

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ И КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭХОСИГНАЛА ПАРНОЙ ЦЕЛИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СВЕРХРЕЛЕЕВСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

В статье представлены результаты сравнительного анализа сигналов отражённых от одиночной и парной целей (ПЦ) в частотной области, а так же произведено вычисление автокорреляционной функции (АКФ) прямоугольной пачки сигнала одиночной цели и пачки ПЦ с целью выявления отличительных признаков. На основании проведённого анализа сформулированы возможные пути формирования признака парной цели необходимых для разработки алгоритмов и технических решений системы высокого (сверхрелеевского) разрешения.

Ключевые слова: парная цель, спектральный анализ, автокорреляционная функция.

Введение. В теории разрешения рассматривается несколько видов и критериев разрешения. Методы "сверхразрешения" в большинстве случаев используют вид разрешения, определяемый термином квазиполное "обнаружение – разрешение" [1], который соответствует задаче обнаружения каждой одиночной цели с заданным качеством, то есть определения состава групповой цели в импульсном объёме РЛС. Альтернативной этому виду является процедура квазиполного "разрешения – измерения" [2], при которой осуществляется измерение угловых координат с точностью, приближающейся в границе Крамера – Рао.

Предполагаемые методы разрешения, основанные на использовании результатов спектрально-временного анализа, по сути соответствуют виду "обнаружение – разрешение", но отличаются от классического подхода тем, что предполагается обнаружение групповой

цели с одновременным формированием признаковой информации о составе цели, использование которой позволяет решить задачу о составе цели: "одиночная – парная".

В результате проведенного в [3] исследования определен информативный признак, характеризующий особенности тонкой структуры эхосигнала ПЦ по сравнению с пачкой одиночной цели. Таким признаком является наличие области быстрых случайных флюктуаций центральной части пачки вследствие случайного изменения относительной фазы импульсов, принятых в каждом периоде. Причиной изменения фазы в пределах $0 - 2\pi$ является дисперсия скорости движения целей, а также явления вибрации корпуса самолёта.

Наличие отличительного признака в структуре пачек эхосигнала даёт принципиальные возможности распознавания вида цели: одиночная – парная.

Анализ спектральной функции дискретной пачки парной цели.

Спектральный анализ (СА) относится к области современной теоретической и прикладной математики, которая, несмотря на свой фундаментальный характер, имеет тенденцию бурного развития.

Совокупность методов и подходов в решении задач СА включает, наряду с классическим анализом Фурье, занимающим центральное место в математическом анализе и его приложениях, целый ряд, так называемых альтернативных методов, классификация и обоснование которых считаются далеко не завершёнными. Основу этих методов составляет понятие обобщённого спектра ("псевдоспектра"), определённого как совокупность значений некоторого линейного оператора или матрицы.

Большинство таких методов альтернативного СА реализовано теоретически в известных работах по "сверхразрешению" [4, 5]. Статистическому анализу этих методов уделено большое внимание в литературе [6, 7]. Одним из принципиальных ограничений их практической реализации являются вычислительные и аппаратные трудности формирования "псевдоспектра".

К группе новых альтернативных методов СА условно можно отнести современное направление вычислительного гармонического анализа, основанное на использовании мощного математического набора методов локализованного частотно-временного и пространственно-фазового анализа многомасштабных явлений. Это направление получило название теории "вейвлет-анализа". Исследование возможностей применения этого метода к решению задачи сверхрелеевого разрешения проводится в [8].

В данном случае ставится задача изучения спектральных характеристик эхосигнала ПЦ методом классического Фурье-анализа применительно к дискретному представлению эхопачки.

Как известно, для анализа спектральных характеристик дискретных сигналов используется разновидность Фурье-анализа, называемая дискретным преобразованием Фурье (ДПФ).

Выражение ДПФ массива сигнала $\{x_n\}$ конечной длины N представляет собой массив $\{y_n\}$, элементы которого находятся по формуле:

$$Y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \exp\left\{-j \frac{2\pi}{N} km\right\}. \quad (1)$$

Спектр $Y(n)$ является дискретным с интервалом между гармониками, равным $2\pi/(NT)$. Реальный масштаб времени фигурирует только в множителе $1/T$ (в исходной формуле – перед оператором суммирования). В практике анализа оперируют с номерами отсчётов и спектральных гармоник без привязки к действительному масштабу времени и частоты.

Перед применением ДПФ необходимо отметить его особенности с точки зрения понятия спектра дискретного сигнала. ДПФ представляет собой набор дискретных отсчётов спектральной функции дискретного сигнала. Это определяет существенную для практики анализа особенность ДПФ, которая заключается в том, что, если к конечному набору отсчётов сигнала добавить некоторое количество нулей, то спектральная функция дискретного сигнала не изменится, но ДПФ даёт большее число спектральных отсчётов,

соответствующих частотам, более тесно расположенным в интервале от нуля до частоты дискретизации. Это свойство иллюстрируется рис. 1 и 2, где левый рис. 1 показывает ДПФ "чистого" сигнала (близкая к прямоугольной пачка), а рис. 2 – ДПФ того же сигнала, к которому добавлено N нулей.

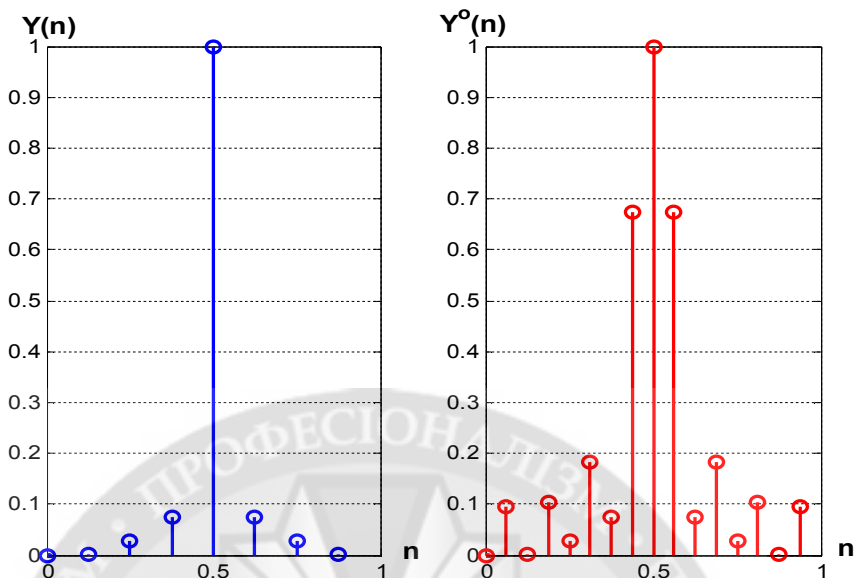


Рис. 1

Рис.2

Данное особое свойство ДПФ может как затруднить анализ при оценке состава высших составляющих спектра, так, в отдельных случаях, и получить определённое преимущество, поскольку оно позволяет повысить спектральное разрешение при вычислении ДПФ.

Используя вложенные функции (fft, fftshift) программного приложения Signal Processing математического пакета MATLAB R2012b [9], получены результаты расчёта ДПФ стандартной пачки одиночной цели и пачки эхосигнала ПЦ. Графики зависимостей $Y(n)$ для обоих случаев представлены на рис. 3 и 4.

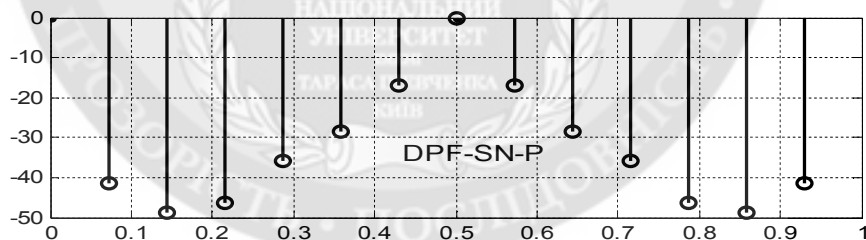


Рис. 3

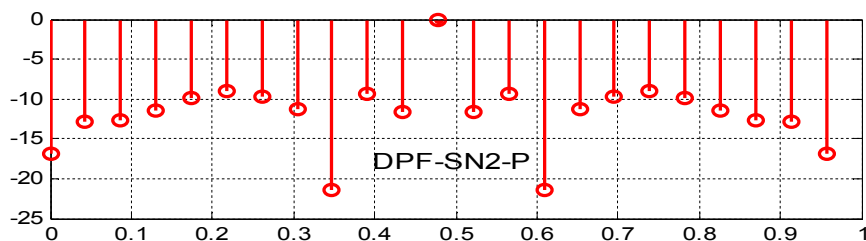


Рис. 4

На рис. 3 показан результат ДПФ отсчётов пачки одиночной цели с гауссовой огибающей при $N = 16$. Масштаб по оси частот соответствует номеру канала, делённому на N , масштаб по оси абсцисс – в дБ (для обоих рис.). На рис. 4 показан дискретный спектр для пачки эхосигнала ПЦ при пересечении составляющих пачек на уровне 0,8 (угловое смещение целей $\cong 0.4$).

Для обоих результатов ДПФ (обозначение сигналов: SN1 и SN2) проведена оценка суммарной мощности высших гармоник спектра Y_k ($k = 1 \dots N - 1$, Y_0 – основная гармоника), которая соответствует:

$$\sum_{k=1}^{N-1} |Y_{SN1}(k)|^2 \cong 0,0446(-13,5 \text{ дБ}), \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} |Y_{SN2}(k)|^2 \cong 0,14(-7,24 \text{ дБ}). \quad (3)$$

Сравнение результатов, представленных на рис. 3 и 4, а также (2) и (3), показывает, что наличие области флюктуаций в пачке ПЦ приводит к увеличению числа и суммарной мощности неосновных составляющих дискретного спектра. Разность суммарной мощности высших составляющих спектров рис. 3 и 4 составляет:

$$\Delta = 6,52 \text{ дБ}.$$

Таким образом, различие дискретных спектров пачек одиночной цели и ПЦ проявляется в увеличении числа и мощности неосновных составляющих ДПФ разрешаемой пачки ПЦ. Физическая причина заключается в принципиальных ограничениях классического Фурье-преобразования, связанных с использованием в качестве базисных функций синусоидальных колебаний, при которых невозможно детально представить перепады сигнала с высокой крутизной при наличии ограниченного числа гармоник. В результате скачкообразные изменения сигнала (разрывы и пики) вызывают незначительное изменение частотного образа в виде "размывания" по частоте, то есть изменение состава высших гармоник.

В данном случае ставится задача, не выходя за рамки классического спектрального анализа проанализировать возможности увеличения признаков различий дискретных спектров сигналов одиночной и парной целей.

Решение такой задачи может быть основано на существенном уменьшении уровня неосновных (высших) составляющих спектра стандартной пачки одиночной цели за счёт применения "веса" преобразования дискретных выборок принятого сигнала с помощью умножения на одну из выбранных функций "окна".

При использовании "веса" функции $w(k)$ выражение ДПФ имеет вид:

$$Y_w(n) = \sum_{i=0}^{N-1} x(k)w(k) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{n}\right\} kn. \quad (4)$$

Возможность повышения разности в энергетике высших составляющих ДПФ одиночной цели и ПЦ основана на различии физической природы формирования частотного образа для эхосигналов указанных выше целей. При отсутствии в сигнале резких случайных изменений импульсов уровень высших составляющих спектра зависит от степени сглаживания огибающей (за счёт "оконного" преобразования), а характер частотного образа пачки с областью случайных флюктуаций практически не зависит от вида огибающей (что в дальнейшем проверяется сравнением ДПФ).

С целью количественного анализа возможностей воздействия на характер неосновных составляющих спектра весовой обработки выборок сигнала проведен расчёт ДПФ для трёх выбранных функций "веса", имеющих следующие аналитические выражения:

- функция Хемминга: $w(k) = 0,54 - 0,46 \cos \frac{2\pi(k-1)}{n-1}; \quad (5)$

- функции Блэкмана: $w(k) = 0,42 - 0,5 \cos \frac{2\pi(k-1)}{n-1} + 0,08 \cos \frac{4\pi(k-1)}{n-1}; \quad (6)$

- функции Чебышева, отсчёты которой рассчитываются путём вычисления обратного преобразования Фурье от частотной характеристики:

$$S(w) = \frac{\cos\{(n-1) \arccos(\pi\mu)\}}{ch\{(n-1) \operatorname{arch}(a)\}}, \quad (7)$$

$\mu = w/w_d$, a – коэффициент (таблица).

Результаты расчёта представлены графиками на рис. 5.

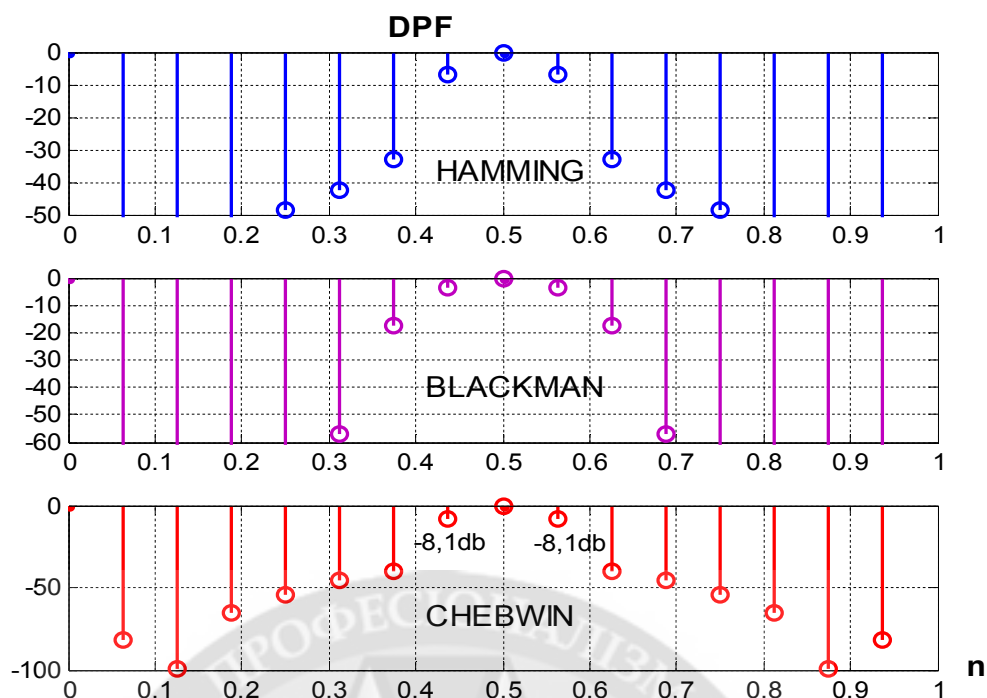


Рис. 5

Как следует из графиков, для всех трёх вариантов функции "окна" характерно наличие двух ближайших к основной гармонике составляющих достаточно высокого относительного уровня. Если обеспечить при дальнейшей обработке их режектирование вместе с основной частотой, то лучшие характеристики подавления высших составляющих имеет функция "веса" Чебышева. Для него отдельно получен результат относительного уровня:

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0001 0.1542 **1.0000** 0.1542 0.0001
 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 .

Выделены две ближние к основной гармонике, сумма остальных составляющих практически равна нулю.

Пара ближних к основной гармоник существенно снижает эффект уменьшения уровня высших гармоник ДПФ "стандартного" сигнала при весовой обработке сигнальной выборки, поэтому возникает задача анализа причины их появления, поскольку из известных теоретических сведений почти любая весовая функция должна снижать относительный уровень боковых лепестков минимум до -40 дБ. Очевидным логическим предположением является факт совпадения на частотной оси этих составляющих с частью главного лепестка частотной характеристики функции "веса". С целью подтверждения такого вывода ниже рассматриваются частотная характеристика оператора ДПФ и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) функций "веса".

Поскольку ДПФ представляет собой линейную совокупность отсчётов входного сигнала, то это позволяет трактовать ДПФ, как дискретный фильтр с импульсной характеристикой вида:

$$h_n(k) = \exp \frac{j2\pi nk}{N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (8)$$

АЧХ такого фильтра определяется функцией вида $\sin(Nx)/\sin(x)$, при этом график АЧХ отдельных каналов ДПФ рассчитывается с помощью функции Дирихле:

$$K(n) = \text{diric}_N(x - x_0).$$

График АЧХ трёх соседних каналов ДПФ приведен на рис. 6.

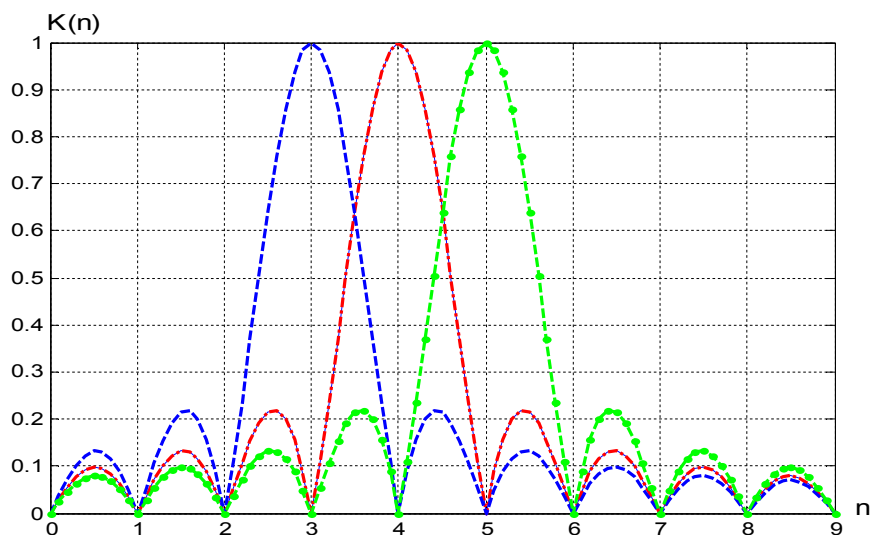


Рис. 6

Из рис. 6 легко определить относительный уровень боковых лепестков АЧХ, для вывода о природе появления пары "нежелательных" первых высших составляющих спектра необходимо провести анализ совместно с АЧХ самих функций "веса". С этой целью проведен расчёт АЧХ функций Блэкмана и Чебышева с использованием встроенной функции:

$$[h, f] = \text{freqz}(f, 20 \log_{10}(\text{abs}(h)))$$

пакета MATLAB [10]. Полученные графики АЧХ представлены на рис. 7.

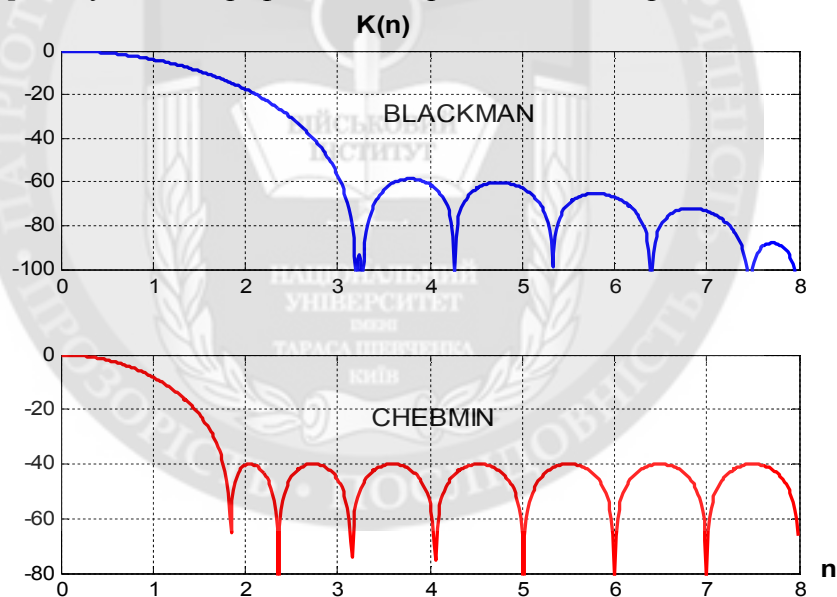


Рис. 7

Как следует из рис. 7, уменьшение уровня боковых лепестков АЧХ фильтра ДПФ происходит как естественная "плата" за расширение центрального лепестка, ширина которого составляет от 2-х и более единиц частотных отсчётов. Сравнительный анализ рис. 6 и 7 подтверждает ранее сформулированную причину появления в составе ДПФ после "оконного" преобразования сигнала пары ближайших к основной гармоник. Причиной может быть только "попадание" этих гармоник в главный лепесток АЧХ функций "веса".

Таким образом, в частотной области при реализации спектрального анализа с помощью алгоритма БПФ возникает возможность различения вида пачек за счёт оценки суммарной мощности высших составляющих дискретного спектра. При использовании перед БПФ весового преобразования пачки (по алгоритму Чебышева) и режекции основной гармоники

относительный уровень неосновных гармоник спектра для одиночного сигнала можно считать равным нулю, а для сигнала ПЦ суммарный уровень соответствует $-(6 \dots 8)$ дБ.

Автокорреляционная функция эхосигналов одиночной и парной целей.

Информационный признак распознавания вида цели: одиночная – групповая, необходимый для решения задачи разрешения ПЦ, содержит форма огибающей дискретной пачки эхосигнала. Как известно, форма выходного сигнала при согласованной обработке полностью определяется АКФ ожидаемого сигнала. Двухмерная АКФ широко используется для оценки постоянных разрешения сигналов.

Эта предпосылка определяет смысл вычисления и сравнительного анализа АКФ двух видов пачек: одиночной и парной целей.

Вычисление АКФ по вектору сигнальных выборок \mathbf{X} производилось на основе использования встроенной статистической функции MATLAB [10]

$$[\mathbf{X}, \mathbf{R}] = \text{corrmtx}(x, m, 'method'),$$

где x – выборки сигнала;

m – размерность АКФ.

Значения \mathbf{R} возвращают квадратную матрицу Топлица, в которой первая строка $R(1,:)$ определяет АКФ.

Произведено вычисление АКФ прямоугольной пачки сигнала одиночной цели ($N = 16$) и пачки ПЦ, состоящей из крайних областей прямоугольной пачки и (между ними) области флюктуаций, в качестве которой использован фрагмент моделирования.

График АКФ пачки одиночной цели показан на рис. 8. АКФ парной цели – рис. 9. На оси ординат обоих графиков показаны значения нормированной АКФ сигнала, на оси абсцисс – временные отсчёты.

Прямоугольная пачка ($N = 16$).

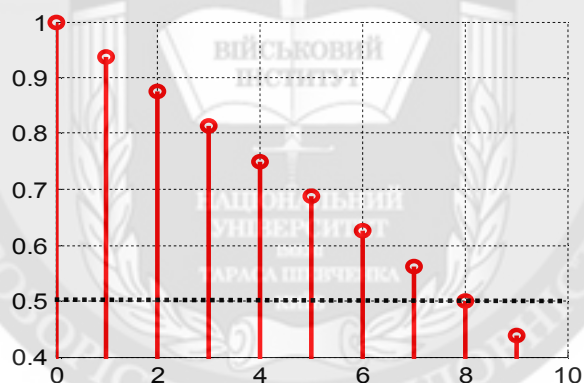


Рис. 8

Прямоугольная пачка ($N = 16$) с областью флюктуаций при $N_{\text{фл}} = 6$.

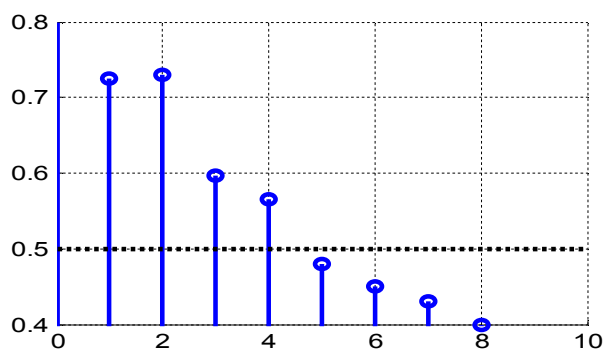


Рис. 9

Как видно из рис. 8 и 9 автокорреляционные функции сигналов одиночной и парной целей имеют отличительные особенности, прямое их использование для разрешения целей пока не очевидно.

Вывод. На основании проведенного анализа можно определить возможные пути формирования признака цели.

Первый путь – использование различий в частотном образе сигнала, формируемом с помощью классического ДПФ. При использовании весовой обработки сигнала до ДПФ суммарная мощность высших гармоник спектра пачки одиночной цели практически близка к нулю, а пачки ПЦ составляет от – 5 до – 7 дБ (в зависимости от значения коэффициента корреляции). Признаком ПЦ может служить результат сравнения высших составляющих ДПФ с соответствующим порогом. Определенной трудностью реализации является относительно малая мощность неосновных составляющих ДПФ.

Второй путь – использование корреляционных различий пачки ПЦ по сравнению со стандартной пачкой одиночной цели. Результаты аналитической оценки КФ обеих пачек были показаны на рис. 8, 9. Вопрос практического использования корреляционных различий может оказаться более сложным.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Чижов А.А. Сверхрелеевское разрешение. Классический взгляд на проблему / А.А. Чижов. – М.: КРАСАНД, 2010. – Т1. – 96 с.
2. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации / А.В. Соколов – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
3. Долгушин В.П. Статистический анализ спектрально-временных параметров эхо-пачки сосредоточенной парной цели / Лоза В.М., Ленков Е.С., Кольцов Р.Ю. / Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2013. – № 43. – С. 35 - 44.
4. Гейбриэл У.Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток // ТИИЭР. – М., 1980. – Т.68, №6. –С. 19-21.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения // Пер. с англ. - М.: Мир, 1990.
6. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения.// ТИИЭР, 1982, т.70, №9.
7. Волочков Е.Б., Гармаш В.Н. Сверхразрешение по угловым координатам когерентных источников при помощи плоской антенной решетки на основе нелинейных методов спектрального анализа. // Радиотехника и электроника, 1992, №8.
8. Лоза В.М. Застосування "вейвлет-технологій" для підвищення ефективності спектрального методу кутового розрізнення в оглядових радіолокаторах систем радіонавігації / Кольцов Р.Ю., Ленков Е.С. / Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К., 2012. – № 38. – С.58 - 62.
9. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширений MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. - 488 с.
10. Дьяконов В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров.– М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

REFERENCES:

1. Chizhov A.A. Sverhreelevskoe razreshenie. Klassicheskij vzgljad na problemu / A.A. Chizhov. – М.: KRASAND, 2010. – T1. – 96 s.
2. Sokolov A.V. Voprosy perspektivnoj radiolokacii / A.V. Sokolov. – М.: Radiotekhnika, 2003. – 512 s.
3. Dolgushin V.P. Statisticheskij analiz spektral'no-vremennyh parametrov jehopachki sosredotochennoj parnoj celi / Loza V.M., Lenkov E.S., Kol'cov R.Ju. / Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka. – К., 2013. – № 43. – С. 35 - 44.
4. Gejbrijel U.F. Spektral'nyj analiz i metody sverhrazreshenija s ispol'zovaniem adaptivnyh reshetok // TIIEP. – М., 1980. – Т.68, №6. –С. 19-21.
5. Marpl-ml. S.L. Cifrovoy spektral'nyj analiz i ego prilozhenija // Per. s angl. - М.: Mir, 1990.

6. Dzhonson D.H. Primenenie metodov spektral'nogo ocenivaniya k zadacham opredeleniya uglovyh koordinat istochnikov izlucheniya.// ТИИЕР, 1982, т.70, №9.

7. Volochkov E.B., Garmash V.N. Sverhrazreshenie po uglovym koordinatam kogерentnyh istochnikov pri pomoshhi ploskoj antennoj reshetki na osnove nelinejnyh metodov spektral'nogo analiza. // Radiotekhnika i jelektronika, 1992, №8.

8. Loza V.M. Zastosuvannja "vejvlet-tehnologij" dlja pidvyshhennja efektyvnosti spektral'nogo metodu kutovogo rozrizzennja v ogljadovyh radiolokatorah system radionavigacii' / Kol'cov R.Ju., Ljenkov Je.S. / Zbirnyk naukovykh prac' Vijs'kovogo instytutu Kyi'vs'kogo nacional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka. – K., 2012. – № 38. – S.58 - 62.

9. D'jakonov V.P., Kruglov V.V. Matematicheskie pakety rasshirenij MATLAB. Special'nyj spravochnik. – SPb.: Piter, 2001. - 488 s.

10. D'jakonov V.P. MATLAB i SIMULINK dlja radioinzhenierov.– M.: DMK Press, 2011. – 976 s.

Рецензент: д.т.н., проф. Жердєв М.К., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

к.т.н. Лоза В.М.

**АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ І КОРЕЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЛУНАСИГНАЛУ ПАРНОЇ ЦІЛІ З ТОЧКИ ЗОРУ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ НАДРЕЛЕЄВСЬКОГО
РОЗРІЗНЕННЯ**

У статті представлені результати порівняльного аналізу сигналів відбитих від одиночної і парної цілей (ПЦ) в частотній області, а також проведено обчислення автокореляційної функції (АКФ) прямокутної пачки сигналу одиночній цілі і пачки ПЦ з метою виявлення відмінних ознак. На підставі проведеного аналізу сформульовані можливі шляхи формування ознак парної цілі необхідних для розробки алгоритмів і технічних рішень системи високого (надрелеєвського) розрізнення.

Ключові слова: парна ціль, спектральний аналіз, автокореляційна функція.

Ph.D. Loza V.N.

**ANALYSIS OF SPECTRAL AND CORRELATION CHARACTERISTICS OF THE ECHO MAN
OBJECTIVES IN TERMS OF SOLVING SVERHRELEEVS'KOGO PERMITS**

The article presents the results of a comparative analysis of the signals reflected from the singles and doubles purposes in the frequency domain, as well as made the calculation of the autocorrelation function of the rectangular packs, single-target signal and doubles purposes packs in order to identify the distinctive features. Based on the analysis set forth ways of forming the pair of feature goals necessary for the development of algorithms and technical solutions High system permission.