

АЛГОРИТМЫ ДЛИТЕЛЬНОГО НАКОПЛЕНИЯ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ДЛЯ РЛС С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ДАЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ УГЛОВЫХ РЫСКАНИЙ САМОЛЕТОВ

Ле Ван Кыонг, аспирант

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

Козлов С.В. – д.т.н., доцент

Аннотация. Приведены модификации алгоритмов некогерентной и комбинированной обработки при длительном накоплении отраженного сигнала от многоэлементной радиолокационной цели типа «самолет», предусматривающие компенсацию миграции дальности для всех возможных значений радиальных скорости и ускорения цели на выходе внутривидеопериодной обработки. При последующем некогерентном накоплении проводится суммирование квадратов модулей отсчетов в элементах разрешения по дальности, сглаживание результатов обработки экспоненциальным фильтром и обнаружение сигнала в каналах обработки с грубым определением радиальной скорости по максимуму сформированной статистики. При комбинированном накоплении сигналы в каждом элементе разрешения по дальности разделяются на подпачки, для которых выполняется преобразование Фурье с последующим отбором и суммированием квадратов спектральных отсчетов с наибольшей амплитудой и сглаживанием результата экспоненциальным фильтром.

– **Ключевые слова.** Радиальное ускорение, миграция дальности и частоты, блестящие точки, центр масс цели, угловые рыскания.

Одним из методов повышения дальности обнаружения воздушных объектов (ВО) при низком отношении сигнал/шум является увеличение времени накопления отраженного сигнала (ОС). Для РЛС с высокой (единицы метров) разрешающей способностью по дальности при длительном накоплении ОС будет наблюдаться миграция дальности (МД) и миграция доплеровской частоты (МЧ). Варианты алгоритмов коррекции МД и МЧ в спектральной области и когерентного накопления ОС для точечной цели приведены в [1,2]. Для многоэлементной цели типа «самолет» использование этих алгоритмов осложняется угловыми рысканиями цели [3,4], при наличии которого различные блестящие точки (БТ) цели будут иметь разные значения радиальных скорости и ускорения. Пусть на интервале наблюдения строительная ось цели совершает гармонические колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой по углу γ_n , периодом повторения T и начальной фазой φ . Закон поступательного движения центра масс цели $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ координаты $n = \overline{1, N}$ видимых БТ цели определяются радиусами R_n и углами γ_n БТ в горизонтальной плоскости. Тогда закон изменения координат БТ может быть записан в виде

$X_n(t) = x(t) + R_n(t) \cos(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n)$; $Y_n(t) = y(t) + R_n(t) \sin(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n)$;
 $Z_n(t) = z(t)$, где $\gamma_n = \arccos \dot{y}(t)/\dot{x}(t)$ - курс цели; $\omega = 2\pi/T$. Дальность до n -ой БТ изменяется по закону $r_n(t) = \sqrt{X_n^2(t) + Y_n^2(t) + Z_n^2(t)}$, а радиальные скорость и ускорение $V_n(t) = \frac{dr_n(t)}{dt}$; $a_n(t) = \frac{d^2 r_n(t)}{dt^2}$

Иллюстрация возникающих при угловых рысканиях самолета эффектов приведена на рис. 1-3, где показаны модель самолета в виде совокупности БТ и радиальные скорости и ускорения трех БТ с наибольшим (треугольники на рис. 1) отклонением от центра масс. Иллюстрация выполнена для $x(0) = 30$ км; $\dot{x}(0) = -0,30$ км/с; $y(0) = 30$ км; $\dot{y}(0) = 0$ км/с; $\ddot{y}(0) = 30$ м/с²; $z(0) = 5$ км, $T = 2$ с; $\Delta\gamma = 2^\circ$. Как видно из рис.2 и 3, радиальные скорости ускорения отдельных БТ различны и изменяется на интервале наблюдения нелинейно, при этом радиальные ускорения БТ колеблются относительно радиального ускорения центра масс цели с амплитудой, определяемой расстоянием БТ до центра масс и периодом рысканий.

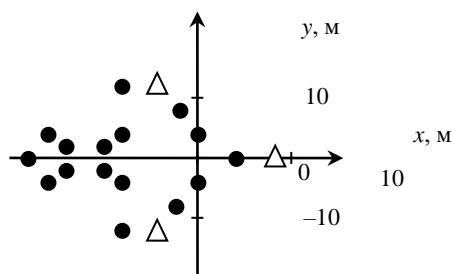


Рисунок 1 - Расположение БТ на цели

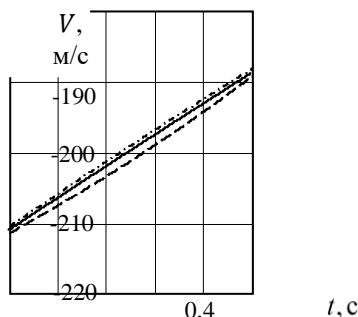


Рисунок 2 – Зависимость радиальной скорости БТ от время наблюдения

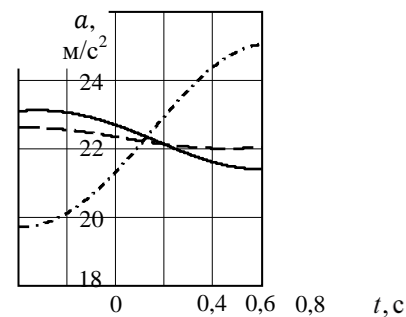


Рисунок 3 – Зависимость радиального ускорения БТ от время наблюдения

Для реализации длительного когерентного накопления (КН) необходимо, чтобы за время КН изменение ускорения цели было меньше, чем разрешающая способность по ускорению $\Delta a = \lambda / 2T_{\text{КН}}^2$ [1]. Зависимость $\Delta a(T_{\text{КН}})$ для различных значений длины волны λ РЛС приведена на рис. 4. Сравнивая характерные значения изменения ускорения на рис.3 с величиной разрешающей способности по ускорению на рис.4, можно сделать вывод, что когерентное накопление сигналов, отраженных от отдельных БТ, возможно при относительно небольшой длительности интервала накопления 0,05...0,1 с. При дальнейшем увеличении времени КН отраженный сигнал будет мигрировать в соседние доплеровские фильтры и эффективность когерентного накопления снизится.

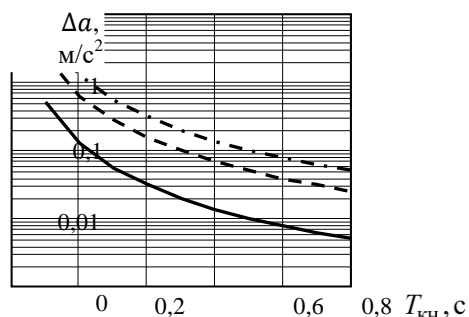


Рисунок 4 - зависимость $\Delta a(T_{\text{КН}})$ для различных значений длины волны λ .
Сплошная - $\lambda = 1$ см, штрих $\lambda = 5$ см, штрих-пунктир- $\lambda = 10$ см

проводится суммирование квадратов модулей результатов ВПО после устранения миграции дальности. Блок-схема алгоритма приведена на рис. 5.

В указанных условиях возможна реализация некогерентного накопления и комбинированного когерентно-некогерентного накопления. Входными данными является матрица $K \times M$ комплексных отсчетов $\dot{U}_{k,m}$ принимаемой реализации, где $m = \overline{1, M}$ - индекс «быстрого» времени в пределах одного периода повторения; $k = \overline{1, K}$ - индекс «медленного» времени по периодам повторения. Алгоритм комбинированного накопления предполагает устранение МД в каждом периоде повторения в соответствии с ожидаемыми значениями скорости и ускорения V_{0r} ; a_r с использованием алгоритмов [1], разделение сигналов на Q подпачек по $K_1 = K/Q$ импульсов, вычисление преобразования Фурье (ПФ) по каждой подпачке, выбор спектральных отсчетов с максимальным значением амплитуды и суммирование их квадратов. После этого проводится сглаживание в экспоненциальном фильтре с постоянной времени τ_ϕ . При некогерентном накоплении

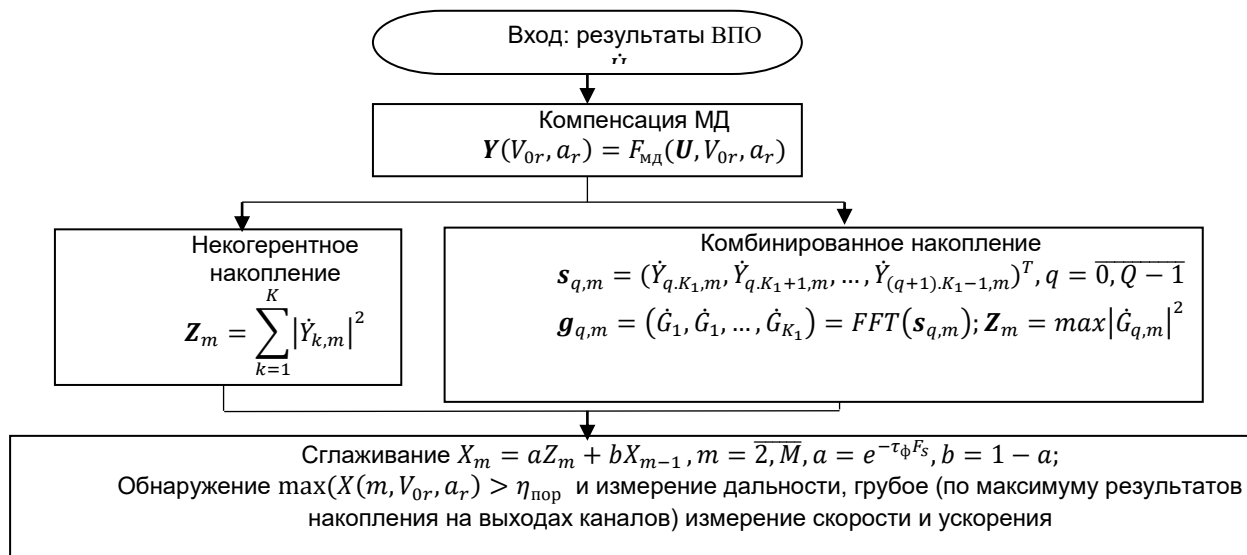


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма комбинированного и некогерентного накопления

Предлагаемые алгоритмы могут быть использованы в РЛС с высокой разрешающей способностью по дальности для повышения вероятности обнаружения воздушных объектов при низком отношении сигнал/шум на выходе внутрипериодной обработки.

Список использованных источников:

1. Базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С. 115-120.
2. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020: материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С. 173-177.
3. Доброленский Ю.П. Динамика полета в неспокойной атмосфере. – М.: Машиностроение, 1968. 256 с.
4. ISAR Autofocus Imaging Algorithm for Maneuvering Targets Based on Phase Retrieval and Gabor Wavelet Transform / Hongyin S., Ting Y., Zhijun Q // Remote Sens. 2018, 10, 1810; doi:10.3390/rs10111810.