

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НЕКОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПО РАДИОЛОКАЦИОННОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

Ле Ван Кыонг

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

Приведены простые алгоритмы некогерентного накопления пачки импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазокодовой манипуляцией (ФКМ) при обнаружении высокоскоростной цели, движущейся с неизвестной скоростью при наличии миграции по дальности. Алгоритмы основаны на анализе радиолокационного изображения (РЛИ), получаемого при согласованной фильтрации (СФ) каждого ЛЧМ-импульса без учета радиальной скорости цели и совокупности РЛИ при согласованной фильтрации каждого ФКМ-импульса при многоканальной обработке с учетом радиальной скорости цели. Проведено математическое моделирование и получены характеристики обнаружения цели.

В настоящее время актуальным является обеспечение обнаружения и точного сопровождения радиолокационных целей с малым значением эффективной площади рассеяния (ЭПР), находящихся на больших (сотни-тысячи км) дальностях и движущихся с большими (единицы км/с) скоростями. К числу таких целей относятся искусственные спутники Земли и высокоскоростные воздушно-космические летательные аппараты (ВВКЛА). Одним из возможных вариантов организации обработки заключается в использовании более простого некогерентного накопления отраженного сигнала. Обработку в этом случае можно разделить на два этапа. Первый этап заключается в реализации некогерентного накопления, в результате чего может быть грубо определена дальность и радиальная скорость цели (без ускорения). На втором этапе реализуется когерентное накопление при существенно меньшем числе каналов обработки.

Целью настоящей работы является обоснование и анализ простых алгоритмов обнаружения высокоскоростных целей по яркостному радиолокационному изображению сцены.

Характеристики радиолокационных изображений. Под элементом (пикселем) $R_{i,m}$ РЛИ сцены будем понимать квадрат модуля комплексной амплитуды на выходе согласованного фильтра одиночного импульса для i -го импульса пачки в моменты времени $t_m = iT_r + t_{оп} + m/F_s$, $i = \overline{0, I-1}$, где I - число импульсов в пачке; $t_{оп}$ - общий для всех периодов повторения опорный момент времени; T_r - период повторения импульсов пачки; F_s - частота дискретизации. Для получения РЛИ используем согласованную фильтрацию. Для сигналов большой длительности СФ удобно выполнять путем выполнения БПФ над участками принимаемой реализации, умножения полученных спектральных отсчетов на комплексную частотную характеристику СФ и обратного БПФ.

Линейночастотномодулированный импульс. На рис. 1 приведены типовые РЛИ сцены при большом и малом отношении сигнал/шум (ОСШ) по каждому импульсу $q_0^2 = 2E/N_0 = 20$ и 0 дБ, соответственно при радиальной скорости цели 2 км/с и 4 км/с. При большом ОСШ по одиночному сигналу на РЛИ имеется четко выраженная линия, начало которой на оси временных задержек соответствует дальности до цели со смещением на величину, определяемую радиальной скоростью цели и знаком внутриимпульсной частотной модуляции. Угол наклона линии определяется расстоянием, пройденным за время радиолокационного наблюдения, то есть соответствует радиальной скорости цели.

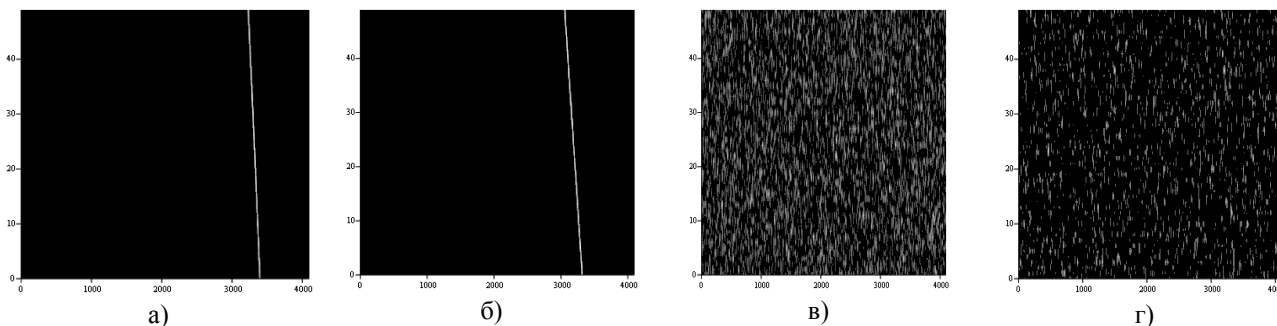


Рисунок 1 – Вид РЛИ при ЛЧМ-сигнале и скорости цели 2 км/с (а, в) и 4 км/с (б, г) ОСШ по одиночному сигналу 10 дБ (а, б), и 0 дБ (в, г).

При малых ОСШ линия визуально не обнаруживается, и для обнаружения цели при некогерентном накоплении необходимо использовать соответствующую обработку. Под термином «обнаружение цели при некогерентном накоплении» далее будем понимать визуальное или алгоритмическое принятие решения о наличии линии на РЛИ, обусловленной приемом отраженного сигнала, с определением номера отсчета по дальности, соответствующего началу линии и угла наклона этой линии. Окончательное обнаружение объекта с выбором соответствующего порога по критерию Неймана-Пирсона проводится по результатам когерентного накопления. Для обнаружения цели на РЛИ при некогерентном накоплении введем $g=1, G$ гипотез об угле $\alpha_g = \alpha_{\max} + 2\alpha_{\max}g/G$ наклона линии и преобразуем РЛИ следующим образом:

$$NN_{g,m} = \sum_{i=0}^{I-1} \left((1 - \{i + m \cdot \text{tg}(\alpha_g)\}) R_{[i+m \cdot \text{tg}(\alpha_g)],m} + \{i + m \cdot \text{tg}(\alpha_g)\} R_{[i+m \cdot \text{tg}(\alpha_g)]+1,m} \right), \quad (1),$$

где $\{x\}, [x]$ - операции взятия дробной части числа и округления до наименьшего целого, соответственно.

Операция (1) соответствует некогерентному накоплению отсчетов РЛИ вдоль линии $i = -m \cdot \text{tg}(\alpha_g)$, то есть согласованию участков НК с радиальной скоростью цели. Обнаружение цели сводится к нахождению максимального значения $\max_{g,m}(NN_{g,m})$ преобразованного РЛИ с одновременной оценкой радиальной скорости \hat{v}_r и дальности до цели:

$$\hat{v}_r = \frac{\text{tg}(\alpha_{g_{\max}})c}{2F_s T_r}; \quad \hat{r} = \frac{I T_r \text{tg}(\alpha_{g_{\max}})c}{2F_s}, \quad (2),$$

где $\alpha_{g_{\max}}$ - угол наклона линии; $\{\alpha_{g_{\max}}, m_{\max}\} = \text{argmax}_{g,m}(NN_{g,m})$ - индексы, соответствующие максимальному значению пикселей преобразованного РЛИ. Вид преобразованного РЛИ (в трехмерной форме) для тех же реализаций, что и на рис. 1б, г приведен на рис. 2.

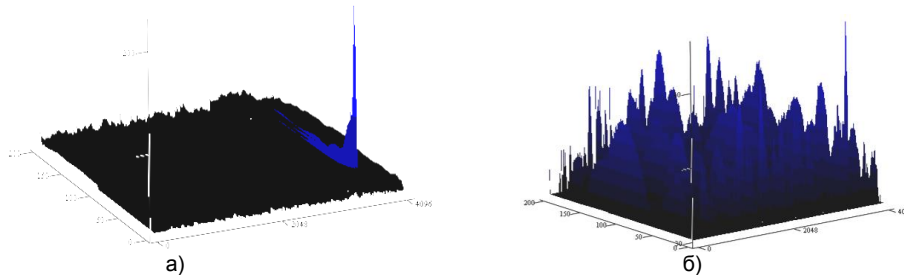


Рисунок 2 – Трехмерный вид преобразованного РЛИ для ОСШ 10 дБ (а) и 0 дБ (б)

Как видно из рис. 2, на преобразованном РЛИ для значений времени задержки и скорости цели формируется пик. При достаточном ОСШ пик будет явно выражен, а его амплитуда будет существенно превышать побочные максимумы.

Фазокодоманипулированный сигнала на базе М-последовательности. Обработка ФКМ-сигнала, в целом, аналогична обработке ЛЧМ, однако для построение исходного и преобразованного РЛИ должно проводиться для возможного диапазона доплеровских скоростей цели с дискретностью, определяемой шириной главного лепестка функции рассогласования одиночного импульса по скорости.

Характеристики обнаружения. Характеристики обнаружения получены для случая зондирующего сигнала в виде пачки ЛЧМ-сигналов при числе импульсов в пачке $I = 50$ при частоте повторения $T_r = 10$ мс. При обработке принималась частота дискретизации $F_s = 4$ МГц, число отсчетов БПФ $M = 1024$. Для определения максимума с вероятностью не менее 0,8 при использовании пачки сигналов из 50 импульсов требуется отношение сигнал/шум по пачке порядка 17...18 дБ, по одному импульсу пачки 0...1 дБ.

Весьма перспективным для реализации предлагаемого алгоритма является использование сверхточных нейронных сетей и высокопроизводительных графических процессоров.

Список использованных источников:

1. Маркович, И. И., Завтур Е. Е. Методы цифровой обработки сигналов, отраженных от вы-сокоманевренных воздушных целей. // Вестник воздушно-космической обороны, 2016, Вып. 3 (11). - С. 17-23.
2. Чепкасов, А. В., Сухоплюев А. В. Радиолокационный прием пачки импульсов большой длительности при обнаружении движущихся целей. // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей», 2019, № 1. - С. 30-34.