

УДК 621.396.96+621.391

КОГЕРЕНТНО-НЕКОГЕРЕНТНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ МИГРАЦИИ ПО ДАЛЬНОСТИ И ЕЕ ПРОИЗВОДНЫМ

КОЗЛОВ С. В., ЛЕ ВАН КЫОНГ

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

E-mail: kozlov@bsuir.by

Аннотация. Предложен вариант длительного комбинированного накопления отраженного сигнала, предусматривающий разделение его на непересекающиеся подпачки, когерентное накопление (КН) в подпачках с использованием одного из быстрых алгоритмов и последующее некогерентное накопление (НН) квадратов модулей результатов обработки подпачек. Отличием предлагаемого алгоритма некогерентного накопления от известных является использование в качестве суммируемых значений максимумов квадратов модулей результатов когерентной обработки, выбираемых из области дальность/радиальная скорость в соответствии с заданной гипотезой о минимальном и максимальном значении радиальной скорости цели и настройки канала обнаружения по радиальному ускорению. Выполнено имитационное моделирование и получены характеристики обнаружения. Приведены оценки для требуемого числа каналов приемника.

Abstract. A variant of long-term combined accumulation of the reflected signal is proposed, which provides for the division of the reflected signal into non-intersecting sub-packs, coherent accumulation in sub-packs using one of the economical algorithms, and subsequent incoherent accumulation of the squares of the modules of the results of processing the sub-packs. The difference between the proposed incoherent accumulation algorithm and the known ones is the use of the summed values of the maxima of the squares of the moduli of the results of coherent processing, selected from the range/radial velocity region in accordance with a given hypothesis about the minimum and maximum values of the target radial velocity and customization the detection channel by radial acceleration. Simulation was performed and detection characteristics were obtained. Estimates are given for the required number of receiver channels.

Постановка задачи

Трудности, возникающие при разработке алгоритмов длительного когерентного накопления отраженного сигналов при наличии миграции по дальности и ее производным, заключаются не только в парировании (без существенных энергетических потерь) указанного фактора, но и в необходимости организации большого числа каналов обработки с последующим анализом их выходных сигналов. В работе [1] предложен базовый, а в [2] на основе базового предложены «быстрые» (экономичные в вычислительном плане) алгоритмы длительного КН отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным и выполнена оценка требуемое число каналов обработки.

При обнаружении реальных радиолокационных целей без априорных данных о параметрах их движения (радиальная скорость, ускорения и производная ускорения) число каналов может составить сотни тысяч-десятки миллионов, что существенно затрудняет реализацию приемника. В этой связи возникает задача снижения числа каналов обработки, что может быть достигнуто за счет применения комбинированной – сочетания когерентной обработки в подпачках и некогерентного накопления результатов обработки.

Цель статьи – обоснование алгоритма комбинированного когерентно-некогерентного алгоритма накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным.

Алгоритм обработки

Как следует из выражения (4) работы [2] число каналов приемника пропорционально шестой степени времени $T_{\text{КН}}$ когерентного накопления (все обозначения соответствуют [1-3]). Следовательно, если уменьшить время КН в Q раз, то число каналов уменьшится в Q^6 раз.

Разделим интервал КН по «медленному» времени на $q = \overline{1, Q}$ непересекающихся подпачек одинаковой длительности. Каждая подпачка будет содержать K / Q импульсов. Будем полагать, что за время наблюдения цель остается в пределах одного диапазона «грубой» доплеровской скорости [1,2].

Так как обработка проводится для Q подпачек, то теоретический выигрыш в числе каналов составит $Q^6/Q=Q^5$ раз. Отметим, что при возможных значениях $T_{\text{кн}}=1$ с и $Q=10$ получим $T_{\text{кн1}}=T_{\text{кн}}/Q=0,1$ с, что приводит к разрешающей способности по производной радиального ускорения $\Delta a' = \lambda / (2T_{\text{кн1}}^3)$ [2], что при $\lambda=0,3\dots 0,03$ м составит $\Delta a'=15\dots 150$ м/с³. Это очень большое значение производной радиального ускорения, практически недостижимое для реальных целей, поэтому на практике при разделении сигнала на подпачки учет произвольной радиального ускорения в большинстве случаев не потребуется. Поэтому выигрыш в числе каналов может быть оценен в Q^2 раз.

В результате применения алгоритм на основе компенсации миграции дальности и преобразования Фурье или алгоритма обработки на основе частичной компенсации миграции дальности и преобразования замкового камня к каждой подпачке для некоторых значений ускорения a_s и начальной радиальной скорости V_{0s} будет образовано $q=1, Q$ матриц $|\dot{G}_q(t_m, F_k)|$ радиолокационного изображения (РЛИ) сцены, по каждой из которой возможно решение задачи обнаружения цели и (или) некогерентное накопление результатов обработки.

Рассмотрим характерные энергетические соотношения. Пусть перед РЛС стоит задача обнаружить цели на заданной дальности при реализованном отношении сигнал/шум при полностью когерентной обработке $\rho = E / N_0$, тогда отношение сигнал/шум по одной подачке будет $\rho_{\text{пш}} = \rho / Q$. Пусть $Q=10$, $\rho=20$ дБ, тогда $\rho_{\text{пш}}=10$ дБ.

При таком значении $\rho_{\text{пш}}$ сигнал не будет существенно выделяться на парциальных радиолокационных изображениях, но его энергия достаточна для эффективного некогерентного накопления. Потери некогерентного накопления в сравнении с когерентным при нефлуктуирующем отраженном сигнале и $Q=10$ составят около 2 дБ [4, 5]. Рассматриваемая ситуация иллюстрируется на рисунке 1, где показано исходное РЛИ в вид результатов согласованной фильтрации одиночных импульсов и синтезированное РЛИ при когерентной обработке каждой подпачки. Число столбцов синтезированного отсчетов синтезированного РЛИ по подпачкам в столбцах равно Q . Элементы синтезированного $|\dot{G}_{\Sigma}(q, t_m)|^2$ РЛИ формировались по правилу

$$|\dot{G}_{\Sigma}(q, t_m)|^2 = \max_k |\dot{G}_q(t_m, F_k)|^2, \quad (1)$$

то есть из соответствующего столбца РЛИ для каждой подпачки выбирался максимальный элемент.



а) исходное РЛИ при сжатии одиночных сигналов



б) синтезированное РЛИ при выборе максимального элемента в столбце из каждого парциального РЛИ

Рис. 1. Иллюстрация результатов обработки подпачек импульсов, $\rho=20$ дБ

Как видно из рис. 1., обнаружение цели по исходному РЛИ практически невозможно, так как отношение сигнал/шум по каждому импульсу пачки составляет 0 дБ. При обработке каждой подпачки из 10 импульсов отношение сигнал/шум по каждой подпачке возрастает в 10 раз до 10 дБ, поэтому выходной сигнал при обработке каждой подпачки заметно выделяется над шумами. Особенно отчетливо это проявляется при интеграции результатов обработки подпачек на одном РЛИ согласно (1). Отметим также характерный вид полученного РЛИ, где наличие цели проявляется в виде характерной прямой или изогнутой (в зависимости от радиального ускорения)

яркой линии на фоне шумовых выбросов меньшей интенсивности. Эта линия может быть легко обнаружена, например, оператором.

Сформируем алгоритм некогерентного накопления парциальных РЛИ. Пусть по парциальным РЛИ $|\dot{G}_q(F_k, t_m)|^2$ проверяется гипотеза о наличии цели, максимум отраженного сигнала от которой при $q=0$ находится в отсчете «быстрого» времени с номером m , однозначная начальная радиальная скорость находится в диапазоне $V_{0\min} \dots V_{0\max}$, а радиальное ускорение соответствует параметру настройки канала обработки и составляет a_s .

Тогда для q -ой пачки максимум парциального РЛИ должен находиться в столбцах с номерами от

$$n_1(q, V_0, a_s) = m + \left[\frac{2F_s}{c} \left(V_{0\min} \frac{q}{Q} T_{\text{кн}} + \frac{1}{2} a_s \left(\frac{q}{Q} T_{\text{кн}} \right)^2 \right) \right] \quad (2)$$

до

$$n_2(q, V_0, a_s) = m + \left[\frac{2F_s}{c} \left(V_{0\max} \frac{q}{Q} T_{\text{кн}} + \frac{1}{2} a_s \left(\frac{q}{Q} T_{\text{кн}} \right)^2 \right) \right]. \quad (3)$$

Выберем из этого столбцов максимальный отсчет

$$B_q = \max_{k; m \in [n_1, n_2]} |\dot{G}_{2q}(t_m, F_k)|^2, \quad (4)$$

и просуммируем эти максимумы для всех парциальных РЛИ:

$$\Psi(m, V_{0\min}, V_{0\max}, a_s) = \sum_{q=0}^{Q-1} B_q. \quad (5)$$

Функция $\Psi(m, V_{0\min}, V_{0\max}, a_s)$ представляет собой решающую статистику при обнаружении отраженного сигнала с возможными значениями начальной радиальной скорости $V_{0\min} \dots V_{0\max}$ и заданным радиальным ускорением a_s , максимум которого (для первого импульса пачки) находится в m -м отсчете. Сравнивая решающую статистику с порогом, принимаем решение о наличии цели и формируем грубую оценку скорости цели.

В отличие от стандартного алгоритма некогерентного накопления [5, 6], решающая статистика (5) формируется при предварительном выборе (3), (4) квадрата модуля максимального отсчета из заданной области по времени задержки/неоднозначной радиальной скорости. Если отношение сигнал/шум по подпачке достаточно велико, то с вероятностью, близкой к единице, указанный максимум будет совпадать с сигнальным отсчетом, и решающая статистика будет образована только сигнальными отсчетами. Если отношение сигнал/шум по подпачке мало, то максимум может сформироваться на шумовом отсчете. Это обстоятельство приведет к «размыванию» сигнального максимума и снижению вероятности правильного обнаружения. Таким образом, предлагаемый алгоритм несколько более требователен к отношению сигнал/шум по некогерентно суммируемым отсчетам. Если стандартный алгоритм некогерентного накопления имеет малые потери при отношении сигнал/шум по суммируемым отсчетам ~ 3 дБ, то предлагаемый алгоритм будет обладать этим свойством при отношении сигнал/шум по суммируемым отсчетам $\sim (5 \dots 7)$ дБ.

Требуемое число каналов по начальной радиальной скорости и ускорению для алгоритма с разделением на подпачки определяется очевидной модификацией выражения (4) в [2] и без учета операций некогерентного накопления составляет

$$N_{\text{комб}} = \frac{16V_{\max} a_{\max} a'_{\max} \Delta f_0 T_{\text{кн}}^6}{c \lambda^2 Q^5}. \quad (6)$$

Например, при $\lambda = 0,1$ м; $\Delta f = 10$ МГц; $T_{\text{кн}} = 1$ с, $a'_{\max} = 10$ м/с², $a_{\max} = 150$ м/с², $V_{\max} = 1000$ м/с, $Q = 10$ получим $N_{\text{комб}} = 2400$, что не вызывает непреодолимых сложностей в практической реализации.

Выбор числа подпачек, на который разделяется принимаемый сигнал, в данном случае является компромиссным. При увеличении Q резко снижается вычислительная сложность

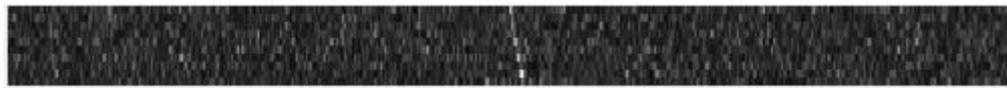
алгоритма, но возрастают потери на некогерентное накопление, при $\rho/Q < (5...7)$ дБ потери могут резко увеличиваться.

Результаты моделирования

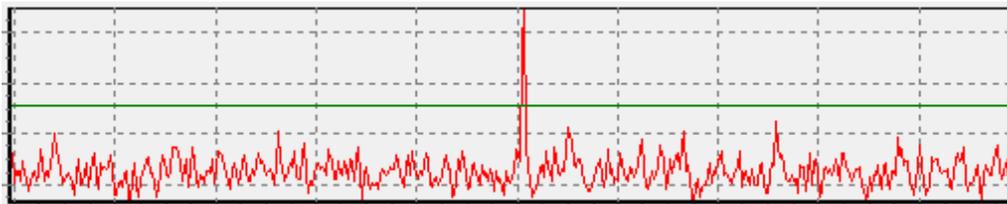
На рис. 2 приведен пример последовательной реализации когерентно накопления в подпачках ($Q=10$), объединения полученных РЛИ путем выбора максимумов и расчета решающей статистики (5). Расчеты проведены при $\rho=20$ дБ, $V_{0r}=V_{0s}=-500$ м/с, $a_r=a_s=-10$ м/с², $V_{0min}=-600$ м/с, $V_{0max}=-400$ м/с.



а) исходное РЛИ – результат согласованной фильтрации



б) РЛИ - результат когерентного накопления в подпачках



с) результат некогерентного накопления для $V_{0min}=-400$ м/с, $V_{0min}=-600$ м/с

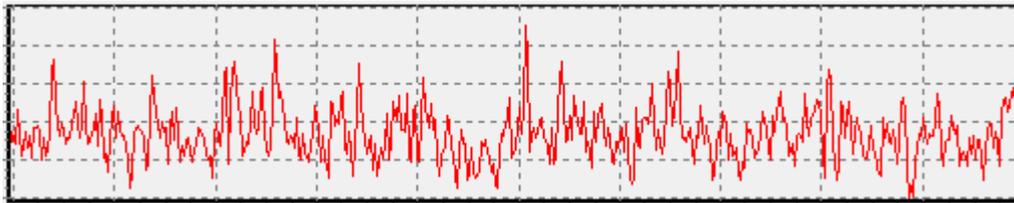
Рис. 2. Иллюстрация последовательной когерентной обработки в подпачках и некогерентного накопления, $\rho=100$

Исходное отношение сигнал/шум невелико, поэтому на исходном РЛИ сигнал практически не наблюдается. После когерентной обработки по подпачкам отношение сигнал/шум возрастает и сигнал может быть обнаружен визуально (рисунок 2б). В результате некогерентного накопления при построении решающей статистики $\Psi(m, V_{0min}, V_{0max}, a_s)$ для отсчета m , примерно соответствующего положению первого сжатого импульса отраженного сигнала, формируется явно выраженный пик, свидетельствующий о наличии цели. Амплитуда пика для заданного значения отношения сигнал/шум примерно в 3,5 раза выше среднего значения фона решающей статистики.

При снижении отношения сигнал/шум по пачке до $\rho=40$ и $Q=10$ сигнал не обнаруживается ни на объединенном РЛИ, ни при анализе решающей статистики (рис. 3). В то же время, если выбрать $Q=4$, сигнал уверенно обнаруживается (рис. 4).



а) РЛИ - результат когерентного накопления в подпачках



b) результат некогерентного накопления для $V_{0min} = -400$ м/с, $V_{0min} = -600$ м/с

Рис. 3. Иллюстрация обработки при $\rho = 40$, $Q = 10$



a) РЛШ - результат когерентного накопления в подпачках



b) результат некогерентного накопления для $V_{0min} = -400$ м/с, $V_{0min} = -600$ м/с

Рис. 4. Иллюстрация обработки при $\rho = 40$, $Q = 4$

Это подтверждает ранее вышеприведенный тезис о необходимости правильного разделения сигнала на подпачки в соответствии с ожидаемым значением отношения сигнал/шум.

После обнаружения цели по результатам некогерентного накопления может быть решена задача обнаружения отраженного сигнала для каждой из подпачек с оцениванием номеров отсчетов, где находятся максимумы отраженных сигналов. Это позволит устранить неоднозначность скорости цели и уточнения ускорения цели с использованием, например, метода наименьших квадратов.

Заключение

Предлагаемый алгоритм комбинированного когерентно-некогерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным позволяет резко сократить число каналов приемника и обладает относительно малыми, единицы дБ, потерями на обработку. С учетом характерных отличий синтезированного по подпачкам радиолокационного изображения перспективным является обоснование нейросетевого алгоритма обнаружения с использованием, например, сверточных нейронных сетей.

Список использованных источников

1. Козлов С. В., Ле Ван Кыонг. Базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным. В настоящем сборнике.
2. Козлов С. В., Ле Ван Кыонг. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным. В настоящем сборнике.
3. Козлов С. В., Ле Ван Кыонг. Математические модели отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным. В настоящем сборнике.
4. Ильчук А. Р., Сеницын И.А. Алгоритмы обработки сигналов, отраженных от высокоскоростных летательных аппаратов, в бортовых радиолокационных системах // Радиотехника, 2014, № 7, с. 16–23.
5. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронной борьбы. Часть 1: основы радиолокации / Учебник курсантов радиотехнических специальностей высших учебных заведения ПВО. – М.: Военное издательство МО СССР, 1983. – 456 с.
6. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
7. Ширман Я. Д., Голиков В. Н. Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров. Издательство советское радио Москва, 1963. – 279 с.