уменьшением разрешаемого объема уменьшается размер площадки подстилающей поверхности, от которой происходят отражения сигнала. С целью повышения качества обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности предложен метод использования поляризационных режимов.

Результаты: предложено техническое решение, основанное на методе расширения спектра сигнала до 1 ГГц путем уменьшения разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций, предназначенных для преобразования радиочастотных сигналов в цифровой вид, используя приемник смешанных сигналов с непосредственной оцифровкой на радиочастоте, такой как AD6688; разработана конструкция малобазовой радиолокационной системы, состоящая из двух позиций, антенны которых находятся в пределах средней ширины лепестка диаграммы обратного рассеяния облучаемого объекта, особенностью антенны является возможность приема и излучения сигналов одной линейной поляризации, но ортогональные по поляризации первой позиции (в т. ч. сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации); получено важное соотношение для малобазовой поляризационной измерительной системы (МПИС), когда расстояние между двумя парциальными антеннами может быть намного меньше расстояния до измеряемого объекта.

Заключение. Предложены методы и технические решения на основании данных методов, позволяющие уменьшить количественные показатели ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) с учетом пассивной помехи. Предложенный подход позволяет перейти к синтезу малобазовой поляризационной измерительной системы.

Ключевые слова: расширение спектра сигнала; пассивная помеха; бортовая радиолокационная станция; малобазовая поляризационная измерительная система; цифровая антенная решетка.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Мухин И. Е., Попов А. Н., Хмелевская А. В. Научно-технические пути уменьшения количественных показателей ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 3. С. 157–169. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>

Поступила в редакцию 05.07.2024

Подписана в печать 04.08.2024

Опубликована 30.09.2024

Scientific and technical ways of reducing quantitative indicators of false alarms during the operation of an airboard radar station on the background of the underlying surface (earth)

Ivan E. Mukhin¹ ✉, Alexander N. Popov¹, Alena V. Khmelevskaya²

¹ JSC "Aviaautomatiks" named after V. V. Tarasov"
47 Zapolnaya Str., Kursk 305040, Russian Federation

² Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: okb@aviaavtomatika.ru

Abstract

The purpose of the research is development of scientific and technical ways to reduce the quantitative indicators of false alarms when operating an on-board radar station against the background of the underlying surface (earth) against the background of passive interference.

Methods. When conducting scientific research, methods of probability theory, mathematical statistics, statistical radio engineering and computational mathematics were used. The study identified a number of methods and technical solutions based on them that make it possible to increase the efficiency of the functioning of airborne radar stations against the background of passive interference. The paper proposes a method for expanding the signal spectrum to 1 GHz by reducing the resolved volume of airborne radar stations. Physically, this is determined by the fact that with a decrease in the resolved volume, the size of the underlying surface area from which the signal is reflected decreases. In order to improve the quality of detection of objects against the background of the underlying surface, a method of using polarization modes is proposed.

Results. In the course of the research: a technical solution was proposed based on the method of expanding the signal spectrum to 1 GHz by reducing the resolution volume of airborne radar stations designed to convert radio frequency signals into digital form, using a mixed signal receiver with direct digitization at radio frequency, such as the AD6688 ; a design of a low-baseline radar system has been developed, consisting of two positions, the antennas of which are located within the average width of the lobe of the backscattering diagram of the irradiated object; a feature of the antenna is the ability to receive and emit signals of the same linear polarization, but orthogonal to the polarization of the first position (including . horizontal and vertical polarization signals); an important relation was obtained for a low-baseline polarization measuring system (MPIS) when the distance between two partial antennas can be much less than the distance to the measured object.

Conclusion. The scientific article proposes methods and technical solutions based on these methods to reduce the quantitative indicators of false alarms when operating an on-board radar station against the background of the

underlying surface (ground) against the background of passive interference. The proposed approach allows us to move on to the synthesis of a low-baseline polarization measuring system.

Keywords: *signal spectrum extension; passive interference; airborne radar; low-baseline polarization measuring system; digital antenna array.*

Conflict of interest: *The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.*

For citation: Mukhin I.E., Popov A.N., Khmelevskaya A.V. Scientific and technical ways of reducing quantitative indicators of false alarms during the operation of an airboard radar station on the background of the underlying surface (earth). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2024;14(3):157–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-3-157-169>

Received 05.07.2024

Accepted 04.08.2024

Published 30.09.2024

Введение

Одним из актуальных направлений является обнаружение объектов на фоне подстилающей поверхности с борта летательного аппарата на базе бортовых радиолокационных станций. Эта технология востребована при производстве поисково-спасательных операций во время стихийных бедствий, пожаров, наводнений [1]. Обнаружение таких объектов на фоне подстилающей поверхности (земли) можно классифицировать как обнаружение на фоне «пассивной» помехи. При этом очень важно обеспечить не только отношение сигнал / шум (в данном случае собственных шумов приемного устройства) принимаемых от объекта отраженных сигналов, но и отношение сигнал / помеха. Отражения от подстилающей поверхности (земли) будут определяться рядом факторов. Наиболее важными из них являются размеры разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций, тип поверхности (степь, лесистая местность, рельеф и параметры поверхности — влажность, температура и т. д.), частотный диапазон (длина волны).

Существует ряд методов и основанных на них технических решений, которые позволяют повысить эффективность функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех. В данном случае под эффективностью функционирования бортовых радиолокационных станций на фоне пассивных помех понимают повышение вероятности правильного обнаружения объектов и снижение уровня ложных тревог. Рассмотрим методы и технические решения, которые возможно использовать в бортовых радиолокационных станциях, созданных на основе цифровых антенных решеток.

Материалы и методы

Одним из способов увеличения отношения сигнал / пассивная помеха, а соответственно, и уменьшения уровня ложных тревог является уменьшение разрешаемого объема бортовых радиолокационных станций. Физически это определяется тем, что с уменьшением разрешаемого объема уменьшается размер площадки подстилающей поверхности, от которой происходят отражения сигнала.

Разрешающая способность по дальности – это минимальное расстояние между двумя целями, при котором их можно различить как отдельные объекты на радаре. Этот параметр тесно связан с шириной спектра излучаемого сигнала. Формула, связывающая разрешающую способность по дальности (ΔR) с шириной спектра сигнала (Δf), выглядит следующим образом [2]:

$$\Delta R = \frac{c}{2 \cdot \Delta f},$$

где ΔR – разрешающая способность по дальности; c – скорость света; Δf – ширина спектра сигнала.

Из этой формулы следует, что разрешающая способность по дальности обратно пропорциональна ширине спектра сигнала. Это означает, что чем шире спектр излучаемого сигнала, тем выше разрешающая способность по дальности, т. е. система может различать более близко расположенные цели. Этот принцип используется в системах с расширением спектра, таких как системы с частотной манипуляцией (FHSS) или прямой последовательности (DSSS), где сигнал распределяется по широкому диапазону частот для улучшения разрешения и уменьшения влияния шума и помех [3].

Технические решения, позволяющие создание приемо-передающих

модулей цифровых антенных решеток с шириной спектра сигналов порядка 1 ГГц, заключаются в следующем.

Учитывая схему БРЛС с цифровыми антенными решетками с использованием современных технических решений, предназначенных для преобразования радиочастотных сигналов в цифровой вид, имеется возможность работать с частотами сигналов шириной полосы до 1,2 ГГц. В частности, используя приемник смешанных сигналов с непосредственной оцифровкой на радиочастоте, такой как AD6688.

В состав такого приемника входят пара аналого-цифровых преобразователей из 14 разрядов с высоким быстродействием, которое может достигать 3.0 GSPS (3,0 млрд выборок в секунду) [4]. Это высокоскоростные АЦП предназначены для преобразования аналоговых сигналов в цифровые данные, которые затем обрабатываются различными блоками цифровой обработки сигналов.

Высокое быстродействие аналого-цифровых преобразователей позволяет анализировать быстро меняющиеся сигналы и обеспечивает высокое разрешение по времени, что важно для определения характеристик движущихся объектов или быстро меняющихся процессов [5].

AD6688 содержит интегрированные буфер и схему выборки-хранения (рис. 1).

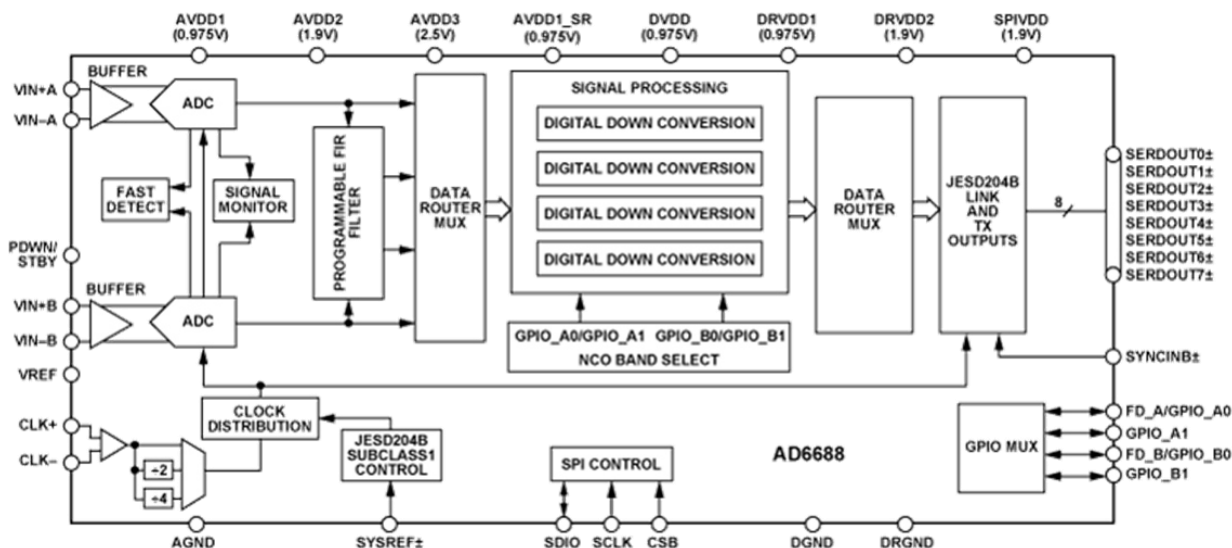


Рис.1. Структурная схема приемника смешанных сигналов AD6688

Fig. 1. AD6688 Mixed Signal Receiver Block Diagram

В многокаскадной дифференциальной конвейерной архитектуре двухядерного аналого-цифрового преобразования применяется интегрированная логика исправления ошибок в выходном коде, что позволяет упростить проектирование системы [6].

Интегрированный источник опорного напряжения обеспечивает высокую точность и стабильность, так как он специально разработан для работы с конкретным АЦП или системой. Использование интегрированного источника опорного напряжения уменьшает количество внешних компонентов, необходимых для работы системы [7]. Интегрированный источник опорного напряжения обычно имеет простую настройку и может быть легко интегрирован в систему без необходимости сложных внешних схем регулирования и стабилизации. Уменьшение количества внешних компонентов также повышает

надежность системы, так как меньшее количество соединений и компонентов снижает вероятность отказов.

Интегрированный источник опорного напряжения может быть оптимизирован для работы с конкретными характеристиками АЦП, что может улучшить общую производительность системы, особенно в условиях высоких скоростей и сложных сигналов.

Система аналого-цифрового преобразования (АЦП) включает в себя несколько ключевых компонентов и подсистем [8].

1. Широкополосный входной каскад аналого-цифрового преобразователя. Этот каскад позволяет выбирать диапазон входных напряжений, что важно для адаптации к различным источникам аналоговых сигналов.

2. Дифференциальные входы. Они измеряют разность напряжений между двумя входными линиями, что улучшает

помехоустойчивость и точность измерений.

3. Перекрестный мультиплексор и цифровые вычислительные синтезаторы (DDC). Выходы данных аналого-цифрового преобразователя подключены через перекрестный мультиплексор к цифровым вычислительным синтезаторам. Это позволяет распределять данные для дальнейшей цифровой обработки.

4. Генератор с программным управлением и GPIO. Генератор с программным управлением позволяет выбирать различные диапазоны частот, что важно для настройки системы под конкретные приложения. Контакты ввода / вывода общего назначения (GPIO) используются для управления этими диапазонами и могут быть запрограммированы для выполнения других функций.

5. Управление рабочими режимами через SPI. Управление рабочими режимами DDC осуществляется через программируемые профили по шине SPI (Serial Peripheral Interface) [9].

Для синтеза радиолокационных сигналов в схеме БРЛС с цифровыми антенными решетками необходимо использовать быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи. При этом можно использовать генератор прямого цифрового синтеза (DDS), такой как AD9914, с тактовой частотой 3,5 GSPS [10]. Данный генератор позволяет производить синтез радиолокационных сигналов с заданными параметрами. Либо непосредственно быстродействующий цифро-аналоговый преобразователь, такой как

AD9135. Его преимущество заключается в возможности формирования радиолокационных сигналов, в т. ч. сложных, с любыми параметрами с полосой до 1 ГГц.

Основные компоненты [11], составляющие приемо-передающий тракты: квадратурные модуляторы, смесители, фильтры, усилители, подбираются с учетом обеспечения высокого отношения сигнал / шум, необходимого для точности обнаружения и баланса элементов активной антенной решетки.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим использование поляризационных режимов для повышения качества обнаружения объектов на фоне подстилающей поверхности.

Различные варианты построения радиолокационной системы с использованием цифровых антенных решеток позволяют реализовать поляризационные режимы работ в БРЛС. Конструкция БРЛС на основе цифровых антенных решеток позволяет использовать несколько антенных полотен с одним приемо-передающим модулем. При этом возможно использовать антенные полотна, формирующие и принимающие сигналы с ортогональными поляризациями.

В данном случае БРЛС будет представлять собой малобазовую поляризационную измерительную систему [12].

Конструкция малобазовой радиолокационной системы состоит из двух позиций, антенны которых находятся в пределах средней ширины лепестка

диаграммы обратного рассеяния облучаемого объекта (рис. 2). Следует учитывать, что фронт волны, которая падает на антенны, является плоским. [13]. Первая позиция включает в себя приемо-передающее устройство и антенну, которая позволяет принимать и транслировать сигналы одной линейной поляризации. Конструкция второй позиции аналогична. Особенностью антенны является возможность приема и излучения

сигналов одной линейной поляризации, но ортогональные по поляризации первой позиции (в т. ч. сигналы горизонтальной и вертикальной поляризации).

Малобазовая поляризационная измерительная система должна принимать и транслировать сигналы с каждой позиции в одном и том же направлении (рис. 2). Таким образом обеспечивается прием сигнала, отраженного от одного и того же объекта, на каждую из позиций.

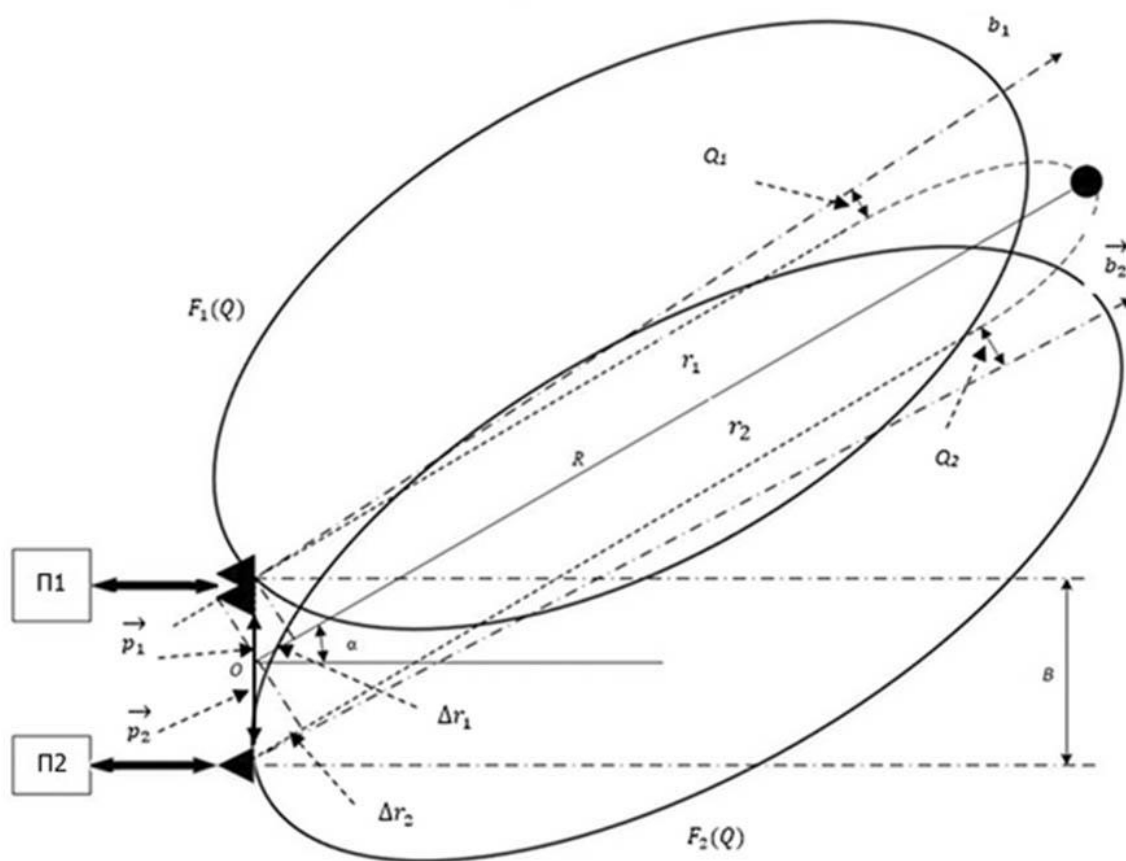


Рис. 2. Структура малобазовой поляризационной измерительной системы: П1 и П2 – номер позиции; О – условный фазовый центр; r_1 и r_2 – расстояния от антенн до объекта (для П1 и П2)

Fig. 2. Structure of a low-phase polarization measuring system: P1 and P2 – position number; O – conditional phase center; r_1 and r_2 – distances from antennas to the object (for P1 and P2)

Результатом функционирования такой малобазовой радиолокационной системы должно быть формирование поляризационной матрицы рассеяния (ПМР)

или поляризационного вектора рассеяния (ПВР) объекта [14]. Поочередная трансляция сигналов с обеих позиций необходима для обеспечения измерения

поляризационного вектора рассеяния. Кроме того, для каждого транслируемого сигнала необходимо проводить прием отраженных сигналов на обе позиции одновременно. В этом случае возможно сформировать поляризационный вектор рассеяния облучаемого объекта [15]:

$$\vec{U}(t, R) = (\dot{U}_{\text{ГВ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ГГ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ВГ}}(t, R) \dot{U}_{\text{ВВ}}(t, R))$$

где U – комплексные амплитуды на выходе приемных каналов; индекс «Г» – горизонтальная поляризация; индекс «В» – вертикальная; первый индекс при U – излучаемая поляризация, второй – принимаемая (например, $\dot{U}_{\text{ВГ}}(t, R)$ – был излучен сигнал на вертикальной поляризации, а принят на горизонтальной).

В общем случае направление на объект может не совпадать с перпендикуляром к условному фазовому центру и может составлять некий угол α [16].

Расстояния Δr_1 и Δr_2 определяются как $\Delta r_1 = R - r_1$, $\Delta r_2 = R - r_2$ и обозначают разности набега фаз отраженного сигнала относительно условного фазового центра при приеме их на позиции 1 и 2 соответственно [17].

Следует принимать во внимание тот факт, что в общем случае антенны обеих позиций малобазовой поляризационной

измерительной системы могут отличаться друг от друга [18]. Этим может быть обусловлена разница в характеристиках направленности (нормированных диаграммах направленности) $F1(Q)$ и $F2(Q)$ [19] и в коэффициентах усиления (КУ) антенн $G1$ и $G2$.

Установлено, что база между позициями характеризуется расстоянием B . Таким образом, применительно для малобазовой системы должно выполняться равенство $B \ll R$ [20].

Выводы

В научной статье предложены методы и технические решения на основании данных методов, позволяющие уменьшить количественные показатели ложной тревоги при работе бортовой радиолокационной станции на фоне подстилающей поверхности (земли) на фоне пассивной помехи.

Получено важное соотношение для малобазовой поляризационной измерительной системы (МПИС), когда расстояние между двумя парциальными антеннами может быть намного меньше расстояния до измеряемого объекта.

Предложенный подход позволяет перейти к синтезу малобазовой поляризационной измерительной системы.

Список литературы

1. Метод и алгоритм автономного планирования траектории полета беспилотного летательного аппарата при мониторинге пожарной обстановки в целях раннего обнаружения источника возгорания / Р. А. Томакова, С. А. Филист, А. Н. Брежнева [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление,

вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 1. С. 93–110.

2. Лобач В. Т., Потипак М. В. Измерение дальности медленно движущейся цели радиолокатором с высокой разрешающей способностью по дальности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 11 (160). С. 67–75.

3. Методологические основы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе комплексной субполосной обработки сверхкороткоимпульсных радиолокационных и оптических сигналов: монография / И. И. Олейник, А. А. Черноморец, Д. С. Коптев [и др.]; под общей редакцией В. Г. Андропова; Минобрнауки России, Юго-Западный государственный университет. Курск: ЮЗГУ, 2021. 203 с.

4. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов, Д. С. Коптев; Юго-Западного гос. ун-т. Курск, 2018. 211 с.

5. Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И. Г. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2016. 316 с.

6. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles / I. G. Babanin, V. G. Andronov, D. S. Koptev, A. I. Nikolaenko, A. E. Sevriukov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

7. Бабанин И. Г., Мухин И. Е., Коптев Д. С. Методологические основы выбора параметров фильтров частотной селекции с учетом эквивалентных энергетических потерь в радиоприёмных устройствах высокоскоростных радиосистем передачи информации: монография / Юго-Западный гос. ун-т. Курск, 2020. 136 с.

8. Интеллектуальная система обработки изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / С. А. Филист, Р. А. Томакова, Н. Г. Нефедов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2022. Т. 12, № 4. С. 64–85.

9. Довбня В. Г., Коптев Д. С. Модифицированная математическая модель приемного тракта цифровых линий связи // Телекоммуникации. 2022. № 6. С. 16–23.

10. Оценка дальности передачи видеоинформации различного качества при мониторинге чрезвычайных ситуаций с беспилотного летательного аппарата / М. Ю. Алемпьев, Д. С. Коптев, В. Г. Довбня, Е. В. Скрипкина // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2023. Т. 13, № 2. С. 31–44.

11. Конаныхин А. Ю., Конаныхина Т. Н., Панищев В. С. Методы улучшения выделенной области изображения при быстрой обработке символьной информации // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2021. Т. 11, № 4. С. 106–119.

12. Олейник И. И. Представление сигналов при обработке информации в малобазовой поляризационной измерительной системе // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (3). С. 422–431.
13. Олейник И. И. Исследование решающих правил распознавания объектов в малобазовой поляризационной измерительной системе при субполосной обработке сигналов // Экономика. Информатика. 2020. № 47 (3). С. 648–660.
14. Олейник И. И., Ширяев А. А., Кукушкин С. С. Методы обработки информации при построении высокопроизводительных аппаратных систем на основе распараллеливания потоков передаваемых данных // Экономика. Информатика. 2023. № 50 (2). С. 465–475.
15. Довбня В. Г., Коптев Д. С., Бабанин И. Г. Оценка потенциальной помехоустойчивости приёма цифровых сигналов, используемых в современных и перспективных системах радиорелейной и спутниковой связи // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2020. Т. 10, № 1. С. 21–35.
16. Оценка помехоустойчивости беспроводных цифровых систем связи при воздействии помех по побочным каналам приема / В. Г. Довбня, А. А. Гуламов, И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2018. Т. 8, № 3 (28). С. 35–40.
17. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals / E. V. Burdanova, E. G. Zhilyakov, A. V. Mamatov, A. N. Nemtsev, I. I. Oleynik // COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology. 2019. Vol. 8, is. 6. P. 3166–3170.
18. Андронов В. Г., Чуев А. А., Юдин И. С. Методика определения отклонений беспилотных летательных аппаратов от заданной траектории по параллаксам изображений подстилающей поверхности // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 26, № 2. С. 122–141.
19. Экспериментальные исследования по распознаванию малоразмерных объектов на видеоизображениях при использовании многомерных пространственно-субполосных векторов / В. А. Голощапова, А. Н. Заливин, Е. М. Маматов, И. И. Олейник // Экономика. Информатика. 2022. Т. 49, № 2. С. 432–440.
20. Коптев Д. С., Мухин И. Е., Андронов В. Г. Состав, структура и назначение комплекса для обеспечения поисково-спасательных операций с использованием вертолётов в Арктической зоне Российской Федерации // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: сборник научных статей по материалам VII Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. Курск, 2023. С. 342–353.

References

1. Tomakova R.A., Filist S.A., Brezhnev A.N., et al. Method and algorithm for autonomous planning of the flight path of an unmanned aerial vehicle when monitoring fire conditions for the purpose of early detection of a fire source. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo*

gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2023;13(1):93–110. (In Russ.)

2. Lobach V.T., Potipak M.V. Measuring the range of a slow-moving target using a radar with high range resolution. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings Sfedu. Engineering Sciences. 2014;11(160):67–75. (In Russ.)*

3. Oleynik I.I., Chernomorets A.A., Koptev D.S., et al. Methodological foundations for detecting small unmanned aerial vehicles based on complex subband processing of ultrashort-pulse radar and optical signals. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2021. 203 p. (In Russ.)

4. Mukhin I.E., Mukhin A.I., Mikhailov S.N., Koptev D.S. Methodological foundations for the synthesis of systems for diagnosing the technical condition of space and aircraft. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2018. 211 p. (In Russ.)

5. Mukhin I.E., Khmelevskaya A.V., Babanin I.G., Mukhin I.E. Methodological foundations for the synthesis of systems for providing electromagnetic access by means of radio monitoring of modern telecommunication systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2016. 316 p. (In Russ.)

6. Babanin I.G., Andronov V.G., Koptev D.S., Nikolaenko A.I., Sevriukov A.E. The conceptual level of analysis and its place in the infological system of information and analytical support in the tasks of operational assessment of threats posed by unmanned aerial vehicles. In: *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2021*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. P. 9470577. <https://doi.org/10.1109/WECONF51603.2021.9470577>

7. Babanin I.G., Mukhin I.E., Koptev D.S. Methodological basis for choosing the parameters of frequency selection filters taking into account equivalent energy losses in radio receivers of high-speed radio information transmission systems. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2020. 136 p. (In Russ.)

8. Filist S.A., Tomakova R.A., Nefedov N.G., et al. Intelligent system for processing images received from unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2022;12(4):64–85. (In Russ.)*

9. Dovbnya V.G., Koptev D.S. Modified mathematical model of the receiving path of digital communication lines. *Telekommunikatsii = Telecommunications. 2022;(6):16–23. (In Russ.)*

10. Alempyev M.Yu., Koptev D.S., Dovbnya V.G., Skripkina E.V. Estimation of the transmission range of video information of various quality when monitoring emergency situations from an unmanned aerial vehicle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering. 2023;13(2):31–44. (In Russ.)*

11. Konanykhin A.Yu., Konanykhina T.N., Panishchev V.S. Methods for improving the selected image area during high-speed processing of symbolic information. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2021;11(4):106–119. (In Russ.)
12. Oleinik I.I. Representation of signals during information processing in a low-base polarization measuring system. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;47(3):422–431.
13. Oleinik I. I. Study of decisive rules for object recognition in a low-baseline polarization measuring system with subband signal processing. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2020;47(3):648–660. (In Russ.)
14. Oleynik I.I., Shiryaev A.A., Kukushkin S.S. Methods of information processing when constructing high-performance hardware systems based on parallelization of transmitted data flows. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2023;50(2):465–475. (In Russ.)
15. Dovbnaya V.G., Koptev D.S., Babanin I.G. Assessing the potential noise immunity of receiving digital signals used in modern and advanced radio relay and satellite communication systems. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2020;10(1):21–35. (In Russ.)
16. Dovbnaya V.G., Gulamov A.A., Babanin I.G., Koptev D.S. Evaluation of the noise immunity of wireless digital communication systems when exposed to interference via side reception channels. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2018;8(3):35–40. (In Russ.)
17. Burdanova E.V., Zhilyakov E.G., Mamatov A.V., Nemtsev A.N., Oleynik I.I. Decisive rule experimental studies to detect objects on the background of the earth surface using polarization differences of radar signals. *COMPUSOFT. An International Journal of Advanced Computer Technology*. 2019;8 (6):3166–3170.
18. Andronov V.G., Chuev A.A., Yudin I.S. Methodology for determining deviations of unmanned aerial vehicles from a given trajectory using parallaxes of images of the underlying surface. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. = Proceedings of the Southwest State University*. 2023;26(2):122–141.
19. Goloshchapova V.A., Zalivin A.N., Mamatov E.M., Oleinik I.I. Experimental studies on the recognition of small-sized objects in video images using multidimensional spatial subband vectors. *Ekonomika. Informatika = Economics. Computer Science*. 2022;49(2):432–440. (In Russ.)
20. Koptev D.S., Mukhin I.E., Andronov V.G. Composition, structure and purpose of the complex to support search and rescue operations using helicopters in the Arctic zone of the Russian Federation. In: *Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i*

puti reshe-niya: sbornik nauchnykh statei po materialam VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Infocommunications and space technologies: status, problems and solutions: Collection of scientific articles based on materials from the VII All-Russian Scientific and Practical Conference. Kursk: Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet; 2023. P. 342–353. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Мухин Иван Ефимович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель генерального конструктора по инвестиционным проектам, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Ivan E. Mukhin, Doctor of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Deputy General Designer for Investment Projects, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: okb@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0005-1583-6550

Попов Александр Николаевич, генеральный директор, АО «Авиаавтоматика» имени В. В. Тарасова», г. Курск, Российская Федерация, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Alexander N. Popov, General Director, JSC "Aviaautomatics" named after V. V. Tarasov", Kursk, Russian Federation, e-mail: plant@aviaavtomatika.ru, ORCID: 0009-0004-4020-1082

Хмелевская Алена Валентиновна, старший преподаватель кафедры космического приборостроения и систем связи, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223

Alena V. Khmelevskaya, Senior Lecturer of the Department of Space Instrumentation and Communication Systems, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: aquarel85@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0656-1223