УДК 621.396.96

В. И. Порсев, А. П. Николаев, И. С. Кривоножко

Многоканальное накопление радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростных целей, движущихся с ускорением

Определены параметры когерентного накопителя пачки импульсов, многоканального по скорости и ускорению. Показаны особенности функции неопределенности пачки импульсов на плоскости скорость – ускорение. Разработаны алгоритмы оценки скорости и ускорения. Предложена система многоканальной согласованной фильтрации пачки когерентных немодулированных импульсов с предварительным некогерентным накоплением, при использовании которой значительно снижаются вычислительные затраты. Определены условия, при которых система не имеет потерь в пороговом сигнале.

Ключевые слова: многоканальное когерентное накопление, согласованный фильтр, пачка импульсов, высокоскоростная цель, оценка радиальной скорости, оценка радиального ускорения, некогерентное накопление.

Введение

Действенным механизмом для обеспечения своевременного и достоверного обнаружения космических объектов (КО) на больших дальностях в условиях физических ограничений на размеры антенной решетки и мощность передатчика является когерентное накопление радиолокационных сигналов. Для обеспечения эффективного когерентного накопления пачка импульсов должна быть когерентна, что в свою очередь зависит от когерентности пачки при излучении, случайных изменений условий распространения радиоволн в тропосфере и ионосфере и амплитудно-фазовой нестабильности отраженного от цели сигнала. По результатам анализа данных, приведенных в работах [1–4], можно считать, что в дециметровом диапазоне пачка сигналов длительностью до 0,3...0,4 с, как правило, будет сохранять когерентность, достаточную для эффективного когерентного накопления.

В статьях [2, 3] показано, что когерентность пачки может нарушить хаотическое отклонение ускорения цели от среднего значения. В то же время для КО оно может быть существенным лишь на атмосферном участке траектории, соответствующем относительно малым дальностям, где для обнаружения цели достаточно одного импульса или короткой пачки, при обработке которых ускорение цели можно не учитывать.

В статье [5] в качестве причин нарушения когерентности названы высокая радиаль-

ная скорость и ускорение цели, а также сделан вывод о неэффективности когерентного накопления длинной пачки сигналов, отраженных от высокоскоростных целей, и нецелесообразности когерентного накопления при обнаружении равноускоренно движущихся целей. Однако высокая скорость цели приводит только к появлению соответствующего доплеровского сдвига частоты сигнала и изменению периода повторения импульсов, а ускорение приводит к изменению доплеровской частоты от импульса к импульсу пачки. Эти изменения параметров пачки априорно неизвестны, однако носят закономерный, а не случайный характер и, следовательно, никак не влияют на когерентность сигналов.

В работах [4, 6–8] показано, что высокие скорость и ускорение цели не являются препятствием для эффективного когерентного накопления. Так, в статье [4] приведены результаты успешных экспериментов по когерентному накоплению пачки импульсов, отраженных от искусственного спутника Земли на дальности в диапазоне 600...2000 км при радиальном ускорении 0...100 м/с². Длительность пачки из 12 импульсов составляла 0,44 с, длина волны – 24 см. Когерентный накопитель (КН) был многоканальным по скорости и ускорению, что позволяло проводить измерение радиального ускорения цели.

Общие принципы радиолокационного измерения дальности, скорости и ускорения изложены в статье [9]. Приведенный анализ является чисто теоретическим и касается точности оценки трех параметров, которая может

быть достигнута при использовании приемника, позволяющего получить максимально правдоподобные оценки. В статье [7] предложены алгоритм многоканального по скорости и ускорению когерентного накопления и два алгоритма совместного измерения скорости и ускорения. Однако оптимальный алгоритм, основанный на поиске максимума корреляционного интеграла, является достаточно сложным, а квазиоптимальный алгоритм требует относительно большого отношения сигнал/шум и неэффективен при наличии более одной цели в разрешаемом объеме. В статье [10] рассмотрен подход по определению параметров многоканального по скорости когерентного накопления, сделан вывод, что в условиях отсутствия априорной информации об ускорении необходимо применять многоканальный по ускорению КН, но алгоритмы оценки ускорения цели не приведены.

Несмотря на практическую необходимость применения когерентного накопления длинных пачек импульсов для обнаружения КО, построение многоканальных по скорости и ускорению КН в научной литературе освещено недостаточно. Еще меньше информации приведено о практически реализуемых алгоритмах оценки скорости и ускорения.

Первая цель данной работы – определение параметров многоканального КН пачки импульсов, отраженных от высокоскоростных целей, которые движутся с ускорением, и алгоритмов оценки скорости, ускорения, обладающих приемлемой точностью, и достаточно простых для практической реализации. Вторая цель – уменьшение вычислительных затрат при реализации многоканального по скорости и ускорению согласованного фильтра пачки немодулированных импульсов без потерь в пороговом сигнале.

Решение первой задачи

Как известно [11], согласованный фильтр для пачки импульсов представляет собой последовательное соединение согласованного фильтра одиночного импульса и КН. Согласованный фильтр можно построить только для полностью известного (за исключением амплитуды и времени прихода) сигнала. Однако длинная пачка импульсов, отраженная от КО, имеет

неизвестные период повторения, доплеровскую частоту и скорость ее изменения внутри пачки, которые связаны с неизвестными радиальной скоростью и радиальным ускорением цели. Отметим, что здесь сделано допущение: вторая и более высокие производные скорости цели равны нулю.

Согласно [9, 12], если какой-либо параметр сигнала неизвестен, то оптимальным решением является применение системы согласованных фильтров, многоканальной по неизвестному параметру. Система фильтров должна перекрывать весь диапазон возможного изменения этого параметра. Для оптимальной обработки пачки, отраженной от КО, в общем случае необходима система согласованных фильтров, многоканальная по периоду повторения импульсов (перемещению цели по дальности), скорости цели (доплеровской частоте) и ускорению цели (скорости изменения доплеровской частоты внутри пачки). Теоретически проблем для построения такой системы нет, но общее количество фильтров, равное произведению числа каналов по каждому из трех параметров, может оказаться очень большим и трудно реализуемым на практике.

Рассмотрим когерентное наложение при разном количестве неизвестных параметров пачки импульсов. Начнем с когерентного наложения полностью известной пачки импульсов. В статье [10] показано, что при известной радиальной скорости V_0 в момент времени $t_0 = (L - 1)T$, который отсчитывается от начала пачки (для цели, приближающейся к РЛС, $V < 0$), и ускорении a цели комплексные коэффиценты $\dot{w}(n)$ КН в формуле

$$\dot{S}(d) = \sum_{n=1}^N \dot{w}(n) \dot{M}(n, d) \quad (1)$$

должны быть определены в соответствии с выражением

$$\begin{aligned} \dot{w}(n) = \\ = \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{2V_0(L-n)T_d}{\lambda} + \frac{a((L-n)T_d)^2}{\lambda} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\dot{S}(d)$ – комплексная огибающая выходного сигнала КН;

d – номер отсчета по дальности;

N – число импульсов в пачке;

n – номер импульса в пачке;

$\dot{M}(n, d)$ – комплексная огибающая входного сигнала КН (выходной сигнал согласованного фильтра одиночного импульса);

j – мнимая единица;

$L \in [1, N]$;

T_d – период повторения импульсов в пачке, отраженной от цели;

$T_d = T / (1 - 2V_0 / c)$;

T – период повторения зондирующих импульсов;

c – скорость света;

a – радиальное ускорение цели, $a = \text{const}$ (для цели, ускоряющейся в сторону РЛС, $a < 0$);

λ – длина волны.

Параметр L определяет момент времени относительно начала пачки, которому соответствует выходной сигнал КН $t_0 = (L - 1)T$.

Для оценки необходимости компенсации перемещения цели по дальности перед КН в статье [10] приведена формула для расчета граничного размера элемента разрешения по дальности $\Delta r_{\text{гр}}$, при которой в одноканальном КН (1) появляются потери более 0,1 дБ из-за перемещения цели в течение пачки:

$$\Delta r_{\text{гр}} \approx 3,3T(N - 1)V_{\text{max}},$$

где V_{max} – максимальная радиальная скорость цели.

В качестве примера запишем расчет для пачки зондирующих импульсов, типичной для радиолокационных станций (РЛС) обнаружения КО, которая имеет следующие параметры:

Длина волна, λ , м	0,24
Период повторения зондирующих импульсов, T , мс	15
Число импульсов в пачке, N	16
Длительность одиночного немодулированного импульса, τ , мс ...	1,00
Общая длительность пачки, NT , с	0,24

При $V_{\text{max}} = 11$ км/с получим $\Delta r_{\text{гр}} \approx 8$ км. Разрешающая способность немодулированного импульса длительностью 1 мс, вычисленная

по формуле $c\tau / 2$, составляет 150 км, что во много раз превышает $\Delta r_{\text{гр}}$. Следовательно, при когерентном накоплении типичной пачки перемещение цели по дальности можно не компенсировать.

Как известно [11], скоростная характеристика КН (1) является периодической. Период однозначности по скорости $V_{\text{одн}}$ и ширина скоростной характеристики (элемент разрешения по скорости) ΔV по уровню –3 дБ определяются по формулам:

$$V_{\text{одн}} = \frac{\lambda}{2T_d}, \quad \Delta V \approx \frac{\lambda}{2NT_d}. \quad (3)$$

Из формул (3) для типичной пачки получим $V_{\text{одн}} = 8$ м/с, $\Delta V \approx 0,5$ м/с. Диапазон изменения скоростей КО $2V_{\text{max}} = 22$ км/с во много раз превосходит период однозначности по скорости $V_{\text{одн}}$. Следовательно, скорость цели, измеренная с помощью КН типичной пачки, является неоднозначной.

Ширина скоростной характеристики КН ΔV крайне мала, поэтому для одноканального КН требуется очень точная априорная информация о скорости, что, как правило, невозможно обеспечить на практике. Известным решением данной проблемы является применение системы согласованных фильтров, многоканальной по скорости. В периоде однозначности по скорости равномерно расположены K фильтров (скоростных каналов), настроенных на скорости:

$$V_k = \frac{kV_{\text{одн}}}{K} = \frac{k\lambda}{2KT_d}, \quad k = 0, 1, \dots, K - 1, \quad (4)$$

где k – номер скоростного канала.

В статье [10] показано, что комплексные коэффициенты $\dot{w}(n, k)$ многоканального по скорости КН при известном ускорении a можно получить, подставив в формулу (2) вместо V_0 выражение (4). Тогда получим

$$\dot{w}(n, k) = \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{k(L - n)}{K} + \frac{a((L - n)T_d)^2}{\lambda} \right) \right\}. \quad (5)$$

В соответствии с выражением (5) выходной сигнал многоканального КН определяется как

$$\dot{S}(k, d) = \sum_{n=1}^N \dot{w}(n, k) \dot{M}(n, d). \quad (6)$$

Число скоростных каналов K выбираем исходя из допустимых потерь в отношении сигнал/шум для случая, когда скорость цели не совпадает ни с одной из V_k . Как правило, для уменьшения потерь приходится устанавливать $K \geq 2N$. Далее будем считать, что $K = 2N$.

Согласно работе [9], зависимость амплитуды выходного сигнала КН (6) от ускорения (ускорительная характеристика) также имеет периодический характер. Период однозначности по ускорению $a_{\text{одн}}$ определяется по формуле

$$a_{\text{одн}} = \frac{\lambda}{2T_d^2}, \quad (7)$$

а ширина ускорительной характеристики КН (элемент разрешения по ускорению) Δa по уровню -3 дБ по формуле

$$\Delta a \approx \lambda / (2T_d^2 (N^2 / 7)). \quad (8)$$

Из формул (7), (8) для типичной пачки получим $a_{\text{одн}} = 533$ м/с², $\Delta a \approx 14,6$ м/с². Для многоканального по скорости КН (6) необходимо целеуказание по ускорению, среднеквадратическая ошибка которого меньше Δa . Если целеуказание отсутствует, то необходимо применять систему, многоканальную по ускорению.

Исходя из общей концепции построения системы согласованных фильтров для случая неизвестных параметров сигнала [12], в диапазоне однозначности по ускорению равномерно расположим P фильтров (ускорительных каналов), настроенных на ускорения:

$$a_p = \frac{p a_{\text{одн}}}{P} = p \Delta a, \quad p = 0, 1, \dots, P-1, \quad (9)$$

где p – номер ускорительного канала.

Если расстояние между фильтрами принять равным Δa , то число каналов по ускорению будет равно

$$P = \text{round}(a_{\text{одн}} / \Delta a) = \text{round}(N^2 / 7), \quad (10)$$

где round – операция округления числа до ближайшего целого.

При таком количестве ускорительных каналов максимальные потери при несовпадении ускорения цели с a_p могут достигать 3 дБ. Для сокращения максимальных потерь до 1 дБ необходимо увеличить число ускорительных каналов до $P = \text{round}(N^2 / 4)$. Для типичной пачки $N = 16$. Тогда $P = 64$.

Коэффициенты $\dot{w}(n, k, p)$ КН, многоканального по скорости и ускорению, получим, подставив в формулу (5) вместо a выражение (9):

$$\begin{aligned} \dot{w}(n, k, p) = \\ = \exp \left\{ j2\pi \left(\frac{k(L-n)}{K} + \frac{p(L-n)^2}{2P} \right) \right\}, \quad (11) \\ L = \frac{(N+1)}{2}. \end{aligned}$$

Выходной сигнал КН определим следующим образом:

$$\dot{S}(k, p, d) = \sum_{n=1}^N \dot{w}(n, k, p) \dot{M}(n, d). \quad (12)$$

При $K = 32$ общее число фильтров $PK = 2048$ весьма значительное. На практике радиальное ускорение КО, движущихся вдоль линии визирования в сторону РЛС, лежит в диапазоне $-8 \dots 0$ м/с².

Для целей, движущихся перпендикулярно линии визирования, максимальное радиальное ускорение можно вычислить по формуле

$$a_{\text{max}} = \frac{V^2}{R}, \quad (13)$$

где V – скорость цели;

R – расстояние до цели.

Для обнаружения целей на малых дальностях нет необходимости применять длинные пачки сигналов, поэтому зададим дальность цели $R_{\text{min}} = 1000$ км, а скорость $V_{\text{max}} = 9$ км/с.

Согласно выражению (13), получим $a_{\text{max}} = 81$ м/с². Таким образом, радиальное ускорение КО может находиться в диапазоне от $a_{\text{min}} = -8$ до $a_{\text{max}} = 81$ м/с². Необходимое число ускорительных каналов Pm можно рассчитать по формуле

$$Pm = \left\lceil (a_{\text{max}} - a_{\text{min}}) \frac{P}{a_{\text{одн}}} \right\rceil + 2.$$

Для типичной пачки $Pm = 13$ общее число фильтров многоканального КН $PmK = 416$, что во много раз меньше, чем число фильтров, перекрывающих весь диапазон однозначности по ускорению ($PK = 2048$).

В выражении (12) номер ускорительного канала p должен принимать следующие значения:

$$0, 1, 2, \dots, \left\lceil a_{\max} \frac{P}{a_{\text{одн}}} \right\rceil,$$

$$P + \left\lfloor a_{\min} \frac{P}{a_{\text{одн}}} \right\rfloor - 1, \quad P + \left\lfloor a_{\min} \frac{P}{a_{\text{одн}}} \right\rfloor,$$

$$P + \left\lfloor a_{\min} \frac{P}{a_{\text{одн}}} \right\rfloor + 1, \quad \dots, \quad P - 1,$$

где $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления числа вверх до целого;
 $\lfloor \cdot \rfloor$ – операция округления числа вниз до целого.

Выражение (12) целесообразно использовать напрямую, если число накапливаемых импульсов не превышает 20...30. Если число накапливаемых импульсов больше, то лучше реализовать выражение (12) с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) [8].

При фильтрации сигналов, согласно формуле (12), возможно рассогласование по трем параметрам: ускорению, скорости и дальности. В связи с этим функция неопределенности пачки сигналов становится функцией трех переменных [9]. Для фиксированной дальности и ускорения $a = 0$ получаем скоростную характеристику (рис. 1, а), для фиксированной дальности и скорости $V = 0$ – ускорительную характеристику (рис. 1, б). На рис. 1, в, г показана двумерная функция неопределенности пачки импульсов при фиксированной дальности на плоскости скорость – ускорение. Хорошо виден (см. рис. 1, в, г) периодический характер функции по скорости и ускорению. При больших

Рис. 1. Функция неопределенности пачки импульсов на плоскости скорость – ускорение

ускорениях функция имеет высокий уровень боковых лепестков (БЛ). Максимальные БЛ с координатами $(a/a_{\text{одн}} = 0,5; V/V_{\text{одн}} = 0,25)$ и $(a/a_{\text{одн}} = 0,5; V/V_{\text{одн}} = 0,75)$ достигают уровня -3 дБ, что совпадает с результатами, полученными в работе [7]. Столь высокий уровень БЛ может затруднить обнаружение слабого сигнала на фоне сильного. Но в диапазоне радиальных ускорений реальных целей от $a/a_{\text{одн}} = -0,015$ до $a/a_{\text{одн}} = 0,14$ уровень БЛ несколько меньше, чем при высоких ускорениях. Он может быть уменьшен дополнительно за счет весовой обработки, для чего следует комплексные коэффициенты КН $\dot{w}(n, k, p)$ умножить на весовую функцию $W(n)$, например, вида:

$$W(n) = 0,5(1 + \gamma) + 0,5(1 - \gamma) \cos(2\pi(n - (N + 1)/2)/N).$$

При $\gamma = 0,08$ получим функцию Хемминга. Весовая обработка значительно снижает уровень БЛ скоростной характеристики, но на уровень БЛ ускорительной характеристики оказывает слабое влияние.

Из работы [9] следует, что при $L = (N + 1)/2$ в формуле (11) обеспечивается независимость измерений скорости и ускорения. Это хорошо видно на рис. 1, где главный лепесток функции имеет «кнопочный» вид. При $L \neq (N + 1)/2$ главный лепесток приобретает вид косого гребня, подобного функции неопределенности сигнала с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) на плоскости дальность – скорость, что приводит к взаимной зависимости измерений.

По положению максимума функции неопределенности можно определить ускорение и неоднозначную скорость:

$$\hat{a} = \begin{cases} pm \frac{a_{\text{одн}}}{P}, & \text{если } pm \leq P/2; \\ (pm - P) \frac{a_{\text{одн}}}{P}, & \text{если } pm > P/2; \end{cases} \quad (14)$$

$$\hat{v} = km \frac{V_{\text{одн}}}{K}, \quad (15)$$

где pm , km , dm – номера каналов по скорости, ускорению и дальности, в которых ам-

плитуда сигнала КН $|\dot{S}(km, pm, dm)|$ максимальна.

Здесь также $V_{\text{одн}}$ определяется согласно выражению (3), $a_{\text{одн}}$ – согласно формуле (7).

Важно отметить, что оценки (14), (15) корректны при условии, что ускорение цели $a = \text{const}$. При $a \neq 0$ скорость цели в течение пачки изменяется линейно. Если в формуле (11) параметр $L = (N + 1)/2$, то оценка скорости (15) соответствует середине пачки.

Оценки ускорения и неоднозначной скорости по формулам (14), (15) являются грубыми, ошибки могут достигать

$$\frac{a_{\text{одн}}}{2P}, \quad \frac{V_{\text{одн}}}{2K}.$$

Для уменьшения ошибок при оценке ускорения и неоднозначной скорости целесообразно применить эмпирические алгоритмы кубического среднего взвешивания:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{p=pm-sa}^{pm+sa} a(p) |\dot{S}(km, p, dm)|^3}{\sum_{p=pm-sa}^{pm+sa} |\dot{S}(km, p, dm)|^3}; \quad (16)$$

$$\hat{v} = \frac{\sum_{k=km-sv}^{km+sv} k(V_{\text{одн}}/K) |\dot{S}(k, pm, dm)|^3}{\sum_{k=km-sv}^{km+sv} |\dot{S}(k, pm, dm)|^3}. \quad (17)$$

Здесь

$$a(p) = \begin{cases} p \frac{a_{\text{одн}}}{P}, & \text{если } p \leq P/2; \\ (p - P) \frac{a_{\text{одн}}}{P}, & \text{если } p > P/2. \end{cases}$$

От параметров sv и sa зависит смещение оценки скорости и ускорения. Для уменьшения смещения sv должно изменяться пропорционально отношению K/N , при этом sa должно изменяться пропорционально отношению P/N^2 . В частности, для типичной пачки ($N = 16$, $K = 32$, $P = 64$) оптимальными являются значения $sv = 3$, $sa = 3$.

Точность оценок ускорения и скорости по алгоритмам (16), (17) достаточно высока. На рис. 2, а показана зависимость смещения

Рис. 2. Точность оценки ускорения

оценки ускорения от истинного значения ускорения для типичной пачки. На рис. 2, б показаны зависимости СКО оценки ускорения от отношения сигнал/шум для предлагаемого алгоритма (красная линия) и оптимального алгоритма (голубая линия), график которого получен по формуле, приведенной в статье [9].

На рис. 3, а показаны зависимости смещения оценки скорости от истинного значения скорости. На рис. 3, б показана (красная линия) зависимость СКО оценки скорости от отношения сигнал/шум для типичной пачки. Там же штрихами (голубая линия) показана зависимость СКО оценки скорости от отношения сигнал/шум для оптимального алгоритма, полученной по формуле, приведенной в статье [9]. Зависимости СКО по скорости и ускорению от отношения сигнал/шум получены при случайных значениях скорости и ускорения, равномерно распределенных в диапазонах $0...8$ м/с и $-150...150$ м/с².

Как видно, алгоритмы (16) и (17) имеют относительно небольшое смещение оценок и уступают оптимальным алгоритмам только при малых отношениях сигнал/шум. Следует отметить, что благодаря большой длительности типичной пачки ($NT = 0,24$ с) достигается исключительно высокая точность оценки скорости. Однако без устранения неоднозначности эту оценку скорости невозможно использовать для траекторной обработки. Для устранения неоднозначности необходимо еще как минимум одно зондирование цели такой же пачкой импульсов, но с другим периодом повторения.

Несомненный практический интерес представляет зависимость выигрыша в пороговом сигнале КН пачки импульсов по сравнению с одноимпульсной процедурой обнаружения от количества импульсов в пачке. Такая зависимость представлена на рис. 4 при вероятности ложной тревоги, равной 10^{-4} ,

Рис. 3. Точность оценки скорости

Рис. 4. Выигрыш в пороговом сигнале при накоплении пачки импульсов по сравнению с одноимпульсным обнаружением:

1 – одноканальный КН; 2 – $2N$ -канальный КН; 3 – $2NPm$ -канальный КН; 4 – НКН

для пачки импульсов с периодом повторения $T = 15$ мс, отраженной от нефлюктуирующей цели, без учета снижения когерентности пачки из-за случайных изменений условий распространения радиоволн. Линия 1 соответствует одноканальному КН, когда скорость и ускорение цели произвольны, но априорно известны. Линия 2 соответствует $2N$ -канальному КН, когда скорость неизвестна и равномерно распределена на интервале однозначности $0 \dots 8$ м/с, а ускорение известно. Линия 3 соответствует $2NPm$ -канальному КН, когда скорость неизвестна и равномерно распределена на интервале однозначности $0 \dots 8$ м/с, ускорение неизвестно и равномерно распределено на интервале от $-8 \dots 77$ м/с². Линия 4 для некогерентного накопителя (НКН) построена при тех же условиях, что и линия 3.

Наибольший выигрыш обеспечивает одноканальный КН, поскольку только он, строго говоря, является согласованным фильтром для пачки сигналов. Любое отклонение от согласованной фильтрации приводит к потерям в пороговом сигнале, поэтому многоканальные системы согласованных фильтров, которые приходится применять в условиях априорной неопределенности, неизбежно вносят потери, величина которых зависит от числа независимых каналов.

При заданных условиях многоканальные КН при увеличении числа импульсов все больше проигрывают одноканальному КН в пороговом сигнале, но при этом остаются более эффективными, чем НКН (см. рис. 4).

Решение второй задачи

Ранее было показано, что для типичной пачки из 16 импульсов $Pm = 13$, а общее число фильтров многоканального КН составило $2NPm = 416$. Практическая реализация 416-канального КН на современных вычислительных средствах возможна. Однако при этом согласованный фильтр одиночного немодулированного импульса длительностью $\tau = 1$ мс, предшествующий КН, также должен быть многоканальным по скорости. Ширина спектра импульса длительностью τ равна $W \approx 1/\tau$, диапазон изменения доплеровской частоты цели $\Delta f = 2V_{\max}/\lambda - 2V_{\min}/\lambda$. Тогда при $V_{\max} = 11$ км/с и $V_{\min} = -11$ км/с получим минимальное количество каналов системы согласованных фильтров:

$$I_{\min} = \frac{\Delta f}{W} = \frac{2\tau(V_{\max} - V_{\min})}{\lambda} = 183. \quad (18)$$

Алгоритм многоканальной согласованной фильтрации одиночного немодулированного импульса можно выразить следующей формулой:

$$M(i, d) = \sum_{x=0}^{B-1} D(x+d) \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi}{I_{\min}} \right) xi \right\}, \quad (19)$$

где $M(i, d)$ – комплексная огибающая выходного сигнала;

i – номер отсчета по скорости (номер канала системы согласованных фильтров одиночного немодулированного импульса);

$$i = 0 \dots I_{\min} - 1;$$

$D(d)$ – комплексная огибающая входного сигнала;

B – число отсчетов, приходящихся на интервал времени, равный длительности зондирующего импульса τ ;

$$B = \lceil \tau f_s \rceil;$$

τ – длительность зондирующего импульса;

$$f_s \text{ – частота дискретизации сигнала;}$$

$$f_s \geq \Delta f.$$

Система согласованных фильтров, задаваемая выражением (19), состоит из $I_{\min}$ фильтров с шириной полосы пропускания, равной $1/\tau$, причем центральные частоты соседних фильтров разнесены на $f_s / I_{\min}$. Такая система позволяет обнаруживать и однозначно измерять скорость цели в диапазоне $V_{\min} \dots V_{\max}$.

На выходе каждого из 183 каналов системы согласованных фильтров одиночного импульса должно осуществляться 416-канальное КН. Общее число каналов $183 \cdot 416 = 76\,128$ получается довольно большим для практической реализации. Известны упрощенные алгоритмы накопления, например [13], уменьшающие вычислительные затраты, но они вносят потери в пороговом сигнале. По этой причине при реализации многоканальной по скорости и ускорению согласованного фильтра пачки немодулированных импульсов актуальной задачей является уменьшение вычислительных затрат без потерь в пороговом сигнале.

Для решения этой задачи, во-первых, при реализации системы согласованных фильтров одиночного импульса (19) применим «скачущее» БПФ [14]. Размер БПФ (число скоростных каналов) примем равным $I_{\text{БПФ}} = 256$, что больше $I_{\text{мин}}$.

Во-вторых, на выходе каждого из 256 каналов системы согласованных фильтров одиночного импульса (рис. 5) сначала проведем некогерентное накопление, которое не требует больших вычислительных затрат, в соответствии с формулой

$$S_n(i, d) = \sum_{n=1}^N |\dot{M}(i, n, d)|, \quad (20)$$

где $S_n(i, d)$ – выходной сигнал НКН;

$$i = 0, 1, \dots, I_{\text{БПФ}};$$

$\dot{M}(i, n, d)$ – выходной сигнал системы согласованных фильтров одиночного импульса.

Все выходные сигналы системы согласованных фильтров одиночных импульсов $\dot{M}(i, n, d)$ поступают в запоминающее устройство одновременно и хранятся там до завершения некогерентного накопления и обнаружения сигналов. Пороговое обнаружение сигнала проводится во всех 256 каналах путем сравнения сигнала с выхода НКН $S_n(i, d)$ с пороговым уровнем $\sigma_n q_1$ (где σ_n – уровень шума на выходе НКН; q_1 – относительный порог для НКН).

Если $S_n(i, d) > \sigma_n q_1$, то $Q(i, d) = 1$. В противном случае $Q(i, d) = 0$. Булев массив $Q(i, d)$ используется для считывания информации с запоминающего устройства. Отметим, что на КН поступают только те элементы массива $\dot{M}(i, n, d)$, для которых $Q(i, d) = 1$, иными словами, те элементы массива, в которых обнаружен сигнал. Количество таких элементов намного меньше общего числа элементов массива $Q(i, d)$, поэтому вычислительные затраты на КН значительно сокращаются.

Общее число элементов массива $Q(i, d)$ не может быть меньше

$$Z_{\text{мин}} = I_{\text{мин}}(T - \tau) / \tau,$$

Рис. 5. Система многоканальной согласованной фильтрации и обнаружения пачки немодулированных импульсов; ЗУ – запоминающее устройство

где $I_{\min}$ определяется согласно (18);

$T - \tau$ – размер обрабатываемой дистанции по времени.

Для типичной пачки $I_{\min} = 183$, $T = 15$ мс, $\tau = 1$ мс. Тогда $Z_{\min} = 2562$. Предположим, что на выходах системы согласованных импульсов после некогерентного накопления обнаружены 10 целей, каждая из которых занимает по два элемента в массиве $Q(i, d)$. Тогда КН необходимо выполнить только 20 раз, а в отсутствие предварительного некогерентного накопления пришлось бы его выполнять 2562 раза. Следовательно, вычислительные затраты сократятся более чем на два порядка. Вычислительные затраты на НКН, который является одноканальным сумматором действительных чисел, и на пороговый обнаружитель здесь не учитываются, поскольку они относительно невелики.

Далее, согласно формуле (12), осуществляется когерентное накопление и проводится пороговое обнаружение сигнала путем сравнения $|\dot{S}(k, p, d)|$ с пороговым уровнем $\sigma_k q_2$ (где σ_k – уровень шума на выходе КН; q_2 – относительный порог для КН). При этом должно быть выполнено условие

$$q_1 \leq q_2 - \Delta q, \quad (21)$$

где Δq – величина выигрыша в пороговом сигнале КН по сравнению с НКН, которая определяется как разность между линиями 3 и 4 (см. рис. 4) при соответствующем числе импульсов.

В формуле (21) все величины выражены в децибелах. Для 16-импульсной пачки $\Delta q \approx 1,5$ дБ. Условие (21) обеспечивает равенство пороговых сигналов НКН и КН. Вероятность ложной тревоги на пороге $\sigma_n q_1$ будет на порядок выше, чем на пороге $\sigma_k q_2$. Это не скажется на выходном потоке ложных тревог системы, поскольку он зависит от более высокого порога $\sigma_k q_2$. Однако при уменьшении порога $\sigma_n q_1$ количество элементов, в которых необходимо проводить КН, будет расти, что приведет к снижению вычислительной эффективности системы. По этой причине применение системы КН, изображенной на рис. 5, целесообразно, когда Δq не превышает 2...2,5 дБ, что выполняется при относительно небольшом числе накапливаемых импульсов (до 50...70).

При превышении порога $\sigma_k q_2$ проводится оценка параметров цели: дальности – по номеру отсчета d ; однозначной скорости – по номеру канала системы согласованных фильтров одиночного импульса i ; ускорения – согласно формуле (16); неоднозначной скорости – согласно выражению (17).

При обработке типичной пачки из 16 импульсов с периодом повторения $T = 15$ мс и длительностью одиночного импульса 1 мс получим разрешающую способность по дальности – 150 км, по однозначной скорости – 114 м/с, по ускорению – 14,6 м/с², по неоднозначной скорости – 0,5 м/с. Этого вполне достаточно для последующего захвата цели на сопровождение.

Заключение

В данной статье определены параметры КН пачки импульсов, многоканальной по скорости и ускорению. Показано, что при параметре $L = (N + 1) / 2$ функция неопределенности пачки импульсов на плоскости скорость – ускорение имеет «кнопочный» вид, что подтверждает возможность независимой оценки радиальной скорости и радиального ускорения цели. Предложены алгоритмы оценки скорости и ускорения методом кубического среднего взвешивания, обладающие приемлемой точностью и достаточно простые для практической реализации.

Предложена система многоканальной согласованной фильтрации пачки немодулированных импульсов с предварительным некогерентным накоплением, не вносящая потерь в пороговом сигнале и значительно уменьшающая вычислительные затраты при числе импульсов, не превышающем несколько десятков.

Список литературы

1. Вопросы перспективной радиолокации / Б. В. Бункин, А. Б. Борзов, В. Б. Сучков и др.; под ред. А. В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003. 512 с.
2. Черных М. М., Васильев О. В. Экспериментальная оценка когерентности отраженного от воздушной цели радиолокационного сигнала // Радиотехника. 1999. № 2. С. 75–78.
3. Аганин А. Г., Замараев В. В., Васильев О. В. Способ измерения когерентности сигналов // Радиотехника. 2003. № 6. С. 50–57.

4. *Kibbler G. O. T. H.* A radar pulse train optimum processor for accelerating targets // *IEEE Transactions*. 1967. September AES 3. No. 5. Pp. 808–818.
5. *Чепкасов А. В.* Определение интервалов когерентного накопления пачки длинных импульсов при обнаружении высокоскоростной цели радиолокационной станцией с АФАР на твердотельных приборах // *Радиопромышленность*. 2016. № 1. С. 14–17.
6. Обработка сигналов в многоканальных РЛС / *А. П. Лукошкин, С. С. Каринский, А. А. Шаталов и др.*; под ред. *А. П. Лукошкина*. М.: Радио и связь, 1983. 328 с.
7. *Кузьменков В. Ю., Логинов В. М.* Способы и устройства совместного измерения радиальной скорости и радиального ускорения // *Радиотехника и электроника*. 1997. Т. 42. № 12. С. 1465–1475.
8. *Маркович И. И., Завтур Е. Е.* Методы цифровой обработки сигналов, отраженных от высокоманевренных воздушных целей // *Вестник воздушно-космической обороны*. 2016. Вып. 3 (11). С. 17–23.
9. *Kelly E. J.* The radar measurement of range, velocity and acceleration // *IRE Transactions*. 1961. April MIL-5. No. 2. Pp. 51–57.
10. *Архипов М. Ю., Николаев А. П.* Алгоритмы накопления радиолокационных сигналов, отраженных от высокоскоростной цели // *Антенны*. 2013. № 1. С. 057–061.
11. *Финкельштейн М. И.* Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
12. *Ширман Я. Д., Манжос В. Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981. 416 с.
13. *Латушкин В. В.* Оценка эффективности накопления произведений импульсов когерентной пачки сигналов // *Радиотехника и электроника*. 1984. Т. 29. № 9. С. 1832–1833.
14. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978. 848 с.

Поступила 22.04.18

Порсев Валерий Иосифович – доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.
Область научных интересов: радиолокация, математическое и имитационное моделирование.

Николаев Анатолий Порфирьевич – главный специалист Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Кривоножко Иван Сергеевич – инженер первой категории Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», г. Москва.
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Multi-channel integration of radiolocation signals reflected from accelerating high-speed targets

The paper determines the parameters of a coherent pulse-burst integrator with multi-channel capabilities in terms of velocity and acceleration. We indicate the singularities of the pulse burst ambiguity function in the velocity-acceleration plane. We present algorithms for estimating velocity and acceleration. We propose a system for multi-channel matched filtering of an unmodulated coherent pulse burst with preliminary non-coherent integration, using which significantly reduces computational expenses. We determine the conditions that lead to the system exhibiting no threshold signal loss.

Keywords: multi-channel coherent integration, matched filter, pulse burst, high-speed target, radial velocity estimation, radial acceleration estimation, non-coherent integration.

Porsev Valeriy Iosifovich – Doctor of Engineering Sciences, Deputy General Director in Research Work, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.
Science research interests: radiolocation, mathematical and physical simulation.

Nikolaev Anatoliy Porfirevich – Chief Specialist, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.
Science research interests: radiolocation, digital signal processing.

Krivosozhko Ivan Sergeevich – Engineer of the first rank, Joint stock company “All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering”, Moscow.
Science research interests: radiolocation, digital signal processing