

УДК 621.396

С.А. Юкин, В.Г. Андреев

## БИСПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИООТРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ СЕЛЕКЦИИ НАЗЕМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

*В работе выполнен биспектральный анализ радиолокационных изображений подстилающей поверхности, формируемых бортовыми радиолокационными системами. Показано, что синтезируемый на основе биспектральных оценок фильтр обработки позволяет повысить эффективность выделения в области отражений по главному лепестку диаграммы направленности антенны (на фоне коррелированной помехи) сигнала движущейся цели в сравнении с оптимизированным режекторным фильтром.*

**Ключевые слова:** биспектральный анализ, радиоотражения от подстилающей поверхности, обнаружение малоподвижных целей.

**Введение.** Статистические характеристики искажающих полезные эхо-сигналы факторов априорно неизвестны. Такая ситуация типична для задач обнаружения и распознавания сигналов в радиолокации.

Эффективность широко используемых методов винеровской и инверсной фильтрации [1] в значительной степени зависит от полноты априорных сведений о статистике сигналов и помех.

Точность и границы применимости традиционных методов фильтрации и восстановления сигналов [1-3] сильно зависят от отношения  $q_{вх} = P_c / (P_n + P_{ш})$  на входе системы обработки, где  $P_c$  – мощность сигнала,  $P_n$  – мощность помехи,  $P_{ш}$  – мощность шума. Для задач обнаружения слабо отражающих целей в радиолокации отношение сигнал/шум не превышает единицу [3, 4]. Ситуация усложняется в присутствии интенсивных отражений от подстилающей поверхности.

К одному из перспективных подходов, обеспечивающих хорошие результаты при решении задач восстановления сигналов в условиях присутствия интенсивных помех, относится подход, основанный на использовании корреляционных функций третьего порядка и биспектров (биспектр – преобразование Фурье корреляционной функции третьего порядка) [5, 6].

**Цель работы** – исследование биспектрального анализа спектра мощности отражений от подстилающей поверхности в когерентно-импульсной бортовой радиолокационной станции (БРЛС) для выделения сигнала от движущейся цели на фоне отражений по главному лепестку диаграммы направленности антенны.

**Постановка задачи и путь ее решения.** Маловысотный полет летательного аппарата со-

пряжен с возрастающей интенсивностью отражений как по главному лепестку (ГЛ) диаграммы направленности (ДНА), так и по боковым лепесткам [4]. Это усложняет задачу формирования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра обработки входного массива данных для селекции движущихся целей, а при попадании отраженного сигнала от цели в область ГЛ ДНА (рассматривается малоподвижная цель) обнаружение, без применения дополнительных режимов работы БРЛС, становится практически невозможным [3, 4].

Движение носителя РЛС позволяет разбить разрешаемый элемент поверхности с угловыми координатами  $(\alpha, \beta)$  относительно пространственного положения носителя РЛС на дополнительные фрагменты, поставив в соответствие каждому такому фрагменту определенное смещение частоты принимаемого сигнала –  $f$ .

Таким образом, формируем доплеровский портрет радиоотражений, т.е. получаем распределение мощности принимаемого сигнала ( $P_{пр}$ ) по частотным каналам – спектральную плотность мощности (СПМ). Рассматривая совместно распределение СПМ вдоль линии визирования РЛС, получаем радиолокационное изображение (РЛИ) поверхности, представляющее собой спектрально-дальностный портрет (см. рисунок 1).

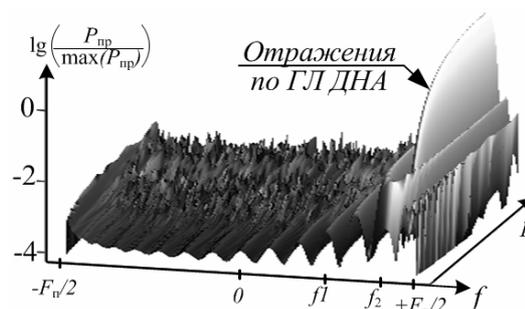


Рисунок 1

Для удобства была введена нормировка к максимальному значению массива, все последующие графики, если не оговорено иного, будут нормироваться к этому же значению.

На рисунке 1 показан пример зашумленного РЛИ, частотами  $f_1$  и  $f_2$  обозначен интересующий нас фрагмент РЛИ (область отражений по ГЛ ДНА и первым боковым лепесткам ДНА), анализируемый в дальнейшем. РЛИ сформировано при следующих условиях и допущениях:

– высота полета летательного аппарата – 200 м, скорость – 100 м/с;

– РЛС работает в режиме средней частоты повторения импульсов (в СПМ нет области, свободной от пассивных помех, обусловленных отражениями от подстилающей поверхности);

– форма ДНА аппроксимирована суммой двух функций:  $|\text{sinc}(x)| = |\sin(x)/x|$ , где

$x = \sqrt{(\alpha - \alpha_0)^2 + (\beta - \beta_0)^2}$  ( $\alpha_0 = 30^\circ$ ,  $\beta_0 = -3^\circ$  – отклонение ГЛ ДНА от вектора путевой скорости,  $\alpha$ ,  $\beta$  – направления на сегменты поверхности), и сферой, так что обеспечиваемый коэффициент направленного действия антенны равен 35 дБ, ширина ДНА –  $3^\circ$ ;

– анализируемый спектрально-дальностный портрет уже усреднен по 3-5 пачкам, что считается достаточным [4] для устранения спекл шумов в изображении (снижения их интенсивности до уровня широкополосного шума канала распространения сигнала).

Интенсивность отражений можно охарактеризовать двумя основными компонентами: медленно меняющимися и быстро меняющимися (см. рисунок 1). Неинформативная составляющая, связанная с медленными изменениями, определяется параметрами РЛС, формой ДНА, средним фоном отражений от коррелированной помехи (средней мощностью отражений, обусловленной постоянством или медленным изменением коэффициента отражения разрешаемого сектора пространства). Быстро меняющаяся составляющая обусловлена резкими изменениями коэффициента отражения, то есть присутствием малоподвижного объекта – цели. В дальнейшем рассматривается резонансная форма спектра отражений от подвижной цели.

Поскольку частота прямо связана со скоростью изменения сигнала, то интуитивно ясно, что частоты в Фурье-образе рассматриваемого РЛИ связаны с вариацией интенсивности отражения в соседних доплеровских каналах. Такое поведение позволяет ассоциировать высокочастотную составляющую преобразования Фурье с быстрым изменением коэффициента отражения,

что может говорить о сильной неоднородности поверхности и/или о наличии в спектре отражений от цели, что и предлагается выделять.

Известная в задаче обработки изображений процедура высокочастотной фильтрации (подавление низкочастотных компонент) ориентирована на выделение контуров и других скачкообразных изменений яркости [8]. Таким образом, чтобы выделить сигнал цели, необходимо подавить низкие частоты спектра РЛИ, соответствующие плавным изменениям интенсивности радиоотражений. Подобная обработка осуществляется фильтрами нулевого фазового сдвига [8] – фильтрами, не меняющими фазовых соотношений, так как действительная и мнимая части спектра анализируемой последовательности умножаются на одну и ту же действительную величину.

Основная проблема, возникающая при этом, – как сформировать АЧХ фильтра обработки?

Таким образом, проблематика, рассматриваемая в рамках данной статьи, может быть сформулирована следующим образом: поиск алгоритма обработки (фильтрации) данных, получаемых с выхода приемника когерентно-импульсной БРЛС, для выделения сигнала от движущейся цели на фоне отражений по главному лепестку диаграммы направленности антенны.

**Теоретическая часть.** Предлагается высокочастотную фильтрацию проводить отдельно для каждой строки РЛИ (для каждой СПМ элемента разрешения по дальности вдоль линии визирования), что позволит, анализируя соответствующие доплеровские каналы в соседних строках дальности, отделить отражения, обусловленные неоднородностью поверхности, и отражения от цели. Предполагается, что неоднородность подстилающей поверхности занимает более одного элементарного разрешаемого объема, а цель является малоразмерной.

Рассмотрим вещественный стационарный одномерный процесс  $\{p^{(i)}(l)\}$ , наблюдаемый в виде дискретной совокупности отсчетов  $l = 0, (L-1)$  по набору  $i = 0, (I-1)$ , где  $L$  – число анализируемых доплеровских каналов (перекрывающих интересующий нас диапазон частот от  $f_1$  до  $f_2$ ),  $I$  – число разрешаемых элементов по дальности.

Тройную автокорреляционную функцию (ТАКФ)  $R_p^{(i)}(k, t)$  рассматриваемого процесса  $\{p^{(i)}(l)\}$  представим в виде:

$$R_p^{(i)}(k, t) = \sum_{l=0}^{L-1} p^{(i)}(l) \cdot p^{(i)}(l+k) \cdot p^{(i)}(l+t), \quad (1)$$

здесь независимые смещения процесса  $k$  и  $t$  принимают значения, лежащие в пределах  $k = \overline{(-L+1), (L-1)}$ ,  $t = \overline{(-L+1), (L-1)}$ .

Биспектр  $\dot{B}_p^{(i)}(n, m)$ , по определению [6], является комплексной функцией двух переменных – двух независимых частот. Символом « $\cdot$ » будем обозначать комплексность соответствующей переменной. Запишем выражение для биспектра в виде следующего двумерного дискретного преобразования Фурье ТАКФ вида (1):

$$\dot{B}_p^{(i)}(n, m) = \frac{1}{(2L-1)^2} \sum_{k=-L+1}^{L-1} \sum_{t=-L+1}^{L-1} R_p^{(i)}(k, t) \times \exp\left[-\frac{j2\pi}{2L-1}(kn + tm)\right], \quad (2)$$

где  $n = \overline{(-L+1), \dots, (L-1)}$ ,  $m = \overline{(-L+1), \dots, (L-1)}$  – номера отсчетов независимых частот.

Рекурсивный алгоритм оценки амплитудного Фурье-спектра сигнала  $|\hat{S}^{(i)}(w)|$  по амплитудному биспектру (2) описывается с помощью следующей системы уравнений [5-7]:

$$\left|\hat{S}^{(i)}(n+m)\right| = \frac{|\dot{B}_p^{(i)}(n, m)|}{\left|\hat{S}^{(i)}(n)\right| \cdot \left|\hat{S}^{(i)}(m)\right|}, \quad n = \overline{0, (L-1)}, \quad m = \overline{0, (L-1)}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно [5], что каждый отсчет оценки Фурье-спектра последовательности  $\{p^{(i)}(l)\}$  имеет  $(n-1)/2$  различных форм представления при нечетных значениях  $n$  и  $n/2$  при четных значениях  $n$ . Это позволяет, усреднив соответствующие оценки, улучшить отношение сигнал/шум на выходе системы обработки.

АЧХ  $|\hat{H}^{(i)}(w)|$  фильтра селекции сигналов от целей формируется как обратная к полученной оценке амплитудного Фурье-спектра  $|\hat{S}^{(i)}(w)|$ ,  $w = \overline{0, (L-1)}$ , с последующей нормировкой к максимальному значению.

Упрощенная структурная схема предлагаемого алгоритма формирования частотной характеристики фильтра и последующей обработки РЛИ представлена на рисунке 2. Между блоком вычисления биспектра  $\dot{B}_p^{(i)}(n, m)$  и блоком оценивания спектра  $|\hat{S}^{(i)}(w)|$  дополнительно может быть размещен блок весовой обработки, что по-

зволяет повысить достоверность формируемых оценок  $|\hat{S}^{(i)}(w)|$  [6].

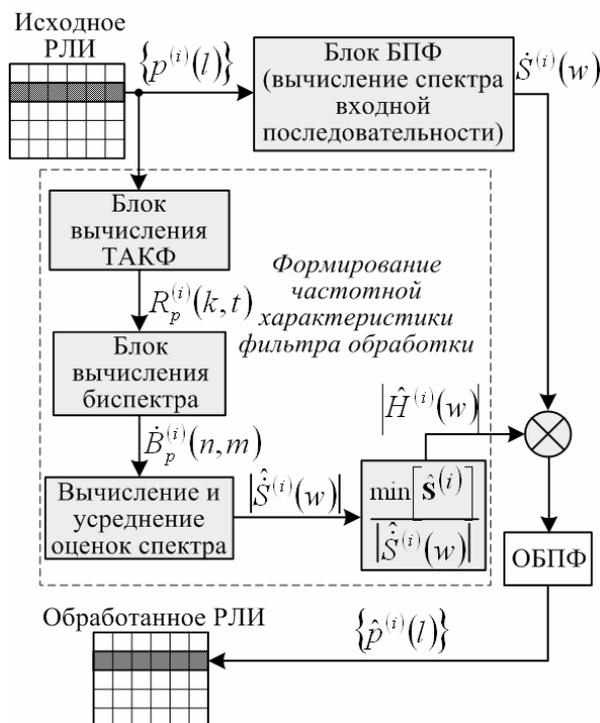


Рисунок 2

**Результаты имитационного моделирования.** Радиолокационное изображение, представленное на рисунке 1, сформировано на основе аддитивной смеси (сигнал + помеха + шум) при следующих соотношениях мощности компонент:  $\lambda = -30$  дБ – отношение шум/помеха,  $q = -20$  дБ – отношение сигнал/(помеха + шум). В качестве процесса  $\{p^{(i)}(l)\}$  рассмотрим фрагмент  $i$ -й строки анализируемого РЛИ (см. рисунок 1), соответствующей дальности, на которой содержится отраженный сигнал от цели (см. рисунок 3).

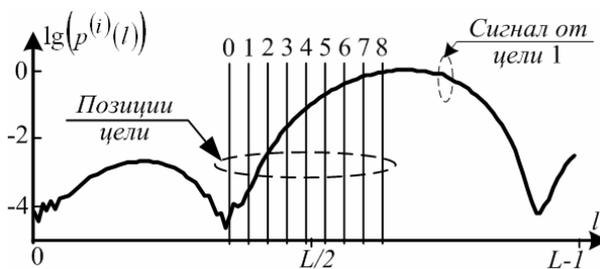


Рисунок 3

Амплитудно-частотная характеристика фильтра обработки, рассчитанная по рассмотренному выше алгоритму, и нормированный амплитудный спектр исходной последовательности в логарифмическом масштабе:  $\lg|\hat{H}^{(i)}(f)|$  и

$\lg \left\{ \dot{S}^{(i)}(f) / \max \left( \left| \dot{S}^{(i)}(f) \right| \right) \right\}$  соответственно представлены на рисунке 4, где  $f_b$  обозначена верхняя частота спектра.

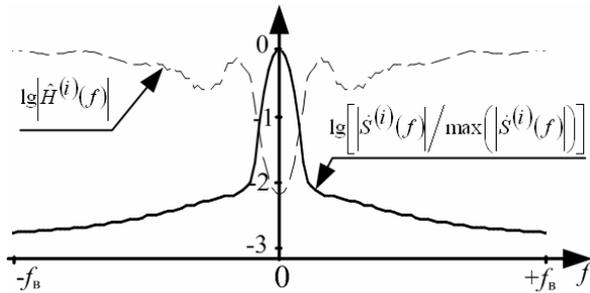


Рисунок 4

Результат высокочастотной фильтрации входной выборки  $\{p^{(i)}(l)\}$  представлен на рисунке 5 ( $\{\hat{p}^{(i)}(l)\}$ ).

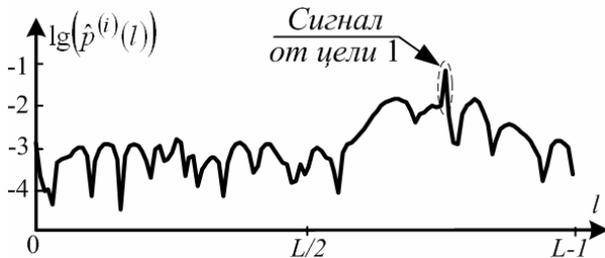


Рисунок 5

Коэффициент  $K$  улучшения отношения сигнал/(помеха+шум) в процессе высокочастотной фильтрации, для рассмотренного процесса  $\{p^{(i)}(l)\}$ , составил:

$$K = \frac{\left[ \frac{P_c}{(P_n + P_{ш})} \right]_{\text{вых}}}{\left[ \frac{P_c}{(P_n + P_{ш})} \right]_{\text{вх}}} = \frac{\left[ \frac{5,991 \cdot 10^{-7}}{3,423 \cdot 10^{-6}} \right]}{\left[ \frac{7,17 \cdot 10^{-7}}{2,503 \cdot 10^{-4}} \right]} = 61,099 \text{ (17,86 дБ)}.$$

Обработывая аналогичным образом каждую строку РЛИ в интересующем нас секторе  $P_{пр}$  (см. рисунок 6), получаем РЛИ, представленное на рисунке 7  $\hat{P}_{пр}$ , где явно видны сигналы от малоподвижных целей.

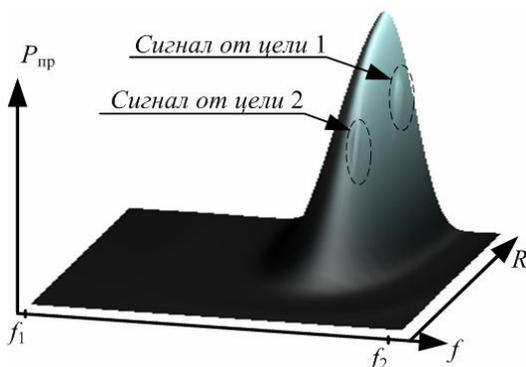


Рисунок 6

Для более детального исследования предложенного алгоритма обработки спектральных компонент отражений по ГЛ ДНА (структура алгоритма представлена на рисунке 2) построим характеристики обнаружения (ХО) и сравним их с результатами фильтрации оптимальным (ОФ) и оптимизированным режекторным фильтрами. Под оптимизированным режекторным фильтром (ОРФ) будем понимать режекторный фильтр, построенный по априорно известной корреляционной матрице помехи и адаптирующий свой порядок с целью максимизации коэффициента улучшения отношения сигнал/(помеха+шум)  $K$ .

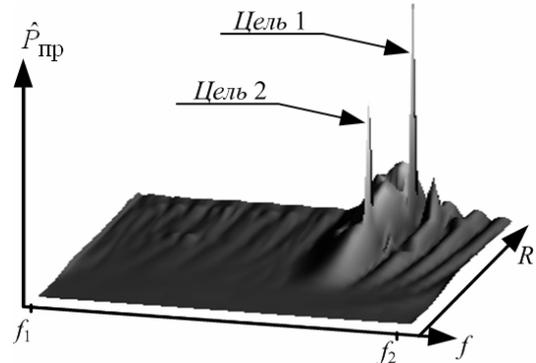


Рисунок 7

Проанализируем несколько позиций цели (различные доплеровские сдвиги отражений от цели относительно положения ГЛ ДНА) в рассматриваемой выборке процесса (см. рисунок 3), анализ проведем при вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-3}$ .

Для построения ХО воспользуемся известным методом анализа собственных значений [9, 10]. Результаты фильтрации для некоторых характерных позиций цели представлены на рисунке 8, где БФ – результат обработки предложенным фильтром, построенным на основе биспектральных оценок.

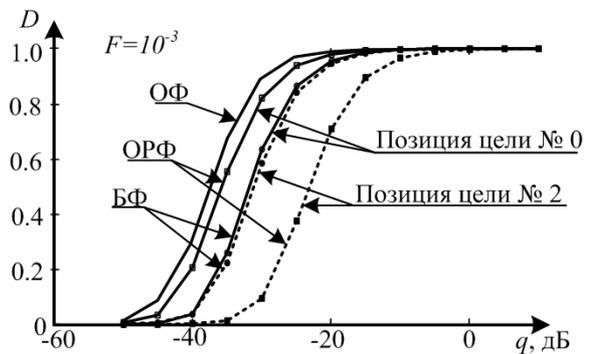


Рисунок 8

Из рисунка 8 видно, что оба метода проигрывают ОФ, но предлагаемый метод уступает и ОРФ в области слабых отражений от коррелированной помехи (позиция 0). При перемещении спектральной компоненты цели в область интен-

сивных отражений (позиция 2) от пассивной помехи (спектральные компоненты, соответствующие отражениям по ГЛ ДНА) у БФ наблюдаются незначительные изменения в ХО, а у ОРФ ХО резко уходят вправо, проигрывая предложенному методу по уровню  $D=0,8$  до 4 дБ.

Для более наглядной визуализации сравнения двух методов фильтрации на рисунке 9 представлена разница вероятностей правильного обнаружения цели в БФ и ОРФ:  $\Delta D = D_{\text{БФ}} - D_{\text{ОРФ}}$ , для всех анализируемых положений цели в области отражений по ГЛ ДНА (см. рисунок 3). Нетрудно видеть, что предложенный метод наиболее эффективен при выделении (обнаружении) целей в области интенсивных коррелированных отражений, т.е. для малоподвижных наземных объектов.

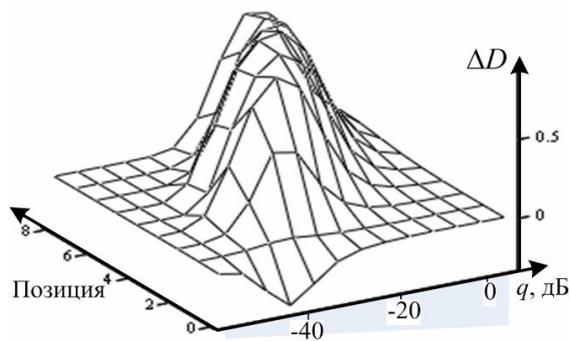


Рисунок 9

**Выводы:** предложен алгоритм выделения малоподвижных объектов, сигналы от которых попадают в доплеровские каналы, соответствующие области интенсивных отражений от подстилающей поверхности по главному лучу диаграммы направленности антенны. Выделение осуществлено посредством высокочастотной фильтрации (фильтром нулевого фазового сдвига) на основе биспектральных оценок радиоло-

кационного изображения, формируемого бортовой когерентной радиолокационной системой. Величина выигрыша по мощности в отношении сигнал/(помеха+шум) в сравнении с оптимизированным режекторным фильтром составила до  $\Delta q = q_{\text{ОРФ}} - q_{\text{БФ}} = 7$  дБ по уровню вероятности правильного обнаружения  $D=0,8$  при вероятности ложной тревоги  $F = 10^{-3}$ .

#### Библиографический список

1. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
2. Обнаружение радиосигналов / под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
3. Бакулев П.А., Сосновский А.А. Радиолокационные и радионавигационные системы. – М.: Радио и связь, 1994. – 296 с.
4. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / под ред. П.И. Дудника. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – 1112 с.
5. Важинский В.Н., Тетерин В.В. Корреляционная функция третьего порядка и биспектр в задачах обработки сигналов // ОМП. – 1991. – № 4. – С. 4–14.
6. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с.
7. Jium Wah Yeo Bi-spectral method for radar target recognition. – Monterey, California: Naval postgraduate school, December 2006. – 73 p.
8. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
9. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. – М.: Советское радио. Том 2. – 1962. – 653 с.
10. Соколов Г.А., Иванов В.А. К расчёту характеристик обнаружения сигналов на фоне коррелированных помех в системах междупериодной обработки // Повышение эффективности и надёжности радиоэлектронных систем: межвузовский сборник научных трудов. – Л.: ЛЭТИ, 1979. – С. 46-53.