

# ВАРИАНТ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ КОГЕРЕНТНОМ НАКОПЛЕНИИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА

*Ле Ван Кыонг, аспирант*

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

*Козлов С.В. – д.т.н., доцент*

**Аннотация.** Предложен новый вариант оценки ускорения и производной ускорения радиолокационной цели (РЦ), основанный на выравнивании задержек отраженных сигналов (ОС) для различных периодов повторения с точностью, достаточной для их попадания в один элемент разрешения по дальности, частичной компенсации квадратичного фазового набега, обусловленного ускорением цели, построении решающей статистики (РС) для каждого элемента разрешения по дальности на основе когерентного накопления (КН) попарных произведений отсчетов медленного времени и фазового множителя, зависящего от ускорения и производной ускорения РЦ, и некогерентного накопления (НН) квадратов модулей результатов КН для различных сдвигов по времени сигналов в попарных произведениях. Показана возможность компромисса между требованиями к вычислительным ресурсам и потерями при обработке за счет выбора числа суммируемых слагаемых при некогерентном накоплении.

**Ключевые слова.** Ускорение, производная ускорения, миграция дальности, миграция частоты, длительное накопление.

В [1, 2] представлены метод трехмерного масштабированного преобразования для реализации КН и оценки параметров движения для маневрирующих целей при низком ОСШ и алгоритм КН при оценке параметров движения, основанный на разности фаз второго порядка в частотной области. Однако сложное трехмерное преобразование не в полной мере подходит для практических приложений. Кроме того, недостатками подходов [1,2] является снижение точности оценки параметров движения при наложении спектров сигналов, отраженных от нескольких РЦ. В [3] предложены два варианта экономичных в вычислительном плане алгоритмов длительного КН при наличии миграции дальности (МД) и ее производных. Целью настоящей работы является обоснование варианта КН с адаптивностью оценкой параметров движения РЦ, обладающего высокой чувствительностью при относительно небольшом и ситуационно выбираемом объеме вычислений.

Предлагаемый вариант реализуется следующим образом (с обозначениями [1]).

1. Вычисляются спектры  $\dot{G}(F, t_k)$  ОС по «быстрому» времени в  $k = \overline{0, K-1}$  каждом периоде повторения.

2. Проводится компенсация миграции дальности и частичная компенсация миграции доплеровской частоты в каждом периоде повторения в спектральной области с одновременным умножением на КЧХ согласованного фильтра одиночного сигнала [3]. В результате формируется спектры выходных сигналов СФ вида:

$$\dot{G}_1(F, t_k) = \dot{G}_{\text{сф}}(F) e^{j \frac{2\pi f_0}{c} a_s t_k^2} e^{j \frac{2\pi f_0}{3c} a'_s t_k^3} \times e^{j \frac{4\pi}{c} \left( F + \frac{2f_0(V_{0s} + a_s t_k + \frac{1}{2} a'_s t_k^2)}{c} \right) \left( \left( V_{0s} + \frac{f_0}{\mu_c} a_s \right) t_k + \frac{1}{2} \left( a_s + \frac{f_0}{\mu_c} a'_s \right) t_k^2 + \frac{1}{6} a'_s t_k^3 + \frac{c F_{\text{сф}}}{2\mu_c} \right)} \dot{G}(F, t_k). \quad (1)$$

Параметры обработки  $V_{0s}$ ,  $a_s$ ,  $a'_s$  выбираются из условий:

$$\Delta V_{\text{лмд}} = |V_{0r} - V_{0s}| T_{\text{кн}} < \frac{c}{4\Delta f_0}; \Delta a_{\text{квмд}} = \frac{1}{2} |a_s - a_r| T_{\text{кн}}^2 < \frac{c}{4\Delta f_0}; \Delta a'_{\text{кубмд}} = \frac{1}{6} |a'_s - a'_r| T_{\text{кн}}^3 < \frac{c}{4\Delta f_0}, \quad (2)$$

что определяет требуемый шаг сетки по радиальной скорости, ускорению и производной ускорения

$$\Delta V_{\text{лмд}} = \frac{c}{4\Delta f_0 T_{\text{кн}}}; \Delta a_{\text{квмд}} = \frac{c}{2\Delta f_0 T_{\text{кн}}^2}; \Delta a'_{\text{кубмд}} = \frac{3c}{2\Delta f_0 T_{\text{кн}}^3}. \quad (3)$$

Для ширины спектра сигнала  $\Delta f_0 = 10$  МГц и  $T_{\text{кн}} = 1$  с получим  $\Delta V_{\text{лмд}} = 7,5$  м/с,  $\Delta a_{\text{квмд}} = 15$  м/с<sup>2</sup>,  $\Delta a'_{\text{кубмд}} = 45$  м/с<sup>3</sup>. Полученное значение производной радиального ускорения практически не встречается для реальных РЦ, поэтому компенсацией КубмД можно пренебречь, приняв в (1)  $a'_s = 0$ .

Требуемое число каналов составит  $N = \frac{4|V_{\text{max}}| \cdot |a_{\text{max}}|}{\Delta V_{\text{лмд}} \Delta a_{\text{квмд}}}$ , где  $|V_{\text{max}}|, |a_{\text{max}}|$  - модули

максимальных значения модулей скорости и ускорения. Так, например, при обнаружении квадрокоптера при  $|V_{\text{max}}| = 50$  м/с,  $|a_{\text{max}}| = 30$  м/с<sup>2</sup> получим  $N = 53$  канала обработки.

3. После обратного преобразования Фурье получим временное представление выходного сигнала в каждом периоде повторения при компенсированной миграции дальности и частично компенсированном квадратичном фазовом набеге:

$$\dot{S}_1(t_m, t_k) = F^{-1} \{ \dot{G}_1(F, t_k) \} = \text{Asinc}(\Delta f_0(t_m - \tau_0)) e^{j \frac{4\pi}{\lambda} V_{0r} k T_r} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (a_s - a_r)(k T_r)^2} e^{j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r (k T_r)^3}. \quad (4)$$

Составив для каждого отсчета  $m$  быстрого времени попарные произведения отсчетов медленного времени, отличающихся на  $\chi$  периодов повторения, получим:

$$\dot{S}_1(t_m, t_{k-\chi}) \dot{S}_1^*(t_m, t_k) = A^2 e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} V_{0r} \chi T_r} e^{j \frac{2\pi}{\lambda} \chi^2 T_r^2} e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} (a_s - a_r) T_r^2 \chi k} e^{j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r T_r^3 ((k-\chi)^3 - k^3)}.$$

Эти попарные произведения после компенсации кубического фазового множителя (при необходимости) для различных значений  $k$  могут быть накоплены когерентно, а результат для различных значений  $\ell$  в диапазоне  $\ell = 1 \dots \chi_{\text{нн}}$  - некогерентно, что приводит к решающей статистике вида

$$\psi(\delta a, a'_r, m) = \sum_{\chi=1}^{\chi_{\text{нн}}} \left| \sum_{k=\chi}^{K-1} \dot{S}_1(t_m, t_{k-\chi}) \dot{S}_1^*(t_m, t_k) e^{j \frac{4\pi}{\lambda} \delta a T_r^2 \chi k} e^{-j \frac{2\pi}{3\lambda} a'_r T_r^3 ((k-\chi)^3 - k^3)} \right|^2, \quad (5)$$

где  $\delta a = a_s - a_r$ , и совместной оценке параметров  $\delta a$ , производной ускорения  $a'_r$  и номера отсчета быстрого времени на интервале интервалах  $m \in (m_1, m_2)$ , где находится может находиться РЦ:

$$(\delta \hat{a}, \hat{a}'_r, \hat{m}) = \arg \max_{\delta a, a'_r, m} \psi(\delta a, a'_r, m). \quad (6)$$

Максимизация (6) ведется в областях  $\delta a \in [-\Delta a_{\text{квмд}}/2, \Delta a_{\text{квмд}}/2]$ ,  $m \in [m_1, m_2]$  и заданной области изменения  $a'_r$ , после чего решается задача стабилизации уровня ложных тревог и обнаружения РЦ. Для расчета (5) целесообразно использовать дробное преобразование Фурье.

На рис. 1 показан характерный вид РС при  $a_r' = 0$  для отсчета  $m$  быстрого времени, где находится ОС, на рис. 2 – вид РС при одновременном поиске по ускорению и его производной. В табл. 1 приведены оценки частоты правильного обнаружения РЦ от параметра  $\chi_{HH}$  ( $a_r' = 0$ ). Расчеты проводились для пачки из  $K=100$  импульсов при отношении сигнал/шум по пачке 18 дБ.

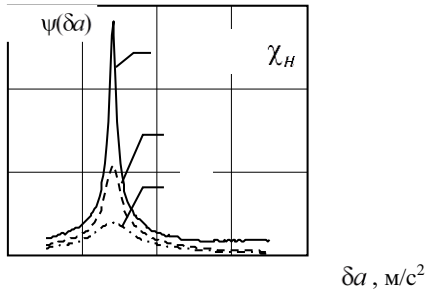


Рисунок 1 – Вид РС для разных значений  $\chi_{HH}$

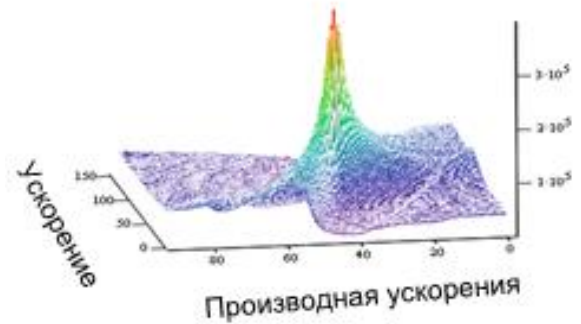


Рисунок 2 - Форма РС при одновременном поиске по ускорению и его производной

Таблица 1- Частота обнаружения РЦ для различных значений числа  $\chi_{HH}$

$\chi_{HH}$	1	2	3	4	5	6	7	10	15
Частота обнаружения РЦ	0,15	0,23	0,39	0,50	0,62	0,78	0,79	0,91	1,0

Параметр  $\chi_{HH}$  определяет вычислительную сложность оценки параметров движения, которая растет линейно от  $\chi_{HH}$ , поэтому выбор указанного параметра является компромиссным между требованиями к вычислительным ресурсам и потерями энергии полезного сигнала при обработке.

**Список использованных источников:**

1. Radar High-Speed Maneuvering Target Detection Based on Three-Dimensional Scaled Transform / Zheng J.B., Liu H.W., Liu J., Du X.L., Liu Q.H // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. 2018, № 11. Pp. 2821–2833.
2. Coherent Integration for Radar High-Speed Maneuvering Target Based on Frequency-Domain Second-Order Phase Difference / Jin K., Lai T., Wang Y., Li G., Zhao Y // Electronics 2019, № 8. <https://doi.org/10.3390/electronics8030287>.
3. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыюнг // материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г. С. 173-177.