



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59>

УДК 621.396.96

## АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ РАСПОЗНАВАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РЕАЛЬНЫМ ЗАПИСЯМ ИМПУЛЬСНОГО РАДИОЛОКАТОРА S-ДИАПАЗОНА

А. С. ХРАМЕНКОВ, В. Г. ЧИГРЯЙ

*Военная академия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** Разработан и исследован подход к анализу классификационных признаков радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе спектральных радиолокационных портретов, сформированных по реальным записям импульсного радара S-диапазона. Рассмотрена задача выделения и оценки информативности сигнальных признаков, доступных для практической реализации в радиолокаторах обнаружения и сопровождения. Проведена обработка экспериментальных данных и сформирован набор физически интерпретируемых признаков, отражающих свойства планерной составляющей и вторичной микродоплеровской модуляции отраженного сигнала. Для количественной оценки разделяющей способности признаков использованы критерий Фишера, количество информации и нормированные межклассовые расстояния. Установлено, что наибольшей информативностью обладают признаки микродоплеровской природы, обеспечивающие устойчивое разделение мультикоптерных и гибридных типов беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** малоразмерные беспилотные летательные аппараты, радиолокационное распознавание, спектральный радиолокационный портрет, вторичная модуляция, классификационные признаки, критерий Фишера, количество информации, межклассовое расстояние.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Храменков, А. С. Анализ информативности признаков распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по реальным записям импульсного радиолокатора S-диапазона / А. С. Храменков, В. Г. Чигряй // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 51–59. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59>.

## ANALYSIS OF THE INFORMATION CONTENT OF RECOGNITION FEATURES OF SMALL-SIZED UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON REAL S-BAND PULSE RADAR RECORDINGS

ANDREI KHRAMIANKOU, VASIL CHYHRAI

*Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** An approach to analyzing classification features for radar recognition of small unmanned aerial vehicles based on spectral radar portraits generated from real S-band pulsed radar recordings is developed and studied. The problem of extracting and assessing the information content of signal features available for practical implementation in detection and tracking radars is considered. Experimental data were processed, and a set of physically interpretable features is generated, reflecting the properties of the airframe component and secondary micro-Doppler modulation of the reflected signal. To quantitatively evaluate the separating ability of features, the Fisher criterion, the amount of information and normalized interclass distances were used. It is established that micro-Doppler features possess the greatest information content, ensuring stable separation of multicopter and hybrid types of unmanned aerial vehicles.

**Keywords:** small unmanned aerial vehicles, radar recognition, spectral radar portrait, secondary modulation, classification features, Fisher criterion, amount of information, interclass distance.

**Conflict of interests.** The authors declare that there is no conflict of interests.

**For citation.** Khramiankou A., Chyhray V. (2026) Analysis of the Information Content of Recognition Features of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles Based on Real S-Band Pulse Radar Recordings. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 51–59. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-51-59> (in Russian).

## Введение

Современное развитие малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (МБЛА) привело к их широкому применению в гражданских и военных областях. Компактные габариты, низкая эффективная площадь рассеяния, сложные маневренные траектории и полеты на малых высотах существенно усложняют задачу их радиолокационного обнаружения и распознавания. В связи с этим разработка и анализ устойчивых классификационных признаков МБЛА остаются актуальной научно-технической задачей, связанной с обеспечением безопасности и защитой объектов инфраструктуры.

С практической точки зрения в радиолокаторах обнаружения и сопровождения наибольший интерес представляют признаки, формируемые в стандартных режимах работы без существенного усложнения аппаратной или алгоритмической части. К таким признакам относится спектральный радиолокационный портрет (СРЛП)  $\xi_s$ , представляющий собой упорядоченную совокупность комплексных амплитуд отраженного сигнала, распределение квадратов модулей которых по частоте Доплера соответствует распределению мощности отраженного сигнала [1].

Анализ СРЛП МБЛА позволяет выделить совокупность классификационных признаков, связанных с различными физическими механизмами рассеяния. В спектре отраженного сигнала присутствуют компоненты, обусловленные отражениями от основных элементов конструкции (планера), а также спектральные составляющие, возникающие вследствие микродвижений и вращения подвижных элементов (вторичная модуляция, ВМ). Эти особенности проявляются в форме спектра, ширине полосы и распределении энергии, что позволяет формировать физически интерпретируемые признаки распознавания. Наиболее достоверная оценка информативности таких признаков достигается при использовании реальных радиолокационных записей. В этом контексте особый интерес представляет открытый датасет полевых измерений импульсного радиолокатора S-диапазона, описанный в [2].

Цель исследований – анализ сигнальных классификационных признаков радиолокационного распознавания МБЛА на основе реальных записей импульсного радиолокатора S-диапазона. В рамках исследования сформированы СРЛП мультикоптерных и гибридных типов МБЛА, выделены физически интерпретируемые признаки и проведена количественная оценка их разделяющей способности с целью формирования набора признаков, пригодных для последующей разработки алгоритмов автоматической классификации.

## Исходные данные

В исследовании использованы данные, опубликованные в [2], полученные при натурных измерениях на площадке аэропорта Лусун (г. Чжучжоу, Китай). Экспериментальные данные были получены с применением восьмиканального цифрового импульсного радиолокатора S-диапазона при измерениях в условиях прямой радиовидимости между радиолокатором и наблюдаемыми объектами.

*Объекты наблюдения и условия регистрации.* Датасет, описанный в [2], включал 13 файлов с записями радиолокационных наблюдений (Data 1–Data 13), охватывающих пять типов МБЛА: мультикоптерные (DJI Matrice 300, DJI Matrice 30T, DJI Inspire 2, DJI Mavic Air 2) и гибридный (CW-10). В исследовании использовались три типа МБЛА ( $M = 3$ ): мультикоптерные – DJI Matrice 300 (тип 1), DJI Matrice 30T (тип 2) и гибридный – CW-10 (тип 3).

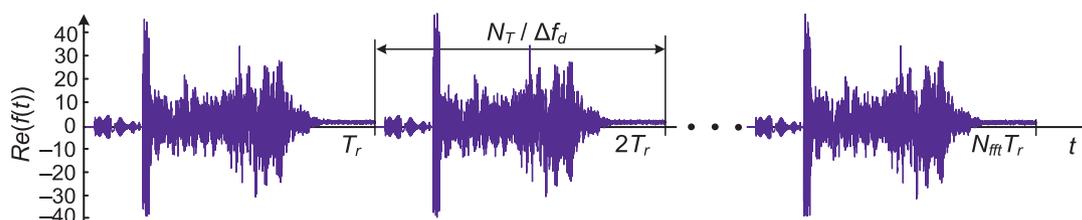
В табл. 1 представлены внешний вид, основные характеристики и параметры полета исследуемых МБЛА.

*Радиолокатор и его технические характеристики.* Регистрация сигналов осуществлялась импульсным когерентным радиолокатором с линейно-частотно-модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом со следующими параметрами: несущая частота  $f_0 = 3,133$  ГГц (длина волны  $\lambda = 9,6$  см); количество каналов антенной системы (передающих/приемных) ( $n_r = 1$ )/( $n_{rc} = 8$ ); период повторения импульсов  $T_r = 1000$  мкс; девиация частоты ЛЧМ-сигнала  $\Delta f_0 = 120$  МГц; длительность импульса  $T_0 = 2,083$  мкс; частота дискретизации  $\Delta f_d = 491,52$  МГц; разрешающая способность по дальности  $\Delta r = 1,25$  м; разрешающая способность по доплеровской частоте  $\Delta F_{II} = 7,8125$  Гц.

**Таблица 1.** Внешний вид и характеристики исследуемых малоразмерных беспилотных летательных аппаратов  
**Table 1.** Appearance and characteristics of the small-sized unmanned aerial vehicles under study

Характеристика, тип аппарата	DJI Matrice 300	DJI Matrice 30T	CW-10
Внешний вид			
Масса, кг	6,3	3,77	12
Габариты, м	0,81×0,67×0,43	0,47×0,585×0,215	1,6×2,6
Максимальная скорость, м/с	23	23	30
Частота вращения винтов, Гц	37–70	50–90	33–83
Количество винтов (лопастей)	4 (2)	4 (2)	1 (2) – полет; 4 (2) – взлет/посадка
Длина лопасти, м	0,27	0,21	0,30–0,80
<b>Условия наблюдения</b>			
Скорость полета, м/с	5,8	9,9	21,0
Дальность полета, м	250–451	621–679	3665–3540
Высота полета, м	30	58,81–65,00	329–332
Траектория полета	Удаление по S-образной траектории	Удаление	Приближение
Время суток	Ночь	Утро	Полдень
Среднее отношение сигнал/шум на выходе устройства когерентного накопления, дБ	35	30	18

*Формат и структура входных данных.* Исходные записи радиолокационных наблюдений были представлены в формате .raw и содержали дискретные отсчеты комплексного принятого сигнала. Каждая запись представляла собой массив данных, организованный по номеру приемного канала антенны, медленному (по номеру импульса) и быстрому (в пределах одного импульса) времени размерами  $(n_{rc} = 8) \times (N_{fft} = 128) \times (N_T = 8192)$  соответственно ( $N_{fft}$  – количество отсчетов быстрого преобразования Фурье (БПФ)). Для всех типов МБЛА были сформированы выборки из записей принятого сигнала размером  $N_i = 90, i = 1 \dots M$ . На рис. 1 представлена реализация квадратурной составляющей принятого сигнала МБЛА DJI Matrice 30T, наблюдаемого в первом приемном канале антенной системы.



**Рис. 1.** Реализация квадратурной составляющей принятого сигнала малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Matrice M30T  
**Fig. 1.** Implementation of the quadrature component of the received signal of the small-sized unmanned aerial vehicle DJI Matrice M30T

Принятый сигнал представлял собой аддитивную смесь отраженного от МБЛА сигнала и радиолокационного фона, включающего внутренний шум и отражения от подстилающей поверхности и стационарных объектов. Для контроля положения цели по дальности использовались файлы с GPS-метками (Truth.txt), где с шагом 1 с указаны координаты цели (время, дальность, азимут, угол места). Полученные временные реализации принятого сигнала служат входными данными для обработки в интересах формирования СРЛП.

## Обработка принятого сигнала и формирование спектрального радиолокационного портрета

Обработка принятого сигнала, представленного в формате .raw, выполнялась поэтапно в соответствии со структурной схемой, приведенной на рис. 2.

Основной целью обработки являлось формирование СРЛП. Обработка принятого сигнала включала цифровое формирование луча путем взвешенного суммирования сигналов приемных каналов антенны, что обеспечивало пространственную селекцию и подавление боковых лепестков. Для повышения разрешения по дальности и увеличения отношения сигнал/шум выполнялась оптимальная фильтровая внутрипериодная обработка ЛЧМ-сигнала, для подавления боковых лепестков выходного сигнала дополнительно применялась весовая обработка с окном Хэмминга. Далее для каждого дискрета дальности осуществлялось БПФ по последовательности импульсов (по медленному времени) с последующим квадратичным детектированием, что позволяло получить матрицу «дальность–скорость». Формирование СРЛП выполнялось на основе эталонных данных о реальной дальности до МБЛА (файл Truth.txt): в пределах соответствующего диапазонного окна из матрицы «дальность–скорость» выбирался дискрет с максимальной мощностью, характеризующий отражения от планера цели, после чего соответствующий энергетический спектр использовался в качестве СРЛП ( $\xi_i = |\xi_{si}|^2$ , где  $i = 1 \dots N_{fft}$ ).

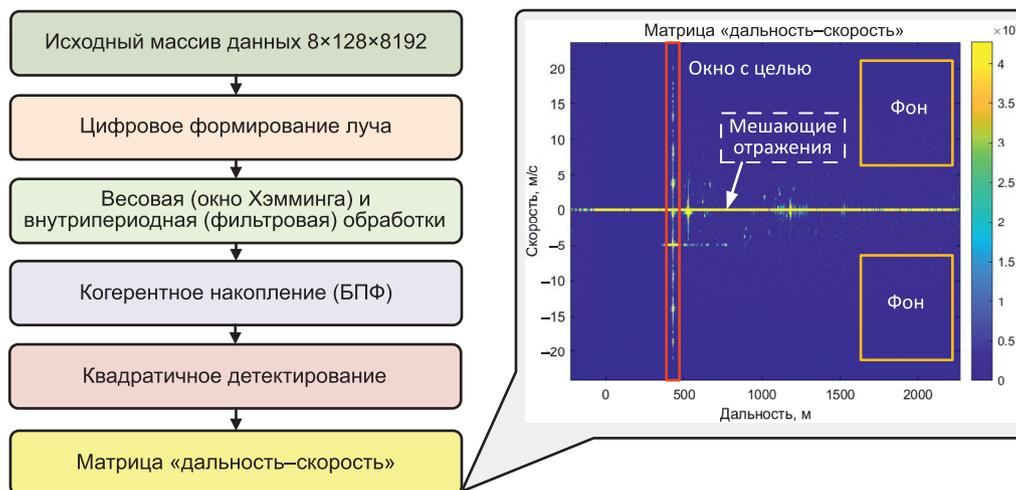


Рис. 2. Структурная схема обработки принятого сигнала  
Fig. 2. Block diagram of the received signal processing

На рис. 3 представлены примеры СРЛП для МБЛА DJI Matrice 300 и CW-10.

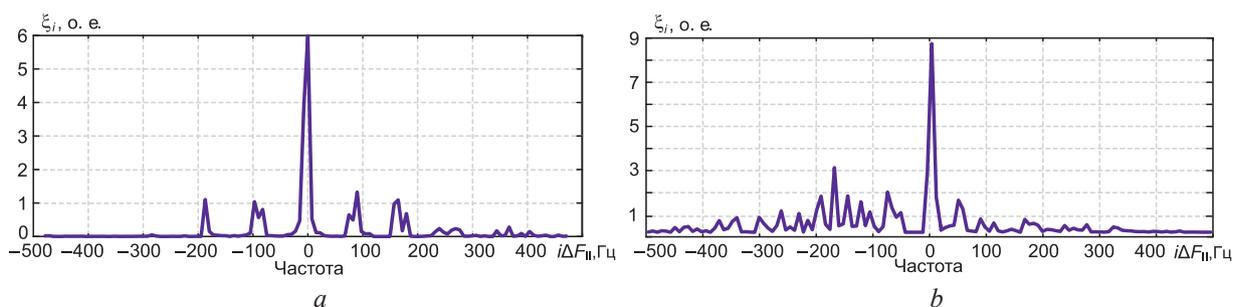


Рис. 3. Спектральный радиолокационный портрет для малоразмерного беспилотного летательного аппарата: *a* – DJI Matrice 300 (мультикоптерный); *b* – CW-10 (гибридный)

Fig. 3. Spectral radar profile for a small unmanned aerial vehicle:  
*a* – DJI Matrice 300 (multicopter); *b* – CW-10 (hybrid)

В СРЛП DJI Matrice 300 (рис. 3, *a*) наблюдаются симметричные боковые компоненты ВМ на частотах  $\pm 90$  Гц и кратных им  $\pm 180$  Гц, соответствующие частоте вращения пропеллеров (около 45 Гц). В СРЛП CW-10 (рис. 3, *b*) наблюдаются симметричные относительно планера состав-

ляющие на частотах  $\pm 50$  Гц и несимметричная гребенчатая структура, отражающая колебания элементов конструкции. Отличительные особенности спектра, зависящие от кинематических и конструктивных характеристик МБЛА, могут быть количественно описаны с помощью классификационных признаков, формируемых на основе анализа СРЛП. Переход к следующему этапу обработки заключается в формализации этих признаков и их анализе в интересах решения задачи классификации.

### Выделение классификационных признаков

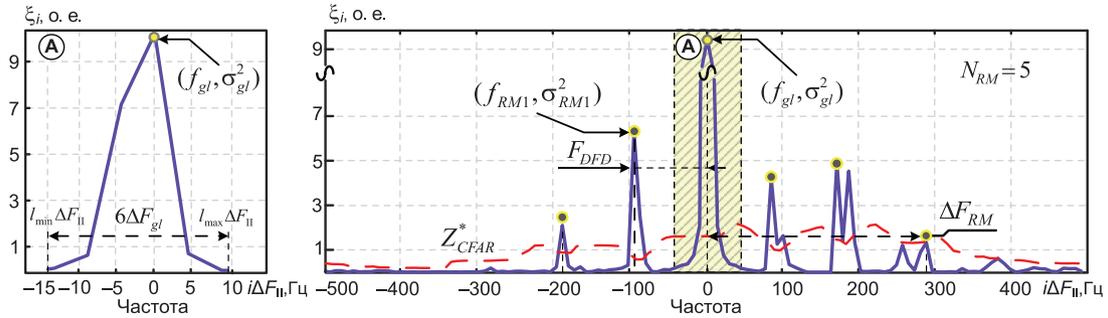
В результате обзора [1–5] были выбраны классификационные признаки МБЛА, которые могут быть рассчитаны на основе СРЛП (табл. 2).

**Таблица 2.** Сигнальные классификационные признаки малоразмерных беспилотных летательных аппаратов  
**Table 2.** Signal classification features of a small unmanned aerial vehicles

Название	Формула для расчета	Физический смысл
Ширина спектра планерной составляющей [3]	$\Delta F_{bd} = \sqrt{\frac{1}{P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} (i\Delta F_{II} - f_{bd})^2 \xi_i},$ <p>где <math>P_{norm} = \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} \xi_i</math> – нормирующий коэффициент; <math>f_{bd}</math> – частота планерной составляющей в СРЛП</p>	Габариты, ракурс МБЛА
Коэффициент асимметрии планерной составляющей [3]	$S_{bd} = \frac{1}{\Delta F_{bd}^3 P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} [(i\Delta F_{II} - f_{bd})^3 \xi_i]$	Симметричность планерной составляющей
Экцесс планерной составляющей [3]	$Kur = \frac{1}{\Delta F_{bd}^4 P_{norm}} \sum_{i=l_{min}}^{l_{max}} [(i\Delta F_{II} - f_{bd})^4 \xi_i]$	«Островершинность» планерной составляющей
Спектральная энтропия [4]	$H_S = - \sum_{i=0}^{N_{fft}} \bar{\xi}_i \log_2(\bar{\xi}_i),$ <p>где <math>\bar{\xi}_i = \xi_i / \sum_{i=1}^{N_{fft}} \xi_i</math> – <math>i</math>-й отсчет нормированного СРЛП</p>	Степень упорядоченности мощности в спектре
Коэффициент энергии цели [5]	$R_\sigma = \sigma_{bd}^2 / \sigma_{RM1}^2$ , где $\sigma_{bd}^2$ – мощность планерной составляющей; $\sigma_{RM1}^2$ – мощность первой спектральной составляющей ВМ в СРЛП	Вклад ВМ в мощность принятого сигнала
Разность частот планерной составляющей и ближайшей составляющей ВМ [5]	$F_{DFD} =   f_{bd} - f_{RM1}  $ , где $f_{RM1}$ – частота ближайшей к планерной спектральной составляющей ВМ	Скорость вращения пропеллеров
Ширина спектра ВМ [1]	$\Delta F_{RM} =  f_{bd} - f_{RM\_max} $ , где $f_{RM\_max}$ – максимальная частота спектральной составляющей ВМ	Длина пропеллеров и скорость вращения пропеллеров
Число модуляционных составляющих [5]	$N_{RM}$ определяется путем подсчета количества областей, превысивших адаптивный порог $Z_{CFAR}^*$	Интенсивность ВМ и ракурс
Усредненный интервал следования спектральных составляющих ВМ [5]	$\Delta \bar{F}$ определяется путем анализа автокорреляционной функции СРЛП с компенсированной планерной составляющей	Скорость вращения пропеллеров

В соответствии с физическим смыслом сигнальные классификационные признаки могут быть разделены на две группы: признаки планерной составляющей ( $\Delta F_{bd}$ ,  $S_{bd}$ ,  $Kur$ ), описывающие спектральную форму отражений от корпуса, и признаки ВМ ( $H_S$ ,  $R_\sigma$ ,  $F_{DFD}$ ,  $\Delta F_{RM}$ ,  $N_{RM}$ ,  $\Delta \bar{F}$ ), характеризующие структуру отражений от вращающихся элементов конструкции объекта.

На рис. 4 представлен внешний вид СРЛП МБЛА DJI Matrice 300 с пояснением извлекаемых параметров для расчета сигнальных классификационных признаков.



**Рис. 4.** Внешний вид спектрального радиолокационного портрета малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Matrice 300 с пояснением классификационных признаков

**Fig. 4.** Spectral radar profile of the DJI Matrice 300 small unmanned aerial vehicle with an explanation of its classification features

Исходный набор экспериментальных данных после этапов обработки принятого сигнала, формирования СРЛП и выделения признаков представляется в виде совокупности пар

$$\left\{ (\mathbf{x}_n, A_{i,n}) \right\}_{n=1}^N, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}_n = \left\| \Delta F_{bd}^{(n)} S_{bd}^{(n)} Kur^{(n)} H_S^{(n)} R_\sigma^{(n)} F_{DFD}^{(n)} \Delta F_{RM}^{(n)} N_{RM}^{(n)} \Delta \bar{F}^{(n)} \right\|^T$  – вектор значений классификационных признаков, полученный по  $n$ -й реализации принятого сигнала;  $A_{i,n}$  – тип  $i$ -го МБЛА, наблюдаемого в  $n$ -й реализации принятого сигнала;  $N = \sum_{i=1}^M N_i$  – общее количество реализаций, используемых для последующего анализа;  $N_i$  – объем выборки МБЛА  $i$ -го типа.

Введенное представление (1) позволяет перейти к анализу информативности выбранных классификационных признаков.

### Анализ признаков

Для количественного анализа информативности выделенных радиолокационных признаков и оценки различий между типами МБЛА использовали набор метрик, включающий критерий Фишера, количество информации и нормированные межклассовые расстояния.

**Критерий Фишера** [6]. Применяется для оценки линейной разделяющей способности признака и определяется как отношение межтиповой дисперсии к внутритиповой

$$F_J(x_k) = \frac{\sum_{i=1}^M N_i (m(x_k | A_i) - m(x_k))^2}{\sum_{i=1}^M N_i \sigma^2(x_k | A_i)}, \quad (2)$$

где  $m(x_k | A_i)$ ,  $\sigma^2(x_k | A_i)$  – среднее значение и дисперсия признака  $x_k$  объекта типа  $A_i$ ;  $m(x_k)$  – общее среднее значение признака  $x_k$ .

**Количество информации** [6]. Используется для оценки общей (в том числе нелинейной) статистической зависимости между признаком и меткой типа и определяется как уменьшение энтропии типа после наблюдения признака. При условии, что параметр  $x_k$  может принимать  $J$  дискретных значений  $x_{kj}$  ( $j = 1 \dots J$ ), информативность  $k$ -го признака относительно множества объектов различных типов определяется по формуле

$$I(x_k) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^J p(x_{kj}, A_i) \log \left( \frac{p(x_{kj}, A_i)}{p(x_{kj}) p(A_i)} \right), \quad (3)$$

где  $p(x_{kj}, A_i)$  – совместное распределение вероятностей значений признака  $x_k$  для  $i$ -го типа  $A_i$ ;  $p(x_{kj})$  – вероятность появления  $j$ -го значения  $k$ -го признака объекта  $i$ -го типа  $A_i$ ;  $p(A_i)$  – априорная вероятность объекта  $i$ -го типа  $A_i$  среди всех  $M$  типов.

**Нормированное межклассовое расстояние** [6]. Для прямой количественной оценки различий между типами МБЛА использовалось нормированное межклассовое расстояние, вычисляемое для каждой пары типов по формуле:

$$D(x_k, A_i, A_m) = |m(x_k | A_i) - m(x_k | A_m)| / \sqrt{\sigma^2(x_k | A_i) + \sigma^2(x_k | A_m)}. \quad (4)$$

Совместное применение изложенных критериев оценки информативности и разделимости признаков (2)–(4) позволяет провести анализ информативности признаков с различных позиций: линейной разделимости, общей статистической зависимости и парных различий между типами. На основании имеющейся совокупности экспериментальных данных (1) для каждого выделенного радиолокационного признака были рассчитаны значения критерия Фишера, количества информации и нормированных межклассовых расстояний между типами МБЛА M300 (DJI Matrice 300), M30T (DJI Matrice 30T) и CW-10 (табл. 3).

**Таблица 3.** Оценка информативности сигнальных классификационных признаков малоразмерных беспилотных летательных аппаратов

**Table 3.** Evaluation of the information content of signal classification features of small unmanned aerial vehicles

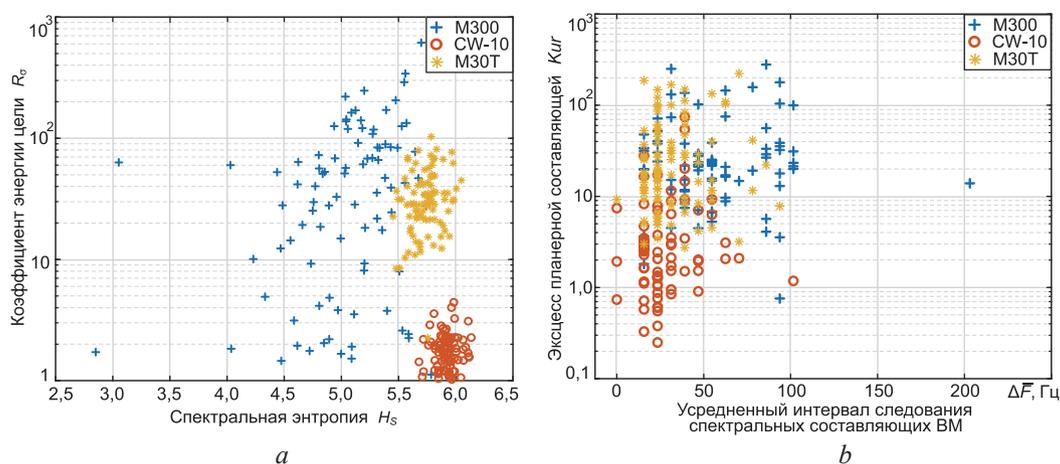
Признак ( $x_k$ )	$F_J(x_k)$	$I(x_k)$	$D(x_k, M300, M30T)$	$D(x_k, M300, CW-10)$	$D(x_k, M30T, CW-10)$
$\Delta F_{bd}$	0,112	0,223	0,64	0,009	0,50
$S_{bd}$	0,022	0,152	0,04	0,240	0,25
$Kur$	0,151	0,155	0,01	0,640	0,72
$H_S$	1,610	0,916	1,38	1,760	1,13
$R_\sigma$	0,244	0,174	0,35	0,720	1,65
$F_{DFD}$	0,049	0,270	0,44	0,210	0,16
$\Delta F_{RM}$	0,015	0,260	0,08	0,130	0,21
$N_{RM}$	0,064	0,085	0,42	0,340	0,03
$\Delta \bar{F}$	0,290	0,211	0,64	0,810	0,21

Проведенный количественный анализ информативности сигнальных классификационных признаков показал, что наибольшей разделяющей способностью обладают признаки, связанные с проявлением ВМ отраженного сигнала (спектральная энтропия  $H_S$ , коэффициент энергии цели  $R_\sigma$  и усредненный интервал следования спектральных составляющих ВМ  $\Delta \bar{F}$ ). В группе признаков, характеризующих планерную составляющую СРЛП, наибольшей информативностью обладает параметр эксцесса  $Kur$ .

Для наглядной оценки распределения наиболее информативных признаков и подтверждения полученных численных оценок были построены попарные диаграммы рассеяния для выбранных комбинаций признаков. Каждая точка на диаграммах соответствует оценке признака, полученной по одной реализации СРЛП, при этом типы МБЛА (DJI Matrice 300, Matrice 30T, CW-10) обозначены цветом и формой маркера. На рис. 5 представлены попарные диаграммы рассеяния с использованием признаков  $H_S$ ,  $R_\sigma$ ,  $\Delta \bar{F}$  и  $Kur$ .

По совокупности метрик наибольшей информативностью обладает признак  $H_S$ , для которого получены максимальные значения критерия Фишера  $F_J = 1,61$  и информативности  $I = 0,916$ , существенно превосходящие показатели остальных признаков; межклассовые расстояния для данного признака  $D = 1,3–1,8$  подтверждают его высокую дискриминационную способность при разделении мультикоптерных МБЛА (DJI Matrice 300, Matrice 30T) и гибридного аппарата CW-10. Для признаков  $R_\sigma$  и  $\Delta \bar{F}$  значения  $F_J = 0,24–0,29$  и  $I = 0,17–0,21$  обеспечивают уверенное разделение пар «мультикоптер–гибридный беспилотный летательный аппарат» ( $D = 0,81–1,65$ ) при существенно меньших расстояниях между мультикоптерными платформами ( $D = 0,64$ ), что отражает сходство их микродоплеровских характеристик. Для планерного признака  $Kur$  получены  $F_J = 0,15$  и  $I = 0,16$  при межклассовых расстояниях  $D = 0,64–0,72$  для мультикоптеров и CW-10 и практически нулевом расстоянии между мультикоптерами ( $D = 0,01$ ).

Таким образом, наибольшую разделяющую способность при радиолокационном распознавании МБЛА обеспечивают признаки, характеризующие микродоплеровскую ВМ отраженного сигнала ( $H_S$ ,  $R_\sigma$  и  $\Delta \bar{F}$ ), которые позволяют разделять мультикоптерные и гибридные типы МБЛА, тогда как признаки планерной составляющей обладают меньшей информативностью и могут использоваться преимущественно для уточняющей классификации.



**Рис. 5.** Внешний вид попарных диаграмм рассеяния малоразмерных беспилотных летательных аппаратов: *a* – признаки  $R_{\sigma}$  и  $H_S$ ; *b* – признаки  $K_{ur}$  и  $\Delta\bar{F}$   
**Fig. 5.** Appearance of pairwise scatterplots of small unmanned aerial vehicles: *a* – features  $R_{\sigma}$  and  $H_S$ ; *b* – features  $K_{ur}$  and  $\Delta\bar{F}$

### Заключение

1. Разработан подход к анализу сигнальных классификационных признаков радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе реальных записей импульсного радара  $S$ -диапазона. Проведена обработка экспериментальных данных и сформированы спектральные радиолокационные портреты различных типов малоразмерных беспилотных летательных аппаратов, полученные в условиях, приближенных к практической эксплуатации радиолокационных систем обнаружения и сопровождения.

2. Выполнены выделение и формализация набора физически интерпретируемых классификационных признаков, отражающих как планерную составляющую отраженного сигнала, так и эффекты вторичной модуляции. Для оценки информативности выделенных признаков проведен комплексный количественный анализ с использованием критерия Фишера, количества информации и нормированных межклассовых расстояний.

3. Установлено, что наибольшей разделяющей способностью обладают признаки, связанные с микродоплеровскими эффектами, в частности, спектральная энтропия, соотношение энергий планерной и модуляционной составляющих, а также усредненная частота микродоплеровских колебаний. Продемонстрировано, что признаки планерной составляющей обладают меньшей информативностью, однако могут использоваться для уточняющей классификации внутри группы мультикоптерных аппаратов.

4. Представленные результаты определяют направления дальнейших исследований, связанные с анализом сигнальных признаков в других частотных диапазонах, а также расширением признакового пространства за счет включения траекторных характеристик движения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов. Перспективным направлением развития работы являются синтез и реализация устройства радиолокационного распознавания малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе методов машинного обучения с использованием сформированного набора информативных признаков.

### Список литературы

1. Гейстер, С. Р. Адаптивное обнаружение-распознавание с селекцией помех по спектральным портретам / С. Р. Гейстер. Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2000.
2. Ground-Based Radar Detection Dataset of “Low Slow Small” Unmanned Aerial Vehicles Under Simple Field Background Conditions / Q. Lin [et al.] // Journal of Signal Processing. 2024. Vol. 40, No 11. P. 2095–2104. <https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.014>.
3. Kretzschmar, R. A Comparison of Feature Sets and Neural Network Classifiers on a Bird Removal Approach for Wind Profiler Data / R. Kretzschmar, N. B. Karayiannis, H. Richner // Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000). 2000. Vol. 2. P. 279–284. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.857909>.

4. Oh, B.-S. A UAV Classification System Based on FMCW Radar Micro-Doppler Signature Analysis / B.-S. Oh, X. Guo, Z. Lin // *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 132. P. 239–255. [https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2019.05.007](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.007).
5. Exploring Radar Micro-Doppler Signatures for Recognition of Drone Types / J. Yan [et al.] // *Drones*. 2023. Vol. 7, No 4. P. 1–15. [https://doi.org/ 10.3390/drones7040280](https://doi.org/10.3390/drones7040280).
6. Murphy, K. P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective* / K. P. Murphy. Cambridge: MIT Press, 2012.

Поступила 18.01.2026

Принята в печать 10.02.2026

### References

1. Heister S. R. (2000) *Adaptive Detection-Recognition with Interference Selection Based on Spectral Portraits*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ. (in Russian).
2. Lin Q., Qin Z., Jiang L., Wang X., Fan H. (2024) Ground-Based Radar Detection Dataset of “Low Slow Small” Unmanned Aerial Vehicles Under Simple Field Background Conditions. *Journal of Signal Processing*. 40 (11), 2095–2104. [https://doi.org/ 10.12466/xhcl.2024.11.014](https://doi.org/10.12466/xhcl.2024.11.014).
3. Kretzschmar R., Karayiannis N. B., Richner H. (2000) A Comparison of Feature Sets and Neural Network Classifiers on a Bird Removal Approach for Wind Profiler Data. *Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN 2000)*. 2, 279–284. [https://doi.org/ 10.1109/IJCNN.2000.857909](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2000.857909).
4. Oh B.-S., Guo X., Lin Z. (2019) A UAV Classification System Based on FMCW Radar Micro-Doppler Signature Analysis. *Expert Systems with Applications*. 2019. 132, 239–255. [https://doi.org/ 10.1016/j.eswa.2019.05.007](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.05.007).
5. Yan J., Hu H., Gong J., Kong D., Li D. (2023) Exploring Radar Micro-Doppler Signatures for Recognition of Drone Types. *Drones*. 7 (4), 1–15. [https://doi.org/ 10.3390/drones7040280](https://doi.org/10.3390/drones7040280).
6. Murphy K. P. (2012) *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. Cambridge, MIT Press Publ.

Received: 18 January 2026

Accepted: 10 February 2026

### Вклад авторов

Храменков А. С. обосновал концепцию исследования, сформулировал идею, цели и задачи исследования, просмотрел подготовленный текст рукописи.

Чиграй В. Г. собрал и систематизировал данные, выполнил моделирование, обобщил и интерпретировал результаты, подготовил текст рукописи и графические материалы.

### Authors' contribution

Khramiankou A. substantiated the research concept, formulated the idea, objectives, and tasks of the study, looked at the prepared text of the manuscript.

Chyhrai V. collected and systematized the data, performed the modeling, generalized and interpreted the results, and prepared the manuscript text and graphical materials.

### Сведения об авторах

**Храменков А. С.**, канд. техн. наук, доц., зам. нач. каф. автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь

**Чиграй В. Г.**, адъюнкт каф. автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь

### Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,  
Минск, просп. Независимости, 220  
Военная академия Республики Беларусь  
Тел.: +375 17 287-42-46  
E-mail: xras.tech@mail.ru  
Храменков Андрей Сергеевич

### Information about the authors

**Khramiankou A.**, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Automatics, Radar-Location and Send-Receive Devices, Military Academy of the Republic of Belarus

**Chyhrai V.**, Adjunct of the Department of Automatics, Radar-Location and Send-Receive Devices, Military Academy of the Republic of Belarus

### Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti Ave., 220  
Military Academy of the Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 287-42-46  
E-mail: xras.tech@mail.ru  
Khramiankou Andrei