

УДК 004.413:621.396.969.3

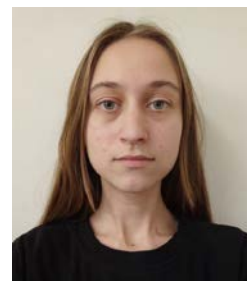
ПРИЗНАКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ



В. Л. Кожуховский
Инженер-программист 1
категории компании ОАО «КБ
Радар», магистр
koozhiihoyski@gmail.com



А. С. Солонар
Старший научный
сотрудник компании ОАО
«КБ Радар», кандидат
технических наук, доцент
andssnew@yandex.ru



А. Ю. Брынчикова
Инженер-программист 2
категории компании ОАО «КБ
Радар»
brin4ikova@yandex.by

В. Л. Кожуховский

Окончил Белорусский Государственный Университет. Область научных интересов связана с разработкой алгоритмов обнаружения опасных баллистических объектов на внеатмосферном участке полета.

А. С. Солонар

Окончил Военную Академию Республики Беларусь. Область научных интересов связана с автоматизацией процесса обработки радиолокационной информации.

А. Ю. Брынчикова

Окончила Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов выделения радиолокационных признаков для распознавания баллистических объектов разного класса.

Аннотация. Выполнен анализ существующих методов и признаков радиолокационного распознавания баллистических объектов. Разработано ПО позволяющее проводить моделирование алгоритмов распознавания основанных на радиолокационных признаках баллистических объектов.

Ключевые слова: Псевдо-моменты Цернике, «значащие» отсчеты, коэффициент корреляции, дисперсия.

Введение. В современных условиях развития аэрокосмических технологий и средств космического нападения остро возникает вопрос выделения опасных объектов из группы наблюдаемых объектов на внеатмосферном участке траектории их полета. Эта задача решается при помощи различных средств наблюдения, в том числе, при помощи многофункциональных радиолокационных станций дальнего наблюдения. В этих станциях космические объекты наблюдаются на дальностях от 1000 до 10000 км. В качестве инструментария разделения объектов по дальномерному портрету используется многочастотный зондирующий сигнал с эквивалентной шириной спектра от 300 до 1000 МГц. Повышение разрешающей способности до 10-ков сантиметров повышает качество различения опасных объектов на фоне других объектов, однако, высокая степень подобия пространственного движения и габаритные размеры объектов затрудняют решение задачи распознавания. Этот факт позволяет говорить об необходимости выделения группы радиолокационных признаков баллистических объектов для эффективного их обнаружения на дальних рубежах обороны.

Выбор признаков распознавания баллистических объектов. Эффективность радиолокационного распознавания баллистических объектов (БО) во многом определяется выбором информативных признаков, позволяющих с высокой точностью дифференцировать цели. В рамках данного исследования разработаны и реализованы признаки, обеспечивающие эффективное разделение БО на классы «Боеголовка (RW)», «Ложная цель (Decoy)» и «Сфера (Sphere)».

Процесс выбора признаков базировался на анализе статистических свойств параметров радиолокационных портретов и их динамики изменения. Основной целью являлось выделение параметров, обладающих максимальной контрастностью при минимальной чувствительности к шумам наблюдения и вариативности исходных данных.

По результатам анализа известной литературы [1, 7, 10] и результатов математического моделирования динамики полета БО и выделения их портретов был выбран следующий набор радиолокационных признаков:

1 Диапазон разброса оценок ширины корреляционных функций «значащих» отсчетов дальномерного портрета буфера размером 32 элемента (обозначение – D_width).

2 Среднее значение ширины корреляционных функций (ширины энергетических спектров) «значащих» отсчетов дальномерного портрета в окне 32 интервала наблюдения (обозначение – $width$).

3 Среднее значение дисперсии «значащих» отсчетов дальномерного портрета в окне 32 интервала наблюдения (обозначение – $disper$).

4 Коэффициент корреляции текущего дальномерного портрета с его усредненным значением в буфере размером 32 элемента (обозначение – $covar$).

5 Угол в многомерном пространстве отсчетов дальномерного портрета между точками текущего дальномерного портрета с его усредненным значением в буфере размером 32 элемента (обозначение – $tetta$).

6 Псевдо-моменты Цернике «значащих» отсчетов дальномерного портрета буфера размером 32 элемента.

Оценка первых пяти радиолокационных признаков. Боеголовки и сферы по своим баллистическим параметрам относятся к стабилизированным БО, ложные цели являются нестабилизированными БО. На рисунке 1 приведен парный график первых пяти признаков распознавания для стабилизированных и нестабилизированных БО.

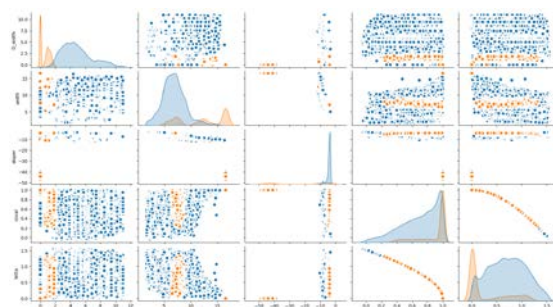


Рисунок 1. Парный график признаков распознавания для стабилизированных и нестабилизированных БО

Признак 3 обладает относительно высокой корреляцией со всеми остальными признаками (рисунок 1), между признаками 4 и 5 наблюдается линейная зависимость, признаки 1 и 2 сильно пересекаются между собой. Наиболее контрастными являются признаки 1 и 5 для различения стабилизированных и нестабилизированных БО. Исходя из приведенных рассуждений для селекции стабилизированных и нестабилизированных БО предлагается использовать двумерное пространство с признаками 1 и 5.

При отборе признаков селекции БГ от сфер был построен парный график признаков распознавания (рисунок 2), который показывает взаимосвязь между всеми возможными парами признаков распознавания этих двух типов объектов. Помимо приведенных выше

признаков использовались еще два дополнительных: число «значащих» отсчетов дальномерного портрета (обозначение – `nonzero_buffer`); среднее значение дисперсии «значащих» отсчетов за все время наблюдения (обозначение – `all_disp`).

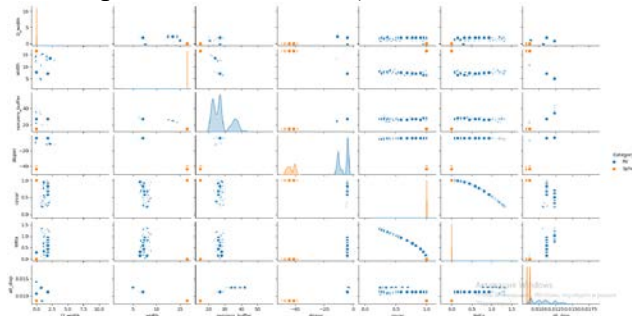


Рисунок 2. Парный график признаков разделения БГ и ложных целей сферической формы

Исходя из результатов, отображенных на рисунках 1,2 можно судить, что для селекции БГ на фоне сфер необходимо использовать одномерное пространство признаков – среднее значение дисперсии «значащих» отсчетов дальномерного портрета в окне 32 интервалов наблюдения. Для селекции стабилизированных и нестабилизированных БО использовать двумерное пространство с признаками [8,9] – угол в многомерном пространстве отсчетов дальномерного портрета между точками текущего дальномерного портрета с его усредненным значением в буфере 32; диапазон разброса оценок ширины корреляционных функций «значащих» отсчетов дальномерного портрета буфера 32.

Псевдо-моменты Цернике. В публикациях [2-6] посвященных классификации баллистических объектов, предлагается использовать псевдо-моментов Цернике (pZ-моментов). По утверждениям авторов, данные признаки демонстрируют высокую эффективность за счет устойчивости к геометрическим преобразованиям и шумам наблюдения, к их преимуществам относят:

1 Инвариантность к повороту, масштабу и смещению. pZ-моменты позволяют формировать признаки, которые не зависят от ориентации объекта, его размеров и положения в пространстве. Это критически важно в условиях изменяющихся траекторий и различных углов обзора РЛС.

2 Высокая информативность признаков. Преобразование высокочастотного радиолокационного профиля цели (HRRP) с помощью обратного преобразования Радона (IRT) позволяет получить двумерное представление объекта, содержащее его пространственную структуру и динамические характеристики движения. Из данного представления извлекаются pZ-моменты, обладающие высокой дискриминирующей способностью.

3 Устойчивость к микродвижениям целей. В отличие от традиционных методов, pZ-моменты позволяют минимизировать влияние случайных вариаций и шумов, возникающих из-за прецессии, нутации и вращения объектов.

4 Эффективность в условиях низкого уровня сигнала. Благодаря свойству накопления энергии в обратном преобразовании Радона, метод pZ-моментов позволяет уверенно классифицировать объекты даже при низком сигнал-шумовом отношении (SNR).

К недостаткам и ограничениям признаков псевдо-моментов Цернике относят:

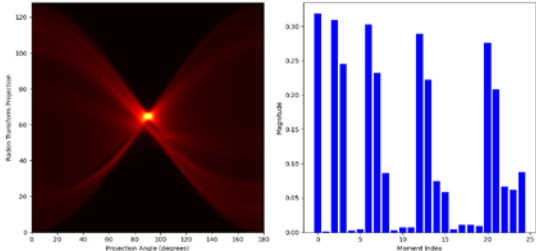
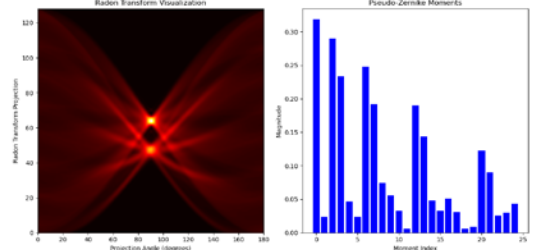
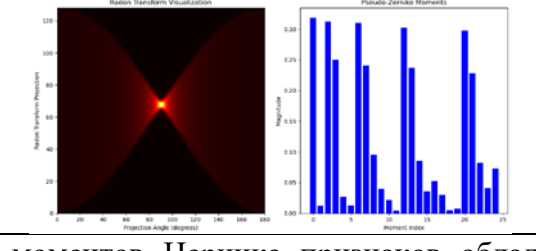
1 Высокая вычислительная сложность. Вычисление pZ-моментов требует значительных ресурсов, особенно при использовании их высоких порядков. Это может быть критичным в системах реального времени с ограниченными вычислительными мощностями.

2 Чувствительность к качеству входных данных. Хотя метод устойчив к микродвижениям, значительные искажения HRRP (например, вызванные помехами, джаммингом или ошибками измерений) могут повлиять на точность распознавания.

3 Зависимость от параметров РЛС. Оптимальность работы алгоритма рZ-моментов может зависеть от характеристик радиолокационной системы, таких как частотный диапазон, разрешающая способность и поляризация сигнала.

При проведении исследований методом математического моделирования были получены псевдо-моментов Цернике для набора из 64 БО. Для каждого из объектов были рассчитаны прямые и обратные преобразования Радона и 25 моментов Цернике. Пример полученных результатов для трех типовых БО – боеголовки, сферы и ложной цели представлен в таблице 1.

Таблица 1. Преобразование Радона и соответствующие псевдо-моменты Цернике

БО – DECOY, форма – «Конус». Вес – 16 кг. Длина – 3 м., радиус – 0.15-0.5 м. Скорость вращения – 24.8 град/сек.	
БО – RW, форма – «Конус». Вес – 700 кг. Длина – 3.44 м., радиус – 0.06-0.6 м. Скорость вращения – 1003 град/сек.	
БО – SPHERE, форма – «Шар». Вес – 0.1 кг. Радиус – 0.5 м.	

С целью выявления из основных моментов Цернике признаков обладающих минимальной корреляцией между собой и обеспечивающих максимальную контрастность была рассчитана ниже таблица корреляции, см. рисунок 3.

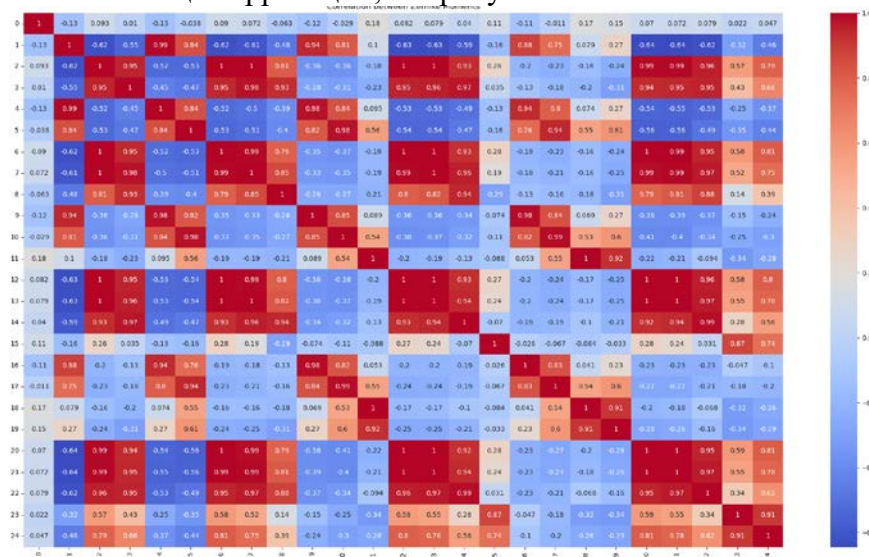


Рисунок 3. Таблица корреляции между псевдо-моментами Цернике

Для выбора наиболее эффективных моментов Цернике использовался коэффициент разделимости:

$$F_j = \frac{(\mu_{RW,j} - \mu_{Decoy,j})^2}{\sigma_{RW,j}^2 + \sigma_{Decoy,j}^2},$$

где $\mu_{RW,j}$ – среднее значение признака j для класса RW ,

$\mu_{Decoy,j}$ – среднее значение признака j для класса $Decoy$,

$\sigma_{RW,j}^2$ – дисперсия признака j в классе RW ,

$\sigma_{Decoy,j}^2$ – Дисперсия признака j в классе $Decoy$.

Результаты анализа коэффициента разделимости (Fisher Score) моментов Цернике представлены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициенты разделимости для моментов Цернике.

Таблица 2. Коэффициенты разделимости для моментов Дюринге.													
M Numb er	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Fisher Scores	0.11	0.03	0.19	0.17	0.11	0.1	0.1	0.1	0.1	0.35	0.47	0.2	
	411	5960	3930	5896	3530	80	87	95	73	7338	6428	01	
	751	66	33	92	89	97	67	51	74	83	1	51	
						15	77	33	01			25	
						2	7	2				1	
M Numb er	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Fisher Scores	0.19	0.19	0.20	0.05	0.68	0.8	0.2	0.3	0.1	0.20	0.23	0.1	0.1
	948	7207	7590	4602	4742	00	17	86	97	7383	6157	25	43
	478	95	93	82	11	46	14	76	32	33	86	41	66
						19	50	89	62			22	69
						1	5	9	6			2	

Коэффициент *Fisher Score* показывает, насколько различаются RW и $Decoy$ по каждому моменту. Чем выше значение, тем лучше этот момент различает классы. Моменты с индексами 17, 18 обладают наибольшей контрастностью. Они могут быть основными признаками для классификации.

Заключение. В данной работе рассмотрены признаки радиолокационного распознавания баллистических объектов (БО) на внеатмосферном участке траектории их полета. Проведенный анализ показал, что выбор информативных признаков является ключевым фактором для эффективного разделения объектов на классы «Боеголовка (RW)», «Ложная цель ($Decoy$)» и «Сфера ($Sphere$)».

Разработанный набор признаков на основе дальномерных портретов БО, включающий параметры корреляции, дисперсии и углов в многомерном пространстве, позволил отобрать двумерное пространство признаков для селекции стабилизированных и нестабилизированных БО. Полученный набор признаков подходит для применения алгоритмов машинного обучения решая при этом основную задачу – классификации баллистических объектов.

Были рассмотрены псевдо-моменты Цернике (pZ -моментов), полученные после обратного преобразования Радона. Данные признаки обеспечивают высокую устойчивость к геометрическим преобразованиям и шумам, что делает его перспективным для применения в системах радиолокационного наблюдения. Расчет коэффициента разделимости (*Fisher Score*) позволил выявить наиболее значимые моменты, обеспечивающие наибольшую дискриминационную способность. Полученный набор псевдо-моментов Цернике при решении задачи классификации БО можно легко

использовать в методах машинного обучения, а полученные портеры на основе преобразования Радона можно использовать для обучения нейронных сетей, решающих ту же задачу классификации.

Таким образом, предложенные признаки позволяют обеспечить высокую контрастность результатов наблюдений стабилизированных и нестабилизированных БО по результатам радиолокационного наблюдения.

Список литературы

- [1] A.M. Sessler, J.M. Cornwall, B. Dietz, S. Fetter, S. Frankel, R.L. Garwin, K. Gottfried, L. Gronlund, G.N. Lewis, T.A. Postol, and D.C. Wright, "Countermeasure: A technical evaluation of the operational effectiveness of the planned us national missile defense system," Tech. Rep., Union of Concerned Scientists MIT Security Studies Program, 2000. – 420p.
- [2] Y. Hua, J. Guo, and H. Zhao, "The usage of inverse-radon transformation in isar imaging," in 2014 IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering, Dec 2014 – pp.167-170.
- [3] C. Clemente, L. Pallotta, I. Proudler, A. DeMaio, J.J. Soraghan, and A. Farina, "Pseudo-zernike-based multi-pass automatic target recognition from multi-channel synthetic aperture radar," Radar, Sonar Navigation, IET, vol.9, no.4, 2015. – pp. 457-466.
- [4] H. Gao, L. Xie, S. Wen, and Y. Kuang, "Micro-doppler signature extraction from ballistic target with micro-motions," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 46, no.4, Oct 2010 – pp. 969–982.
- [5] M.E. Clark, "High range resolution techniques for ballistic missile targets," Tech. Rep., British Aerospace Land and Sea Systems, Newport Road, Cowes, Isle of Wight, PO318PF, United Kingdom, British Aerospace epic. 1999 – 860p.
- [6] S.R. Deans, The Radon Transform and Some of Its Applications, Dover Books on Mathematics Series. Dover Publications, 2007 – 167p.
- [7] Paulraj, A.; Roy, R.; Kailath, T., Estimation Of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques - ESPRIT, *Nineteenth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers*, 1985. – pp. 83–89.
- [8] L. Li-hua, W. Zhuang, and H. Wei-dong, "Precession period extraction of ballistic missile based on radar measurement," in 2006 CIE International Conference on Radar, Oct 2006 – 227p.
- [9] Zhuo, Z.Y.; Zhou, Y.; Du, L.; Ren, K.; Li, Y. A Noise Robust Micro-Range Estimation Method for Precession Cone-Shaped Targets. *Remote Sens.*, 2021 – 1820p.
- [10] Тагаев Т. И., Музафаров Д. А., Мохорт Д. Ю., Космачев В. М., Определение оптимальных тактико-технических характеристик антенной решетки для различения алгоритмом сверхразрешения ESPRIT целей, разнесенных на малое угловое расстояние // Антенны и распространение радиоволн. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Санкт-Петербург), 2021. — С. 96-98.

Авторский вклад

Кожуховский Владислав Леонидович – реализация и тестирование алгоритмов выделения признаков распознавания баллистических объектов. Исследование эффективности применения псевдо-моментов Цернике на радиолокационных портретах баллистических объектов различного класса.

Солонар Андрей Сергеевич – руководство исследованием, постановка задачи для исследования, проведение совместных исследований.

Брынчикова Анастасия Юрьевна – разработка метода выделения радиолокационных признаков для распознавания баллистических объектов, тестирование группы отобранных признаков на баллистических объектах различного класса.

FEATURES OF RADAR RECOGNITION OF BALLISTIC OBJECTS

V. L. Kozhuhovsky

Software engineer, 1st category,
ISC "KB Radar", master's
degree

A. S. Solonar

Senior researcher, ISC "KB
Radar", PhD in technical
sciences, Associate professor

A. Yu. Brynchikova

Software engineer, 2nd
category, ISC "KB Radar"

Abstract. This article analyzes existing methods and features of radar recognition of ballistic objects. A software system has been developed that allows the simulation of recognition algorithms based on radar features of ballistic objects.

Keywords: Zernike pseudo-moments, "significant" samples, correlation coefficient, variance.