

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 621.396.959.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-23-37

Применение бортовых радиолокационных станций дециметрового диапазона при гуманитарном разминировании

О.В. Васильев¹, П.С. Горшков¹, С.А. Зябкин¹, И.П. Шепеть²

¹ООО «НПО НаукаСофт», г. Москва, Россия

²Технологический институт сервиса (филиал ДГТУ), г. Ставрополь, Россия

Аннотация: Проблема гуманитарного разминирования на текущий момент чрезвычайно актуальна. В работе рассмотрены различные технические средства, применяемые в инженерной разведке для решения задачи обнаружения мин, и обоснована необходимость радиолокационного обеспечения гуманитарной инженерной разведки. В качестве основного информационного звена предложен авиационный радиолокационный комплекс инженерной разведки на базе радиолокационной станции бокового обзора Р-диапазона, предназначенный для размещения на беспилотных летательных аппаратах. Описаны физические принципы формирования радиолокационного изображения методом синтеза апертуры. Показано применение функции радиолокационного рельефа при описании радиоотражающих свойств поверхности и использовании принципа суперпозиций при обработке радиолокационного сигнала. Представлены основные математические выражения, применяемые при расчете радиолокационных изображений поверхности методом синтеза апертуры, заключающиеся в применении корреляционной обработки сигнала независимо по координатам путевой и наклонной дальностей. Проанализированы особенности использования дециметрового диапазона электромагнитных волн при построении радиолокационных изображений в интересах обнаружения мин на различных подстилающих поверхностях, и проведено сравнение с сантиметровым диапазоном. В качестве преимуществ продемонстрировано значительное увеличение контраста металлических объектов на фоне отражения от подстилающей поверхности и возрастание глубины проникновения в подстилающую поверхность. Также сформулированы недостатки, включающие в себя повышенные требования к стабильности полета носителя, необходимость увеличения размера апертуры для достижения сопоставимой детальности и учета миграции каналов дальности. Демонстрирована структура программного обеспечения, содержащего бортовую часть для получения радиолокационных изображений и графический интерфейс наземного автоматизированного рабочего места оператора-дешифровщика для решения задачи поиска мин при гуманитарном разминировании. Показан образец комплекса и результаты его испытаний на различных носителях, включающих беспилотные летательные аппараты классов «квадрокоптер» и вертикального взлета и посадки (VTOL).

Ключевые слова: гуманитарное разминирование, инженерная разведка, бортовая радиолокационная станция с синтезированной апертурой бокового обзора Р-диапазона, информационное обеспечение гуманитарного разминирования, беспилотный летательный аппарат.

Для цитирования: Васильев О.В. Применение бортовых радиолокационных станций дециметрового диапазона при гуманитарном разминировании / О.В. Васильев, П.С. Горшков, С.А. Зябкин, И.П. Шепеть // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 1. С. 23–37. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-23-37

The use of onboard decimeter-band radar stations for humanitarian demining

O.V. Vasiliev¹, P.S. Gorshkov¹, S.A. Zyabkin¹, I.P. Shepet²

¹NaukaSoft Scientific and Production Association, Moscow, Russia

²Technological Institute of Service (branch of DSTU), Stavropol, Russia

Abstract: Humanitarian demining is a pressing issue today. This paper examines various technical means used in engineer reconnaissance to detect mines and substantiates the need for radar support for humanitarian engineer reconnaissance. An airborne

engineer reconnaissance radar system based on a side-looking P-band radar, intended for deployment on unmanned aerial vehicles, is proposed as the main information link. The physical principles of radar image formation using aperture synthesis are described. The application of the radar relief function in describing the radio-reflective properties of a surface and the use of the superposition principle in radar signal processing are demonstrated. The main mathematical expressions used in calculating radar images of a surface using the aperture synthesis method are presented, consisting of the application of correlation signal processing independently by the coordinates of the ground and slant ranges. The features of using the decimeter range of electromagnetic waves in constructing radar images for the purpose of detecting mines on various underlying surfaces are analyzed and a comparison with the centimeter range is made. The demonstrated advantages include a significant increase in the contrast of metal objects against the background of reflection from the underlying surface and an increase in the penetration depth into the underlying surface. Disadvantages are also identified, including increased requirements for the stability of the flight of the carrier, the need to increase the size of the aperture to achieve comparable detail and take into account the migration of range channels. The software architecture is demonstrated, comprising an onboard unit for acquiring radar images and a graphical interface for a ground-based automated operator-decipherer workstation for solving the problem of mine detection during humanitarian demining. A sample system and the results of its testing on various carriers, including quadcopter and vertical takeoff and landing (VTOL) unmanned aerial vehicles, are presented.

Key words: humanitarian demining, engineer reconnaissance, airborne side-looking P-band synthetic aperture radar, information support for humanitarian demining, unmanned aerial vehicle.

For citation: Vasiliev, O.V., Gorshkov, P.S., Zybkin, S.A., Shepet', I.P. (2026). The use of onboard decimeter-band radar stations for humanitarian demining. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 29, no. 1, pp. 23–37. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-1-23-37

Введение

Гуманитарное разминирование – деятельность, выполняемая вне районов боевых действий во взаимодействии с органами местного самоуправления (территориальной администрацией), которая приводит к устранению опасностей (рисков), связанных с взрывоопасными предметами (ВОП), и включает проведение сплошного обследования местности и объектов на предмет наличия ВОП, составление карт, поиск и обезвреживание ВОП, подготовку документации после проведения разминирования¹.

Характерной особенностью современных войн является повсеместное и массовое минирование обширных территорий. Причем подавляющее большинство мин и ВОП не оснащены средствами самоликвидации. Это делает обязательным их поиск и обезвреживание. Современные способы и средства поиска мин сапером не обеспечивают разминирование в короткие сроки, а применение безэкипажных тралов невозможно при обезвреживании противотанковых мин.

В этом случае актуальной является задача проведения инженерной разведки с помощью

технических средств в интересах гуманитарного разминирования территорий. При этом в качестве технических средств предлагается целая номенклатура устройств, работа которых основана на широком спектре физических принципов.

В статье обосновано применение радиолокационной станции (РЛС) бокового обзора дециметрового диапазона длин волн с синтезированной апертурой для поиска противотанковых мин на больших площадях. Проанализированы особенности использования дециметрового диапазона, его достоинства и недостатки при ведении инженерной разведки. Представлены результаты летных экспериментальных исследований по поиску и обнаружению мин и их имитаторов на различных грунтах при установке РЛС на различных носителях. Сделан вывод о высокой эффективности РЛС данного типа при ведении инженерной разведки в интересах гуманитарного разминирования.

Технические средства, применяемые при ведении инженерной разведки

Традиционно основными инструментами поиска ВОП и разминирования являются шуп, миноискатели. Для снижения рисков для жизни саперов дополнительно могут применяться специально обученные собаки [1].

¹ Практическая деятельность (гуманитарное разминирование) [Электронный ресурс] // Министерство обороны Российской Федерации – сайт. URL: <https://mil.ru/mpc/activities/practical.htm> (дата обращения: 21.04.2025).

Попытки снижения рисков и автоматизации процесса разминирования ведутся во многих странах, пока без серьезных результатов.

Вместе с тем за последние несколько лет применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) при ведении инженерной разведки достигло широких масштабов [2]. Многие правительственные и некоммерческие учреждения, занимающиеся гуманитарным разминированием, внедряют применение БЛА в свои стандартные процедуры. Помимо сбора аэрофотоснимков потенциально опасных территорий для построения ортофотопланов местности, БЛА уже определяют приоритетность зон разминирования, а в некоторых случаях обеспечивают обнаружение мин.

На современном этапе ведения дистанционной минной разведки в качестве информационных датчиков, используемых в виде целевой нагрузки БЛА, можно указать видеокамеры видимого диапазона (ТВ-камеры), инфракрасного диапазона (ИК-камеры), сканирующие лазерные локаторы (ЛЛ), а также магнитометрические датчики (ММ). Все они отличаются как особенностями применения, так и информационными возможностями по обнаружению и классификации ВОП [3].

Так, для ТВ-камер характерна высокая скорость и детальность просмотра исследуемой поверхности. Однако существенна метеорологическая и суточная зависимость качества снимков. Кроме того, для покрытия 1 км^2 с приемлемым разрешением понадобится не менее 60 000 снимков.

Одним из перспективных направлений поиска мин является использование ИК-камер. Метод поиска основан на различиях тепловых излучений основного грунта и небольшой зоны, где расположена или зарыта мина. Однако по результатам экспериментальных исследований выявилось большое количество ложных тревог, вызванных аномалиями влажности или плотности грунта.

Лазерный локатор полезен для обнаружения воронок, свидетельствующих о нарушениях земляного покрова, но он не может обнаружить сами зарытые объекты.

Магнитометры – лучшие на данный момент инструменты для обнаружения заглубленных металлических предметов. Однако

магнитный сигнал ослабевает по мере удаления ММ от земли, и предполагает применение БЛА на малой высоте.

Одним из наиболее перспективных направлений для повышения эффективности ведения минной разведки является применение в качестве целевой нагрузки БЛА радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА) бокового обзора (БО) [4].

Физические принципы формирования радиолокационных изображений в РСА

В качестве математической модели отражающих свойств наблюдаемой поверхности используется функция радиолокационного рельефа (ФРР). Она определяет комплексную огибающую электромагнитного (ЭМ) поля \dot{e} , рассеянного от подстилающей поверхности, и численно зависит от локального коэффициента отражения поверхности и параметров сигнала по следующей формуле [5]:

$$\dot{e}(r, x) = e(r, x) \cdot \exp\{j\psi(r, x)\}, \quad (1)$$

где x и $r = \sqrt{y^2 + H^2}$ – координаты по путевой и наклонной дальностям соответственно; $e(r, x)$ и $\psi(r, x)$ – амплитудная и фазовая характеристики рассеянного электромагнитного поля (ЭМП). Исходя из [5], если не учитывать изменения отражающих свойств поверхности в интервале наблюдения $X_n = r_0 \theta_A$, где θ_A – ширина диаграммы направленности (ДН) антенны, можно ограничиться только зависимостью от пространственных координат. Формирование синтезированной апертуры антенны в РСА БО представлено на рис. 1.

На рис. 1 переменная T_3 характеризует период повторения импульсов, V_n – скорость полета носителя. Известно, что для процесса формирования и обработки радиолокационного сигнала справедлив принцип суперпозиций вследствие линейности операций [6]. А значит, обработка сигнала от каждого элементарного отражателя на наблюдаемом рельефе может производиться независимо, а отражения от сложного распределенного в пространстве объекта можно представить

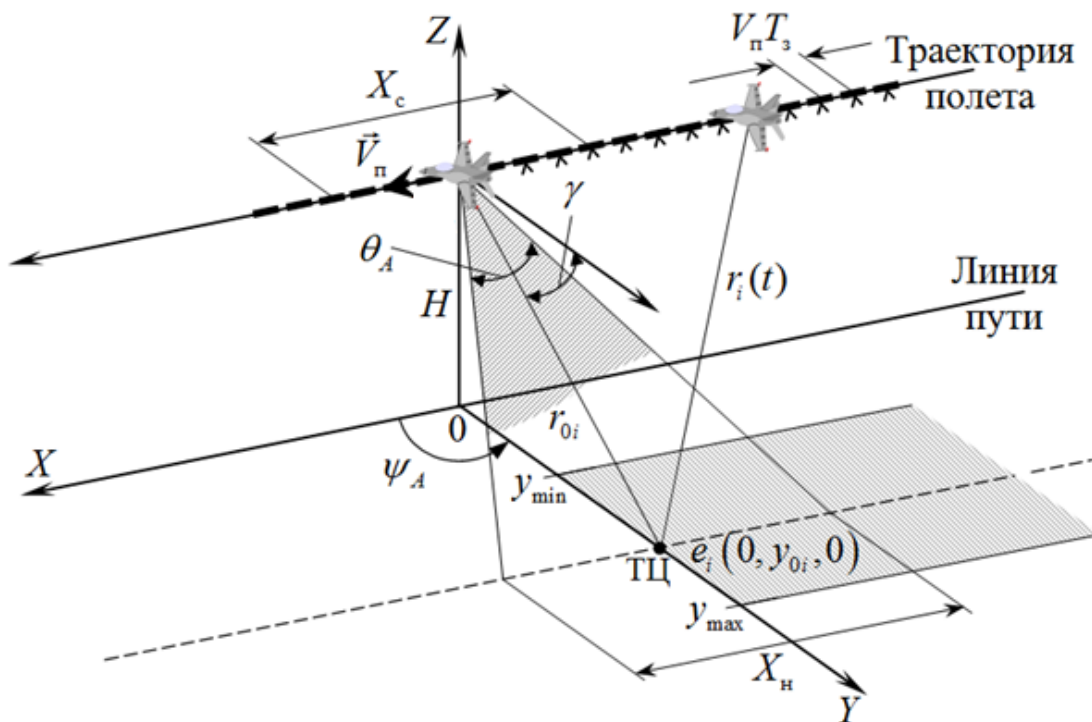


Рис. 1. Формирование синтезированной апертуры антенны при $\Psi_A = \pi/2$
Fig. 1. Formation of the synthetic aperture of the antenna at $\Psi_A = \pi/2$

в виде суммы сигналов от нескольких точечных целей на его поверхности.

Сигнал $\dot{s}(\tau, n)$ в РСА бокового обзора от i -го точечной цели на выходе приемника явля-

ется непрерывным по наклонной дальности $\tau = 2r/c$ и дискретным по путевой дальности nT_3 ($n = 0, 1, 2, \dots$), а также независимым по этим координатам [7]:

$$\dot{s}_i(\tau, n) = \dot{s}_i(\tau, nT_3) = \eta_i U_i(\tau - \tau_i) \cdot G(\tau, nT_3) \cdot \exp\{j \cdot [\psi(\tau - \tau_i) - \alpha(nT_3)^2 + \varphi_i]\}, \quad (2)$$

где τ_i – временная задержка сигнала от i -го точечной цели по наклонной дальности в периоде зондирования; $\alpha = 2\pi V_n / \lambda r_{0i}$; $\psi(\tau)$ – функция, описывающая закон фазовой модуляции зондирующих сигналов; $U_i(\tau)$ – функция, описывающая огибающую амплитуды сигнала от i -го элементарного отражателя, $G(\tau, nT_3)$ – огибающая сигнала по путевой координате x .

В случае применения зондирующего ЛЧМ-импульса сигнал от i -го элементарного отражателя, расположенного на дальности r_i , $m\Delta r \leq r_i \leq (m+1)\Delta r$, определяется по формуле

$$\dot{s}_i(m, n) = \eta_i U_i[(m - m_i)\Delta r] G(m\Delta r, (n - n_i)\Delta x) \cdot \exp\left\{-j \cdot \left[\frac{2\alpha_r}{c^2} ((m - m_i)\Delta r)^2 + \frac{2\pi}{m\Delta r \lambda} ((n - n_i)\Delta x)^2 + \varphi_i\right]\right\}, \quad (3)$$

$\Delta r = \delta r / k_r$ и $\Delta x = V_n T_3$ – интервалы дискретизации по координатам x и r ; $\alpha_r = 2\Delta\omega / \tau_u$ – крутизна ступеньки ЛЧМ; $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – девиация частоты.

Сигнал, отраженный от земной поверхности и сложных объектов $\dot{\xi}(\tau, n)$, представляет

собой суперпозицию шума и откликов от всех элементарных отражателей, попавших в диаграмму направленности:

$$\dot{\xi}(\tau, n) = \sum_i \dot{s}_i(\tau, n) + \dot{n}(\tau, n), \quad (4)$$

где $\dot{n}(\tau, n)$ – комплексный белый шум.

Как было отмечено ранее, сечения сигнала $\dot{s}_i(m, n)$ по путевой (при фиксировании координаты m) и наклонной (при фиксировании координаты n) дальностям при отсутствии миграции сигналов от точечных целей в полоске наклонной дальности на интервале синтезирования являются независимыми, а сам сигнал $\dot{s}_i(m, n)$ является разделяющимся по координатам m и n [5]. Поэтому разработку алгоритмов для этой обработки можно вести независимо по координатам m и n . Цель обработки – на основе имеющегося расширения спектра сигнала в сечениях по координатам r и x про-

вести сжатие сигналов от каждого элемента наблюдаемой поверхности, обеспечивая тем самым высокое разрешение по координатам путевой и наклонной дальностей.

Известно, что радиолокационные сигналы с расширенной базой сжимаются по длительности путем *корреляционной обработки* [8]. При этом используется согласованная с сигналом от элементарного отражателя опорная функция. Эта функция так же, как и сигнал, разделена по координатам x и r :
 $\dot{h}_0(m, n) = \dot{h}_{0r}(m) \cdot \dot{h}_{0x}(n) = \dot{s}_i^*(m, n)$
(знак «*» обозначает комплексное сопряжение):

$$\begin{aligned} \dot{e}(m, n) &= \left| \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \dot{\xi}(l-m, k-n) \dot{h}_0(l, k) \right| = \\ &= \left| \sum_{l=0}^{N-1} \left\{ \sum_{k=0}^{M-1} \dot{\xi}(l-m, k-n) \dot{h}_{0r}(l) \right\} \cdot \dot{h}_{0x}(k) \right|, \end{aligned} \quad (5)$$

где $m = 0, 1, \dots, M_r - 1$; $n = 0, 1, \dots, N_x$; M и N – число отсчетов опорных функций по наклонной $\dot{h}_{0r}(m)$ и путевой $\dot{h}_{0x}(n)$ дальностям.

Опорная функция $\dot{h}(m, n)$, согласованная по фазе с сигналом от точечного отражателя на интервале синтезирования $X_c = N_c V_n T_3 = N_c \Delta x$, описывается по формуле

$$\dot{h}(m, n) = H(m, n) \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{m \Delta r \lambda} (n \Delta x)^2 \right\}, \quad (6)$$

где $H(m, n)$ – огибающая импульсной характеристики цифрового фильтра, задаваемая на ИС: $n = 0, 1, 2, \dots, N_c - 1$.

Особенности РЛИ Р-диапазона

Эффективность обнаружения цели определяется отношением сигнал/фон q , которое равно отношению электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) объекта $\sigma_{ц}$ к ЭПР фона $\sigma_{ф}$ в элементе разрешения:

$$q = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{ф}} = \frac{\sigma_{ц}}{\sigma_0 \delta r \delta l}, \quad (7)$$

где δr и δl линейные разрешения по дальности и углу соответственно, σ_0 – удельный ЭПР поверхности.

Ориентировочные значения удельных ЭПР для различных подстилающих поверхностей для X (3 см)- и P (70 см)-диапазонов при угле падения излучения 20° представлены в табл. 1 [9]. Показаны величины для различных поляризаций, где ГГ – горизонтальная поляризация на прием и передачу, ВВ – вертикальная поляризация на прием и передачу.

Как видно из таблицы, при переходе от сантиметрового к дециметровому диапазону происходит резкое изменение прежде всего функций отражения подстилающей поверхности. Так, в диапазоне $\lambda = 70$ см среднее значение удельной ЭПР σ_0 уменьшается на 20...30 дБ, что приводит к увеличению радиолокационного контраста объектов относительно фона.

Также из выражения (7) очевидно, что максимальная эффективность обнаружения достигается при соответствии размеров элемента разрешения РСА БО $\delta r, \delta l$ линейным размерам объекта (цели) на поверхности по координатам y и x соответственно. Высокое разрешение по наклонной дальности (координата y) достигается применением широкополосных сигналов, а по направлению путевой скорости (координата x) – длительными интервалами накопления траекторного сигнала.

Таблица 1
Table 1

Ориентировочные значения удельных ЭПР для типичных поверхностей
Approximate RCS values for typical surfaces

Тип земной поверхности	Удельная ЭПР σ_0 , дБ		
	$\lambda = 3,0$ см		$\lambda = 70,0$ см
	ГГ	ВВ	ГГ и ВВ
Море, волнение 2 балла	-38	-28	-45
Море, волнение 6 баллов	-30	-25	-45
ВПП	-32	-24	-58
Степь, зима, снег	-17	-17	-55
Степь, лето, трава	-15	-15	-53
Пустыня, камни, песок	-15	-17	-40
Лес	-14	-15	-30

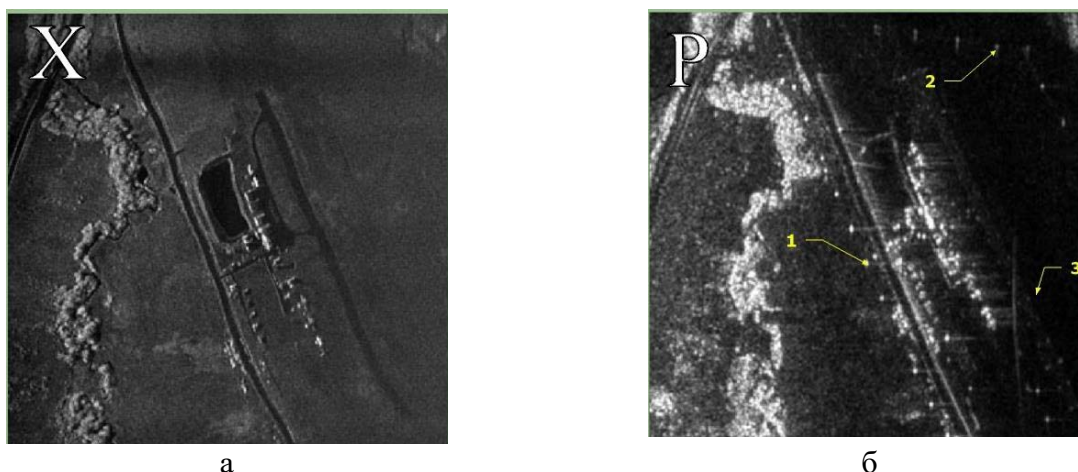


Рис. 2. РЛИ участка с дорогой, прудом, аэродромом малой авиации:
a – в *X*-диапазоне; *б* – в *P*-диапазоне
Fig. 2. Radar image of a section with a road, a pond, and a small aircraft airfield:
a – in the *X*-band; *б* – in the *P*-band

На рис. 2 представлены радиолокационные изображения (РЛИ), полученные при использовании двухдиапазонной интегрированной бортовой РСА БО [10, 11]. Высота полета носителя (самолет Ан-2) – 800 м, дальность до центра РЛИ – 2 000 м. На рис. 2, *a* на РЛИ *X*-диапазона (длина волны $\lambda = 3$ см) наблюдается аэродром малой авиации с инфраструктурой, автомобильной дорогой и прудом. На рис. 2, *б* на РЛИ *P*-диапазона (длина волны $\lambda = 70$ см) ярко проявляются фонарные столбы и ров вдоль дороги, от-

дельные строения, технические средства, самолеты (отмечены соответствующими маркерами 1–3 на рис. 2, *б*).

Особенности применения *P*-диапазона, большинство из которых проявляются на рис. 2:

- значительно (на 20...30 дБ) увеличивается контраст металлических объектов на фоне отражения от подстилающей поверхности;
- начинают играть роль резонансные явления;

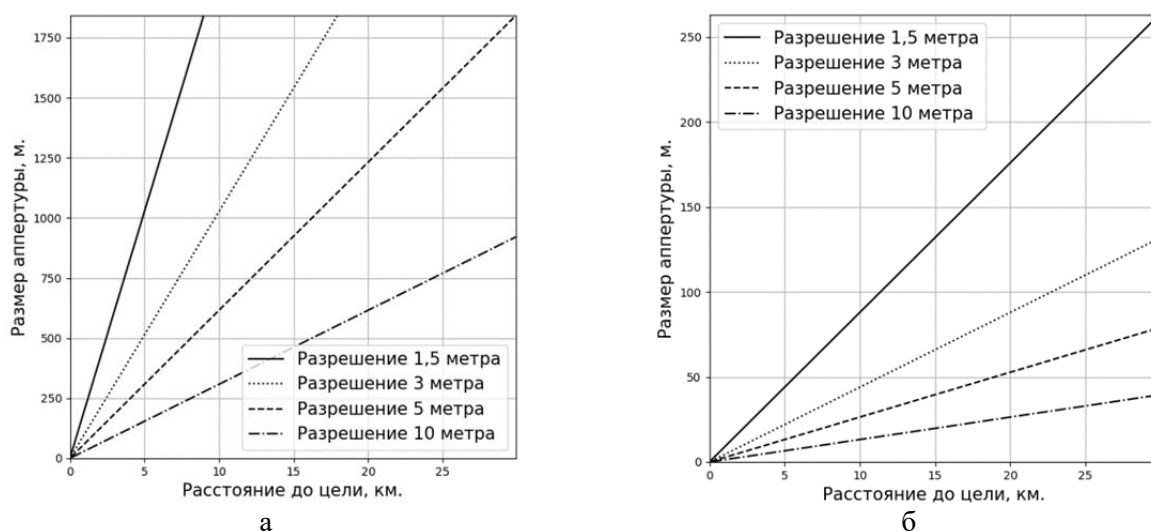


Рис. 3. Семейство кривых X_c от r_0 для различных δl : a – для $\lambda = 70$ см, b – для $\lambda = 3$ см
Fig. 3. Family of curves X_c from r_0 for different δl : a – for $\lambda = 70$ cm, b – for $\lambda = 3$ cm

- обеспечивается большая глубина проникновения в подстилающую поверхность по сравнению с сантиметровым диапазоном.

Вместе с тем при использовании РСА БО P -диапазона возникают объективные трудности в формировании РЛИ.

Во-первых, относительно низкая несущая частота не позволяет использовать сигналы с шириной спектра более 100 МГц (20...25 % от несущей). При этом предельная разрешающая способность по наклонной дальности δr составляет 1,5 м.

Во-вторых, большая длина волны для достижения высокой разрешающей способности по азимуту δl (соизмеримой δr) требует большего размера синтезированной апертуры, а значит, большую длительность интервалов накопления траекторного сигнала при одинаковых скоростях полета носителя [12]. Зависимости размера апертуры X_c от расстояния до цели r_0 для различных разрешающих способностей по азимуту для двух диапазонов частот представлены на рис. 3.

Так, для $\delta l = 1,5$ м, $r_0 = 1\ 000$ м, $\lambda = 0,7$ м интервал синтезирования составит более 200 м. Для достижения той же детальности РЛИ в X -диапазоне интервал синтезирования не превышает 9 м.

В-третьих, условие согласованной по линейке дальности обработки накопленного

траекторного сигнала выполняется в случае отсутствия миграции отсчетов сигнала от каждого элементарного отражателя по полоскам дальности [13]. Для этого на интервале синтезирования $T_c = X_c/V_{\text{п}}$ требуется удовлетворение следующего неравенства:

$$\Delta r_i(t) = r_i(t) - r_{0k} \leq \delta r, \quad (8)$$

где r_{0k} – траверзная наклонная дальность до i -й полоски дальности; $\Delta r_i(t)$ – приращение наклонной дальности до i -го элементарного отражателя на интервале синтезирования T_c . С учетом равенства $\delta r = \delta l$ имеем неравенство

$$r_{0k} \leq \frac{8\delta l^3}{\lambda^2}, \quad (9)$$

из которого следует, что миграция сигнала по каналам дальности для принятых значений начинается с наклонной дальности более 60 м (для X -диапазона 30 000 м), то есть в P -диапазоне практически всегда.

В-четвертых, случайные отклонения фазы траекторного сигнала приводят к расширению радиолокационных откликов от точечных отражателей в РЛИ [6, 12]. Это может привести как к искажению изображений от распределенных целей, так и к некорректному определению малоразмерных целей.



Рис. 4. Структурная схема алгоритма формирования РЛИ
Fig. 4. Structural diagram of the radar image formation algorithm

Все перечисленные трудности в реальных системах решаются применением различных компромиссов, например в виде использования математической компенсации миграции каналов дальности при обработке сигналов или необходимости получения и учета информации от датчиков бортовой микронавигации для компенсации траекторных нестабильностей. Все это приводит к существенному усложнению алгоритмов обработки траекторных сигналов.

Структура алгоритмического обеспечения РСА БО для формирования РЛИ

Исходя из информации, представленной ранее, в общем виде можно представить алгоритм формирования РЛИ (рис. 4).

Сначала на вход подается радиолокационный сигнал, из которого подготавливается радиоголограмма (РГГ) принятого комплекс-

ного сигнала. С учетом (5) целесообразно производить сжатие сигнала по дальности непосредственно в РСА БО. Производится компенсация траекторных нестабильностей РГГ и миграции каналов дальности. Далее производится двумерное прямое преобразование Фурье для получения спектра РГГ. Затем выполняется прямое преобразование Фурье двумерной опорной функции для получения спектра опоры. Спектры опорной функции и РГГ перемножаются. Опорная функция вычисляется для заданной дальности для компенсации фазы точек на этой дальности. Двумерное обратное преобразование Фурье перемноженных спектров выполняется для преобразования данных во временную область. В результате получают искомые данные – радиолокационное изображение [14, 15].

На рис. 5 представлена структурная схема бортового радиолокационного комплекса инженерной разведки (БРЛК ИР) «Археолог-И», разработанного в инициа-

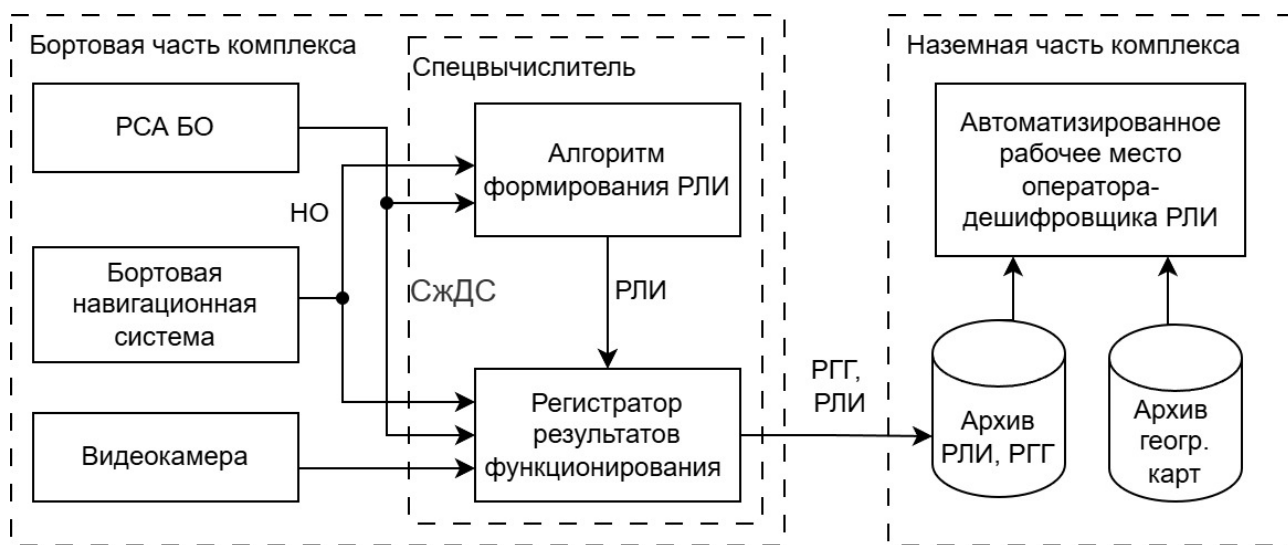


Рис. 5. Структурная схема БРЛК ИР «Археолог-И»
Fig. 5. Structural diagram of the airborne radar reconnaissance complex “Arkheolog-I”

тивном порядке творческим коллективом ООО «НПО НаукаСофт».

Бортовая часть комплекса состоит из спецвычислителя, бортовой навигационной системы, РСА БО *P*-диапазона. Навигационные определения (НО) применяются для компенсации траекторных нестабильностей в радиолокационных голограммах, состоящих из сжатого по дальности радиосигнала (СЖДС). Все результаты функционирования комплекса, такие как принятые РГГ, НО, полученные РЛИ сохраняются во внутреннюю память спецвычислителя.

Наземная часть комплекса состоит из базы данных, содержащей архивы полученных РГГ, радиолокационных изображений и географических карт. Географические карты применяются для координатной привязки полученных РЛИ к местности. Хранение РГГ для каждого РЛИ позволяет повторно произвести операции получения изображений с уточненными параметрами, к примеру, произвести точную фокусировку РЛИ в определенном участке интереса. Внешний вид интерфейса автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора-дешифровщика для БРЛК ИР «Археолог-И» представлен на рис. 6.

АРМ оператора-дешифровщика решает следующие задачи:

1) прием от СПО первичной обработки и отображение РЛИ;

2) прием и отображение навигационных данных;

3) предварительная обработка РЛИ;

4) геометрическая коррекция и трансформирование РЛИ;

5) привязка РЛИ к цифровой карте местности [16];

6) дешифрирование РЛИ в части обнаружения, распознавания и определение параметров объектов интереса [17];

7) архивирования данных для повторного доступа к ним;

8) формирование сообщений потребителям.

Результаты экспериментальных наблюдений

Ниже представлены экспериментальные материалы, описывающие особенности применения РСА БО *P*-диапазона в составе комплекса инженерной разведки при решении задач гуманитарного разминирования.

На рис. 7, а представлен внешний вид АРЛК ИР «Археолог», размещенного на носителе – БЛА среднего класса типа «квадрокоптер», а на рис. 7, б – РСА БО *P*-диапазона «Линза».

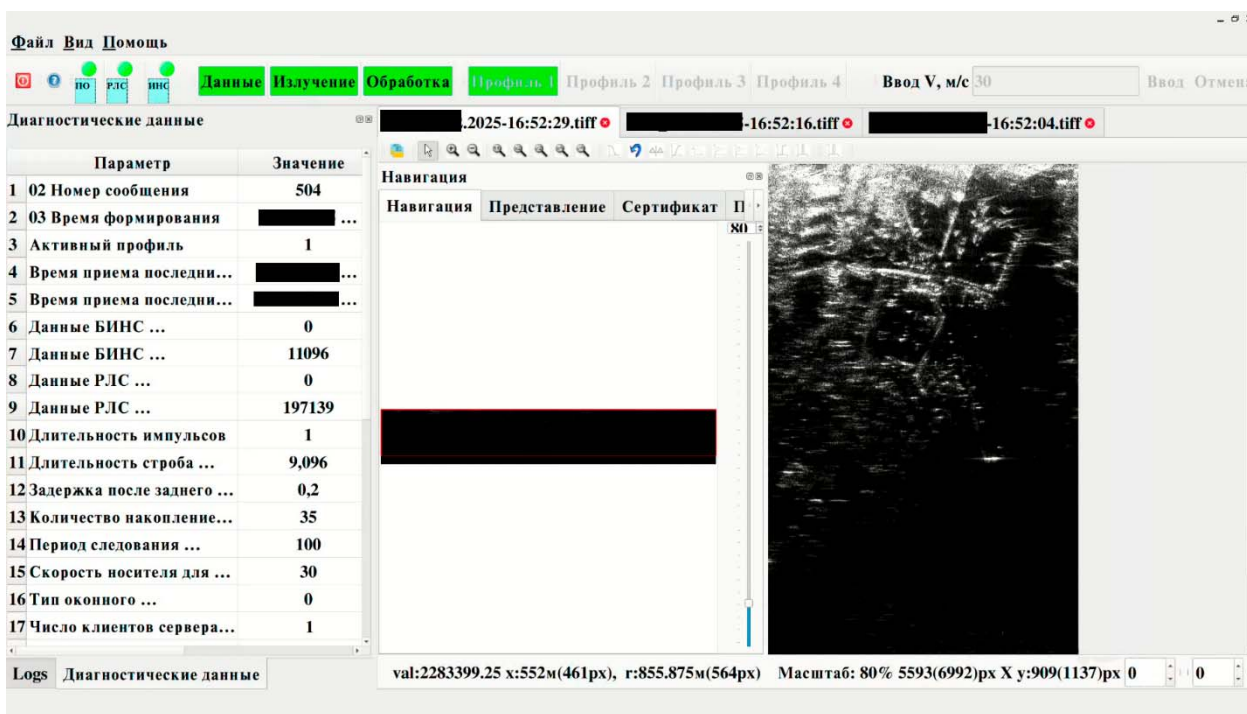


Рис. 6. Интерфейс АРМ оператора-дешифровщика
Fig. 6. Interface of the decoder operator's automated workstation



а



б

Рис. 7. а – АРЛК ВР «Археолог», б – бортовая РЛС Р-диапазона «Линза», размеры 43 × 38 × 7 см, вес до 9 кг
Fig. 7. а – airborne radar reconnaissance complex “Arkheolog”, б – airborne P-band radar “Linza”, dimensions 43×38×27 cm, weight up to 9 kg

На РЛИ *P*-диапазона в оттенках серого (рис. 8, б) и в 3D-представлении (рис. 8, в) наблюдаются имитаторы мин (рис. 8, а) (три металлических миски диаметром до 30 см) и ВОП (два обрезка металлической водопроводной трубы длиной 35 см). Высота полета носителя составляла до 300 м, наклонная дальность до объектов – менее 600 м. Несмотря на относительную равномерность подстилающей поверхности на РЛИ наблю-

даются пятна, возникающие в результате случайного суммирования отраженных сигналов от элементарных участков поверхности и называемые «спекл-структурой».

Ни рис. 9, а представлен вариант размещения БРЛК ИР на БЛА типа *VTOL*. Полетное задание предполагало полет по прямоугольному периметру на высоте до 300 м со скоростью до 100 км/ч и наклонным удалением от центра установки мишеней до 400 м.

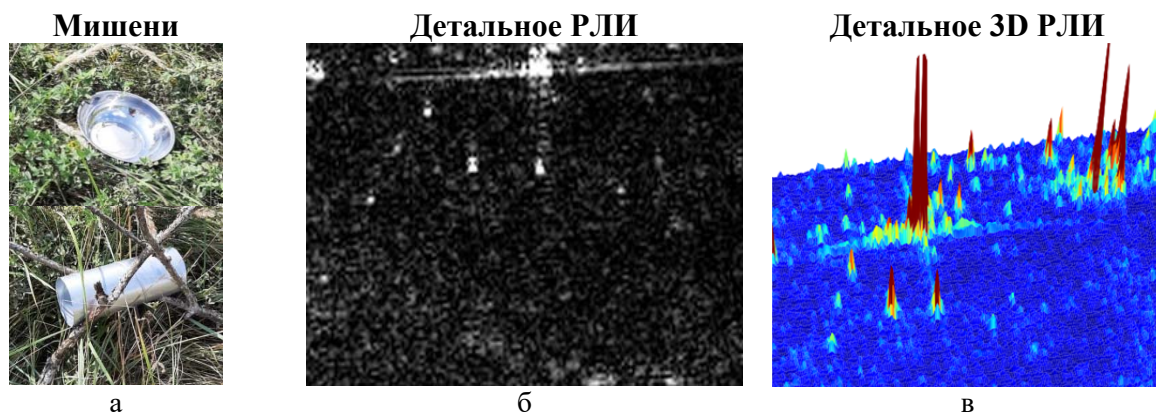


Рис. 8. РЛИ сухой степи летом с имитаторами мин
Fig. 8. Radar image of dry steppe in summer with mine simulators



Рис. 9. Летный эксперимент с использованием БЛА типа VTOL
Fig. 9. Flight experiment using a VTOL UAV



Рис. 10. Мишени и схема их размещения
Fig. 10. Targets and their placement diagram

Коррективы в маршрут внес сильный боковой ветер (до 15 м/с), который существенно изменил траекторию полета носителя, как это видно на рис. 9, б. Мишени в виде мисок, обрезков труб, а также пластмассовых учебных противотанковых мин ТМ-62 (рис. 10, а) бы-

ли расставлены через 10 м, как это указано на рис. 10, б.

На рис. 11 представлены 3D-РЛИ (рис. 11, а) и 2D-РЛИ (рис. 11, б) участка поверхности с мишенями.

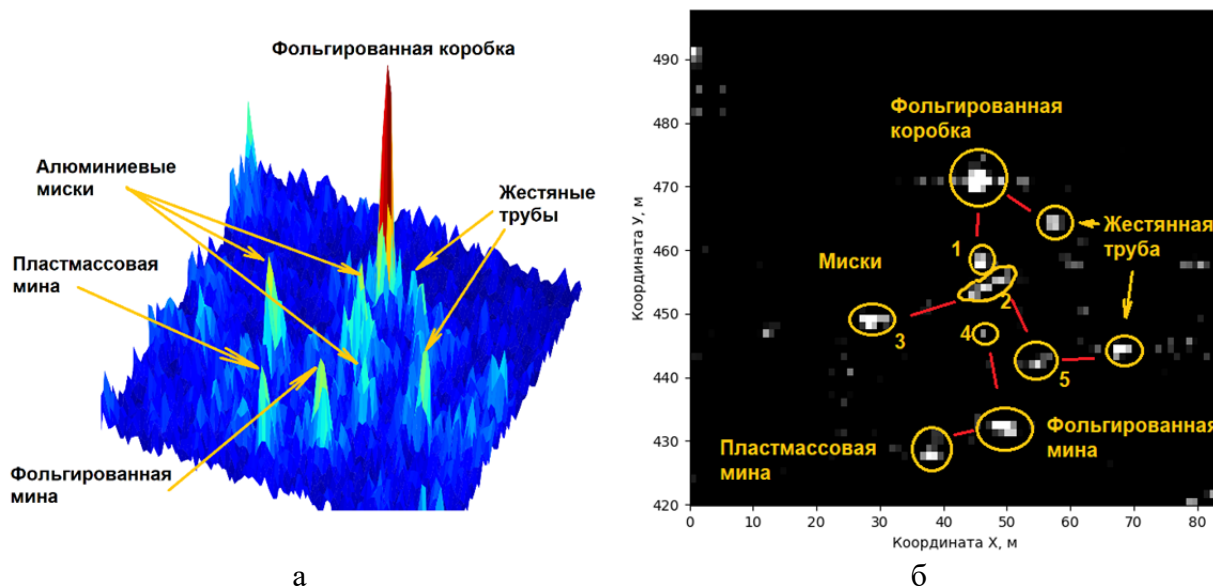


Рис. 11. РЛИ мишеней на фоне влажной степи в весенний период
Fig. 11. Radar images of targets on a humid steppe background during spring

Несмотря на существенную кривизну траектории, при обработке удалось сфокусировать отраженные сигналы и получить существенный радиолокационный контраст. Дешифрирование РЛИ позволило обнаружить и идентифицировать 10 мишеней из 12 (рис. 11, б). Максимальная амплитуда наблюдается у сигнала, отраженного от картонной коробки, обернутой фольгой. Процесс дешифрирования усложнялся относительным смещением максимумов отражений от мишеней, вызванным существенным отклонением траектории полета носителя.

Заключение

Проведенные летные экспериментальные исследования показали высокую информативность РСА БО *P*-диапазона при решении задач инженерной разведки. В качестве носителя предпочтительным вариантом выглядит БЛА типа *VTOL*, имеющий большую продольную устойчивость полета. Таким образом, задача информационного обеспечения гуманитарного разминирования может быть решена путем комплексного применения БЛА с различной целевой нагрузкой в несколько этапов.

На первом этапе с применением ТВ-камер и ЛЛ строится ортофотоплан местности,

предназначенной для разминирования. Затем строится его радиолокационное и ИК-изображение, совместная обработка которых после наложения на ортофотоплан позволит построить кадастровый реестр минного поля. Информация может быть уточнена дополнительным пролетом БЛА с ММ в качестве целевой нагрузки. Таким образом, будет обеспечиваться последовательное повышение детальности, полноты и достоверности информации: «мин нет» – «мины локализованы в указанных областях» – «кадастровый реестр минного поля с указанием координат мин».

Необходимость обработки больших объемов сложной информации требует максимальной автоматизации деятельности оператора-дешифровщика изображений. И здесь не обойтись без применения технологий искусственного интеллекта, требующих больших объемов обучающих выборок и серьезных вычислительных ресурсов.

Список литературы

1. Северов Н.В. Применение робототехники в чрезвычайных ситуациях: теория и практика: монография. Новогорск: АГЗ МЧС России, 2003. 241 с.
2. Петренко Е.С. Некоторые технические особенности решения проблемы гума-

нитарного разминирования. Системы технической охраны объектов [Электронный ресурс] // vrsystems.ru. URL: https://www.vrsystems.ru/stati/nekotore_texnicheskie_osobennosti_resheniya_problemi_gumanitarnogo_razminiroyaniya.htm (дата обращения: 21.04.2025).

3. **Baur J.** Ukraine is riddled with land mines: drones and ai can help // IEEE Spectrum. 2024. Vol. 61, no. 5. Pp. 42–49. DOI 10.1109/MSPEC.2024.10522930

4. **Горшков П.С., Васильев О.В.** Новые технические средства разведки в интересах гуманитарного разминирования // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции. Сочи, 01-10 октября 2024 г. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2024. С. 131–135.

5. **Школьный Л.А., Толстов Е.Ф., Детков А.Н. и др.** Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учеб. пособие / Под. ред. Л.А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 432 с.

6. **Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.** Радиовидение. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

7. **Толстов Е.Ф., Филончиков В.Д., Школьный Л.А.** Радиотехнические цепи и сигналы. Теория сигналов, линейных цепей и систем. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1993. 720 с.

8. **Тихонов В.И., Харисов В.Н.** Теория, методы анализа и синтеза радиоэлектронных систем. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1989. 609 с.

9. **Кондратенков Г.С., Хотляник В.А., Иванисов Б.А.** Статистические характеристики сигналов РЛС с синтезированной апертурой дециметрового диапазона // Радиотехника. 2000. № 3. С. 55–60.

10. **Васильев О.В.** Малогабаритная радиолокационная система Р-диапазона беспилотных летательных аппаратов / О.В. Васильев, А.Н. Детков, О.Н. Зинченко, А.В. Криштопов, О.В. Цветков // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 2. С. 44–54.

11. **Васильев О.В., Детков А.Н.** Малогабаритная двухдиапазонная радиолокационная станция с синтезированной и интегрированной апертурой антенны для беспилотного летательного аппарата воздушной ледовой разведки в арктическом регионе // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 7. С. 17–23.

12. **Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В.** Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 1999. Ч. 2. 220 с.

13. **Школьный Л.А.** Два способа описания оператора зондирования при синтезе системы обработки сигналов в РСА по координате путевая дальность // НММ по импульсной технике и дискретной обработке информации: сборник статей. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1981. С. 112–119.

14. **Cumming I., Wong F.** Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Artech House Publishers, 2005. 625 p.

15. **Fang J.** Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation / J. Fang, Z. Xu, B. Zhang, W. Hong, Y. Wu // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2014. Vol. 7, no. 1. Pp. 352–363. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2263309

16. **Тонких А.Н., Кузнецова В.А.** Автоматизированная геопривязка радиолокационных изображений с применением методов машинного зрения // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («РАДИО-ИНФОКОМ-2023»): сборник научных статей VII Международной научно-практической конференции. Москва, 20–24 ноября, 2023 г. М.: МИРЭА, 2023. С. 38–42.

17. Власов С.О. Решение задачи обнаружения объекта с помощью нейросетевых технологий / С.О. Власов, А.И. Гладышев, А.А. Богуславский, С.М. Соколов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2023. № 16. 27 с. DOI: 10.20948/prepr-2023-16

References

1. Severov, N.V. (2003). Application of robotics in emergency situations: theory and practice: Monograph. Novogorsk: AGZ MCHS Rossii, 241 p. (in Russian)
2. Petrenko, E.S. (2024). Some technical features of the solution to the problem of humanitarian demining. Systems of technical protection of objects. *vrsystems.ru*. Available at: https://www.vrsystems.ru/stati/nekotorie_texnicheskie_osobennosti_resheniya_problemi_gumanitarnogo_razminirovaniya.htm (accessed: 21.04.2025). (in Russian)
3. Baur, J. (2024). Ukraine is riddled with land mines: drones and ai can help. *IEEE Spectrum*, vol. 61, no. 5, pp. 42–49. DOI: 10.1109/MSPEC.2024.10522930
4. Gorshkov, P.S, Vasiliev, O.V. (2024). New technical means of reconnaissance in the interests of humanitarian demining. In: *Innovationnyye, informatsionnyye i kommunikatsionnyye tekhnologii: sbornik trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 131–135. (in Russian)
5. Shkolnyy, L.A., Tolstov, E.F., Detkov, A.N. et al. (2008). Onboard radar reconnaissance systems and decoding of radar images: Tutorial, in Shkolnyy L.A. (Ed.). Moscow: Izdatelstvo VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 432 p. (in Russian)
6. Kondratenkov, G.S., Frolov, A.Yu. (2005). Radiovision. Spaceborne Radar Earth-Observation Stations: textbook for universities, in Kondratenkov G.S. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, 368 p. (in Russian)
7. Tolstov, E.F., Filonchikov, V.D., Shkolnyy, L.A. (1993). Radio engineering circuits and signals. Theory of signals, linear circuits and systems. Moscow: Izdatelstvo VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 720 p. (in Russian)
8. Tihonov, V.I., Harisov, V.N. (1989). Theory, Methods of Analysis and Synthesis of Radio-Electronic Systems. Moscow: Izdatelstvo VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 609 p. (in Russian)
9. Kondratenkov, G.S., Hotlyannik, V.A., Ivanisov, B.A. (2000). Statistical Characteristics of Signals of Decimeter Band Synthetic Aperture Radar Stations. *Radiotekhnika*, no. 3, pp. 55–60. (in Russian)
10. Vasilyev, O.V., Detkov, A.N., Zinchenko, O.N., Krishtopov, A.V., Tsvetkov, O.E. (2016). The compact p-band UAV'S SAR. *Information-measuring and control systems*, vol. 14, no. 2, pp. 44–54. (in Russian)
11. Vasilyev, O.V., Detkov, A.N. (2018). Small-sized integrated two-band SAR for a UAV of monitoring of an ice surface in the arctic region. *Polet*, no. 7, pp. 17–23. (in Russian)
12. Neronskiy, L.B., Mikhaylov, V.F., Bragin, I.V. (1999). Microwave equipment for remote sensing of the Earth's surface and atmosphere. Radars with synthetic aperture antennas: Tutorial. Part 2. St. Petersburg: SPbGUAP, 220 p. (in Russian)
13. Shkolnyy, L.A. (1981). Two ways to describe the operator's sensing during the synthesizing of the RSA signal processing system by coordinate path range. In: *NMM po impul'snoy tekhnike i sadovoy obrabotke informatsii: sbornik statey*. Moscow: Izdatelstvo VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 112–119. (in Russian)
14. Cumming, I., Wong, F. (2005). Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation. Artech House Publishers, 625 p.
15. Fang, J., Xu, Z., Zhang, B., Hong, W., Wu, Y. (2014). Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied*

Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, no. 1, pp. 352–363. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2263309

16. **Tonkih, A.N., Kuznetsova, V.A.** (2023). Automated georeferencing of sar images using machine vision methods. In: *Aktualnyye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikatsionnykh sistem ("RADIOINFOKOM-2023")*: sbornik nauchnykh statey VII Mezhdunarodnoy nauchno-prak-

ticheskoy konferentsii. Moscow: MIREA, pp. 38–42. (in Russian)

17. **Vlasov, S.O., Glasyshev, A.I., Boguslavsky, A.A., Sokolov, S.M.** (2023). Example of the object detection problem solving using neural network technologies. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha*, no. 16, 27 p. DOI: 10.20948/prepr-2023-16 (in Russian)

Сведения об авторах

Васильев Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ООО «НПО НаукаСофт», vas_ov@mail.ru.

Горшков Павел Сергеевич, доктор технических наук, доцент, генеральный директор ООО «НПО НаукаСофт», vas_ov@mail.ru.

Зябкин Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник ООО «НПО НаукаСофт», sergezyab@gmail.com.

Шепеть Сергей Петрович, кандидат технических наук, профессор, профессор Технологического института сервиса (филиал Донского ГТУ), ship.1963@mail.ru.

Information about the authors

Oleg V. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vas_ov@mail.ru.

Pavel S. Gorshkov, Doctor of Technical Sciences, General Director of NaukaSoft Scientific and Production Association, vas_ov@mail.ru.

Sergey A. Zybkin, Candidate of Technical Sciences, Research Associate, NaukaSoft Scientific and Production Association, sergezyab@gmail.com.

Sergey P. Shepet, Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of the Technological Institute of Service (branch of the Don State Technical University), ship.1963@mail.ru.

Поступила в редакцию	08.07.2025	Received	08.07.2025
Одобрена после рецензирования	25.08.2025	Approved after reviewing	25.08.2025
Принята в печать	22.01.2026	Accepted for publication	22.01.2026