

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 621.396.96

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИЗМЕРЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ЦЕЛЕЙ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ РЛС

Василенко С.И.*, Кудряшов М.Ю.**, Прокофьев А.В.*

*Закрытое акционерное общество Научно-исследовательский центр «Резонанс»,
г. Москва

**Тверской государственный университет, г. Тверь

Поступила в редакцию 15.04.2021, после переработки 24.11.2021.

В работе предложен алгоритм обнаружения и однозначного измерения радиальной скорости воздушных объектов (ВО), летящих с абсолютной скоростью, превышающей скорость звука в несколько раз (гиперзвуковых целей). Область применения алгоритма – импульсно-доплеровские РЛС с линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) зондирующим сигналом (ЗС). Приведено описание, обоснование использования и результаты моделирования обработки пачки принятых радиоимпульсов разработанным алгоритмом на модели современной импульсно-доплеровской РЛС.

Ключевые слова: радиолокационные сигналы, линейно-частотная модуляция, радиальная скорость цели, когерентная обработка сигналов, измерение координат.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2021. № 4. С. 14–28.
<https://doi.org/10.26456/vtprmk627>

Введение

В работе рассматриваются проблемы обнаружения и измерения координат, в частности, радиальной скорости, в современных импульсно-доплеровских РЛС, использующих в качестве зондирующих сигналов (ЗС) последовательность одинаковых импульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с постоянным периодом повторения и допускающих когерентное накопление (КН) пачки принимаемых радиоимпульсов [3]. За счет КН в таких РЛС, помимо дальности, азимута и угла места появляется возможность измерения радиальной скорости воздушных объектов (ВО).

© Василенко С.И., Кудряшов М.Ю., Прокофьев А.В., 2021

Максимальная однозначно определяемая радиальная скорость в таких РЛС зависит от периода повторения импульсов T и длины волны λ [2]:

$$v_{r \max} = \frac{\lambda}{4T}. \quad (1)$$

Это означает, что однозначно определяемая радиальная скорость ВО принадлежит интервалу $[-v_{r \max}, v_{r \max}]$ и для целей с радиальной скоростью v_r вне указанного интервала будет получено ошибочное измерение радиальной скорости v_r^{kn} :

$$\begin{aligned} \overline{v_r} &= v_r \pmod{(2v_{r \max})}, \\ v_r^{kn} &= \begin{cases} \overline{v_r}, & \overline{v_r} \leq v_{r \max}, \\ \overline{v_r} - 2v_{r \max}, & \overline{v_r} > v_{r \max}. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Помимо этого на возможность измерения радиальных скоростей высокоскоростных ВО влияет время накопления когерентной пачки принимаемых радиоимпульсов T_{kn} , которое определяется по формуле [3]:

$$T_{kn} = NT, \quad (3)$$

где N – количество принимаемых радиоимпульсов в пачке.

Несложно определить радиальную скорость ВО, при которой за время T_{kn} цель успеет вылететь за размер элемента дальности Δr в формируемой дальностно-частотной матрице когерентно накопленных сигналов. Для этого достаточно знать используемую при цифровом формировании квадратурных составляющих принимаемого радиоимпульса частоту дискретизации F_d :

$$\Delta r = \frac{c}{2F_d}, \quad (4)$$

где c – скорость света.

Следовательно, ВО с радиальной скоростью $|v_r| > k\Delta r/T_{kn}$ м/с за время T_{kn} успеет переместиться на k элементов дальности, что приводит к потерям при обнаружении как при КН, так и при НН [6].

Кроме того, маневрирование цели, а также ее перемещение с большими абсолютными скоростями под углом относительно направления на или от РЛС приводит к существенному изменению радиальной скорости цели за время T_{kn} [1], что приводит к ее не обнаружению при КН пачки принятых сжатых радиоимпульсов из-за уширения главного лепестка автокорреляционной функции по скорости.

В силу вышеперечисленных особенностей обработки пачки принятых радиоимпульсов в импульсно-доплеровских РЛС современные средства воздушного нападения, которые могут перемещаться с гиперзвуковыми скоростями, обнаруживаться не будут.

В этой связи проблема обнаружения высокоскоростных ВО является актуальной задачей. В работе предложен алгоритм обработки пачки принимаемых радиоимпульсов, позволяющий обнаруживать и измерять радиальную скорость гиперзвуковых ВО.

В первом разделе изложены особенности обработки пачки принимаемых радиоимпульсов в импульсно-доплеровских РЛС. Во втором разделе приведено описание предлагаемого алгоритма. В третьем разделе изложены основные результаты, полученные в результате моделирования.

1. Обработка пачки принимаемых радиоимпульсов

В современных импульсно-доплеровских РЛС, как правило, на начальных этапах осуществляется как внутрипериодная, так и межпериодная обработка принимаемых радиоимпульсов [6].

Внутрипериодная обработка заключается в цифровом формировании квадратурных составляющих (ЦФКС) принимаемых радиоимпульсов и их согласованной фильтрации (сжатии) (СФ).

Межпериодная обработка состоит из формирования пачки сжатых радиоимпульсов

$$\vec{S} = \{s_i(n)\}^T, \quad (5)$$

где $s_i(n)$ – i -й принятый сжатый радиоимпульс, $i = 0, \dots, N - 1$; N – количество принятых сжатых радиоимпульсов в пачке; $n = 0, \dots, M - 1$; M – количество отсчетов (элементов дальности) в принятом сжатом радиоимпульсе.

Далее выполняется как когерентное, так и некогерентное накопление сформированной пачки, вычисление модуля комплексного сигнала (ВМ) и пороговая обработка (ПО) (Рис. 1).

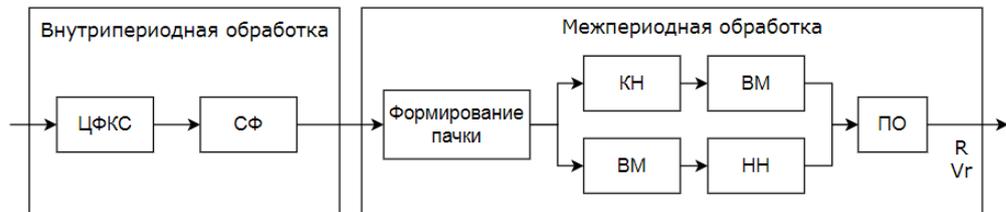


Рис. 1: Структурная схема обработки

Результатом КН является двумерная функция неопределенности (Рис. 2). Аргументы обнаруженных максимумов функции неопределенности, прошедших пороговую обработку (ПО) определяют дальность R^{kn} и радиальную скорость v_r^{kn} цели.

В силу отмеченных во введении причин такая схема обработки пачки сжатых принятых радиоимпульсов в современных импульсно-доплеровских РЛС не позволяет обнаруживать гиперзвуковые цели.

Для решения данной задачи предложен алгоритм, который применяется на этапе межпериодной обработки сразу после формирования пачки сжатых принятых радиоимпульсов (Рис. 1).

В следующем разделе приведено описание алгоритма. В целях иллюстрации особенностей работы алгоритма для расчетов и описания шагов алгоритма использованы параметры современной РЛС [5].

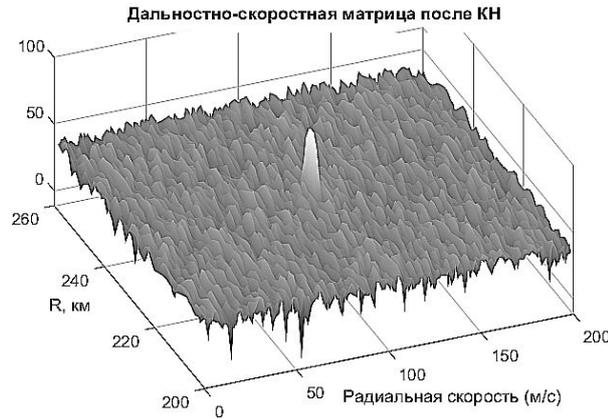


Рис. 2: Дально-скоростная матрица после КН и вычисления модуля

2. Алгоритм обнаружения и измерения радиальной скорости гиперзвуковых ВО

2.1 Формирование пакета модифицированных пачек

Предлагается из исходной пачки принятых сжатых радиоимпульсов \vec{S} (5) сформировать набор модифицированных пачек.

Модифицированная пачка адаптирована для накопления принятых сжатых радиоимпульсов, отраженных от ВО, летящих в определенном интервале радиальных скоростей. С учетом того, что заранее неизвестно удаляется ВО от РЛС или приближается, формирование модифицированной пачки будет отличаться.

Модифицированные пачки, созданные в предположении, что ВО удаляется от РЛС ($v_r > 0$) представляет собой один набор, который будем называть пакетом пачек Π^+ . Модифицированные пачки, созданные в предположении, что ВО, наоборот, приближается к РЛС ($v_r < 0$) представляют собой содержимое второго пакета пачек Π^- .

Модифицированная пачка получается из исходной посредством разбиения на P подпачек, состоящих из $Q = \lfloor \frac{N}{P} \rfloor$ принятых сжатых радиоимпульсов. При этом, сжатые радиоимпульсы в подпачке $k, k = 1, \dots, P$ сдвинуты на $k - 1$ элементов дальности (отсчетов).

Для пачек пакета Π^+ сдвиг осуществляется в сторону уменьшения дальности с тем, чтобы компенсировать удаление ВО за время накопления подпачки (Рис. 3).

Для пачек пакета Π^- сдвиг осуществляется в сторону увеличения дальности с тем, чтобы компенсировать приближение ВО за время накопления подпачки (Рис. 4).

Приведенные на рисунках значения радиальных скоростей получены по параметрам [5]. Так, цель с $v_r = 460$ м/с успевает переместиться на один элемент дальности $\Delta r = 1200$ м за период накопления $T_{kn} = 2.61$ с.

Формирование p -ой модифицированной пачки из пакета Π^+ выполняется в соответствии со следующей формулой:

$$\vec{A}_p = \{a_j^k(n)\}, \quad (6)$$

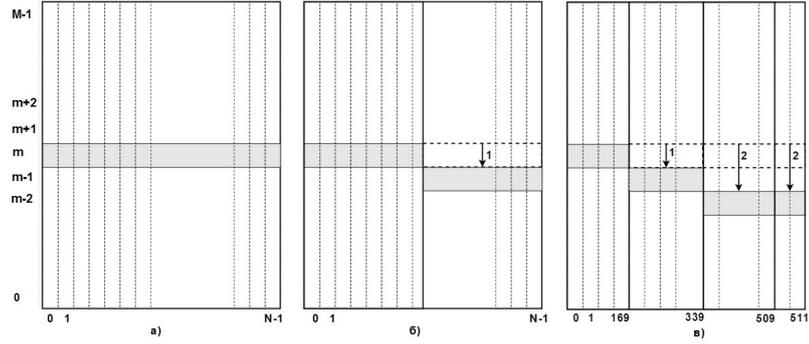


Рис. 3: Формирование пакета Π^+ из L модифицированных пачек ($L = 3$) в предположении, что $v_r > 0$: а) $v_r = 460$ м/с; б) $v_r = 920$ м/с; в) $v_r = 1380$ м/с

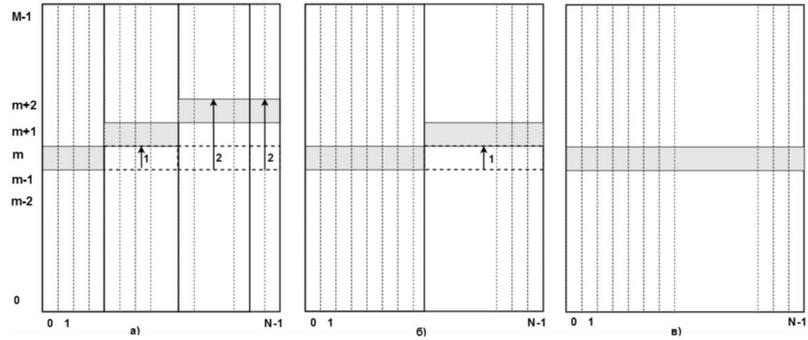


Рис. 4: Формирование пакета Π^- из L модифицированных пачек ($L = 3$) в предположении, что $v_r < 0$: а) $v_r = -1380$ м/с; б) $v_r = -920$ м/с; в) $v_r = -460$ м/с

где $k = \overline{1, P}$ – количество подпачек в модифицированной пачке.

Подпачки в (6) формируются из пачки (5) по формуле:

$$\alpha_j^k(n) = s_i(n - k + 1), \quad (7)$$

где $i = (k - 1)Q, \dots, kQ - 1$ – индексы принятых сжатых радиоимпульсов в k -ой подпачке; $n = 0, \dots, M - 1$ – элементы дальности (отсчеты) в принятом сжатом радиоимпульсе.

Так как количество подпачек не всегда кратно размеру пачки N , то не попавшие в последнюю полную подпачку сжатые радиоимпульсы добавляются в эту подпачку с тем же сдвигом, который использовался для формирования последней p -ой подпачки:

$$\alpha_i^p(n) = s_i(n - p + 1), i = \overline{pQ, (N - 1)}. \quad (8)$$

Формирование p -ой модифицированной пачки из Π^- выполняется в соответствии с формулой:

$$\vec{B}_p = \{\beta_j^k(n)\}, \quad (9)$$

где $k = \overline{1, P}$ – количество подпачек в модифицированной пачке.

Подпачки в (9) формируются из пачки (5) по формуле:

$$\beta_j^k(n) = s_i(n + k - 1). \quad (10)$$

В формуле (10) значения индексов такие же, как и в формуле (7).

Аналог формулы (8) для данного случая:

$$\beta_j^p(n) = s_i(n + p - 1), i = \overline{pQ, (N-1)}. \quad (11)$$

Так, например, третья модифицированная пачка (\vec{A}_3) в пакете Π^+ на Рис. 3 в) содержит три полных подпачки $\alpha_j^1(n)$, $\alpha_j^2(n)$ и $\alpha_j^3(n)$, состоящие из $Q = \lfloor N/3 \rfloor = \lfloor 512/3 \rfloor = 170$ принятых сжатых радиоимпульсов. При этом, третья подпачка $\alpha_j^3(n)$ дополнена двумя сжатыми радиоимпульсами:

$$\begin{aligned} \alpha_i^1(n) &= s_i(n), i = \overline{0, 169}, \\ \alpha_i^2(n) &= s_i(n - 1), i = \overline{170, 339}, \\ \alpha_i^3(n) &= s_i(n - 2), i = \overline{340, 512}. \end{aligned}$$

Т.е. первая подпачка сформирована из радиоимпульсов исходной пачки без каких-либо сдвигов. Вторая подпачка получена в результате сдвига указанных сжатых радиоимпульсов исходной пачки на 1 элемент дальности, третья пачка сформирована в результате сдвига указанных сжатых радиоимпульсов исходной пачки на 2 элемента дальности.

Исходя из данного способа построения, модифицированной пачке p из Π^+ будет соответствовать положительная радиальная скорость:

$$v_r^+ = \frac{\Delta r p}{T_{kn}}. \quad (12)$$

Модифицированной пачке с тем же номером из Π^- будет соответствовать отрицательная радиальная скорость:

$$v_r^- = -\frac{\Delta r p}{T_{kn}}. \quad (13)$$

Для рассматриваемого примера модифицированным пачкам на Рис. 3 а), б) и в) в соответствии с (12) поставлены значения радиальных скоростей: 460 м/с, 920 м/с и 1380 м/с.

В соответствии с (13) модифицированным пачкам из второго пакета на Рис. 4 а), б) и в) поставлены отрицательные значения радиальных скоростей: -1380 м/с, -920 м/с и -460 м/с.

Формулы (12) и (13) позволяют оценить количество модифицированных пачек в пакетах, достаточное для определения требуемого значения радиальной скорости. Т.е. для определения радиальной скорости цели из диапазона $[-5000, 5000]$ м/с достаточно построить два пакета, состоящих из 10 модифицированных пачек.

2.2 Алгоритм обнаружения и измерения радиальной скорости

Суть алгоритма заключается в том, что по исходной пачке принятых сжатых радиоимпульсов формируется пакет модифицированных пачек. Размер пакета определяется диапазоном измеряемых радиальных скоростей. Каждой пачке

ставится в соответствие значение радиальной скорости, определяемое способом формирования модифицированной пачки.

Для каждой модифицированной пачки в результате ее НН определяется уровень амплитуды главного лепестка. В результате получается зависимость уровня амплитуд каждой модифицированной пачки после ее НН от значения радиальной скорости, соотнесенной с каждой модифицированной пачкой. При этом максимальный уровень амплитуды в результате НН будет у модифицированной пачки, способ формирования которой наилучшим образом соответствует текущему значению радиальной скорости ВО, что дает возможность обнаружить ВО (т.к. более вероятно, что максимальный уровень превысит значение порога).

Далее ищется модифицированная пачка с максимальным значением уровня амплитуды. По найденной пачке определяется соотнесенное с ней значение радиальной скорости, которое уточняется посредством квадратичной интерполяции с использованием значений амплитуд двух соседних к найденной пачкам.

Если в результате КН найденной модифицированной пачки получены значения, больше установленного порога, то эти значения используются для уточнения измеренного значения радиальной скорости. Следует отметить, что процедура уточнения возможна лишь в ситуации, когда радиальная скорость цели за время T_{kn} изменяется незначительно.

Последовательность шагов выполнения алгоритма можно представить следующим образом:

1. На основе пачки принятых сжатых радиоимпульсов (5) формируются два пакета $\Pi^+ = \{\vec{A}_1, \dots, \vec{A}_L\}$ и $\Pi^- = \{\vec{B}_1, \dots, \vec{B}_L\}$ по L элементов (модифицированных пачек, сформированных согласно (6) и (9)) в каждом.

2. Для каждой модифицированной пачки \vec{A}_l и $\vec{B}_l, l = 1, \dots, L$ выполняется НН сжатых радиоимпульсов.

3. Для каждой функции НН элементов Π^+ и Π^- ищутся максимумы и запоминаются пары $\Omega^+ = \{C_i^+, R_i^+\}_l$ и $\Omega^- = \{C_i^-, R_i^-\}_l$, где i - индекс найденного максимума, C_i^+ и C_i^- - амплитуды максимумов, R_i^+ и R_i^- - значения дальности найденных максимумов, l -номер элемента в пакете.

4. Из множества пар Ω^+ и Ω^- выделяется множество амплитуд $\{C_l^+\}$ и $\{C_l^-\}$ с одинаковой дальностью.

5. В множествах амплитуд $\{C_l^+\}$ и $\{C_l^-\}$ находятся максимальные значения и соответствующие индексы: $C_{max}^+ = \max\{C_l^+\}$, $l_{max}^+ = \operatorname{argmax}_l\{C_l^+\}$ и $C_{max}^- = \max\{C_l^-\}$, $l_{max}^- = \operatorname{argmax}_l\{C_l^-\}$.

6. На основании найденных амплитуд и индексов в соответствии с (12) и (13) определяется измеренное посредством НН значение радиальной скорости v_r^{nn} :

$$v_r^{nn} = \begin{cases} \frac{\Delta r l_{max}^+}{T_{kn}}, & C_{max}^+ > C_{max}^- \\ -\frac{\Delta r l_{max}^-}{T_{kn}}, & C_{max}^- > C_{max}^+ \end{cases} \quad (14)$$

7. Посредством интерполяции, например, квадратичной [4] находится интерполированное значение (14): \hat{v}_r^{nn} .

8. По модифицированной пачке $\vec{A}_{l_{max}^+}$ (если $C_{max}^+ > C_{max}^-$) или по модифицированной пачке $\vec{B}_{l_{max}^-}$ (если $C_{max}^- > C_{max}^+$) выполняется КН и для дальности, определенной на шаге 4 алгоритма вычисляется неоднозначное значение радиальной скорости ВО v_r^{kn} .

9. Выполняется уточнение значения \widehat{v}_r^{nn} с использованием найденного на предыдущем шаге неоднозначного значения радиальной скорости v_r^{kn} :

$$d_{max} = \begin{cases} \operatorname{argmin}_d \{ |\widehat{v}_r^{nn} - (V_r^{kn} + 2v_{r \max} d)| \}, & \widehat{v}_r^{nn} > 0, d = \overline{0, L}, \\ \operatorname{argmin}_d \{ |\widehat{v}_r^{nn} - (V_r^{kn} - 2v_{r \max} d)| \}, & \widehat{v}_r^{nn} < 0, d = \overline{0, L}, \end{cases} \quad (15)$$

$$\widehat{v}_r = \begin{cases} v_r^{kn} + 2v_{r \max} d_{max}, & \widehat{v}_r^{nn} > 0, \\ v_r^{kn} - 2v_{r \max} d_{max}, & \widehat{v}_r^{nn} < 0. \end{cases} \quad (16)$$

В общем случае, когда ВО движется с произвольным курсом относительно РЛС, алгоритм завершается на 7 шаге.

Предложенный алгоритм позволяет вычислять радиальные скорости целей, превышающие допустимый диапазон скоростей, но при этом требует в $2L$ раз больше памяти для хранения пакетов модифицированных пачек принятых сжатых радиоимпульсов, $2L$ операций некогерентного накопления импульсов для определения искомого элемента пакета, где L – уровень построения пакета, зависящий от максимальной вычисляемой скорости.

3. Результаты применения алгоритма

Ниже представлены результаты экспериментов с использованием разработанной имитационной модели, в которой был реализован предложенный алгоритм обнаружения и измерения радиальной скорости ВО (Таблица 1). За основу взята модель [5].

Параметры имитируемых принятых радиоимпульсов и условия проведения вычислительных экспериментов одинаковые, за исключением абсолютной скорости имитируемой цели и направления ее движения.

В Таблице 1 для каждого номера (N) эксперимента на начальный момент формирования пачки принятых радиоимпульсов указана дальность (R , км) до ВО относительно РЛС, курсовой угол на РЛС (Θ , град). Также в таблицу занесена абсолютная скорость (v , м/с) и среднее значение радиальной скорости (v_r , м/с) ВО за время накопления пачки. В оставшиеся столбцы таблицы записываются результаты измерений радиальной скорости ВО. В обстоятельствах, при которых применимо КН пачки принятых сжатых радиоимпульсов, в ячейки таблицы занесены результаты измерений v_r^{kn} (шаг 8 алгоритма) и \widehat{v}_r (шаг 9 алгоритма). Измеренное значение \widehat{v}_r^{nn} , полученное на 7-м шаге алгоритма, записывается в таблицу во всех случаях.

Таблица 1: Результаты вычислительных экспериментов

N	R , км	Θ°	v , м/с	v_r , м/с	v_r^{kn} , м/с	\widehat{v}_r^{nn} , м/с	\widehat{v}_r , м/с
1	200	0	3700	-3700	221.47	-3724.52	-3700.1
2	200	180	4300	4300	-111.89	4440.53	4299.88
3	456	13	3100	-3017.2	-73.14	-3143.32	-3014.32

В эксперименте №1 (Таблица 1) ВО перемещается с дальности 200 км по направлению на РЛС $\Theta = 0$ гр. с абсолютной скоростью 3700 м/с. Иллюстрация

работы алгоритма показана на Рис. 5 а), где приведена зависимость максимумов функций НН $\{C_l^-\}$ принятых сжатых радиоимпульсов в модифицированных пачках из пакета Π^- от индекса модифицированной пачки l этого пакета. Видно, что максимальное значение достигается при НН восьмой ($l_{max}^- = 8$) модифицированной пачки пакета Π^- .

На Рис. 5 б) приведена аналогичная зависимость, с той лишь разницей, что она получена в результате обработки модифицированных пачек пакета Π^+ . Видно, что максимальное значение достигается при НН первой ($l_{max}^+ = 1$) модифицированной пачки пакета Π^+ .

Исходя из того, что $C_8^- > C_1^+$, в соответствии с шагом 6 алгоритма, по формуле (14) вычисляется значение $v_r^{nn} = -3683.67$ м/с.

Для уточнения найденного значения с помощью квадратичной интерполяции (шаг 7 алгоритма) дополнительно используются соседние амплитуды C_7^- и C_9^- . В результате получается значение $\hat{v}_r^{nn} = -3724.52$ м/с.

В соответствии с шагом 8 выбирается модифицированная пачка \vec{B}_8 и в результате ее КН находится значение $v_r^{kn} = 221.47$ м/с.

Далее, как описано на 9 шаге алгоритма, по формулам (15) и (16) уточняется измеренное значение \hat{v}_r^{nn} . В данном случае, уточненное измеренное значение $\hat{v}_r = -3700.1$ м/с практически совпадает со средней радиальной скоростью ВО ($v_r = -3700$ м/с) за время накопления пачки принятых радиоимпульсов.

На Рис. 6 приведена иллюстрация к эксперименту №2. В этом эксперименте ВО перемещается по направлению от РЛС ($\Theta = 180$ гр.) со скоростью 4300 м/с. Как показано на Рис. 6 б), здесь максимальное значение получено в результате НН десятой ($l_{max}^+ = 10$) модифицированной пачки из пакета Π^+ . Это определяет, что ВО перемещается с положительной радиальной скоростью, результаты измерения которой в соответствии с алгоритмом записаны в строке под №2 в Таблице 1.

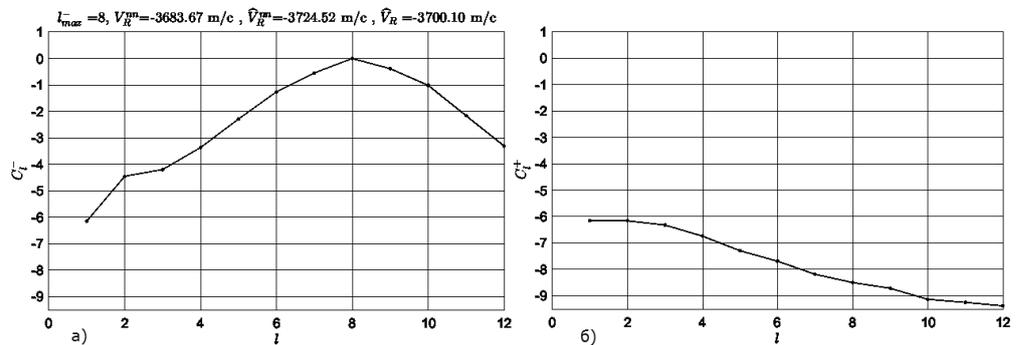


Рис. 5: Эксперимент №1. Графики зависимостей максимумов функций НН (дБ) от индекса пачки принятых радиоимпульсов в пакете

На Рис. 7 приведены результаты измерения радиальной скорости ВО при его приближении к РЛС по траектории, показанной на Рис. 7 а) ($\Theta = 0$ гр.). На этом рисунке толстой линией показано перемещение ВО за время накопления пачки. Параметры соответствуют эксперименту №1 за исключением дальности.

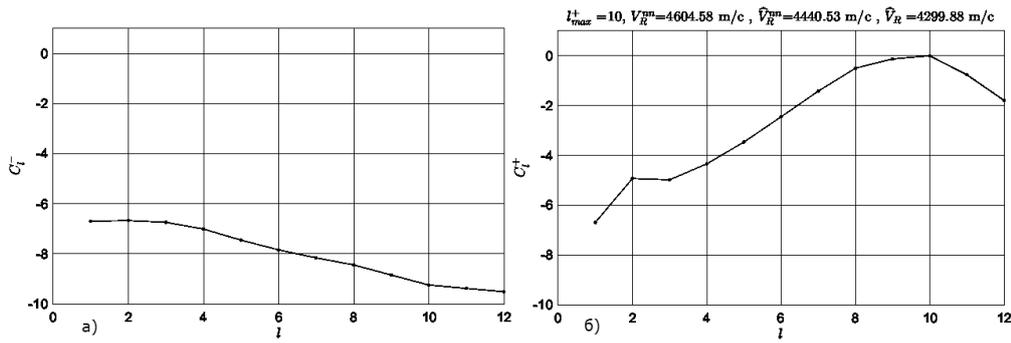


Рис. 6: Эксперимент №2. Графики зависимостей максимумов функций НН (дБ) от индекса пачки принятых радиопульсов в пакете

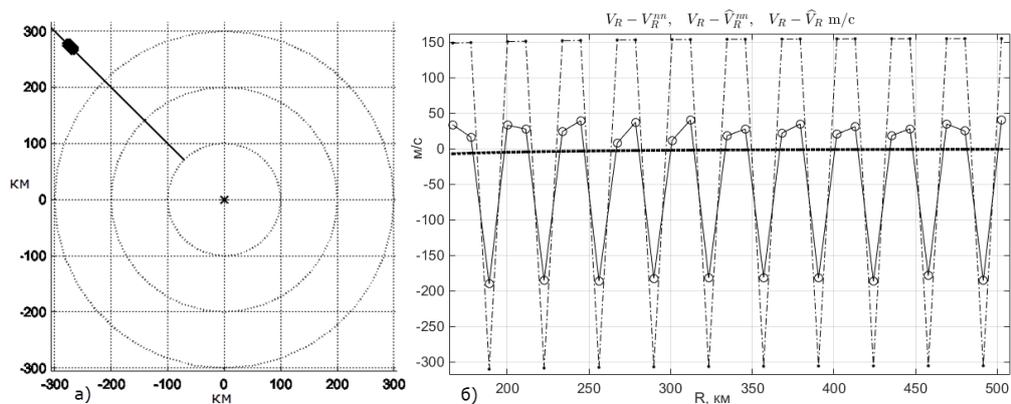


Рис. 7: Эксперимент №1 (продолжение)

На Рис. 7 б) показаны отклонения измеренных значений радиальных скоростей от среднего значения за время формирования пачки. Приведены три линии: линия с маркером в виде точки, которой соответствует отклонение найденного на шаге 6 алгоритма измерения радиальной скорости ($v_r - v_r^{nn}$); линия с выколотым маркером, которой соответствует отклонение найденного на шаге 7 алгоритма измерения радиальной скорости ($v_r - \hat{v}_r^{nn}$); жирная пунктирная линия, которой соответствует отклонение измерения радиальной скорости, полученного на шаге 9 алгоритма ($v_r - \hat{v}_r$).

Приведенные результаты иллюстрируют тот факт, что значение v_r^{nn} , полученное по формуле (14), может иметь ошибку до 460 м/с (следует из способа формирования модифицированных пачек). Интерполированное значение \hat{v}_r^{nn} позволяет уменьшить ошибку измерений до двух раз. Уточненное посредством КН значение \hat{v}_r показывает наименьшее отклонение.

На Рис. 8 приведены результаты обнаружения и измерения ВО, приближа-

ющегося с абсолютной скоростью $v = 3100$ м/с с параметром относительно РЛС (Рис. 8 а)). На Рис. 8 б) показано как изменяется радиальная скорость ВО (сплошная линия) от угла Θ при движении ВО. Линией с маркерами в виде точки показаны результаты измерений \hat{v}_r^{nn} , маркерами '*' показаны уточненные значения \hat{v}_r , полученные при использовании КН. Видно, что при отклонении большим, чем 20 градусов при данных скоростях КН перестает работать. Тем не менее, как следует из представленных результатов разработанный алгоритм позволяет обнаружить и измерить радиальную скорость ВО посредством использования НН.

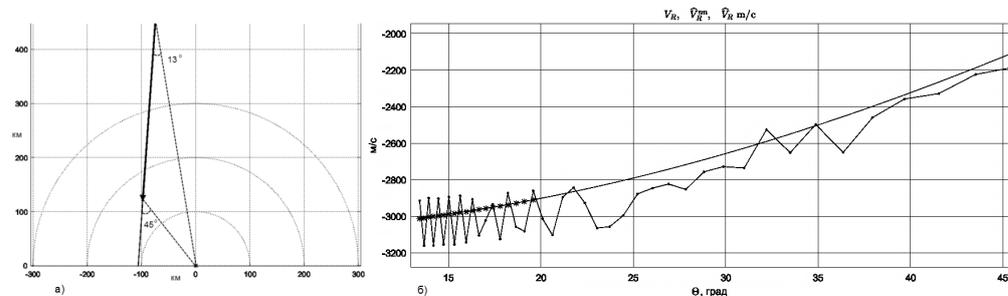


Рис. 8: Эксперимент №3

Заключение

В работе предложен алгоритм обнаружения и измерения радиальных скоростей ВО, перемещающихся с гиперзвуковыми скоростями. Классическая обработка посредством КН или НН пачки сжатых принятых радиоимпульсов не приводит к обнаружению таких целей в импульсно-доплеровских РЛС.

За счет предложенного в алгоритме подхода к обработке пачки применение НН позволяет обнаружить и измерить радиальную скорость гиперзвуковых ВО.

Использование КН не применимо в данной ситуации, поскольку за счет изменения радиальной скорости ВО за время пачки происходит уширение главного лепестка автокорреляционной функции по скорости.

При движении гиперзвукового ВО с небольшими курсовыми углами на РЛС его радиальная скорость за время пачки изменяется незначительно. В этой ситуации применение КН пачки может привести к возможному обнаружению ВО, однако измеренное значение радиальной скорости будет неоднозначным. Разработанный алгоритм позволяет в этой ситуации измерить радиальную скорость гиперзвуковых ВО однозначно с точностью измерения сопоставимой с точностью, которую обеспечивает импульсно-доплеровская РЛС при измерении малоскоростных целей.

Приведено описание и обоснование применения алгоритма в импульсно-доплеровских РЛС с достаточно большим временем накопления пачки и постоянным периодом излучения импульсов. В целях иллюстрации особенностей работы алгоритма для расчетов использованы параметры современной РЛС [5].

Эта же модель использовалась при проведении моделирования и получения вычислительных результатов. Полученные результаты подтверждают, что при-

менение алгоритма позволяет обнаружить и измерить радиальную скорость ВО перемещающихся с гиперзвуковыми скоростями.

Список литературы

- [1] Проскурин В.И., Ягольников С.В., Шевчук В.И. Радиолокационное наблюдение. Методы, модели, алгоритмы. М.: Радиотехника, 2017. 368 с.
- [2] Попов Д.И. Измерение радиальной скорости цели // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2015. № 1. С. 53–59.
- [3] Сколник М.И. (ред.) Справочник по радиолокации. Т. 1. М.: Техносфера, 2015. 627 с.
- [4] Richards M.A. Fundamentals of Radar Signal Processing. Second Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 618 p.
- [5] Шустов Э.И., Новиков В.И., Щербинко А.В., Стучилин А.И. Радиолокационная станция кругового обзора “Резонанс”. Патент № 2624736 С2 РФ, МПК G01S 13/00. № 2015152359.
- [6] Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах. Монография. Ростов на Дону: Издательство Южного федерального университета, 2012. 236 с.
- [7] Николаев А.П., Кривоножко И.С., Собкина Н.Ю. Компенсация перемещения цели при длительном накоплении радиолокационных сигналов // Вестник Концерна ВКО “Алмаз – Антей”. 2018. № 3. С. 12–19.

Образец цитирования

Василенко С.И., Кудряшов М.Ю., Прокофьев А.В. Обнаружение и измерение радиальной скорости гиперзвуковых целей в импульсно-доплеровских РЛС // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2021. № 4. С. 14–28. <https://doi.org/10.26456/vtprm627>

Сведения об авторах

1. Василенко Станислав Иванович

научный сотрудник ЗАО НИЦ «Резонанс».

Россия, 107076, г. Москва, ул. 1-я Бухвостова, д. 12/11, к. 20.

E-mail: vasilenko.stanislav2017@yandex.ru

2. Кудряшов Максим Юрьевич

доцент кафедры информационных технологий Тверского государственного университета.

Россия, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, д. 33, ТвГУ. E-mail: mkvm@mail.ru

3. Прокофьев Александр Валерьевич
научный сотрудник ЗАО НИЦ «Резонанс».

*Россия, 107076, г. Москва, ул. 1-я Бухвостова, д. 12/11, к. 20. E-mail:
alexandr.prk@gmail.com*

DETECTION AND MEASUREMENT OF HYPERSONIC TARGET RADIAL VELOCITY IN PULSE DOPPLER RADAR

Vasilenko Stanislav Ivanovich

Researcher at ZAO SRC «Rezonans»

Russia, 107076, Moscow, 1st Buhvostova str., 12/11, building 20.

E-mail: vasilenko.stanislav2017@yandex.ru

Kudryashov Maksim Yuryevich

Associate Professor at Information Technologies department, Tver State University

Russia, 170100, Tver, 33 Zhelyabova str., TSU.

E-mail: mkvm@mail.ru

Prokof'ev Aleksandr Valer'evich

Researcher at ZAO SRC «Rezonans»

Russia, 107076, Moscow, 1st Buhvostova str., 12/11, building 20.

E-mail: alexandr.prk@gmail.com

Received 15.04.2021, revised 24.11.2021.

An algorithm for the detection and unambiguous measurement of the radial velocity of supersonic air objects is proposed. The scope of the algorithm is pulse-Doppler radars with a linear frequency modulation (LFM). The description, justification of the use and the results of modeling the processing of a packet of received radio pulses by the developed algorithm on a model of a modern pulse-Doppler radar are presented.

Keywords: radar signals, linear frequency modulation, target radial velocity, doppler process, measurement of coordinates.

Citation

Vasilenko S.I., Kudryashov M.Yu., Prokof'ev A.V., "Detection and measurement of hypersonic target radial velocity in pulse Doppler radar", *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2021, № 4, 14–28 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtprm627>

References

- [1] Proskurin V.I., Yagolnikov S.V., Shevchuk V.I., *Radiolokatsionnoe nablyudenie. Metody, modeli, algoritmy [Radar surveillance. Methods, models, algorithms]*, Radiotekhnika, M., 2017 (in Russian), 368 pp.
- [2] Popov D.I., "Measuring the radial velocity of the target", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2015, № 1, 53–59 (in Russian).
- [3] Skolnik M.I. (ed.), *Spravochnik po radiolokatsii [Radar Handbook]*. V. 1, Tekhnosfera, Moscow, 2015 (in Russian), 627 pp.

- [4] Richards M.A., *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Second Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2014, 618 pp.
- [5] Shustov E.I., Novikov V.I., Shcherbinko A.V., Stuchilin A.I., *Radiolokatsionnaya stantsiya krugovogo obzora "Rezonans"*, Patent № 2624736 C2 RF, МПК G01S 13/00. № 2015152359 (in Russian).
- [6] Markovich I.I., *Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustrojstvakh*, Monografiya, Izdatelstvo Yuzhnogo federalnogo universiteta, Rostov na Donu, 2012 (in Russian), 236 pp.
- [7] Nikolaev A.P., Krivonozhko I.S., Sobkina N.Yu., "Compensation of target movement during long-term accumulation of radar signals", *Vestnik Kontserna VKO "Almaz – Antej" [Bulletin of the Concern of East Kazakhstan Region "Almaz - Antey"]*, 2018, № 3, 12–19 (in Russian).