

УДК 621.396:681.34

А.В. ТОЦКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОБНАРУЖЕНИЕ ДВИЖУЩИХСЯ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ  
БИСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ  
ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ**

*Рассмотрена задача обнаружения движущегося радиолокационного объекта на фоне помех с использованием метода биспектрального анализа нестационарного сигнала обратного рассеивания. Предложен подход к улучшению отношения сигнал-шум в радиолокационной системе обнаружения движущихся наземных объектов, основанный на выделении из широкополосного спектра сигнала и помехи только тех пар доплеровских частот, которые связаны по фазе. Представлены данные экспериментальных измерений сигналов обратного рассеяния шагающего и бегущего человека, полученные на радиолокаторе миллиметрового диапазона длин волн. Приведены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие выигрыш в отношении сигнал-шум при использовании предлагаемого подхода по сравнению с известным подходом, основанным на анализе доплеровского спектра Фурье.*

**Ключевые слова:** радиолокатор, доплеровская частота, биспектральная плотность.

**Введение**

В настоящее время во многих странах мира интенсивно разрабатываются радиолокационные системы сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн для наблюдения за движущимися наземными объектами [1 – 5]. Повышенный интерес к данным системам вызван не только их работоспособностью в сложных погодных условиях, в дневное и ночное время суток, но и также возможностью обнаружения движущихся объектов за препятствиями, такими как, например, стены зданий. Изменения доплеровского смещения частоты радиолокационного сигнала обратного рассеяния движущейся цели служит основным информативным признаком, общепринятым при решении задач обнаружения и распознавания объектов. Следует отметить, что наибольшее распространение в обработке радиолокационных сигналов обратного рассеивания движущихся наземных объектов получили методы оценивания спектрограмм [1 – 3], [6 – 8], а также методы оценивания кратковременного амплитудного спектра Фурье [5, 9], формируемого с помощью скользящего окна. Явление корреляции спектральных компонент доплеровского Фурье спектра обратного рассеяния движущегося пешехода, исследованное в статье [4] с помощью метода биспектрального оценивания, позволяет получить новые информативные признаки для решения задачи обнаружения и распознавания радиолокационного объекта. Так как возможные фазовые связи между гармониками в широкополосном доплеровском энергетическом спектре

безвозвратно утеряны, их оценка невозможна с помощью анализа спектрограммы радиолокационного сигнала обратного рассеяния движущегося пешехода. Использование подхода [4], основанного на биспектральном оценивании позволяет выделить из широкополосного доплеровского спектра радиолокационного эхо-сигнала только те пары спектральных компонент, которые связаны между собой по фазе, и подавить помеху, присутствующую в принятом колебании.

К основным достоинствам подхода, предложенного в работе [4], относятся: во-первых, низкая чувствительность к аддитивной помехе с симметричной плотностью распределения вероятности, что позволяет успешно подавить нормальный гауссов шум, присутствующий в наблюдении обратного рассеивания; во-вторых, оценка биспектральной плотности нечувствительна к перемещениям и вращениям объекта [10], что обеспечивает устойчивость оценки при изменении ракурса объекта; в-третьих, биспектральное оценивание позволяет обнаружить фазовые связи определенных пар спектральных компонент и выделить из широкополосного спектра смеси сигнала и помехи только данные пары спектральных компонент. Настоящая статья посвящена экспериментальному исследованию показателей обнаружения движущегося пешехода в радиолокационной системе наблюдения миллиметрового диапазона длин волн с использованием именно последнего свойства оценки биспектральной плотности.

Цель данной статьи заключается в улучшении

выходного отношения сигнал-шум в радиолокаторе наблюдения за движущимися наземными объектами с помощью биспектрального анализа по сравнению с подходом, в котором используется оценка амплитудного спектра Фурье.

### 1. Получение информативных признаков с помощью биспектрального оценивания

Рассмотрим модель радиолокационного сигнала обратного рассеяния движущегося пешехода. В процесс движения человека вовлечены одновременно кинематические вклады различных частей тела: раскачивания торса при ходьбе, шаговые движения ног и размахивания рук. Эти части тела человека движутся с различными радиальными скоростями, закон изменения которых, как правило, отличается от равномерного. По телу человека протекают поверхностные токи СВЧ, наводимые падающей электромагнитной волной. Параметры радиолокационного эхо-сигнала зависят как от кинематических характеристик, так и от радиофизических свойств движущихся поверхностей обратного рассеяния электромагнитной волны. Следовательно, сигнал обратного рассеяния представляет собой многочастотный нестационарный процесс, параметры которого меняются в процессе движения объекта и зависят от ракурса движущихся частей тела и проводимости поверхности обратного рассеяния.

Особый интерес представляют фазовые связи частот, наблюдаемых в доплеровском спектре. Отдельные пары доплеровских частот могут иметь фазовые связи вследствие, во-первых, механической связи медленно перемещающегося торса (своего рода «несущей» конструкции) с быстрее движущимися руками и ногами и, во-вторых, вследствие пространственного фазового распределения токов СВЧ на движущихся поверхностях обратного рассеяния. Данные фазовые связи содержат важную информацию об индивидуальных, т.е. характерных только для данного объекта признаках.

Приняв во внимание выше отмеченные особенности, принятый цифровой сигнал обратного рассеяния  $y(i)$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} y(i) &= \sum_{m=1}^M A_m(i) \cos[\Phi_m(i)] = \\ &= \sum_{m=1}^M a_m(i) \cos[\varphi_m(i)] F^2(\theta_m) \times \\ &\times \cos\left\{ \frac{4\pi}{\lambda_0} [r_m(i) - r_0(i)] \right\} + n(i), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $a_m(i)$  – меняющаяся во времени амплитуда коэффициента обратного рассеяния, соответствующая  $m$ -му локальному центру рассеяния;  $\varphi_m(i)$  – меняю-

щаяся во времени фаза  $m$ -го локального центра обратного рассеяния;  $i = 1, 2, \dots, I$  – индекс временного отсчета;  $F(\theta)$  – диаграмма направленности (ДН) антенной системы (полагаем, что одна и та же антенна работает в режиме излучения и приема, и что ширина ДН одинакова в плоскости Н и Е);  $\theta_m$  – угловое положение  $m$ -го локального центра обратного рассеяния;  $r_m(i)$  и  $r_0(i)$  – меняющиеся во времени расстояния от фазового центра антенны до произвольного  $m$ -го центра обратного рассеяния и фазового центра объекта соответственно;  $\lambda_0$  – излучаемая длина волны;  $A_m(i)$  и  $\Phi_m(i)$  – меняющиеся во времени амплитуда и полная фаза соответственно;  $n(i)$  – аддитивный гауссов шум.

В соответствии с выражением (1) радиолокационный сигнал обратного рассеяния представляет собой сумму вкладов  $M$  движущихся центров обратного рассеяния электромагнитной волны, которые создают многочастотный доплеровский спектр.

Радиолокаторы миллиметрового диапазона длин волн, работающие в непрерывном режиме [4, 5, 9], обеспечивают достаточно высокое разрешение доплеровских спектральных компонент, соответствующих вкладам в сигнал (1) отдельных движущихся частей тела пешехода.

Следует отметить, что наряду с информативными частотами в доплеровском спектре обратного рассеяния обычно присутствуют помехи, создаваемые отражениями зондирующей электромагнитной волны от листвы деревьев и кустарника, а также собственными электрическими шумами аппаратуры. Эти помехи уменьшают отношение сигнал-шум, маскируют информативные признаки радиолокационного объекта, и распознавание объекта на фоне помех ухудшается.

Теоретически в работе [10] доказано, что в амплитудном биспектре многочастотного процесса, содержащего вклады связанных и несвязанных фазовыми соотношениями спектральных компонент, асимптотически, т.е. при бесконечно большом объеме выборки, наблюдаются только такие пики, координаты которых равны частотным парам, связанным по фазе. В то же самое время, в биспектре данного многокомпонентного процесса отсутствуют пики для спектральных компонент, которые не имеют фазовых связей. Это свойство биспектра служит основой для выделения из помехи пар доплеровских частот, связанных по фазе. Однако, к сожалению, в практике измерений нестационарного многокомпонентного радиолокационного сигнала обратного рассеяния время обработки и объем выборки существенно ограничены, и оценка биспектральной плотности искажена помехами. Поэтому показатели обнаружения объекта в практической ситуации зависят от отношения сигнал-шум на вхо-

де радиолокационный приемник, оцениваемого в виде отношения пикового значения доплеровского спектра к уровню помехи.

Задача, решаемая в данной статье, заключается в экспериментальной оценке отношения сигнал-шум при измерениях биспектральной плотности и сравнения биспектрального отношения сигнал-шум с величиной, полученной с использованием традиционного подхода.

Определим кратковременную оценку биспектральной плотности  $\hat{B}_y(p, q; n)$  в следующем виде

$$\begin{aligned} \hat{B}_y(p, q; n) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S(p; n) S(q; n) S^*(p+q; n) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \hat{B}_y(p, q; n) \right| \exp[j\hat{\beta}_y(p, q; n)], \end{aligned} \quad (2)$$

где  $S(p; n)$  – прямое дискретное преобразование Фурье, рассчитываемое для кратковременного сегмента, выделенного из наблюдаемого процесса  $y(i)$  (1) с помощью скользящего окна, занимающего  $n = 1, 2, \dots, N$  положений с пятидесятипроцентным перекрытием;  $|\hat{B}_y(p, q; n)|$  и  $\hat{\beta}_y(p, q; n)$  – кратковременные оценки амплитудного и фазового биспектра соответственно;  $p = 0, 1, 2, \dots, P$  и  $q = 0, 1, 2, \dots, P$  – индексы частотных отсчетов; символ \* означает комплексное сопряжение.

Отметим, что в случае, когда пара частот  $p$  и  $q$  связана по фазе, в оценке амплитудного биспектра  $|\hat{B}_y(p, q; n)|$  в (2) должен появиться пик с координатами  $(p, q)$  на биспектральной плоскости. Частотные компоненты помехи (обратное рассеивание деревьями, кустарниками и электрический гауссов шум), которые не имеют фазовых связей, теоретически должны дать отклик меньшего уровня в оценке амплитудного биспектра в (2). При этом возникает важный вопрос: достаточна ли амплитуда информативного пика по отношению к уровню помехи для обнаружения движущегося радиолокационного объекта? Для ответа на данный вопрос ниже рассмотрим результаты экспериментальных исследований обнаружения движущегося человека на фоне помех.

## 2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования предлагаемого подхода к обнаружению радиолокационных объектов на фоне помех с использованием оценивания биспектральной плотности были выполнены на доплеровском гомодинном радиолокаторе непрерывного излучения, работающего на вертикальной поляризации на длине волны  $\lambda_0 = 8,8$  мм. Радиолокатор разработан и изготовлен в институте Радиофизики и Электроники НАН Украины им. А.Я. Уси-

кова в отделе радиолокации под руководством заведующего отделом, профессора Г.И. Хлопова [9].

Фотография и структурная схема радиолокатора приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Технические характеристики радиолокатора:

- мощность излучения в непрерывном режиме равна  $P_T = 15$  мВт;
- ширина ДН антенны в Е и Н плоскости одинакова и равна  $\Delta\theta_{E,H} = 6^\circ$ ;
- уровень боковых лепестков:  $-24$  дБ;
- высота расположения антенны над земной поверхностью: 150 см;
- чувствительность радиолокационного приемника  $P_{receiver} = 10^{-15}$  Вт/Гц;
- коэффициент шума радиолокационного приемника  $F_n = 20,2$  дБ;
- уровень кросс-поляризации:  $\leq -30$  дБ;
- двухканальный 16-разрядный АЦП позволяет регистрировать принимаемые последетекторные колебания для последующей записи и хранения данных в виде звуковых wav-файлов.



Рис. 1. Гомодинный радиолокатор миллиметрового диапазона длин волн

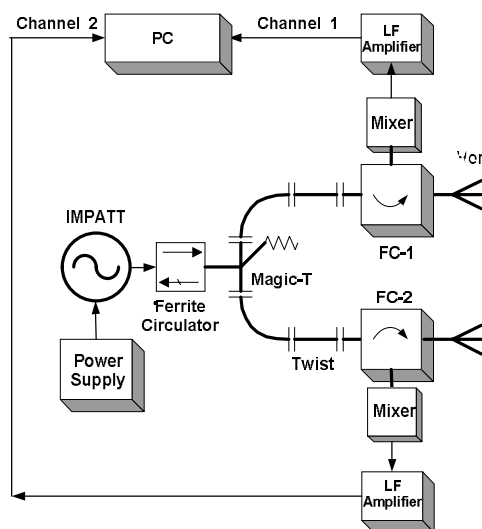


Рис. 2. Структурная схема радиолокатора

### 3. Результаты эксперимента

Для решения задачи обнаружения движущегося радиолокационного объекта была разработана компьютерная программа, позволяющая после расчета оценки биспектральной плотности (2) выделить пары связанных по фазе частотных компонент и отображать пиковые значения оценки амплитудного биспектра на графике зависимости относительной амплитуды от частоты. Величина относительной амплитуды (Relative Amplitude) информативных пиков рассчитывалась как

$$\text{Relative Amplitude (dB)} = 20 \log \frac{|B(p, q; n)|}{|B(p, q; n)|_{\max}}, \quad (3)$$

где  $|B(p, q; n)|_{\max}$  – максимальное значение оценки амплитудного биспектра.

Радиолокационным объектом в натурном эксперименте служил человек идущий или бегущий по направлению к или от радиолокатора на фоне деревьев и кустарника.

Зависимости относительной амплитуды (3) от частоты, полученные с использованием оценивания биспектральной плотности (2), представлены на рис. 3 – 5. Расчеты данных зависимостей были выполнены с помощью скользящего окна Дирихле длительности 1024 отсчета, которое последовательно (шаг за шагом) занимало  $N = 24$  положения с пятидесятипроцентным перекрытием.

Для сравнения на рис. 6 – 8 представлены графики обычных доплеровских спектров Фурье, которые рассчитаны с помощью компьютерной программы «SPECLAB» с использованием алгоритма БПФ размерности, равной 32768 отсчетов. Это соответствует длительности наблюдения радиолокационного сигнала обратного рассеивания, равной приблизительно трем секундам.

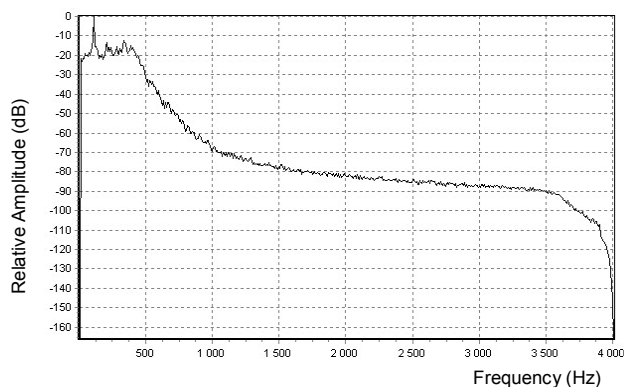


Рис. 3. Человек, идущий в направлении от радиолокатора

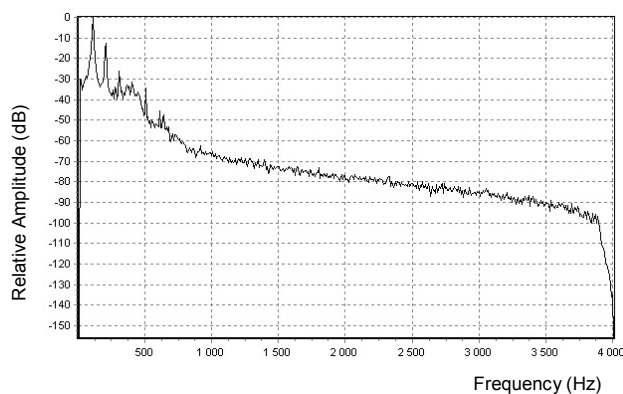


Рис. 4. Человек, идущий по направлению к радиолокатору

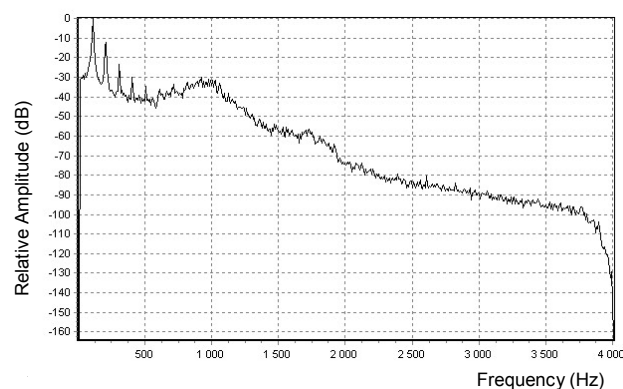


Рис. 5. Человек, бегущий в направлении от радиолокатора

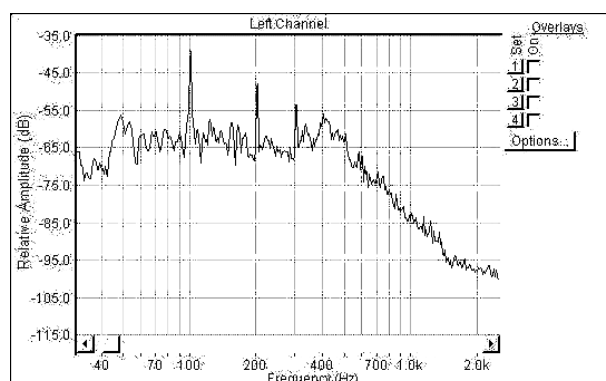


Рис. 6. Человек, идущий в направлении от радиолокатора

Графики, приведенные на рис. 3 – 8, позволяют количественно оценить преимущества показателей обнаружения движущегося радиолокационного объекта, достигаемые в предлагаемом подходе, по сравнению с традиционным методом анализа доплеровского спектра Фурье.

Для сравнительной оценки показателей обнаружения радиолокационного объекта на фоне помех будем рассматривать величину превышения уровня информативного пика по отношению к уровню ши-

рокополосной помехи. Отметим, что информативный пик возникает на доплеровской частоте, соответствующей максимальной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Максимальная ЭПР движущегося пешехода соответствует обратному рассеянию торса человека.

Сравнение графиков на рис. 3 и 6, полученных при движении человека по направлению к радиолокатору, показывает, что превышение спектрального уровня информативного пика, наблюдаемого на частоте  $f = 400$  Hz, по отношению к уровню помехи на частоте  $f = 2$  KHz равно соответственно 68 dB (см. рис. 3) для предлагаемого подхода и 45 dB для традиционного подхода (см. рис. 6). Следовательно, выигрыш в обнаружении шагающего человека, обеспечиваемый при использовании биспектрального оценивания, равен 23 dB.

Анализ показателей обнаружения с помощью графиков, полученных для человека, идущего по направлению к радиолокатору (см. для сравнения рис. 4 и 7), показывает, что величина превышения информативного пика ( $f = 400$  Hz) над уровнем помехи (на частоте  $f = 2$  KHz) равна соответственно 45 dB и 32 dB для предлагаемого и известного подходов. Выигрыш, достигаемый в отношении сигнал-шум при использовании предлагаемого подхода, равен 13 dB.

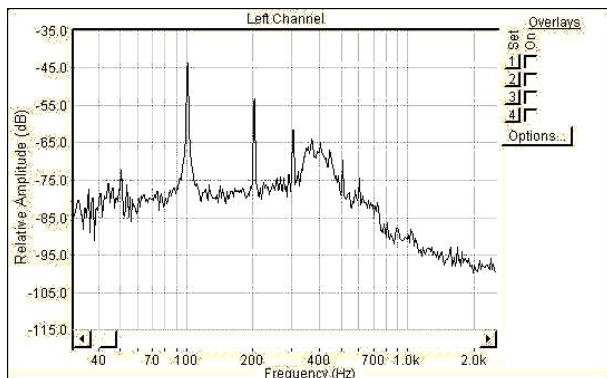


Рис. 7. Человек, идущий по направлению к радиолокатору

Наконец, величина выигрыша, достигаемого при обнаружении человека, бегущего по направлению от радиолокатора (см. для сравнения величину превышения информативного пика на частоте  $f = 1$  KHz над уровнем помехи на частоте  $f = 2$  KHz на рис. 5 и 8), равна приблизительно 15 dB.

### Заключение

Основная отличительная особенность предлагаемого подхода к решению задачи обнаружения в

радиолокационной системе наблюдения за движущимися объектами заключается в формировании

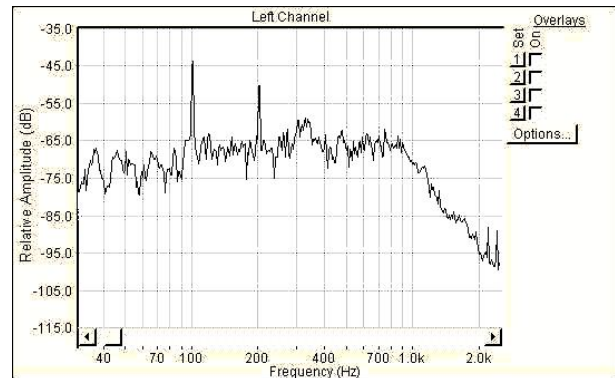


Рис. 8. Человек, бегущий в направлении от радиолокатора

оценки спектральной корреляции третьего порядка, позволяющей выделить из широкополосного спектра обратного рассеяния пары связанных по фазе доплеровских частот. Для обнаружения радиолокационного объекта на фоне помех предложено рассчитывать кратковременные оценки биспектральной плотности в пределах последовательности сегментов, выделяемых из многочастотного нестационарного сигнала с помощью скользящего окна. Экспериментальные измерения сигналов обратного рассеяния выполнены с использованием доплеровского радиолокатора миллиметрового диапазона длин волн для идущего и бегущего человека. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что использование биспектрального оценивания обеспечивает выигрыш в отношении сигнал-шум по сравнению с традиционным методом обнаружения объекта с использованием оценки амплитудного доплеровского спектра Фурье. Величина достигаемого выигрыша лежит в пределах от 13 до 23 dB. Полученные результаты могут быть использованы в радиолокационных системах автоматического распознавания образов для целей охраны объектов, занимающих большие площади.

### Литература

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. – P. 267-278.
2. Chen V.C. *Doppler signatures of radar back-scattering from objects with micro-motions* / V.C. Chen // *IET Signal Processing*. – 2008. – Vol. 42, No. 3. – P. 291-300.
3. 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.

4. Astola J.T. Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals / J.T. Astola, K.O. 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.

5. Тоцький А.В. Радиолокаційне розпізнавання движущихся наземных объектов в миллиметровом диапазоне длин волн / А.В. Тоцький, А.Л. Теплюк, В.Е. Морозов, Г.И. Хлопов, С.И. Хоменко // *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*. – 2008. – № 12. – С. 35-45.

6. Page C.H. Instantaneous power spectra / C.H. Page // *J. Appl. Physics*. – 1952. – Vol. 23. – P. 103-106.

7. Rihaczek A.W. Signal energy distribution in time and frequency / A.W. Rihaczek // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1968. – Vol. IT-14. – P. 369-374.

8. Cohen L. Time-frequency distributions—a review / L. Cohen // *Proceedings of the IEEE*. – 1989. – Vol. 77. – P. 941-981.

9. Khlopov G.I. Coherent radar in short millimeter wave band / G.I. Khlopov // *MSMW'04 Symposium Proceedings, 5-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, June 21-26*. – 2004. – Vol. 1. – P. 103-108.

10. 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.

Поступила в редакцію 2.04.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор, професор кафедри № 504 В.В. Лукин, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків.

#### ВИЯВЛЕННЯ РУХОМИХ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БІСПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЯННЯ

*О.В. Тоцький*

Розглянуто задачу виявлення рухомого об'єкту на фоні завад з використанням методу біспектрального аналізу нестационарного детермінованого сигналу зворотного розсіяння. Запропоновано підхід до покращення відношення сигнал-шум в радіолокаційній системі виявлення наземних об'єктів, в основі якого лежить виділення з широкосмугового спектру сигналу і завади тільки таких пар доплерівських частот, які зв'язані за фазою. Представлені данні експериментальних вимірювань сигналів зворотного розсіяння крокуючої та біжучої людини які отримані на радіолокаторі міліметрового діапазону. Приведені результати експериментальних досліджень, які демонструють вигравш у відношенні сигнал-шум з використанням запропонованого підходу в порівнянні з відомим підходом, який засновано на аналізі доплерівського Фур'є спектра.

**Ключові слова:** радіолокатор, доплерівська частота, біспектральна густина.

#### DETECTION OF MOVING GROUND OBJECTS BY USING BISPECTRAL ANALYSIS OF THE RADAR BACKSCATTERED SIGNALS

*A.V. Totsky*

The problem of detecting a moving radar object observed in interference environment by using bispectral analysis of non-stationary backscattered signal is considered. An approach to improvement the signal-to-noise ratio in radar ground moving object detection system is proposed. The approach proposed is based on the extracting Doppler frequency phase coupled pairs from broadband signal and interference spectrum. Experimental data measured by radar operating in millimeter wavelength for signals backscattered by a walking or running human are represented. Experimental results demonstrate the benefit obtained for signal-to-noise ratio comparing to known approach using Doppler Fourier spectrum analysis.

**Key words:** radar, Doppler frequency, bispectral density.

**Тоцький Александр Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент каф. № 504 Национального аерокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: totskiy@xai.edu.ua.