

ВОПРОСЫ КЛАССИФИКАЦИИ ВХОДЯЩИХ В АТМОСФЕРУ ЭЛЕМЕНТОВ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ РАКЕТ ПО ИНФОРМАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ

А.А. Толкачев, В.Е. Фарбер, ЛООТ "Радиофизика", Россия

Одной из важнейших задач, стоящих перед современными РЛС, работающими с баллистическими ракетами, входящими в атмосферу, является классификация элементов баллистических ракет (ЭБР) на основные и ЭБР помехового фона, отличающихся от основных большим значением баллистического коэффициента. При решении этой задачи путем использования различий в величине аэродинамического торможения элементов возможны несколько подходов. Рассмотрим два из них.

Первый подход состоит в том, что многоканальная РЛС на внеатмосферном участке траектории полета обеспечивает обнаружение всех пересекающих заданную зону ответственности ЭБР, формирование измерений дальности и угловых координат и сопровождение каждого из обнаруженных ЭБР (поэлементное сопровождение). На атмосферном участке полета в процессе сопровождения формируется оценка баллистического коэффициента $\bar{\gamma}$ и ее дисперсия $\sigma^2(\bar{\gamma})$ и при достижении заданной точности

$$\sigma^2(\bar{\gamma}) \leq \delta^2 \bar{\gamma}^2 \quad (1)$$

производится сравнение $\bar{\gamma}$ с граничным значением $\gamma_{\text{гр}}$ и при $\bar{\gamma} \leq \gamma_{\text{гр}}$ данный ЭБР причисляется к классу основных. Этот подход требует для своей реализации высоких точностей измерения дальности и угловых координат и возможности одновременного измерения координат всех ЭБР.

$$H = -(1,15 / \beta) \lg \left\{ 8\sigma^2(R) TV(\beta \sin \theta)^5 / \rho_3^2 \delta^2 \gamma^2 \right\} \quad \sin \theta = |\dot{H}| / V \quad (3)$$

где: $\sigma^2(R)$ - дисперсия ошибок измерения дальности;
 $\rho(H) = \rho_3 \exp\{-\beta H\}$ плотность атмосферы на высоте

Второй подход основан на использовании зондирующих сигналов, обеспечивающих разрешение ЭБР радиальной скорости. Поскольку радиальные скорости движения ЭБР помехового фона уже в верхних слоях атмосферы отличаются от скоростей движения основных ЭБР, то использование таких сигналов позволяет, в принципе, обеспечить классификацию путем фильтрации отраженного сигнала в полосе частот, определяемой радиальными скоростями движения основных ЭБР. При этом фильтрацию можно проводить до обнаружения и сопровождения, что существенно снижает требования к программно-алгоритмическому обеспечению и канальности РЛС. Этот подход требует высоких точностей измерения доплеровских сдвигов частот.

Дадим количественную оценку эффективности этих способов классификации ЭБР.

При поэлементном сопровождении значение высоты, на которой выполняется критерий (1) для РЛС, обеспечивающей измерение дальности и угловых координат, зависит как от точностей измерений, так и от движения ЭБР относительно РЛС. В случае движения ЭБР в направлении на РЛС [1]

$$\sigma^2(\bar{\gamma}) = 8\delta^2(R) TV(\beta \sin \theta)^5 / \rho(H), \quad (2)$$

а указанное значение высоты определяется соотношениями

$$H(\rho_3 = 1.22 \text{ кг} / \text{м}^3, \beta^{-1} = 7.17 \text{ км})$$

Число H - значение скорости движения и скорости снижения ЭБР, T - период измерения координат каждого ЭБР, θ угол входа ЭБР в атмосферу.

В качестве иллюстрации для характерного случая $\sigma^2(R) = 7 \text{ м}^2$, $T=0.1\text{s}$, $V=5\text{км}/\text{s}$,

$\delta = 0.1$, $\theta = 30^\circ$ в табл.1 приведена зависимость значений H от γ .

Таблица 1

$\gamma [\text{м}^2 / \text{кг}]$	0	0^{-1}	0^{-2}	0^{-3}	0^{-4}
$H [\text{км}]$	35	19	03	96	70

Входящий в выражения (2) и (3) период измерения координат T зависит от выделенного на обслуживание ЭБР количества зондирующих посылок. У многоканальных РЛС, предназначенных для сопровождения большого количества элементов, период излучения $T_0 \ll T_1$. В этих условиях существует возможность повышения высоты, на которой происходит выполнение критерия достижения требуемой точности (1) за счет перераспределения во времени выделенного количества зондирующих импульсов на основе решения задачи оптимального быстродействия наблюдения за входящими в атмосферу ЭБР на интервале наблюдения γ при ограниченном ресурсе на измерение $\tau_\Sigma < T_H$. В [1] показано, что для достижения заданной точности оценки баллистического коэффициента за минимальное время T_H необходимо, чтобы все выделенные для измерения зондирующие импульсы были сосредоточены в конце интервала наблюдения $(0, T_H)$ с максимально возможной частотой. Из полученных в [1] результатов, в частности, следует, что для обеспечения десятикратного повышения точности оценки γ при равномерном плане наблюдений необходимо, чтобы ЭБР снизился относительно начальной высоты на 8.25км, а при

оптимальном плане - на 4.88км, т.е. выигрыш по высоте составляет 3.37км.

В случае ненулевого значения угла φ между вектором скорости и направлением на РЛС, значение высоты, на которой выполняется критерий (1) также определяется соотношением (3) с той лишь разницей, что вместо $\sigma^2(R)$ в него следует подставить величину

$$\sigma^2 = \left\{ \frac{\cos^2 \varphi}{\sigma^2(R)} + \frac{\sin^2 \varphi}{\sigma^2(A)R} \right\}^{-1},$$

где $\sigma^2(A)$ - дисперсия ошибок измерения угловых координат; R - дальность до ЭБР.

Полученные выражения формально не зависят от несущей частоты РЛС. Однако, если учесть возможность увеличения точности измерения дальности и особенно угловых координат с ростом несущей частоты, то станет ясной сильная зависимость эффективности метода от этого параметра.

При использовании доплеровской фильтрации значение высоты, на которой обеспечивается требуемое значение $\delta_v = \Delta V / V$ изменения скорости движения ЭБР, обусловленное аэродинамическим торможением определяется следующим образом

$$H = -(2,3 / \beta) \{ \lg(2\beta\Delta V \sin \theta / \gamma \rho_0 V) \}. \quad (4)$$

Поскольку сменение частоты пропорционально изменению скорости ΔV , то величина δ_v одновременно определяет требуемую разрешающую способность РЛС по доплеровскому сменению частоты

$$\delta_v = \Delta V / V = \Delta f / 2FV = c / 2FVT_i, \quad (5)$$

где c - скорость света; T_i - длительность когерентно обрабатываемой зондирующей посылки, F - несущая частота.

В качестве иллюстрации для случая $V=5\text{км}/\text{s}$, $\theta = 30^\circ$, $F = 3 \cdot 10^{10} \text{ Гц}$, $T_i = 10^{-4}$ с в табл.2 приведена зависимость H от γ .

$\gamma \left[\text{м}^2 / \text{кг} \right]$	0		0^{-1}	0^2	0^3	0^4
$H \left[\text{км} \right]$	14	98	81	65	48	48

Полученные оценки для характерных случаев показывают, что доплеровская фильтрация даже при большом значении несущей частоты обеспечивает выделение ЭБР на высотах меньших, чем при выделении ЭБР в процессе поэлементного сопровождения. Поэтому несмотря на то, что применение доплеровской фильтрации позволяет упростить аппаратуру, существенно сократить требуемую канальность РЛС и избежать информационной перегрузки системы обработки информации, в том случае, когда по каким либо причинам нельзя использовать большие длительности когерентных посылок T_n , целесообразно использовать поэлементное сопровождение.

Следует иметь в виду, что движение ЭБР в атмосфере, как правило, сопровождается образованием плазмы. В этом случае ЭБР представляет собой протяженный радиолокационный объект. Это приводит к тому, что от одного ЭБР существенно возрастает количество информации, что может привести к перегрузке вычислительных средств РЛС из-за больших затрат времени на прием и на обработку информации при поэлементном сопровождении, а также к серьезному усложнению процесса доплеровской фильтрации.

Доплеровский спектр частот эхо-сигнала плазменного следа смешен в область низких частот относительно эхо-сигнала объекта. В этих условиях существует возможность разгрузки системы обработки информации путем использования сигналов, обеспечивающих эффективное разрешение целей по дальности или радиальной скорости. При использовании сигналов, не обеспечивающих разрешение целей по радиальной скорости, например, сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигналов), для разгрузки системы обработки информации при сопровождении объектов на атмосферном участке траектории могут быть использованы специальные приемы.

Остановимся более подробно на использовании для этих целей ЛЧМ сигналов. ЛЧМ сигнал обладает той особенностью, что при измерении дальностной координаты наряду с флюктуационной появляется скоростная ошибка ΔR_n^v , пропорциональная радиальной $V_R(t_n)$ скорости движения ЭБР. При использовании схемы подстройки частоты скоростная ошибка пропорциональна разности между радиальной $V_R(t_n)$ и опорной $V_R^{0n}(t_n)$ (соответствующей опорному значению частоты) скоростями

$$\Delta R_n^v = K_v \{ V_R(t_n) - V_R^{0n}(t_n) \}$$

$$K_v = T_{zc} F / \Delta F \quad (6)$$

где T_{zc} - длительность зондирующего сигнала; F - несущая частота; ΔF - частотная девиация ЛЧМ сигнала; K_v - коэффициент скоростного смещения.

Скорости движения частиц плазменного следа существенно отличаются от скорости движения самого ЭБР. Следовательно скорость ошибка при измерении дальностной координаты плазменного следа будет отличаться от скоростной ошибки при измерении дальности до ЭБР. Это отличие будет тем больше, чем больше коэффициент скоростного смещения K_v . Таким образом, увеличивая значение коэффициента скоростного смещения (увеличивая несущую частоту РЛС или уменьшая в известных пределах девиацию ЛЧМ сигнала) можно эффективно селектировать по дальности замеры, получаемые от плазменного следа.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что повышение несущей частоты излучения РЛС повышает эффективность классификации входящих в атмосферу ЭБР. При доплеровской фильтрации это непосредственно следует из (4) и (5). При поэлементном сопровождении это связано с увеличением точности

измерения как дальности (в частности, за счет возможности повышения девиации ЛЧМ сигнала), так и угловых координат. При повышении несущей частоты удается обеспечить большее значение коэффициента скоростного смещения, обеспечив тем самым дополнительные возможности для выделения эхо-сигнала плазменного следа и связанное

с этим улучшение условий сопровождения ЭБР на атмосферном участке полета.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Горохов, В. Е. Фарбер. Решение задачи об оптимальном быстродействии наблюдения за снижающимися в атмосфере космическими объектами. Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1992. № 2.