

И.Ю. ГРИШИН, канд. техн. наук, Европейский университет (г. Киев)

МЕТОД И АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ В РЕЖИМЕ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Запропонований і обґрунтований метод і алгоритм локально-оптимального управління енергетичними ресурсами багатопозиційної радіолокаційної системи для режиму супроводу об'єктів. Для обґрунтування методу використається дискретний принцип мінімуму в матричній формі.

A method and algorithm of local-optimum control by the power resources of the multistatic radar system for the objects tracking mode is offered. For the ground of method discrete matrix principle of minimum is used.

Постановка проблемы. В процессе работы радиолокационной системы (комплекса) условия ее функционирования могут меняться в широком диапазоне. Количество ситуаций, с которыми может столкнуться радиолокационная система, весьма велико, и при ее проектировании невозможно предусмотреть заранее правильные реакции на каждую ситуацию. В результате этого эффективность системы может понизиться.

Радиолокационная система обладает ограниченными возможностями по получению и преобразованию информации о потоках объектов (целей). Эти ограничения определяются в основном конечными значениями ее энергетических и информационных ресурсов. В принципе можно обеспечить получение информации высокого качества об очень большом числе целей. Однако ограниченные ресурсы радиолокационной системы приведут к тому, что, например, темп локации каждой цели может оказаться чересчур низким. В результате информация о целях будет поступать в системы высшего порядка с большим запозданием и это приведет к тому, что эффективность системы может стать недостаточной [1].

С другой стороны, информация о части целей, наблюдаемых радиолокационной системой, может по различным причинам мало интересовать систему более высокого порядка. Вследствие этого радиолокационная система могла бы ослабить наблюдение за такими целями и сосредоточить использование своих ресурсов на целях, имеющих для обслуживаемой системы первостепенное значение. Например, систему контроля за воздушным движением в первую очередь интересуют самолеты с ограниченным запасом горючего или передавшие сообщение о неисправностях, возникших в полете. Аналогично систему обороны некоторого района интересует, прежде всего, информация о целях, которые

могут атаковать данный обороняемый район [2], и сравнительно мало интересуют цели, атакующие другие районы.

Основным способом поддержания эффективности радиолокационной системы в процессе ее работы на возможно более высоком уровне является управление системой [1, 3].

Практика показала, что применение алгоритмов оптимального управления многопозиционной радиолокационной системой (МПРЛС) в режиме сопровождения целей [4, 5] не всегда позволяет рассчитать управляющие воздействия в реальном масштабе времени, особенно в сложной целевой обстановке. Поэтому для таких условий целесообразно применять менее эффективные, но быстро работающие алгоритмы квазиоптимального управления.

Анализ литературы. В работе [1] впервые задача управления радиолокационными системами (РЛС) была рассмотрена с системных позиций. Показано, что критерий качества управления РЛС должен быть согласован с критерием системы более высокого уровня. Для синтеза алгоритмов управления используется информационный подход, при котором главным критерием является энтропия информации о целях на различных этапах функционирования РЛС. Однако такой подход, учитывая современное состояние теории оптимального управления, не позволяет получить эффективных решений для МПРЛС в условиях сложной целевой обстановки. В работе [3] рассмотрены основные подходы к управлению РЛС, основанные на решении текущих задач и не учитывающие эффективность управления за достаточно длительный промежуток времени, не учтена специфика МПРЛС. В работе [7] предложен метод оптимального управления МПЛРЛ, который основан на математическом аппарате дискретного принципа минимума [6] в матричной форме [8]. Однако применение предложенного метода в условиях сложной целевой обстановки практически невозможно вследствие повышенных требований к вычислительным ресурсам управляющей ЭВМ.

Цель статьи – разработать метод и алгоритм управления МПРЛС в режиме сопровождения объектов, позволяющий осуществлять эффективное управление такой системой в реальном масштабе времени.

Формализация задачи управления. Одним из подходов, на основе которого можно синтезировать квазиоптимальные алгоритмы, является выработка локально-оптимальных управляющих воздействий. При этом не учитывается качество сопровождения цели на протяжении всего интервала, а управления выбираются исходя из наибольшей эффективности измерений в текущий момент времени.

С учетом сказанного показатель качества управления на этапе сопровождения может быть представлен в виде

$$J = \sum_{i=1}^N \text{tr}(\mathbf{h}_i^T \Psi_i(t+1)). \quad (1)$$

Здесь $\text{tr}[\mathbf{h}_i(t)\Psi_i(t)] = \sum_{l=1}^k \mathbf{h}_i^{ll}(t)\Psi_i^{ll}(t)$ – след произведения матриц $\mathbf{h}_i(t)$ и $\Psi_i(t)$, характеризующий взвешенную величину ошибки фильтрации координат i -го объекта. При этом весовая матрица $\mathbf{h}_i(t)$ определяется в зависимости от способа сопровождения и допоиска объектов в процессе сопровождения, а также от метода наведения ракет на цель (или способа принятия решения на управление воздушным движением, движением морских судов и т.п.). $\Psi_i(t+1)$ – ковариационная матрица ошибок оценок параметров траектории i -го объекта. Динамика этих матриц описывается следующим [7] соотношением

$$\begin{aligned} \Psi_i(t+1) - \Psi_i(t) &= \mathbf{F}_i(t, \Psi_i(t), \alpha(t)) - \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T - \\ &\quad - \Psi_i(t) - \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \times \\ &\quad \times \sum_{j=1}^M \left\{ \alpha^{ij}(t) \mathbf{H}_j^T (\mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \mathbf{H}_j^T + \right. \\ &\quad \left. + \mathbf{R}_j)^{-1} \mathbf{H}_j \right\} \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T, \\ \Psi_i(0) &= \Psi_{i0}, \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T-1. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь Φ_i – матрица экстраполяции параметров траектории на один временной интервал; \mathbf{H}_j – матрица наблюдения (связи наблюдаемых и оцениваемых параметров); \mathbf{R}_j – ковариационная матрица ошибок измерения параметров сопровождаемого объекта; N – количество сопровождаемых объектов; T – количество временных интервалов сопровождения объектов; Ψ_{i0} – ковариационные матрицы ошибок оценок параметров объектов в начальный момент времени.

На управляемый параметр $\alpha^{ij}(t)$ должны быть наложены ограничения исходя из следующих соображений.

Реальные МПРЛС часто имеют в своем составе несколько активных позиций, т.е. радиолокаторов, которые могут излучать зондирующие сигналы в направлении той или иной цели. Целесообразно алгоритм управления построить таким образом, чтобы энергетический ресурс использовался полностью, а количество сопровождаемых объектов в один и тот же момент времени равнялось количеству активных позиций радиолокационной системы. При этом следует учесть, что некоторые из каналов МПРЛС используют одну и ту же активную позицию, а, следовательно, в один и тот же момент времени

может работать только один из такой группы каналов. Тогда система ограничений примет следующий вид:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \alpha^{ij}(t) = K_{\text{акт}}, \quad t = 1, 2, \dots, T-1; \quad (3)$$

$$\alpha^{ij}(t) = \begin{cases} 0; \\ 1, \quad j = 1, 2, \dots, M; \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad t = 1, 2, \dots, T-1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{k_1} \alpha^{ij}(t) = 1, \quad t = 1, 2, \dots, T-1;$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=k_1+1}^{k_2} \alpha^{ij}(t) = 1, \quad t = 1, 2, \dots, T-1;$$

..... (5)

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=k_m+1}^{k_n} \alpha^{ij}(t) = 1, \quad t = 1, 2, \dots, T-1;$$

.....

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=k_{p-1}+1}^{k_p} \alpha^{ij}(t) = 1, \quad t = 1, 2, \dots, T-1,$$

где $K_{\text{акт}}$ – количество активных (излучающих) позиций МПРЛС; M – количество радиолокационных каналов МПРЛС; $p = K_{\text{акт}}$ – количество групп радиолокационных каналов МПРЛС, объединенных вокруг одной из активных позиций; $k_m - (k_n + 1)$ – количество радиолокационных каналов, объединенных вокруг m -й активной позиции.

При этом ограничение (3) соответствует требованию о полном использовании энергетического ресурса радиолокационной системы, соотношение (4) означает, что в каждый t -й момент времени любой j -й радиолокационный канал может производить или не производить измерение параметров i -го объекта. Система ограничений (5) означает требование работы в t -й момент времени только одного из группы радиолокационных каналов, объединенных вокруг одной активной позиции.

Таким образом, необходимо разработать такой метод управления, при котором достигался бы минимум функционала (1) при соблюдении ограничений (3) – (5) на управления с учетом динамики управляемого объекта (2). Это задача оптимального управления.

Разработка метода и алгоритма управления. Поскольку управляемый объект (2) представлен в матричном виде, то для поиска оптимальных управлений применим принцип минимума в матричной форме [8].

Тогда гамильтониан системы с учетом [8] записывается в виде выражения

$$H(\Psi(t), P(t+1), \alpha(t)) = \sum_{i=1}^N F_i[t, \Psi_i(t), \alpha(t)] \cdot P_i^T(t+1). \quad (6)$$

Терминальное значение матрицы сопряженных переменных равно

$$P_i(t+1) = \frac{\partial tr(\mathbf{h}_i^T \Psi_i(t+1))}{\partial \Psi_i(t+1)} = \mathbf{h}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Следовательно, учитывая (6), (7), выражение для гамильтониана системы примет вид

$$H(\Psi(t), P(t+1), \alpha(t)) = \sum_{i=1}^N tr(\Psi_i(t+1, \alpha(t)) - \Psi_i(t)) \mathbf{h}_i^T. \quad (8)$$

Однако управление должно определяться из условия минимума гамильтониана, т.е.

$$H(\Psi^*(t), P^*(t+1), \alpha^*(t)) \leq H(\Psi^*(t), P^*(t+1), \alpha(t)), \quad \alpha(t) \in \Omega. \quad (9)$$

Область допустимых управлений Ω определяется выражениями (3) – (5).

Учитывая структуру выражения $\Psi_i(t+1, \alpha(t)) - \Psi_i(t)$ можно записать условие поиска оптимального управления для каждого текущего значения t в виде

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \alpha^{ij}(t) H_{\alpha}^{ij}(t) \rightarrow \min_{\alpha(t)}, \quad (10)$$

где

$$H_{\alpha}^{ij}(t) = tr \left\{ \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \times \mathbf{H}_j^T \left(\mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \mathbf{H}_j^T + \mathbf{R}_j \right)^{-1} \mathbf{H}_j \Phi_i \Psi_i(t) \Phi_i^T \right\}. \quad (11)$$

Таким образом, метод квазиоптимального (локально-оптимального) управления состоит в расчете управлений $\alpha^{ij}(t)$, удовлетворяющих условию (10), с учетом ограничений (3) – (5) для каждого момента времени t интервала сопровождения целей.

При большом количестве каналов МПРЛС и сопровождаемых объектов решение задачи линейного программирования (10) может представлять серьезную проблему. Для ее решения возможно применение перспективного метода [9].

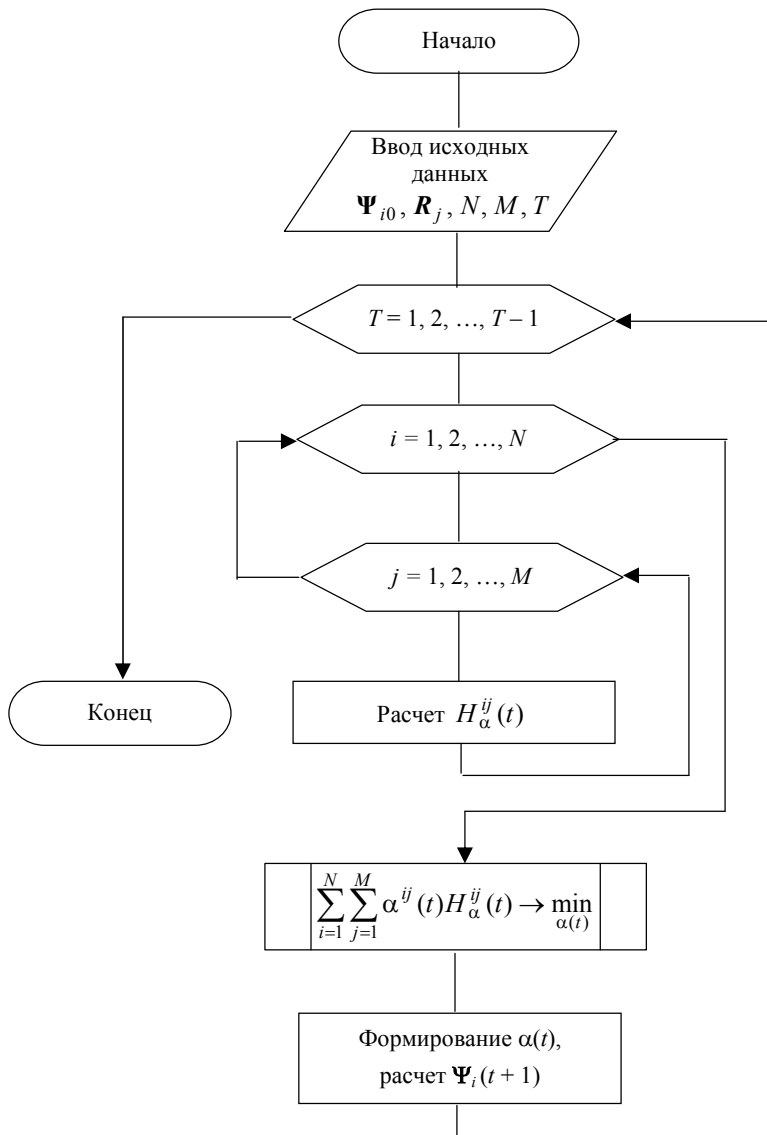


Рис. Алгоритм квазиоптимального управления МПРЛС в режиме сопровождения целей

Для практического применения разработанного метода синтезирован алгоритм (см. рисунок).

Результаты моделирования. Моделирование проводилось с целью оценки эффективности разработанных метода и алгоритма локально-оптимального управления МПРЛС в режиме сопровождения объектов. В качестве базового метода, использованного для сравнения, применен метод равномерного зондирования (распределения энергетических ресурсов) РЛС, который в настоящее время является основным в реальных радиолокационных комплексах в условиях сложной целевой обстановки.

При применении разработанного метода для однопозиционных РЛС выигрыш в точности оценки параметров сопровождаемых объектов по сравнению с базовым методом составил 10 – 43 %, а для МПРЛС (число активных позиций 2 – 5, количество сопровождаемых целей 10 – 25) выигрыш составил 22 – 81 %. При этом оптимальные планы сопровождения объектов отличаются существенной неравномерностью.

Выводы. В результате проделанной работы разработан новый метод локально-оптимального управления МПРЛС, отличающийся от известных высокой эффективностью и достаточно низкой вычислительной трудоемкостью. В ходе дальнейшей работы предложенный метод должен быть усовершенствован для обеспечения требуемого уровня устойчивости сопровождения объектов.

Список литературы: 1. *Конторов Д.С., Голубев-Новожилов Ю.С.* Введение в радиолокационную системотехнику. – М.: Сов. радио, 1971. – 368 с. 2. *Гришин И.Ю., Можар М.К., Решетник В.М.* Проблемы управления зенитными ракетными комплексами // Наука и оборона, 1994. – Вып. 3. – С. 27–32. 3. *Кузьмин С.З.* Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с. 4. *Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В.* Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 1. – С. 9–69. 5. *Гришин И.Ю., Можар М.К., Есин В.И.* Оптимизация управления многопозиционным радиолокационным комплексом / Тезисы докладов 2-й Всесоюзной научно-технической конференции. – Туапсе, 1991. – С. 48–49. 6. *Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.* Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 392 с. 7. *Гришин И.Ю.* Оптимальное управление многопозиционным радиолокационным комплексом / Тезисы докладов Международной конференции "Автоматика-2007". – Севастополь: Национ. ун-т ядерной энергетики, 2007. – С. 7–8. 8. *Athans M.* The matrix minimum principle. Massachusetts Institute of Technology Electronic Systems Laboratory Report, Cambridge, Massachusetts, 1967. – 19 p. 9. *Grishin I., Potapov G.* Linear programming: a new polynomial-time algorithm // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2007. – № 1 (107). – С. 113–119.

Поступила в редакцию 10.10.2007