

УДК 621.396.67

ОПТИМАЛЬНАЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СЕЛЕКЦИЯ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ ДВИЖУЩИХСЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ, НА ФОНЕ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.К.Волосюк¹⁾, д-р техн. наук, А.А. Шаповалов²⁾

¹⁾ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"*,

²⁾ *Харьковский институт ВВС им. И. Кожедуба*

Получены алгоритмы оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов, отраженных от воздушных целей. Рассмотрены необходимые операции обработки сигналов, их последовательность и физический смысл. Представлены структурные схемы систем селекции воздушных целей на фоне земной поверхности. Обоснована возможность синтеза апертуры по подвижным целям.

* * *

Отримано алгоритми оптимальної та квазіоптимальної обробки сигналів, відбитих від повітряних цілей. Розглянуто необхідні операції обробки сигналів, їхня послідовність і фізичний зміст. Представлено структурні схеми систем селекції повітряних цілей на фоні земної поверхні. Обґрунтовано можливість синтезування апертури по рухливих цілях.

* * *

Received algorithm optimum and quasioptimum processing the signals reflected from air integer. Considered necessary operations on processing the signals, their sequence and physical sense. Presented structured system scheme to breedings air integer on background terrestrial surface. Motivated possibility synthesis aperture on rolling purposes.

Постановка проблемы. В последнее десятилетие значительное развитие получила тенденция создания многорежимных и многофункциональных разведывательно-ударных и разведывательных комплексов летательных аппаратов, способных решать самые различные задачи аэрокосмической разведки, картографирования земной поверхности, навигации, обнаружения и сопровождения как воздушных, так и наземных целей. При этом одна из важнейших ролей при решении таких задач отводится радиолокационным станциям с синтезированной апертурой (РСА). Однако в силу специфики решаемых задач этими РСА введение в них дополнительных режимов работы связано с трудностями как алгоритмического, так и системотехнического характера. В данной работе выполнены исследования возможности функционирования РСА в режиме пространственно-временной селекции воздушных целей с одновременным осуществлением операции синтеза апертуры по этим целям.

Решение данной проблемы имеет важное значение для построения современных многофункциональных комплексов летательных аппаратов (ЛА) и

связано с основными задачами научно-исследовательских работ Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского „ХАИ” и Харьковского Института Военно-Воздушных Сил.

Анализ последних достижений в этой области показал, что исследования в области создания многофункциональных РСА, в том числе многолучевых систем с режимами селекции воздушных целей, весьма актуальны. О состоянии таких работ имеются лишь поверхностные сведения [2,3]. Ряд важных результатов в этом направлении были опубликованы в работах [1,4]. В работе [1] были рассмотрены задачи выделения изображений подповерхностных слоев земной поверхности на фоне отражений от ее верхнего покрова. Полученные алгоритмы могут быть применены и для селекции сигналов, отраженных от воздушных объектов. Однако, поскольку оптимизация обработки была выполнена лишь по отношению к выделению сигналов, рассеянных подповерхностными слоями почв, то эти алгоритмы по отношению к выделению сигналов, отраженных от воздушных целей, несмотря на их очевидность и кажущуюся эффективность, не являются оптималь-

ними.

Постановка задачі. Цель данной работы – синтез оптимальных алгоритмов обработки сигналов, отраженных от движущихся воздушных целей, и выделения их на фоне отражений от земной поверхности. Особенностью этих алгоритмов является учет межпериодного накопления импульсов, эквивалентного синтезу апертуры по подвижным целям. Предполагаем, что воздушные цели находятся в нижней полусфере, между самолетом и земной поверхностью. Полагается также, что сигналы принимаются той же антенной решеткой, с помощью которой в других режимах работы РСА осуществляется картографирование верхнего покрова земной поверхности или ее подповерхностных слоев.

Как и в работах [1,4], на первых этапах решения оптимизационной задачи вместо реальной антенной решетки (АР) здесь рассмотрен идеализированный континуальный раскрыв D' , в котором возможна раздельная регистрация и обработка колебаний, принятых в каждой его точке $\vec{r}' \in D'$.

Уравнение наблюдения в данном случае аналогично уравнению (1) в [1], с той лишь разницей, что полезным сигналом $S(t, \vec{\lambda})$ является сигнал, отраженный от движущейся воздушной цели. Это уравнение имеет вид

$$u(t, \vec{r}') = s(t, \vec{\lambda}, \vec{r}') + n_1(t, \vec{r}') + n_2(t, \vec{r}').$$

Здесь полезный сигнал определяется выражением

$$\begin{aligned} s(t, \vec{\lambda}, \vec{r}') &= \text{Re} \dot{A} \left(t - \frac{2R_0}{c} \right) \times \\ &\times \exp \left\{ j \left[(\omega_0 \pm \omega_d) t - 2kR_0 - k\vec{\Theta}_{\text{ц}} \vec{r}' \right] \right\} = \\ &= \dot{S}(t, \vec{\lambda}, \vec{r}') \exp(j\omega_0 t) = \\ &= \dot{S}(t, \vec{\lambda}) \exp(j\omega_0 t) \exp(-jk\vec{\Theta}_{\text{ц}} \vec{r}'), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{A}(\cdot)$ – комплексная огибающая зондирующего сигнала, ω_d – доплеровский сдвиг частоты, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $\vec{\Theta}_{\text{ц}} = (\vartheta_{\text{цх}}, \vartheta_{\text{цy}}) = (\cos \theta_{\text{цх}}, \cos \theta_{\text{цy}})$ – вектор направляющих косинусов в направлении на цель, R_0 – расстояние до цели.

Помеховый сигнал $n_1(t, \vec{r}')$ обусловлен отраже-

ниями от земной поверхности

$$n_1(t, \vec{r}') = \text{Re} \int_D \dot{F}(t, \vec{r}) \dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}') d\vec{r}, \quad \vec{r}(x, y) \in D. \quad (2)$$

Здесь $\dot{F}(t, \vec{r}) d\vec{r}$ – комплексный коэффициент рассеяния элемента поверхности $d\vec{r}$; $\dot{s}_0(t, \vec{r}, \vec{r}')$ – единичный сигнал, форма которого определяется формой зондирующего сигнала, геометрией и движением летательного аппарата относительно земной поверхности. В данной постановке задачи полагаем, что коэффициент рассеяния $\dot{F}(t, \vec{r})$ зависит от времени. Это обусловлено флуктуациями во времени рассеивающих элементов поверхности, а также тем, что такой коэффициент различен при различных углах визирования, которые меняются при движении летательного аппарата относительно рассеивающих элементов поверхности.

Корреляционную функцию помехи можно представить в виде [5]

$$\begin{aligned} R_{n1}(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) &= \frac{1}{2} \text{Re} \rho(t_1 - t_2) \times \\ &\times \int_D \sigma^\circ(\vec{r}) \dot{s}_0(t_1, \vec{r}, \vec{r}'_1) \dot{s}_0^*(t_2, \vec{r}, \vec{r}'_2) d\vec{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

Эта корреляционная функция отличается от аналогичной функции [1] наличием множителя $\rho(t_1 - t_2)$ – коэффициента корреляции сигнала во времени, обусловленного наличием флуктуаций во времени коэффициента $\dot{F}(t, \vec{r})$.

Случайный процесс $n_2(t, \vec{r}')$ – процесс типа белого шума с корреляционной функцией $R_{n2}(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) = \frac{N_0}{2} \delta(t_1 - t_2) \delta(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2)$ моделирует внутренние шумы приемных устройств и шумы, обусловленные внешним фоном. Отсутствие корреляции процесса $n_2(t, \vec{r}')$ в точках \vec{r}'_1 и \vec{r}'_2 для дискретных раскрывов, т.е. антенных решеток, означает независимость шумов в отдельных каналах, подключенных к выходам элементарных антенн, входящих в состав АР.

Полагая процессы $n_1(t, \vec{r}')$ и $n_2(t, \vec{r}')$ гауссовскими, ищем решение задачи обнаружения цели и оценок ее параметров в рамках метода максималь-

ного правдоподобия

$$P(u/\bar{\lambda}) = \max,$$

$$\text{где } p(u/\bar{\lambda}) = k \exp \left\{ -\frac{1}{2} \int_0^T \int_{D'} \int_{D'} [u(t_1, \vec{r}_1') - s(t_1, \vec{r}_1', \bar{\lambda})] \times \right. \\ \left. \times W(t_1, t_2, \vec{r}_1', \vec{r}_2') [u(t_2, \vec{r}_2') - s(t_2, \vec{r}_2', \bar{\lambda})] d\vec{r}_1' d\vec{r}_2' dt_1 dt_2 \right\}.$$

Полагая, что параметры $\bar{\lambda} = (\omega_d, t_3, \bar{\Theta}_\Pi)$ являются неэнергетическими ($\bar{\Theta}_\Pi$ - угловые координаты цели), а также усредняя функционал правдоподобия по таким несущественным параметрам, как случайный множитель интенсивности и случайная начальная фаза, получим решающее правило вида

$$\left| \dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(\bar{\lambda}) \right| = \left| \int_0^T \int_{D'} \int_{D'} u(t_1, \vec{r}_1') W(t_1, t_2, \vec{r}_1', \vec{r}_2') \times \right. \\ \left. \times \dot{s}(t_2, \vec{r}_2', \bar{\lambda}) d\vec{r}_1' d\vec{r}_2' dt_1 dt_2 \right| = \max. \quad (4)$$

Здесь $u(t_1, \vec{r}_1')$ - вещественная функция; $\dot{s}(t_2, \vec{r}_2', \bar{\lambda})$ - комплексное представление сигнала.

Представляя функции $u(t_1, \vec{r}_1')$, $\dot{s}(t_2, \vec{r}_2', \bar{\lambda})$ в виде таких выражений:

$$u(t, \vec{r}') = \frac{\dot{U}(t, \vec{r}') \exp(j\omega_0 t) + \dot{U}^*(t, \vec{r}') \exp(-j\omega_0 t)}{2}, \\ \dot{s}(t, \vec{r}', \bar{\lambda}) = \dot{S}(t, \vec{r}', \bar{\lambda}) \exp(j\omega_0 t),$$

в соответствии с методом комплексных огибающих получим

$$\left| \dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(\bar{\lambda}) \right| = \frac{1}{2} \left| \int_0^T \int_{D'} \int_{D'} \dot{U}(t_1, \vec{r}_1') W(t_1, t_2, \vec{r}_1', \vec{r}_2') \times \right. \\ \left. \times \dot{S}^*(t_2, \vec{r}_2', \bar{\lambda}) d\vec{r}_1' d\vec{r}_2' dt_1 dt_2 \right|, \quad (5)$$

где $\dot{U}(t, \vec{r}')$ и $\dot{S}(t, \vec{r}', \bar{\lambda})$ - комплексные огибающие процессов $u(t, \vec{r}')$ и $\text{Re} \dot{s}(t, \vec{r}', \bar{\lambda})$.

Это выражение является в определенной мере общим и справедливым для решения многих задач оценки параметров полезных сигналов. Однако данное общее выражение при решении конкретных задач и, в частности, поставленной выше задачи, приобретает ряд новых свойств, характеризующих особенности построения алгоритмов для конкретной геометрии задачи.

Переходя к дискретному раскрытию, т. е. к антенной решетке, этот алгоритм можно записать в таком виде:

$$\left| \dot{Y}_{\text{ВЫХ}}(\bar{\lambda}) \right| = \left| \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}_m') \int_0^T W_{mn}(t_1, t_2) \times \right. \\ \left. \times \dot{S}_0^*(t_2, \bar{\lambda}) dt_2 dt_1 \exp jk\bar{\Theta}_n \vec{r}_n \right| = \max, \quad (6) \\ n = \overline{1, M}, \quad m = \overline{1, M}.$$

Здесь полагается, что многоканальный когерентный приемник позволяет формировать на выходах квадратурных детекторов комплексные огибающие $\dot{U}(t_1, \vec{r}_m')$, соответствующие выходам каждой m -й антенны.

Очевидно, что глобальный максимум выходного эффекта будет достигнут при достижении локальных максимумов по каждому из оцениваемых параметров t_3 , ω_d и $\bar{\Theta}_\Pi$. Одна из возможных схем реализации алгоритма (6) показана на рис.1. Полагаем, что в ней устройства весового интегрирования принятых колебаний выполнены по схеме фильтрации с импульсной характеристикой $\dot{h}_{WSmn}(t, \bar{\lambda})$, равной опорному сигналу $S_{Wmn}(t, \bar{\lambda})$

$$S_{Wmn}(t, \bar{\lambda}) = \dot{h}_{WSmn}(t, \bar{\lambda}) = \int_0^T W_{mn}(t, t_2) \dot{S}_0^*(t_2, \bar{\lambda}) dt_2.$$

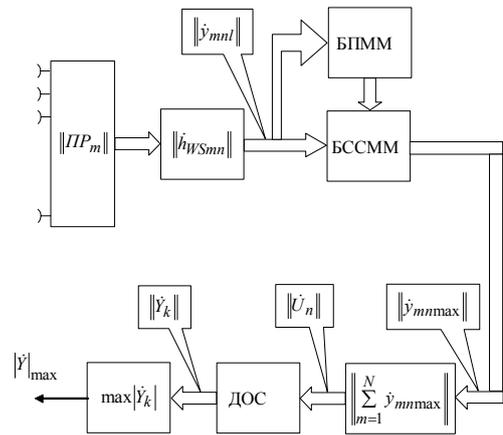


Рис. 1. Схема оптимальной обработки сигналов, отраженных от воздушных целей с устройством весового интегрирования

К каждой из антенн подключен когерентный приемник (ПП_м) с квадратурным детектором, на выходе которого имеем действительную и мнимую части комплексной огибающей $\dot{U}(t, \vec{r}_m')$. Выходные эффекты, модули которых максимальны

$$\dot{y}_{mn\max} = \int_0^T \dot{U}(t, \vec{r}'_m) h_{WSmn}(t, \vec{\lambda}) dt,$$

формируются на наборе различных доплеровских частот $\omega_{д1}, l = \overline{1, L}$, где шаг изменения параметра $\omega_{д}$ определяется заданной точностью оценки этой частоты, а число L – предполагаемым диапазоном изменения доплеровских частот. Таким образом, фильтрация, согласованная с сигналом $\dot{S}_0^*(t, \vec{\lambda})$, соответствует фильтрации сигнала на частоте $\omega_{д}$, а также накоплению сигнала на заданном времени задержки (дальности). Весовая функция $W_{mn}(t, t_2)$ соответствует спектральной режекции помехового сигнала, что эквивалентно его декорреляции (выбеливанию) во времени. Суммирование сигналов $\dot{y}_{mn\max}$ с весовыми функциями $W_{mn}(t, t_2)$ соответствует пространственной режекции (выбеливанию) помехи, т.е. формированию динамического (перемещающегося во времени) провала в направлении взаимодействия зондирующего сигнала с поверхностью

$$\dot{U}_n = \sum_{m=1}^M \dot{y}_{mn\max}.$$

Следующая операция суммирования:

$$\dot{Y}_k(\vec{\lambda}) = \sum_{n=1}^M \dot{U}_n \exp(jk\vec{\theta}_k \vec{r}'_n)$$

соответствует обычному диаграммообразованию, т.е. формированию луча, максимумом ориентированного на направление $\vec{\theta}_k$. Число таких лучей, покрывающих заданный сектор обзора, равно N . Оценка направления на цель осуществляется выбором номера луча и доплеровской частоты, для которых величина $|\dot{Y}_k(\vec{\lambda})|$ является максимальной. Эта же задача может быть выполнена путем последовательного просмотра заданного сектора обзора, т.е. сканированием.

Комплексные функции $\dot{y}_{mn\max}$, имеющие максимальное значение модуля на одной из доплеровских частот, формируются следующим образом. В блоке поиска максимума модуля комплексного чис-

ла \dot{y}_{mn} находится соответствующий канал, после чего управляющий сигнал поступает на блок селекции сигналов, имеющих максимум модуля (БССММ), который пропускает лишь тот комплексный сигнал, имеющий максимум его модуля. Это может быть блок управляемых ключей.

Основные операции, составляющие основу алгоритма (6), можно выполнить в иной последовательности:

$$|\dot{Y}_{\text{вых}}(\vec{\lambda})| = \left| \sum_{n=1}^M \int_0^T \dot{S}_0^*(t_2, \vec{\lambda}) \sum_{m=1}^M \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}'_m) \times W_{mn}(t_1, t_2) dt_1 dt_2 \exp(jk\vec{\theta}_{\text{цк}} \vec{r}'_n) \right|. \quad (7)$$

В соответствии с этим алгоритмом вначале выполняется на выходе каждой антенны операция выбеливания помехи во времени

$$\dot{x}_{mn}(t_2) = \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}'_m) W_{mn}(t, t_2) dt_1.$$

Затем выполняется операция выбеливания в пространстве, т.е. операция формирования управляющего провала, направленного на участок взаимодействия зондирующего излучения с поверхностью

$$\dot{z}_n(t_2) = \sum_{m=1}^M \dot{x}_{mn}(t_2).$$

Следующая операция – это согласованная фильтрация (блок СФ) сигнала $\dot{z}_n(t_2)$ в устройствах с импульсной характеристикой $\dot{S}_0^*(t_2, \vec{\lambda})$, настроенных на различные доплеровские частоты $\omega_{д1}, l = \overline{1, L}$ и осуществляющих накопление сигналов во времени, а также выборку соответствующего комплексного значения с максимальным значением его модуля

$$U_{n\max} = \int_0^T z_n(t_2) \dot{S}_0^*(t_2, \vec{\lambda}) dt_2.$$

Далее, как и в предыдущей схеме, идет диаграммообразование, т.е. формирование веера лучей, покрывающих заданный сектор обзора, и выборка максимума модуля сигнала, соответствующая оценке направления на цель. Схема, соответствующая этому алгоритму, изображена на рис.2. По степени сложности технической реализации эти схемы при-

мерно равноценны.

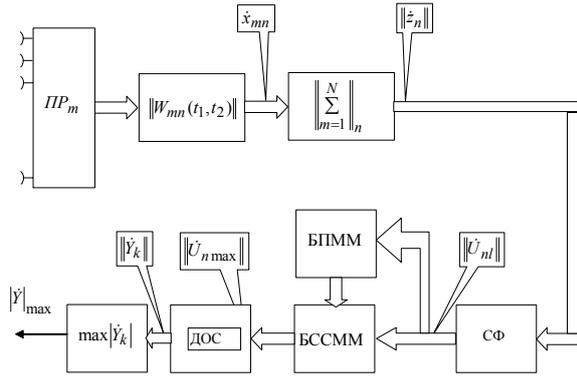


Рис. 2. Второй вариант схемы оптимальной обработки сигналов, отраженных от воздушных целей

Однако физическая интерпретация основных действий во втором случае является более наглядной.

Из общих структур этих схем видно, что процессы пространственной и временной обработки в ней практически неразделимы. Тем не менее, из физической сущности рассмотренных операций видно, что можно предложить достаточно эффективный квази-оптимальный алгоритм, существенно упрощающий схему обработки и обладающий большей физической интерпретацией основных операций.

Для этого формально разобьем процедуру формирования выходного эффекта (5) на два этапа: существенно пространственной и существенно временной и учтем, что принятый сигнал имеет вид (1). На этапе существенно пространственной обработки формируется выходной эффект

$$\dot{Y}_{D'}(t_1, t_2) = \int_{D'} \int_{D'} \dot{U}(t_1, \vec{r}_1') \times W(t_1, t_2, \vec{r}_1', \vec{r}_2') \exp(jk\vec{\Theta}_{ц} \vec{r}_2) d\vec{r}_1' d\vec{r}_2'. \quad (8)$$

На этом этапе обработка сигнала осуществляется в течение некоторого времени $t \in (0, T)$. Примем, что $t_1 = t_2 = t$, тогда

$$\dot{Y}_{D'}(t) = \int_{D'} \dot{U}(t, \vec{r}_1') \dot{S}_W^*(t, \vec{\Theta}_{ц}, \vec{r}_1') d\vec{r}_1', \quad (9)$$

$$\text{где } \dot{S}_W^*(t, \vec{\Theta}_{ц}, \vec{r}_1') = \int_{D'} W(t, \vec{r}_1', \vec{r}_2') \exp(jk\vec{\Theta}_{ц} \vec{r}_2') d\vec{r}_2' \quad (10)$$

- опорный сигнал пространственной обработки, определяющий как процедуру пространственной согласованной фильтрации процесса $\dot{U}(t, \vec{r}_1')$, так и его декорреляцию. Пусть функция W зависит от

разности аргументов $\vec{r}_1' - \vec{r}_2'$. Тогда \dot{S}_W является пространственной сверткой функции

$$\dot{S}_W^*(t, \vec{\Theta}_{ц}, \vec{r}') = \exp(jk\vec{\Theta}_{ц} \vec{r}') \otimes W(t, \vec{r}'). \quad (11)$$

Функцию \dot{S}_W^* по отношению к огибающей $\dot{U}(t, \vec{r}_1')$ можно рассматривать как АФР системы пространственной обработки принятого сигнала. Преобразование Фурье от АФР антенной системы дает ее диаграмму направленности. С другой стороны, поскольку функция \dot{S}_W^* является сверткой (11), то преобразование Фурье от этой функции представляет собой произведение двух диаграмм направленности

$$\dot{G}[\vec{\Theta}] = \dot{G}_{D'}(t, \vec{\Theta}) \cdot \dot{G}_W(\vec{\Theta}). \quad (12)$$

Рассмотрим диаграмму направленности $\dot{G}_{D'}(\vec{\Theta})$. Эта диаграмма направленности является преобразованием Фурье от АФР вида

$$\begin{aligned} \dot{I}(\vec{\Theta}, \vec{r}') &= I_0(\vec{r}') \exp(jk\vec{\Theta} \vec{r}'), I_0(\vec{r}') = \begin{cases} 1 & \vec{r}' \in D' \\ 0 & \vec{r}' \notin D' \end{cases} \\ \dot{G}_{D'}(\vec{\Theta}) &= F[\dot{I}(\vec{\Theta}, \vec{r}')] = \\ &= \int_{D'} \exp(jk\vec{\Theta}_{ц} \vec{r}') \exp(-jk\vec{\Theta} \vec{r}') d\vec{r}' = \\ &= \int_{D'} \exp(-jk(\vec{\Theta} - \vec{\Theta}_{ц}) \vec{r}') d\vec{r}'. \end{aligned} \quad (13)$$

Для прямоугольного раскрытия

$$\begin{aligned} \dot{G}_{D'}(\vec{\Theta} - \vec{\Theta}_{ц}) &= \int_{\frac{-X'}{2}}^{\frac{X'}{2}} \int_{\frac{-Y'}{2}}^{\frac{Y'}{2}} \exp(-jk(\vartheta_x - \vartheta_{цx})x') \times \\ &\times \exp(-jk(\vartheta_y - \vartheta_{цy})y') dx' dy' = \\ &= X'Y' \text{Sinc} \left[k(\vartheta_x - \vartheta_{цx}) \frac{X'}{2} \right] \text{Sinc} \left[k(\vartheta_y - \vartheta_{цy}) \frac{Y'}{2} \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Очевидно, что при отсутствии шумов одним из условий достижения максимума выходного эффекта (5) является совпадение направлений $\vec{\Theta} = \vec{\Theta}_{ц} - \vec{\Theta}_{цн}$, где $\vec{\Theta}_{цн}$ - направление, соответствующее истинному положению цели. Процедура формирования диаграммы направленности $\dot{G}_{D'}$ представляет собой процедуру пространственной согласованной фильтрации, т.е. фильтрации, согласованной с состав-

ляющей сигнала (1) $\exp(jk\bar{\Theta}_{ц}\bar{r}')$. Для поиска максимума выходного эффекта необходимо обеспечить либо параллельный обзор заданного сектора путем формирования веера диаграмм направленности (13) на различные направления $\bar{\Theta}_{цк}$, либо последовательный путем сканирования во времени. Однако такая операция пространственной обработки далека от оптимальной, хотя и является составляющей оптимального выходного эффекта (5). Возможности приближения этой операции к оптимальной будут рассмотрены позже. А сейчас рассмотрим физическую сущность второго сомножителя в (12).

Для определения вида диаграммы направленности $\dot{G}_W(\bar{\Theta})$ необходимо найти обратную корреляционную функцию $W(t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2)$. Эта функция находится из уравнения обращения

$$\int_{0D'} \int^T R(t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2) W(t_2, t_3, \bar{r}'_2, \bar{r}'_3) dt_2 d\bar{r}'_2 = \delta(t_1 - t_3) \delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_3). \quad (15)$$

Корреляционная функция помех

$$R_n = R_{n1}(t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2) + \frac{N_0}{2} \delta(t_1 - t_2) \delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2), \quad (16)$$

где R_{n1} определяется выражением (3).

Форма единичного сигнала существенно зависит от геометрии задачи, направления движения летательного аппарата относительно земной поверхности, а также от ограничений, накладываемых на режим функционирования антенной решетки.

В общем случае

$$\dot{s}_0(t, \bar{r}, \bar{r}') = \dot{G}(t, \bar{r}) \dot{A}[t - t_3(t, \bar{r}, \bar{r}')] \exp(j\omega_0(t - t_3(t, \bar{r}, \bar{r}'))), \quad (17)$$

где $\dot{G}(t, \bar{r})$ - диаграмма направленности антенной системы, облучающей поверхность, пересчитанная к координатам поверхности \bar{r} .

Время задержки $t_3(t, \bar{r}, \bar{r}')$ зависит от расстояния между точками \bar{r} и \bar{r}' , а также от изменения этого расстояния во времени t при движении летательного аппарата.

Полагаем, что выполняется условие пространственно - временной узкополосности, т.е. условие,

когда запаздыванием огибающей на краях апертуры D' можно пренебречь:

$$\dot{s}_0(t, \bar{r}, \bar{r}') = \dot{S}_0(t, \bar{r}) \exp(-jk\bar{\Theta}(\bar{r})\bar{r}') \exp(j\omega_0 t), \quad \dot{S}_0(t, \bar{r}) = \dot{G}(t, \bar{r}) \dot{A}[t - t_3(t, \bar{r})] \exp(j\omega_0(t - t_3(t, \bar{r}))), \quad (18)$$

$$\text{тогда } R_{n1}(t_1, t_2, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2) = \frac{1}{2} \text{Re} \rho(t_1 - t_2) \int_D \sigma^\circ(\bar{r}) \times \dot{S}_0(t_1, \bar{r}, \bar{r}'_1) \dot{S}_0^*(t_2, \bar{r}, \bar{r}'_2) \exp[jk\bar{\Theta}(\bar{r})(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2)\bar{r}] d\bar{r}. \quad (19)$$

При $t_1 = t_2$ корреляционная функция

$$R_{n1}(t, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2) = \frac{1}{2} \text{Re} \rho(t_1 - t_2) \times \int_D \sigma^\circ(\bar{r}) |\dot{S}_0(t_1, \bar{r})|^2 \exp[jk\bar{\Theta}(\bar{r})(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_2)\bar{r}] d\bar{r}$$

или

$$R_{n1}(t, \Delta\bar{r}') = \frac{1}{2} \text{Re} \rho(t_1 - t_2) F \left\{ \sigma^\circ(\bar{r}(\bar{\Theta})) |\dot{S}_0(t_1, \bar{r}(\bar{\Theta}))|^2 \right\} \quad (20)$$

является пространственным преобразованием Фурье от углового распределения интенсивности отраженного сигнала

$$V(t, \bar{\Theta}) = \sigma^\circ(\bar{\Theta}) |\dot{S}_0(t, \bar{\Theta})|^2. \quad (21)$$

Соотношение (20) является аналогом теоремы Ван Циттерта-Цернике, применимым для описания случайных сигналов в радиолокации [7]. Это выражение соответствует угловому распределению интенсивности отражений от участка поверхности, смещаемого со скоростью света вследствие отражения от поверхности D , движущегося в пространстве зондирующего импульса длиной $\Delta R = c\tau_u/2$ (τ_u - длительность импульса).

Для выяснения сущности пространственной декорреляции помех выделим пространственную часть интегрального уравнения обращения

$$\int_{D'} R_n(t, \bar{r}'_1, \bar{r}'_2) W(t, \bar{r}'_2, \bar{r}'_3) d\bar{r}'_2 = \delta(\bar{r}'_1 - \bar{r}'_3). \quad (22)$$

Полагая, что интервал корреляции процесса $n_1(t, \bar{r}') + n_2(t, \bar{r}')$ значительно меньше размеров раскрыва D' и применяя пространственное преобразование Фурье к обеим частям интегрального уравнения (22), получим

$$\dot{G}_W(t, \bar{\Theta}) = \frac{1}{\sigma^\circ(\bar{\Theta}) |\dot{S}_0(t, \bar{\Theta})|^2 + \frac{N_0}{2}}, \quad (23)$$

т. е. пространственное преобразование Фурье от функции $W(t, \bar{r}'_2 - \bar{r}'_3)$ в соответствии с выражения-

ми (11, 12) совпадает с диаграммой направленности \dot{G}_W в произведении (12).

Минимум (провал) в диаграмме направленности имеет место там, где находится максимум функции $W(t, \vec{\vartheta})$, т.е. в том направлении, в котором в текущий момент времени t с поверхностью D взаимодействует зондирующий сигнал. Форма этого провала определяется формой функции $|\dot{S}_0(t - t_3(\vartheta))|^2$.

Для выяснения характера временной обработки (фильтрации) принятых сигналов рассмотрим ту часть выходного эффекта $Y(\vec{\lambda})$, которая связана с интегрированием принятых колебаний во времени. Заметим еще раз, что выходной эффект не факторизуется отдельно на пространственную и временную обработку сигналов. Эти операции неразделимы и выполняются совместно. Однако приближенное раздельное рассмотрение пространственной и временной обработки позволяет глубже понять их физическую сущность и реализовать упрощенные квазиоптимальные алгоритмы. Тем не менее, даже такая раздельная обработка приводит к алгоритмам пространственной фильтрации, зависящим от времени, и к алгоритмам временной фильтрации, зависящим от пространственных координат \vec{r}' .

Временная часть алгоритма (5) имеет вид

$$\dot{Y}_T = \int_0^T \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}'_1) W(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) \dot{S}^*(t_2, \vec{\lambda}) dt_1 dt_2, \quad (24)$$

где $\dot{S}^*(t, \vec{\lambda})$ определяется выражением (1).

Этот алгоритм можно записать также и в таком виде:

$$\dot{Y}_T = \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}'_1) \dot{S}_W^*(t_1, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) dt_1, \quad (25)$$

$$\text{где } \dot{S}_W(t_1, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) = \int_0^T W(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) \dot{S}(t_2, \vec{\lambda}) dt_2. \quad (26)$$

Для формирования опорного сигнала S_W необходимо найти обратную корреляционную функцию W . Пусть $\vec{r}'_1 = \vec{r}'_2 = \vec{r}' = 0$. Из уравнения обращения выделим временную его часть и найдем лишь временную обратную корреляционную функцию для

процесса, регистрируемого в начале координат $\vec{r}' = 0$.

Прямая корреляционная функция

$$R_{n1}(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) = \frac{1}{2} \text{Re} \rho(t_1 - t_2) \times \times \sigma^\circ(t_1) \int_{T_3 D} \dot{S}_0(t_1 - t_3) \dot{S}_0^*(t_2 - t_3) d\vec{r}. \quad (27)$$

Полагаем, что время задержки $t_3 = t_3(\vec{r})$, $\vec{r} \in D$ однозначно связано с дальностью от точки $\vec{r}' = 0$ до точки \vec{r}' . В этой формуле предполагается, что на интервале пересечения функций \dot{S}_0 в окрестностях $t_3 = t_2$ с поверхностью D величина удельной ЭПР σ^0 практически постоянна и ее можно вынести за знак интеграла в точке $t_1 = t_2$. Это выражение отчетливо указывает на нестационарный характер помехи, обусловленный зависимостью от координат $\vec{r}(t_3)$.

Полагая функцию $\sigma^0(t)$ медленной по сравнению с единичным сигналом \dot{S}_0 , пользуясь методом «замороженных» параметров [6], найдем энергетический спектр процесса $n_1(t, \vec{r}') + n_2(t, \vec{r}')$, как спектр нестационарного случайного процесса

$$G_R(\omega, t) = \sigma^\circ(t) F \left[\rho(t_1 - t_2) \Psi(t_1 - t_2) + \frac{N_0}{2} (t_1 - t_2) \right] = = \sigma^\circ(t) G_\rho(\omega) \otimes |\dot{S}_0(j\omega)|^2 + \frac{N_0}{2}, \quad (28)$$

где $G_\rho(\omega) \otimes |\dot{S}_0(j\omega)|^2$ – свертка образа Фурье функции $\rho(t_1 - t_2)$, ответственной за временные флуктуации элементов поверхности, с образом Фурье функции

$$\int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_0(t) \dot{S}_0^*(t + \tau) dt,$$

являющейся функцией неопределенности единичного сигнала. Заметим, что в общем случае спектр единичного сигнала определяется не только спектром зондирующего сигнала, но и доплеровскими смещениями спектральных линий, обусловленными движением ЛА относительно поверхности.

Решая временную часть уравнения обращения методом преобразования Фурье, полагая, что интер-

вал корреляции процесса $n_1(t, \vec{r}') + n_2(t, \vec{r}')$ значительно меньше интервала наблюдения $(0, T)$, находим, что

$$\dot{G}_W(t, \omega) = \frac{1}{\sigma^0(t) \dot{G}_p(\omega) \otimes |\dot{S}_0(j\omega)|^2 + \frac{N_0}{2}},$$

а выходной эффект в спектральной форме

$$Y(\lambda) = F^{-1} \left\{ \frac{\dot{U}(j\omega) \dot{S}_{\text{ш}}^*[j(\omega - \omega_d)]}{\sigma^0(t) \dot{G}_p(\omega) \otimes |\dot{S}_0(j\omega)|^2 + \frac{N_0}{2}} \right\}.$$

Числитель в этом выражении указывает на согласованную фильтрацию принятого сигнала во времени, согласованную со спектром полезного сигнала. Так как ω_d обычно неизвестна, то она должна быть оценена путем поиска в многоканальной системе максимального значения соответствующего эффекта. В более сложных случаях при изменении этой частоты во времени она может быть оценена методами оптимальной динамической фильтрации, как правило, нелинейной, или методами квазиоптимальной фильтрации в системах фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) в следящих измерителях скорости движения цели.

Знаменатель указывает на необходимость режекции помех в спектральной области. В этом плане могут быть использованы классические методы СДЦ с компенсаторами среднего доплеровского сдвига частоты, обусловленного движением ЛА относительно земной поверхности. Этот вопрос можно не обсуждать, так как он достаточно полно освещен в соответствующей литературе, например в [7].

Однако здесь имеет место весьма существенный момент в процессе обработки, связанный с зависимостью во времени удельной ЭПР $\sigma^0(t)$. Эта функция, стоящая в знаменателе, указывает, что коэффициент передачи системы во времени должен уменьшаться пропорционально увеличению $\sigma^0(t)$. Так как при наклонном зондировании часть времени сигнал движется в свободном пространстве и лишь через некоторое время начинает взаимодействовать с землей, то резкое уменьшение коэффициента пе-

редачи должно осуществляться через время $t_3 = 2R_D/c$, где R_D – дальность до поверхности в заданном направлении. Это можно выполнить после диаграммообразования, т.е. образования веера лучей, или в процессе сканирования путем соответствующего стробирования приемника.

Следующим моментом, скрытым в неявной форме в операции согласованной фильтрации во времени в сочетании с предшествующей пространственной обработкой, является возможность синтезирования апертуры по отношению к движущейся цели при условии, что ее скорость или закон изменения скорости во времени известны. Если же скорость неизвестна, то процедуры синтезирования апертуры по отношению к цели и оценки ее скорости могут быть совмещены.

Факторизовать пространственно-временную обработку отдельно на пространственную и временную можно, представив обратно-корреляционную функцию $W(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2)$ для дискретного раскрытия в виде

$$W(t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2) = W_{mn} W(t_1, t_2).$$

Тогда алгоритмы (6), (7) можно упростить и записать следующим образом:

$$\begin{aligned} |\dot{Y}_k(\vec{\lambda})| &= \left| \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^M \int_0^T \int_0^T \dot{U}(t_1, \vec{r}'_m) W_{mn} \times \right. \\ &\times W(t_1, t_2) \dot{S}^*(t_2, \vec{\lambda}) dt_2 dt_1 \exp(jk \vec{\Theta}_{\text{шк}} \vec{r}'_n) \Big| = \\ & \left| \int_0^T \dot{S}^*(t_2, \vec{\lambda}) \int_0^T W(t_1, t_2) \sum_{n=1}^M \left(\sum_{m=1}^M \dot{U}(t_1, \vec{r}'_m) W_{mn} \right) \times \right. \\ & \left. \times \exp(jk \vec{\Theta}_{\text{шк}} \vec{r}'_n) dt_2 dt_1 \right|. \end{aligned}$$

Обозначим результаты основных операций этапа пространственной обработки

$$\begin{aligned} \dot{U}_W(t_1, n) &= \sum_{m=1}^M \dot{U}(t_1, \vec{r}'_m) W_{mn}, \\ \dot{Y}_{D'}(t_1, k) &= \sum_{n=1}^M \dot{U}_W(t_1, n) \exp(jk \vec{\Theta}_{\text{шк}} \vec{r}'_n). \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} |\dot{Y}_k(\vec{\lambda})| &= \left| \int_0^T \dot{S}^*(t_2, \vec{\lambda}) \int_0^T W(t_1, t_2) \dot{Y}_{D'}(t_1, k) dt_2 dt_1 \right| = \\ &= \left| \int_0^T \dot{Y}_{D'}(t_1, k) \int_0^T W(t_1, t_2) \dot{S}^*(t_2, \vec{\lambda}) dt_1 dt_2 \right|. \end{aligned}$$

Одна из возможных схем такой квазиоптимальной обработки, являющейся существенно более простой, чем предыдущие, показана на рис.3.

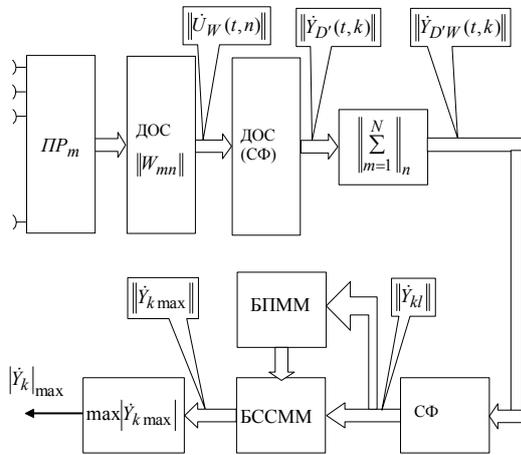


Рис.3. Схема квазиоптимальной обработки сигналов отраженных от воздушных целей

Заключение

Таким образом, в данной работе получены алгоритмы оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов, отраженных от воздушных целей. Установлены необходимые операции обработки сигналов, их последовательность и физический смысл. Разработаны структурные схемы систем селекции воздушных целей на фоне земной поверхности. Обоснована возможность синтезирования апертуры по подвижным целям.

Результаты выполненной работы позволили определить ряд перспективных направлений дальнейших исследований. Такими направлениями являются, прежде всего, направления, связанные с исследованием совместных оценок координат целей и их скорости в режиме сопровождения и синтезирования апертуры.

Литература

1. Шаповалов А.А., Волосюк В.К. Оптимизация пространственно-временной обработки сигналов в многофункциональных РЛС подповерхностного картографирования и обнаружения воздушных целей // Открытые информационные и интегрированные компьютерные технологии. – Х., ХАИ, 2002. –

Вып. 17.

2. Лифанов Ю.И., Саблин В.Н., Федоринов А.Н., Шапошников В.И. Направления развития современных радиолокационных средств и систем разведки наземных целей // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – М., 1998. - № 5.- С. 3-14.- № 6.- С. 3-17.- № 7.-С. 3-9.

3. Саблин В.Н., Викулов О.В., Меркулов В.И. Авиационные многопозиционные радиолокационные системы многоканального наведения. Разведывательно-ударные комплексы // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – М., 1998. - № 9. - С. 3-31

4. Шаповалов А.А., Волосюк В.К. Оптимальная пространственная селекция изображений верхнего покрова и подповерхностных слоёв земной поверхности // Открытые информационные и интегрированные компьютерные технологии. –Х., ХАИ, - 2002.– Вып. 14. – С. 91-98.

5. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Математические методы моделирования физических процессов в задачах дистанционного зондирования Земли //Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. -Ч.1. – М., 2000. - №8. - С. 3–80.

6. Первачев С.В., Валуев А.А., Чиликин В.М., Статическая динамика радиотехнических следящих систем. – М.: Сов. радио, 1973.

7. Теоретические основы радиолокации/ Коростелев А.А., Клюев Н.Ф., Мельник Ю.А. / Под ред. В.Ф. Дулевича -М.: Сов. радио, 1978. -608 с.

8. Фалькович С.Е. Оценка параметров сигнала. - М.: Сов. радио, 1970. -336 с.

9. Бакут П.А., Большаков И.А. Герасимов Б.Н. и др. Вопросы статистической теории радиолокации: В 2 т. Т.2, - М: Сов. радио, 1964. -1080 с.

Поступила в редакцию 18.02.03

Рецензент: канд. техн. наук, доцент Бледнов В.И., ХИВВС, г. Харьков.