

УДК 621.396:681.34

П.А. МОЛЧАНОВ¹, В.М. ОРЛЕНКО², А.В. ТОЦКИЙ¹

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

² *Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина*

УМЕНЬШЕНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАЛЬНОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ С ПОМОЩЬЮ БИСПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Проанализирована изменчивость радиолокационных дальностных портретов, вызванная вариациями ракурса объекта наблюдения по отношению к линии визирования РЛС. Показана возможность уменьшения воздействия спекл-эффекта на изменчивость радиолокационных дальностных портретов летательных аппаратов. Предложен подход, основанный на восстановлении дальностных портретов с помощью биспектрального оценивания. Результаты компьютерного моделирования, полученные для разных типов воздушных радиолокационных целей, демонстрируют уменьшение чувствительности оценки дальностного профиля к изменениям ракурса объекта при использовании биспектрального оценивания.

радиолокационный дальностный портрет, спекл-эффект, биспектральная оценка

Введение

Задача классификации и идентификации протяженных воздушных целей, решаемая с помощью оценивания их радиолокационных дальностных портретов (РДП) в системах автоматического распознавания объектов, представляет большой практический интерес [1 – 4]. РДП, формируемый в виде одномерного пространственного распределения интенсивности поля обратного рассеяния, позволяет получить информацию не только о длине, но и о форме протяженной цели. Поэтому РДП может служить отличительным информативным признаком для решения задач распознавания радиолокационных воздушных целей.

Широко распространенной моделью обратного рассеяния электромагнитного поля, принятой в радиолокации, служит представление протяженной цели в виде совокупности «блестящих точек», пространственно распределенных на поверхности объекта, а моделью РДП – проекция пространственного распределения интенсивности протяженной цели на линию визирования РЛС [1]. На практике значительные флуктуации интенсивности наблюдаются в РДП, величина которых способна резко измениться даже при малых (десятые доли углового градуса)

вариациях ракурса цели, а также при малых (доли длины волны) пространственных перемещениях цели. По этой причине изменчивость РДП, вызванная изменениями ракурса цели при ее перемещении, является главным ограничением и источником ошибок при решении задачи идентификации цели и ее распознавании.

Величина векторной суммы полей обратного рассеяния многочисленных «блестящих точек» в элементе разрешения зависит от текущего значения азимута и угла места цели. К основным источникам временной изменчивости РДП относятся: флуктуации интенсивности – перемещения пиков интенсивности вследствие разворота цели в широком угловом секторе наблюдения; изменение формы РДП при поступательном движении цели и спекл-эффект, проявляющийся при вариациях ракурса цели в очень узком угловом секторе наблюдения.

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 [5] позволяет обеспечить инвариантность РДП к пространственному сдвигу цели. При этом отпадает необходимость в процедуре выравнивания РДП, требуемая при перемещении цели вдоль линии визирования РЛС [2 – 4, 6]. Данная особенность биспектрального оценивания в совокупности с высокой помехоустойчивостью биспектра по отношению к аддитивному шуму с симметричной функцией плотности вероятности представляются несомненными преимуществами по сравнению с традиционным некогерентным усреднением совокупности РДП, регистрируемых в пределах широкого углового сектора наблюдения цели [1].

Спекл-эффект, природа которого связана с когерентностью поля обратного рассеяния протяженной цели, также является источником значительных флуктуаций РДП даже при очень малых изменениях ракурса цели. При интерференции полей обратного рассеяния нескольких «блестящих точек» в элементе разрешения возникают флуктуации РДП вследствие спекл-эффекта. Поэтому даже небольшой угловой поворот цели, соответствующий, например, разности хода в половину длины волны, может сопровождаться вычитанием полей в элементе разрешения, и в результате появляется провал в распределении интенсивности РДП.

Задача уменьшения изменчивости РДП, вызванной спекл-эффектом, ранее не рассматривалась, хотя в ряде практических ситуаций именно такие флуктуации являются преобладающими.

Данная статья посвящена исследованию флуктуационных искажений РДП, которые вызваны спекл-эффектом, и применению метода биспектрального оценивания для уменьшения таких искажений.

Постановка задачи. Рассмотрим модель радиолокационного эхо-сигнала, наблюдаемого в результате обратного рассеяния поля при равномерном развороте воздушной цели по отношению к линии

визирования РЛС в пределах ограниченного углового сектора. Импульсная ЛЧМ РЛС X-диапазона позволяет получить РДП с высоким разрешением. Принятый комплексный цифровой сигнал $y_k(i)$, наблюдаемый на выходе согласованного дальномерного фильтра при произвольном k -м текущем ракурсе цели, равен

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

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; $k=1, 2, \dots, K$ – индекс отсчета ракурса цели; индекс m соответствует обратному рассеянию m -й «блестящей точки».

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

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

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, величина которой и вклад которой в РДП зависят от ракурса цели.

Для большого количества точечных рассеивателей M перекрестный член в (2) стремится к случайному процессу с нулевым средним значением, и коэффициент взаимной корреляции, оцениваемый между соседними РДП при изменении ракурса цели, мал [4]. Коэффициент корреляции близок к единице только для изменения ракурса цели, не превышающего сотые доли градуса. Следовательно, перекрестный член в (2) порождает значительные флуктуации в наблюдаемом РДП при малых угловых поворотах цели, что приводит к существенной изменчивости формы РДП в зависимости от ракурса цели.

Данные искажения РДП, вызванные спекл-эффектом, увеличиваются с уменьшением длины волны и с увеличением длины воздушной цели.

Для уменьшения изменчивости РДП, вызванной спекл-эффектом, необходимо ввести в обработку эхо-сигналов процедуру сглаживания на основе использования выборки из совокупности РДП, наблюдаемых в пределах углового сектора измерений.

Для сглаживания флуктуаций обычно используют некогерентное усреднение совокупности РДП, формируемых в пределах наблюдаемого углового сектора вариаций ракурса цели [1]. Однако уровень флуктуаций после некогерентного усреднения часто остается недопустимо большим, а его величина не удовлетворяет предъявляемым требованиям к изменчивости РДП.

Рассмотрим оценку биспектра, формируемую для произвольного k -го РДП (2) (k -го ракурса цели) в следующем виде:

$$B_k(p, q) = Z_k(p)Z_k(q)Z_k^*(p + q), \quad (3)$$

где $Z_k(p)$ – дискретное преобразование Фурье k -го РДП; $p=1, \dots, I$ и $q = 1, \dots, I$ – независимые частотные индексы; символ * означает комплексное сопряжение.

Отметим, что для получения несмещенной биспектральной оценки (3) РДП следует центрировать – вычесть из функции $z_k(i)$ (2) ее среднее значение перед выполнением процедуры преобразования Фурье [7].

При резкой изменчивости РДП, которая характерна при воздействии спекл-эффекта, для уменьшения чувствительности оценивания РДП к вариациям ракурса цели представляется целесообразным формирование последовательности K/N сглаженных биспектральных оценок. Для этого достаточно выполнить следующую операцию усреднения по коротким ($N \ll K$) выборкам РДП:

$$\tilde{B}_n(p, q) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N B_{kn}(p, q), \quad n=1, 2, \dots, K/N. \quad (4)$$

Последовательность оценок РДП $\{\hat{z}_n(i)\}$ можно восстановить по набору сглаженных биспектраль-

ных оценок (4) с использованием рекурсивного алгоритма, подробно описанного в [8].

Отметим, что вариации размера выборки N позволяют оценить эволюцию изменчивости РДП, а рациональный выбор величины N дает возможность получения устойчивого информативного признака (форма РДП), требуемого для повышения надежности распознавания цели в широком секторе изменения ракурса.

Результаты компьютерного моделирования

Чувствительность РДП по отношению к изменению ракурса воздушных целей исследовалась с помощью моделей РДП, представленных в [1]. Изменчивость дальностных портретов изучалась на моделях РДП следующих летательных аппаратов (ЛА):

- бомбардировщики Tu-16 и В1-В;
- истребитель MiG-21;
- крылатая ракета типа GLCM.

Для каждого типа выше отмеченных ЛА рассчитывались $K = 2000$ дальностных портретов, формируемых в виде 160 отсчетов комплексного выхода согласованного фильтра (2). Использовались следующие исходные данные:

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

Исходные массивы комплексных отсчетов РДП вида (1) были дополнены нулями для получения массивов отсчетов размером $I = 256$, удобным для применения алгоритма БПФ.

Количественной мерой оценивания изменчивости РДП в зависимости от ракурса цели служила величина, определенная в виде

$$v_n = \min_t \frac{\sum_{i=1}^{256} |\hat{z}_1(i-t) - \hat{z}_n(i)|}{\sum_{i=1}^{256} |\hat{z}_1(i)|}, \quad (5)$$

где $\hat{z}_1(i)$ и $\hat{z}_n(i)$ – это оценки РДП, восстановленные из биспектральных оценок (4) при $n=1,2,\dots,K/N$ (начало отсчета анализируемой последовательности РДП соответствует направлению носа ЛА на РЛС); t – целочисленный сдвиг ($t = 1,2,\dots,256$), введенный для учета инвариантности биспектра к сдвигу обрабатываемого сигнала [5].

На рис. 1 приведен пример, иллюстрирующий эволюцию изменчивости РДП самолета Tu-16 вследствие воздействия спекл-эффекта. На графике представлена последовательность $K/N = 20$ РДП, которая рассчитана при некогерентном усреднении $N=100$ РДП вида (2). Из рис. 1 явно видна эволюция изменчивости РДП, наблюдаемая в пределах исследуемого ракурса ЛА от 180° до 170° .

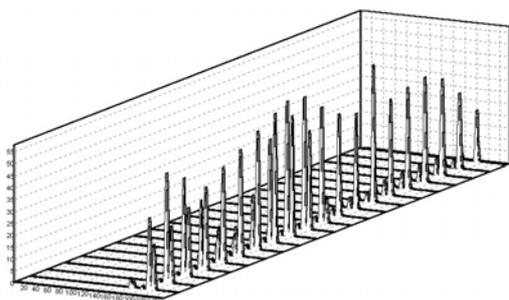


Рис. 1. Последовательность РДП самолета Tu-16

Два метода сглаживания флуктуаций РДП исследовались и сравнивались между собой. В первом случае полный угловой сектор разворота цели, равный 10° , разбивался на $K/N_1 = 40$ и $K/N_2 = 20$ сегментов, и в пределах каждого сегмента некогерентному усреднению подвергались $N_1 = 50$ и $N_2 = 100$

РДП вида (2), соответственно.

Во втором случае исследовалось усреднение $N_1 = 50$ и $N_2 = 100$ биспектральных оценок вида (3) и восстановление $K/N_1 = 40$ и $K/N_2 = 20$ РДП из усредненных биспектральных оценок (4), соответственно.

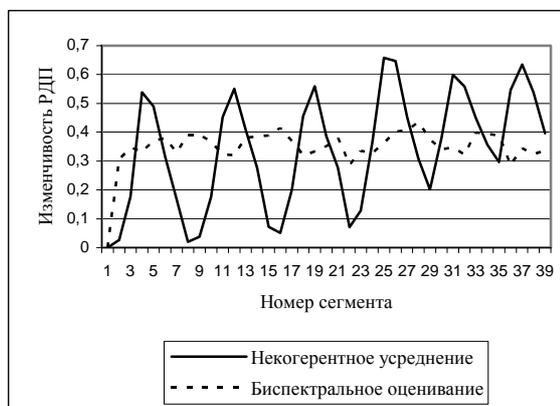


Рис. 2. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента (самолет В1-В, $K/N_1 = 40$)

Графики зависимости изменчивости (5) от порядкового номера анализируемого сегмента представлены на рис. 2 – 5 (количество сегментов $K/N_1 = 40$, что соответствует дискретной последовательности ракурсов цели с шагом, равным $0,25^\circ$) и на рис. 6 – 9 (количество сегментов $K/N_1 = 20$, что соответствует дискретной последовательности ракурсов цели с шагом, равным $0,5^\circ$).



Рис. 3. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – крылатая ракета GLCM

В табл. 1 приведены результаты расчетов среднеквадратичных отклонений изменчивости РДП для метода некогерентного усреднения РДП и для метода биспектрального оценивания. Сравнительный анализ данных табл. 1 свидетельствует об очевидном

преимущество метода биспектрального оценивания по сравнению с некогерентным усреднением РДП.



Рис. 4. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – самолет MiG-21



Рис. 5. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – самолет Tu-16



Рис. 6. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – самолет B1-B



Рис. 7. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – крылатая ракета GLCM

Анализ результатов, представленных на рис. 2 – 9, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, изменчивость РДП существенно зависит от размеров и формы поверхности обратного рассеяния объекта. Флуктуации интенсивности РДП, вызванные спекл-эффектом, минимальны для гладкой поверхности обратного рассеяния (рис. 3 и 7 – результаты, полученные для крылатой ракеты GLCM). Флуктуации интенсивности РДП возрастают с увеличением размера объекта (для сравнения – изменчивость РДП MiG-21 на рис. 4 и 8, а также изменчивость РДП Tu-16 на рис 5 и 9).



Рис. 8. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – самолет MiG-21



Рис. 9. Изменчивость РДП как функция порядкового номера сегмента – самолет Tu-16

Таблица 1

СКО изменчивости РДП

Тип цели	СКО изменчивости РДП			
	Некогерентное усреднение		Биспектральное оценивание	
	$N_1 = 50$	$N_2 = 100$	$N_1 = 50$	$N_2 = 100$
B1-B	0,199	0,166	0,036	0,03
GLCM	1,7E-03	1,5E-03	9,8E-04	9,1E-04
MiG-21	0,202	0,075	0,045	0,057
Tu-16	37,23	25,58	15,23	5,67

Во-вторых, размах флуктуаций изменчивости РДП (5) уменьшается при увеличении размера выборки усреднения. Однако, в то же самое время, с увеличением размера выборки начинает проявляться выше отмеченная изменчивость РДП из-за перемещения цели и ее вращательного движения, которая во много раз превышает изменчивость РДП, вызванную спекл-эффектом.

В-третьих, изменчивость РДП, порожденная спекл-эффектом, существенно меньше для метода биспектрального оценивания по сравнению с методом некогерентного усреднения РДП.

Заключение

Метод биспектрального оценивания радиолокационных дальностных портретов исследован с использованием компьютерного моделирования воздушных целей различной протяженности. Показано, что изменчивость РДП при малых изменениях ракурса цели порождена явлением спекл-эффекта, в результате проявления которого величина перекрестного интерференционного члена в распределении интенсивности выхода согласованного фильтра зависит от ракурса объекта и маскирует истинное распределение интенсивности объекта. Выполнены расчеты изменчивости РДП в зависимости от ракурса цели методом некогерентного усреднения РДП и методом биспектрального оценивания. Установлено, что метод биспектрального оценивания обладает меньшей чувствительностью к вариациям ракурса цели по сравнению с методом некогерентного накопления РДП. Данное преимущество представляется перспективным в системах автоматического распознавания объектов по их РДП.

Литература

1. Computer simulation of aerial targets, radar scattering, recognition, detection, and tracking / Y.D. Shir-

man, S.A. Gorshkov, S.P. Leshenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy. – Boston-London, Artech House, 2002. – 294 p.

2. Zyweck A., Bogner R.E. Radar target classification of commercial aircraft // IEEE Trans. Antennas Propagation. – 1996. – Vol. 32, No. 2. – P. 598-606.

3. Xian-Da Zhang, Yu Shi, and Zheng Bao. A new feature vector using selected bispectra for signal classification with application in radar target recognition // IEEE Trans. Signal Processing. – 2001. – Vol. 49, No. 9. – P. 1875-1885.

4. Lan Du, Hongway Liu, Zheng Bao, Mengdao Xing. Radar HRRP target recognition based on higher order spectra // IEEE Trans. Signal Processing. – 2005. – Vol. 53, No. 7. – P. 2359-2368.

5. Nikias C.L., and Raghuvveer M.R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework // Proc. IEEE. – 1987. – Vol. 75, No. 7. – P. 869-891.

6. Totsky A.V., Kurbatov I.V., Lukin V.V., Egi-azarian K.O., Astola J.T. Combined bispectrum-filtering techniques for radar output signal reconstruction in ATR applications // Proceedings of International Conference "Automatic Target Recognition XIII"; Ed. Firooz A. Sadjadi; Orlando (USA) – 2003 – SPIE Vol. 5094. – P. 301-312.

7. Sundaramoorthy G., Raghuvveer M.R., Dianat S.A. Bispectral reconstruction of signals in noise: Amplitude reconstruction issues // IEEE Transact. Acoustics, Speech, Signal Processing. – 1990. – Vol. 38, No. 7. – P. 1297-1306.

8. Bartelt H., Lohmann A.W., Wirmitzer B. Phase and amplitude recovery from bispectra // Applied Optics. – 1984. – Vol. 23. – P. 3121 – 3129.

Поступила в редакцию 27.03.2007

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