

УДК 621.396.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ 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 результаты анализа эффективности алгоритмов некогерентной и комбинированной обработки при длительном накоплении (ДН) отраженного сигнала (ОС) от многоэлементной радиолокационной цели типа «самолет». Показана необходимость и предложена процедура адаптивной оценки междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала после компенсации миграции дальности и частоты в каждом отчете по дальности. С использованием математического моделирования показано, что предлагаемые алгоритмы обеспечивают возможность обнаружения сигнала, отраженного от многоэлементной цели при угловых рысканиях последней в условиях низких, менее минус 10 дБ, отношениях сигнал/шум на выходе внутривычислительной обработки (ВПО).

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

В [1] приведены разработанные на основе [2] алгоритмы длительного накопления (ДН) отраженного сигнала (ОС) для РЛС высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолета. Цель настоящей работы – выявление и обсуждение основных закономерностей указанного накопления. Используемые исходные данные и обозначения соответствуют [1].

Закономерности накопления отраженного сигнала при детерминированной модели рысканий

На рис.1. приведены формируемые при длительном когерентном накоплении радиолокационные изображения (РЛИ) цели с параметрами согласно [1] при $T_{\text{кн}}=256$ мс, периоде повторения импульсов РЛС $T_r=1$ мс, числе импульсов в пачке $Q = T_{\text{кн}} / T_r$ и длине волны $\lambda=10$ см при гипотетическом случае отсутствия угловых рысканий цели и различной степени рассогласования параметров движения цели и параметров системы обработки. Цель совершала разворот с ускорением $3g$, отношение сигнал/шум на выходе внутривычислительной обработке (ВПО) по одной блестящей точке цели составляло $-10,9$ дБ, разрешение по дальности, радиальной скорости и ускорению составляло 3 м, 0,2 м/с и 0,78 м/с², соответственно. Горизонтальная ось на рисунках соответствует доплеровскому сдвигу частоты, вертикальная – дальности.

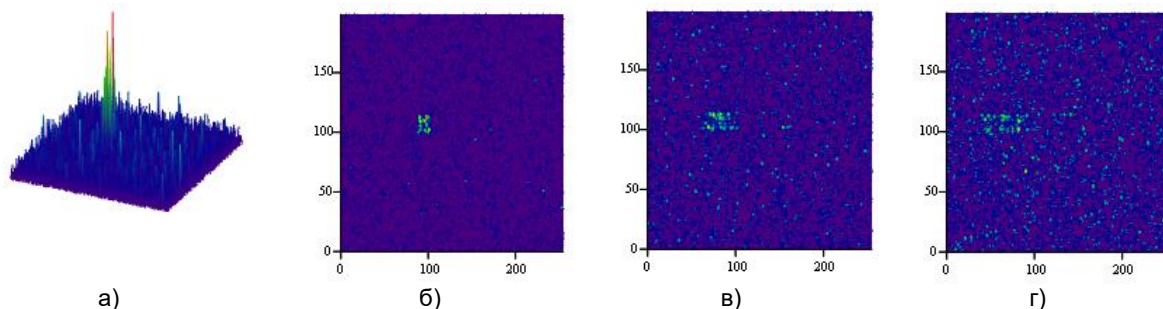


Рисунок 1 - Трехмерное (а) и яркостное (б-г) РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при точном (а, б) согласовании параметров системы обработки и рассогласовании по ускорению 20 м/с² (в) и 40 м/с² (г)

Как видно из рис.1, 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 РЛИ по дальности соответствует наблюдаемой радиальной протяженности объекта. Размер РЛИ по частоте определяется разностью доплеровских частот отдельных блестящих точек (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.

На рис.2-4 приведены формируемые РЛИ при точном совпадении с параметров системы обработки с параметрами движения центра масс самолета и различных периодах рыскания $T_{рыск}$ при когерентном, некогерентном и комбинированном накоплении. Отношение сигнал/шум по одной БТ на выходе ВПО составляло минус 10,9 дБ, общее число БТ 19, потенциальное ОСШ по всей продолжительности наблюдения для гипотетического случая когерентного суммирования отраженных от всех блестящих точек сигналов составляет 26 дБ. Пунктирной линией для случаев некогерентного и комбинированного накопления показан порог, сформированный исходя из предположения о нормализации фона при вероятности ложной тревоги 10^{-6} . Комбинированное накопление реализовывалось путем разделения интервала наблюдения на 8 подпачек. Сглаживание осуществлялось в экспоненциальном фильтре с постоянной времени, равном удвоенному значению периода (10 нс) дискретизации. 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.

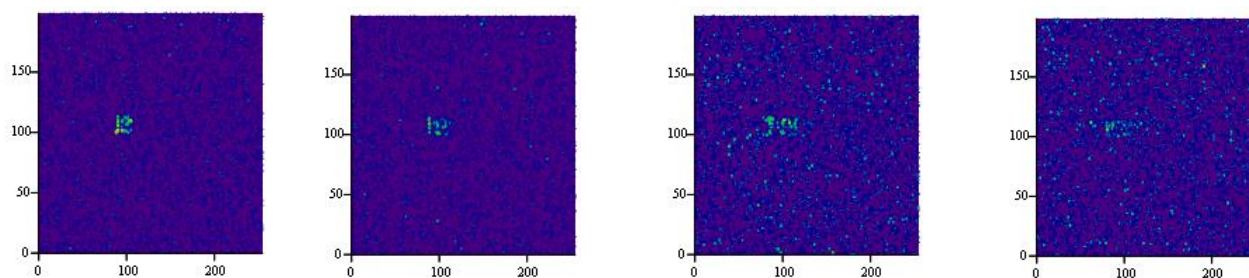


Рисунок 2 - РЛИ цели в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с при когерентном накоплении

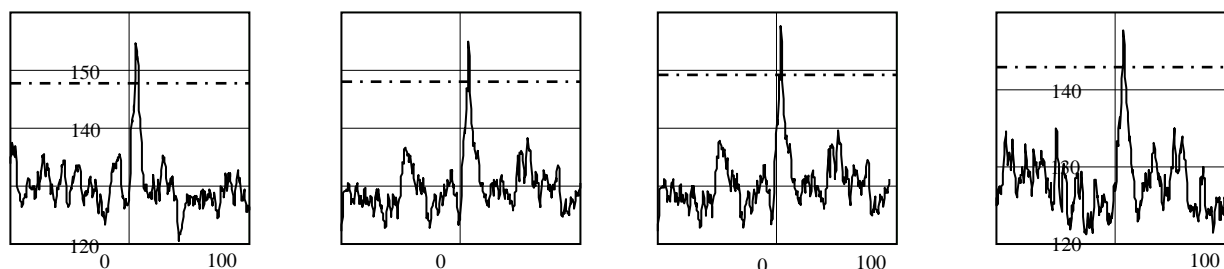


Рисунок 3 - Результат некогерентного накопления при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с

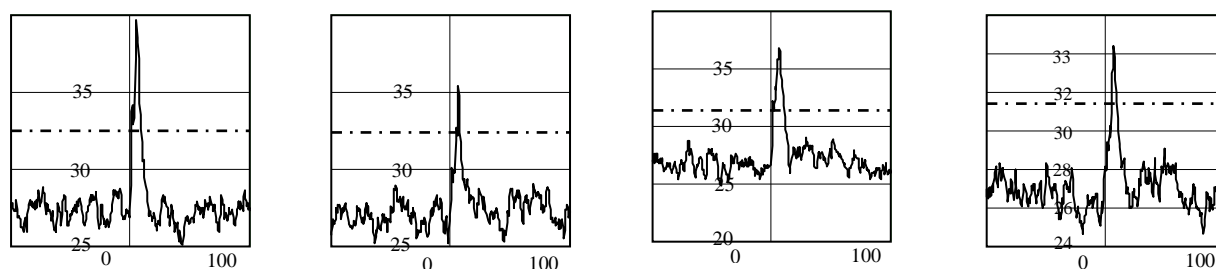


Рисунок 4 - Результат комбинированного накопления при периоде рысканий 2, 1, 0,5 и 0,25 с

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- при достаточно малой угловой скорости рысканий с периодом повторения $T_{рыск} = 2$ с РЛИ объекта при когерентном накоплении 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 когерентного накопления становится затруднительным;
- при некогерентном и комбинированном накоплении уверенное обнаружение цели обеспечивается для всех значений периода угловых рысканий;
- качество некогерентного накопления по данной цели, оцениваемое визуально по выходному сигналу, примерно соответствует качеству комбинированного накопления; в данном случае это можно объяснить интерференцией сигналов, отраженных от различных блестящих точек цели, что приводит к возникновению «доплеровского шума» и случайному перемещению сигнала по доплеровским фильтрам при комбинированном накоплении; однако среднее квадратическое отклонение «шумовой» дорожки в элементах разрешения по дальности, где блестящие точки цели отсутствуют, несколько меньше, чем для некогерентного накопления; как будет показано ниже, если блестящие точки цели

разрешаются по дальности, то комбинированное накопление более эффективно, чем некогерентное накопление, причем число подпачек, на которые разбивается общий интервал наблюдения необходимо выбирать в соответствии с интервалом рысканий (временем нахождения сигнала в доплеровском фильтре при разделении на подпачки) по аналогии с выбором времени когерентного накопления по флуктуирующему сигналу [3].

Таким образом, предложенные [1] алгоритмы обеспечивает возможность обнаружения сигнала, отраженного от многоэлементной цели при угловых рысканиях последней в условиях низких, менее минус 10 дБ, отношениях сигнал/шум на выходе внутривычислительной обработки для РЛС с высоким разрешением по дальности.

Закономерности накопления отраженного сигнала при случайных рысканиях цели при полете в турбулентной атмосфере

Рассмотренный выше случай ввиду использования гармонического изменения угловых рысканий является модельным и позволяет выявить основные закономерности длительного накопления отраженного сигнала. 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 длительного накопления отраженного сигнала с учетом турбулентности атмосферы необходима соответствующая модель отраженного сигнала. 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 [4] и развиваемом его учениками. Комплекс обеспечивает реализацию имитационной модели отраженных сигналов от маневрирующих аэродинамических объектов при узкополосном и сверхширокополосном зондировании в заданном диапазоне частот. В качестве входных параметров цели используются: координаты положения центра масс цели; координаты положения БТ относительно центра масс; параметры движения цели.

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

- наблюдаемые радиолокационные цели: тип-1 – среднеразмержный самолет, в качестве которого принимался заданный в программном комплексе объект типа F-15; тип-2 – крупноразмерный самолет, в качестве которого принимался заданный в программном комплексе объект типа B-52;

- 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 РЛС: зондирующие сигналы в виде когерентных пачек 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 РЛС, разрешающая способность РЛС по дальности много меньше радиальной протяженности объекта, поэтому цель занимает примерно 5-7 элементов разрешения по дальности. Результаты моделирования отраженных сигналов (шумы отсутствовали) на достаточно большом временном интервале до и после компенсации миграции дальности с использованием различных форм представления выходных результатов приведены на рис. 5-7. На рис. 5 приведена амплитудная огибающая ОС для различных значений номера k импульса пачки. Как видно из рис.5, ОС представляет собой совокупность некоторых комплексных амплитуд, относящихся к различным элементам разрешения по дальности. Положения максимумов в пределах строка дальности характеризуют миграцию дальности, которая в данном случае весьма значительна. Элементы радиолокационного портрета характеризуют радиальное распределение областей отражения объекта с учетом его конструктивных особенностей и вносят разный вклад в формирование отраженного сигнала. Флуктуация сигналов БТ также различны в процессе наблюдения: есть стабильные элементы, а есть - интенсивно флуктуирующие. При учете турбулентности атмосферы флуктуации происходят с меньшим временем корреляции и с большей интенсивностью. Особенно наглядно эффект миграции дальности и флуктуаций отраженного сигнала проявляется на ярком РЛИ в координатах «дальность – номер импульса пачки». Из рис. 7 видно, что эффект МД при указанном разрешении по дальности нужно учитывать даже при небольшом времени накопления. Яркая линия с изменяющейся интенсивностью заметно наклонена по отношению к горизонтальной оси. После компенсации МД (рис. 7 д-з) эта линия перпендикулярна горизонтальной оси, что обеспечивает возможность когерентного, комбинированного и некогерентного накопления в каждом элементе разрешения по дальности.

На рис. 8,9 показано формирование РЛИ при полностью когерентном накоплении (рис. 8) и некогерентном накоплении (рис. 9) при времени наблюдения 1 с и 256 мс. Несмотря на то, что пик

сигнала на выходе когерентного накопителя сформировался правильно, эффективность когерентного накопления оказалась низкой. Об этом свидетельствует сравнение амплитуды сигналов на выходе ВПО (рис. 5) и на выходе когерентного накопителя (рис. 8,9), а также то, что результат когерентного накопления за время 256 мс оказался существенно лучше, чем за время 1 с.

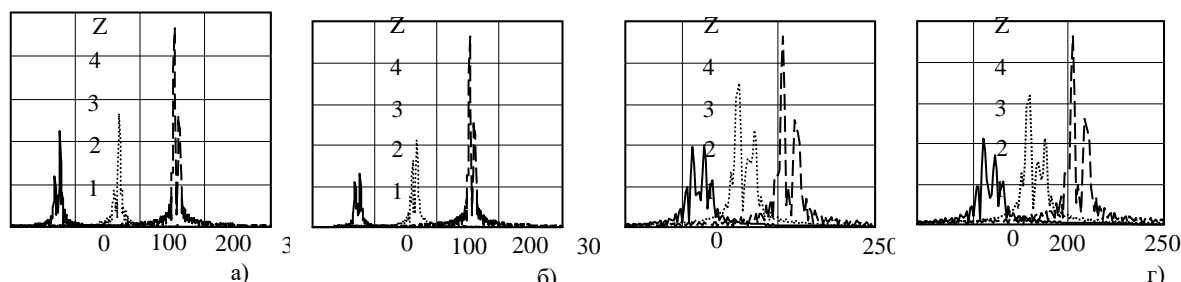


Рисунок 5 – Пример отраженного цели тип-1 сигнала на выходе ВПО при времени наблюдения $T_{KH} = 1$ с (а,б) и при $T_{KH} = 256$ мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г). (длинный штрих – $k = 0$; круглые точки $k = 500$ (а,б), 128 (в,г); сплошная линия $k = 999$ (а,б), 255 (в,г))

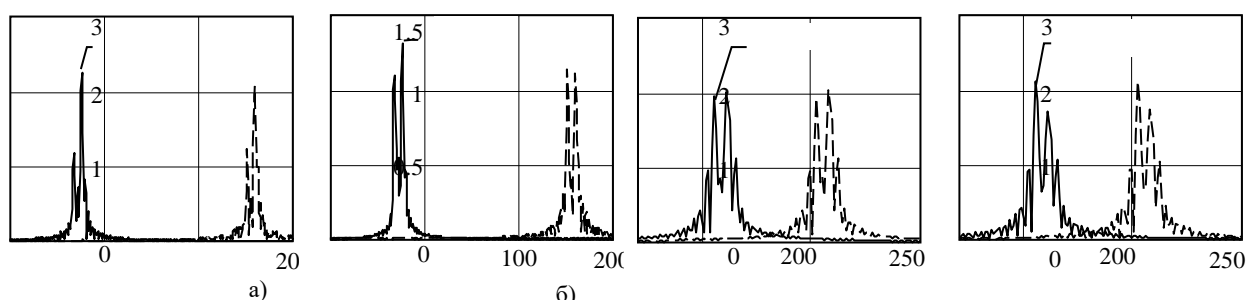


Рисунок 6 – Сигнал на выходе ВПО до (сплошная линия) и после (длинный штрих) компенсации миграции дальности при времени наблюдения $T_{KH} = 1$ с (а,б) и при $T_{KH} = 256$ мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г)

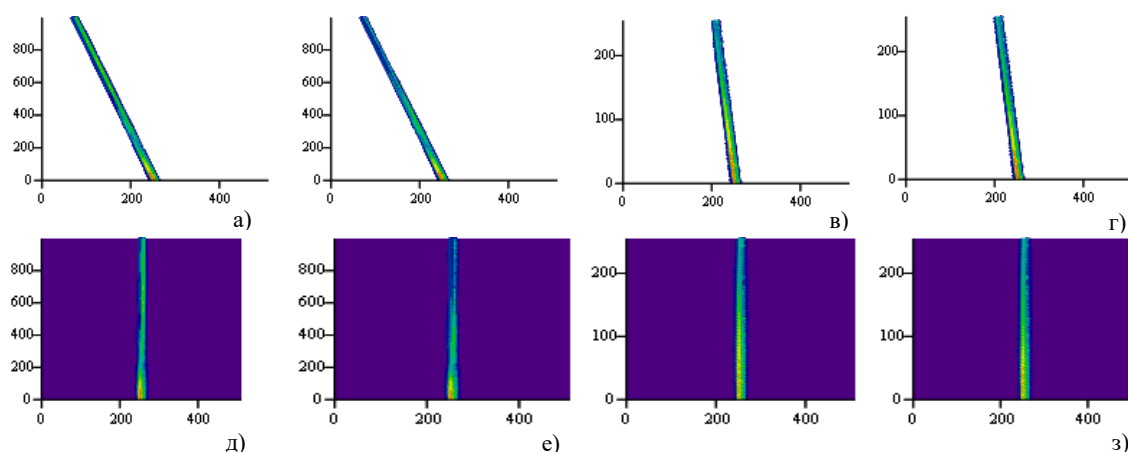


Рисунок 7 – Яркостное РЛИ на выходе ВПО в виде сигналов до (а-г) и после (д-з) компенсации миграции дальности при времени наблюдения $T_{KH} = 1$ с (а, б, д, е) и при $T_{KH} = 256$ мс (в,г, ж, з) в случаях без учета атмосферы (а, в, д, е) и турбулентности ясной погоды (б, г, е, з)

Некогерентное накопление с компенсацией миграции дальности (рис. 9) менее чувствительно к флуктуациям отраженного сигнала. В результате некогерентного накопления на выходе системы обработки сформировался устойчивый дальномерный портрет цели, протяженность которого по уровню 0,5 примерно совпадает с продольной протяженностью цели.

В соответствии с [3] для отраженных сигналов с произвольным флуктуациями при реализации комбинированного накопления необходимо использовать строго определенное соотношение между временем когерентного и некогерентного накопления.

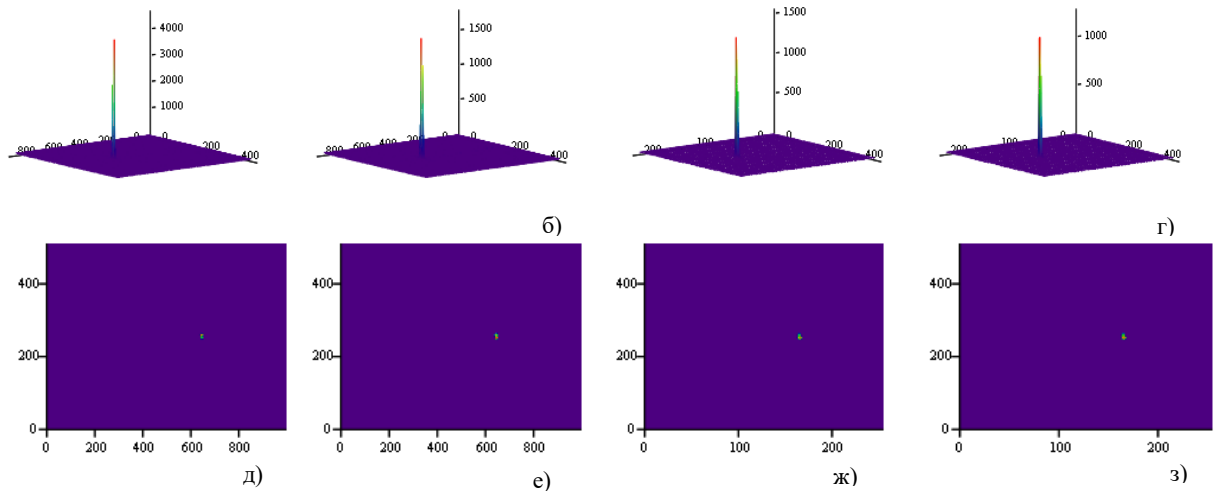


Рисунок 8 - Трехмерное (а-г) и яркостное (д-з) РЛИ самолета F15 в координатах дальность-доплеровский сдвиг частоты при времени наблюдения $T_{\text{КН}} = 1$ с (а, б, д, е) и при $T_{\text{КН}} = 256$ мс (в, г, ж, з) в случаях без учета атмосферы (а, в, д, е) и турбулентности ясной погоды (б, г, е, з)

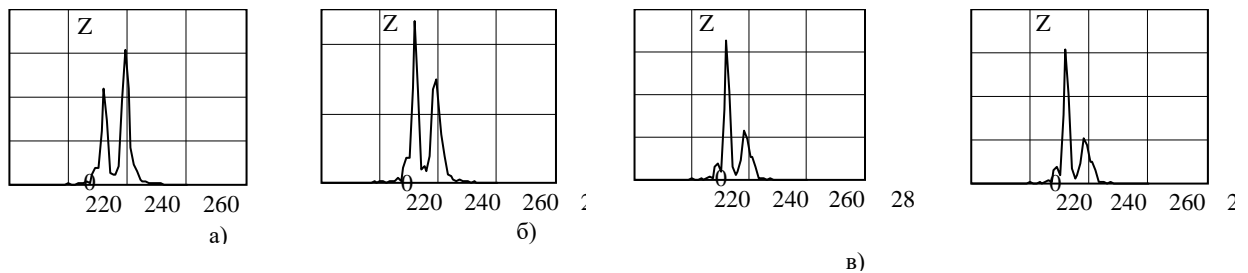


Рисунок 9 - Результат некогерентного накопления при времени накопления $T_{\text{КН}} = 1$ с (а,б) и при $T_{\text{КН}} = 256$ мс (в,г) в случаях без учета атмосферы (а,в) и турбулентности ясной погоды (б,г)

На рис. 10 приведен вид выходного сигнала при одной и той же реализации при комбинированном накоплении с различным числом Q_1 подпачек (рис. 10 а, б, в), на которые разбивается общее время наблюдения, и при некогерентном накоплении. В качестве показателя эффективности при комбинированном накоплении примем величину

$$\beta = \frac{Z_{\text{max}} - \bar{Z}_{\text{ш}}}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где Z_{max} - максимальное значение результатов комбинированного накопления; $\bar{Z}_{\text{ш}}, \sigma_{\text{ш}}$ - среднее значение, среднее квадратическое отклонение результатов накопления для отсчетов, где присутствует только шум. Величина β является аналогом отношения сигнал/шум при когерентном накоплении, причем, с учетом нормализации порог при обнаружении сигнала $\ell = \bar{Z}_{\text{ш}} + \sigma_{\text{ш}} \Phi^{-1}(1 - F_{\text{лт}})$, где $\Phi^{-1}(\bullet)$ - функция, обратная интегралу вероятности вида $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt$, $F_{\text{лт}}$ - вероятность ложной тревоги.

В табл. 1 для тех же исходных данных, что и на рис. 10 приведены оценки $\sigma_{\text{ш}}$ и параметра β , полученные для наиболее мощной блестящей точки цели. Из приведенных результатов видно, что оптимальным (при заданной дискретности оценивания) является разделение общей продолжительности наблюдения на $Q_1=4$ подпачек, при котором шумовые отсчеты и отсчет, содержащий отраженный сигнал, разделяются наилучшим образом.

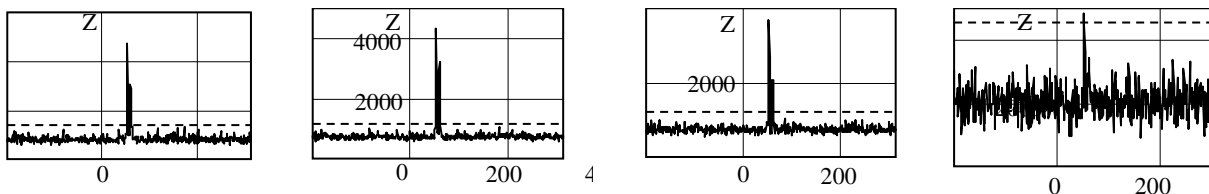


Рисунок 10 - Результат комбинированного накопления при изменении числа подпачек, на которые разбивается пачка $Q_1=2$ (а), $Q_1=10$ (б), $Q_1=4$ (в) и некогерентного накопления (г).

Таблица 1 – СКО шума и параметр эффективности комбинированного некогерентного накопления

Параметр	Комбинированное накопление			некогерентное накопление
	$Q_1 = 2$	$Q_1 = 10$	$Q_1 = 4$	
$\sigma_{\text{ш}}$	57.549	120.56	70.331	884.53
β	41.927	24.19	48.429	6.285

Алгоритм оценивания междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций

Так как междупериодные коэффициенты корреляции флуктуаций сигналов для различных элементов разрешения по дальности, в которых находится отраженный от цели сигнал, различны и априори неизвестны, возникает необходимость их адаптивного оценивания по принятой реализации [6, 7].

С учетом специфики, обусловленной предварительной компенсацией миграции дальности и частоты, возможный алгоритм оценки заключается в следующем. Оценим мощность ОС, попадающего в m -м отсчет дальности. С учетом возможности оценки мощности шума по все «шумовой дорожке» на участках, где сигнала нет, оценку $\hat{P}_{\text{ш}}$ мощность шума считаем известной с высокой точностью $\hat{P}_{\text{ш}} \rightarrow P_{\text{ш}}$.

Так как с учетом некоррелированности сигнала и шума $\frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\dot{U}_{m,k}|^2 \approx \hat{P}_{C_m} + P_{\text{ш}}$, где $\dot{U}_{m,k}$ -

отсчеты сигнала на выходе ВПО после компенсации миграции дальности, то наиболее простой алгоритм оценки мощности ОС имеет вид

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

Отметим, что в соответствии с (2) 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).

$$\psi_m(r) = \mathbf{u}_m^+ \mathbf{R}^{-1}(r) \mathbf{u}_m + \ln |\mathbf{R}(r)|, \quad (3)$$

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; $\mathbf{R}(r)$ - оценка корреляционной матрицы (КМ) суммы флуктуирующего сигнала и шума с элементами

$$R_{k_1, k_2} = r^{|k_1 - k_2|} e^{j2\pi F_{DS}(k_1 - k_2) T_r} \hat{P}_{C_m} + \begin{cases} P_{sh}, & \text{при } k_1 = k_2; \\ 0, & \text{при } k_1 \neq k_2, \end{cases} \quad (4)$$

где F_{DS} - доплеровский сдвиг частоты, который полагается известным.

При типовых значениях $r = 0,7 \dots 0,95$ 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 (3) путем суммирования по главной диагонали матрицы и $N-1$ перекрестным элементам в столбце от главной диагонали. Для этого вычисляется редуцированная корреляционная матрица $\mathbf{R}_p(r)$ флуктуирующего сигнала размером $N \times N$ элементов согласно (4) и проводится ее обращение $\mathbf{Q}_p(r) = \mathbf{R}_p^{-1}(r)$. В полученной матрице $\mathbf{Q}_p(r)$ далее используется только первый столбец.

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

$$\psi_{p_m}(r) = \sum_{k=0}^{K-1} Q_{p0,0} |\dot{U}_{m,k}|^2 + 2 \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-n-1} Q_{p0,n} \dot{U}_{m,k} \dot{U}_{m,k+n}^* + \frac{K}{N} \ln |R_p(r)|. \quad (5)$$

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

$$\hat{r}_m = \underset{r}{\operatorname{argmax}} \psi_{p_m}(r). \quad (6)$$

На рис. 11 приведены зависимости решающей статистики $\psi_{p_m}(r)$ для двух элементов разрешения, где находятся компоненты отраженного сигнала, отраженного от радиолокационных целей тип-1,2. Зависимости приведены для различных значений размерности N учитываемых перекрестных членов решающей статистики (5).

Как видно из рис. 11а-б, для крупноразмерной цели значение коэффициента междупериодной корреляции флуктуаций отраженного сигнала изменяется в пределах 0,7...0,9, то есть отраженный сигнал в каждом элементе разрешения имеет относительно малое время корреляции флуктуаций. Для среднеразмерной цели (рис. 11 в-г) значение междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала изменяется в пределах 0,988...0,996, то есть время корреляции флуктуаций отраженного сигнала намного больше. После оценивания междупериодного коэффициента корреляции отраженного сигнала по каждому из элементов разрешения (отсчету по дальности) определяется время T_{KH_m} когерентного накопления и число Q_1 подпачек, на которые разделяется общая длительность наблюдения

$$T_{KH_m} = -\frac{T_r}{\ln(\hat{r}_m)}; \quad Q_1 = \frac{KT_r}{T_{KH_m}}. \quad (7)$$

и проводится оптимальное комбинированное накопление отраженного сигнала в каждом из элементов разрешения по дальности. Результат сравнивается с адаптивно формируемым порогом, определяемым заданной вероятностью ложных тревог, оценкой \hat{P}_Σ мощности шума и особенностями логики накопления при предлагаемом варианте длительного комбинированного накопления (суммированием максимумов квадратов модулей результатов когерентного накопления в подпачках [1]).

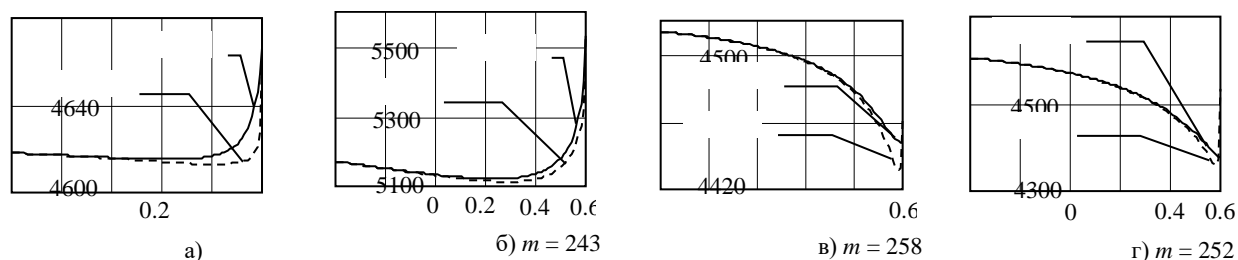


Рисунок 11- зависимости решающей статистики (5) от коэффициента корреляции для отраженных сигналов для цели тип-2 (а-б) и тип-1 (в-г) для различных значений номера m элемента разрешения в строке дальности

При этом цель считается обнаруженной, если произошло обнаружение хотя-бы в одном элементе разрешения по дальности. Несколько более упрощенный подход может заключаться в:

- предварительной локализации области $m_1...m_2$ нахождения цели по отсчетам быстрого времени, например, по оценкам (2) мощности ОС;
- оценкам коэффициента междупериодной корреляции ОС согласно (6) и вычислении среднего из них;
- определении оптимального в среднем времени когерентного накопления в соответствии с (7) и комбинированном накоплении отраженных сигналов.

Для этого случая применительно к цели тип-1 на рис. 12 приведен сигнал на выходе ВПО до компенсации миграции дальности в виде яркостного РЛИ и результат длительного накопления при оценке среднего значения междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала 0,996. Отношение сигнал/шум по самой мощной блестящей точке цели на выходе ВПО составляло -10 дБ, число накапливаемых импульсов $K = 1000$. Как видно из рис. 12а, по яркостному РЛИ на выходе ВПО обнаружение цели, например, оператором, невозможно: на РЛИ отсутствует характерная наклонная линия (см. рис. 7) повышенной в сравнении с фоном яркости. Неэффективным является и некогерентное накопление после компенсации миграции дальности (рис. 12б). В то же время при комбинированном накоплении после компенсации миграции дальности и адаптивной оценкой среднего значения междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций, отраженный сигнал хорошо выделяется на фоне шума (рис. 12в).

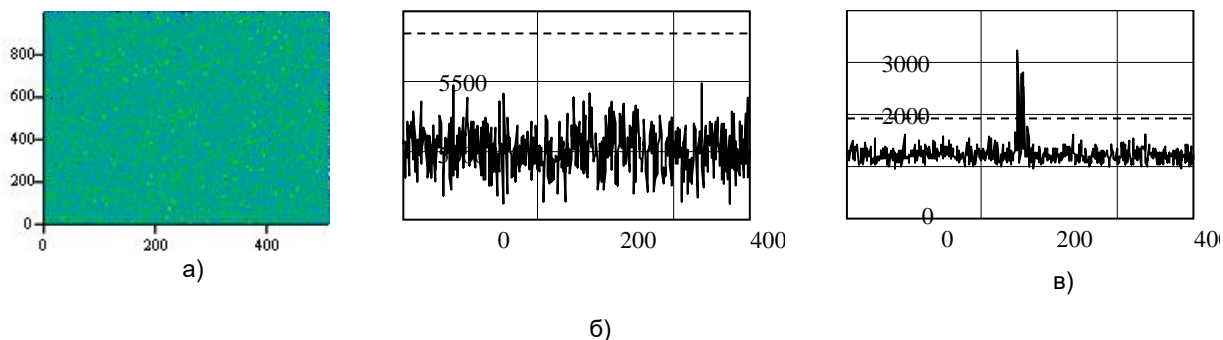


Рисунок 12 - Яркостное РЛИ (а), результаты некогерентного (б) и комбинированного (в) накопления при среднем значении междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала 0,9

Выводы

Из приведенного выше анализа можно сделать следующие выводы:

- применительно к РЛС с высоким разрешением по дальности при решении задачи обнаружения типовых радиолокационных целей – самолетов при длительном накоплении отраженных сигналов необходима предварительная компенсации миграции дальности и доплеровской частоты; указанная компенсация может быть эффективно выполнена в спектральной области с использованием предлагаемых [1,2] алгоритмов;

- время корреляции флуктуаций отраженных сигналов в различных отсчетах по дальности в пределах радиальной протяженности цели зависит от большого числа факторов: номера отсчета по дальности, ракурса наблюдения, динамики взаимного изменения взаимного пространственного положения цели и РЛС, типа цели, характеристик атмосферы и т.д., в связи с чем после компенсации миграции дальности необходима адаптивная оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала в каждом отсчете дальности;

- адаптивная оценка междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала в каждом отсчете дальности после компенсации миграции дальности и частоты достигается путем решения оптимизационной задачи, предусматривающей оценку средних мощностей шума и отраженного сигнала, вычисления редуцированной корреляционной матрицы суммы флуктуирующего сигнала и шума и вычисления решающей статистики для всех возможных значений междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала;

- получение оценки междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций обеспечивает возможность близкого к оптимальному времени когерентного накопления отраженного сигнала с использованием алгоритма комбинированного накопления [1] с учетом угловых рысканий цели, предусматривающего суммирование максимумов квадратов модулей результатов когерентного накопления в подпачках; при выборе правильного числа подпачек, на которые разбивается общая длительность радиолокационного наблюдения, комбинированное накопление существенно более эффективно, чем некогерентное накопление;

- при длительном комбинированном накоплении в РЛС с высоким разрешением по дальности возможно формирование качественного дальностного портрета, протяженность которого коррелирована с радиальной протяженностью цели.

Таким образом, предлагаемые алгоритмы длительного накопления отраженных сигналов в РЛС с высоким разрешением по дальности с компенсацией миграций дальности и частоты и адаптивной оценкой междупериодного коэффициента корреляции флуктуаций отраженного сигнала обеспечивают существенное повышение возможностей радиолокационного наблюдения радиолокационных целей типа «самолет» при низких отношениях сигнал/шум. Существенное изменение дальности и скорости цели, а также ее угловые рыскания в турбулентной атмосфере на интервале радиолокационного контакта с целью не являются препятствиями для длительного накопления отраженного сигнала.

Список использованных источников:

1. Алгоритмы длительного накопления отраженного сигнала для РЛС с высоким разрешением по дальности с учетом угловых рысканий самолетов / Ле Ван Кыонг // В настоящем сборнике.
2. Экономичные алгоритмы длительного когерентного накопления отраженного сигнала при наличии миграции по дальности и ее производным / Козлов С. В., Ле Ван Кыонг // материалы Республиканской научно-практической конференции, Минск, БГУИР, 28-29 октября 2020 г.–С.173-177.
3. Охрименко А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Часть 1. Основы радиолокации. Военное издательство министерства обороны СССР, Москва 1983, 456 с.
4. Shirman Y.D. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual. Artech House, Boston, London, 2002, 69 p.
5. Shirman Y.D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, & Tracking. Artech House, Boston, London, 2001, 294p.
6. Характеристики обнаружения радиолокационного приемника, учитывающего корреляционные свойства отраженного сигнала / Габец С. А., Седышев С. Ю // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2014.– № 1 (42). – С.81–87.
7. Адаптивное к корреляционным характеристикам отраженного сигнала устройство междупериодной обработки / Габец С. А., Седышев С. Ю. // Изв. НАН РБ.2015.– № 4. – С.100–106.

UDC 621.396.2

EFFICIENCY OF LONG-TERM ACCUMULATION OF A REFLECTED SIGNAL FOR HIGH-RANGE RESOLUTION RADARS TAKING INTO ACCOUNT ANGULAR YAW OF AIRCRAFT

Le Van Cuong

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V – D. Sci., associate professor

Annotation. The results of the analysis of the efficiency of algorithms for incoherent and combined processing with long-term accumulation of the reflected signal from a multi-element radar target of the "airplane" type are presented. The necessity is shown and the procedure of adaptive estimation of the inter-period correlation coefficient of fluctuations of the reflected signal after compensation of the range and frequency migration in each range report is proposed. Using mathematical modeling, it is shown that the proposed algorithms provide the possibility of detecting a signal reflected from a multi-element target at angular yaw of the latter in conditions of low, less than minus 10 dB, signal-to-noise ratios at the output of intraperiodic processing.

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