УДК 621.396.969:004.932 Научная статья

https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-9-64-72

Алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях на основе многомерных структурно-семантических описаний

К. И. Титов, С. Н. Гусев✉, Р. Ю. Лазутин

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

✉ gusev_sn@mail.ru

Аннотация. Представлен алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях на основе сопоставления их многомерных структурно-семантических описаний, которые включают пространственные, геометрические и амплитудно-яркостные характеристики целей. Описан комплексный подход к исследованию сложных сосредоточенных объектов, при котором вся совокупность указанных разнородных признаков представлена в виде единого информационного дескриптора цели. Обоснована система частных показателей подобия объектов, а также предложен математический аппарат расчета вероятности распознавания как интегрального показателя.

Цель работы: повышение эффективности поиска и распознавание объектов на радиолокационных изображениях за счет их сравнительного анализа с эталонами по набору информативных признаков.

Материалы и методы: в ходе проведения исследований применялась статистическая теория радиолокации, теория пространственно-временной обработки сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой, математический аппарат и методы теории вероятностей. Для оценки результатов исследований использовались методы компьютерного моделирования, позволившие подтвердить возможность использования дескрипторов для сравнительного анализа объектов на радиолокационных изображениях и их распознавания на основе многомерных структурно-семантических описаний.

Результаты работы: новый методический подход и алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях, перечень информативных признаков для анализа степени подобия двух объектов, а также математический аппарат расчета частных показателей подобия объектов и интегрального показателя вероятности распознавания.

Заключение: предложенный алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях на основе сравнения многомерных структурно-семантических описаний позволяет анализировать степень подобия объектов и оценивать вероятность их распознавания, что, в свою очередь, предоставляет возможность проведения автоматизированного поиска интересующих объектов.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, распознавание образов, степень подобия, информационный дескриптор, вероятность распознавания

Для цитирования: Титов К. И., Гусев С. Н., Лазутин Р. Ю. Алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях на основе многомерных структурно-семантических описаний // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 9. С. 64–72. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-64-72.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Algorithm for Object Search and Recognition in Synthetic Aperture Radar Images Based on Multidimensional Structural and Semantic Descriptions

K. I. Titov, S. N. Gusev✉, R. Y. Lasutin

A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

✉ gusev_sn@mail.ru

Abstract. An object search and recognition algorithm for synthetic aperture radar (SAR) images based on the matching of their multidimensional structural and semantic descriptions, which encompass spatial, geometric,

 © К. И. Титов, С. Н. Гусев, Р. Ю. Лазутин, 2026

and amplitude-brightness characteristics of the targets, is presented in this article. A comprehensive approach to the characterization of complex discrete targets is described, wherein the entire set of these heterogeneous features is represented as a single informative target descriptor. A system of partial object similarity metrics is substantiated, and a mathematical framework for recognition probability estimation as an integral performance metric is proposed.

Purpose of the work: The research aims to increase the efficiency of object search and recognition in radar images through their comparative analysis with reference templates using a set of informative features.

Materials and methods: The study utilizes the statistical theory of radar, the theory of space-time signal processing in SAR, and the mathematical framework and methods of probability theory. To evaluate the research findings, computer modeling methods were applied. These methods confirmed the feasibility of using descriptors for the comparative analysis of objects in radar images and their recognition based on multidimensional structural and semantic descriptions.

Results: The research results include a new methodological approach and an algorithm for object search and recognition in radar images, a list of informative features for analyzing the degree of similarity between two objects, a mathematical framework for calculating partial object similarity metrics and the integral recognition probability metric.

Conclusion: The proposed algorithm for object search and recognition in radar images based on the comparison of multidimensional structural and semantic descriptions allows for analyzing the similarity degree of objects and estimating their recognition probability. This, in turn, enables the automated search for objects of interest.

Keywords: synthetic aperture radar, pattern recognition, similarity degree, informative descriptor, recognition probability

For citation: Titov K. I., Gusev S. N., Lasutin R. Y. Algorithm for Object Search and Recognition in Synthetic Aperture Radar Images Based on Multidimensional Structural and Semantic Descriptions // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 9. P. 64–72. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-9-64-72.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Введение. В современных системах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) критически важной научно-технической проблемой является автоматизация поиска, селекции и классификации сложных сосредоточенных объектов по радиолокационным изображениям (РЛИ). Опираясь на фундаментальные положения теории распознавания, в качестве ключевого критерия эффективности обработки таких данных следует рассматривать математические вероятности правильного обнаружения и последующего распознавания объектов [1]. На практике эта задача решается преимущественно с помощью традиционных подходов, которые основаны на выделении локальных признаков и расчете усредненных параметров (габаритных размеров, взаимной корреляции или среднеквадратического отклонения (СКО) яркости совмещаемых фрагментов двух РЛИ).

Однако с улучшением технических характеристик современных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) использование подобных стандартных алгоритмов становится неэффективным. При переходе к РЛИ с разрешением до 0.15 м возможностей базовых подходов уже не хватает. Традиционные алгоритмы либо перегружают систему лишними признаками, либо пропускают объекты, а также сильно зависят от ракурса съемки и спекл-шума. Они способны выделить лишь общие очертания объектов, тогда как анализ высокодетальных РЛИ требует детального анализа геометрической формы и семантической структуры объектов [2].

Для решения данной проблемы перспективен переход к описанию исследуемых объектов через их многомерные структурно-семантические свойства, отражающие внутреннюю структуру объекта, характерную для конкретной цели. Традиционно эта процедура основывается на сопоставлении выделенных фрагментов РЛИ с априорно известными эталонами. Тем не менее, на данный момент в литературе отсутствует формализованный математический аппарат, позволяющий количественно оценить степень подобия объекта и эталона для расчета результирующей вероятности правильного распознавания.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки высокоэффективного алгоритма поиска и распознавания объектов на РЛИ на основе их многомерных структурно-семантических описаний.

Формирование системы информативных признаков для поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях. Задачу распознавания и последующей классификации

сложных сосредоточенных объектов на РЛИ целесообразно рассматривать как процесс сопоставления признаков обнаруженного объекта с соответствующим ему эталонным описанием из базы данных [3]. Следовательно, для формирования обоснованного критерия подобия объектов на РЛИ на первом этапе необходимо определить оптимальный перечень и состав информативных признаков. Данные показатели должны комплексно описывать исследуемый объект относительно следующих характеристик:

– геометрических (детальные пространственные характеристики, описывающие не просто габаритные размеры, но и конфигурацию контуров, а также взаимное расположение локальных центров рассеяния);

– яркостных (распределение интенсивности (эффективной площади рассеяния (ЭПР)) локальных центров рассеяния объекта по элементам разрешения, отражающее его отражательные свойства);

– структурных (статистические характеристики распределения яркости, позволяющие дифференцировать внутреннюю текстуру отражений).

Указанные характеристики объекта целесообразно представить в виде многомерного структурно-семантического описания – дескриптора объекта. Переход к использованию дескрипторов позволяет сформировать инвариантный к внешним условиям перечень признаков, объективно и полно характеризующий форму, пространственную конфигурацию и отражательную способность сложной цели.

Анализ работ, посвященных математическому моделированию процессов формирования РЛИ [4], позволяет сделать вывод, что сложный сосредоточенный объект можно представить в виде совокупности геометрически распределенных локальных центров рассеяния. Это справедливо при условии, что суперпозиция эхо-сигналов от данных центров идентична реальному траекторному сигналу, отраженному от описываемой цели.

Данное обстоятельство позволяет формализовать описание объекта в виде паспорта эталонного описания типовой цели (ПЭО ТЦ) [4], содержащего упорядоченные массивы значений пространственных координат и ЭПР локальных центров рассеяния, имеющих вид

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & \cdots & I_{1M} \\ I_{21} & I_{ij} & \cdots & I_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N1} & I_{N2} & \cdots & I_{NM} \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где I_{ij} – значение интенсивности (амплитуды цифрового отсчета) *ij*-го центра рассеяния объекта на РЛИ; N и M – геометрические размеры анализируемого фрагмента РЛИ по дальности и азимуту соответственно.

Однако в реальных условиях радиолокационной съемки данные значения для одного и того же центра рассеяния в составе сложного объекта будут носить случайный характер, так как представляют собой результат обработки траекторного сигнала, зависящего от многих различных факторов – интерференции отраженных сигналов, спекл-шума, особенностей системы цифровой обработки сигналов РСА и др. Вследствие этого значения интенсивности отметок на РЛИ в рамках дескриптора должны представляться в виде вектора случайных величин с теоретическим законом распределения, описывающим характер размещения центров рассеяния исследуемого объекта относительно его эталонного паспорта [5].

В соответствии с теорией распознавания образов, в качестве основного частного показателя эффективности классификации используется вероятность распознавания $P_{\text{р}}$, характеризующая достоверность отнесения обнаруженного радиолокационного портрета к соответствующему эталонному классу (ПЭО ТЦ). С математической точки зрения данный показатель отражает меру выявления критических различий между исследуемым объектом и его эталоном. Аналитическое выражение для расчета вероятности распознавания имеет вид

$$P_{\text{р}} = P_{\text{обн}} \Phi\left(Z_{\text{ф}}\right), \qquad (2)$$

где $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения объекта на РЛИ; $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-0.5x^2} dx$ – интеграл вероятностей (функция Лапласа); $Z_{\text{ф}}$ – обобщенный параметр распознавания объекта, количественно характеризующий степень подобия двух сложных сосредоточенных объектов на РЛИ с точки зрения статистического анализа сопоставляемых дескрипторов и их семантических признаков.

Таким образом, оценивание степени соответствия обнаруженных целей эталонам основывается на расчете вероятности распознавания объекта, которая напрямую характеризует степень его подобия ПЭО ТЦ. Для расчета данной вероятности предложен комплексный подход, позволяющий всесторонне описать энергетические, семантиче-

ские и количественные характеристики подобия сравниваемых на РЛИ объектов.

При этом взаимная независимость рассчитываемых коэффициентов, характеризующих качественно различные признаки подобия, позволяет, с одной стороны, получить объективную многокритериальную оценку, а с другой – исключить возможность получения ошибочно высокого значения параметра распознавания $Z_{\text{ф}}$ для тех объектов, которые «похожи» на эталон лишь по какому-то одному изолированному признаку.

В качестве энергетического критерия в (2) выступает вероятность обнаружения $P_{\text{обн}}$, служащая обязательным условием реализуемости самой задачи распознавания объектов и, соответственно, дальнейшего анализа их степени подобия. Данный показатель определяет минимально необходимый уровень информативности РЛИ, при котором результаты последующего семантического сравнения могут считаться достоверными. Как известно [6], вероятность обнаружения объекта на РЛИ зависит от отношения сигнал/фон и в общем виде определяется выражением

$$P_{\text{обн}} = P_{\text{л. т}}^{1/(1+q)},$$

где $P_{\text{л. т}}$ – вероятность ложной тревоги; q – отношение сигнал/фон на РЛИ.

В контексте оценивания степени подобия объектов на РЛИ важную роль играют граничные условия применимости математического аппарата. Так, при критически низких значениях вероятности обнаружения исследуемого объекта и эталона (в частности, при $P_{\text{обн}} \le 0.1$) дальнейший расчет коэффициента подобия теряет практический смысл. В подобных условиях объекты становятся едва различимы на фоне шумов, их ключевые структурные элементы полностью «размываются» спекл-шумом, локальные максимумы матрицы интенсивностей могут дать случайными артефактами радиолокационной съемки, а пространственная геометрия центров рассеяния необратимо искажается. С другой стороны, даже при незначительном снижении вероятности обнаружения радиолокационные портреты объектов на РЛИ подвергаются деформациям, что закономерно снижает результирующее значение вероятности распознавания.

Расчет вероятности распознавания в (2) базируется на строгом сопоставлении двух объектов по критерию подобия геометрической формы и полноты воспроизведения их доминантных центров рассеяния. При этом процедура распознавания проводится на основе семантического анализа дескрипторов, характеризующих доминантные центры рассеяния сравниваемых объектов, которые адаптивно выбираются из общей матрицы интенсивностей (1).

Таким образом, задача распознавания сложного сосредоточенного объекта на РЛИ по дескрипторам формулируется как классическая статистическая задача проверки двух альтернативных гипотез:

– гипотеза H_1 – наблюдаемая выборка дескрипторов порождена исключительно фоновым шумом или случайными флуктуациями сигнала;

– гипотеза H_2 – наблюдаемая выборка дескрипторов соответствует эталону из базы данных ПЭО ТЦ.

В такой постановке количественной мерой, определяющей вероятность распознавания, выступает безразмерный параметр обнаружения $Z_{\text{ф}}$, связывающий между собой теоретические вероятностные распределения для указанных гипотез. Схематично взаимосвязь составляющих параметра распознавания представлена на рис. 1.

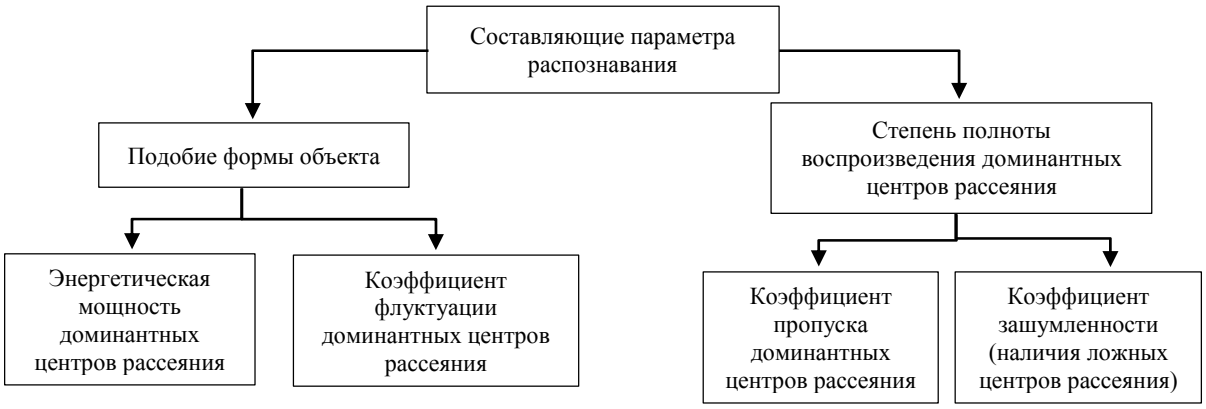


Рис. 1. Составляющие параметра распознавания
Fig. 1. Components of the recognition parameter

В соответствии с разработанным комплексным подходом обобщенный параметр распознавания определяется выражением

$$Z_{\text{ф}} = \psi_{\text{ц. р}} + K_{\text{фл}} + K_{\text{д. пр}} + K_{\text{д. л}}, \qquad (3)$$

где $\psi_{\text{ц. р}}$ – энергетическая мощность доминантных центров рассеяния; $K_{\text{фл}}$ – коэффициент флуктуации доминантных центров рассеяния; $K_{\text{д. пр}}$ – коэффициент пропуска доминантных центров рассеяния; $K_{\text{д. л}}$ – коэффициент зашумленности РЛИ (наличия ложных центров рассеяния).

Независимый расчет каждого из входящих в (3) коэффициентов позволяет детально оценить качественно различные физические признаки подобия сложных сосредоточенных объектов, что исключает получение ложноположительного высокого значения вероятности распознавания для объектов, имеющих случайное сходство лишь по одному из параметров.

Алгоритм расчета вероятности распознавания объектов на радиолокационных изображениях. На первом этапе осуществляется поиск на РЛИ интересующего объекта, его обрезка и приведение к виду (1). Далее в соответствии с выбранным пороговым значением формируются дескрипторы, представляющие собой векторы значений координат и интенсивности доминантных центров рассеяния объекта. При этом данная процедура проводится как для исследуемого объекта, так и для эталона. Таким образом, в качестве исходных данных используются множества дескрипторов эталона $\left(Q_{\text{эт}}\right)$ и исследуемого объекта $\left(Q_{\text{и}}\right)$ вида

$$Q_{\text{эт}} = \left\{ q_{\text{эт}\,k} \middle|\; q_{\text{эт}\,k} = \left(x_k, r_k, I_k\right),\; k = 1, \ldots, K \right\};$$
$$Q_{\text{и}} = \left\{ q_{\text{и}\,k} \middle|\; q_{\text{и}\,k} = \left(x_l, r_l, I_l\right),\; l = 1, \ldots, L \right\},$$

где $q_{\text{эт}\,k}$ и $q_{\text{и}\,k}$ – дескрипторы доминантных центров рассеяния эталона и исследуемого объекта соответственно; x_k, r_k – координаты k-го доминантного центра рассеяния эталона; x_l, r_l – координаты l-го доминантного центра рассеяния исследуемого объекта; K и L – количество доминантных центров рассеяния эталона и исследуемых объектов соответственно.

На втором этапе осуществляется расчет энергетической мощности доминантных центров рассеяния $\left(\psi_{\text{ц. р}}\right)$, который показывает, насколько точно взаимное расположение доминантных центров рассеяния на исследуемом РЛИ объекта соответствует их расположению на эталоне.

В предложенном методе для расчета данного параметра используется расстояние Махаланобиса. В задачах обработки РЛИ оно обладает существенным преимуществом перед классическим евклидовым расстоянием. Это обусловлено тем, что в евклидовой метрике предполагается, что пространство однородно и изотропно, однако в радиолокации разрешение по дальности и по азимуту часто различается, а само изображение подвержено перспективным искажениям, в результате чего объект на РЛИ может быть равномерно растянут или сжат вдоль одной из осей координат.

При определении энергетической мощности доминантных центров рассеяния рассчитывается полная матрица расстояний Махаланобиса для каждого сочетания выявленных доминантных центров рассеянии сравниваемых объектов, определяемых выражением

$$D_M^2\left(k,l\right) = \Delta\mathbf{X}^{\text{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\cdot\Delta\mathbf{X},$$

где D_M^2 – квадрат расстояния Махаланобиса между парой доминантных центров рассеяния; $\Delta\mathbf{X}$ – вектор пространственной невязки; $\boldsymbol{\Sigma}^{-1}$ – ковариационная матрица.

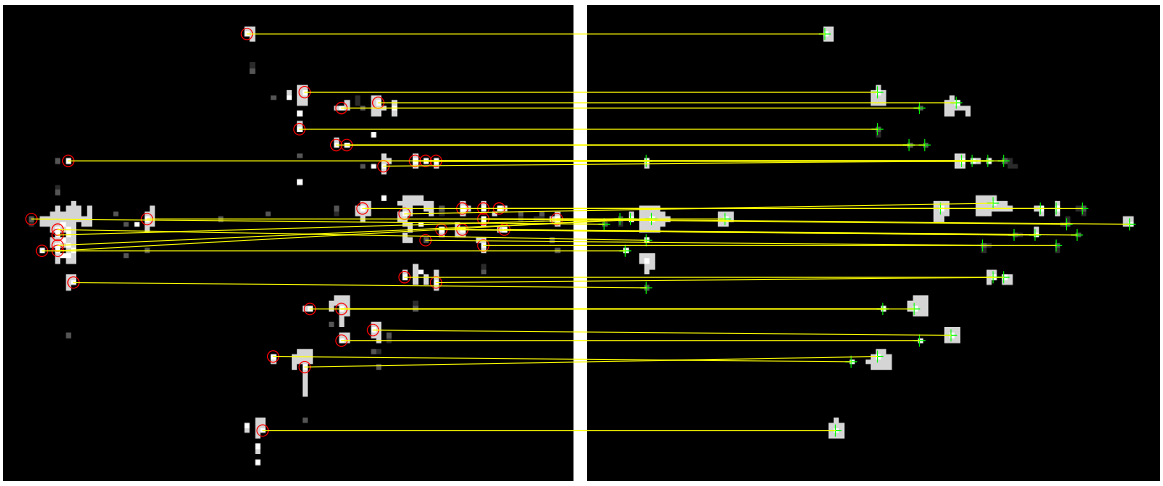
Учитывая, что ошибки оценок координат и интенсивности независимы, ковариационная матрица содержит только значения СКО по координатам азимута и дальности $\left(\sigma_x \text{ и } \sigma_r\right)$ и значения СКО интенсивности $\left(\sigma_I\right)$, расстояния Махаланобиса для k-го и l-го доминантных центров рассеяния определяются следующим образом:

$$D_M^2\left(k,l\right) = \frac{\left(x_k - x_l\right)^2}{\sigma_x^2} + \frac{\left(r_k - r_l\right)^2}{\sigma_r^2} + \frac{\left(I_k - I_l\right)^2}{\sigma_I^2}.$$

Из сформированной матрицы формируются пары дескрипторов, удовлетворяющие пороговому уровню, после чего осуществляется расчет энергетической мощности доминантных центров рассеяния по выражению

$$\psi_{\text{ц. р}} = 3\left[1 - \exp\left(-k_{\text{кр}}\sum_{s=1}^{N_{\text{п}}} E_s\right)\right],$$

где $k_{\text{кр}}$ – коэффициент крутизны функции, учитывающей количество доминантных центров рассеяния необходимых для распознавания объекта; $N_{\text{п}}$ – количество пар совпавших дескрипторов;



а *б*

Рис. 2. РЛИ с совпавшими доминантными центрами рассеяния: *а* – РЛИ № 1; *б* – РЛИ № 2
Fig. 2. Radar images with matching dominant scattering centers: *а* – radar image no. 1; *б* – radar image no. 2

$$E_s = \frac{1 - \exp\left(-0.5 D_M^2(s)\right)}{2}$$

– энергетическая оценка s-й пары дескрипторов.

На рис. 2 представлены два сравниваемых РЛИ самолета, на которых схематично обозначены совпавшие доминантные центры рассеяния, дескрипторы которых удовлетворяют заданному пороговому значению.

В связи с тем, что для сопоставления пар дескрипторов был введен некоторый порог, совпавшие доминантные центры исследуемого объекта и эталона могут флуктуировать друг относительно друга. Однако реальный объект представляет собой жесткий геометрический каркас, где все элементы и, соответственно, доминантные центры рассеяния сохраняют свое взаимное расположение.

С одной стороны, на РЛИ данные искажения могут быть вызваны шумами, незначительным отличием ракурса съемки и особенностями синтезирования апертуры. С другой стороны, это может свидетельствовать о различии объектов. Поэтому для количественной оценки степени нелинейной деформации геометрической структуры объекта в (3) был введен коэффициент флуктуации доминантных центров рассеяния $\left(K_{\text{фл}}\right)$, который снижает значение параметра распознавания пропорционально степени искажения взаимного расположения доминантных центров рассеяния.

Определение степени описанных геометрических искажений основано на применении алгоритма RANSAC (Random Sample Consensus), который позволяет оценить сдвиг и деформацию «каркаса» объекта. Это осуществляется при помощи итерационного поиска модели объекта по минимальному набору доминантных центров рассеяния с последующей проверкой модели на остальных дескрипторах. Выходным параметром алгоритма становится вектор глобального сдвига $\mathbf{S}_{\text{сдв}}$, представляющий собой смещение и искажение объекта.

Дальнейшее определение коэффициента $K_{\text{фл}}$ основано на расчете СКО остаточных невязок положения доминантных центров рассеяния сравниваемых объектов относительно вычисленного алгоритмом RANSAC глобального вектора сдвига:

$$K_{\text{фл}} = \frac{\sigma_{\text{сдв}}}{2r_{\text{д}}},$$

где $r_{\text{д}}$ – допустимый порог флуктуации доминантных центров рассеяния; $\sigma_{\text{сдв}}$ – СКО остаточных невязок положения доминантных центров рассеяния исследуемого и эталонного объектов, определяемое следующим образом:

$$\sigma_{\text{сдв}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{п}}} \sum_{s=1}^{N_{\text{п}}} \left\| S_{\text{эт}\,s} - \left(S_{\text{и}\,s} - \mathbf{S}_{\text{сдв}}\right) \right\|^2},$$

где $S_{\text{и}\,s}$ – координаты s-го доминантного центра рассеяния исследуемого объекта; $S_{\text{эт}\,s}$ – координаты s-го доминантного центра рассеяния эталонного объекта.

Коэффициенты $\psi_{\text{ц.р}}$ и $K_{\text{фл}}$ рассчитываются на основе дескрипторов объектов, что позволяет

подтвердить сходство формы даже в том случае, когда общая мощность отраженного сигнала отличается от эталонной, но сохранено взаимное расположение основных центров рассеяния. При этом усреднение значений подобия доминантных центров рассеяния позволяет получить статистически достоверную оценку того, насколько качественно сохранена структура объекта на РЛИ. Кроме того, указанный способ расчета, оперирующий значениями математического ожидания и СКО, обладает устойчивостью к спекл-шуму, что позволяет минимизировать влияние шумовой составляющей.

Следующим важным фактором, влияющим на вероятность распознавания объекта, служит присутствие на РЛИ шумов, артефактов и ложных отметок, вызванных искажением радиолокационного поля помехами. Данное обстоятельство может приводить к появлению на РЛИ ложных доминантных центров рассеяния либо, наоборот, к зашумлению существующих.

В связи с этим на следующем этапе для нивелирования указанных искажений и повышения достоверности расчета вероятности распознавания объекта в методике оценивается полнота воспроизведения доминантных центров рассеяния, количественно определяемая коэффициентами пропуска доминантных центров рассеяния $\left(K_{\text{д. пр}}\right)$ и зашумленности $\left(K_{\text{д. л}}\right)$.

Расчет коэффициента пропуска доминантных центров рассеяния определяется выражением

$$K_{\text{д. пр}} = \frac{L - N_{\text{п}}}{L}.$$

Как видно из данного выражения, зависимость $K_{\text{д. пр}}$ от количества доминантных центров рассеяния и количества совпавших пар – линейная, так как пропуск каждого элемента приводит к строго пропорциональной потере информации о структуре объекта.

Однако для расчета коэффициента зашумленности (наличия ложных центров рассеяния) линейная зависимость не подходит. Это обосновано рядом факторов. Во-первых, в задачах обнаружения сигналов отношение правдоподобия при наличии аддитивного шума и помех имеет преимущественно экспоненциальную зависимость [5]. Во-вторых, в условиях помех количество ложных центров рассеяния не ограничено и может на несколько порядков превышать количество доминантных центров рассеяния эталона. В связи с этим переход к логарифмическому масштабу позволит более достоверно описать процесс анализа подобия объектов в условиях помех.

Таким образом, в предложенной методике расчет коэффициента $K_{\text{д. л}}$ осуществляется следующим образом:

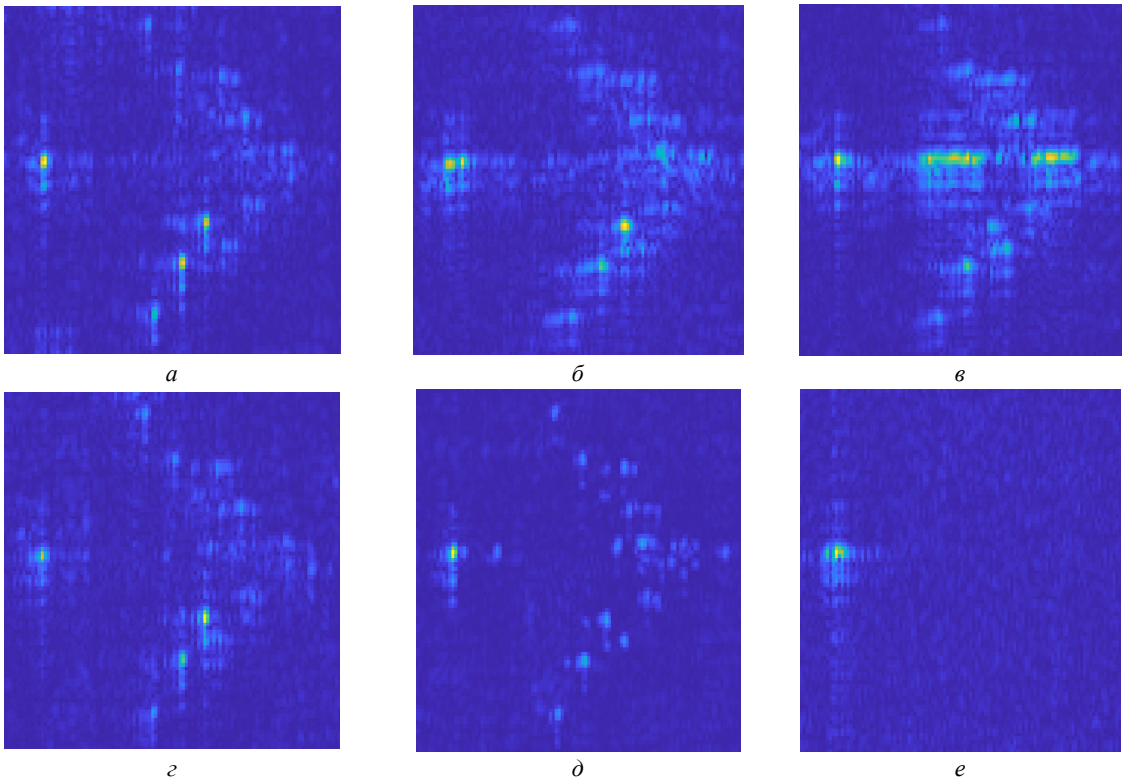


Рис. 3. Тестовые РЛИ: *а* – объект № 1; *б* – объект № 2; *в* – объект № 3; *г* – объект № 4; *д* – объект № 5; *е* – объект № 6
Fig. 3. Test radar images: *а* – object no. 1; *б* – object no. 2; *в* – object no. 3; *г* – object no. 4; *д* – object no. 5; *е* – object no. 6

$$K_{\text{д. л}} = 0.5 \ln\left(1 + \frac{K - N_{\text{п}}}{K}\right).$$

Следовательно, коэффициенты $\psi_{\text{ц. р}}$ и $K_{\text{фл}}$ позволяют сделать вывод о схожести формы и геометрической структуры сравниваемых объектов, а коэффициенты $K_{\text{д. пр}}$ и $K_{\text{д. л}}$ – оценить полноту обнаруженных признаков (доминантных центров рассеяния) и исключить влияние шума и помех, провоцирующих появление ложных центров рассеяния.

Апробация предложенного алгоритма осуществлялась методом имитационного моделирования, в ходе которого поиск объектов осуществлялся как предложенным методом, так и классическим методом корреляционного анализа. В качестве тестовых объектов использовались РЛИ типовых самолетов, а также набор ложных объектов (рис. 3).

Результаты моделирования показали, что при использовании метода корреляционного анализа объект № 6 (рис. 3, *е*) удовлетворяет пороговому значению. С другой стороны, расчет вероятности распознавания предложенным алгоритмом показал для объекта № 6 низкое значение (таблица).

Значения вероятности распознавания для тестовых объектов
Recognition probability values for test objects

Объект	1	2	3	4	5	6
Вероятность распознавания	0.97	0.96	0.98	0.97	0.98	0.31

Таким образом, преимущество предложенного алгоритма перед классическими, например перед поиском объектов методом корреляционного анализа, заключается в том, что он позволяет снизить вероятность ложных тревог.

Заключение. В настоящей статье представлен новый алгоритм поиска и распознавания объектов на радиолокационных изображениях, функционирующий на основе сопоставления их многомерных структурно-семантических описаний. В ходе проведения исследования получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработан комплексный подход к формализации описания сложных сосредоточенных целей на РЛИ. Его ключевое отличие от традиционных геометрических методов состоит в переход к дескрипторам целей, что позволяет проводить семантический анализ распознавания объектов.

2. Сформирована и теоретически обоснована система независимых частных показателей подобия объектов, которая всесторонне описывает их разнородные физические свойства. Учет данных параметров в рамках единого алгоритма существенно снижает выдачу ложноположительных решений при случайном совпадении объектов по единичным признакам, а также обеспечивает устойчивую работу системы в условиях интенсивных помех и спекл-шума.

3. Создан математический аппарат для расчета интегрального показателя – вероятности распознавания объектов, которая количественно выражает меру подобия исследуемой цели и эталона. В основе расчета лежит использование матрицы расстояний Махаланобиса совместно с итерационным алгоритмом RANSAC, что позволило оценивать степень подобия объектов в условиях флуктуации координат и ЭПР доминантных центров рассеяния.

Таким образом, предложенный алгоритм поиска и распознавания объектов на РЛИ, базирующийся на сравнении их структурно-семантических описаний, обеспечивает существенное повышение вероятности распознавания объектов.

Список литературы

1. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Ширман Я. Д., Горшков С. А., Лещенко С. П., Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Радиотехника. 2000. № 11. С. 5–64.

2. Жердев Д. А., Казанский Н. Л., Фурсов В. А. Распознавание объектов на радиолокационных изображениях с использованием показателей сопряженности и опорных подпространств // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 2. С. 255–264. doi: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-255-264.

3. Ананенков А. Э., Верба В. С., Нуждин В. М., Расторгуев В. В. Оценка параметров и распознавание малоразмерных объектов на основе анализа структуры их блестящих точек // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2021. Т. 19, № 3. С. 44–56.

4. Гусев С. Н. Методика программного формирования траекторного сигнала при решении задачи калибровки радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2017. № 6. С. 368–377.

5. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, В. Г. Осипов, В. Э. Турук. Под ред. В. С. Вербы. Москва: Радиотехника. 2010. 675 с.

6. Матвеев Ю. Н., Косточка А. В. Анализ вероятностных характеристик обнаружения малоразмерных объектов на радиолокационных изображениях // Цифровая обработка сигналов. 2014. № 3. С. 45–50.

Информация об авторах

Титов Константин Игоревич – канд. техн. наук, начальник отдела Военного института (Научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: konstantin_titov@mail.ru

Гусев Сергей Николаевич – канд. техн. наук, начальник лаборатории Военного института (Научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: gusev_sn@mail.ru

Лазутин Роман Юрьевич – канд. техн. наук, начальник лаборатории Военного института (Научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, ул. Ждановская, д. 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: roma.lazutin.90@mail.ru

References

1. Metody radiolokacionnogo raspoznavanija i ih modelirovanie / Shirman Ja. D., Gorshkov S. A., Leshhenko S. P., G. D. Bratchenko, V. M. Orlenko // Radiotehnika. 2000. № 11. S. 5–64. (In Russ.).

2. Zherdev D. A., Kazanskij N. L., Fursov V. A. Raspoznavanie ob#ektov na radiolokacionnyh izobrazhenijah s ispol'zovaniem pokazatelej soprjazhjonnosti i opornyh podprostranstv // Komp'juternaja optika. 2015. T. 39, № 2. S. 255–264. doi: 10.18287/0134-2452-2015-39-2-255-264. (In Russ.).

3. Ananenkov A. Je., Verba V. S., Nuzhdin V. M., Rastorguev V. V. Ocenka parametrov i raspoznavanie malorazmernyh ob#ektov na osnove analiza struktury ih blestjashhih tochek // Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy. 2021. T. 19, №3. S. 44–56. (In Russ.).

4. Gusev S. N. Metodika programmnogo formirovanija traektornogo signala pri reshenii zadachi kalibrovki radiolokacionnyh sistem s sintezirovannoj aperturoj antenny // Izv. TulGU. Tehnicheskie nauki. 2017. № 6. S. 368–377. (In Russ.).

5. Radiolokacionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovanija / V. S. Verba, L. B. Neronskij, B. G. Osipov, V. Je. Turuk. Pod red. V. S. Verby. Moskva: Radiotehnika. 2010. 675 s. (In Russ.).

6. Matveev Ju. N., Kostochka A. V. Analiz verojatnostnyh harakteristik obnaruzhenija malorazmernyh ob#ektov na radiolokacionnyh izobrazhenijah // Cifrovaja obrabotka signalov. 2014. № 3. S. 45–50. (In Russ.).

Information about the authors

Konstantin I. Titov – Cand. Sci. (Eng.), Head of Department, Military Institute (Research) of the A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Zhdanovskaya St., 13, St. Petersburg, 197198, Russia.
E-mail: konstantin_titov@mail.ru

Sergey N. Gusev – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Military Institute (Research) of the A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Zhdanovskaya St., 13, St. Petersburg, 197198, Russia.
E-mail: gusev_sn@mail.ru

Roman Yu. Lazutin – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Military Institute (Research) of the A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Zhdanovskaya St., 13, St. Petersburg, 197198, Russia.
E-mail: roma.lazutin.90@mail.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2026; принята к публикации после рецензирования 02.10.2026; опубликована онлайн 27.11.2026.

Submitted 24.09.2026; accepted 02.10.2026; published online 27.11.2026.