

УДК 621.396:681.34

А.В. Тоцкий

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДВИЖНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИНФОРМАТИВНЫМ ПРИЗНАКАМ, СОДЕРЖАЩИМСЯ В ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ СИГНАЛОВ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Предложен новый подход к выделению информативных признаков при решении задачи классификации подвижных радиолокационных объектов на основе биспектрального оценивания параметров сигналов обратного рассеяния. Признаки классификации предложено выделять из кратковременных оценок биспектральной плотности нестационарных эхо-сигналов доплеровской радиолокационной системы наблюдения за подвижными наземными объектами. Представлены результаты экспериментальных исследований автоматической радиолокационной системы классификации подвижных объектов в условиях воздействия пассивных помех от растительности. Выполнен сравнительный анализ вероятности классификации радиолокационных объектов с использованием предложенных биспектральных и известных кепстральных коэффициентов.

Ключевые слова: радиолокация, классификация радиолокационных объектов, информативные признаки, биспектр, кепстр, биспектральные коэффициенты.

Введение

Радиолокационные системы распознавания, идентификации и классификации подвижных наземных объектов широко используют в современных комплексах охраны стратегически важных объектов и границ, военной разведки и на поле боя. В последние годы повышенный интерес специалистов в области ближней радиолокации проявляется к методам автоматического распознавания и классификации подвижных наземных объектов с использованием в качестве информативных признаков частотно-временных распределений (ЧВР) нестационарных сигналов обратного рассеяния (радиолокационных портретов) [1] – [6]. Микро-доплеровские вклады в ЧВР, наблюдаемые в виде траекторий мгновенной частоты на частотно-временной плоскости и содержащие информацию об индивидуальных характеристиках подвижного объекта, представляются эффективными и перспективными признаками в задачах анализа и классификации радиолокационных образов [3, 4]. При решении данных задач с использованием ЧВР наибольшее распространение в настоящее время получили спектрограммы, формируемые по многочастотным нестационарным сигналам обратного рассеяния. Однако следует отметить, что в радиолокационном портрете – спектрограмме утеряна важная информация о частотных и фазовых взаимосвязях, присутствующих в сигнале обратного рассеяния подвижного наземного объекта. Выявление таких взаимосвязей представляется перспективным с точки зрения увеличения информативности за счет получения новых робастных признаков идентификации и классификации таких сложных для идентификации классов объектов, как одиночный пешеход или группа движущихся людей, находя-

щихся в области обзора радиолокационной системы наблюдения.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в наших работах [5], [6], показывают, что метод биспектрального оценивания частотно-фазовых связей, содержащихся в радиолокационных сигналах обратного рассеяния, представляется эффективным средством при извлечении новых информативных признаков для решения задач классификации подвижных наземных объектов.

Цель настоящей статьи заключается в исследовании вероятностных показателей автоматической радиолокационной системы классификации подвижных наземных объектов с использованием новых информативных признаков, извлекаемых из сигналов обратного рассеяния с помощью метода оценивания биспектральной плотности.

Методика извлечения информативных признаков

Результаты экспериментальных исследований кинематических характеристик движущегося пешехода по радиолокационным сигналам обратного рассеяния [3], [4] показывают, что основная доплеровская частота, соответствующая радиальной скорости поступательного перемещению торса человека, модулирована по фазе и частоте микро-доплеровскими компонентами. Метод биспектрального оценивания позволяет сделать вывод о том, что радиальные скорости движения рук и ног шагающего человека порождают в ЧВР определенные пары мгновенных микро-доплеровских частот, которые связаны между собой по фазе. Выделение данных фазовых взаимосвязей позволяет улучшить информативность признаков объекта распознавания и классификации.

Для решения задачи классификации подвижных радиолокационных объектов воспользуемся двумя известными алгоритмами биспектрального оценивания параметров аудио сигналов [7], [8], которые используют при решении задач распознавания речи. Первый из этих алгоритмов [7] 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 частоты; $|B(\omega_1, \omega_2)| = |X(\omega_1)| |X(\omega_2)| |X^*(\omega_1 + \omega_2)|$ – амплитудный биспектр (биамплитуда) сигнала; K – ширина окна, используемого в кратковременном преобразовании Фурье; $|X(\omega_i)|$ – амплитудный Фурье-спектр сигнала; * означает комплексное сопряжение.

Биспектральную оценку $DFB(\omega)$ в алгоритме [8] формируют как:

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

В качестве информативных признаков в решаемой задаче классификации предлагаются *биспектральные коэффициенты* $CIB(\omega)$ или $DFB(\omega)$, рассчитанные по оценкам биспектров (1) и (2):

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

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

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

Для решения задачи классификации радиолокационных объектов воспользуемся стохастической моделью гауссовой смеси, которая представляется удобной при аппроксимации функции плотности распределения вероятности (ПРВ) [9].

Модель гауссовой смеси согласно [9] представим в виде:

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

где

$$\phi(\bar{x}; \theta_m) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |C|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} (\bar{x} - \bar{\mu})^T C^{-1} (\bar{x} - \bar{\mu})\right)$$

– ПРВ произвольной m -й компоненты; π_m – весовые коэффициенты; θ_m – параметры компонентной ПРВ; \bar{x} – вектор признаков классификации объекта; C – ковариационная матрица; $\bar{\mu}$ – вектор средних значений; M – количество объектов в задаче классификации.

Для сравнения показателей вероятности классификации с использованием предлагаемых *биспектральных коэффициентов* (3) и (4) рассмотрим известный подход [1], где информативные признаки формируют в виде следующих *кепстральных коэффициентов* $C(\omega)$:

$$C(\omega) = |F^{-1} \{\log[|X(\omega)|^2]\}|^2. \quad (6)$$

С целью упорядочивания признаков классификации в соответствии с корреляцией по отношению к определенному классу была использована следующая условная энтропия

$$H(\text{Class} | V) = \sum_{j=1}^S p_j * H(\text{Class} | V = j), \quad (7)$$

где p_j – вероятность, при которой признак V принимает состояние j ; S – максимальное число состояний признака V .

Энтропия (7) определяет долю энтропии при условии, что состояние признака V известно.

Улучшение информативности (IG), определяющее величину объема дополнительной информации о классе и достигаемое с помощью признака V , равно

$$IG(\text{Class}|V) = H(\text{Class}) - H(\text{Class}|V). \quad (8)$$

Принятие решения о принадлежности объекта к определенному классу проводилось по правилу, основанному на максимуме функции правдоподобия:

$$\hat{w} = \arg \max_{w=1..W} f(\bar{x}, H_w), \quad (9)$$

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

Обсуждение результатов эксперимента

Векторные информативные признаки, определенные в предыдущем разделе, были получены в результате экспериментальных измерений, выполненных на доплеровском гомодинном радаре. Радиолокационная система, работающая в режиме непрерывного излучения на длине волны $\lambda = 8,8$ мм, обеспечивает возможность записи цифровых сигналов обратного рассеяния подвижных наземных объектов. В рамках эксперимента были реализованы три сценария для следующих трех классов объектов: 1) *одиночный пешеход*, двигавшийся к/от радара со скоростью 3...5 км/ч (среднее отношение сигнал/шум (ОСШ) равно 4 дБ); 2) *два человека* двигавшиеся к/от радара со скоростью 3...5 км/ч (среднее ОСШ равно 6 дБ); 3) *три человека* двигавшиеся к/от радара со скоростью 3...5 км/ч синхронно и асинхронно (среднее ОСШ равно 11 дБ).

Для каждого класса объектов было выполнено 11 экспериментов. В течение 10 экспериментов информативные признаки были извлечены для формирования базы данных обучения, а последний эксперимент использовался для накопления тестируемой базы данных, т.е. 91% от общего объема записей цифровых сигналов обратного рассеяния участвовал в формировании базы данных обучения, а 9% – в тестировании.

Примеры ЧВР одиночного пешехода, экспериментально полученные на фоне помех от растительности, приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что ЧВР на рис. 1, б и рис. 1, в, сформированные в соот-

ветствии с (1) и (2), отличаются от классической спектрограммы (рис. 1, а) лучшим сглаживанием помехи. Это позволяет более четко выделить траектории мгновенных частот на частотно-временной плоскости.

Гистограммы распределений бикепстрального и кепстрального коэффициентов второго порядка, рассчитанные для трех рассматриваемых классов радиолокационных объектов, представлены на рис. 2, а, б соответственно.

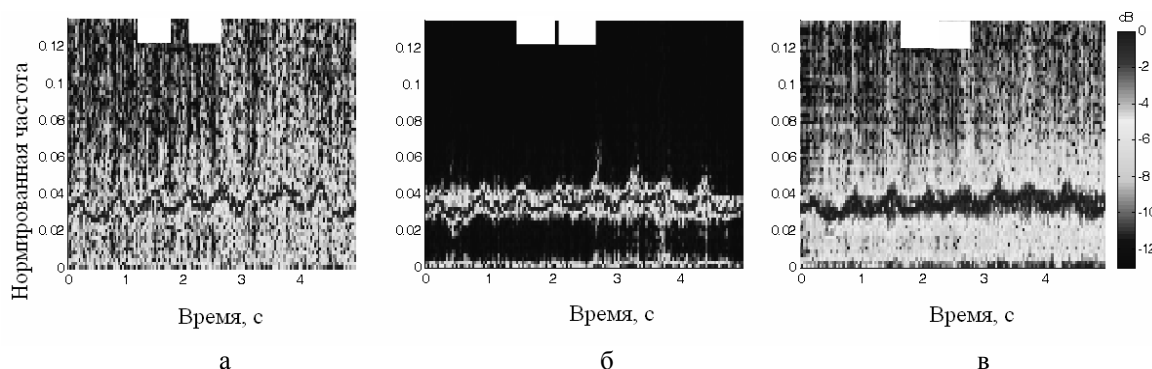


Рис. 1. Частотно-временные радиолокационные портреты, полученные на основе: а – спектрограммы; б – алгоритма (1); в – алгоритма (2)

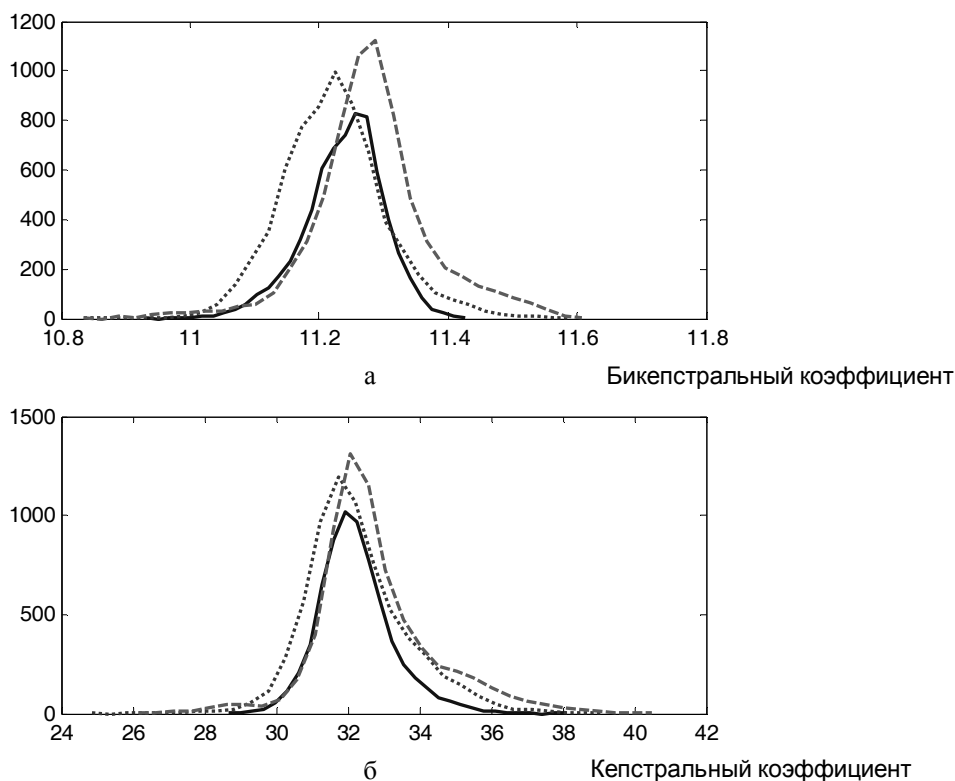


Рис. 2. Гистограммы распределений бикепстрального/кепстрального коэффициентов второго порядка, рассчитанные для одиночного пешехода (сплошная кривая), двух движущихся людей (точечная кривая) и трех человек (пунктирная кривая): а – расчеты выполнены согласно (3) и б – согласно (6)

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что по гистограммам трудно различить одиночного пешехода от двух и трех шагающих людей, так как графики гистограмм, соответствующих данным трем радиолокационным объектам, имеют области перекрытия. В то же самое время, следует отметить, что графики гистограмм на рис. 2, а сливаются в меньшей степени по сравнению с графиками гистограмм на рис. 2, б.

Анализ приведенных гистограмм свидетельствует о том, что для улучшения показателей классификации необходимо использовать признаки, которые обладают максимальной ортогональностью в рассматриваемых трех классах объектов. Для оценки данной ортогональности воспользуемся евклидовой мерой, рассчитываемой для выборочных кросс-корреляционных функций. Мету степени подобия признаков обозначим SM и оценим в виде:

$$SM(m) = \frac{1}{3m} \sum_{i=1}^m \sum_{\substack{k=1,2,3 \\ l=2,3,1}} \|XCF\{C_k(i,:), C_l(i,:)\}\|, \quad (10)$$

где m – число используемых бикепстральных/кепстральных коэффициентов; XCF – кросс-корреляционная функция; k, l – индексы, принадлежащие трем рассматриваемым классам радиолокационных объектов; $C_k(i,:)$ – совокупность бикепстральных/кепстральных коэффициентов, принадлежащих k -му классу.

Зависимости степени подобия (10) от числа бикепстральных (см. формулу (3)) и кепстральных (см. формулу (6)) коэффициентов первого порядка представлены на рис. 3. Из данного рисунка явно видно, что степень подобия для бикепстральных коэффициентов меньше по сравнению с величиной, рассчитанной для кепстральных коэффициентов. Следовательно, должны быть обеспечены лучшие показатели классификации объектов с использованием бикепстральных коэффициентов.

Графики зависимостей вероятности правильной классификации от длительности выборки обрабатываемых радиолокационных данных представлены на рис. 4.

Как следует из рис. 4, наилучшие показатели вероятности классификации обеспечивает использование бикепстральных коэффициентов (4) (сплошная кривая, обозначенная CDFB на рис. 4).

Наибольший выигрыш при использовании бикепстральных коэффициентов наблюдается, когда длительность выборки данных превышает 64 мс. В то же самое время, использование кепстральных коэффициентов (6) обеспечивает незначительный выигрыш в случае, когда длительность выборки данных не превышает 64 мс.

Снижение показателей системы классификации при уменьшении длительности выборки данных объясняется ухудшением частотного разрешения, величина которого обратно пропорциональна длительности окна кратковременного преобразования Фурье.

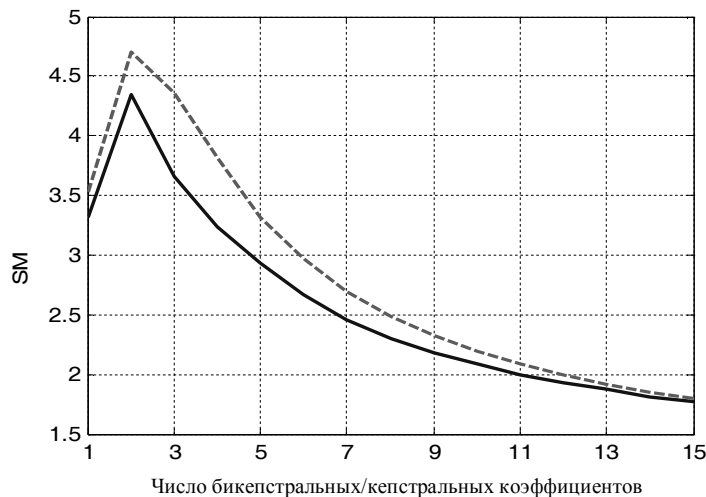


Рис. 3. Степень подобия как функция числа бикепстральных (сплошная кривая) и кепстральных (пунктирная кривая) коэффициентов

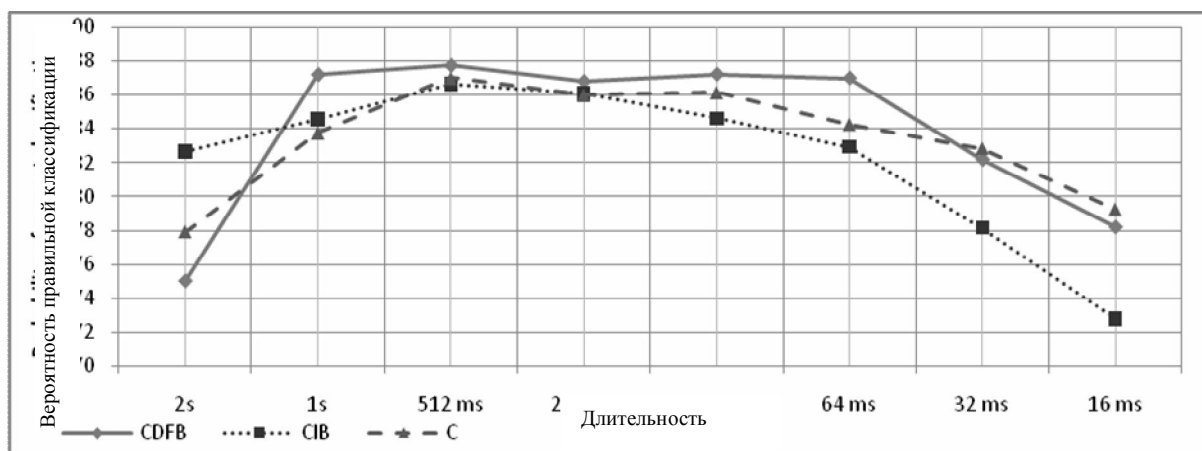


Рис. 4. Вероятность правильной классификации как функция длительности выборки обрабатываемых данных

Рассмотренный в данной статье непараметрический метод биспектрального оценивания микро-доплеровской частоты обеспечивает частотное разрешение, равное 63 Гц и 125 Гц при длительностях выборки, равных 32 мс и 16 мс соответственно.

Для улучшения частотного разрешения рекомендуется использовать параметрический метод биспектрального оценивания, чтобы избежать зависимости частотного разрешения от длительности выборки обрабатываемых данных.

Выводы

Предложен метод формирования информативных признаков радиолокационных объектов из частотно-временных распределений сигналов обратного рассеяния. Отличительная особенность предложенного метода заключается в выделении связанных по фазе пар спектральных компонент в наблюдении с помощью биспектрального оценивания мгновенных доплеровских частот.

Экспериментально исследованы показатели вероятности классификации радиолокационных объектов с использованием биспектральных и кепстральных коэффициентов, рассчитываемых из биспектральных и кепстральных оценок сигналов обратного рассеяния соответственно.

Приведены результаты эксперимента классификации одиночной и групповой радиолокационных целей, наблюдаемых на фоне помех от взволнованной ветром растительности.

Продемонстрированы преимущества автоматической радиолокационной системы классификации подвижных наземных объектов с использованием биспектрального оценивания параметров сигналов обратного рассеяния.

Список литературы

1. 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.
2. van Dorp P. Feature-based human motion parameter estimation with radar / P. van Dorp, F.C.A. Groen // *IET Radar, Sonar and Navigation*. – 2008. – Vol. 2, No 2. – P. 135-145.
3. Chen V.C. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions / V.C. Chen // *IET Signal Processing*. – 2008. – Vol. 2, No 3. – P. 291-300.
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. Astola J. 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 // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2008. – Vol. 57, No 9. – P. 1949-1957.
6. Molchanov P.A. 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.
7. 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.
8. Onoe K. 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.
9. 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 редколлегию 16.02.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

КЛАСИФІКАЦІЯ РУХОМИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ІНФОРМАТИВНИМИ ОЗНАКАМИ, ЩО МІСТЯТЬСЯ У ЧАСТОТНО-ЧАСОВОМУ РОЗПОДІЛІ СИГНАЛІВ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЯННЯ

О.В. Тоцький

Запропоновано новий підхід до виділення інформативних ознак у вирішенні задачі класифікації рухомих радіолокаційних об'єктів на основі биспектрального оцінювання параметрів сигналів зворотного розсіяння. Ознаки класифікації запропоновано виділяти з короткочасових оцінок биспектральної щільності нестационарних сигналів відлуння доплерівської радіолокаційної системи спостереження за рухомими наземними об'єктами. Представлено результати експериментальних досліджень автоматичної системи класифікації рухомих об'єктів в умовах впливу пасивних завад від рослинності. Виконано порівняльний аналіз ймовірності класифікації радіолокаційних об'єктів з використанням запропонованих биспектральних та відомих кепстральних коефіцієнтів.

Ключові слова: радіолокація, класифікація радіолокаційних об'єктів, інформативні ознаки, биспектр, кепстр, биспектральні коефіцієнти.

RADAR OBJECTS CLASSIFICATION BY USING INFORMATION FEATURES CONTAINING IN BACKSCATTERING SIGNAL TIME-FREQUENCY DISTRIBUTIONS

A.V. Totsky

Novel approach to extraction of information features based on backscattering signal parameters estimation is proposed for solving moving object classification problem. It has been proposed to extract information features from short-time echo-signal bispectral estimates measured by Doppler ground radar surveillance system. Results of experimental study of automatic radar systems are represented for surveillance the moving ground objects. Comparative analysis is performed for radar pattern classification probabilities by using proposed bispectral coefficients and common cepstral coefficients.

Keywords: radiolocation, radar objects classification, information features, bispectrum, cepstrum, bispectral coefficients.