

УДК 621.396.96+621.391

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ И ОДНОЗНАЧНОЙ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ КОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ 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.** Предложены два варианта алгоритма совместного измерения дальности и однозначной радиальной скорости цели по отраженному сигналу (ОС) при наличии миграции по дальности и ее производным. Первый алгоритм предполагает использование пачки зондирующих сигналов с постоянным периодом повторения. После обнаружения цели одним из экономичных алгоритмов с оцениванием «грубой» скорости, ускорения и производной ускорения проводится повторная обработка ОС путем его разделения минимум на две подпачки с определением временного положения ОС на оси задержек для каждой подпачки, коррекцией влияния ускорения на смещение импульсов по оси задержки и аппроксимацией временного положения линейной зависимостью, коэффициенты которой пропорциональны начальной дальности и начальной радиальной скорости цели. Вторым алгоритмом предполагается использование двух подпачек зондирующих сигналов с близкими частотами периодами повторения. По каждой из подпачек оценивается неоднозначная радиальная скорость, корректируется радиальная скорость второй подпачки в соответствии с настройкой канала обнаружения по радиальному ускорению и решается задача устранения неоднозначности в многоканальной системе.

**Abstract.** Two variants of the algorithm for joint measurement of the range and unambiguous radial velocity of the target based on the reflected signal (RS) in the presence of migration along the range and its derivatives are proposed. The first algorithm assumes the use of a burst of probing signals with a constant repetition period. After detecting the target, one of the economical algorithms with the estimation of the "rough" speed and acceleration is repeated processing of the RS by dividing it into at least two sub-batches, determining the time position of the RS on the delay axis for each sub-batch, correcting the effect of radial acceleration on the pulse displacement along the delay axis and approximation time position by a linear relationship, the coefficients of which are proportional to the initial range and initial radial speed of the target. The second algorithm assumes the use of two sub-bursts of probing signals with close frequencies and repetition periods. For each of the sub-packs, the ambiguous radial velocity is estimated, the radial velocity of the second sub-pack is corrected in accordance with the setting of the detection channel for radial acceleration, and the problem of disambiguation in the multichannel system is solved.

### Постановка задачи

Одной из актуальных задач радиолокации является обнаружение и высокоточное сопровождение объектов с малой эффективной поверхностью рассеяния на больших дальностях, что требует использования длительного, до единиц секунд, когерентного накопления (КН) отраженного сигнала (ОС). При длительном КН необходимо учитывать движение радиолокационной цели (РЛЦ) с ненулевыми высшими производными дальности с использованием, например, экономичных алгоритмов [1]. В то же время в известной литературе не описаны особенности измерения дальности и радиальной скорости при длительном КН ОС с учетом ненулевых высших производных дальности, что и определяет цель настоящей статьи.

Обоснование способа измерения дальности и радиальной скорости проведем для характерного случая использования в РЛС зондирующего сигнала в виде когерентной пачки из  $K$  линейно-модулированных импульсов с длительностью импульсов  $T_0$ , периодом повторения  $T_r$  и шириной спектра  $\Delta f_0$ . Для одного из вариантов пачка может быть разделена на две подпачки с различающимися периодами повторения  $T_{r1}$  и  $T_{r2}$ . Используемые в статье обозначения соответствуют [1] и ссылкам на литературу в указанной работе.

**Алгоритм оценивания, основанный на измерении среднего расстояния между временами задержки максимумов сигналов в подпачках**

Пусть при обработке все пачки обнаружена цель и оценено время задержки  $\hat{t}_r$ , неоднозначная радиальная скорость  $\hat{V}_{НО}$ , радиальное ускорение  $\hat{a}_r$  и его производная  $\hat{a}'_r$ . Ввиду функциональной зависимости времени задержки и доплеровского сдвига частоты, характерной для ЛЧМ-сигнала [2, 3], вначале необходимо оценить однозначную радиальную скорость, после чего скорректировать оценку времени задержки и рассчитать начальную дальность.

Проведем повторную обработку принятой реализации с обнаруженным отраженным сигналом для опорных значений  $a_s = \hat{a}_r$  и  $a'_s = \hat{a}'_r$ . Разделим интервал когерентного накопления на  $q = \overline{0, Q-1}$  непересекающихся подпачек одинаковой длительности. Каждая подпачка будет содержать  $K/Q$  импульсов при  $T_r = \text{const}$ . Будем полагать, что за время наблюдения цель остается в пределах одного диапазона «грубой» доплеровской скорости. В результате применения одного из экономичных алгоритмов обработки [1] к каждой подпачке для некоторых значений ускорения  $a_s$  и начальной радиальной скорости  $V_{0s}$  будет образовано  $q = \overline{0, Q-1}$  матриц  $|\dot{G}_q(t_m, F_k)|$ , по каждой из которой возможно обнаружение цели и определение номеров отсчетов по «быстрому» времени и «медленному» спектру, содержащих максимумы отсчетов спектра:

$$(m_q, k_q) = \arg \max_{m, k} |\dot{G}_q(t_m, F_k)|^2. \quad (1)$$

Зафиксируем значения квадратов модуля спектра в отсчете с максимумом

$$y_q^{\max} = |\dot{G}_q(t_{m_q}, F_{k_q})|^2$$

и соседними значениями влево и вправо

$$y_q^- = |\dot{G}_q(t_{m_q-1}, F_{k_q})|^2, \quad y_q^+ = |\dot{G}_q(t_{m_q+1}, F_{k_q})|^2,$$

после чего выполним параболическую аппроксимацию номера максимума  $\tilde{m}_q$  (нецелочисленного) для  $q$ -ой подпачки с дополнительной коррекцией по ускорению в части физического перемещения и функциональной зависимости времени задержки и доплеровского сдвига частоты для ЛЧМ-сигнала:

$$\tilde{m}_q = m_q + \underbrace{\frac{y_q^- - y_q^+}{2(y_q^- - 2y_q^{\max} + y_q^+)}}_{\text{уточнение положения максимума}} - \underbrace{2a_s \frac{qT_{\text{КН}}}{Q\lambda} \frac{F_s}{\mu_c}}_{\text{коррекция смещения за счет приращения скорости за подпачку}} - \underbrace{\frac{a_s}{c} \left( \frac{qT_{\text{КН}}}{Q} \right)^2}_{\text{коррекция ускорения}} F_s. \quad (2)$$

Оценки  $\tilde{m}_q$  представляют собой зависимость дальности до цели, движущейся с начальной радиальной скоростью  $V_{0rc}$ , искаженную шумами измерений (выраженную в нецелочисленных номерах отсчетов) от номера подпачки. Аппроксимируем эту зависимость линейной, используя метод наименьших квадратов,

$$\tilde{m}_q = Aq + B. \quad (3)$$

При отсутствии шумов наблюдения коэффициент  $A$  в этой зависимости – это изменение времени задержки отраженного сигнала в пределах подпачки для цели, движущейся с начальной

радиальной скоростью  $V_{0rc}$ , выраженное в числе отсчетов  $A=V_{0rc} \frac{2T_{\text{кн}}}{cQ} F_s$ , коэффициент  $B$  – это начальная дальность (в числе отсчетов от опорной точки) с учетом смещения из-за функциональной зависимости времени задержки и скорости для ЛЧМ-сигнала.

Для коэффициентов линейной аппроксимации имеем

$$A = \frac{\sum_{q=0}^{Q-1} \tilde{m}_q q - \sum_{q=0}^{Q-1} \tilde{m}_q \sum_{q=0}^{Q-1} q}{\sum_{q=0}^{Q-1} q^2 - \left( \sum_{q=0}^{Q-1} q \right)^2}; B = \sum_{q=0}^{Q-1} \tilde{m}_q - a \sum_{q=0}^{Q-1} q. \quad (4)$$

Оценку начальной радиальной скорости ищем в виде

$$\hat{V}_{0rc} = \frac{AcQ}{2F_s T_{\text{кн}}}. \quad (5)$$

Оценку начальной дальности ищем в виде

$$\hat{r}_{0c} = \frac{c}{2} \left( t_1 + \frac{B}{F_s} - T_0 \right) - \frac{\hat{V}_{0rc} c}{\lambda \mu_c}, \quad (6)$$

где  $t_1$  – опорное время (время смещения момента начала дискретизации принимаемого сигнала);  $T_0$  – постоянная времени задержки в согласованном фильтре. Второе слагаемое в (6) это смещение расстояния, вызванное величиной сдвига частоты в линейном частотно-модулированном сигнале.

Обработка существенно упрощается при использовании  $Q=2$  подпачек. В этом случае отношение сигнал/шум по каждой подпачке наибольшее, то есть вероятности аномальных ошибок при определении времени задержки сигналов в подпачках минимальные. Упрощается и аппроксимация (4), то есть  $A = \tilde{m}_1 - \tilde{m}_0$ ,  $B = \tilde{m}_0$ . Вместе с тем, этот вариант требует наибольшей производительности вычислительных средств. При  $Q > 2$  вычислительные затраты на реализацию процедуры оценивания снижаются [2], но увеличиваются вероятности аномальных ошибок при оценивании положения максимумов решающей статистики. В этой связи выбор параметра  $Q$  должен проводиться с учетом оценки отношения сигнал/шум по пачке отраженных сигналов.

Основными отличиями предлагаемого алгоритма оценивания от известных [2, 3] являются дополнительные операции разделения принимаемого сигнала на подпачки, коррекции (2) оценок времени задержки в соответствии с предполагаемым ускорением цели и линейной аппроксимации (4).

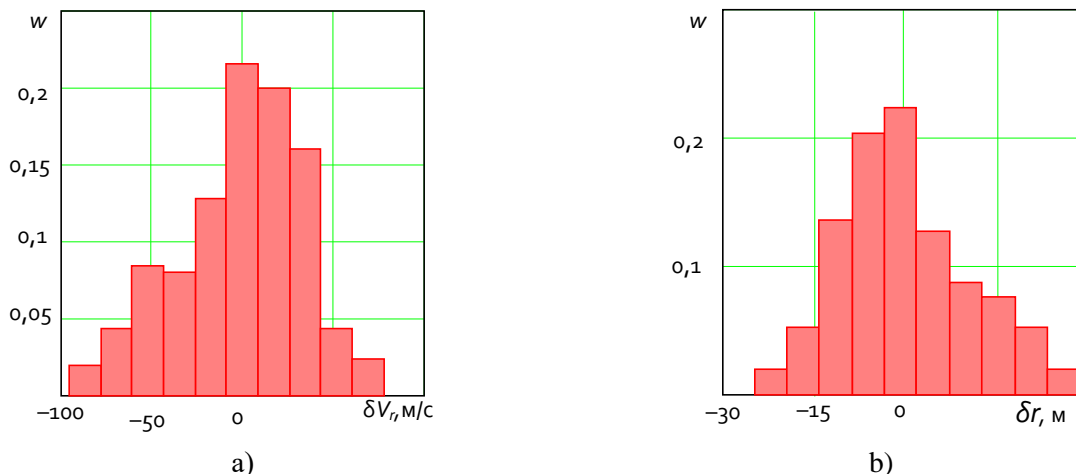


Рис. 1. Полигоны относительных частот ошибок оценивания скорости (а) и дальности (б)

Предлагаемый алгоритм оценивания проверялся путем прямого имитационного моделирования. На рис. 1. приведены полигоны относительных частот ошибок оценивания радиальной скорости  $\delta V_r$  и дальности  $\delta r$ , полученные для случая  $\Delta f_0 = 1$  МГц;  $T_{\text{кн}} = 1$  с;  $\lambda = 0,1$  м;  $\rho = 20$  дБ и параметрах движения цели  $V_{0rc} = -500$  м/с;  $a_r = 100$  м/с.

Математическое ожидание ошибок по скорости и дальности были близки к нулю. Влияние радиального ускорения полностью устранено. Так как оценка скорости (5) непосредственно входит в оценку начальной дальности (6), оценки  $\hat{V}_{0rc}$ ,  $\hat{r}_{0c}$  будут коррелированы, что и наблюдалось в статистическом эксперименте, где коэффициент корреляции ошибок был близок к минус единице.

### Алгоритм оценки параметров движения при использовании двух подпачек с различными периодами повторения

Пусть зондирующий сигнал состоит из двух подпачек с периодами повторения  $T_{r1} \neq T_{r2}$ , но  $T_{r1} \approx T_{r2}$ . Длительности подпачек  $T_{1(2)} = T_{\text{кн}} / 2$  и число импульсов в них полагаем, для простоты, одинаковыми. Обработаем каждую подпачку с использованием алгоритма на основе компенсации миграции дальности и преобразования Фурье [1] и выполним обнаружение и оценивание (с использованием параболической аппроксимации) начальные для каждой подпачки неоднозначных точных радиальных скоростей  $\hat{V}_{T1(2)}$ .

Возможные значения начальной радиальной скорости цели по результатам измерения для первой и второй подпачки могут принимать значения

$$\hat{V}_{n_1} = \hat{V}_{T1} + n_1 V_{\text{одн1}}; \quad (7)$$

$$\hat{V}_{n_2} = \hat{V}_{T2} + n_2 V_{\text{одн2}} - \hat{a}_r \frac{T_{\text{кн}}}{2}, \quad (8)$$

где  $V_{\text{одн1(2)}} = \frac{\lambda}{2T_{r1(2)}}$  - интервал однозначного измерения скорости для подпачек, причем

индексы  $n_1, n_2$  могут находиться в пределах от

$$n_1^{\min} = \left\lfloor \frac{\hat{V}_{\text{Гр}} - \delta V_{\text{Гр}} / 2}{V_{\text{одн1}}} \right\rfloor \text{ до } n_1^{\max} = \left\lceil \frac{\hat{V}_{\text{Гр}} + \delta V_{\text{Гр}} / 2}{V_{\text{одн1}}} \right\rceil,$$

$$\text{и от } n_2^{\min} = \left\lfloor \frac{\hat{V}_{\text{Гр}} - \delta V_{\text{Гр}} / 2}{V_{\text{одн2}}} \right\rfloor \text{ до } n_2^{\max} = \left\lceil \frac{\hat{V}_{\text{Гр}} + \delta V_{\text{Гр}} / 2}{V_{\text{одн2}}} \right\rceil.$$

Отметим, что в (8) присутствует дополнительное слагаемое, обусловленное приращением радиальной скорости цели за счет ее ненулевого радиального ускорения. Если и другие высшие производные дальности отличны от нуля, учет осуществляется аналогично.

Для определенной комбинации индексов скорости совпадут  $\hat{V}_{n_1} \approx \hat{V}_{n_2} \approx V_{0rc}$ . С учетом коррекции в (8) устранение неоднозначности с оптимальной оценкой параметра  $\hat{V}_{0rc}$  достигается совместным подбором индексов  $n_1, n_2$  и оценки  $\hat{V}_{0rc}$ :

$$(\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{V}_{0rc}) = \arg \min_{n_1, n_2, V_{0rc}} \Theta(n_1, n_2, V_{0rc}), \quad (9)$$

где  $\Theta(n_1, n_2, V_{0rc})$  - невязка измерений по первой и второй подпачке

$$\Theta(n_1, n_2, V_{0rc}) = (\hat{V}_{n_1} - V_{0rc})^2 + (\hat{V}_{n_2} - V_{0rc})^2. \quad (10)$$

С учетом высокой точности измерения неоднозначной скорости, оптимизационная задача (9) может быть упрощена путем отказа от поиска оптимального значения скорости и поиска только пары индексов  $\hat{n}_1, \hat{n}_2$ , минимизирующей значения невязки между  $\hat{V}_{n_1}$  и  $\hat{V}_{n_2}$

$$(\hat{n}_1, \hat{n}_2) = \arg \min_{n_1, n_2} \Theta_1(n_1, n_2), \quad (11)$$

где

$$\Theta_1(n_1, n_2) = (\hat{V}_{n_1} - \hat{V}_{n_2})^2 = \left( \hat{V}_{T1} - \hat{V}_{T2} + n_1 V_{\text{одн1}} - n_2 V_{\text{одн2}} + \hat{a}_r \frac{T_{\text{кн}}}{2} \right)^2, \quad (12)$$

с последующим нахождением оценки однозначной скорости

$$\hat{V}_{0rc} = \hat{V}_{\text{гр}} + \hat{n}_1 V_{\text{одн1}} + \hat{V}_{T1}. \quad (13)$$

Таким образом, алгоритм устранения неоднозначности по скорости при обработке двух подпачек с различными периодами повторения заключается в:

- измерении точных неоднозначных скоростей  $\hat{V}_{T1}, \hat{V}_{T2}$  по первой и второй подпачке
- вычислении возможных значений начальной радиальной скорости по результатам измерения для первой и второй, с учетом коррекции радиального ускорения, подпачки согласно (7), (8);
- определении комбинации индексов  $n_1, n_2$ , минимизирующей (11);
- вычислении однозначной скорости в соответствии с (13).

После вычисления однозначной скорости осуществляется коррекция дальности аналогично (6).

Аналогично предыдущему, предлагаемый алгоритм оценивания проверялся путем прямого имитационного моделирования. На рис. 2. приведен полигон относительных частот измеренной однозначной скорости и дальности при точной оценке ускорения цели. Параметры ситуации соответствовали рис.1.

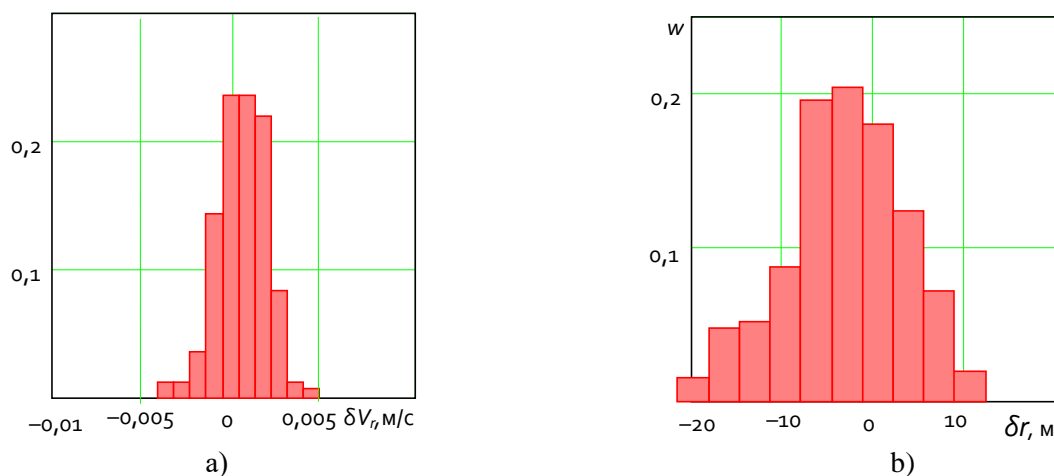


Рис. 2. Полигоны относительных частот ошибок оценивания скорости (а) и дальности (б)

Математические ожидания ошибок измерения скорости и дальности близки к нулю, выборочное СКО ошибок измерения скорости составляет 0,002 м/с, что соответствует ожидаемому значению. Выборочный коэффициент корреляции измерений скорости и дальности близок к нулю. В сравнении с вышеизложенным алгоритмом разделения на две подпачки с одинаковыми периодами повторения точность оценивания дальности и скорости возросла.

### Список использованных источников

1. Козлов С. В., Ле Ван Кьонг. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным. В настоящем сборнике.
2. Верба В. С., Меркулов В. И. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Части 1-3. М.: Радиотехника, 2004. – 312 с.
3. Справочник по радиолокации В 2-х кн. Кн. 1 / Под ред. М. И. Скольника. Пер. с англ. под общей ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2014. – 672 с.