

## **Особенности классификации подстилающих поверхностей земли по характеристикам эхо-сигналов в бортовых РЛС**

**Ненашев В.А.**

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, ГУАП,*

*Большая Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия*

*e-mail: [nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)*

*Статья поступила 12.05.2021*

### **Аннотация**

В работе рассмотрены вопросы выбора и формирования пространства информационных признаков для классификации эхо-сигналов от различных типов подстилающих поверхностей, сформированных бортовой аппаратурой радиолокационных систем. В подобных системах достаточно сложно решается задача классификации наблюдаемых поверхностей земли. Поэтому, в целях реализации системы классификации, требуется предварительно определить и проанализировать информационные признаки эхо-сигналов бортовых РЛС, соответствующие определенным типам подстилающих поверхностей. Результатом работы является разработка алгоритма классификации подстилающих поверхностей по ЭПР.

**Ключевые слова:** классификация, подстилающая поверхность, эхо-сигнал, бортовые радиолокационные системы, эффективная поверхность рассеяния, пространство информационных признаков.

## Введение

Сегодня в качестве устройств наблюдения за земной поверхностью применяются различные системы бортового локационного мониторинга [1-4]. К таким системам сбора информации о земной поверхности, базирующих на малых летательных аппаратах (ЛА), относятся: цифровая фото- видео аппаратура; тепловизор; ИК-камера; радиолокационные системы; счетчик Гейгера и др. На борту ЛА крепится необходимое, перечисленное выше, оборудование, при этом, в целях минимизации массы груза, обработку зарегистрированных данных необходимо выполнять в наземном пункте управления ЛА, передавая данные по каналу беспроводной связи или использовать режим постобработки.

Малогабаритные бортовые РЛС обладают большими практическими достоинствами. Основными из этих достоинств являются:

- реализация мониторинга земной поверхности в неблагоприятных метеоусловиях и в любое время суток, а также в различных сезонных условиях;
- достаточно большая дальность действия;
- высокая точность определения координат обнаруживаемых физических объектов и очертаний кромок подстилающих поверхностей;
- возможность за короткий промежуток времени охватить обширные участки наблюдаемых зон;
- реализация режима в реальном масштабе времени и т.д.

Задачи радиолокационной классификации типа земной поверхности довольно успешно решаются современными бортовыми радиолокационными системами.

В связи с этим, целесообразно более подробно рассмотреть особенности реализации бортовой системы классификации, реализуемой на основе информационных признаков эхо-сигналов земной поверхности, принимаемых малогабаритной радиолокационной аппаратурой ЛА.

Таким образом, следует разработать алгоритм классификации типа подстилающих поверхностей по заранее определенным характеристикам эхо-сигналов. Задача разрабатываемого классификатора состоит в том, чтобы экспериментально подтвердить его способность достоверно определять типы подстилающих поверхностей с бортов малогабаритных РЛС при автономном мониторинге земной поверхности, в том числе с бортов БПЛА. Таким образом, целью настоящего исследования является нахождение статистических эквивалентов - законов распределений эхо-сигналов для радиолокационной классификации различных типов подстилающих поверхностей.

### **Модели радиолокационных сигналов земной поверхности**

Радиолокационная классификация использует модели распределений эхо-сигналов бортовых систем наблюдения. Хорошо изучены и применяются на практике для описания эхо-сигналов земной поверхности распределения Релея, Релея-Райса и распределение Вейбулла, а также логарифмически нормальное распределение как эквивалент для описания морской поверхности. Известны также и другие распределения, которые описывают модели эхо-сигналов земной и

морской, а также других типов поверхностей. Это, например, гамма-распределение, К-распределение, распределение Хи-квадрат и Хойта, а также др.

Статистические характеристики эхо-сигналов морской и земной поверхности приведены в работах [5-9].

Однако, в случае, например, когда электромагнитный луч перемещается от моря на сушу, то флюктуации радиолокационного сигнала, отраженного от границы раздела земля-море должны соответствовать соответствующей модели составного векторного распределения. Модели и алгоритмы моделирования составных распределений описаны в работах [8, 9]. Рассмотрение составного закона распределения выходит за рамки данной статьи.

Для достоверной классификации как физических объектов (ФО), так и типов постилающих поверхностей, требуется определить соответствующее пространство информационных признаков.

### **Пространство информационных признаков классификации**

После обнаружения в зоне поиска ФО возникает задача их классификации. Принадлежность ФО тому или иному типу можно определить по наблюдаемым эхо-сигналам ФО и при наличии заранее сформированной базе информационных классификационных признаках ФО.

В качестве классификационных признаков, оцениваемым по наблюдаемым эхо-сигналам, можно использовать следующие:

- среднее значение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) ФО или, соответственно, среднее значение амплитуд отраженных сигналов;

- значения коэффициентов вариации амплитуд;

- среднее значение длительностей сигналов;

- длительность корреляционной функции амплитуд и корреляционной функции длительностей;

- коэффициент корреляции между амплитудой и длительностью отраженных импульсов;

- скорость наблюдаемого ФО  $V$  и др. [10].

Возможны и некоторые другие признаки: геометрические, поляризационные и т.п. Таким образом, для классификации ФО достаточно информационных признаков, перечисленных выше.

Однако для классификации подстилающих поверхностей возможна разработка алгоритма классификации по одному, двум или нескольким признакам. В данной работе подробнее рассмотрим случай классификации по одному признаку.

Довольно часто в качестве информационного признака, позволяющего достоверно классифицировать типы подстилающих поверхностей земли, используют оценку среднего значения ЭПР. При этом алгоритм классификации реализуется на основе сопоставления значения ЭПР взятого из соответствующей базы признаков классификации объектов и подстилающих поверхностей со значением ЭПР, вычисленной по принимаемым значениям амплитуд эхо-сигнала наблюдаемых в стробе приемника бортовой РЛС.

## Эффективная площадь рассеивания различных видов поверхностей

При практическом использовании математической модели эхо-сигнала необходимо задать ее параметры, которые в свою очередь определяются характеристиками бортового лоатора, условиями наблюдения за земной и морской поверхностями и их состояниями.

Характеристики лоатора и условия наблюдения являются необходимыми и должны быть заданы разработчиком системы. Параметр флюктуаций амплитуды эхо-сигнала  $A_{ij}$ , определяется через вычисление средней мощности отраженного от элемента поверхности площадью  $S$  с удельной ЭПР  $\sigma_{уд}$  в пределах основного луча и вычисляется по формуле

$$P_{ij}^r = \frac{P_i^t \cdot \lambda_i^2 \cdot c \cdot \tau_3 \cdot \eta_i \cdot G_{ij}^2 \cdot \Delta\phi}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot R_{ij}^3 \cdot \cos \theta_{ij}} \cdot 10^{0,1\sigma_{уд ij}}, \quad (1)$$

где  $P_i^t$  – мощность передатчика в Вт,  $\tau_3$  – длительность зондирующего импульса,  $c$  – скорость света,  $\lambda$  – длина волны в среде распространения,  $R_{ij}$  – наклонная дальность до  $i, j$ -го элемента разрешения поверхности,  $\theta_{ij}$  – угол визирования,  $\eta_i$  – коэффициент потерь,  $\sigma_{уд}$  – удельная ЭПР элемента разрешения поверхности,  $G_{ij}$  – коэффициент усиления антенны,  $\Delta\phi_i$  – ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности.

Поэтому, для вычисления  $P_{ij}^r$  необходимо задать удельную ЭПР земной поверхности  $\sigma_{уд}$ . Будем рассматривать случай классификации земной поверхности. Удельная ЭПР определяется с использованием эмпирических моделей, построенных на базе полигонных измерений различных поверхностей и зависит от вида

подстилающей поверхности, угла скольжения волны бортовой РЛС и т.д.[11].

Согласно модели Кулемина, удельная ЭПР находится из выражения:

$$\sigma_{уд} = A_1 + A_2 \lg \frac{\beta}{20} + A_3 \lg \frac{f_0}{10} \quad (2)$$

где  $A_1, A_2, A_3$  – коэффициенты, учитывающие вид земной поверхности, в дБ (см.

табл. 1);  $\beta$  – угол скольжения в градусах;  $f_0$  – несущая частота РЛС в ГГц.

*Таблица 1 - Коэффициенты для расчета удельной ЭПР*

<b>Вид поверхности</b>	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Бетон	-49	32	20
Пашня	-37	18	15
Снег	-34	25	15
Лес лиственный и хвойный летом	-20	10	6
Лес лиственный зимой	-40	10	6
Луг с высотой травы более 0,5 м	-21	10	6
Луг с высотой травы менее 0,5 м	-28	10	6
Городские и сельские строения	-8,5	5	3

Из таблицы 1 следует, что для достоверной классификации различных типов, например, лесного массива, требуется заранее определить коэффициенты  $A_1, A_2, A_3$  для расчета соответствующей удельной ЭПР, поскольку лес является сложной средой для классификации и может варьироваться, как по плотности (густой, редкий), так и по высоте деревьев, в зависимости от количества присутствующей листвы, а также по типу деревьев (хвойный, лиственный и т.д.).

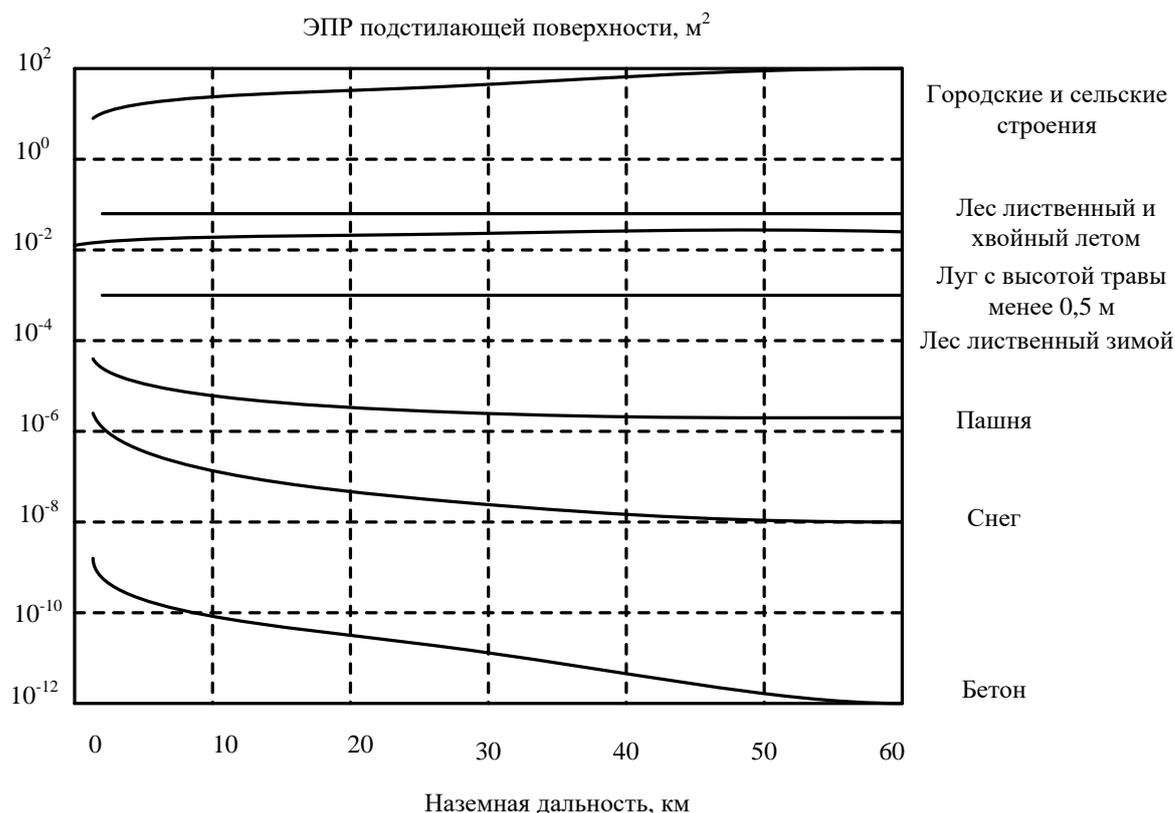


Рисунок 1 – ЭПР различных типов подстилающих поверхностей (параметры РЛС:

$$\Theta = 0,5^\circ; \lambda = 3,2 \text{ см}; \tau_{\text{н}} = 0,5 \text{ мкс})$$

На рисунке 1 приведены графики значений удельных ЭПР, соответствующих различным типам подстилающих поверхностей в зависимости от дальности действия РЛС. Следует сделать вывод, что при малых углах скольжения значительной ЭПР, порядка десятка метров, наблюдаются у отражений от городских и сельских строений, при этом значения других ЭПР не превосходит 0.1 м<sup>2</sup>.

### Алгоритм классификации типов подстилающих поверхностей

Алгоритм классификации типов подстилающих поверхностей, реализующий описанные выше идеи, представлен на рис. 2.

Работа алгоритма понятна из названий соответствующих блоков, которые осуществляют операции, достаточно подробно описанные в соответствующей литературе по радиолокационным системам классификации [12-25]. Однако здесь показана одна из возможностей реализации идеи классификации получаемой от базы признаков именно подстилающих поверхностей.

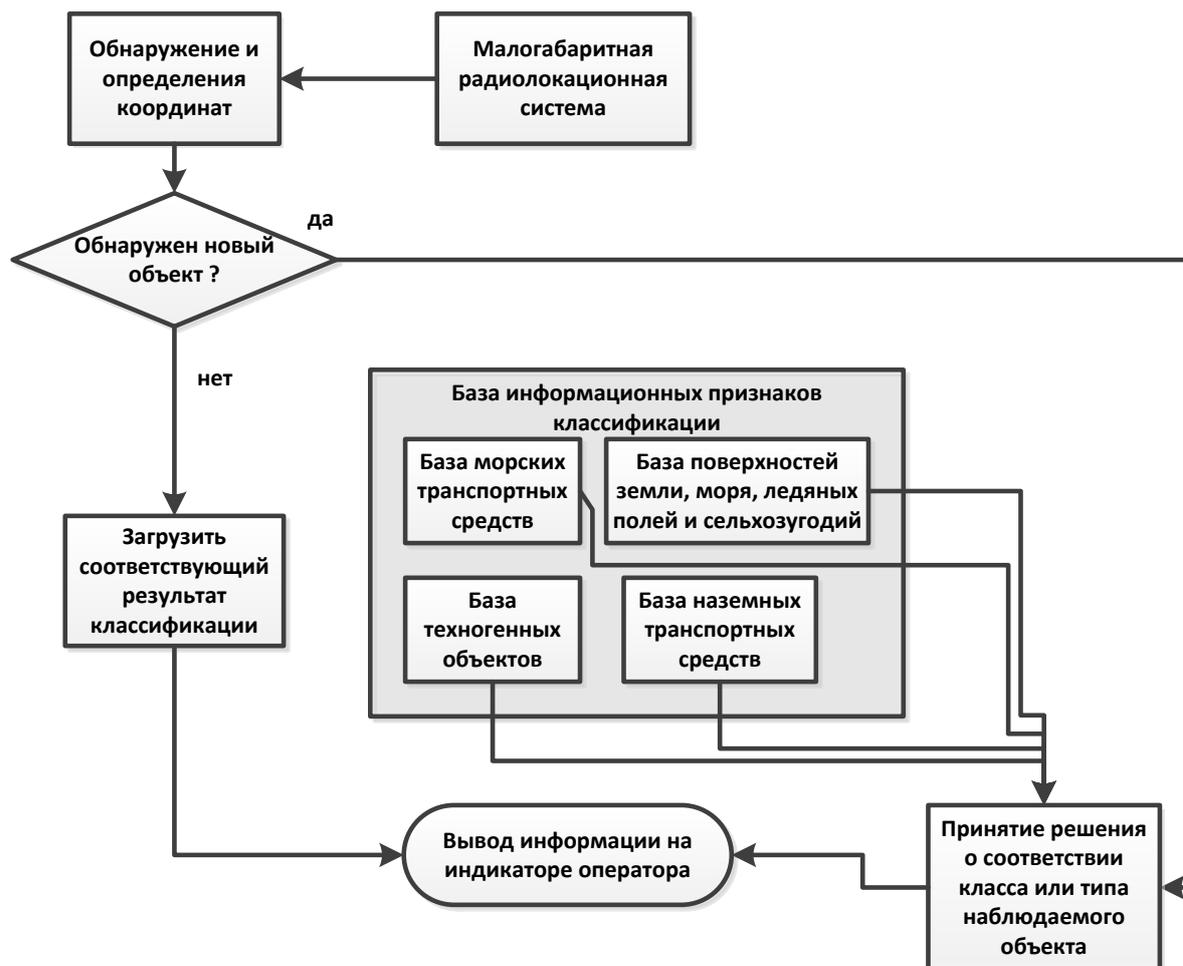


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма классификации

Таким образом, в рассматриваемой ситуации, задачи обнаружения физического объекта, определения его координат возлагаются на малогобаритную радиолокационную систему, а задача классификации на симбиоз заранее сформированной базы с бортовой РЛС. Таким образом, при классификации

объектов и подстилающих поверхностей были использованы и электромагнитные классификационные признаки, которые незаменимы в сложных погодных и сезонных условиях, а также в условиях ограниченной видимости.

### **Выводы**

Для решения задач классификации поверхностей земли можно использовать малогабаритные бортовые РЛС. Для этого были определены, проанализированы и сформированы соответствующие параметры эхо-сигналов пространства информационных признаков характеристик. При этом выявлены наиболее информативные параметры классификации, основным из которых является значение ЭПР. При этом выделенные параметры эхо-сигналов являются устойчивыми при влиянии различных деструктивных воздействий на сигнал при его распространении.

В качестве модели флуктуаций огибающей эхо-сигналы земной поверхности используются законы распределения: Вейбулла, Релея, Релея-Райса, Хойта и т.д., а также логарифмически нормальный закон и К-распределение как эквивалент эхо-сигнала морской поверхности.

В работе разработан алгоритм классификации по одному информационному признаку, которым является ЭПР. Приведена блок схема алгоритма. За счет использования бортовой радиолокационной аппаратуры, осуществляется поиск, обнаружение и классификация подстилающих поверхностей, что позволяет выполнять данные задачи вне зависимости от погодных, суточных и сезонных

условий. При этом достоверность алгоритма классификации зависит только от собственных флюктуаций оцениваемых характеристик эхо-сигналов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда*

*(проект № 19-79-00303)*

### **Библиографический список**

1. Сенцов А.А., Ненашев В.А., Иванов С.А., Турнецкая Е.Л. Совмещение сформированных радиолокационных изображений с цифровой картой местности в бортовых системах оперативного мониторинга земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=156227>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-08)
2. Лунёв Е.М., Неретин Е.С., Дяченко С.А. Дуброво А.И. Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66366>
3. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars // Information and Control Systems, 2020, no. 2, pp. 31 - 36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
4. Дяченко С.А. Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91966>

5. Keith Ward, Robert Tough, Simon Watts. Sea Clutter: Scattering, the K distribution and radar performance // *Electromagnetics and Radar*, 2007, no.17 (2), pp. 233 – 234. DOI: [10.1080/17455030601097927](https://doi.org/10.1080/17455030601097927)
6. Cheng K. Lee, Miin-Jye Wen. A Multivariate Weibull Disitribution // *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 2010, no. 5, pp. 55 – 66. DOI: [10.18187/pjsor.v5i2.120](https://doi.org/10.18187/pjsor.v5i2.120)
7. Исаков В.И., Подоплёкин Ю.Ф., Шепета Д.А. Марковская модель флюктуаций амплитуд и длительностей эхо-сигналов крупных надводных объектов // *Морской вестник*. 2016. № 3 (59). С. 49 - 50.
8. Isakov V.I., Shepeta D.A., Nenashev V.A. Algorithm for modeling location signals reflected from the edge of various underlying surfaces // *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 2020, pp. 9131550. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131550](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131550)
9. Исаков В.И., Шепета Д.А. Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 5. С. 89 - 94. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2017.5.89](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.89)
10. Давидчук А.Г., Подоплекин Ю.Ф., Шепета А.П. Алгоритмы классификации по ЭПР морских объектов, наблюдаемых бортовыми локаторами в дальней зоне // *Морская радиоэлектроника*. 2018. № 2 (64). С. 24 - 28.
11. Смирнов В.В., Николаев С.В. Пассивные помехи: монография. – СПб.: БГТУ, 2008. – 400 с.

12. Блаунштейн Н.Ш., Сергеев М.Б., Шепета А.П. Прикладные аспекты электродинамики. - СПб.: Аграф+, 2016. – 272 с.
13. Lee S., Jha D., Agrawal A. Parallel Deep Convolutional Neural Network Training by Exploiting the Overlapping of Computation and Communication // 2017 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing, Jaipur, 2017, pp. 183 - 192. DOI: [10.1109/HiPC.2017.00030](https://doi.org/10.1109/HiPC.2017.00030)
14. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Скосырев В.Н. Экспериментальное исследование отражений от подстилающей поверхности и селекции в РЛС обзора летного поля // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 2. С. 1 - 18.
15. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A., Turnetskaya E.L. Classification and recognition of objects on radar portraits formed by the equipment of mobile small-size radar systems // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020, pp. 9131475. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131475](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131475)
16. Ненашев В.А., Сеницын В.А., Страхов С.А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // IX Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные технологии и технические средства специального назначения»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 16-18 ноября 2016). – СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2017. С. 351 - 355.

17. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths and Wolfgang Koch (Eds.). Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 1. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar, SciTech Publishing, 2017, 952 p. URL: [http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f\\_pti](http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f_pti)
18. Шепета А.П., Осипов Л.А., Сергеев М.Б., Соловьев Н.В. Использование спектральных характеристик для распознавания изображений, полученных при дистанционном зондировании // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 83 - 85.
19. Ненашев В.А., Григорьев Е.К., Ненашев С.А. Классификация объектов на сформированных локационных изображениях в бортовой многопозиционной системе // XXIX Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации»: сборник трудов (Алушта, 14–20 сентября 2020). – М.: Издательский Дом «МЕДПРАКТИКА-М», 2020. – С. 147 - 148.
20. Richard Klemm (ed.). Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 2. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion, London, Scitech Publishing, 2017, 553 p.
21. Сергеев М.Б., Сенцов А.А., Григорьев Е.К., Ненашев С.А. Имитационная модель радиолокационной обстановки интеллектуальной системы управления распределенными средствами радиолокационных станций // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. № 8 (3). С. 1 - 17. DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.038](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.038)

22. Верба В.С., Татарский Б.Г. и др. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства: монография. - М.: Радиотехника, 2014. - 576 с.
23. Melvin W.L., Scheer J.A. Principles of Modern Radar. Advanced Techniques. Vol. II. Scitech publishing, 2013, 876 p.
24. Верба В.С., Меркулов В.И. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. – М.: Радиотехника, 2010. – 472 с.
25. Nenashev V.A., Kryachko A.F., Shepeta A.P., Burylev D.A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tokyo, 2019, pp. 111970X-1-111970X-7. DOI: [10.1117/12.2542718](https://doi.org/10.1117/12.2542718)

## **Features of classification of the underlying earth surfaces according to the characteristics of echo signals in on-board radars**

**Nenashev V.A.**

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,*

*67, Bolshaya Sea str., Saint Petersburg, 190000, Russia*

*e-mail: [nenashev@guap.ru](mailto:nenashev@guap.ru)*

### **Abstract**

Today, on-board radar monitoring systems are actively used as devices for observing the earth's surface. They have great practical advantages. The main of these advantages are:

- implementation of monitoring of the earth's surface in unfavorable weather conditions and at any time of the day, as well as in various seasonal conditions;
- sufficiently long range of action;
- high accuracy in determining the coordinates of the detected physical objects and outlines of the edges of the underlying surfaces;
- the ability to cover large areas of the monitored areas in a short period of time;
- implementation of the mode in real time, etc.

The work defines, analyzes and forms the corresponding parameters of echo signals, the space of information features of characteristics. The most informative classification parameters have been identified, the main of which is the radar cross section (RCS) value. In this case, the selected parameters of echo signals are stable under the influence of various destructive influences on the signal during its propagation.

The distribution laws of Weibull, Rayleigh, Rayleigh-Rice, Hoyt, etc. are used as a model for the fluctuations of the envelope of the earth's surface echoes, as well as the log-normal law and the K-distribution as the equivalent of the sea surface echo.

In this work, an algorithm for the classification of one information attribute, which is the RCS, has been developed. The block diagram of the algorithm is presented. The classification algorithm is implemented on the basis of comparing the RCS value taken from the corresponding base of classification features of objects and underlying surfaces with the RCS value calculated from the received values of the echo signal amplitudes observed in the receiver strobe of the onboard radar.

Through the use of on-board radar equipment, search, detection and classification of underlying surfaces is carried out, which makes it possible to perform these tasks regardless of weather, daily and seasonal conditions. In this case, the reliability of the classification algorithm depends only on the intrinsic fluctuations of the evaluated characteristics of the echo signals. The result of the work is the development of an algorithm for the classification of underlying surfaces by RCS.

**Keywords:** classification, underlying surface, echo signal, airborne radar systems, radar cross section, space of information signs.

## References

1. Sentsov A.A., Nenashev V.A., Ivanov S.A., Turnetskaya E.L. *Trudy MAI*, 2021, no. 117. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156227>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-08](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-08)
2. Lunev E.M., Neretin E.S., Dyachenko S.A. Dubrovo A.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=66366>
3. Shepeta A.P., Nenashev V.A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars, *Information and Control Systems*, 2020, no. 2, pp. 31 - 36. DOI: [10.31799/1684-8853-2020-2-31-36](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2020-2-31-36)
4. Dyachenko S.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91966>
5. Keith Ward, Robert Tough, Simon Watts. Sea Clutter: Scattering, the K distribution and radar performance, *Electromagnetics and Radar*, 2007, no.17 (2), pp. 233 – 234. DOI: [10.1080/17455030601097927](https://doi.org/10.1080/17455030601097927)
6. Cheng K. Lee, Miin-Jye Wen. A Multivariate Weibull Disitribution, *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research*, 2010, no. 5, pp. 55 – 66. DOI: [10.18187/pjsor.v5i2.120](https://doi.org/10.18187/pjsor.v5i2.120)
7. Isakov V.I., Podoplekin Yu.F., Shepeta D.A. *Morskoi vestnik*, 2016, no. 3 (59), pp. 49 - 50.
8. Isakov V.I., Shepeta D.A., Nenashev V.A. Algorithm for modeling location signals reflected from the edge of various underlying surfaces, *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems*, 2020, pp. 9131550. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131550](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131550)

9. Isakov V.I., Shepeta D.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017, no. 5, pp. 89 - 94. DOI: [10.15217/issn1684-8853.2017.5.89](https://doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.5.89)
10. Davidchuk A.G., Podoplekin Yu.F., Shepeta A.P. *Morskaya radioelektronika*, 2018, no. 2 (64), pp. 24 - 28.
11. Smirnov V.V., Nikolaev S.V. *Passivnye pomekhi: monografiya* (Passive clutter), Saint Petersburg, BGTU, 2008, 400 p.
12. Blaunshtein N.Sh., Sergeev M.B., Shepeta A.P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* (Applied aspects of electrodynamics), Saint Petersburg, Agraf+, 2016, 272 p.
13. Lee S., Jha D., Agrawal A. Parallel Deep Convolutional Neural Network Training by Exploiting the Overlapping of Computation and Communication, *2017 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing*, Jaipur, 2017, pp. 183 - 192. DOI: [10.1109/HiPC.2017.00030](https://doi.org/10.1109/HiPC.2017.00030)
14. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Skosyrev V.N. *Zhurnal radioelektroniki*, 2017, no. 2, pp. 1 - 18.
15. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Nenashev S.A., Turnetskaya E.L. Classification and recognition of objects on radar portraits formed by the equipment of mobile small-size radar systems, *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems, WECONF 2020*, pp. 9131475. DOI: [10.1109/WECONF48837.2020.9131475](https://doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131475)
16. Nenashev V.A., Sinitsyn V.A., Strakhov S.A. *IX Obshcherossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva*

*spetsial'nogo naznacheniya»: sbornik trudov*, Saint Petersburg, Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet «Voenmekh» im. D.F. Ustinova, 2017, pp. 351 - 355.

17. Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths and Wolfgang Koch (Eds.). *Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 1. Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*, SciTech Publishing, 2017, 952 p. URL: [http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f\\_pti](http://dx.doi.org/10.1049/sbra512f_pti)

18. Shepeta A.P., Osipov L.A., Sergeev M.B., Solov'ev N.V. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2004, no. 6, pp. 83 - 85.

19. Nenashev V.A., Grigor'ev E.K., Nenashev S.A. *XXIX Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii v zadachakh upravleniya, avtomatiki i obrabotki informatsii»: sbornik trudov*, Moscow, Izdatel'skii Dom «MEDPRAKTIKA-M», 2020, pp. 147 - 148.

20. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications. Vol. 2. Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*, London, Scitech Publishing, 2017, 553 p.

21. Sergeev M.B., Sentsov A.A., Grigor'ev E.K., Nenashev S.A. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*, 2020, no. 8 (3), pp. 1 - 17. DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.038](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.038)

22. Verba V.S., Tatarskii B.G. et al. *Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoi poverkhnosti i vozdushnoyu prostranstva: monografiya* (Radar systems for aerospace monitoring of the earth's surface and airspace), Moscow, Radiotekhnika, 2014, 576 p.

23. Melvin W.L., Scheer J.A. *Principles of Modern Radar. Advanced Techniques. Vol. II*, Scitech publishing, 2013, 876 p.
24. Verba V.S., Merkulov V.I. *Otsenivanie dal'nosti i skorosti v radiolokatsionnykh sistemakh* (Estimation of range and speed in radar systems), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 472 p.
25. Nenashev V.A., Kryachko A.F., Shepeta A.P., Burylev D.A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Tokyo, 2019, pp. 111970X-1-111970X-7. DOI: [10.1117/12.2542718](https://doi.org/10.1117/12.2542718)