

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ОТСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ В ИМПУЛЬСНЫХ РЛС

Кострова Т.Г.<sup>1</sup>, Бернюков А.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Муромский техникум радиоэлектронного приборостроения

<sup>2</sup>Владимирский государственный университет

В импульсных РЛС обзорного типа для устранения ложных отметок от целей, находящихся за пределами однозначного измерения дальности, применяется вобуляция периода повторения зондирующих сигналов с последующей критерийной обработкой сигналов [1]. Вобуляция межимпульсного интервала позволяет при каждом зондировании изменять значение максимальной однозначно измеряемой дальности, при этом структура пачек импульсов от целей, расположенных в пределах однозначного измерения, и целей, находящихся за пределами максимальной однозначно измеряемой дальности, оказывается различной. Заметим, что без соответствующей обработки сигналов при использовании двух периодов  $T_1$  и  $T_2$  повторения зондирующих импульсов одна цель с 1-ой зоны неоднозначности на экране индикатора кругового обзора создает 2 ложные отметки, разнесенные на расстояние  $\Delta R = 0,5 \cdot c \cdot |T_1 - T_2|$ , где  $c$  – скорость распространения радиоволн. Ниже рассматривается обнаружение сигналов в обзорной РЛС с механическим вращением луча и некогерентной весовой обработкой пачки импульсов.



Рис. 1. Структурная схема блока обработки пачки эхо-сигналов

Для устранения эффекта двоения отметок, т.е. для устранения неоднозначности измерения, в структуру обнаружителя РЛС вводится специальное устройство – канал критерийной обработки (ККО) [1,2]. Структурная схема подключения ККО представлена на рис. 1, где  $y_i$  – последовательность входного сигнала в окне анализа блока цифровой обработки,  $i = 0, 1, \dots, N-1$ ;  $d_{0k}, d_{kp}, d_c$  – решения,

принимаемые в основном канале, канале критерийной обработки и после объединения в схеме И ( $d_c = d_{0k} \& d_{kp}$ ). В основном канале выносятся решение  $d_{0k} = 1$  при обнаружении или  $d_{0k} = 0$  при необнаружении цели соответственно. Канал критерийной обработки, используя различия в структуре пачки эхо-сигналов, выносит решение о принадлежности принятого сигнала либо к зоне однозначного измерения ( $d_{kp} = 1$ ), либо к зоне неоднозначного измерения дальности ( $d_{kp} = 0$ ).

Как показали ранее проведенные исследования, высокую эффективность обработки сигналов дает алгоритм ККО на базе распознавания образов. В [1,2] подобные алгоритмы были построены для обработки во временной области. Одним из недостатков таких алгоритмов является необходимость вычисления статистики бинарной классификации для всех возможных образов пачек эхо-сигналов [2]. Ниже рассматривается алгоритм работы ККО в частотной области, который является инвариантным к временным образам эхо-сигналов.

Основной канал обработки состоит из некогерентно-весового накопителя, реализующего процесс вычисления статистики обнаружения  $Z_N = \sum_{i=0}^{N-1} a_{1i} y_i$  в пределах окна анализа, и порогового устройства. Здесь  $a_{1i}$  – весовые коэффициенты, определяемые диаграммой направленности антенны по мощности и соответствующие целям, расположенным в пределах однозначного измерения дальности.

Для синтеза алгоритма различения наблюдаемых пачек импульсных сигналов можно воспользоваться правилом максимума правдоподобия, согласно которому вычисляются отношения правдоподобия  $\Lambda_m = w(y_0^{N-1}/H_1) / w(y_0^{N-1}/H_m)$ , где  $w(y_0^{N-1}/H_i)$  – условная плотность распределения;  $y_0^{N-1} = \{y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-1}\}$  – реализация наблюдаемого процесса;  $H_1$  – гипотеза о принадлежности сигналов цели, расположенной в пределах однозначного измерения дальности;  $H_m, m = 2, 3, \dots, M$  – гипотезы о принадлежности наблюдаемых сигналов цели, находящейся за пределами однозначного измерения;  $M-1$  – число возможных структур пачек сигналов с неоднозначным измерением дальности и различными весовыми коэффициентами  $a_{mi}$ . Отношение правдоподобия  $\Lambda = \max_m \Lambda_m$  сравнивается с порогом классификации, которое, как правило, при оптимальной классификации сигналов принимается равным 1.

Для расчета свертки двух последовательностей воспользуемся дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). В условиях поставленной задачи обнаружения пачки импульсов алгоритм вычисления статистики классификации можно привести к виду

$$z = \max_m \left( \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) [H_1(k) - H_m(k)] - C_m \right), \quad (1)$$

где  $C_m = (E_1 - E_m)/2$  – константа, обусловленная различием энергии пачки импульсов для целей, находящихся в пределах однозначного измерения дальности, и пачки эхо-сигналов от целей, расположенных в первой зоне неоднозначности измерений;  $Y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n W_N^{nk}$  – ДПФ входного сигнала  $y_0^{N-1}$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ ;  $H_j(k) = \sum_{n=0}^{N-1} h_{j,n} W_N^{nk}$  – ДПФ последовательности весовых коэффициентов  $h_{j,i} = a_{j,N-i-1}$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$ ;  $W_N = \exp\{-j 2\pi/N\}$  – поворачивающий множитель.

Заметим, что в рамках рассматриваемой задачи классификации двух пачек эхо-сигналов с различной структурой вычислять обратное ДПФ не обязательно, поскольку нас интересует только факт принадлежности наблюдаемой последовательности к тому или иному виду эхо-сигналов. Если  $z \geq 0$ , то принимается решение о принадлежности наблюдаемой пачки импульсов к первому образу пачки (цель находится в пределах однозначного измерения дальности). В противном случае принимается решение о том, что цель находится за пределами однозначно измеряемой дальности.

Задача моделирования алгоритма классификации (1) упрощается тем, что коэффициенты  $a_{1i}$ ,  $a_{mi}$  образуют симметричную действительную последовательность, для которой ДПФ является действительным. Кроме того, весовые коэффициенты  $a_{mi}$  при  $m \geq 2$  имеют одинаковые ДПФ. Для примера на рис. 2 представлены нормированные ДПФ последовательностей коэффициентов  $a_{1i}$  и  $a_{2i}$  (рис. 2 А и рис. 2 Б соответственно) при  $N = 16$ .

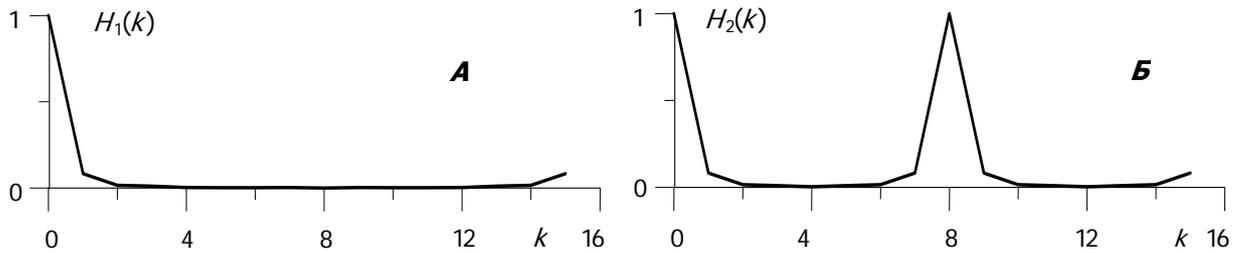


Рис. 2. ДПФ весовых коэффициентов

Сравнение этих графиков показывает, что в спектре коэффициентов  $a_{2i}$  имеется значительная высокочастотная составляющая. Эти различия как раз и используются в алгоритме работы канала ККО для классификации сигналов. Можно также заметить, что ДПФ весовых коэффициентов отличаются только в небольшой области с центром  $N/2$ . Поэтому при реализации алгоритма классификации (1) вычисления можно производить только в области  $k = l, l+1, \dots, p$ , где разность  $H_1(k) - H_2(k)$  отлична от нуля. Эти свойства можно использовать при моделировании ККО в обнаружителе сигналов РЛС. Они позволяют упростить процесс вычислений, снизить требования к объему памяти вычислительных средств без потери в качестве обработки сигналов. После упрощений алгоритм вычисления статистики классификации принимает вид

$$z^* = -Y^{-1}(0) \sum_{k=l}^p Y(k) H_2(k), \quad (2)$$

где для устранения зависимости статистики от энергии сигнала проведена нормировка на  $Y(0)$ .

С целью анализа качества обнаружения эхо-сигналов в блоке обработки, структурная схема которого представлена на рис. 1, был проведен статистический эксперимент. Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: вероятность ложной тревоги  $F = 10^{-5}$ ; число импульсов в пачке  $N = 16$ ; форма диаграммы направленности по мощности аппроксимирована функцией  $\cos^2 \theta$ , разрядность данных на входе блока ЦОС – 11 + знак; число используемых при вобуляции периодов зондирования сигналов – 2 ( $M = 3$ ). На рис. 3 представлены характеристики обнаружения данного устройства – зависимости вероятности обнаружения сигналов  $P_D$  от отношения сигнал-шум  $q$  для центрального импульса в пачке, выраженного в децибелах. Характеристика обнаружения под цифрой 1 получена при отключенном ККО и характеризует потенциальные возможности обнаружения целей, находящихся в пределах однозначного измерения дальности. Остальные кривые получены при включенном

ККО, в основу работы которого был положен алгоритм (2) вычисления статистики  $z^*$ . Величина  $z^*$  сравнивалась с порогом классификации  $K$ : если  $z^* < K$ , то выносилось решение  $d_{kp} = 0$ ; если  $z^* \geq K$ , то принималось решение  $d_{kp} = 1$ .

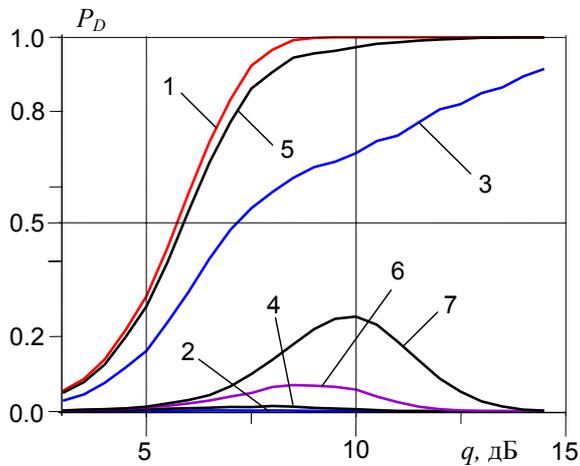


Рис. 3. Характеристики обнаружения

Кривые 2 и 3 сняты при оптимальном пороге классификации. Как видно из графиков, применение в ККО алгоритма (2) позволяет получить малую вероятность обнаружения ложной цели  $P_D < 0,01$  (кривая 2). Кривая 3 соответствует обнаружению цели, находящейся в пределах однозначного измерения дальности. Сравнение кривых 1 и 3 показывает, что при оптимальном пороге классификации наблюдаются значительные потери в пороговой мощности сигнала от целей, находящихся в пределах рабочей дистанции. Увеличение порога до величины  $K = 0,2$  приводит к некоторому росту вероятности обнаружения ложной цели ( $P_D < 0,03$ , кривая 4), но характеристики обнаружения целей в пределах рабочей зоны РЛС значительно улучшаются (кривая 5). Потери в пороговой мощности в области  $P_D \cong 0,5$  невелики и

составляют примерно 0,3...0,5 дБ. При более высоких значениях вероятностей, когда  $P_D > 0,8$ , потери возрастают. Увеличив порог до величины  $K = 0,3$ , подобных потерь можно избежать (характеристика обнаружения сливается с кривой 1). При этом вероятность обнаружения ложной цели остается приемлемой для практики, достигая в максимальной точке  $P_D \cong 0,07$  (кривая 6). Дальнейшее увеличение порога до  $K = 0,5$  приводит к резкому росту вероятности обнаружения ложных сигналов (кривая 7, в точке максимума  $P_D \cong 0,26$ ).

Упрощение алгоритма вычисления статистики классификации в канале критерийной обработки может быть произведено за счет замены вычисления ДПФ, которое в общем случае является комплексным, на вычисление дискретного косинусного преобразования, являющегося действительным для реального сигнала. Качество работы устройства обнаружения при этом ухудшается.

#### Литература

1. Кострова Т.Г., Бернюков А.К. Эффективность цифровых устройств обнаружения и устранения неоднозначности отсчета дальности в импульсных РЛС // Цифровая обработка сигналов и ее применение. Труды 6 Междунар. конф. DSPA-2004. – М.: РНТО РЭС, 2004. Т.2. – С.64-67.
2. Патент РФ № 2237259. Способ последетекторной обработки вобулированной пачки радиоимпульсов и устройство для его осуществления // Дыранов Ю.В., Костров В.В., Антуфьев Р.В., Кострова Т.Г. // Бюл. № 27 от 27.09.2004.

