

Р.Р. Ибадов, В.П. Федосов, С.Р. Ибадов

АНАЛИЗ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ В РЕЖИМЕ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБУЖЕНИЯ ЛУЧА

Радар на основе сканирования с реальным лучом широко используется как в гражданской, так и в военной сфере. Однако трудно реализовать высокое разрешение по азимуту стационарной платформы или платформы с неравномерным движением с помощью традиционных алгоритмов обработки сигналов. Технология Доплеровского обужения луча (ДОЛ) представляет собой сочетание высокого разрешения и производительностью в реальном времени по сравнению с технологией РЛС с синтезированной апертурой (САР), которая вдоль азимутального направления использует доплеровский сдвиг между эхо-сигналами от объектов на подстилающей поверхности, вызванный движением радиолокационной платформы. К сожалению, традиционный алгоритм визуализации ДОЛ, конструирующий доплеровский фильтр с помощью БПФ, имеет низкое разрешение по азимуту и высокий уровень боковых лепестков, что ограничивает дальнейшее улучшение разрешения по азимуту. В статье исследован алгоритм построения карты подстилающей поверхности в направлении движения носителя РЛС на основе ДОЛ и проведен анализ изображения карты с помощью преобразования Фурье. Показан трехмерный вид карты подстилающей поверхности с распределением значений на изображениях. Предметом исследования являются метод и алгоритм построения карты подстилающей поверхности в режиме доплеровского обужения луча и выявление цепочных структур на основе анализа преобразования Фурье. Объектом исследования является набор тестовых изображений карты местности. Результатом исследования является разработка алгоритма построения карты с целью выявления цепочных структур на подстилающей поверхности. Новизной работы является алгоритм, позволяющий построить карту подстилающей поверхности на основе ДОЛ с учётом слепой зоны в направлении движения носителя РЛС. Полученные результаты позволяют выявлять также цепочные структуры в интересующей области. Проверена возможность оценки периодичности элементов изображения с использованием Фурье-преобразования. В результате решения сформулированных задач можно сделать следующие выводы: – разработан алгоритм построения карты подстилающей поверхности на основе ДОЛ с коррекцией изображения в направлении движения носителя РЛС; – анализ результатов проведённого исследования показал, что предложенный алгоритм позволяет выявить цепочные структуры на карте местности.

Доплеровское обужение луча; разрешение; карта местности; картографирование; преобразование Фурье; модуляция.

R.R. Ibadov, V.P. Fedosov, S.R. Ibadov

ANALYSIS OF UNDERLYING SURFACE IN IMAGE FORMATION IN DOPPLER BEAM SHARPENING MODE

Radar based on real beam scanning is widely used in both civil and military spheres. However, it is difficult to realize high azimuth resolution of a stationary platform or a platform with non-uniform motion using conventional signal processing algorithms. Doppler beam sharpening (DBS) technology is a combination of high resolution and real-time performance compared to Synthetic Aperture Radar (SAR) technology, which uses the Doppler shift between echoes from objects on the underlying surface along the azimuth direction, caused by the movement of the radar platform. Unfortunately, the traditional DBS imaging algorithm, which constructs a Doppler filter using an FFT, has a low azimuth resolution and a high level of side lobes, which limits further improvement in azimuth resolution. In the article, the algorithm for constructing a map of the underlying surface in the direction of movement of the radar carrier based on the DBS was studied and the map image was analyzed using the Fourier transform. A three-dimensional view of the map of the underlying surface is shown with the distribution of values in the images. The subject of the study is the method and algorithm for constructing a map of the underlying surface in the Doppler beam sharpening mode and identifying chain structures based on the analysis of the Fourier transform. The object of the study is

a set of test images of the terrain map. The result of the study is the development of an algorithm for constructing a map in order to identify chain structures on the underlying surface. The novelty of the work is an algorithm that allows you to build a map of the underlying surface based on the DBS, taking into account the blind zone in the direction of movement of the radar carrier. The results obtained also make it possible to reveal chain structures in the region of interest. The possibility of estimating the periodicity of image elements using the Fourier transform has been tested. As a result of solving the tasks set, the following conclusions can be drawn: – an algorithm has been developed for constructing a map of the underlying surface based on DBS with image correction in the direction of movement of the radar carrier. – analysis of the results of the study showed that the proposed algorithm allows you to identify chain structures on the map.

Doppler beam sharpening; resolution; local map; mapping; Fourier transform; modulation.

Введение. В сложной оперативной обстановке городской инфраструктуры беспилотным летательным аппаратам необходимо контролировать его ориентацию относительно объектов на подстилающей поверхности [1–5]. Отображение наземных объектов и обнаружение медленно движущихся целей – две важные функции бортовой РЛС управления класса "воздух-земля". Технология доплеровского облучения луча (ДОЛ) [6] может заставить бортовой радар управления реализовать быстрое изображение земли с небольшими вычислениями в условиях широкого сканирования антенны. Для наземной индикации движущихся целей [7] во избежание конкуренции дальних слабых целей с сильными помехами ближнего действия, вызванными неоднозначностью дальности, обычно используется низкая частота повторения импульсов в режиме «воздух-земля», для бортовой РЛС управления, антенна работает в режиме переднего сектора обзора. Из-за расширения и смещения луча отражения от главного лепестка при движении платформы наземные медленно движущиеся цели легко попадают в помехи от главного лепестка в доплеровской области. Помехи от главного лепестка становятся основным фактором, ограничивающим работу радара. В этом случае даже антенна со сверхмалыми боковыми лепестками не может быть эффективной для улучшения характеристик обнаружения системы обработки, такой как каскадная пространственно-временная обработка (CST). Для решения этой проблемы проводятся обширные исследования по подавлению помех бортовой подвижной платформы [8].

Обработка радиолокационного сигнала – это метод, используемый для извлечения информации из эхо-сигналов от объектов на поверхности. Эхо-сигналы, принимаемые приемником РЛС, обрабатываются в цифровом формате. Радары широко классифицируются на основе разрешающей способности [9].

Разрешение можно определить как способность радара различать близко расположенные цели. Разрешение по дальности и разрешение по азимуту определяются для обнаружения близко расположенных целей по дальности и углу соответственно. Точное разрешение диапазона может быть получено методом сжатия импульсов. Сжатие импульсов включает использование длинного импульса с внутренней модуляцией для получения высокой энергии, что в конечном итоге дает разрешение короткого импульса [10].

Метод повышения резкости доплеровского луча (ДОЛ) может быть выражен как комбинированный продукт теории антенн и цифровой обработки сигналов [11]. Разрешение по азимуту улучшается методом ДОЛ. В методе повышения резкости доплеровского луча полученные сигналы сжимаются импульсами для получения желаемого разрешения [12–14]. Согласованные фильтры представляют собой линейные сети, которые используются для увеличения пикового отношения сигнал-шум (SNR) сигнала, что, в свою очередь, увеличивает вероятность обнаружения цели. ДОЛ использует преимущество поступательного движения радара для создания эквивалентной большой антенны [15]. Увеличение виртуальной длины антенны обеспечивает увеличение разрешающей способности в угловом направлении.

Концепция радара с синтезированной апертурой (САР) была впервые представлена в 1951 году Карлом Уайли из Goodyear. САР был определен как радар, который может анализировать возвращение эхо-сигнала во временную область. Поэтому он был назван методом повышения резкости доплеровского луча (ДОЛ). Позже ДОЛ использовался для анализа эхо-сигналов, обработанных доплеровским методом, для получения лучшего разрешения по азимуту, чем разрешение, создаваемое только реальным лучом. При движении платформы, на которой установлен радар, создается синтетическая большая апертура антенны. Это, в свою очередь, улучшает разрешение в азимутальной области. Каждый раз, когда передается импульс, радар занимает позицию немного дальше по траектории полета. Направив маленькую антенну в сторону и суммируя отражения от последовательных импульсов, можно синтезировать очень длинную линейную решетку бокового обзора [16].

В современных бортовых радиолокационных системах метод доплеровского обужения луча используется в качестве режима для получения грубого изображения целевой области наряду с высоким разрешением по дальности и в азимутальном секторе относительно направления движения РЛС.

Воздушная радиолокационная съемка с высоким разрешением по углу в области переднего сектора обзора является незаменимой технологией для получения информации об объектах на подстилающей поверхности [17]. В практических приложениях широко применяется метод доплеровского обужения луча, обладающий преимуществом визуализации в реальном времени. Разрешение по азимуту в диапазоне визуализации ДОЛ в основном ограничено временем пребывания луча в одном из направлений [18–19]. Основываясь на подходах к оценке спектра со сверхвысоким разрешением, визуализация ДОЛ может эффективно улучшить разрешение в поперечном диапазоне, тем не менее, высокая вычислительная сложность приводит к потере преимущества визуализации в реальном времени [20].

В данной статье разработали метод для демонстрации алгоритма повышения направленности доплеровского луча в переднем секторе обзора.

Цели и задачи. Целью исследований является повышение точности получения данных о подстилающей поверхности, которая заключается в обужении слепой зоны и выявлении цепочных структур на поверхности.

Задачи исследования:

- ◆ Разработать метод построения карты местности на основе ДОЛ.
- ◆ Провести анализ эффективности предложенного алгоритма.

Основная часть. Метод визуализации ДОЛ использует доплеровский сдвиг, вызванный относительным движением между радаром и объектами на поверхности, для улучшения разрешения по угловым координатам [22]. Упрощенная конфигурация системы переднего радиолокационного обзора поверхности показана на рис. 1:

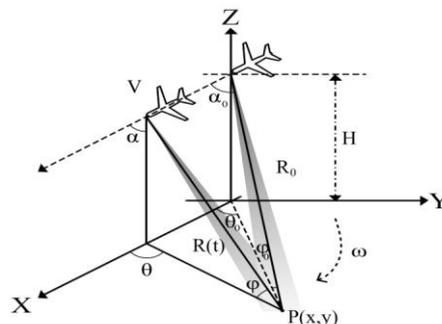


Рис. 1. Геометрическая модель ДОЛ

На рис. 1 самолет движется вдоль направления оси X с фиксированной скоростью V на высоте H . Луч радара сканирует область изображения по часовой стрелке с угловой скоростью ω . R_0 представляет собой начальное расстояние между радаром самолета и целью, расположенной в точке $P(x, y)$. В момент времени t дальность может быть выражена как:

$$R(x, y, t) = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2 - 2R_0 \cos \theta_0 \cos \varphi_0 vt}, \quad (1)$$

где φ_0 и θ_0 – обозначают начальный угол наклона и поперечный угол между направлением максимума характеристики направленности бортовой сканирующей РЛС и объектом $P(x, y)$. По геометрической конструкции может быть выведено: $\cos \alpha_0 = \cos \varphi_0 \cos \theta_0$.

Поскольку время сканирования луча относительно направления на точечный объект невелико, дальность может быть предварительно обработана на основе следующего выражения, с помощью разложения в ряд Тейлора [21]:

$$R(x, y, t) \cong R_0 - \cos \theta_0 \cos \varphi_0 vt. \quad (2)$$

Радиолокационная система передает сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) для достижения высокого разрешения по дальности с помощью метода сжатия импульсов. Для области изображения Ω , эхо-сигнал после процесса преобразования с понижением частоты может быть выражен как:

$$y(\tau, t) = \sum_{(\tau, t) \in \Omega} \sigma(\tau, t) A(\theta) \text{rect} \left[\frac{\tau - \tau_d}{T_r} \right] \cdot \exp(j\pi K_r [\tau - \tau_d]^2) \cdot \exp(-j2\pi f_0 \tau_d), \quad (3)$$

где τ и t – быстрое и медленное время; σ – представляет собой коэффициент обратного рассеяния целей; $A(\theta)$ – функция модуляции диаграммы направленности антенны; τ_d и T_r – обозначают задержку эхо-сигнала и длительность передаваемого сигнала.

Затем после процесса сжатия импульса выполняется метод коррекции смещения диапазона, чтобы реализовать высокое разрешение по диапазону, и эхо-сигнал может быть преобразован как [23]:

$$y(\tau, t) = \sum_{(\tau, t) \in \Omega} \sigma(\tau, t) A(\theta) \sin c \left(B \left[\tau - \frac{2R_0}{c} \right] \right) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi f_0}{c} R(t) \right), \quad (4)$$

где B и c – ширина полосы пропускания и скорость света. Анализ эхо-сигнала в дискретной форме может быть выражен следующим образом:

$$y(m, n) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k(m) \exp(jnf_k) + e(m, n), \quad (5)$$

где $y(m, n)$ – эхо-сигнал n -го азимута и m -го интервала дальности; $m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$. K – точки дискретизации в доплеровской частотной области; $f_k = \frac{2\pi k}{K}$ – нормированная доплеровская частота. $k = 0, \dots, K-1$; $\sigma_k(m)$ – m -й интервал дальности означает коэффициент отражения в k -ой точке доплеровской частоты; $e(m, n)$ – аддитивный гауссовский белый шум.

Для объекта, расположенного по азимуту θ и углу наклона φ , доплеровская центральная частота равна

$$f_d = \frac{2v \cos \theta \cos \varphi}{\lambda}, \quad (6)$$

где λ – длина волны излучаемого сигнала.

Можно обнаружить, что градиент центральной доплеровской частоты на различных азимутах способствует формированию изображения карты по азимуту. Далее приводится результат моделирования предложенным алгоритмом на тестовых изображениях подстилающей поверхности.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 представлен результат моделирования карты подстилающей поверхности в режиме ДОЛ [24].

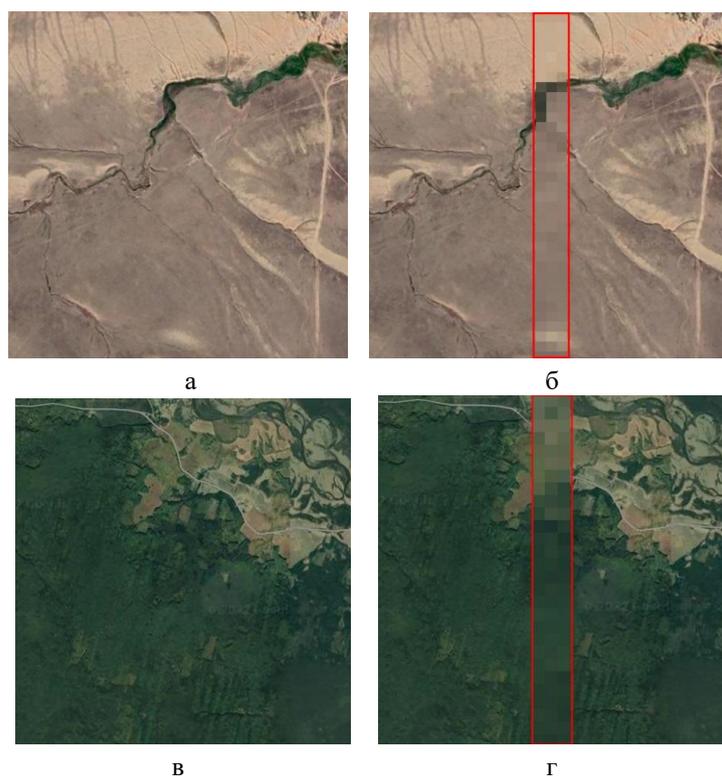


Рис. 2. Результат моделирования карты подстилающей поверхности: а и в – оригинальные изображения; б и г – формирование в режиме ДОЛ с выделенной красными линиями слепой зоной

Из анализа изображений на рис. 2,б,г можно рассмотреть потери в формировании изображения карты подстилающей поверхности в направлении движения носителя РЛС [25].

На рис. 3 представлен прологарифмированный спектр изображения со смещенным центром: изменены расположения низкой и высокой частот изменения изображения вдоль осе координат, а логарифмирование применено для удобства отображения результатов исследования [26].

Линии на рис. 3,а показывают повторяющиеся объекты (элементы разрешения) на изображении карты поверхности (см. рис 3,г). Углы наклона линий на Фурье-образе изображения карты (см. рис 3,е) соответствуют направлениям дорог на поверхности. Фурье-образ имеет элементы сходства со спектром гармонического колебания.

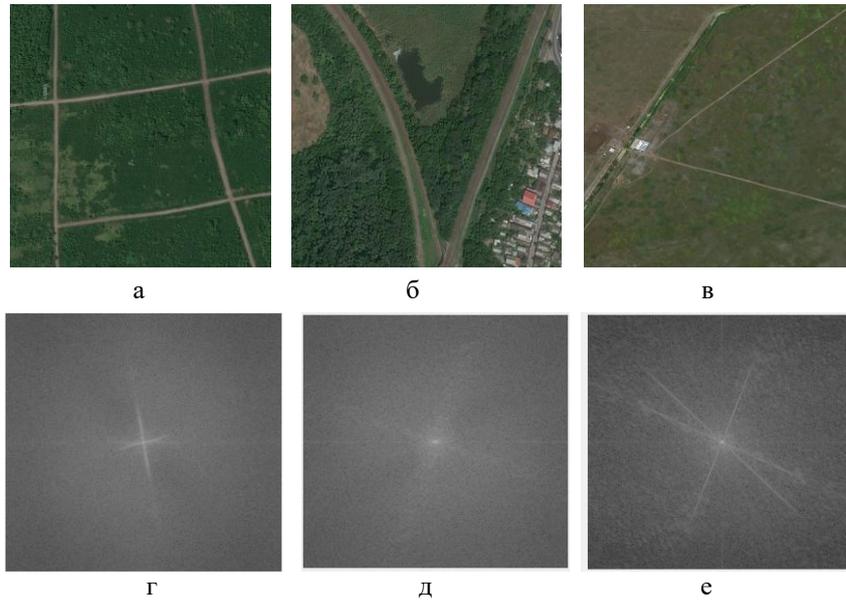


Рис. 3. Результат прологарифмированного спектра изображения карты подстилающей поверхности: а, б, в – оригинальные изображения; г, д, е – Фурье-образ оригинальных изображений

Трехмерный вид изображений карты подстилающей поверхности представлены на рис. 4 для прологарифмированного и не прологарифмированного спектра изображения карты подстилающей поверхности изображений соответственно на рис. 2,б,г.

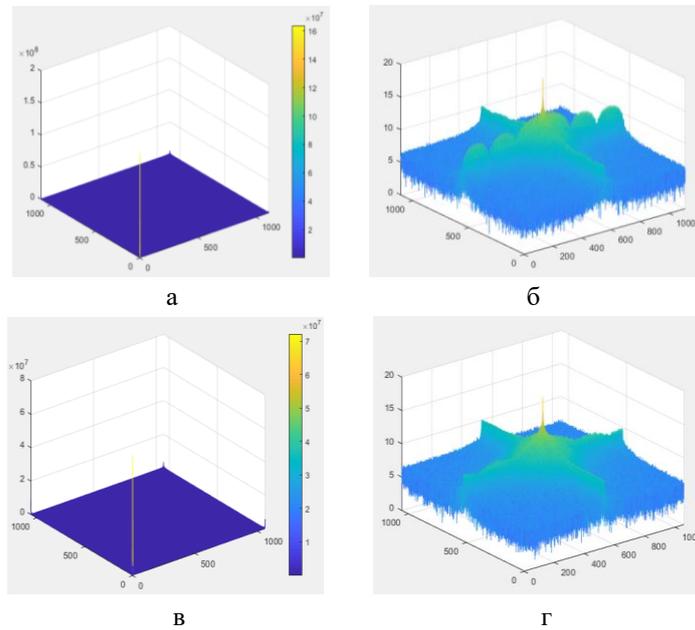


Рис. 4. Результат трехмерного вида изображений карты подстилающей поверхности спектра изображения карты подстилающей поверхности: а, в – для не прологарифмированных массивов; б, г – для прологарифмированных массивов

Графики на рис. 4,а,в показывают 3D-изображение не прологарифмированной карты подстилающей поверхности рис. 2,б,г. Графики на рис. 4,б,г показывают 3D-изображения прологарифмированной карты подстилающей поверхности рис. 2,б,г. На графиках видно что чем выше значения тем ближе к желтому, чем меньше, тем ближе к синему.

Заключение. В работе представлен алгоритм моделирования карты подстилающей поверхности в направлении движения носителя РЛС на основе ДОЛ и выявление периодичности объектов на изображениях с помощью преобразования Фурье. Представлены результаты Фурье образа прологарифмированного и не прологарифмированного спектра изображения со смещенным центром. В ходе экспериментов выявлено, что Фурье-образ имеет элементы сходства со спектром гармонического колебания.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-29-01389 от 21.12.2021 г. в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Белый Ю.И., Таганцев В.А.* Радиолокационный прицельный комплекс Н001: модернизация продолжается // Радиотехника. – 2005. – №. 2. – С. 28-29.
2. *Матвеев А.М.* Построение модели и предобработка изображения подстилающей поверхности для радиолокационных систем с доплеровским обужением луча на основе информации, получаемой о поверхности в оптическом диапазоне. – М.: «Электронный журнал», 2004.
3. *Величкин А.И., Карпов О.А., Таланцев В.В., Толстов Е.Ф.* Повышение разрешающей способности авиационной РЛС при наблюдении вперед // Радиотехника. – 1998. – № 12. – С. 12.
4. *Козаев А.А., Колтышев Е.Е., Фролов А.Ю., Янковский В.Т.* Алгоритм доплеровского измерения скорости в РЛС с синтезированной апертурой // Радиотехника. – 2005. – №. 6. – С. 13-16.
5. *Антипов В.Н., Суляков Д.Ю.* Картографирование и обнаружение наземных движущихся целей // Радиотехника. – 2005. – №. 6. – С. 10-12.
6. *Витязев В.В., Колодько Г.Н., Витязев С.В.* Способы и алгоритмы формирования радиолокационного изображения в режиме доплеровского обужения луча // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – №. 3. – С. 31-41.
7. *Витязев В.В., Витязев С.В.* Методы синтеза узкополосного адаптивного КИХ-фильтра на основе многоскоростной обработки // Цифровая обработка сигналов. – 2007. – №. 4. – С. 13.
8. *Qi L., Zheng M., Yu W., et al.* Super-resolution Doppler beam sharpening imaging based on an iterative adaptive approach // Remote sensing letters. – 2016. – Vol. 7, No. 3. – P. 259-268.
9. *Mao D., Zhang, Y., Kang, Y., Zhang, Y., et al.* Doppler beam sharpening imaging based on beam-recursion fiaa // IEEE Radar Conference (RadarConf). – IEEE, 2019. – P. 1-4.
10. *Xue M., Xu L., Li J.* IAA spectral estimation: fast implementation using the Gohberg–Semencul factorization // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2017. – Vol. 59, No. 7. – P. 3251-3261.
11. *Yang H., Mao, D., Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, Y., et al.* Doppler beam sharpening imaging based on fast iterative adaptive approach // IEEE Radar Conference (RadarConf). – IEEE, 2017. – P. 1419-1423.
12. *Zhang Y., Jakobsson A., Yang J.* Range-recursive IAA for scanning radar angular super-resolution // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, No. 10. – P. 1675-1679.
13. *Mao D., Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, Y., et al.* Super-resolution Doppler beam sharpening method using fast iterative adaptive approach-based spectral estimation // Journal of Applied Remote Sensing. – 2018. – Vol. 12, No. 1. – P. 015020.
14. *Huang Y., Zha, Y., Zhang, Y., et al.* Real-beam scanning radar angular super-resolution via sparse deconvolution // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. – IEEE – 2014. – P. 3081-3084.
15. *Zhang Y., Jakobsson, A., Zhang, Y., et al.* Wideband sparse reconstruction for scanning radar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 56, No. 10. – P. 6055-6068.
16. *Karlsson J., Rowe, W., Xu, L., et al.* Fast missing-data IAA with application to notched spectrum SAR // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2014. – Vol. 50, No. 2. – P. 959-971.

17. Paulus A.S., Melvin W.L., Williams D.B. Multichannel GMTI techniques to enhance integration of temporal signal energy for improved target detection // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2017. – Vol. 11, No. 3. – P. 395-403.
18. Li X., Feng D., Liu H.W., et al. Dimension-reduced space-time adaptive clutter suppression algorithm based on lower-rank approximation to weight matrix in airborne radar // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2014. – Vol. 50, No. 1. – P. 53-69.
19. Xu J., Wang, C., Liao, G., et al. Sum and difference beamforming for angle-doppler estimation with STAP-based radars // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, No. 6. – P. 2825-2837.
20. Schleher D.C. MTI and pulsed Doppler radar with MATLAB. – Artech House, 2010.
21. Li M., Wei H., Sun J., et al. Keeping sharpening ratio constant for DBS of airborne mechanic scanning radar. – 2009. – P. 497-497.
22. Fedosov V.P., Ibadov R.R., Ibadov S.R. Restoration of the Lost Area of the Underlying Surface Image Using the Saliency Map // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – IEEE, 2021. – P. 447-450.
23. Ибадов Р.Р., Федосов В.П., Ибадов С.Р. Восстановление дефектов и слепой зоны на изображениях подстилающей поверхности для бортовых радиолокационных систем картографирования на основе Доплеровского обужения луча // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №. 6 (216). – С. 41-52.
24. Ibadov R.R., Gapon N.V., Ibadov S.R., et al. Image reconstruction using the modified texture synthesis algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1029, No. 1. – P. 012117.
25. Ibadov R.R., Fedosov V.P., Ibadov S.R. The method of spatial-temporal reconstruction of dynamic images based on a geometric model with contour and texture analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1029, No. 1. – P. 012093.
26. Ибадов Р.Р., Федосов В.П., Воронин В.В., Ибадов С.Р. Исследование метода синтеза текстур изображений поверхности земли на основе нейронной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – №. 5. – С. 16-25.

REFERENCES

1. Bely Yu.I., Tagantsev V.A. Radiolokatsionnyy pritsel'nyy kompleks N001: modernizatsiya prodolzhaetsya [Radar sighting system N001: modernization continues], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2005, No. 2, pp. 28-29.
2. Matveev A.M. Postroenie modeli i predobrabotka izobrazheniya podstilayushchey poverkhnosti dlya radiolokatsionnykh sistem s doplerovskim obuzheniem luchy na osnove informatsii, poluchaemoy o poverkhnosti v opticheskom diapazone [Construction of a model and pre-processing of the image of the underlying surface for radar systems with Doppler beam narrowing based on information obtained about the surface in the optical range]. Moscow: «Elektronnyy zhurnal», 2004.
3. Velichkin A.I., Karpov O.A., Talantsev V.V., Tolstov E.F. Povyshenie razreshayushchey sposobnosti aviatsionnoy RLS pri nablyudenii vpered [Improving the resolution of an aviation radar during forward observation], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1998, No. 12, pp. 12.
4. Kozaev A.A., Koltyshev E.E., Frolov A.Yu., Yankovskiy V.T. Algoritm doplerovskogo izmereniya skorosti v RLS s sintezirovannoy aperturoy [Algorithm for Doppler velocity measurement in synthetic aperture radars], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2005, No. 6, pp. 13-16.
5. Antipov V.N., Suslyakov D.Yu. Kartografirovaniye i obnaruzheniye nazemnykh dvizhushchikhsya tseley [Mapping and detection of ground moving targets], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2005, No. 6, pp. 10-12.
6. Vityazev V.V., Kolod'ko G.N., Vityazev S.V. Sposoby i algoritmy formirovaniya radiolokatsionnogo izobrazheniya v rezhime doplerovskogo obuzheniya luchy [Methods and algorithms for the formation of a radar image in the mode of Doppler beam narrowing], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2006, No. 3, pp. 31-41.
7. Vityazev V.V., Vityazev S.V. Metody sinteza uzkopolosnogo adaptivnogo KIKh-fil'tra na osnove mnogoskorostnoy obrabotki [Synthesis methods for a narrow-band adaptive FIR filter based on multi-rate processing], *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing], 2007, No. 4, pp. 13.
8. Qi L., Zheng M., Yu W., et al. Super-resolution Doppler beam sharpening imaging based on an iterative adaptive approach, *Remote sensing letters*, 2016, Vol. 7, No. 3, pp. 259-268.

9. Mao D., Zhang, Y., Kang, Y., Zhang, Y., et al. Doppler beam sharpening imaging based on beam-recursion fias, *IEEE Radar Conference (RadarConf)*. IEEE, 2019, pp. 1-4.
10. Xue M., Xu L., Li J. IAA spectral estimation: fast implementation using the Gohberg–Semencul factorization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, Vol. 59, No. 7, pp. 3251-3261.
11. Yang H., Mao, D., Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, Y., et al. Doppler beam sharpening imaging based on fast iterative adaptive approach, *IEEE Radar Conference (RadarConf)*. IEEE, 2017, pp. 1419-1423.
12. Zhang Y., Jakobsson A., Yang J. Range-recursive IAA for scanning radar angular super-resolution, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, Vol. 14, No. 10, pp. 1675-1679.
13. Mao D., Zhang, Y., Zhang, Y., Huang, Y., et al. Super-resolution Doppler beam sharpening method using fast iterative adaptive approach-based spectral estimation, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, Vol. 12, No. 1, pp. 015020.
14. Huang Y., Zha, Y., Zhang, Y., et al. Real-beam scanning radar angular super-resolution via sparse deconvolution, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2014, pp. 3081-3084.
15. Zhang Y., Jakobsson, A., Zhang, Y., et al. Wideband sparse reconstruction for scanning radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, Vol. 56, No. 10, pp. 6055-6068.
16. Karlsson J., Rowe, W., Xu, L., et al. Fast missing-data IAA with application to notched spectrum SAR, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, Vol. 50, No. 2, pp. 959-971.
17. Paulus A.S., Melvin W.L., Williams D.B. Multichannel GMTI techniques to enhance integration of temporal signal energy for improved target detection, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, Vol. 11, No. 3, pp. 395-403.
18. Li X., Feng D., Liu H.W., et al. Dimension-reduced space-time adaptive clutter suppression algorithm based on lower-rank approximation to weight matrix in airborne radar, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, Vol. 50, No. 1, pp. 53-69.
19. Xu J., Wang, C., Liao, G., et al. Sum and difference beamforming for angle-doppler estimation with STAP-based radars, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, Vol. 52, No. 6, pp. 2825-2837.
20. Schleher D.C. MTI and pulsed Doppler radar with MATLAB. Artech House, 2010.
21. Li M., Wei H., Sun J., et al. Keeping sharpening ratio constant for DBS of airborne mechanic scanning radar, 2009, pp. 497-497.
22. Fedosov V.P., Ibadov R.R., Ibadov S.R. Restoration of the Lost Area of the Underlying Surface Image Using the Saliency Map, *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. IEEE, 2021, pp. 447-450.
23. Ibadov R.R., Fedosov V.P., Ibadov S.R. Vosstanovlenie defektov i slepoy zony na izobrazheniyakh podstilayushchey poverkhnosti dlya bortovykh radiolokatsionnykh sistem kartografirovaniya na osnove Doplerovskogo obuzheniya lucha [Restoration of defects and a blind zone on images of the underlying surface for airborne radar mapping systems based on Doppler beam sharpening], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2020, No. 6 (216), pp. 41-52.
24. Ibadov R.R., Gapon N.V., Ibadov S.R., et al. Image reconstruction using the modified texture synthesis algorithm, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1029, No. 1, pp. 012117.
25. Ibadov R.R., Fedosov V.P., Ibadov S. R. The method of spatial-temporal reconstruction of dynamic images based on a geometric model with contour and texture analysis, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, Vol. 1029, No. 1, pp. 012093.
26. Ibadov R.R., Fedosov V.P., Voronin V.V., Ibadov S.R. Issledovanie metoda sinteza tekstur izobrazheniy poverkhnosti zemli na osnove neyronnoy seti [Study of the method for synthesizing textures of images of the earth's surface based on a neural network], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2019, No. 5, pp. 16-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.И. Марчук.

