

ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ В РЛС С ФАР

В.Д. Карлов¹, К.П. Квиткин¹, В.В. Гаврилкин², В.В. Челпанов¹
(¹Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, ²В/ч А2293)

Рассматриваются возможности построения алгоритмов управления энергетическими ресурсами РЛС с ФАР на этапах обнаружения и сопровождения целей, обеспечивающих заданные показатели качества обнаружения и оценки параметров траектории целей.

алгоритмы управления энергетическими ресурсами, обнаружение и сопровождение целей

Постановка проблемы. При организации работы многофункциональной РЛС с ФАР основной проблемой является оптимальное распределение ее ограниченных энергетических и временных ресурсов между этапами обнаружения и активного сопровождения целей. При этом необходимо обеспечить требуемые характеристики обнаружения и активного сопровождения целей.

Анализ литературы. В [1] рассматривается выбор зон обнаружения в секторе ответственности РЛС и порядок их просмотра с учетом минимизации затрат энергетических ресурсов при обеспечении требуемого качества выдаваемой радиолокационной информации. В [2] аналогичная задача решается для баллистических и космических объектов путем совместной оптимизации алгоритмов обнаружения и активного сопровождения. В [4] рассматривается возможность адаптивного управления лучами ФАР в зависимости от целевой обстановки в зоне обзора.

Цель работы. Рассмотреть возможность построения эффективных алгоритмов управления энергетическими ресурсами РЛС с ФАР в режимах обнаружения и активного сопровождения целей.

Основная часть. При организации режимов работы и управления параметрами РЛС с ФАР можно выделить два основных этапа обработки радиолокационной информации – этап обнаружения (поиска) целей и этап активного сопровождения.

На этапе поиска осуществляется обзор пространства в заданном секторе ответственности РЛС по определенному алгоритму. На данном этапе решаются следующие основные задачи: обнаружение целей, входящих в сектор обзора; построение (оценка) параметров траекторий целей, для передачи их на сопровождение.

При этом должны выполняться определенные требования:

- сектор обзора выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое время нахождения цели в секторе ответственности;
- алгоритм обзора, то есть время и период обзора зон сектора должны обеспечивать своевременное обнаружение целей и определение параметров их движения для передачи на сопровождение;
- выделяемая энергия на разрешаемый объем (определяемый параметрами диаграммы направленности) должна обеспечивать заданную вероятность обнаружения цели и необходимую точность измерения координат.

На этапе активного сопровождения осуществляется распределение энергии зондирующих сигналов для обслуживания сопровождаемых целей по определенному алгоритму в секторе ответственности РЛС.

На данном этапе решается задача сопровождения целей с оценкой параметров траектории и определением их характеристик (состава, важности, типа целей). При этом последовательность обработки, время и энергетические затраты на обслуживание каждой цели должны обеспечивать заданную точность получаемых оценок параметров траектории за определенное время или к требуемому рубежу.

Режимы обнаружения и активного сопровождения чередуются между собой для того, чтобы своевременно решать задачу обнаружения вновь появляющихся целей и определения их характеристик и параметров траектории движения. Полный обзор всего сектора ответственности РЛС занимает, как правило, значительный интервал времени, особенно при использовании связей из игольчатых диаграмм направленности. Поэтому обращение к циклам сопровождения может осуществляться несколько раз за полный цикл обзора:

$$T_{\text{цс}} = (1/k)\Delta T_{\text{цo}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{цс}}$ – периодичность циклов сопровождения; $\Delta T_{\text{цo}}$ – время, затрачиваемое на полный обзор сектора; k – некоторый коэффициент, например $k = 1, 2, 4$.

Один из возможных вариантов организации режимов обнаружения и сопровождения целей приведен на рис. 1. Здесь на один полный цикл обзора в режиме обнаружения приходится четыре цикла активного сопровождения.

За каждую четверть полного цикла обнаружения ($0,25\Delta T_{\text{цo}}$) осуществляется обзор половины сектора по азимуту $0,5\Delta\beta_{\text{с}} = 0,5(\beta_{\text{max}} - \beta_{\text{min}})$, и по углу места $0,5\Delta\epsilon_{\text{с}} = 0,5(\epsilon_{\text{max}} - \epsilon_{\text{min}})$. Между ними реализуется режим сопровождения, в данном случае трех целей. При этом целеуказания по угловым координатам соответствуют экстраполированному положению цели.

Время, выделяемое на один цикл – $\Delta T_{\text{цс}}$, минимальное время обновления информации определяется величиной $T_{\text{с}} = \Delta T_{\text{цс}} + 0,25\Delta T_{\text{цo}}$. В данном варианте используется диаграмма направленности, узкая в азимутальной плоскости β и широкая (в половину сектора обзора) по углу места ϵ .

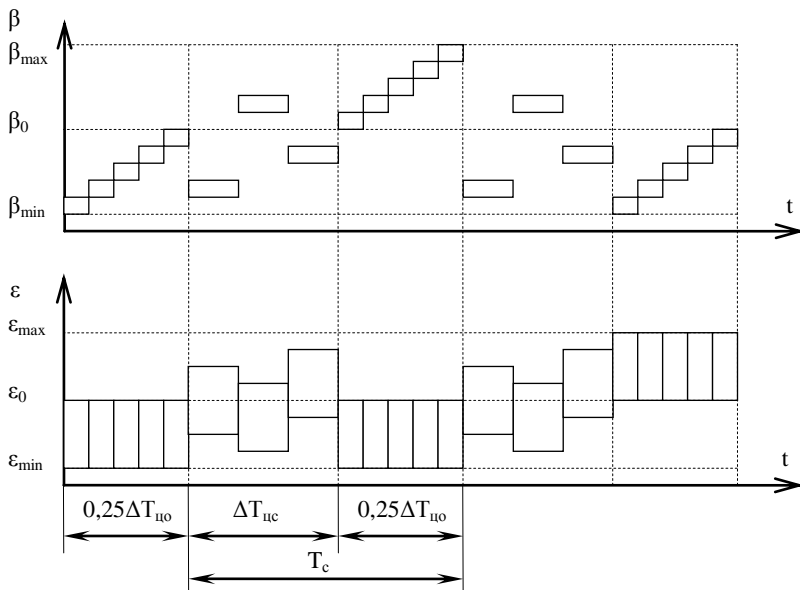


Рис. 1. Один из возможных вариантов организации режимов обнаружения и сопровождения целей

Рассмотрим возможности организации цикла обзора и обнаружения.

Как правило, обзор осуществляется по жесткой программе (алгоритму), которая определяется заранее, при разработке алгоритма функционирования РЛС. Тем не менее, могут быть предусмотрены определенные изменения в алгоритме обнаружения в зависимости от возникающих условий. Варьируемыми параметрами цикла обнаружения могут быть энергетические и временные параметры зондирующих сигналов, а также размеры зон обзора в секторе ответственности и порядок их просмотра. В частности, для РЛС с ФАР можно изменять:

- число зондирующих импульсов в разрешающем объеме (M);
- количество модулей ФАР, формирующих диаграмму направленности (например, использовать весь раскрыв ФАР из N модулей, где $N = N_{\beta}N_{\epsilon}$, или его часть – 0,5N, 0,25N);
- период повторения T_п зондирующих импульсов, например, в соответствии с количеством задействованных в такте зондирования модулей, при N – период T_п, а при 0,5N модулей – период 0,5T_п.

При изменении количества формирующих модулей в азимутальной или угломестной плоскости (β, ε) соответственно изменяется ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности ($\Delta\beta_{0,5P}$, $\Delta\epsilon_{0,5P}$). Например, если для N_β имеем $\Delta\beta_{0,5P}$, то для 0,5N_β получим 2Δβ_{0,5P}. При этом в два раза

уменьшается время обзора заданного сектора, но и в 8 раз уменьшается энергия эхо-сигнала. Поэтому одним из вариантов обзора может быть такой:

а) обзор барьерной зоны на минимальных углах места, для целей, входящих в сектор обзора на максимальной дальности, осуществляется с максимальной энергией зондирующих сигналов, обеспечиваемой параметрами $N, T_n, \Delta\beta_{0,5P}, \Delta\varepsilon_{0,5P}, M$;

б) обзор зоны с большими углами места, для целей на ближней дальности – с параметрами зондирования $0,5N, 0,5T_n, 2\Delta\beta_{0,5P}, \Delta\varepsilon_{0,5P}$.

Во втором случае скорость обзора возрастает в 4 раза, но и в 8 раз снижается энергия эхо-сигналов. Для обеспечения требуемых характеристик обнаружения необходимо, чтобы это снижение компенсировалось ее увеличением за счет меньшей дальности до цели.

Возможность уменьшения энергии зондирующих сигналов для обнаружения целей на ближней дальности можно показать на следующем примере.

Отношение сигнал/шум по мощности ρ в зависимости от параметров зондирующих сигналов и ФАР, а также дальности до цели R может быть записано в виде [2]:

$$\rho = \Pi_3 \frac{S_3}{R^4}; \quad \Pi_3 = \frac{P_i \tau_i A_{\text{пер}} A_{\text{пр}} l \cos^2 \varphi}{173 \lambda^2 T_{\text{эф}}}, \quad (2)$$

где Π_3 – потенциал РЛС; S_3 – эффективная поверхность рассеяния цели; P_i – импульсная мощность излучения; τ_i – длительность зондирующего импульса; l – коэффициент потерь; $T_{\text{эф}}$ – эффективная шумовая температура; λ – длина волны; $A_{\text{пер}}, A_{\text{пр}}$ – площадь соответственно передающей и приемной антенн.

Будем считать, что при полном использовании раскрыва ФАР обеспечивается требуемое значение ρ для целей, находящихся на максимальной дальности R_{max} . Для совмещенной на прием и передачу ФАР ($A_{\text{пер}} = A_{\text{пр}}$) получим, что при использовании половины раскрыва ФАР ($0,5N$ модулей) отношение сигнал/шум уменьшается по цели на дальности R_{max} в 8 раз.

Соответствующее увеличение ρ будет получено для целей, находящихся на дальности $0,6R_{\text{max}}$. Следовательно, использование половины раскрыва ФАР допустимо при обнаружении и сопровождении целей на дальности $R_{\text{ц}} \leq 0,6R_{\text{max}}$.

Далее рассмотрим алгоритм выделения энергии на режим активного сопровождения. При реализации данного алгоритма варьируемыми параметрами могут быть: энергетические и временные параметры зондирующих сигналов (M, T_n); характеристики передающей и приемной диаграмм направленности (число используемых модулей ФАР N_c); порядок обслуживания сопровождаемых целей и период обновления информации (темп сопровождения).

Выбор значений параметров M, T_n, N_c в первую очередь определяется дальностью до сопровождаемой цели, и, соответственно, требуе-

мой энергией зондирования. Порядок обслуживания сопровождаемых целей определяется в первую очередь степенью важности (опасности) целей (например, атакующие на опасном направлении имеют наибольший приоритет). Следовательно, необходимо осуществлять предварительную классификацию типа цели на начальном этапе сопровождения.

Период обновления информации (время назначения очередного зондирования) по сопровождаемой цели определяется различными факторами:

- ошибками единичных измерений и требуемой точностью оценки параметров траектории;
- характером траектории и типом цели – наличием маневра, составом цели (одиночная, сложная, групповая), приоритетом цели.

При выборе периода обновления информации τ_c (времени экстраполяции) следует учитывать возможные ошибки экстраполяции Δx , которые с заданной вероятностью не должны превышать размер строба сопровождения Δ_c .

Ошибка экстраполяции определяется, в частности, величинами дисперсий оценок значений координат $\sigma_{(x)}^2$ и их производных $\sigma_{(\dot{x})}^2$, $\sigma_{(\ddot{x})}^2$.

Поэтому должно выполняться следующее условие:

$$\sigma_{(x)}^2 + \tau_c^2 \sigma_{(\dot{x})}^2 + \frac{1}{4} \tau_c^4 \sigma_{(\ddot{x})}^2 \leq (\varphi \Delta_c)^2, \quad (3)$$

где φ – коэффициент, определяющий вероятность попадания x , в строб сопровождения ($\varphi = 0,2 \dots 0,5$).

Например, для линейной траектории:

$$\tau_c \leq \sqrt{(\varphi \Delta_c)^2 - \sigma_{(x)}^2} / \sigma_{(\dot{x})}. \quad (4)$$

При маневре цели увеличиваются ошибки оценки параметров траектории, поэтому необходимо уменьшать период обновления информации τ_c .

При расчете величины τ_c необходимо иметь информацию о наличии маневра и его характеристиках (ускорении или интенсивности маневра).

Обнаружение маневра и оценка ускорения может быть осуществлена по текущим динамическим ошибкам сопровождения – значениям невязок $Z_{(i)}$ или их квадратичных форм $Q_{(i)}$.

Текущие оценки параметров траектории $\hat{x}_{(i)}$ на момент времени t_i формируются в соответствии с соотношениями для фильтра Калмана [1]:

$$\hat{x}_{(i)} = x_{\text{э}(i)} + A(y_{(i)} - Hx_{\text{э}(i)}), \quad (5)$$

где $Z_{(i)} = y_{(i)} - Hx_{\text{э}(i)}$; $Q_{(i)} = Z_{(i)}^T \Psi_{(i)}^{-1} Z_{(i)}$; $y_{(i)}$ – измеренное значение координаты; A – коэффициент усиления фильтра; Ψ – корреляционная матрица ошибок оценок параметров.

Обнаружить маневр цели можно путем сравнения усредненной текущей ошибки фильтрации ($\bar{Z}_{(i)}$, $\bar{Q}_{(i)}$) с некоторым порогом, например:

$$\bar{Q}_{(i)} \geq Q_{\text{пор}}, \quad (6)$$

где $\bar{Q}_{(i)} = \alpha \bar{Q}_{(i-1)} + (1-\alpha)Q_{(i)}$; α – коэффициент усреднения, определяющий вес очередной ошибки экстраполяции, например, $\alpha = 0,8$.

Оценка ускорения маневра также может быть получена по значениям текущих ошибок фильтрации, в частности, усредненных невязок:

$$\bar{Z}_{(i)} = \alpha \bar{Z}_{(i-1)} + (1-\alpha)Z_{(i)}. \quad (7)$$

Принимая, что среднее значение ошибки экстраполяции $M[\delta_s]$ будет определяться ускорением маневра g , можно записать:

$$M[\delta_s] = M[\bar{Z}_{(i)}]. \quad (8)$$

Тогда на интервале устойчивого сопровождения можно записать выражение для оценки ускорения [2]:

$$\hat{g} = \bar{Z}_{(i)}B_0/T_c, \quad (9)$$

где B_0 – коэффициент усиления фильтра по скорости; T_c – темп поступления измерений при сопровождении.

Ошибка экстраполяции за счет ускорения маневра не должна превышать заданной величины строга сопровождения $\varphi\Delta_c$:

$$\sigma_{(x_s)}^2 \leq (\varphi\Delta_c)^2. \quad (10)$$

Тогда требуемый временной интервал обновления информации (время экстраполяции) по сопровождаемой цели будет определяться, как [2]:

$$\tau_c = \sqrt{2 \left(\frac{2 + \varphi^2}{1 + \varphi^2} - \frac{2}{\sqrt{1 + \varphi^2}} \right) \frac{\Delta_c}{\hat{g}}}. \quad (11)$$

В ходе активного сопровождения цели производятся также классификация типа цели и определение ее характеристик, например, по составу (одиночная, сложная, групповая).

Для решения задачи классификации может быть назначено зондирование последовательностью из M когерентных импульсов большей длительности, например, $M = 16$ (32), которая обеспечивает более высокую разрешающую способность [3].

В случае сложной цели, при значительной загрузке системы сопровождения, возможно сопровождение центра массы сложной цели вместо построения траекторий каждого из ее элементов. В этом случае центральная траектория формируется и обновляется с помощью обычного фильтра Калмана, обрабатывающего усредненные значения опорных точек, поступающих от элементов сложной цели [4].

При отсутствии обнаруженных и сопровождаемых целей очередной цикл активного сопровождения может быть исключен, или его энергия

передана на режим обнаружения, например, на обзор барьерной зоны с накоплением сигналов.

Следует также учитывать необходимость выделения части временного цикла сопровождения на проведение функционального контроля (сопровождение контрольной траектории). Контроль функционирования может проводиться с фиксированным периодом, или назначается при наличии значительных динамических ошибок сопровождения и появления сигналов неисправностей систем обработки.

Функциональный контроль может быть проведен, если в течение интервала времени, отводимого на контроль (τ_k) будет свободен хотя бы один целевой канал системы сопровождения. Если поток целей пуассоновский с интенсивностью λ , а число целевых каналов m , вероятность проведения контроля определится, как:

$$P_{(m > n_c)} = \sum_{i=0}^{m-1} \frac{(\lambda \tau_k)^i e^{-\lambda \tau_k}}{i!}, \quad (12)$$

где n_c – число целей на сопровождении.

Выводы: Таким образом, распределение энергии зондирующих сигналов в цикле обнаружения в РЛС с ФАР, как правило, осуществляется по жесткой программе. Параметры сигналов и алгоритма обзора сектора ответственности определяются заранее, исходя из необходимости обеспечения заданных временных и вероятностных характеристик обнаружения.

В цикле активного сопровождения порядок обслуживания целей, темп сопровождения и распределение энергии зондирующих импульсов определяется целевой обстановкой – количеством сопровождаемых целей и их характеристиками (степенью опасности цели, типом цели, наличием маневра, значениями ошибок сопровождения).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. *Цифровая радиолокация*. – КВЦ, 2000. – 255 с.
2. Саврасов Ю.С. *Алгоритмы и программы в радиолокации*. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
3. *Обработка сигналов в многоканальных РЛС / Под ред. А.П. Лукошкина*. – М.: Радио и связь, 1983. – 328 с.
4. Фарина О., Студер Ф. *Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ.* – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.

Поступила 21.03.2006

Рецензент: доктор технических наук, профессор Л.Ф. Купченко,
Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба.