

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ОТСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ В ИМПУЛЬСНЫХ РЛС

Кострова Т.Г., Бернюков А.К.\*

Муромский техникум радиоэлектронного приборостроения

\*Владимирский государственный университет

**Введение.** От качества обнаружения сигналов существенно зависит качество решения радиолокационных задач в целом. В современных импульсных радиолокационных станциях (РЛС) обзорного типа возникает дополнительная проблема устранения неоднозначности измерения дальности. Эхо-сигналы от целей, находящихся за пределами максимальной дальности однозначного отсчета, являются помехами. Они аналогичны сигналам от целей с однозначным измерением, поэтому бороться с такого рода помехами затруднительно [1]. Вместе с тем эти помехи существенно загружают процессор вторичной обработки информации, затрудняют работу оператора, создают ложную информацию. Неоднозначность отсчета дальности наблюдается при работе РЛС с повышенной частотой зондирования, при наличии за пределами максимальной дальности целей с большой эффективной отражающей поверхностью, а также в условиях аномального распространения радиоволн.

Все известные способы снижения уровня ложных эхо-сигналов можно разделить на две группы. Одну группу составляют методы, заключающиеся в специальном кодировании зондирующих сигналов от импульса к импульсу. Эти методы требуют, как правило, обеспечения истинной когерентности в РЛС. К ним относятся системы со случайным изменением фазы зондирующего сигнала от импульса к импульсу, с использованием последовательности кодированных импульсов по поляризации, с изменением закона модуляции сложных зондирующих сигналов от импульса к импульсу [2]. Другая группа методов основана на устранении неоднозначности измерения дальности. К ним относятся методы с использованием амплитудной и фазовой модуляции зондирующих импульсов, с использованием малой вобуляции межимпульсного интервала и применения кратных частот повторения зондирующих сигналов [3,4].

Наиболее мощными помехами этого вида являются помехи с 1-го интервала неоднозначного измерения дальности, поэтому их подавлению необходимо уделять наибольшее внимание. Методы, разработанные для борьбы с подобными помехами, оказываются работоспособными и для более общего случая [4].

**Структура блока цифровой обработки сигналов.** В данном докладе рассматривается метод с использованием вобуляции межимпульсного интервала для устранения эхо-сигналов, соответствующих неоднозначному измерению дальности. Вобуляции межимпульсного интервала (изменение периода повторения) позволяет нарушить детерминированный характер постоянной ошибки измерения дальности. Известно [4], что при вобуляции зондирующих импульсов требуется дополнительная обработка сигналов по определенным критериям. Один из вариантов подключения дополнительного канала критерийной обработки приведен на рис. 1.

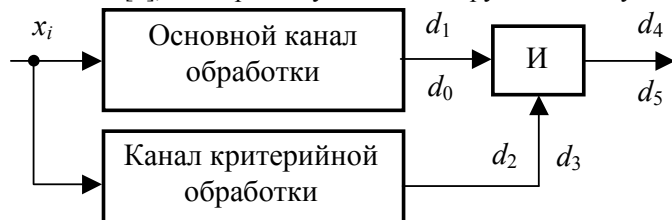


Рис. 1

Входными данными для процессора радиолокационных сигналов является последовательность  $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ , импульсов пачки. Предполагается, что эта последовательность прошла нормирующие устройства, а внутренний шум приемного устройства стабилизирован с помощью, например, системы шумовой автоматической регулировки. Также полагается, что обработка радиолокационных сигналов реализуется в цифровом виде. Основной канал обработки представляет собой типичный обнаружитель некогерентных сигналов. Он производит некогерентно-весовое накопление по алгоритму  $z_n = \sum_1^n g_i x_i$ , где  $g_i$  – весовые коэффициенты, и сравнение накопленной суммы с порогом обнаружения  $h$ . На выходе основного канала обработки формируются решения:  $d_0 = 0$ , если  $z_n < h$ , и  $d_1 = 1$ , если  $z_n \geq h$ . Канал критерийной обработки на основании поступивших данных выносит два решения:  $d_2 = 0$ , если принято решение о том, что полученная выборка сигнала принадлежит помехе с 1-го интервала неоднозначного измерения дальности, и  $d_3 = 1$ , если пачка принадлежит цели, находящейся в рабочей зоне РЛС. Объединение каналов осуществляется с помощью схемы "И": принимается решение  $d_4 = 0$ , если приняты решения  $d_0$  и  $d_2$  ( $d_3$ ) или  $d_2$  и  $d_1$  ( $d_0$ ); решение  $d_5 = 1$  выносится только в том случае, если приняты решения  $d_1$  и  $d_3$ . Такое построение схемы позволяет снизить вероятность появления отметок от целей, находящихся за пределами рабочей зоны РЛС.

**Алгоритмы критерийной обработки.** Для построения канала критерийной обработки необходимо учитывать структурные отличия сигналов: пачка эхо-сигналов от целей, находящихся в зонах неоднозначного измерения дальности, отличается от пачки полезных эхо-сигналов пропусками импульсов [4]. Это позволяет использовать различные алгоритмы.

**Критерий " $k$  подряд из  $n$ ".** Один из простейших способов критерийной обработки при использовании вобуляции заключается в сравнении эхо-сигналов соседних периодов и выделении совпадающих импульсов. Реализация этой идеи возможна за счет применения схемы совпадений. Одним из вариантов классификации сигналов в подобных условиях является использование обнаружителя по критерию " $k$  подряд из  $n$ " [5]. Первый порог бинарного квантования  $h_0$  выбирается из условия обеспечения минимума вероятности ошибочного различения импульсов сигнала и шума. Вторым порогом цифрового обнаружения  $k$  целесообразно выбрать не менее числа используемых для вобуляции периодов повторения зондирующих сигналов. Результаты обработки пачки (решения  $d_2, d_3$ ) запоминаются и подаются на схему "И" объединения с основным каналом обработки.

**Критерий " $k$  из  $n$ ".** Более "мягким" для критерийной обработки является применение критерия " $k$  из  $n$ " [5]. При его использовании канал критерийной обработки состоит из порогового устройства бинарного квантования с порогом  $h_0$ , цифрового накопителя в пределах пачки и второго порогового устройства с порогом  $h_1 \cong 1,5 \cdot \sqrt{n}$ . Данный критерий критичен к установке порогов. Особая точность нужна при установке первого порога, поскольку его незначительные изменения приводят к росту вероятности обнаружения целей, находящихся вне рабочей зоны РЛС, или к увеличению потерь в пороговой мощности.

**Алгоритм бинарной классификации.** Для пачки эхо-сигналов от целей, находящихся в зонах неоднозначного измерения дальности, можно записать статистику обнаружения  $z_n^* = \sum_1^n g_i^* x_i - 0,5 S_0 \sum_1^n g_i^{*2}$ , где  $g_i^*$  – весовые коэффициенты, соответствующие пачке импульсов с неоднозначным измерением дальности;  $S_0$  – амплитуда центрального импульса пачки. Для пачки эхо-сигналов от целей, находящихся в рабочей зоне РЛС, аналогичная статистика обнаружения имеет вид  $z_n^{**} = z_n - 0,5 S_0 \sum_1^n g_i^{*2}$ . Значения сумм типа  $0,5 \sum_1^n g_i^{*2}$  могут быть вычислены заранее и хранятся в памяти, величина  $z_n$  передается из основного канала обработки. Неопределенной в данных соотношениях является амплитуда  $S_0$ . Для ее определения использовался метод максимального правдоподобия, согласно которому оценка равна  $S_0^* = \sum_1^n g_i^* x_i / \sum_1^n g_i^{*2}$ . Классификацию сигналов производят по правилу: выносится решение  $d_2$ , если  $z_n^{**} < z_n^*$ , принимается решение  $d_3$  при условии  $z_n^{**} \geq z_n^*$ .

**Анализ качества обнаружения.** Теоретический анализ устройств обнаружения вызывает серьезные математические трудности, связанные с расчётом характеристик обнаружения сигналов. Кроме того, в основном канале и канале критерийной обработки сигналы и шумы оказываются зависимыми, что также усложняет статистический анализ обнаружителя. Поэтому для сравнения качества работы различных алгоритмов критерийной обработки 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  $\cos^2 \theta$ , разрядность данных на входе блока ЦОС – 12, число используемых при вобуляции периодов зондирования сигналов – 2. Для определения порога обнаружения  $h$  использовался метод экстремальных статистик.

На рис. 2 представлены характеристики обнаружения сигнала со случайной начальной фазой при некогерентном накоплении в пределах пачки. На рис. 2 приняты обозначения:  $D$  – вероятность правильного обнаружения,  $q$  – отношение сигнал-шум по мощности в децибелах. Кривые 1, 2 получены при выключенном канале критерийной обработки. График 1 соответствует обнаружению целей в пределах рабочей зоны РЛС и характеризует потенциальные возможности обнаружителя при некогерентной обработке пачки импульсов; график 2 получен для эхо-сигналов от целей, расположенных за пределами однозначного измерения дальности. Сравнение данных графиков показывает, что пороговое отношение сигнал-шум для ложных целей увеличивается на 2...3 дБ, а вероятность ее обнаружения снижается. Это свидетельствует о том, что вобуляция периода повторения позволяет раздробить энергию сигнала. Различия в качестве обнаружения, как показывают графики 1 и 2, наблюдается только в области пороговых сигналов. При увеличении мощности сигнала ложной цели ( $q > 12$  дБ) вероятность правильного обнаружения  $D \rightarrow 1$ , поэтому такие цели будут восприниматься как цели, находящиеся в пределах рабочей дистанции.

Таким образом, путем только вобуляции полностью устранить проблему неоднозначных измерений не удастся.

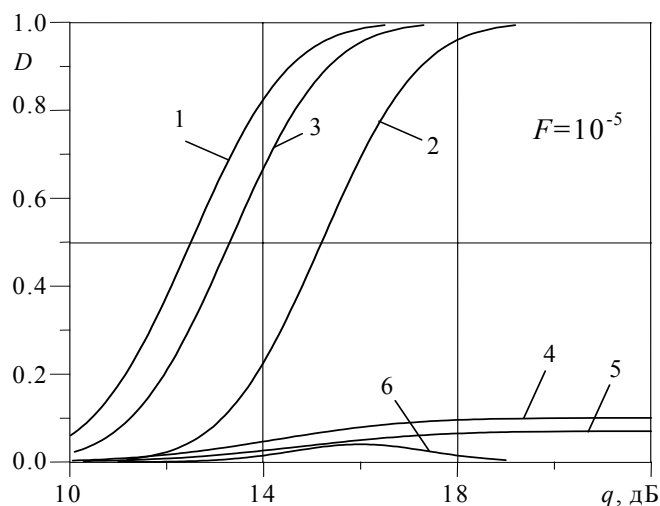


Рис. 2

Далее эксперименты проводились при включенном канале критерийной обработки. Следует заметить, что в этом режиме при неизменных параметрах основного канала обработки вероятность правильного обнаружения снижается (кривая 3, критерий " $k$  из  $n$ ", потери пороговой мощности сигнала около 1 дБ). Кривые 4,5,6 представляют характеристики обнаружения сигналов от целей, находящихся в зонах неоднозначного измерения дальности. Они соответствуют алгоритмам работы канала критерийной обработки: 4 – метод " $k$  подряд из  $n$ ", 5 – метод " $k$  из  $n$ ", 6 – метод, основанный на алгоритме классификации сигналов. Как показывают графики, использование критериев " $k$  подряд из  $n$ " и " $k$  из  $n$ " при построении канала критерийной

обработки не позволяет полностью раскрыть неопределенность относительно измерения дальности. При увеличении отношения сигнал-шум вероятность обнаружения целей, расположенных за пределами максимальной однозначно измеряемой дальности, остается постоянной конечной величиной ( $D = \text{const}$  при  $q \rightarrow \infty$ ). Алгоритм классификации сигналов имеет конечную вероятность обнаружения ложных целей только в области пороговых сигналов. При  $q \rightarrow \infty$  вероятность  $D \rightarrow 0$ . Потери в пороговой мощности полезных сигналов (от целей в пределах рабочей зоны) составляют 0,02...0,1 дБ (в пределах точности проведения эксперимента).

**Заключение.** Результаты моделирования на ЭВМ показали, что среди приведенных алгоритмов работы канала критерийной обработки наиболее предпочтительным является алгоритм, основанный на бинарной классификации сигналов. Он удовлетворяет требованиям практики, как по потерям в пороговой мощности сигнала, так и по вероятности устранения неоднозначности отсчета дальности.

#### Литература

1. Бакулев П.А., Степин В.М. Методы и устройства селекции движущихся целей. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л: Гидрометеоздат, 1988. – 588 с.
3. Радиолокационные измерители дальности и скорости. Т.1. В.И.Меркулов, А.И.Перов, В.Н.Саблин и др. Под ред. В.Н.Саблина. – М.: Радио и связь, 1999. – 420 с.
4. Sosulin Yu.G., Kostrova T.G., Kostrov V.V. Suppression of Second Scan Stroke Echo Signals in Pulsed Surveillance Radar // Proc. German Radar Symp., Bonn, Germany. September 3-5, 2002. – Pp.449-453.
5. Клюев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов с помощью накопителей дискретного действия. – М.: Сов. радио, 1963. – 112 с.