

УДК 623.681.93

О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕЛИНЕЙНОЙ СХЕМЫ КОМПРОМИССОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМОМ СОПРОВОЖДЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС

Получены аналитические выражения и проведена оценка эффективности применения для управления режимом сопровождения многофункциональной РЛС показателя качества, построенного с использованием нелинейной схемы компромиссов. Показано, что использование такого показателя качества при разработке методов и алгоритмов управления режимом сопровождения позволяет повысить эффективность применения многофункциональной РЛС как информационной подсистемы зенитного ракетного комплекса.

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

### Введение

**Постановка проблемы.** В работе [1] получен показатель качества управления режимом сопровождения многофункциональной радиолокационной станции (МФ РЛС), построенный с использованием нелинейной схемы компромиссов. Однако оценить эффективность данного показателя по сравнению с показателями, традиционно используемыми для оптимизации режима сопровождения, не позволяет отсутствие соответствующих аналитических выражений.

Эффективность применения того или иного показателя не зависит от его значения, а определяется величиной выигрыша в виде предотвращенного ущерба  $G$ , который обеспечивает МФ РЛС, являющаяся информационной подсистемой зенитного ракетного комплекса (ЗРК), самому ЗРК. В рассматриваемом в работе [1] иллюстративном примере типовой РЛС обнаружения/сопровождения ЗРК малой дальности войск противовоздушной обороны Сухопутных войск выражение для расчета  $G$  [2] может быть записано следующим образом:

$$G = \chi M_o \left( 1 - (1 - \exp(-\sigma^2 / I_o^2))^Z \right), \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент полноты отображения целевой обстановки в зоне обзора МФ РЛС;  $M_o$  – общее количество целей, одновременно находящихся в зоне обзора МФ РЛС, не превосходящее пороговое значение ее пропускной способности;  $\sigma^2$  – дисперсия ошибки определения положения сопровождаемой цели в некоторой точке ее траектории;  $I_o$  – параметр закона поражения;  $Z$  – количество зенитных управляемых ракет (ЗУР), одновременно наводимых МФ РЛС на каждую обстреливаемую цель.

Величины  $\chi$  и  $\sigma^2$  характеризуют качество радиолокационной информации, выдаваемой МФ РЛС для ЗРК. Однако использовать выражение (1) для оценки эффективности управления режимом сопровождения МФ РЛС в таком виде практически невозможно, так для этого необходимо знать зависимость значения  $G$

от одного или нескольких управляемых параметров, обеспечивающих минимизацию соответствующих показателей качества. Получение данной зависимости, позволяющей провести сравнительную оценку эффективности применения различных показателей качества управления режимом сопровождения МФ РЛС, и составляет основное содержание рассматриваемой в настоящей работе проблемы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Из исследований и публикаций последнего времени по данной теме можно отметить работы [3] и [4]. В статье [3] для максимизации показателя эффективности ЗРК (предотвращенного обороняемым объектам ущерба) используется, в том числе, оптимизация характеристик его основного информационного средства – РЛС обнаружения/сопровождения воздушных целей. Задача решается путем последовательного синтеза вариантов построения РЛС и ЗРК в целом с дальнейшим анализом полученных результатов. Однако выражения, в явном виде связывающие оптимизируемые параметры РЛС с показателем эффективности ЗРК, отсутствуют. В работе [4] среди прочих проблем управления ЗРК рассматривается задача согласования показателей качества, объективно отражающих эффективность функционирования его основных подсистем (в т.ч. информационной – РЛС) с общим показателем эффективности ЗРК, под которым также понимается величина предотвращенного ущерба. На основании результатов качественного анализа влияния основных характеристик РЛС на показатель эффективности ЗРК формулируются три целевые функции управления РЛС в режиме сопровождения, аналогичные описанным в [1] показателям качества. Вместе с тем не приводятся количественные результаты такого анализа, что не позволяет оценить эффективность ЗРК при управлении режимом сопровождения РЛС в соответствии с той или иной целевой функцией.

Таким образом, в известной литературе не рассматривается сравнительная оценка эффективности

применения различных показателей качества для управления одним и тем же режимом работы МФ РЛС.

**Целью статьи** является получение аналитических выражений для оценки эффективности показателя качества управления режимом сопровождения многофункциональной радиолокационной станции (МФ РЛС), построенного с использованием нелинейной схемы компромиссов.

**Постановка задачи.** Имеются три частных показателя качества управления режимом сопровождения РЛС ( $J_1, J_2, J_3$ ), а также построенный в виде их скалярной свертки по нелинейной схеме компромиссов обобщенный показатель  $J_0$  [1]. Необходимо оценить эффективность данного показателя по сравнению с показателями  $J_1$ - $J_3$ , предварительно определив зависимость выигрыша  $G$ , который обеспечивает МФ РЛС системе более высокого уровня иерархии – ЗРК, от одного управляемого параметра, связывающего между собой всю совокупность рассматриваемых показателей качества.

### Изложение основного материала

Коэффициент полноты отображения целевой обстановки в зоне обзора есть относительное число целей, сопровождаемых МФ РЛС в конкретной ситуации [2]:

$$\chi = N_{ц} / M_0, \quad (2)$$

где  $N_{ц}$  – количество одновременно сопровождаемых МФ РЛС целей. При детерминированном и равномерном целевом потоке (частным случаем которого является рассматриваемый в работе [1] процесс сопровождения одной цели) величина  $N_{ц}$  может быть определена как [2]:

$$N_{ц} = T / T_c, \quad (3)$$

где  $T_c$  – время, затрачиваемое МФ РЛС на сопровождение одной цели в течение временного интервала  $T$ .

При точном сопровождении цели по направлению дисперсия ошибки определения ее положения в некоторой точке траектории соответствует дисперсии ошибки оценивания дальности до цели  $R$  [5], которая, согласно [1], равна

$$\sigma^2 = C_c / \xi_c, \quad (4)$$

где  $C_c$  – коэффициент, связывающий ошибки определения дальности до сопровождаемой цели с долей энергии МФ РЛС  $\xi_c$ , выделенной на ее сопровождение. Тогда, используя понятие нормированного коэффициента энергопотребления (КЭП)  $\xi_c$  режима сопровождения [1], а также соотношения (2 – 4), запишем выражение (1) в виде

$$G = \xi_c^{-1} \cdot \left( 1 - (1 - \exp(-C_c / I_0^2 \xi_c))^Z \right), \quad (5)$$

Соотношение (5) выражает зависимость между величиной выигрыша  $G$  и КЭП режима сопровождения  $\xi_c$ , обеспечивающим минимизацию того показателя качества, в соответствии с которым осуществляется управление режимом сопровождения МФ РЛС в данной конкретной ситуации.

Для обобщенного показателя качества управления  $J_0$  оптимальное значение КЭП  $\xi_{со}^{опт}$ , полученное в результате решения уравнения  $\partial J_0 / \partial \xi_c = 0$  [1], равно:

$$\xi_{со}^{опт} = \frac{2C_c - 4T_{max}C_c}{2(TC_c - 2T_{max}\sigma_1^2)} - \frac{2 \cdot \sqrt{(2T_{max}C_c - C_c)^2 + (2T_{max}C_c \times (TC_c / \sigma_1^2 + T_{max}^2 \sigma_1^2 / T) - 5T_{max}^2 C_c^2)}}{2(TC_c - 2T_{max}\sigma_1^2)}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1^2$  – дисперсия ошибки оценивания дальности до сопровождаемой цели при однократном зондировании [1].

Время  $T_{max}$ , представляющее собой максимально допустимую (исходя из условий функционирования ЗРК как вышестоящего потребителя траекторной информации) длительность сопровождения цели, может быть определено, например, для случая нулевого курсового параметра цели как (рис. 1):

$$T_{max} = \frac{R - D_{min} (1 + V_{ц} / V_p^{ст})}{V_{ц}}, \quad (7)$$

где  $D_{min}$  – ближняя граница зоны поражения ЗРК;  $V_{ц}$  – скорость сопровождаемой цели;  $V_p^{ст}$  – средняя скорость ЗУР на стартовом участке ее траектории.



Рис. 1. К определению максимально допустимой длительности сопровождения цели МФ РЛС ЗРК

Для показателей  $J_1 - J_3$  соответствующие значения КЭП  $\xi_{с1}^{опт} - \xi_{с3}^{опт}$  находятся при моделировании процесса сопровождения цели согласно условиям, описанным в [1]. При этом специфика рассматриваемой в качестве примера РЛС обуславливает необходимость следующего уточнения данного в [1] определения КЭП режима сопровождения.

За период обзора пространства  $T_{обз}$  РЛС, помимо сопровождения цели с частотой  $F_{и}$ , осуществляет просмотр оставшихся угловых направлений с излучением в каждое из них  $N_0$  импульсов. Частота излучения этих импульсов  $F_0$  может быть найдена как [6]:

$$F_0 = \left[ \frac{\Phi_{аз} \Phi_{ум} - 1}{\theta_{аз} \theta_{ум}} - 1 \right] \frac{N_0}{T_{обз}}, \quad (8)$$

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

Тогда, используя определение энергетического ресурса РЛС [2] и полученные в [1] соотношения

для его расчета, запишем КЭП режима сопровождения в следующем виде:

$$\xi_c = F_u / F_o . \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить величину параметра  $\xi_c$ , доставляющего минимум используемому в каждом конкретном случае показателю качества управления режимом сопровождения МФ РЛС.

В процессе боевой работы ЗРК необходимо в первую очередь стремиться к сокращению времени сопровождения цели [7], что соответствует использованию для минимизации обобщенного показателя качества  $J_0$  КЭП  $\xi_{co}^{opt}$  в виде (6). Поэтому для оценки эффективности данного показателя можно ограничиться сравнением величины обеспечиваемого им для ЗРК выигрыша (значения предотвращенного ущерба в относительных единицах)  $G_0$  с выигрышем  $G_2$ , получаемым при минимизации показателя качества  $J_2$ .

На рис. 2 приводятся результаты такой оценки при  $l_0 = 15$  м;  $Z = 2$ ,  $D_{min} = 1,5$  км,  $V_{ц} = 600$  м/с,  $V_p^{ст} = 400$  м/с,  $N_0 = 13$  и требуемой точности сопровождения цели  $\sigma_{тр}^2 = 81$  м<sup>2</sup>.

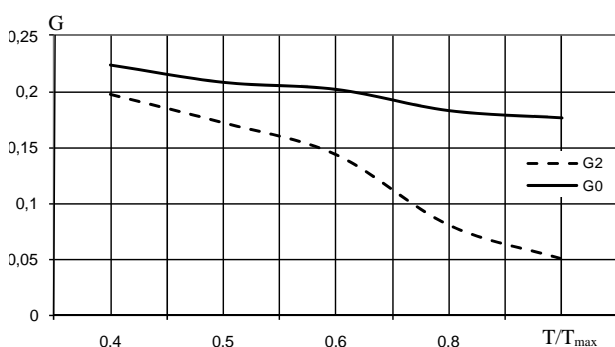


Рис. 2. Выигрыш, обеспечиваемый МФ РЛС при использовании различных показателей качества управления режимом сопровождения

Анализ полученных результатов показывает, что при управлении режимом сопровождения МФ

РЛС обобщенный показатель качества  $J_0$  обеспечивает более значительный выигрыш по сравнению с традиционным показателем  $J_2$ , причем это преимущество сохраняется при усложнении условий боевой работы ЗРК (уменьшении времени, отводимого на сопровождение цели).

## Выводы

Показатель качества управления режимом сопровождения МФ РЛС, построенный с использованием нелинейной схемы компромиссов, позволяет повысить эффективность применения МФ РЛС как информационной подсистемы ЗРК, поэтому его применение при разработке методов и алгоритмов управления режимом сопровождения МФ РЛС является целесообразным.

## Список литературы

1. Смирнов О.Л. Выбор показателя качества управления режимом сопровождения многофункциональной РЛС / О.Л. Смирнов, О.Н. Ставицкий, Е.А. Рябоконт, В.Н. Чепига // Збірник наукових праць ХУ ПС. – Х.: ХУПС, 2009. – № 2 (20). – С. 38-41.
2. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Сов. радио, 1971. – 368 с.
3. Вишнякова Л.В., Кухтенко В.И. Система автоматизированного формирования облика зенитных ракетных комплексов / Л.В. Вишнякова, В.И. Кухтенко // Техническая кибернетика, 1993. – № 6. – С. 137-185.
4. 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.
5. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
6. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
7. Кун А.А. Основы построения зенитных ракетных комплексов / А.А. Кун. – М.: Воениздат, 1985. – 344 с.

Поступила в редколлегию 30.09.2009

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

## ЕФЕКТИВНІСТЬ НЕЛІНІЙНОЇ СХЕМИ КОМПРОМІСІВ ПРИ УПРАВЛІННІ РЕЖИМОМ СУПРОВОДЖЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС

О.Л. Смірнов, О.М. Ставицький, Е.О. Рябоконт

Отримані аналітичні вирази та проведена оцінка ефективності застосування для управління режимом супроводження багатофункціональної РЛС показника якості, що побудований з використанням нелінійної схеми компромісів. Показано, що застосування такого показника при розробці методів та алгоритмів управління режимом супроводження дозволяє підвищити ефективність застосування багатофункціональної РЛС як інформаційної підсистеми зенітного ракетного комплексу.

**Ключові слова:** багатофункціональна РЛС, режим супроводження, показники якості управління, нелінійна схема компромісів.

## EFFICIENCY OF NON-LINEAR TRADE-OFF SCHEME BY CONTROL OF TRACKING MODE MULTIFUNCTIONAL RADAR STATION

O.L. Smirnov, O.N. Stavitsky, E.O. Ryabokon

The analytical terms are received, and the efficiency application estimation for controlling the tracking mode of multifunctional radar station of quality index based on nonlinear trade-off scheme. It is shown the application of such quality index when control methods and algorithms of tracking mode are developed, allows to increase the application efficiency of multifunctional radar station as an information subsystem of antiaircraft-rocket complex.

**Keywords:** multifunctional radar station, tracking mode, quality control indexes, nonlinear trade-off scheme.