

УДК 623.681.93

О.Л. Смирнов<sup>1</sup>, О.Н. Ставицкий<sup>2</sup>, Е.А. Рябоконт<sup>2</sup>, В.Н. Чепига<sup>3</sup><sup>1</sup>Концерн «Райский уголок», Харьков<sup>2</sup>Харьковский Университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>3</sup>ООО "Фактор", Днепропетровск

## ВЫБОР ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ СОПРОВОЖДЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС

Рассматривается выбор показателя качества управления режимом сопровождения многофункциональной радиолокационной станции, позволяющего одновременно учесть противоречивые требования по минимизации расхода энергетического ресурса радиолокационной станции, времени и ошибок сопровождения цели. Принятая аксиоматика нелинейной схемы компромиссов позволяет формализовано получать парето-оптимальное решение рассматриваемой многокритериальной задачи при любых изменениях целевой обстановки в зоне обзора данной радиолокационной станции.

**Ключевые слова:** многофункциональная РЛС, режим сопровождения, показатели качества управления.

### Вступление

Рассмотрим многофункциональную радиолокационную станцию (МФ РЛС) зенитного ракетного комплекса (ЗРК), представляющую собой единый радиотехнический комплекс, выполняющий реализованные в виде отдельных режимов функции РЛС различного назначения [1]. Данная МФ РЛС должна одновременно вести поиск воздушных целей (режим обнаружения), сопровождать ранее обнаруженные цели (режим сопровождения) и наводить на некоторые из них зенитные управляемые ракеты (ЗУР) (режим наведения).

**Постановка проблемы.** Под управлением МФ РЛС в каком-либо из режимов понимается целенаправленное изменение параметров этого режима с одновременным обеспечением заданных характеристик МФ РЛС в остальных режимах [1]. Применительно к режиму сопровождения такое управление обычно осуществляется с одним из трех следующих показателей качества, выраженных соответствующими функционалами [1, 2].

Первый из них – это величина ошибки оценивания заданной координаты  $x$  траектории сопровождаемой цели:

$$J_1 = \sigma_x^2. \quad (1)$$

где  $\sigma_x^2$  – дисперсия ошибки оценивания координаты  $x$  траектории сопровождаемой цели к концу временного интервала  $[0; T]$  размер которого зависит от требований, предъявляемых вышестоящим потребителем траекторной информации, т.е. ЗРК.

Второй показатель определяет длительность сопровождения цели  $T_c$  для достижения требуемого значения ошибки оценивания заданной координаты ее траектории:

$$J_2 = T_c, \quad (2)$$

причем в общем случае  $T_c \leq T$ .

Третий показатель учитывает затраты энергетических ресурсов  $E_c$  рассматриваемой МФ РЛС в течение временного интервала  $[0; T]$  на достижение требуемого значения ошибки оценивания заданной координаты траектории сопровождаемой цели:

$$J_3 = E_c. \quad (3)$$

Очевидно, что критерием оптимальности управления режимом сопровождения МФ РЛС в каждом конкретном случае будет являться минимум одного из вышеуказанных показателей качества.

Вместе с тем в силу тесной взаимосвязи технических параметров РЛС, регулирование которых является основным содержанием процесса управления ее функционированием в рассматриваемом режиме сопровождения [1 – 3], все три данных показателя качества оказываются взаимно противоречивыми.

Приведем иллюстративный пример для случая сопровождения одной цели типовой РЛС обнаружения (сопровождения) ЗРК малой дальности войск противовоздушной обороны Сухопутных войск (ПВО СВ). Процесс сопровождения цели импульсной РЛС “на проходе” [4] может быть представлен в виде непрерывно следующих друг за другом периодов обзора пространства длительностью  $T_{обз}$ , в течение каждого из которых цель облучается пачкой импульсов объемом  $N_n$  (рис. 1).

Пусть цель с эффективной поверхностью рассеивания (ЭПР)  $\sigma_c$  берется на сопровождение на дальности  $R$ . Дисперсия ошибки оценивания ее координаты (например, дальности) при  $N_n$ -кратном зондировании определяется как [1, 5]:

$$\sigma_R^2 = \frac{c^2 \tau_n^2}{4\pi q_1 N_n}, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света;  $\tau_n$  – длительность зондирующего импульса;  $q_1$  – отношение сигнал/шум для од-

ного зондирующего импульса.

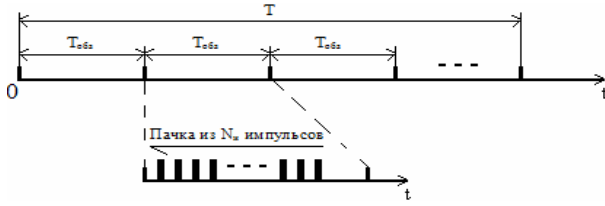


Рис. 1. Процесс сопровождения цели импульсной РЛС “на проходе”

Значение  $q_1$  может быть найдено (без учета обобщенного коэффициента потерь на тракте) посредством выражения [5]:

$$q_1 = \frac{P_n \tau_n G^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 k T_0 R^4}, \quad (5)$$

где  $P_n$  – импульсная мощность излучения РЛС;  $G$  – коэффициент усиления приемо-передающей антенны РЛС;  $\lambda$  – длина волны излучения РЛС;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_0$  – опорная температура.

При относительно постоянном (в течение  $n$  периодов обзора) отношении сигнал/шум и некоррелированных между собой ошибках однократных измерений (зондирований) дисперсия сглаженной оценки координаты для случая линейной траектории сопровождаемой цели  $\sigma_n^2$  имеет вид [1, 6]:

$$\sigma_n^2 = \frac{2(2n-1)}{n(n+1)} \sigma_R^2. \quad (6)$$

Параметр

$$K_n = \sigma_n^2 / \sigma_R^2, \quad (7)$$

есть отношение величин дисперсий ошибки оценивания рассматриваемой координаты цели после проведения  $n$  и одного периода обзора соответственно. Поэтому количество периодов обзора  $n$ , необходимых для достижения требуемого значения  $\sigma_{тр}^2 = \sigma_n^2$  (т.е. требуемой величины функционала  $J_1$ ), можно получить, объединив выражения (6) и (7):

$$n = 2 / K_n - 0,5 + \sqrt{(0,5 - 2 / K_n)^2 - 2 / K_n}. \quad (8)$$

Тогда временной интервал, в течение которого обеспечивается заданная точность сопровождения цели, и затрачиваемый на это энергетический ресурс РЛС [3] соответственно равны:

$$T_c = n T_{обз}, \quad (9)$$

$$E_c = P_{cp} n T_{обл}, \quad (10)$$

где  $P_{cp}$  – средняя мощность излучения РЛС;  $T_{обл}$  – время облучения цели РЛС.

Выражения (9) и (10) позволяют определить значения функционалов  $J_2$  и  $J_3$  при заданной величине функционала  $J_1$ , причем время облучения цели для постоянной скорости вращения антенны РЛС рассчитывается как [5]:

$$T_{обл} = \frac{T_{обз} \theta_{аз} \theta_{ум}}{\Phi_{аз} \Phi_{ум}}, \quad (11)$$

где  $\theta_{аз}$  и  $\theta_{ум}$  – ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно;  $\Phi_{аз}$  и  $\Phi_{ум}$  – зона обзора РЛС в азимутальной и угломестной плоскостях соответственно.

Анализ выражений (4) – (9) показывает, что при фиксированном значении требуемой точности сопровождения цели функционал  $J_2$  (или  $J_3$ ) в случае необходимости может быть минимизирован в основном за счет снижения дисперсии ошибки оценивания рассматриваемой координаты после проведения одного периода обзора. Для этого необходима корректировка объема пачки зондирующих импульсов согласно зависимости [5]:

$$N_n = T_{обл} F_n, \quad (12)$$

где  $F_n$  – частота повторения зондирующих импульсов.

Так как время облучения цели для рассматриваемой РЛС есть величина неизменная, то количество зондирующих импульсов определяется только частотой  $F_n$ .

Средняя мощность излучения РЛС в данном случае не является постоянной и связана с параметром  $F_n$  известным соотношением [3]

$$P_{cp} = P_n \tau_n F_n, \quad (13)$$

поэтому выражение для расчета соответствующих затрат энергетических ресурсов имеет вид:

$$E_c = P_n \tau_n F_n n T_{обл}. \quad (14)$$

На рис. 2 показано изменение затрат энергетических ресурсов РЛС  $\Delta E$  за один период обзора относительно опорного значения (т.е. обеспечивающего достижение заданной величины дисперсии ошибки оценивания за соответствующее время) при изменении требований к точности и времени сопровождения цели.

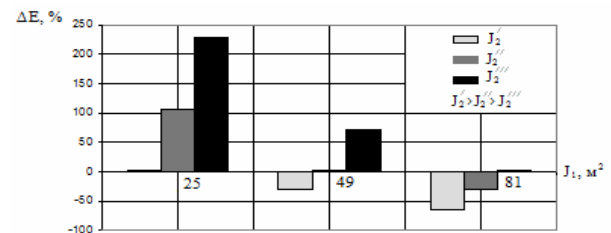


Рис. 2. Относительные затраты энергоресурса РЛС на достижение требуемой точности за заданное время

При моделировании были приняты следующие численные значения используемых параметров цели и РЛС:  $\sigma_{ц}=0,03$  м<sup>2</sup>,  $T_{обз}=3$  с,  $R=27$  км,  $c=3 \cdot 10^8$  м/с,  $\tau_n=4$  мкс,  $G=10000$ ,  $\lambda=0,03$  м,  $k=1,38^{23}$  Дж/град,  $T_0=300$  К,  $P_n=30$  кВт,  $\theta_{аз}=1^\circ$ ,  $\theta_{ум}=3,75^\circ$ ,  $\Phi_{аз}=360^\circ$ ,  $\Phi_{ум}=30^\circ$ .

Анализ данных, представленных на рис. 2, позволяет сделать вывод о том, что управление режимом сопровождения путем минимизации только одного из показателей качества (1) – (3) вызывает либо нерациональный расход энергоресурса РЛС, либо приводит к увеличению времени или ошибки

сопровождения цели. Все это, в свою очередь, снижает эффективность как собственно РЛС, так и всего ЗРК, в состав которого она входит [2]. Таким образом, проблема заключается в необходимости формирования обобщенного показателя качества управления, позволяющего одновременно учесть все три требующих минимизации противоречивых показателя (1) – (3).

**Анализ последних исследований и публикаций.** Среди исследований и публикаций последнего времени, посвященных рассматриваемой проблеме, наиболее общий подход к ее решению представлен в работе [1].

Оптимизация режима сопровождения цели осуществляется здесь посредством минимизации обобщенного показателя качества следующего вида:

$$I = \alpha I_1 + \beta I_2, \quad (15)$$

где  $I_1$  и  $I_2$  – частные показатели, характеризующие соответственно ошибку оценки координаты сопровождаемой цели и время сопровождения;  $\alpha$  и  $\beta$  – весовые коэффициенты, учитывающие неодинаковый вклад в обобщенный показатель каждого слагаемого.

Приведены соотношения, позволяющие определить доставляющие минимум показателю (15) количество измерений оцениваемой координаты и число зондирующих импульсов в пачке. Вместе с тем выражения для расчета  $\alpha$  и  $\beta$  отсутствуют.

Однако, как показано в работах [7 – 9], именно обоснование весовых коэффициентов представляет собой главную трудность при формировании обобщенного показателя качества управления в виде взвешенной суммы частных показателей. Кроме того, показатель вида (15) не учитывает в явном виде затрат энергетического ресурса РЛС на сопровождение цели.

**Целью статьи** является выбор показателя качества управления режимом сопровождения РЛС, учитывающего все особенности ее функционирования, и свободного от указанных выше недостатков.

**Постановка задачи.** Имеется совокупность функционалов (частных показателей качества управления режимом сопровождения РЛС) вида (1) – (3), которые образуют вектор

$$J_0 = \{J_i\}_{i=1}^3. \quad (16)$$

Требования, предъявляемые к РЛС как информационному средству ЗРК, сводятся к ограничениям на возможные значения этих функционалов, заключающиеся в указании области их возможных изменений в виде неравенств:

$$a_i \leq J_i \leq A_i, \quad (17)$$

где  $a_i$  и  $A_i$  – соответственно нижние и верхние значения функционалов  $J_i$ .

Необходимо осуществить скалярную свертку векторного показателя (16) таким образом, чтобы получить возможность его минимизации по предварительно выбранному одному управляемому пара-

метру, связывающему между собой все частные показатели (1) – (3).

### Изложение основного материала

В качестве единого параметра, связывающего между собой все частные показатели (1) – (3), используем нормированный коэффициент энергопотребления (КЭП)  $\xi_c$  режима сопровождения как одного из  $K$  режимов работы МФ РЛС [10]. Он определяет, какая доля общего ресурса РЛС (количество измерений  $M_c$ , время  $T_c$  или энергия  $E_c$ ) расходуется на интервале длительностью  $T$  для минимизации функционала  $J_i$ :

$$\xi_c = \frac{M_c}{M} = \frac{T_c}{T} = \frac{E_c}{E}, \quad (18)$$

где  $E$  и  $M$  – соответственно общая энергия и количество зондирующих импульсов, излученные РЛС за время  $[0; T]$ . Так как

$$\sum_{k=1}^K \xi_k = 1, \quad (19)$$

то КЭП  $k$ -того функционального режима непосредственно определяет характеристики МФ РЛС в этом режиме и косвенно – в других одновременно реализуемых режимах. Поэтому результат решения задачи управления режимом сопровождения с соответствующим показателем качества влияет на эффективность МФ РЛС как информационного средства ЗРК в целом.

В работе [10] показано, что функционал (1) может быть записан как:

$$J_1 = C_c / \xi_c, \quad (20)$$

где  $C_c$  – коэффициент, связывающий ошибки определения координат сопровождаемой цели с долей энергетики МФ РЛС  $\xi_c$ , выделенной на ее сопровождение [3].

В свою очередь, с учетом (18) функционалы (2) и (3) примут вид:

$$J_2 = T \xi_c, \quad (21)$$

$$J_3 = E \xi_c. \quad (22)$$

Для скалярной свертки векторного показателя (16) воспользуемся описанным в работе [11] методом решения многокритериальных оптимизационных задач (к которым относится и рассматриваемая задача), основанным на применении скалярной свертки частных показателей качества по нелинейной схеме компромиссов:

$$J_0 = \sum_{i=1}^3 A_i (A_i - J_i)^{-1}, \quad (23)$$

где функционалы  $J_i$  удовлетворяют ограничению (17).

Идейная основа нелинейной схемы (23) заключается в том, что компромисс между частными показателями ставится в зависимость от ситуации, в которой принимается многокритериальное решение. При этом используется понятие напряженности ситуации как меры близости величины частных

показателей к своим предельным значениям (потерям). Дополнительным требованием является то, что все частные показатели должны быть неотрицательными и ограничены.

Показатели качества вида (20) – (22) являются неотрицательными по своему физическому смыслу. Ограничения же на их предельные значения могут быть записаны как:

$$a_i = 0; A_1 = \sigma_{\text{тр}}^2; A_2 = T_{\text{max}}; A_3 = E_{\text{max}} \quad (24)$$

где  $T_{\text{max}}$  – максимально допустимая длительность интервала сопровождения цели, обуславливаемая требованиями вышестоящего потребителя траекторной информации (т.е. ЗРК);  $E_{\text{max}}$  – энергетический ресурс, выделяемый на режим сопровождения с учетом необходимости одновременного решения МФ РЛС ряда других задач (например, обнаружения новых целей и наведения ЗУР).

Используя соотношения (20) – (22) и (24), приведем выражение (23) к следующему виду:

$$J_o = \sigma_{\text{тр}}^2 (\sigma_{\text{тр}}^2 - C_c / \xi_c)^{-1} + T_{\text{max}} (T_{\text{max}} - T_{\xi_c})^{-1} + E_{\text{max}} (E_{\text{max}} - E_{\xi_c})^{-1} \quad (25)$$

Так как энергия, излученная МФ РЛС за некоторое время, равна произведению средней мощности излучения на величину данного временного интервала [3], то

$$J_o = \sigma_1^2 (\sigma_1^2 - C_c / \xi_c)^{-1} + 2T_{\text{max}} (T_{\text{max}} - T_{\xi_c})^{-1} \quad (26)$$

Оптимальное значение КЭП  $\xi_c^{\text{опт}}$ , доставляющее минимум показателю (26), находится в результате решения уравнения

$$\partial J_o / \partial \xi_c = 0 \quad (27)$$

### Выводы

Функционал (25) одновременно учитывает противоречивые требования по минимизации расхода энергетического ресурса РЛС, времени и ошибок сопровождения цели и поэтому в виде выражения (26) может быть использован как показатель качества при разработке методов и алгоритмов управления

режимом сопровождения МФ РЛС. Принятие аксиоматики нелинейной схемы компромиссов позволяет формализовано получать парето-оптимальное решение рассматриваемой многокритериальной задачи при любых изменениях целевой обстановки в зоне обзора данной РЛС.

### Список литературы

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
2. Можар М.К. Проблемы управления зенитными ракетными комплексами / М.К. Можар, В.М. Решетник, И.Ю. Гришин // Наука и оборона. – 1995. – № 2. – С. 14-21.
3. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Советское радио, 1971. – 368 с.
4. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
5. Вишнякова Л.В. Система автоматизированного формирования облика зенитных ракетных комплексов / Л.В. Вишнякова, В.И. Кухтенко // Техническая кибернетика. – 1993. – № 6. – С. 137-185.
6. Этингтон Д.А. Многофункциональные вращающиеся РЛС с электронным сканированием для обзора воздушного пространства / Д.А. Этингтон, П.Дж. Карилас, Дж. Д. Райт // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 199-216.
7. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества / Л.С. Гуткин. – М.: Советское радио, 1975. – 468 с.
8. Сильвестров А.Н. Идентификация и оптимизация автоматических систем / А.Н. Сильвестров, П.Н. Чинаев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 396 с.
9. Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза сложных технических систем / Т.К. Сиразетдинов. – М.: Машиностроение, 1988. – 298 с.
10. Смирнов О.Л. Оптимальное распределение энергетических ресурсов многофункциональной РЛС между функциональными режимами / О.Л. Смирнов, С.Н. Пискунов, В.М. Решетник, Е.В. Титова // АСУ и приборы автоматики. – Х., ХГТУРЭ, 1998. – Вып. 107. – С. 42-45.
11. Воронин А.Н. О формализации выбора схемы компромиссов в задачах многокритериальной оптимизации / А.Н. Воронин // Техническая кибернетика. – 1984. – № 2. – С. 37-45.

Поступила в редколлегию 18.04.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Е.Л. Казаков, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ВИБІР ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ СУПРОВОДЖЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС

О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконе, В.Н. Чепига

Розглядається вибір показника якості керування режимом супроводження багатofункціональної РЛС, що дозволяє одночасно врахувати суперечливі вимоги по мінімізації витрати енергетичного ресурсу РЛС, часу та помилок супроводження цілі. Прийнята аксіоматика нелінійної схеми компромісів дозволяє формалізовано отримувати парето-оптимальне рішення багатокритеріальної задачі що розглядається за будь-яких змін цільової обстановки в зоні огляду даної радіолокаційної станції.

**Ключові слова:** багатofункціональна РЛС, режим супроводу, показники якості управління.

### METHODS OF DIELECTRIC NOSE RADOMES MANUFACTURING WITH SMALL BORESIGHT ERRORS

O.L. Smirnov, O.M. Stavitskiy, E.O. Ryabokon, V.M. Chepiga

A choice is examined of index of quality management the mode of accompaniment of the multifunction radio-location station, allowing simultaneously to take into account contradictory requirements on minimization of expense of power resource of the radio-location station, time and errors of accompaniment of purpose. The accepted axioms of nonlinear chart of compromises allows formalized to get the paretoo-optimum decision of the examined multicriterion task at any changes of having a special purpose situation in a keepout this radio-location station.

**Keywords:** multifunction RLS, mode of accompaniment, indexes of management quality.