

УДК 621.396:681.34

А.В. ТОЦКИЙ¹, П.А. МОЛЧАНОВ², Б.Б. ПОСПЕЛОВ³¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина²Технологический университет, Тампере, Финляндия³Государственный университет инфокоммуникационных технологий, Киев, Украина

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ДАЛЬНОСТНЫМ ПРОФИЛЯМ

Рассмотрена задача распознавания летательных аппаратов (ЛА) по их радиолокационным дальностным профилям (РДП). Исследованы показатели автоматической системы распознавания радиолокационных образов на основе критерия минимума евклидовой нормы и принципа мажоритарного большинства. Выполнен сравнительный анализ результатов распознавания четырех различных типов ЛА с использованием известного метода некогерентного накопления РДП и предложенного метода биспектральной обработки данных. Приведенные результаты расчетов кривых распознавания демонстрируют преимущества биспектральной обработки радиолокационных данных в условиях флуктуаций времени задержки эхо-сигнала и неопределенности в системе оценки дальности.

Ключевые слова: радиолокация, радиолокационный дальностный профиль, вероятность распознавания объекта

Введение

В настоящее время решение задач классификации и идентификации воздушных целей в системах автоматического распознавания объектов на основе использования информативных признаков, которые содержатся в РДП, представляет большой научный и практический интерес [1 – 8]. РДП, формируемый в виде одномерного пространственного распределения интенсивности поля обратного рассеяния электромагнитной волны в сантиметровом или миллиметровом диапазонах длин волн, позволяет получить информацию не только о длине, но и о форме протяженной цели.

Распространенной моделью обратного рассеяния электромагнитного поля, общепринятой в радиолокации, служит представление протяженной цели в виде совокупности «блестящих точек» – локальных центров обратного рассеяния [2], пространственно распределенных на поверхности ЛА. Общепринятая модель РДП представляет проекцию пространственного распределения интенсивности протяженной цели на линию визирования РЛС [1, 2] (рис. 1).

Измерение РДП подвижной цели неизбежно сопряжено с проблемой изменчивости в зависимости от ориентации ЛА по отношению к углу зрения (визирования) РЛС. Эта изменчивость наблюдается даже при очень малых (единицы градусов и даже десятые доли углового градуса) изменениях ракурса самолета (рис. 2).

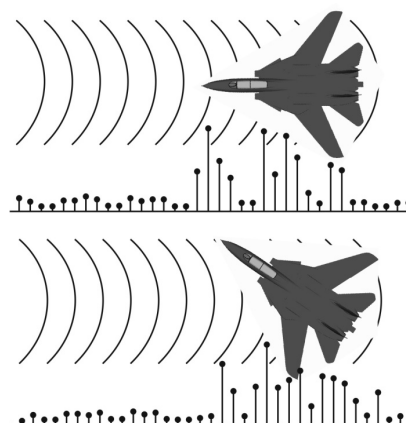


Рис. 1. Примеры РДП, наблюдаемые при изменении ракурса самолета
Tu-16 MiG-21

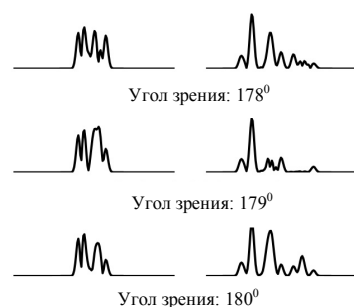


Рис. 2. Пример изменчивости РДП для двух типов ЛА: бомбардировщик Tu-16 и истребитель МиГ-21

Данная изменчивость РДП приводит к возрастанию размерности вектора информативных признаков на входе системы автоматического распозна-

вания образов. В результате растает размерность условной плотности вероятности и ухудшается вероятность распознавания целей образа. Поэтому, результативность решения задачи распознавания образов по РДП в первую очередь требует уменьшения размерности вектора информативных признаков и обеспечения их устойчивости в течение интервала времени измерений.

Изменение ракурса цели и ее пространственное перемещение порождают смещение пиков интенсивности в РДП из одного элемента разрешения по дальности в соседние элементы. При этом пространственный разнос пиков не меняется: РДП подвергается пространственному смещению, характер изменения которого соответствует маневрам цели.

Свойство инвариантности биспектра к пространственному сдвигу сигнала [9] позволяет надеяться на обеспечение инвариантности РДП к пространственным перемещениям цели. При этом отпадает необходимость в процедуре выравнивания последовательности РДП, требуемой при перемещении цели вдоль линии визирования РЛС. Данная особенность биспектрального метода обработки данных в совокупности с высокой помехоустойчивостью биспектра по отношению к аддитивному нормальному шуму представляются несомненными преимуществами по сравнению с традиционным некогерентным усреднением совокупности РДП, регистрируемых в пределах широкого углового сектора наблюдения цели для одновременного обеспечения устойчивости информативных признаков и уменьшения размерности вектора информативных признаков на входе системы распознавания.

Цель настоящей статьи заключается в разработке и исследовании подхода к улучшению показателей радиолокационной системы распознавания ЛА на основе биспектральной обработки РДП.

1. Постановка задачи

Рассмотрим модель радиолокационного сигнала, наблюдаемого при обратном рассеянии электромагнитного поля ЛА. Комплексный сигнал $y_k(i)$, наблюдаемый на выходе согласованного дальномерного фильтра при произвольном k -м ракурсе ЛА, равен

$$y_k(i) = \sum_{m=1}^M a_m(i) \exp[j\Phi_{km}(i)], \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, K,$$

где $a_m(i)$ и $\Phi_{km}(i)$ – амплитудное и фазовое пространственное распределение поля обратного рассеяния соответственно; $i = 1, 2, \dots, I$ – индекс отсчета по дальности; индекс m соответствует обратному рассеянию m -й «блестящей точки» в РДП.

С учетом (1), выражение квадрата огибающей для произвольного k -го РДП представим в виде

$$z_k(i) = \{\text{Re}[y_k(i)]\}^2 + \{\text{Im}[y_k(i)]\}^2 = \sum_{m=1}^M a_m^2(i) + 2 \sum_{m=2}^M \sum_{n=1}^m a_m(i) a_n(i) \cos[\Phi_{km}(i) - \Phi_{kn}(i)].$$

Из формулы (2) следует, что распределение интенсивности в РДП содержит два члена: первый – сумма интенсивностей локальных точечных рассеивателей, величина которой не зависит от ракурса цели; второй член – сумма перекрестных составляющих, вклад которой в РДП зависит от ракурса цели.

Именно этот второй член суммы в формуле (2) вызывает изменчивость РДП.

Задача распознавания решалась с использованием электродинамических моделей РДП для четырех типов ЛА [10]: бомбардировщики Tu-16 и В1-В, истребитель MiG-21 и крылатая ракета типа GLCM. Для каждого типа ЛА рассчитывались $K = 2000$ РДП, когда РДП был сформирован в виде $I = 160$ отсчетов комплексного выхода согласованного фильтра (1). Основные характеристики измерителя цели полагались следующими:

- ЛЧМ сигнал колокольной формы длительностью 10 мкс и частотой следования пачки импульсов, равной 1000 Гц;
- рабочая полоса частот $\Delta f = 80$ МГц и центральная длина волны РЛС $\lambda_0 = 3$ см;
- разрешение по дальности $\Delta r = c/2\Delta f = 1,875$ м;
- горизонтальная поляризация;
- размер окна отслеживания РДП равен 80 м, а шаг дискретизации в оценке РДП – $\Delta i = 0,5$ м;
- движение ЛА – вращательное;
- пределы изменения ракурса ЛА: от 180^0 до 170^0 (180^0 – нос самолета направлен в сторону РЛС);
- угол крена и тангажа ЛА неизменны и равны 2^0 и 3^0 соответственно.

Информативные признаки извлекались, во-первых, – из РДП, формируемого на основе известного подхода [1, 2] путем осреднения по выборке из K/N РДП (2) (N – число РДП в сегменте некогерентного накопления), и, во-вторых, предлагаемым методом – на основе вычисления модуля оценки биспектра для отсчетов, принадлежащих главной диагонали – модифицированной главной диагонали биспектра (МГДБ) и определяемых как

$$D_n(i) = \begin{cases} |\dot{B}_n(129-i, 129-i)|, & i \leq 128 \\ |\dot{B}_n(i-127, i-127)|, & i > 128 \end{cases}, \quad (3)$$

где $\tilde{B}_n(p, q) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_{kn}(p, q)$, $n=1, 2, \dots, K/N$;

$B_{kn}(p, q) = Z_{kn}(p) Z_{kn}^*(q) Z_{kn}^*(p+q)$; $Z_k(p)$ – дискретное преобразование Фурье k -го РДП; $p=1, 2, \dots, I$ и

$q = 1, 2, \dots, I$ – независимые частотные индексы; символ * означает комплексное сопряжение.

Исследовались также векторы информативных признаков, параметры которых были эвристически заданы, во-первых, совокупностью конечного набора информативных величин, выделяемых из РДП (2) и, во-вторых, – из МГДБ (3).

Ниже определены пятнадцать предлагаемых эвристических взаимно-ортогональных информативных признаков:

1. Выборочная мощность РДП/МГДБ

$$P_1 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I [RP_n(i)]^2. \quad (4)$$

2. Выборочная оценка математического ожидания РДП/МГДБ

$$P_2 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I RP_n(i). \quad (5)$$

3. Выборочная оценка дисперсии РДП/МГДБ

$$P_3 = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I [RP_n(i) - P_2]^2. \quad (6)$$

4. Оценка асимметрии РДП/МГДБ

$$P_4 = \frac{1}{I \cdot P_3^3} \sum_{i=1}^I [RP_n(i) - P_2]^3. \quad (7)$$

5. Оценка эксцесса РДП/МГДБ

$$P_5 = \left\{ \frac{1}{I \cdot P_3^4} \sum_{i=1}^I [RP_n(i) - P_2]^4 \right\} - 3. \quad (8)$$

6. Максимальная величина отсчета в РДП/МГДБ.

7. Количество отсчетов, значения которых больше 20% от максимума в РДП/МГДБ.

8. Количество отсчетов, значения которых больше 60% от максимума в РДП/МГДБ.

9. Длина кривой, описывающей РДП/МГДБ

$$P_9 = \sum_{i=2}^I \{RN_n(i) - RP_n(i-1)\}. \quad (9)$$

10. Сумма значений функции арктангенс

$$P_{10} = \sum_{i=1}^I \arctg[RP_n(i)]. \quad (10)$$

11. Сумма косинусов значений выборки

$$P_{11} = \sum_{i=1}^I \cos[RP_n(i)]. \quad (11)$$

12. Сумма синусов значений выборки

$$P_{12} = \sum_{i=1}^I \sin[RP_n(i)]. \quad (12)$$

13. Площадь области, образованной пересечением РДП/МГДБ с его зеркальным отображением относительно горизонтальной оси.

14. Площадь области, образованной пересечением РДП/МГДБ с его зеркальным отображением относительно вертикальной оси.

15. Сумма первых 8 коэффициентов разложения в ряд Тейлора функции РДП/МГДБ.

В формулах (4 – 12) приняты следующие обозначения:

$$RP_n(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N D_{nk}(i),$$

для МГДБ или

$$RP_n(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_{nk}(i) \text{ для РДП } n=1, 2, \dots, K/N.$$

Введем коэффициент значимости $K_r^s \in [0, 1]$ для каждого из перечисленных выше пятнадцати информативных признаков в виде

$$K_r^s = \frac{S(G_r)}{S(G_r^s) + S(G_r)}, \quad (13)$$

где $S(G_r)$ – площадь области G_r , ограниченной функцией плотности распределения вероятности (ПРВ) r -го информативного признака ($r = 1, 2, \dots, 15$) для s -го типа ЛА ($s = 1 - 4$) и $S(G_r^s)$ – сумма площадей областей G_r^s , образованных пересечениями функций ПРВ r -го информативного признака для разных типов ЛА.

В соответствии с критерием минимума евклидова расстояния решение о принадлежности ЛА к определенному классу принимают по правилу вида

$$\min d_s = \sqrt{\sum_{i=1}^I \{\hat{f}(i) - h_s(i)\}^2}, \quad (14)$$

где $\hat{f}(i)$ – оценка РДП, полученная некогерентным усреднением или на основе МГДБ; $h_s(i)$ – РДП, априорно полученный некогерентным усреднением, или на основе МГДБ, рассчитанный априорно для ЛА, принадлежащего к классу s .

Для решения задачи распознавания ЛА с использованием предлагаемого набора пятнадцати эвристических информативных признаков рассмотрим следующие три вида правил, обладающих определенными преимуществами и недостатками.

Первое правило основано на минимуме евклидова расстояния вида

$$\min d_s = \sqrt{\sum_r K_r^s [\hat{Y}_r - U_r^s]^2}, \quad (15)$$

где \hat{Y}_r – оценка информативного признака, выделенного из наблюдаемой оценки РДП или из наблюдаемой оценки МГДБ; U_r^s – априорно рассчитанный r -й информативный признак для ЛА, принадлежащего к классу s .

Второе правило, являющееся модификацией правила (15), сводится к следующему:

$$\min d_s = \sqrt{\sum_r K_r^s \left[\frac{|\hat{Y}_r - U_r^s|}{|\hat{Y}_r| + |U_r^s|} \right]^2}. \quad (16)$$

Третье правило основано на принципе мажоритарного большинства с использованием алгоритма «ближайшего соседа» [2]. По каждому r -му ($r = 1, 2, \dots, 15$) информативному признаку определяется «ближайший сосед» и запоминается класс s ЛА. После того как определяются «ближайшие соседи» по всем признакам, тому классу ЛА, который наберет больше всех «баллов», и будет принадлежать наблюдаемый РДП $\hat{f}(i)$.

В третьем правиле учет коэффициента значимости информативных признаков не принимается во внимание.

2. Результаты статистического моделирования

На рис. 3 приведены кривые распознавания (зависимости вероятности распознавания P от отношения сигнал/шум (SNR)), рассчитанные согласно правилу (14) и исходным априорным данным: $N = 1$ сегмент ($K = 2000$ РДП). Величина $h_s(i)$ в (14) рассчитывалась осреднением по выборке объемом 2000 РДП.

При расчете величины SNR учитывалось различие энергии в РДП четырех типов ЛА.

Анализ поведения графиков на рис. 3 показывает, что при использовании правила (14) предлагаемый метод обработки данных уступает традиционному методу некогерентного усреднения.

На рис. 4 приведены кривые распознавания, рассчитанные с использованием правила 1 (15), правила 2 (16) и правила 3.

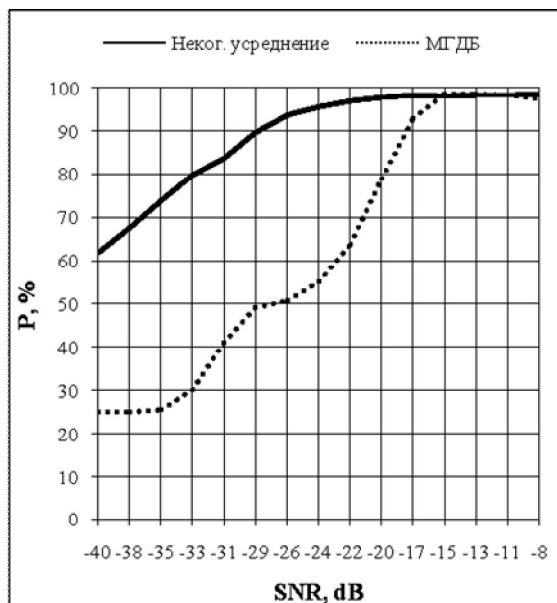
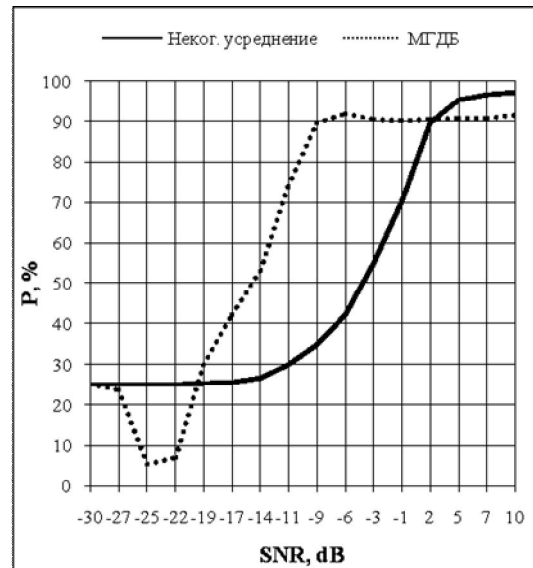
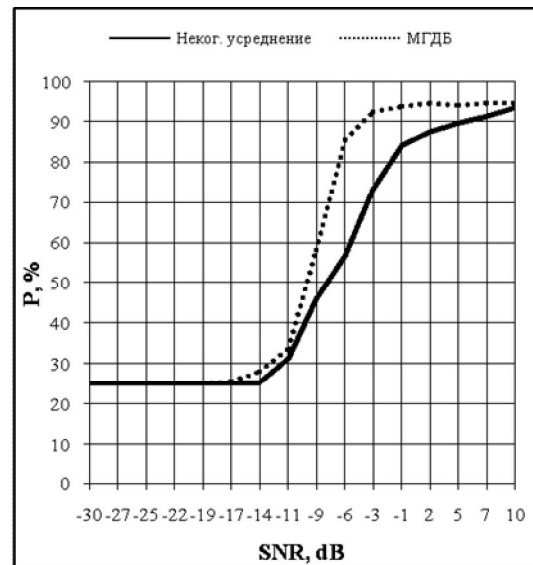


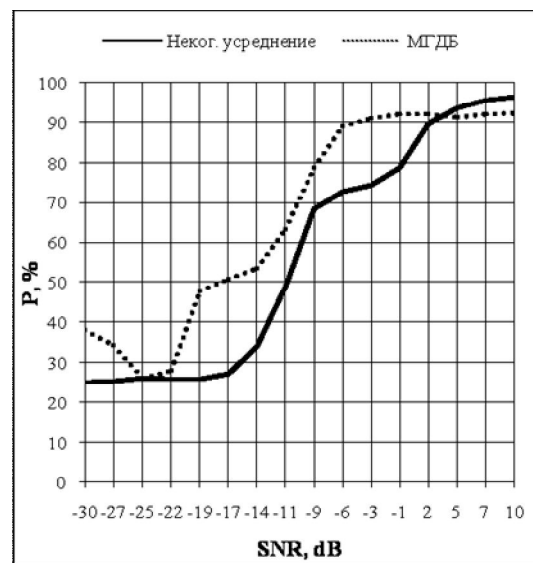
Рис. 3. Кривые распознавания, рассчитанные при осреднении на выборке $T=30$ РДП/МГДП



а



б



в

Рис. 4. Кривые распознавания: $N=20$ сегментов и $T=1$; а, б и в — правила 1, 2 и 3 соответственно

Анализ поведения кривых на рис. 4 показывает, что, во-первых, на рис. 4, а-в вероятность распознавания по МГДБ достигает уровня 90% при меньших величинах SNR по сравнению с некогерентным усреднением. Из 4б видно, что на уровне $P=90\%$ предлагаемый метод обеспечивает выигрыш в отношении сигнал/шум, равный 10 дБ. Также следует отметить, что наиболее гладкое поведение кривой вероятности распознавания обеспечивает использование правила 2 (16), где отсутствуют аномальные «провалы», наблюдаемые на графиках 4а, в.

При SNR = 10 dB автоматическая система распознавания с использованием МГДБ стремится к безошибочному режиму работы, т.е. практически к 100% вероятности. В то же самое время, система распознавания, построенная на основе некогерентного усреднения РДП, имеет граничный предел вероятности, равный 90% и 91% (см. рис. 4а и в соответственно).

Рассмотрим воздействие дестабилизирующего фактора в радиолокационной автоматической системе распознавания ЛА, который вызван флуктуациями времени задержки эхо-сигнала и неопределенностью в системе оценки дальности.

При компьютерном моделировании этот вид помехи вводился в виде случайной задержки, величина которой при накоплении РДП в зависимости от изменения ракурса ЛА менялась в пределах $[-J, J]$ отсчетов дальности.

На рис. 5 приведены кривые распознавания, построенные с использованием евклидовой меры (14).

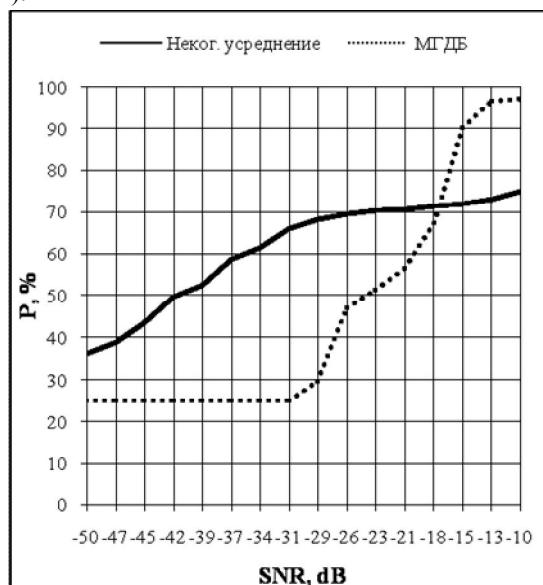


Рис. 5. Кривые распознавания, построенные при $N=20$; $T=10$ и $J=10$

Графики на рис. 5 демонстрируют инвариантность предлагаемого биспектрального метода обработки к случайным сдвигам РДП ЛА, по сравнению

с методом некогерентного накопления, для которого наблюдается сильное влияние случайных сдвигов РДП. При девиации случайного сдвига, равной $J=10$ отсчетов имеет место ограничение вероятности распознавания величиной, равной 75%, в то время как распознавание, основанное на оценивании МГДБ, при любых величинах J стремится к 100%.

Заключение

Исследована вероятность распознавания ЛА для двух различных классов информативных признаков с использованием традиционного метода некогерентного накопления и предлагаемого метода биспектральной обработки наблюдаемых данных в условиях воздействия аддитивного гауссова шума и наличия случайных сдвигов РДП.

Установлено, что показатели распознавания, основанные на методе биспектрального оценивания уступают методу некогерентного накопления РДП только для класса информативных признаков, формируемых осреднением дискретных функций пространственного распределения интенсивности на выходе согласованного фильтра в отсутствие случайных задержек (в отсутствие неопределенности по дальности). Показано, что в классе рассматриваемых ортогональных информативных эвристических признаков, выделяемых из наблюдаемых РДП, предлагаемый метод выделения признаков из выборочной оценки МГДБ дает выигрыш в величине отношения сигнал/шум, равный приблизительно 10дБ, при фиксированной вероятности распознавания, равной 90%.

Продемонстрирована инвариантность вероятности распознавания предлагаемого метода по отношению к случайным сдвигам РДП, вызванным случайными задержками эхо-сигнала и неопределенностью в оценке дальности. Установлено, что при величине девиации случайной задержки, не превышающей 2% от полной длительности РДП, величина максимальной вероятности распознавания при использовании предлагаемого метода биспектрального оценивания приблизительно на 30% превышает соответствующее значение вероятности распознавания для метода некогерентного накопления.

Литература

1. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1996. – № 11. – С. 3–63.
2. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп.; под ред. Я.Д. Ширмана / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Малярченко и др. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

3. Леценко С.П. Информативность и достоверность радиолокационного распознавания воздушных целей по дальностным портретам / С.П. Леценко // Збірник наукових праць ХВУ. – Вип. 7(37). – X., 2001. – С. 63-72.
4. Heiden Van Der R. The Box-Cox metric for nearest neighbor classification improvement/ R. Van Der Heiden, F.C.A. Groen // *Pattern Recognition*. – February 1997. – Vol. 30, no. 2. – P. 273-279.
5. Zhoum D. Spatio-temporal target identification method of high-range resolution radar/ D. Zhoum, G. Liu, J. Wang // *Pattern Recognition*. – January 2000. – Vol. 33, no. 1. – P. 1-7.
6. Nelson D.E. Iterated wavelet transformation and signal discrimination for HRR radar target recognition/ D.E. Nelson, J.A. Starzyk, D.D. Ensley // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. – 2003. – Vol. 33, no. 1. – P. 52-57.
7. Jacobs S.P. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range profiles / S.P. Jacobs et al. // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2000. – Vol. 36, no. 2. – P. 364-381.
8. Smith C.R. Radar target identification / C.R. Smith, P.M. Goggans // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 1993. – Vol. 35, no. 2. – P. 27-37.
9. Nikias C.L. Bispectral estimation: A digital signal processing framework / C.L. Nikias, M.R. Raghuveer // *Proceedings IEEE*. – 1987. – Vol. 75, no. 7. – P. 869-891.
10. Computer simulation of aerial targets, radar scattering, recognition, detection, and tracking/ Ya.D. Shirman, S.A. Gorshkov, S.P. Leshenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy. – Boston-London, Artech House, 2002. – 294 p.

Поступила в редакцию 4.07.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой приема, передачи и обработки сигналов А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗПІЗНАВАННЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЗА ЇХ РАДІОЛОКАЦІОНІМИ ДАЛЕКІСНИМИ ПРОФІЛЯМИ

О.В. Тоцький, П.О. Молчанов, Б.Б. Поспелов

Розглянуто задачу розпізнавання літальних апаратів (ЛА) за їх радіолокаційними далекісними профілями (РДП). Досліджено показники автоматичної системи розпізнавання радіолокаційних образів на основі критерію мінімуму евклідової норми і принципу мажоритарної більшості. Виконано порівняльний аналіз результатів розпізнавання чотирьох типів ЛА з використанням методу некогерентного накопичення РДП та запропонованого методу біспектральної обробки даних. Приведено результати розрахунків кривих розпізнавання, які демонструють переваги біспектральної обробки радіолокаційних даних в умовах флуктуацій часу затримання луна-сигналу та невизначеності у системі оцінки далекості.

Ключові слова: радіолокація, радіолокаційний далекісний профіль, ймовірність розпізнавання об'єкту

AIRCRAFT RECOGNITION BY THEIR RADAR RANGE PROFILES

A.V. Totzky, P.A. Molchanov, B.B. Pospelov

The problem of aircraft recognition by their radar range profiles is considered. Performance of automatic pattern recognition system has been studied by using minimum Euclidian norm criterion and majority rule principle. Comparative analysis of recognition results performed for four aircraft types has been carried out for non-coherent accumulation of radar range profiles and proposed bispectrum-based data processing. Results of computations of recognition curves demonstrate the benefits of bispectral data processing in fluctuation echo-signal delay environment and range ambiguity in range estimate system.

Key words: radiolocation, radar range profile, probability of object recognition

Тоцький Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры приема, передачи и обработки сигналов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: totzkiy@xai.edu.ua.

Молчанов Павел Александрович – магистр, аспирант Технологического университета, Тампере, Финляндия, e-mail: pavlo.molchanov@tut.fi.

Поспелов Борис Борисович – д-р техн. наук, доцент, профессор Государственного университета информационно-коммуникационных технологий, Киев, Украина, e-mail: borbor2007@mail.ru.