

УДК 621.396.96

ДЛИТЕЛЬНОЕ НАКОПЛЕНИЕ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ВЫСОКОМ  
РАЗРЕШЕНИИ ПО ДАЛЬНОСТИ И УГЛОВЫХ РЫСКАНИЯХ  
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЦЕЛИ

LONG-TERM ACCUMULATION OF THE REFLECTED SIGNAL FOR HIGH-RANGE  
RESOLUTION RADARS TAKING INTO ACCOUNT ANGULAR YAW OF TARGET

**С.В. Козлов,**

профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, д.т.н., доцент, г. Минск, Республика Беларусь.

**Ле Ван Кьонг,**

аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск Республика Беларусь.

**В.В. Радионович,**

аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, г. Минск Республика Беларусь.

**S.V. Kozlov,**

professor of information radioengineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, D. Sci., associate professor, Minsk, Republic of Belarus.

**Le Van Cuong,**

pg student of information radioengineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus.

**V.V. Radionovic,**

pg student of information radioengineering department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus.

Дата поступления в редакцию — .04.2021 г.

Приведены способы цифровой обработки при высоком разрешении по дальности и длительном накоплении (ДН) сигнала, отраженного от многоэлементной радиолокационной цели при ее угловых рысканиях. Они предусматривают компенсацию миграции дальности и частоты для всех возможных значений радиальных скорости и ускорения цели при внутрипериодной обработке (ВПО). При последующем адаптивном комбинированном накоплении (КомБН) принимаемый сигнал в каждом элементе разрешения по дальности разделяются на фрагменты, для которых выполняется когерентное накопление (КН) путем преобразования Фурье с последующим некогерентным накоплением (НН) путем отбора и суммирования квадратов спектральных отсчетов с наибольшей амплитудой. Предложен критерий деления принимаемого сигнала на фрагменты. Приведены результаты математического моделирования.

Methods of digital processing with high range resolution *and long-term accumulation* of the signal reflected from a multi-element radar target during its angular yaw are presented. They provide compensation for the range and frequency migration for all possible values of the radial velocity and acceleration of the target during *intraprocess*. With subsequent adaptive *combined accumulation*, the received signal in each range resolution element is divided into fragments, for which *coherent accumulation* is performed by Fourier transform followed by *incoherent accumulation* by selection and summation of the squares of spectral samples with the largest amplitude. A criterion for dividing the received signal into fragments is proposed. The results of mathematical modeling are presented.

Ключевые слова: Радиальное ускорение, миграция дальности и частоты, блестящие точки, центр масс цели, угловые рыскания, когерентное накопление, комбинированное накопление.

Keywords: Radial acceleration, range and frequency migration, scatterers of the aircraft, target center of mass, angular yaw, coherent accumulation, combined accumulation.

## Введение

Одним из возможных методов повышения дальности обнаружения воздушных объектов при низком отношении сигнал/шум является увеличение времени накопления отраженного сигнала (ОС). Если изменение дальности до цели за время наблюдения больше разрешающей способности по дальности, имеет место миграция дальности (МД). Аналогично, если изменение доплеровского сдвига частоты ОС за время наблюдения превышает величину, обратную времени наблюдения, имеет место миграция частоты (МЧ). Варианты алгоритмов коррекции МД и МЧ в спектральной области и когерентного накопления ОС для точечной цели приведены в [1,2]. Для многоэлементной, состоящей из множества пространственно-распределенных областей отражения – блестящих точек (БТ), цели, использование этих алгоритмов осложняется ее угловыми рысканиями [3,4]. При рысканиях различные блестящие точки (БТ) цели будут иметь разные и изменяющиеся в процессе наблюдения относительно общей средней величины значения радиальной скорости и ускорения. Кроме того, наложение сигналов, отраженных от различных БТ, находящихся в одном или соседних элементах разрешения, приводит к появлению флуктуаций ОС, время корреляции  $\tau_c$  которых для типовых аэродинамических целей (самолетов), как правило, меньше или сравнимо с временем наблюдения  $T_H$  [5]. Это требует адекватного учета при обработке сигнала.

Цель статьи – модификация способов ДН ОС при наличии миграции дальности и частоты применительно к сложной многоэлементной радиолокационной цели.

**Выявление закономерностей для случая гармонических угловых колебаний цели**  
Пусть на интервале наблюдения строительная ось цели совершает гармонические колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой по углу  $\Delta\gamma$ , периодом повторения  $T$  и начальной фазой  $\varphi$ . 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  $\gamma_n$  БТ, например, в горизонтальной плоскости. Тогда закон изменения координат, дальности и производных дальности до БТ может быть записан в виде

$$X_n(t) = x(t) + R_n \cos(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n); Y_n(t) = y(t) + R_n \sin(\gamma_n(t) + \Delta\gamma \cos(\omega t + \varphi) + \gamma_n); Z_n(t) = z(t);$$

$$r_n(t) = \sqrt{X_n^2(t) + Y_n^2(t) + Z_n^2(t)}; V_n(t) = \frac{dr_n(t)}{dt}; a_n(t) = \frac{d^2 r_n(t)}{dt^2},$$

где  $\gamma_n(t) = \arccos \dot{y}(t) / \dot{x}(t)$  - курс цели;  $\omega = 2\pi / T$ .

Иллюстрация возникающих при угловых рысканиях цели эффектов приведена на рис. 1, где показаны модель цели в виде совокупности из 19-ти идентичных БТ и радиальные скорости и ускорения трех БТ с наибольшим (треугольники на рисунке 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/с<sup>2</sup>;  $z(0) = 5$  км,  $T = 2$  с;  $\Delta\gamma = 2^\circ$ .

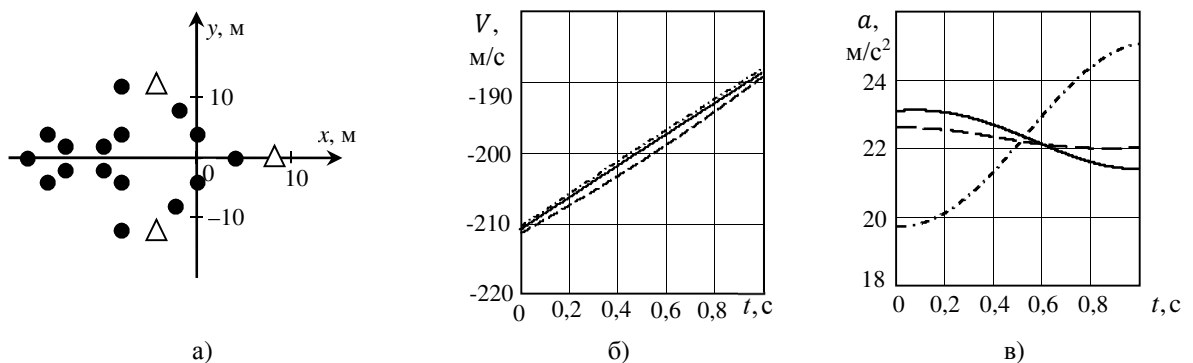


Рис. 1. Расположение БТ на цели (а) и зависимости радиальных скоростей (б) и ускорениях (в) БТ от времени наблюдения

Как видно из рис. 1б, в, 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.

Для реализации длительного когерентного накопления (КН) необходимо, чтобы за время КН модуль максимального изменения  $a = \max|a(t) - a(0)|, t \in [0 \dots T_n]$  ускорения цели был меньше, чем разрешающая способность по ускорению  $a = \lambda / 2T_n^2$  [1].

Зависимость  $\Delta a(T_{\text{кн}})$  для различных значений длины волны  $\lambda$  приведена на рис. 2. Сравнивая характерные значения изменения ускорения из рис. 1в с величиной  $\Delta a$  на рис. 2, можно сделать вывод, что когерентное накопление сигналов, отраженных от отдельных БТ,

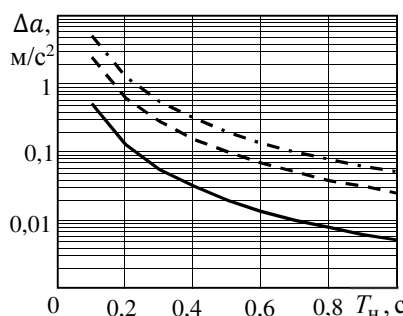


Рис. 2. Зависимости разрешающей способности по ускорению от времени накопления для различных значений длин волн. Сплошная кривая –  $\lambda = 1$  см, штрих  $\lambda = 5$  см, штрих-пунктир –  $\lambda = 10$  см

возможно при относительно небольшой длительности интервала накопления 0,01...0,1 с. При дальнейшем увеличении времени накопления ОС будет мигрировать в соседние доплеровские фильтры и эффективность КН снизится.

### Способы когерентной, некогерентной и комбинированной обработки

В указанных условиях потенциально возможна реализация КН, некогерентного (НН) и комбинированного (КомБН) когерентно-некогерентного накопления.

Входными данными для всех видов обработки является матрица  $\mathbf{U}$  размерностью  $K \times M$  комплексных отсчетов  $U_{k,m}$  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. Последовательность операций при обработке приведена на рис. 3.

Способы предполагают единый предварительный этап, на котором выполняется ВПО с одновременным устранением МД и составляющей МЧ, обусловленной квадратичным и последующими членами изменения дальности в соответствии с ожидаемыми значениями радиальной скорости  $V_{0r}$ , ускорения  $a_r$  и производной (при необходимости) ускорения  $a_r'$  с использованием [1]. В результате матрица  $\mathbf{U}$  преобразуется в матрицу  $\mathbf{Y}$  с комплексными отсчетами  $Y_{k,m}$  при устранении МД. Каждый столбец матрицы  $\mathbf{Y}$  содержит отсчеты  $Y_{k,m}$  сигналов на выходе ВПО, приведенные по дальности к первому импульсу пачки.

При КН далее проводится быстрое преобразование Фурье (БПФ) по столбцам матрицы  $\mathbf{Y}$  [1] с последующим вычислением квадратов модулей спектральных отсчетов. При НН проводится суммирование квадратов модулей результатов ВПО по столбцам матрицы  $\mathbf{Y}$ . Процедуры КН и НН после компенсации миграции дальности полностью аналогичны известным. Процедура КомБН в сравнении с традиционной [1] имеет следующие существенные особенности. Каждый столбец матрицы  $\mathbf{Y}$  разделяется на  $Q_\phi$  фрагментов - подпачек по  $K_1 = K / Q_\phi$  импульсов и вычисляется БПФ по каждой подпачке. Доплеровский сдвиг частоты ОС в процессе радиолокационного наблюдения может последовательно находиться в нескольких элементах разрешения по частоте, причем закон изменения доплеровского смещения частоты неизвестен. Однако, если отношение сигнал/шум по когерентно накапливаемым фрагментам достаточно велико, то максимум амплитудного спектра будет соответствовать среднему доплеровскому сдвигу частоты сигнала в пределах фрагмента. Поэтому при КомБН из результатов БПФ для каждого фрагмента выбираются и суммируются максимальные значения квадратов модулей спектральных отсчетов.

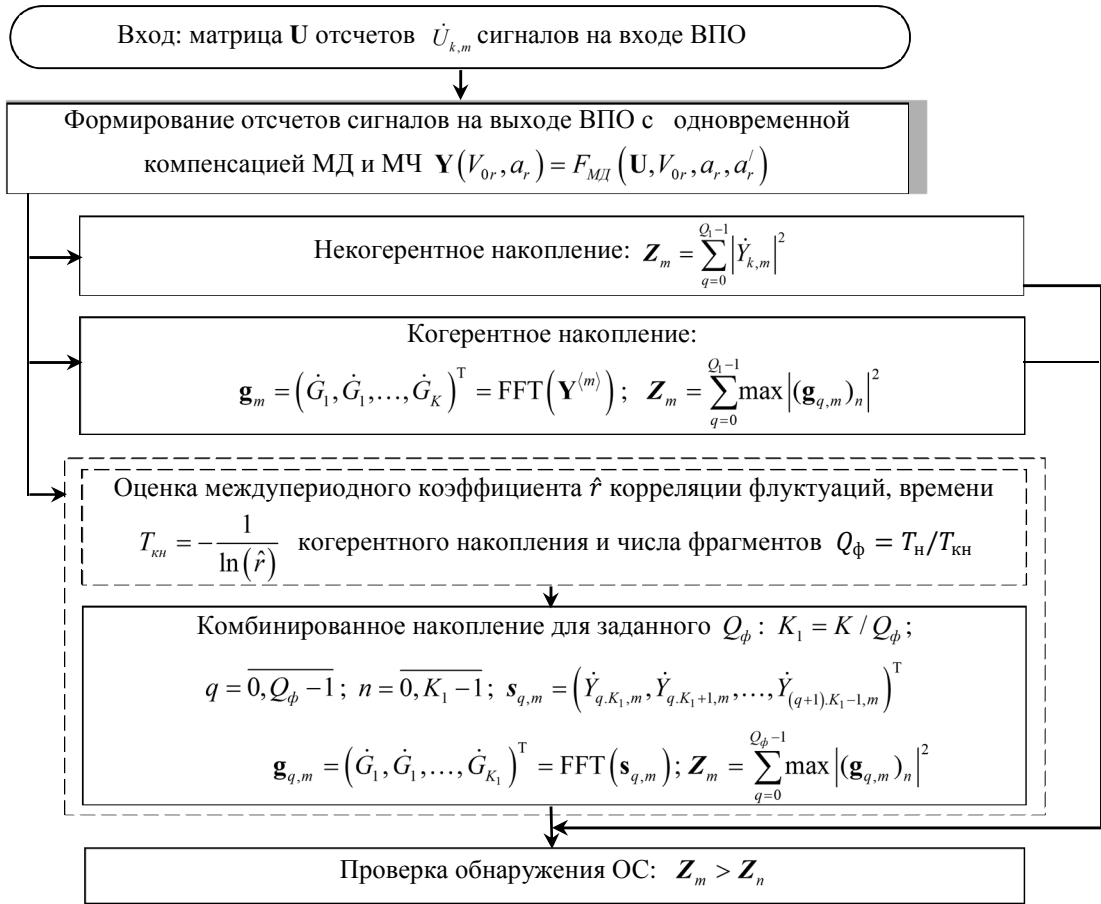


Рис. 3. Алгоритмическая схема обработки

Определение числа фрагментов  $Q_\phi$  выполняется на основе оценки междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций ОС, или организуется многоканальная по  $Q_\phi$  обработка с выбором результатов по определенному критерию.

Результаты обработки  $Z_m$  для каждого отсчета по быстрому времени сравниваются с соответствующим виду обработки порогом  $Z_n$ . Цель считается обнаруженной, если порог превышен хотя бы для одного отсчета быстрого времени.

### Алгоритм оценивания междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций и особенности организации многоканальной по времени когерентного накопления обработки

Так как междупериодные коэффициенты корреляции флуктуаций сигналов для различных элементов разрешения по дальности, в которых находится отраженный от цели сигнал, различны и априори неизвестны, то для выбора оптимального времени КН [5] возникает необходимость их адаптивного оценивания по принятой реализации [8].

С учетом специфики, обусловленной предварительной компенсацией миграции дальности и частоты, возможный алгоритмов оценки заключается в следующем. Оценим мощность ОС, попадающего в  $m$ -м отсчет дальности. С учетом возможности оценки мощности шума по всей «шумовой дорожке» на участках, где сигнала нет, оценку  $\hat{P}_ш$  мощности шума считаем известной с высокой точностью  $\hat{P}_ш \rightarrow P_ш$ . Так как с учетом некоррелированности сигнала и шума  $\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\dot{U}_{m,k}|^2 \approx \hat{P}_{c_m} + P_ш$ , где  $\dot{U}_{m,k}$  - отсчеты сигнала на выходе ВПО после компенсации миграции дальности, то наиболее простой алгоритм оценки мощности ОС имеет вид

$$\hat{P}_{c_m} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\dot{U}_{m,k}|^2 - \hat{P}_ш. \quad (1)$$

Отметим, что в соответствии с (1) оценка  $\hat{P}_{c_m}$  может оказаться меньше нуля, что будет соответствовать либо шумовому отсчету, либо отсчету, содержащему предельно слабый и, следовательно, необнаруживаемый сигнал, по которому дальнейшие оценки не проводятся.

Оптимальный алгоритм оценки коэффициента корреляции предполагает вычислении логарифма функции правдоподобия (ФП)

$$\Psi_m(r, \bar{F}_{DS}) = \mathbf{u}_m^+ \mathbf{R}^{-1}(r, \bar{F}_{DS}) \mathbf{u}_m + \ln |\mathbf{R}(r, \bar{F}_{DS})|, \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_m = (\dot{U}_{m,0}, \dot{U}_{m,1}, \dots, \dot{U}_{m,K-1})^T$  - вектор, составленный из отсчетов медленного времени для  $m$ -го отсчета быстрого времени;  $\mathbf{R}(r, \bar{F}_{DS})$  - оценка корреляционной матрицы (КМ) суммы флуктуирующего сигнала с междупериодным коэффициентом корреляции флуктуаций  $r$  и средним доплеровским сдвигом частоты  $\bar{F}_{DS}$  и шума с элементами

$$R_{k_1, k_2} = r^{|k_1 - k_2|} e^{j2\pi F_{DS}(k_1 - k_2)T} \hat{P}_{c_m} + \begin{cases} P_{sh}, & \text{при } k_1 = k_2; \\ 0, & \text{при } k_1 \neq k_2. \end{cases} \quad (3)$$

При типовых значениях  $r=0,5 \dots 0,95$  элементы как прямой, так и обратной КМ быстро убывают при удалении от главной диагонали, поэтому прямую и обратную КМ можно заменить ленточными, выполняя вычисление эрмитовой формы в (2) путем суммирования по главной диагонали матрицы и  $N-1$  перекрестным элементам в столбце от главной диагонали. Для этого вычисляется редуцированная корреляционная матрица  $\mathbf{R}_p(r, \bar{F}_{DS})$  флуктуирующего сигнала размером  $N \times N$  элементов согласно (3) и проводится ее обращение  $\mathbf{Q}_p(r, \bar{F}_{DS}) = \mathbf{R}_p^{-1}(r, \bar{F}_{DS})$ . В полученной матрице  $\mathbf{Q}_p(r, \bar{F}_{DS})$  далее используется только первый столбец.

Редуцированная решающая статистика при накоплении сигнала по лентам корреляционной матрицы будет иметь вид

$$\Psi_{p_m}(r, \bar{F}_{DS}) = \sum_{k=0}^{K-1} Q_{p_{0,0}} |\dot{U}_{m,k}|^2 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-n-1} Q_{p_{0,n}} \dot{U}_{m,k} U_{m,k+n}^* + \frac{K}{N} \ln |R_p(r, \bar{F}_{DS})|. \quad (4)$$

Тогда оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала для  $m$ -го отсчета по дальности

$$\hat{r}_m = \underset{r}{\operatorname{argmin}} \Psi_{p_m}(r, \bar{F}_{DS}). \quad (5)$$

Из-за необходимости максимизации по двум параметрам в (5) оценка коэффициента  $\hat{r}_m$  оказывается достаточно сложной. Альтернативным вариантом является прямой перебор числа  $Q_\phi$  фрагментов, на которые разбивается интервал наблюдения, что в вычислительном плане может оказаться предпочтительнее оценки (5). Отметим, что при прямом переборе величина  $\mathbf{Z}_m$  монотонно возрастает с увеличением  $Q_\phi$ , достигая максимума при  $Q_\phi = K$ , то есть при некогерентном накоплении. Поэтому необходимо обоснование критерия оптимизации времени КН и числа  $Q_\phi$  обрабатываемых фрагментов.

Отметим, что при типовых для длительного накопления значениях  $Q_\phi = 10 \dots 50$  можно ожидать нормализации величины  $\mathbf{Z}_m$  как для отсутствия, так и для наличия полезного сигнала. Поэтому в качестве оптимизируемого показателя примем величину

$$\Lambda_m(Q_\phi) = \frac{Z_m(Q_\phi) - \bar{Z}_m(Q_\phi)}{\sigma_m(Q_\phi)}, \quad (6)$$

где  $\bar{Z}_m(Q_\phi)$ ,  $\sigma_m(Q_\phi)$  - среднее значение и среднее квадратическое отклонение выходного сигнала при наличии только шума при разделении интервала наблюдения на  $Q_\phi$  фрагментов. Показатель (6) соответствует расстоянию Махаланобиса между двумя статистическим распределениями, для одного из которых (при наличии полезного сигнала) математическое ожидание принято равным значению выходного сигнала накопителя, а среднее

квадратическое отклонение для обоих распределений принято одинаковым. Таким образом (6) представляет собой нормированное расстояние между выходным сигналом накопителя при наличии полезного сигнала и средним значением выходного сигнала при наличии только шума. Нормировка проводится путем деления на среднее квадратическое отклонение шума на выходе накопителя.

Тогда оптимальная оценка числа фрагментов, на которые нужно разделить сигнал

$$\hat{Q}_{\Phi_m} = \arg \max \Lambda_m(Q_{\Phi}), \quad (7)$$

откуда альтернативная (5) оценка коэффициента корреляции

$$\hat{r}_m = e^{-\hat{Q}_{\Phi_m}/K}. \quad (8)$$

Отметим, что после вычисления (6) может быть решена задача обнаружения. Для этого  $\Lambda_m(Q_{\Phi})$  сравнивается с нормированным порогом  $\ell = \Phi^{-1}(1 - F_{лт})$ , где  $\Phi^{-1}(1 - F_{лт})$  - функция,

обратная интегралу вероятности вида  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$ ,  $F_{лт}$  - вероятность ложной

тревоги. Ниже приведены результаты моделирования предлагаемых алгоритмов для детерминированной модели рысканий и модели рысканий в виде случайного процесса, обусловленного турбулентными свойствами атмосферы.

#### Закономерности компенсации миграции дальности и накопления отраженного сигнала при детерминированной модели рысканий

На рис. 4 приведено яркостное радиолокационное изображение (РЛИ) в координатах дальность (горизонтальная ось) без и при наличии компенсации МД ( $T_n=512$  мс, период повторения импульсов  $T_r=1$  мс,  $\lambda=10$  см, гипотетический случай отсутствия угловых рысканий цели). До компенсации МД сигнал от цели представлен в виде яркой наклонной линии, повернутой относительно оси дальности на угол, определяемый радиальной скоростью и ускорением цели. При достаточно большом ускорении эта линия визуально будет соответствовать параболе. После компенсации МД наклонная линия преобразуется в вертикальную, что обеспечивает возможность дальнейшего накопления в каждом элементе разрешения по столбцам матрицы. Изменение яркости свидетельствует об амплитудных флуктуациях ОС. На рис. 5 приведены формируемые при длительном когерентном накоплении радиолокационные изображения (РЛИ) цели при различной степени рассогласования параметров движения цели и параметров системы обработки. Цель (рис. 1) совершала разворот с ускорением  $3g$ , отношение сигнал/шум на выходе ВПО по одной БТ цели составляло  $-10,9$  дБ (потенциальное отношение сигнал/шум по всей

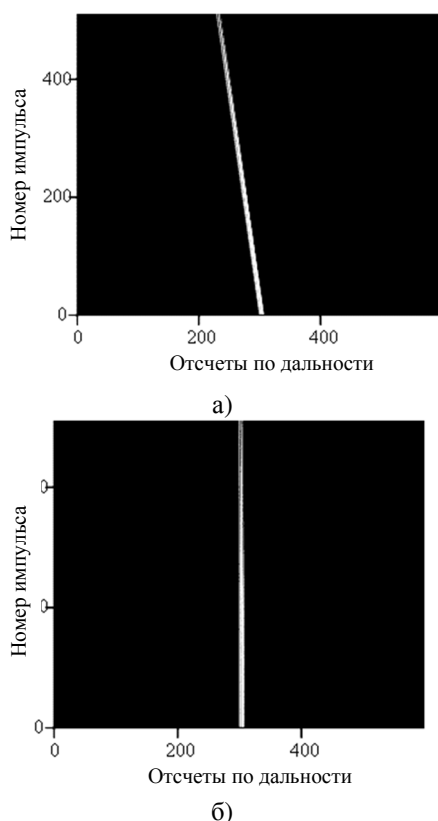


Рис. 4. Яркостное РЛИ на выходе ВПО без (а) и при наличии (б) компенсации МД

продолжительности наблюдения для гипотетического случая когерентного суммирования отраженных от всех БТ сигналов составляет 26 дБ), разрешение по дальности, радиальной скорости и ускорению составляло 3 м, 0,2 м/с и 0,78 м/с<sup>2</sup>, соответственно. Горизонтальная ось на рисунках соответствует доплеровскому сдвигу частоты, вертикальная – дальности. Как видно из рис. 5, при отсутствии угловых рысканий и точном согласовании параметров движения цели и системы обработки формируется характерное РЛИ объекта в виде совокупности ярких по отношению к фону точек, распределенных по дальности и доплеровскому сдвигу частоты. Размер изображения цели по дальности соответствует ее

наблюдаемой радиальной протяженности, по частоте – определяется разностью доплеровских частот отдельных БТ цели, что создает предпосылки для оценивания размера объекта в картинной плоскости. При рассогласовании радиального ускорения объекта и системы обработки РЛИ «размывается» преимущественно по оси частот, и, при достаточно большом рассогласовании обнаружение цели становится затруднительным.

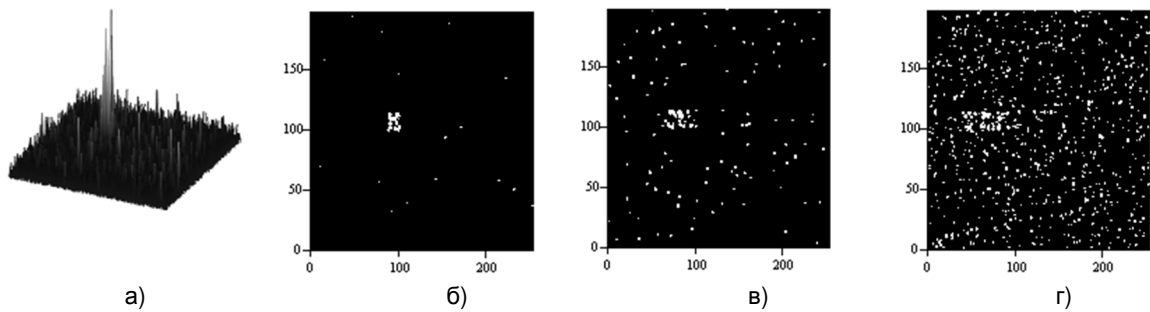


Рисунок. 5. Трехмерное (а) и яркостное (б-г) РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при точном (а, б) согласовании параметров системы обработки и рассогласовании по ускорению 20 м/с<sup>2</sup> (в) и 40 м/с<sup>2</sup> (г)

На рис. 6 приведен формируемые РЛИ при точном совпадении параметров ВПО при компенсации МД и МЧ с параметрами движения центра масс цели и различных периодах рыскания  $T_{\text{рыск}}$  при КН, НН ( $Q_{\phi}=8$ ). Пунктирной линией для случаев НН накопления показан порог, сформированный исходя их предположения о нормализации фона при вероятности ложной тревоги  $10^{-6}$ . При выбранных исходных данных за время накопления блестящие точки цели смещаются на расстояние равное, в среднем, 22 элементам разрешения по дальности. Смещение цели за время наблюдения примерно соответствует ее длине.

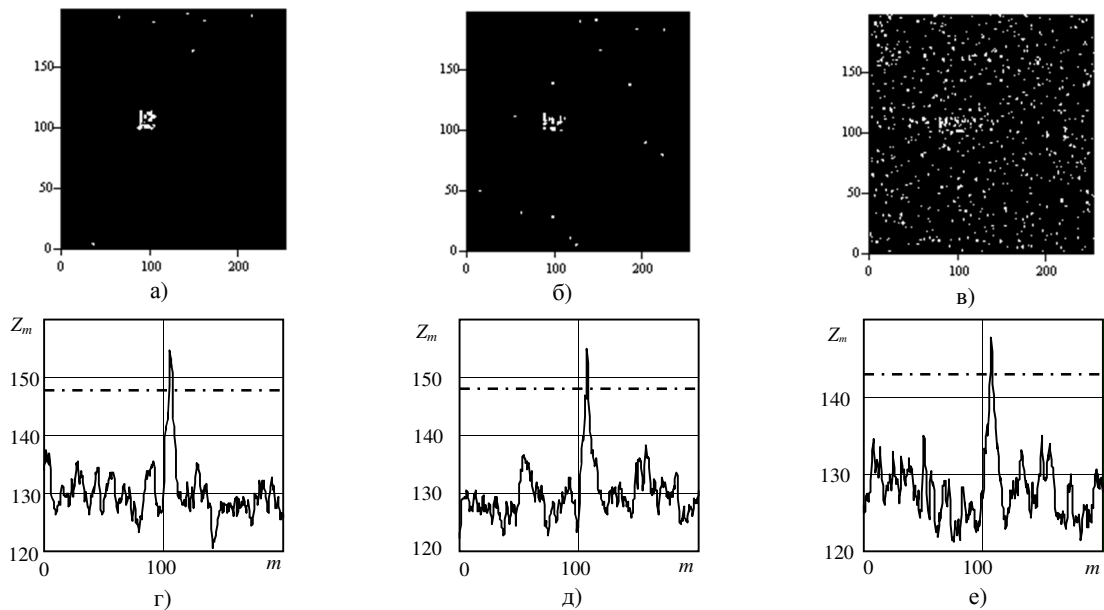


Рисунок. 6. РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты (а-в), результат НН (г-е) при периоде рысканий 2 с (а, г), 1 с (б, д) и 0,25 с (в, е)

Как видно из результатов моделирования, при достаточно малой угловой скорости рысканий с периодом повторения  $T_{\text{рыск}} = 2$  с РЛИ объекта при КН практически не изменяется в сравнении со случаем отсутствия рысканий. При увеличении скорости рысканий происходит размывание РЛИ по оси частот и, при достаточно большой скорости рысканий, визуальное обнаружение цели по результатам КН становится затруднительным. При НН уверенное обнаружение цели обеспечивается для всех значений периода угловых рысканий.

**Результаты моделирования длительного накопления отраженного сигнала при случайных рысканиях цели при полете в турбулентной атмосфере**

Рассмотренный выше случай ввиду использования гармонических угловых рысканий является модельным и позволяет выявить основные закономерности ДН. В реальных условиях радиолокационного наблюдения за самолетом его угловые рыскания будут определяться турбулентностью атмосферы и представлять из себя случайный процесс с заданными статистическими свойствами.

Для оценки эффективности ДН по типовым радиолокационным целям с учетом турбулентности атмосферы необходима соответствующая модель ОС. В настоящее время широко используется модель радиолокационных характеристик вторичного излучения аэродинамических целей, реализованная в специализированном программном комплексе «Back Scattering Simulation» (BSS), созданной Я.Д. Ширманом [6] и развиваемом его учениками. Комплекс обеспечивает воспроизведение отраженных от маневрирующих аэродинамических объектов сигналов при узкополосном и сверхширокополосном зондировании. В качестве входных параметров цели используются: координаты положения центра масс цели; координаты положения БТ относительно центра масс; параметры движения цели.

Исследование эффективности ДН проводилось при следующих исходных данных в программном комплексе BSS:

- наблюдаемая радиолокационная цель – среднеразмерный самолет, в качестве которого принимался заданный в программном комплексе объект типа F-15;

- параметры режима полета: начальный азимут цели – 0 град; начальная дальность до центра масс цели – 50 км; высота полета – 4000 м; начальный курсовой угол – 225 град; скорость полета – 1100 км/ч;

- параметры зондирования и обработки: когерентные пачки линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов с прямоугольной огибающей (без оконной обработки); длительность импульса – 10 мкс; девиация частоты – 50 МГц; длина волны – 3 см; поляризация сигнала – горизонтальная; частота повторения импульсов – 1000 Гц; размер строка дальности – 600 м, число элементов дальности в строке – 512.

С указанными выше параметрами зондирующего сигнала цель занимает примерно 5-7 элементов разрешения. Результаты моделирования ОС (шумы отсутствовали) приведены на рис. 7.

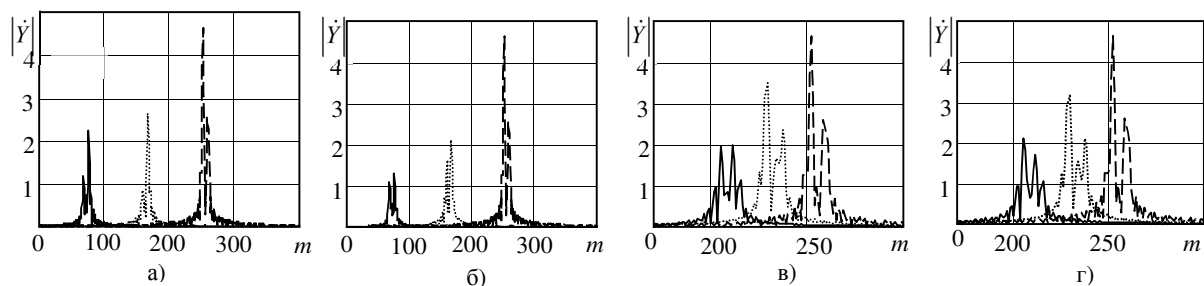


Рис. 7. Пример отраженного сигнала на выходе ВПО (без компенсации МД) при времени наблюдения  $T_H = 1$  с (а,б) и 256 мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г) (длинный штрих –  $k = 0$ ; круглые точки  $k = 500$  (а,б), 128 (в,г); сплошная линия  $k = 999$  (а,б), 255 (в,г)).

Как видно из рис. 7, совокупный ОС заметно мигрирует по дальности. Флуктуации ОС в различных элементах разрешения по дальности также различны в процессе наблюдения: имеются как относительно стабильные элементы, так и интенсивно флуктуирующие. Для турбулентной атмосферы флуктуации происходят с меньшим временем корреляции и с большей интенсивностью.

На рис. 8 показан результат КН и НН при времени наблюдения 1 с и 256 мс. Несмотря на то, что пик сигнала при КН сформировался правильно, эффективность КН из-за флуктуаций сигнала оказалась низкой. Об этом свидетельствует сравнение амплитуды сигналов на выходе ВПО (рис. 7) и после КН (рис. 8а, в), а также то, что результат КН за время 256 мс оказался существенно лучше, чем за время 1 с.



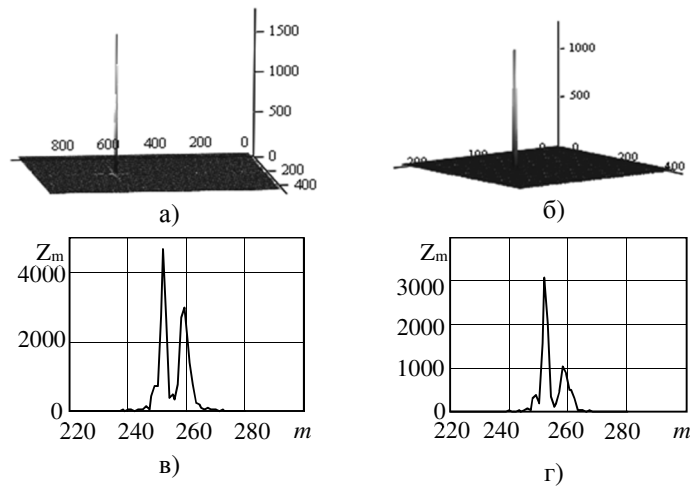


Рис. 8. Трехмерное РЛИ цели при КН в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты (а, б) и результат НН (в, г) для цели F15 при времени наблюдения 1 с (а, в) и при 256 мс (б, г) в случае турбулентности ясной погоды

На рис. 9 для числа учитываемых перекрестных членов  $N = 64$  в (4) и двух элементов разрешения с наибольшей амплитудой ОС с индексами  $m = 252, 258$  приведены зависимости решающей статистики (4), формируемой при оценке (5) междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций ОС для различных значений доплеровского сдвига частоты  $\delta F$  относительно доплеровского сдвига частоты, обусловленного движением центра масс цели. Оценки проводились при среднем на интервале наблюдения отношении сигнал/шум на выходе ВПО по БТ с  $m = 252, 258$ , равным  $-13$  дБ и  $-15$  дБ, соответственно.

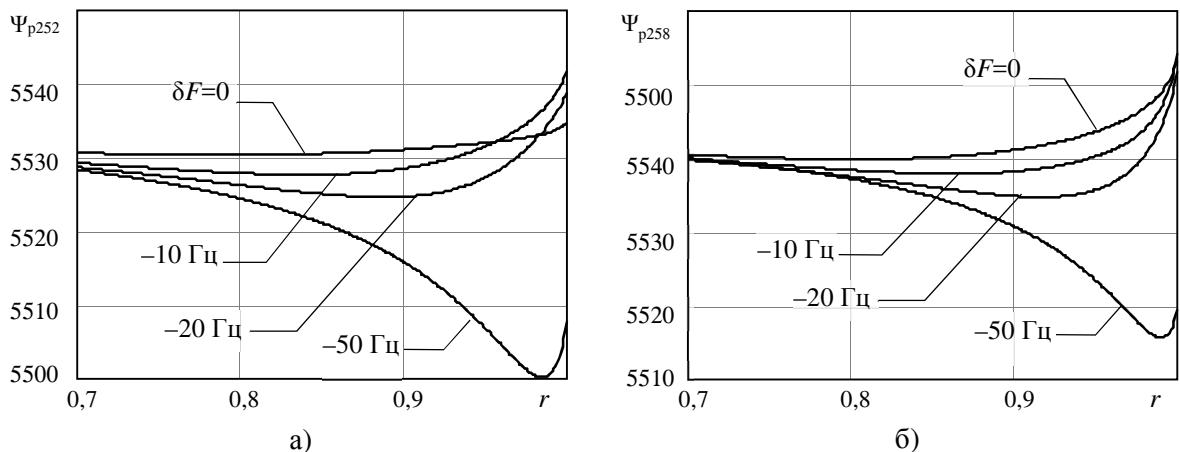


Рис. 9. Зависимость решающей статистики (4) от междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций для различных значений доплеровского сдвига частоты

Выборочные коэффициенты корреляции флуктуаций отраженного сигнала, определенные статистическим усреднением при отсутствии шума, составили  $\hat{r}_{252} = 0,997$  и  $\hat{r}_{258} = 0,996$ . Оценки (5) при указанных выше значениях ОСШ составили  $\hat{r}_{252} = 0,994$  и  $\hat{r}_{258} = 0,988$  при смещении оценки частоты относительно доплеровского сдвига частоты центра масс цели около  $-50$  Гц (смещение по скорости  $-0,75$  м/с). Указанное смещение обусловлено угловым движением БТ относительно центра масс.

Отметим, что при указанных значениях  $\hat{r}_m$  время оценки  $\hat{\tau}_m = -T_r / \ln \hat{r}_m$  времени корреляции флуктуаций ОС составит  $\hat{\tau}_m = 166$  мс и  $\hat{\tau}_m = 83$  мс. Полученные значения превышают известные данные для времени корреляции флуктуаций ОС для среднеразмерной цели порядка десятков мс [5]. Вместе с тем, данные [5] относятся к узкополосному зондирующему сигналу. В настоящем случае, так как протяженность элемента разрешения по дальности в  $5 \dots 7$  раз меньше радиального размера цели, отражение формируется небольшим (одной-тремя) БТ, поэтому время корреляции флуктуаций возрастает.

На рис. 10а для тех же исходных данных, что и на рис. 8, приведен вид функций  $\Lambda_{252}(Q_\phi)$ ,  $\Lambda_{258}(Q_\phi)$  для элементов разрешения, где находится сигнал, и, для сравнения,  $\Lambda_{200}(Q_\phi)$ , где сигнал отсутствует. Штрихпунктирной линией на рис. 10а обозначен порог при вероятности ложной тревоги  $10^{-6}$ . Оптимальным при  $m=252$  является разделение общей продолжительности наблюдения на  $Q_\phi=4$  фрагмента по 250 мс, но для элемента разрешения с наибольшей амплитудой обнаружение будет происходить и при других значениях  $Q_\phi$ . Сигнал от цели (рис. 10б) после обработки хорошо выделяется на фоне шумов.

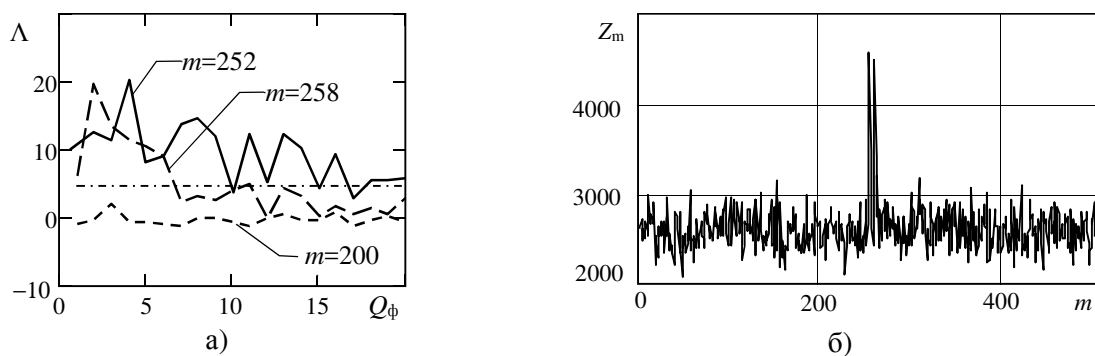


Рис. 10. Зависимость  $\Lambda_m$  от числа фрагментов  $Q_\phi$  (а) и выходной сигнал системы обработки (б) при  $Q_\phi=4$

Отметим, что предлагаемый вариант перебора по числу  $Q_\phi$  фрагментов, на которые разделяется принимаемая реализация в вычислительном плане может оказаться предпочтительнее предварительной совместной оценки коэффициента корреляции ОС и доплеровского сдвига частоты согласно (5).

### Заключение

Разработанные способы обеспечивают возможность накопления и обнаружения сигнала, отраженного от многоэлементной радиолокационной цели в ситуациях, когда цель испытывает угловые рыскания в турбулентной атмосфере, а изменение дальности и радиальной скорости цели на интервале наблюдения существенно превышают размеры элементов разрешения по соответствующим параметрам. Применение способов целесообразно для повышения дальности обнаружения при низких отношениях сигнал/шум.

### Литература:

1. Козлов, С. В. Модель и базовый алгоритм длительного когерентного накопления отраженного сигнала при ненулевых высших производных дальности до радиолокационной цели / С. В. Козлов, Ле Ван Кыонг // Доклады БГУИР. – 2021. – № 2. – С. 49–57.
2. Ле Ван Кыонг. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / С. В. Козлов, 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/ Ю.П. Доброленский – 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.
5. Охрименко, А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба/ А.Е. Охрименко. Ч. 1. – М., 1983. – 456 с.
6. Shirman, Y.D. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual/ Y.D. Shirman. Artech House, Boston, London, 2002. – 69 p.
7. Shirman, Y.D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection & Tracking/ Y.D. Shirman. Artech House, Boston, London, 2001. – 294 p.
8. Адаптивное к корреляционным характеристикам отраженного сигнала устройство междупериодной обработки / С. А.Габец, С. Ю. Седышев // Изв. НАН РБ. 2015.– № 4. – С.100–106.