

УДК 621.396:681.34

А.В. ТОЦКИЙ<sup>1</sup>, П.А. МОЛЧАНОВ<sup>2</sup>, Г.И. ХЛОПОВ<sup>3</sup>, В.Е. МОРОЗОВ<sup>3</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина<sup>2</sup>Технологический университет Тампере, Финляндия<sup>3</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков

## РАДИОЛОКАЦИОННАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Предложен способ выделения новых информативных признаков из частотно-временного распределения сигналов обратного рассеяния подвижными наземными объектами в задачах распознавания и классификации радиолокационных образов. Бикепстральные коэффициенты, рассчитываемые из наблюдений кратковременных оценок биспектров нестационарных сигналов обратного рассеяния, использованы в качестве информативных признаков в радиолокационной автоматической системе классификации (РАСК) подвижных наземных объектов. Исследованы показатели РАСК на основе модели гауссовой смеси и правила принятия решения по максимуму правдоподобия. Представлены результаты экспериментальных исследований, выполненных на доплеровском радиолокаторе миллиметрового диапазона длин волн. Приведены результаты расчетов вероятностей классификации одиночного пешехода и группы пешеходов, движущихся на фоне помех от растительности.

**Ключевые слова:** радиолокация, радиолокационная автоматическая система классификации, частотно-временное распределение, биспектр, бикепстральные коэффициенты.

### Введение

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований автоматической системы распознавания и классификации подвижных наземных объектов по их радиолокационным портретам, формируемым в виде изменений мгновенных микро-доплеровских частот сигналов обратного рассеяния в частотно-временной области. Частотно-временные распределения (ЧВР) широко используются в современных радиолокационных системах наблюдения за подвижными радиолокационными объектами [1 – 5]. Авторы данных работ используют для решения задач распознавания и классификации подвижных наземных радиолокационных объектов спектрограммы, т.е. ЧВР как функцию распределения энергии сигнала обратного рассеяния от двух переменных – частоты и времени. В полученных таким образом ЧВР информация о частотных и фазовых связях микро-доплеровских компонент безвозвратно утеряна. Поэтому, извлечение в качестве информативных признаков *частотных и фазовых взаимосвязей* из данных ЧВР не представляется возможным. В наших статьях [6 – 9] продемонстрировано, что метод биспектрального оценивания параметров радиолокационных сигналов обратного рассеяния подвижных наземных объектов позволяет выделить связанные по фазе пары гармоник на фоне аддитивного гауссова шума. По сравнению с подходом, когда в оценке спектрограммы присутствуют как вклад сигнала обратного рассея-

ния подвижным радиолокационным объектом, так и вклад помехового радиолокационного фона, метод биспектрального оценивания позволяет подчеркнуть вклад *когерентных*, а значит, однозначно принадлежащих объекту микро-доплеровских гармоник и ослабить вклад в выходном эффекте некогерентных спектральных компонент гауссовой помехи. Метод биспектрального оценивания позволяет улучшить отношение сигнал-шум (ОСШ) в биспектральном радиолокационном портрете по сравнению со спектрограммой, и, следовательно, дает возможность извлечь робастные информативные признаки распознавания и классификации радиолокационных образов в условиях воздействия аддитивных гауссовых помех.

В настоящей статье предложен новый класс информативных признаков в виде совокупности *бикепстральных коэффициентов*, извлекаемых из кратковременных биспектральных оценок доплеровских эхо-сигналов и используемых для решения задачи идентификации и классификации подвижных наземных радиолокационных объектов. Показатели РАСК исследованы при решении одной из наиболее важных и трудных задач классификации одиночного пешехода и группы пешеходов в условиях воздействия радиолокационного фона растительности.

Цель настоящей статьи заключается в сравнении вероятностных показателей классификации подвижных радиолокационных объектов с использованием информативных признаков, содержащихся

в наборе классических кепстральных коэффициентов и в совокупности предлагаемых бикепстральных коэффициентов.

### Постановка задачи и описание метода исследования

Идея предлагаемого подхода основана на свойствах биспектра, которые подробно изложены в работе [10]. В статьях [6 – 7] представлены результаты экспериментальных исследований характеристик сигналов обратного рассеяния движущегося пешехода. Движение данного радиолокационного объекта можно рассматривать как физическое явление, включающее одновременное пространственно-временное перемещение различных частей тела: раскачивающегося при ходьбе с низкой радиальной скоростью торса; поступательно-вращательное размахивание рук с более высокой скоростью, чем раскачивание торса и поступательные движения ног при ходьбе. В результате доплеровская частота, соответствующая поступательному перемещению торса, имеющего максимальную величину эффективной площади рассеяния, оказывается фазо-частотно модулированной микро-доплеровскими фазами и частотами. С помощью метода биспектрального оценивания было экспериментально установлено [7], что маховые движения рук и шаговые движения ног пешехода порождают пары мгновенных микро-доплеровских частот, которые связаны между собой по фазе. Поэтому многокомпонентный фазо-частотно модулированный эхо-сигнал содержит совокупность пространственно-коррелированных вкладов центров обратного рассеяния, распределенных на теле движущегося пешехода. Выделение данных вкладов позволяет получить новые информативные признаки объекта распознавания и классификации.

Поскольку частотный диапазон радиолокационных сигналов обратного рассеяния движущегося пешехода лежит в пределах звукового частотного диапазона, воспользуемся двумя алгоритма биспектрального оценивания [11], [12], которые используют для решения задач распознавания речи. Алгоритм оценивания интегрального биспектра [11] сводится к расчету оценки  $IB(\omega)$  вида

$$IB(\omega) = \frac{1}{K - \omega} \sum_{\omega_1=1}^{K-\omega} |B(\omega, \omega_1)|, \quad (1)$$

где  $\omega = 1, 2, \dots, (K-1)$  – нормированные угловые частоты;  $|B(\omega_1, \omega_2)| = |X(\omega_1)| |X(\omega_2)| |X^*(\omega_1 + \omega_2)|$  – амплитудный биспектр (биамплитуда) эхо-сигнала;  $K$  – ширина окна в кратковременном преобразовании Фурье;  $|X(\omega_1)|$  – амплитудный Фурье-спектр эхо-сигнала; \* означает комплексное сопряжение.

Во втором алгоритме оценивания биспектра [12] выполняются расчет функции  $DFB(\omega)$  вида

$$DFB(\omega) = \frac{1}{F} \sum_{f_2}^F |B(\omega - f_2, f_2)|^{1/3}. \quad (2)$$

Следующие бикепстральные коэффициенты  $CIB(\omega)$  и  $DFB(\omega)$ , рассчитанные по оценкам биспектров (1) и (2), используются в качестве информативных признаков в решаемой задаче классификации

$$CIB(\omega) = |F^{-1} \{\log[IB(\omega)]\}|, \quad (3)$$

$$CDBF(\omega) = |F^{-1} \{\log[DFB(\omega)]\}|, \quad (4)$$

где  $F^{-1} \{\dots\}$  – обратное дискретное преобразование Фурье.

Для решения задачи классификации радиолокационных объектов воспользуемся методом максимума правдоподобия и стохастической моделью гауссовой смеси. Модель гауссовой смеси представляется удобной при аппроксимации функции плотности распределения вероятности (ПРВ) [13] и по нашему мнению и опыту – это один из наиболее удачных подходов, используемых при решении задач распознавания и классификации образов.

Модель гауссовой смеси согласно [13] представим в виде:

$$f(\bar{x}) = \sum_{m=1}^M \pi_m \phi(\bar{x}; \theta_m), \quad (5)$$

где  $\pi_m$  – весовые коэффициенты;  $\phi(\bar{x}; \theta_m)$  – ПРВ произвольной  $m$ -й компоненты;  $\theta_m$  – параметры компонентной ПРВ;  $\bar{x}$  – вектор признаков классификации объекта.

Функция ПРВ произвольной компоненты модели гауссовой смеси в (5) равна

$$\phi(\bar{x}; \theta) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |C|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (\bar{x} - \bar{\mu})^T C^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu})\right], \quad (6)$$

где  $C$  – ковариационная матрица;  $\bar{\mu}$  – вектор средних значений;  $m$  – количество объектов в задаче классификации.

Для уменьшения интервала времени обучения в РАСК теоретически можно использовать только диагональные элементы ковариационной матрицы  $C$ . Однако при этом возможные взаимосвязи, существующие между отдельными элементами матрицы, не учитываются, и это может привести к плохой аппроксимации. Поэтому, мы будем использовать полный набор данных, содержащихся в ковариационной матрице  $C$ .

Для принятия решения о принадлежности объекта к определенному классу воспользуемся следующим правилом, основанным на максимуме функции правдоподобия:

$$\hat{w} = \arg \max_{w=1..W} f(\bar{x}, H_w), \quad (7)$$

где  $f(\bar{x}, H_m)$  – это ПРВ вектора классификации  $\bar{x}$  по отношению к гипотезе  $H_w$ .

Обычно (см. [3, 5, 12]), для оценки показателей классификации базу данных, полученную в результате проведенных измерений, делят на две части, когда одна часть используется в качестве обучающей выборки, а вторая часть – это тестируемая выборка. Недостаток такого подхода заключается в том, что результат может меняться в зависимости от того, какая доля данных отведена под обучение, а какая доля данных – под тестирование.

Для обеспечения требуемой точности классификации радиолокационных объектов воспользуемся методом, который носит название «K-fold Cross-Validation Technique» (KFCVT) [12]. В соответствии с данным методом всю выборку данных, полученную в результате измерений, делят на K одинаковые подвыборки, и K–1 из них на первом шаге обработки используют для обучения, а оставшуюся выборку – для тестирования. Затем процесс деления повторяют K–1 раз для всех K подвыборок теперь используемых каждый раз как тестируемые данные. На финальной стадии K полученных результатов классификации осредняют для получения статистически устойчивой оценки вероятности классификации. Главное преимущество метода KFCVT заключается в том, что вся выборка наблюдений принимает участие, как в процессе обучения, так и в процессе тестирования. Каждая выборка наблюдения использована при тестировании один раз.

Показатели РАСК можно улучшить также с помощью процедуры интегрирования. Сущность данной процедуры заключается в осреднении условных ПРВ (5) перед принятием решения по правилу максимума правдоподобия (7). В результате можно улучшить точность классификации, однако при этом требуется большие временные затраты на наблюдение и обработку.

### Обсуждение результатов эксперимента

Обучающая и тестируемая базы данных были накоплены в результате измерений, выполненных на доплеровском, гомодинном, поляриметрическом радиолокаторе, работающим в режиме непрерывного излучения.

Технические характеристики радиолокатора:

длина волны	8,8 мм;
мощность излучения	15 мВт;
ширина ДН приемной/передающей антенны в плоскости Н и Е	60°;
уровень боковых лепестков	– 24 дБ;
уровень кросс-поляризации	≤ – 30 дБ;
шум-фактор приемника	20,2 дБ;
двухканальный АЦП	16 разрядов;
частота дискретизации	8 кГц.

Три следующие класса радиолокационных объектов участвовали в эксперименте, проведенном осенью 2010 года.

*Одиночный пешеход:*

Человек, идущий к/от радиолокатора.

*Группа пешеходов:*

Два человека, идущих к/от радиолокатора.

*Группа пешеходов:*

Три человека, идущих к/от радиолокатора.

Пешеходы двигались как синхронно, так и асинхронно, а также с размахом рук и с руками, прижатыми к туловищу. Сигналы обратного рассеяния были записаны в виде wav-файлов, полная длительность записей составила 23 минуты. Усредненные величины ОСШ равны 4, 6 и 11 дБ для одиночного пешехода, двух и трех пешеходов соответственно.

Накопление данных в базу данных было выполнено следующим образом. В начальный момент измерений пешеход располагался на удалении в нескольких метрах от радиолокатора. Затем пешеход начинал движение, шагал приблизительно сорок секунд, удаляясь от радиолокатора, останавливался и затем продолжал движение в обратном направлении. Данное передвижение человека/группы людей повторялось несколько раз. Для каждого из выше перечисленных классов объектов были сделаны следующие записи сигналов обратного рассеяния: шесть экспериментов движения радиолокационного объекта от радара и пять экспериментов – к радару. Это позволило сформировать в РАСК выборку K = 11 при использовании метода KFCVT для решения задачи классификации.

Примеры экспериментальных ЧВР одиночного шагающего человека приведены на рис. 1. Как видно из рисунков, помехи в виде радиолокационного фона (обратное рассеяние листвой деревьев и кустарников) на радиолокационных портретах, полученных в соответствии с предлагаемым методом (см. рис. 1б, в), сглажены лучше по сравнению с классической спектрограммой (см. рис. 1а). Микро-доплеровские изменения мгновенной частоты хорошо видны на рисунках 1 б и в.

Для сравнения показателей предлагаемого метода с использованием бикепстральных коэффициентов (3) и (4), были выполнены расчеты вероятностей классификации радиолокационных объектов с использованием классических кепстральных коэффициентов C(ω) вида:

$$C(\omega) = |F^{-1} \{ \log[|X(\omega)|^2] \}^2| \quad (8)$$

Оптимальное число кепстральных (8) и бикепстральных (3) и (4) коэффициентов было определено следующим образом. С одной стороны, если это число мало с точки зрения объема информативных признаков, то вероятность классификации плохая.

С другой стороны, так называемое в задачах математического программирования "проклятие размерности" может возникнуть при выборе чрезмерно большого числа коэффициентов. Поэтому, было выбрано оптимальное число коэффициентов, когда расчет вероятности классификации радиолокационных объектов выполнялся в пределах от одного до пятидесяти процентов от их максимального числа. При этом оптимальное число коэффициентов было определено по величине максимальной вероятности классификации.

Было установлено, что порядок модели гауссовой смеси (5) влияет незначительно на вероятность классификации радиолокационных объектов. Однако с увеличением размерности вектора информативных признаков порядок модели гауссовой смеси уменьшается. В рамках рассматриваемой задачи число векторов-признаков классификации при длительности отрезка записи радиолокационных данных, равной 2 секунды, 18 векторов-признаков использовано для каждого класса для одной реализации по методу KFCVT. При длине отрезка записи радиолокационных данных, равной 16 миллисекундам, 2468 векторов-признаков требуется для каждого класса для одной реализации метода KFCVT. Эмпирически было установлено, что при длительностях отрезков записи обрабатываемых данных, равных 2с, 1с и 512 мс, порядок модели гауссовой смеси равен четырем, а при длительностях 32 и 16 мс – равен трем.

Результаты расчетов вероятности классификации радиолокационных объектов, выраженные в процентах, представлены в таблице 1. Каждая ячейка таблицы лежит на пересечении столбца, соответствующего длине окна кратковременного преобразования Фурье, и строки, соответствующей времени интегрирования. В каждой ячейке приведены результаты расчетов, выполненные по трем рассматриваемым методам извлечения информативных признаков, т.е. по методам (3), (4) и (8).

Максимальные величины вероятности классификации выделены с помощью фоновой заливки в ячейке. Сравнительный анализ данных табл. 1 демонстрирует преимущества биекстральных методов по сравнению с классическим кепстральным методом. Биекстральные методы обеспечивают лучшие показатели классификации при длительности окна кратковременного преобразования Фурье, меньшей 64 мс и времени интегрирования больше, чем 128 мс. Следует отметить, что достигаемый выигрыш ограничен частотным разрешением, величина которого зависит от длины окна кратковременного преобразования Фурье. Рассмотренные в статье непараметрические методы обеспечивают частотное разрешение, равное 63 Гц и 125 Гц при длине окна, равной 32 мс и 16 мс соответственно. Для улучшения частотного разрешения представляется перспективным использование параметрических методов биекстрального оценивания [9].

## Заключение

Исследованы показатели вероятности классификации радиолокационных объектов на основе биекстральных методов и классического кепстрального метода выделения информативных признаков. Устойчивость информативных признаков классификации к воздействию помех экспериментально исследована с помощью доплеровского радиолокатора. Метод максимального правдоподобия и модель гауссовой смеси использованы в радиолокационной автоматической системе классификации подвижных наземных объектов: одиночного пешехода, двух и трех движущихся людей.

Продемонстрированы преимущества метода биекстрального оценивания параметров сигналов обратного рассеяния. Полученные результаты позволяют дать практические рекомендации разработчикам радиолокационных систем наблюдения за подвижными наземными объектами.

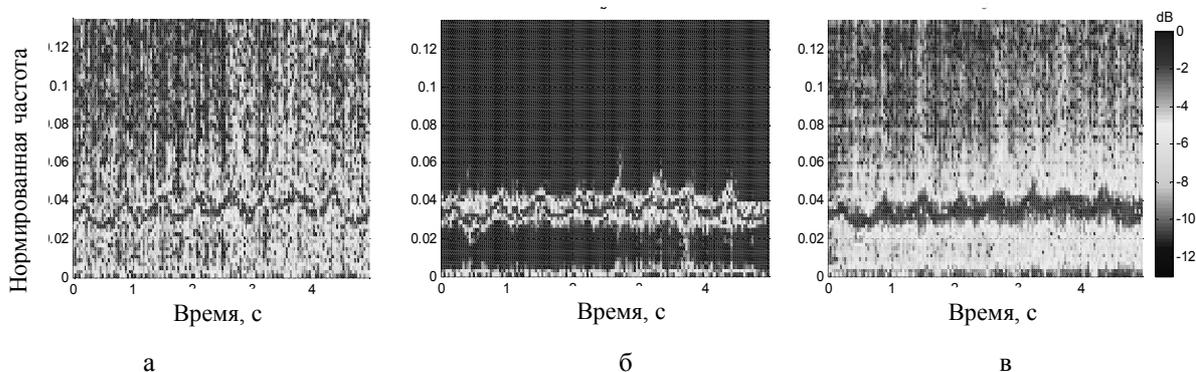


Рис. 1. Частотно-временные радиолокационные портреты, полученные с помощью:  
 а – спектрограммы; б – метода (1); в – метода (2)

Таблиця 1

Вероятность правильной классификации, выраженная в процентах

		Размер окна кратковременного преобразования Фурье															
		16 мс		32 мс		64 мс		128 мс		256 мс		512 мс		1с		2с	
Время интегрирования	2 с	73	79	78	83	83	87	85	87	86	87	87	88	85	87	83	75
			79		83		84		86		86		87		84		78
	1 с	72	76	76	80	80	84	81	83	82	83	82	84	80	84		
			78		81		81		82		81		82		80		
	512 мс	70	74	74	77	76	79	76	79	76	79	77	79				
			76		77		78		77		76		77				
	256 мс	67	70	70	72	71	74	70	73	70	72						
			71		72		72		72		69						
	128 мс	63	65	65	67	65	67	64	66								
			65		67		66		65								
	64 мс	60	61	59	61	60	61										
			60		61		60										
	32 мс	56	57	57	57												
			56		57												
16 мс	53	53															
		52															

Метод обработки

CIB (1)	CDFB (2)
	C (8)

**Литература**

1. Chen V.C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions / V.C. Chen // IET Signa l Processing. – 2008. – Vol. 2, No 3. – P. 291–300.
2. Van Dorp P. Feature-based human motion parameter estimation with rada r/ P. van Dorp, F.C.A. Groen // IET Radar, Sonar and Navigation.– 2008. – Vol. 2, No 2.– P. 135–145.
3. Bilik I. GMM-based target classification for ground surveillance Doppler radar/I. Bilik, J. Tabrikian, A. Cohen// IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2006. – Vol. 42, No 1. – P. 267–277.
4. Smith G.E. Multistatic Micro-Doppler Signature of Personnel / G.E. Smith, K. Woodbridge, C.J. Baker // Proceedings of the 2008 IEEE Radar Conference, Rome. – 2008. – P. 1961–1966.
5. Jahangir M. Robust Doppler classification technique based on hidden Markov models/M. Jahangir, K. Ponting, J. O’Loughlen // Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings. – 2003. – Vol. 150, issue 1. – P. 33–36.
6. Time-frequency analysis of radar backscattered signals using phase coupled frequencies extracted from time-varying bispectrum estimates / A.V. Totsky, I.V. Kurbatov, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, V.Ye. Mo-

- rozov, J.T. Astola, K.O. Egiazarian // Proceedings of 16th International Conf. Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON–2006, Poland, Krakow. – 2006. – Vol. I, May 22-26. – P. 203–206.
- 7 Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals / J. Astola, K. Egiazarian, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, I.V. Kurbatov, V.Ye. Morozov, A.V. Totsky //I EEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57, No 9. – P. 1949–1957.
8. Time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals by using short-time cross-bispectrum estimates / J.T. Astola, K.O. Egiazarian, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, I.V. Kurbatov, V.Ye. Morozov, A.L. Tepluk, A.V. Totsky // Proceedings of International Radar Symposium IRS 2007, 5–7 September. – 2007. – Cologne, Germany. – P. 805–808.
9. Object recognition in ground surveillance Doppler radar by using bispectrum-based time-frequency distributions / P.A. Molchanov, J.T. Astola, K.O. Egiazarian, G.I. Khlopov, V.Ye. Morozov, B.B. Pospelov, A.V. Totsky // Proceedings of International Radar Symposium IRS 2010, 16–18 June, 2010. – Vilnius, Lithuania. – Vol. 2. – P. 1–4.
10. Nikias C.L. Bispectral estimation: A digital signal processing framework / C.L. Nikias, M.R. Ra-

ghuweer // *Proc. IEEE*. – 1987. – Vol. 75, No 7. – P. 869–891.

11 Moreno A. *Integrated polyspectrum on speech recognition* / A. Moreno, M. Rutllan // *Proceedings of Fourth International Conference on Digital Object Identifier ICSLP 96*. – 1996. – Vol. 2. – P. 1281–1284.

12 *Bi-spectral acoustic features for robust speech*

*recognition* / K. Onoe, S. Sato, S. Homma, A. Kobayashi, T. Imai, T. Takagi // *IEICE-Transactions on Information and Systems*. – 2008. – Vol. E91–D, issue 3. – P. 631–634.

13. Duda R.O. *Pattern Classification* / R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. – 2 edition, John Wiley & Sons Inc., 2000. – 680 p.

Поступила в редакцію 4.02.2011

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук В.Г. Сугак, Інститут радіофізики і електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України, Харків.

## РАДІОЛОКАЦІЙНА АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА КЛАСИФІКАЦІЇ РУХОМИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

*О.В. Тоцький, П.О. Молчанов, Г.І. Хлопов, В.Є. Морозов*

Запропоновано засіб виділення нових інформативних ознак з частотно-часового розподілу сигналів зворотного розсіяння рухомими наземними об'єктами у задачах розпізнавання і класифікації радіолокаційних образів. Біспектральні коефіцієнти, які розраховано із спостережень короткочасових оцінок біспектрів нестационарних сигналів зворотного розсіяння, використано як інформативні ознаки у радіолокаційній автоматичній системі класифікації (РАСК) рухомих наземних об'єктів. Досліджено показники РАСК на основі моделі гаусової суміші та правила прийняття рішення за максимумом правдоподібності. Представлено результати експериментальних досліджень, що виконані на доплерівським радіолокаторі міліметрового діапазону довжин хвиль. Приведено результати розрахунків ймовірностей класифікації одинокого пішохода та групи пішоходів, які рухаються на фоні завад від рослинності.

**Ключові слова:** радіолокація, радіолокаційна автоматична система класифікації, частотно-часовий розподіл, біспектр, біспектральні коефіцієнти

## RADAR AUTOMATIC SYSTEM FOR MOVING GROUND OBJECTS CLASSIFICATION

*A.V. Totzky, P.A. Molchanov, G.I. Khlopov, V.Ye. Morozov*

A technique for extraction novel information features from time-frequency distribution of signals backscattered by moving ground objects is suggested for solving recognition and classification problems. Bicepstral coefficients extracted from short-time bispectral estimates of backscattered signals are used as information features in radar automatic classification system (RACS). RACS performance is studied by using Gaussian mixture model and maximum likelihood rule. Experimental investigation results performed by Doppler radar operating in millimeter wavelength are represented and discussed. Result of computations the classification probabilities are represented for single moving human, as well as for group of humans moving in vegetation clutter.

**Key words:** radiolocation, radar automatic classification system, time-frequency distribution, bispectrum, bicepstral coefficients

**Тоцький Александр Владимирович** – д-р техн. наук, доц., профессор каф. 504, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: totzkiy@xai.edu.ua.

**Молчанов Павел Александрович** – аспирант, Технический университет Тампере, Финляндия.

**Хлопов Григорий Иванович** – д-р техн. наук, проф., зав. отделом, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.

**Морозов Владимир Евгеньевич** – главный инженер отдела, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков, Украина.