

УДК 621.396.967

к.т.н., доц. Долгушин В.П. (ВИКНУ)
к.т.н. Ленков Е.С. (НАУ)
к.т.н. Лоза В.Н. (ВИКНУ)
Кольцов Р.Ю. (ВИКНУ)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭХО-ПАЧКИ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ ПАРНОЙ ЦЕЛИ

Рассматриваются вопросы статистической оценки параметров тонкой структуры эхосигнала, отражённого от парной цели в пределах импульсного объёма радиолокационной станции (РЛС), в интересах выявления признаков информации, необходимой для разрешения целей. В статье приведены результаты статистической оценки области перекрытия пачек одиночных целей, а так же приводятся результаты спектрального и корреляционного анализа эхо-пачки парной сосредоточенной цели. Полученные в ходе анализа статистические параметры зоны флуктуаций представляют собой набор данных, необходимых для разработки алгоритмов и технических решений построения систем обработки радиолокационной информации.

Ключевые слова: радиолокационная станция, разрешающая способность, эхо-пачка, сосредоточенная парная цель.

1. Вступление и постановка задачи. На современном этапе и в перспективе серьёзной проблемной задачей остаётся задача повышения угловой разрешающей способности выше классического релейского предела.

Несмотря на большое число работ по исследованию "сверхразрешающих" методов пространственно-временной обработки, практическое внедрение их результатов ограничивается существенным усложнением алгоритмов обработки и, как следствие, ростом вычислительных затрат с одновременным многократным повышением требований к отношению сигнал/шум. Этот факт характеризует актуальность поиска новых подходов к решению задачи сверхрелейского разрешения, отвечающих требованиям критерия "эффективность – стоимость", в частности представляющих возможность технической реализации на основе модернизации освоенных алгоритмов цифрового обнаружения сигналов.

В решении такой задач необходимым является всестороннее исследование статистических характеристик эхосигнала пачки сосредоточенной парной цели (ПЦ) с целью выявления информационных признаков состава цели в импульсном объёме РЛС.

Целью статьи является статистическая оценка параметров тонкой структуры эхопачки ПЦ.

Модель цели, как вторичного излучателя, состоит из двух точечных излучателей с одинаковой эффективной поверхностью рассеяния. Рассовмещение одиночных целей по дальности меньше разрешающей способности по координате и изменяется случайным образом за время облучения цели.

Объектом анализа является цифровой эквивалент отражённой от ПЦ пачки во временной и спектральной областях.

Статья организована следующим образом. В пункте 2 рассматриваются общие характеристики пачки ПЦ. В пункте 3 приведены результаты статистической оценки области перекрытия пачек одиночных целей. В пункте 4 приводятся результаты спектрального и корреляционного анализа эхопачки ПЦ.

2. Общая характеристика тонкой структуры пачки эхосигнала парной цели.

Понятие «тонкая» структура используется при учёте влияния фазовых соотношений на характеристики сигнала (или результата обработки).

Общая модель эхопачки ПЦ может быть представлена в виде вектора:

$$X = [X_1 \vee X_2], \quad (1)$$

где X_1, X_2 – векторы, определяющие совокупность импульсов неперекрывающихся частей каждой пачки, суммирование которых может быть только при накоплении в процессе обработки.

При дискретном представлении сигнала элементы векторов X_1, X_2 определяются весовыми коэффициентами огибающей пачки s_i :

$$X_1 = \{s_i\}_{i=1}^{M-0.5M_{\text{фл}}}; \quad X_2 = \{s_i\}_{i=M+0.5M_{\text{фл}}}^M. \quad (2)$$

Вектор V определяет результат интерференции импульсов соседних пачек в области их перекрытия:

$$V = \{v_i\}_{i=1}^{M_{\text{фл}}},$$

где v_i – случайная величина, значение которой определяется в соответствии с известной формулой суммарной мощности сигналов двух источников при наличии фазового смещения [1]:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \Delta\varphi,$$

$M_{\text{фл}}$ – число импульсов области перекрытия пачек.

Если использовать индекс, определённый в пределах области перекрытия, то v_i можно определить как

$$v_i = \sqrt{2} \sqrt{s_{M_{\text{фл}}-i}^2 + s_i^2 + 2s_i s_{M_{\text{фл}}-i} \cos \Delta\varphi}. \quad (3)$$

При количественном анализе используется среднее значение суммируемых весов (в общем случае зависящем от уровня пересечения пачек):

$$v_i = \sqrt{2} s_{\text{ср}} \sqrt{1 + \cos 2\pi\xi}, \quad (4)$$

где ξ – случайная величина с равновероятным распределением в пределах $0 \dots 1$.

Принципиальным отличием структуры эхосигнала пачки ПЦ от пачки одиночной цели является наличие в середине пачки области флюктуаций амплитуды импульсов. Анализ области флюктуаций результирующей пачки предполагает установить характер флюктуаций и определить их статистические характеристики.

3. Статистический анализ области флюктуаций.

Характер флюктуаций. При условии равенства фаз отражения (что вполне допустимо) величина $\Delta\varphi$ определяется только разностью дальностей до целей, которая за

время облучения ПЦ изменяется в связи с естественным фактом дисперсии скорости целей.

Не имея достоверных данных о дисперсии скорости движения боевых самолётов, определим при каком изменении скорости за период повторения импульсов (T_{Π}) возникает изменение фазы в пределах 2π .

Для РЛС сантиметрового диапазона (несущая частота 9 ГГц) смещение цели на 2,5 см изменяет фазу на π . Такое изменение за период (ед. мс) возникает при изменении скорости цели на 10 м/с. Относительная величина изменения скорости при современных скоростях боевых целей (1600 ... 3600) км/час составит в данном случае 1 ... 2%.

Отсюда следует, что случайные изменения фазы в области пересечения происходят от импульса к импульсу, и следовательно, пачка эхосигнала ПЦ имеет в центре область быстрых флюктуаций.

На рис. 1 представлена картина флюктуаций, полученная моделированием для области с числом импульсов перекрытия 6, 8, 10 (слева-направо). Нижний и верхний рисунки соответствуют различным включениям датчика случайных чисел.

Если обозначить уровень квантования, как α (0.5 или 0,7 по амплитуде), то импульсы соответствующие случаю $v < \alpha$ определяют наличие "провалов", которые при обнаружении дискретной пачки представляются значением "0". Из общего анализа рис. 1 следует, что характер флюктуаций "сильно" выражен и число провалов в принципе должно увеличиваться с увеличением ширины области флюктуаций, хотя такая зависимость имеет вероятностный характер.

Полную информацию о свойствах случайной величины дают эмпирическая (гистограмма) и аналитическая плотности распределения случайной величины.

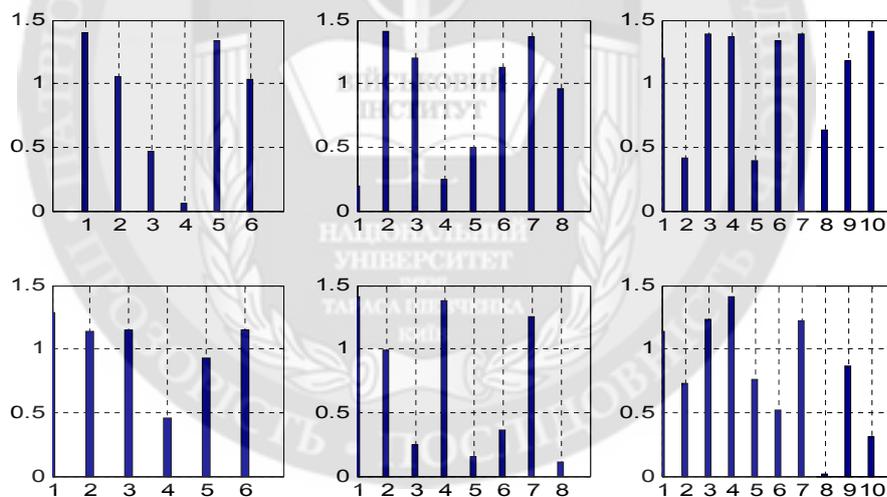


Рис. 1

Эмпирическая плотность распределения вероятностей амплитуд флюктуирующей области.

Определяется графически в виде гистограммы. Исходными данными для построения гистограммы служит выборка случайных величин большого объёма ($N = 10000$ и более), представленная вариационным рядом:

$$v_1, v_2, v_3, \dots, v_N ; (v_i \leq v_{i+1}).$$

В соответствии с рекомендациями [3] число интервалов выбирается не более 10 ... 15 (увеличение числа интервалов практически не повышает точность статистической оценки).

На рис. 2 представлена гистограмма распределения частот при использовании выборки $N = 10000$ и 10 интервалов построения. На правом рис. 3 показан результат

сглаживания гистограммы с использованием полинома пятой степени. Оба результата получены вычислением в среде математического пакета MATLAB-8.

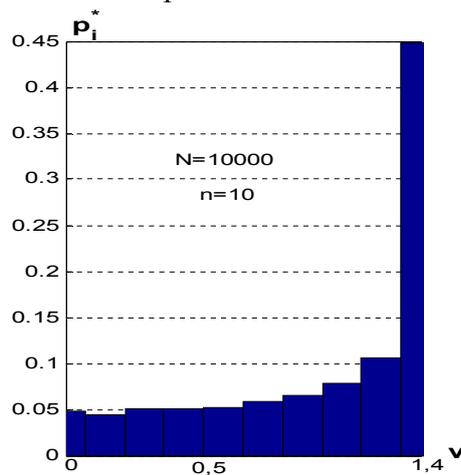


Рис. 2

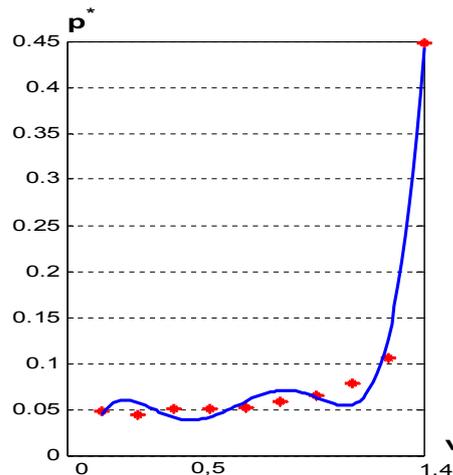


Рис. 3

Для полноценной оценки вероятности получения амплитуды импульсов флюктуации пачки ПЦ в заданном интервале значений необходимо знать аналитическое выражение плотности распределения параметра.

Закон распределения плотности вероятности амплитуд импульсов области флюктуаций.

Закон плотности распределения $p(v)$ находится аналитически по формуле преобразования при известной функциональной зависимости $y = u(x)$ (обозначения для примера) и плотности вероятности $p(x)$ решением уравнения [2]:

$$p(y) = p[u^{-1}(y)] |du^{-1}(y)/dy|, \quad (5)$$

где $u^{-1}(y)$ – монотонная функция, обратная функции $y = u(x)$,

$|du^{-1}(y)/dy| = \psi(y)$ – так называемый, якобиан преобразования.

Для решаемой задачи известными функциональной зависимостью и плотностью распределения являются:

$$v = a\sqrt{1 + \cos(\varphi)} \quad \text{и} \quad p(\varphi) = 1/2\pi, \quad (6)$$

где "a" – коэффициент, определяющий среднее значение "веса" суммируемых импульсов флюктуации.

Решая уравнение относительно ψ с учётом (6), получим:

$$\psi(v) = \arccos\left(\frac{v^2}{a^2} - 1\right), \quad (7)$$

Якобиан преобразования определяется дифференцированием (7) и имеет вид:

$$\psi(v) = 2\varphi / (a^2 \sqrt{1 - (\frac{v^2}{a^2} - 1)^2}). \quad (8)$$

Искомая плотность распределения вероятностей амплитуды импульсов области флюктуаций с учётом (6) и (8) соответствует выражению:

$$p(v) = \frac{2\varphi}{\pi a^2 \sqrt{1 - (\frac{v^2}{a^2} - 1)^2}}. \quad (9)$$

График плотности вероятности $p(v)$ при значении $a = 1$ приведена на рис. 4.

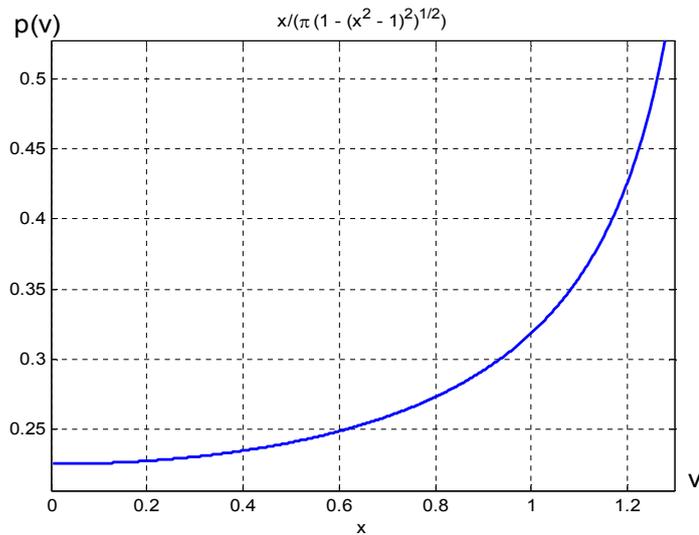


Рис. 4

Закон распределения плотности вероятностей амплитуды импульсов флюктуации с достаточной достоверностью подтверждает результаты сглаживания гистограммы распределения (рис. 3).

Расчёт вероятности получения амплитуд в заданном интервале значений.

Вероятность попадания случайной величины с распределением $p(v)$ в диапазон значений $[m, n]$ определяется известным выражением [2]:

$$P(m \leq v \leq n) = \int_m^n p(v) dv. \quad (10)$$

Для определения интеграла в (10) используется метод аналитического вычисления интегралов в среде пакета MATLAB 8. Результат решения имеет вид:

$$P(m \leq v \leq n) = \frac{\arcsin\left(\frac{v^2-1}{a^2}\right)}{2\pi|n|}. \quad (11)$$

Полученное значение вероятности появления импульсов флюктуаций с амплитудой меньше α позволяет прогнозировать вероятностную оценку ожидаемого числа "провалов" в зависимости от уровня пересечения пачек, определяющего число импульсов области флюктуаций. Из теории вероятностей известна задача, в которой при заданном числе независимых испытаний N и известной вероятности появления некоторого события A (обозначим – p) даётся вероятностная оценка того, что событие A появится " m " раз. Вероятность данного события определяется формулой биномиального закона распределения дискретных случайных величин [3]:

$$b(m, N, p) = C_N^m p^m (1-p)^{N-m}. \quad (12)$$

В решаемой задаче интересным является случай появления не менее двух провалов в области анализа (так как наличие одного провала может быть в любой пачке).

Такая постановка задачи требует рассчитать вероятность появления ряда событий A_1, A_2, \dots, A_m , характеризующих появление точно от двух до m провалов. Число испытаний определяется числом импульсов в области перекрытия пачек N . Принимая во внимание, что ожидаемое значение N ограничено, расчёт ведётся для значений $N = 6, 8, 10, 12$, при этом предполагаемое число провалов принимается 4 ... 5.

Вероятность искомого числа провалов определяется выражением:

$$P_k(m_1 \leq m_2) = \sum_{i=m_1}^{m_2} C_{N_k}^{m_i} p^{m_i} (1-p)^{N_k-m_i}; \quad C_N^m = \frac{N!}{m!(N-m)!}, \quad (13)$$

где k – индекс суммирования;

m_1 принимается, равной 2;

m_2 – ожидаемое число провалов (4 ... 5).

Для расчёта вероятности "p" в (13) можно использовать вычисления по точным и эмпирическим распределениям случайных величин. Результат, полученный вычислением определённого интеграла, используя (11), и моделированием для общей совокупности $N = 10000$ и анализе до 100 вариантов даёт следующие результаты оценки вероятности "p":

- при квантовании на уровне $0,5p = 0,23 \dots 0,25$;
- при уровне 0.7 (по мощности 0,5) $p = 0,33 \dots 0,36$.

Результаты расчёта для обоих случаев в виде зависимости вероятности числа провалов при двух уровнях отсчёта амплитуды α (значения на графике) от числа импульсов в области перекрытия N показана на рис. 5.

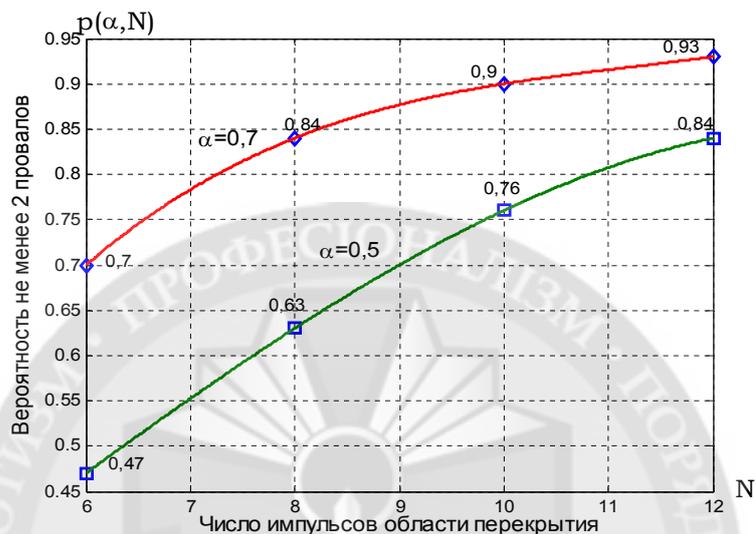


Рис. 5

Анализ результатов, представленных на рис. 5, показывает, что при уровне, равном 0,7, и использовании выборки даже в 6 ... 8 импульсов вероятность не менее двух провалов в центре пачки ПЦ достаточно высокая.

Корреляционная функция флюктуаций.

Плотность распределения сигнала флюктуаций даёт информацию о вероятности получения тех или иных значений амплитуды импульсов в области перекрытия огибающих пачек одиночных целей. Для дальнейшего анализа важное значение имеет характеристика скорости флюктуаций, информацию о которой даёт корреляционная функция (КФ).

Вычисления КФ флюктуаций флюктуаций выполнено моделированием при использовании "большой" выборки дискретного процесса ($N = 10000$) и методики численного анализа с использованием встроенной функции $[t, R] = \text{corrmtx}(\)$ в математическом пакете MATLAB [5].

Результаты расчёта КФ последовательности импульсов флюктуаций для большой выборки ($N = 10000$) показан на левой части рис. 6. На том же рисунке (правая часть) показан результат расчёта для выборки, ограниченной значением $N = 24$ (ширина пачки).

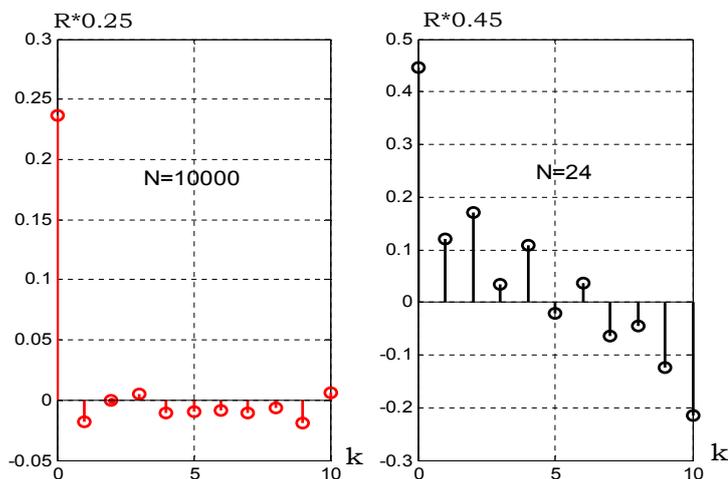


Рис. 6

Корреляционные характеристики случайного (в данном случае дискретного) процесса определяются по результатам анализа "большой" ($N > 1000$) выборке, поэтому из анализа левого рис. 6 следует вывод, что импульсы флуктуаций некоррелированы уже через период. Правая часть рис. 6 приведена для иллюстрации, так как, с точки зрения понятий теории вероятностей, её нельзя считать корректно определённой. Однако и на правом графике наличие некоторой корреляции выражено очень слабо.

Выводы. Результаты анализа временной структуры пачки эхосигнала ПЦ дают возможность выявить основной информативный признак, отличающий её от структуры эхо-пачки одиночной цели.

Таким признаком является наличие быстрых флуктуаций импульсов в центре пачки ПЦ. Физически основой этого является интерференция импульсов со случайным соотношением фаз в области перекрытия пачек одиночных целей. Таким образом, принципиальной основой распознавания эхосигналов одиночной и парной целей является область интерференции импульсов. Другая особенность пачки ПЦ, связанная с увеличением её длительности, является неинформативным признаком.

4. Спектральные и корреляционные характеристики эхосигнала парной цели.

Анализ спектральной функции дискретной пачки парной цели.

Совокупность методов и подходов в решении задач спектрального анализа 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.

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:

$$Y(n) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp \left\{ -j \left(\frac{2\pi}{N} \right) kn \right\}. \quad (14)$$

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.

Принципиальная особенность ДПФ по сравнению с совокупностью дискретных отсчётов спектральной функции сигнала 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 [4].

Данное 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, получены результаты расчёта ДПФ стандартной пачки одиночной цели с гауссовой огибающей и пачки эхосигнала ПЦ. Графики зависимостей $Y(n)$ для обоих случаев представлены на рис. 7 и 8.

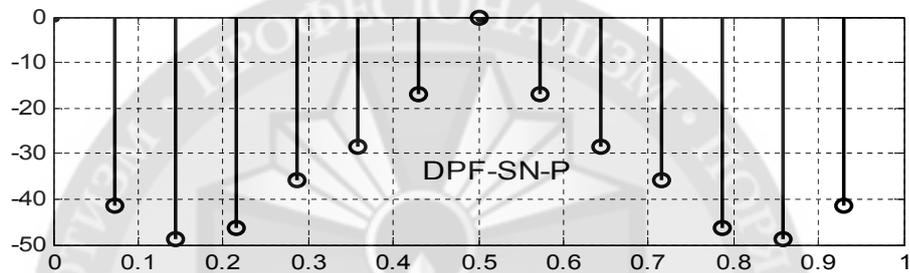


Рис. 7

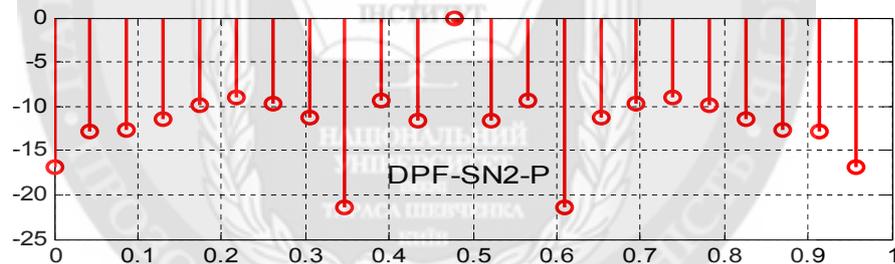


Рис. 8

На рис. 7 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 рисунков). На рис. 8 показан дискретный спектр для пачки эхосигнала ПЦ при пересечении составляющих пачек на уровне 0,8.

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:

$$\sum_{k=1}^{N-1} |Y_{SN1}(k)|^2 \cong 0,0446 (-13,5 \text{ дБ}), \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^{N-1} |Y_{SN2}(k)|^2 \cong 0,14 (-7,24 \text{ дБ}). \quad (16)$$

Сравнение результатов, представленных на рис. 10 и 11, а также (15) и (16), 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 составляет:

$$\Delta = 6,52 \text{ дБ}.$$

Скачкообразные изменения сигнала (разрывы и пики) вызывают незначительное изменение частотного образа в виде "размывания" по частоте, то есть изменение состава высших гармоник.

Автокорреляционная функция (АКФ) 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. Вычисление АКФ по вектору сигнальных выборок \mathbf{X} производилось на основе использования встроенной статистической функции (MATLAB-R2012b):

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

где x – выборки сигнала;

m – размерность АКФ.

Значения R возвращают квадратную матрицу Топлица, в которой первая строка $R(1,:)$ определяет АКФ. Результаты вычисления АКФ прямоугольной пачки одиночной цели и ПЦ для $M = 40$ и 10 отсчётов АКФ при относительном угловом перекрытии пачек $\Delta = 0,6$ показаны на рис. 9 (АКФ стандартной пачки обозначена маркерами).

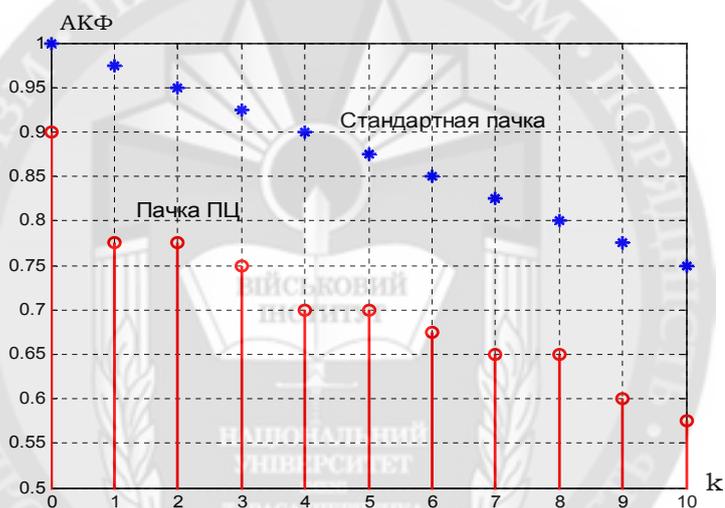


Рис. 9

Несмотря на наличие нулевых значений (использован один из вариантов моделирования), в пачке ПЦ сохраняется корреляция соседних импульсов, однако степень корреляции выше уровня 0,7 (отсчёт по 0,5 мощности) имеет место только для нескольких первых отсчётов.

5. Выводы. В результате проведенного исследования определён 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. Полученные в ходе анализа статистические параметры зоны флюктуаций представляют собой набор данных, необходимых для разработки алгоритмов и технических решений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов.радио, 1970 – 560с.

2. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Сов.радио, 1974-552с.
3. Абезгауз М.В. Справочник по вероятностным расчётам. – М.: Воениздат, 1970 – 468с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003 – 604с.
5. Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширений MATLAB. – СПб.: Питер, 2001.

Рецензент: д.т.н., проф. Ленков С.В., начальник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**к.т.н., доц. Долгушин В.П., к.т.н. Ленков Є.С., к.т.н. Лоза В.М, Кольцов Р.Ю.
СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСОВИХ ПАРАМЕТРІВ
ЕХО-ПАЧКИ ЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ПАРНОЇ ЦІЛІ**

Розглядаються питання статистичної оцінки параметрів тонкої структури ехосигналу, відбитого від парної цілі в межах імпульсного об'єму радіолокаційної станції (РЛС), в інтересах виявлення ознакової інформації, необхідної для розрізнення цілей. У статті наведено результати статистичної оцінки області перекриття пачок одиночних цілей, а також наводяться результати спектрального та кореляційного аналізу ехо-пачки парної зосередженої цілі.

Отримані в ході аналізу статистичні параметри зони флуктуацій представляють собою набір даних, необхідних для розробки алгоритмів і технічних рішень побудови систем обробки радіолокаційної інформації.

Ключові слова: радіолокаційна станція, роздільна здатність, ехо-пачка, зосереджена парна цілі.

**Dolhushyn V., Lenkov E., Loza V., Kol'tsov R.
STATISTICAL ANALYSIS SPECTRAL-TEMPORAL PARAMETERS ECHO-PACKS OF
CONCENTRATED PAIR TARGET**

The problems of statistical estimation of parameters of the fine structure of echo reflected from the pair targets within radar pulse volume, in the interest of identifying information necessary for distinguishing purposes. The results of the statistical evaluation of the overlap region packs of single targets as well as the results of spectral and correlation analysis of echo packets pair focused goals.

Obtained in the analysis of statistical fluctuation zone settings are a set of data necessary for the development of algorithms and technical solutions to build radar data processing systems.

Keywords: radio location station, resolution, echo packet is concentrated pair target.