
УДК 621.396.96

С.В. Кадубенко, Г.А. Злывка

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ (ВРЕМЕННЫХ) РЕСУРСОВ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ РЛС ЗРК В РЕЖИМЕ ПОИСКА И ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

В статье рассматриваются пути повышения эффективности информационных средств современных и перспективных зенитных ракетных комплексов. Рассматривается режим поиска и обнаружения воздушных целей многофункциональной РЛС зенитного ракетного комплекса. Обоснована необходимость решения задачи оптимального распределения энергетических (временных) ресурсов МФ РЛС ЗРК в режиме поиска и обнаружения целей.

Ключевые слова: энергетические (временные) ресурсы, режим поиска и обнаружения, критерий эффективности управления.

Общая постановка проблемы

Интенсивное развитие и совершенствование средств воздушного нападения (СВН), форм и способов их боевого применения, вызывают необходимость эффективного противодействия им, которое должно базироваться на развитой системе противовоздушной обороны (ПВО) [1]. Важную роль в достижении эффективного применения средств ПВО играют информационные средства ЗРК (радиолокационные станции). В современных и в перспективных ЗРК, как правило, применяются многофункциональные радиолокационные станции (МФ РЛС) [2]. В МФ РЛС обеспечиваются и реализуются управляемый поиск целей в зоне обзора, активное сопровождение множества разнотипных целей, формирование и передача команд управления, наведение средств воздействия (самолётов или ракет) и выполнение других функциональных операций [3]. Как правило, программы и алгоритмы функционирования МФ РЛС ЗРК закладываются в вычислительные средства ещё на этапе проектирования, и они являются неизменными. Эти алгоритмы рассчитаны на работу в определенных условиях, и не учитывают конкретные условия. Таким образом, энергетические (временные) ресурсы МФ РЛС не всегда используются рационально, а потенциальные возможности станции используются не полностью.

Одним из путей повышения эффективности МФ РЛС является оптимизация процесса распределения энергетическими (временными) ресурсами в режиме поиска и обнаружения воздушных целей. Под поиском, при этом, понимается процесс целенаправленного обследования определённой области пространства для обнаружения находящегося там объекта [4]. Под обнаружением понимается получение информации о месте объекта путём установления с ним прямого энергетического контакта [4].

Анализ известных работ показал, что решение задачи оптимального распределения ограниченных энергетических (временных) ресурсов в режиме поиска и обнаружения в общем виде отсутствует, что приводит к необходимости проведения дальнейших исследований.

Для постановки задачи необходимо рассмотреть понятия «пространство поиска» и «поисковое усилие». Под пространством поиска будем понимать ограниченную область пространства, в которой МФ РЛС ведёт поиск находящихся там объектов. Под поисковым усилием понимается направленное действие станции, осуществляемое с целью получения информации о местоположении объекта.

Для обеспечения максимальной эффективности поисковых усилий наиболее пригоден вид обзора пространства поиска со сканированием диаграммой направленности, как по азимуту, так и по углу места. Необходимо принимать во внимание различные

размеры пространственного объёма, который просматривается РЛС, по азимуту и углу места. Это определяется тем, что размеры сектора обзора по азимуту всегда значительно больше, чем по углу места, а условия решения задачи обзора меняются от периода к периоду. При этом непрерывный просмотр пространства обеспечивается по азимуту, а по углу места достаточно дискретного обзора пространства, так как цели в основном перемещаются в горизонтальной плоскости. В этом случае, информация о положении цели по углу места на этапе поиска представляет меньший интерес.

При организации поиска цели должны решаться задачи распределения поисковых усилий не только в пространстве, но и во времени, при минимальных затратах поисковых усилий. При поиске в заданном районе, объект поиска может быть обнаружен в любой момент в разных участках района поиска. Поэтому поисковые усилия целесообразно распределять таким образом, чтобы обеспечить оптимальный обзор пространства поиска за наименьшие промежутки времени с обеспечением высокой вероятности обнаружения цели.

Осуществление управления в режиме поиска и обнаружения проводится путём составления оптимальных расписаний последовательности просмотра ячеек пространства поиска. Периодичность реализации оптимального управления в режиме поиска и обнаружения, как правило определяется динамикой изменения обстановки в зоне обзора МФ РЛС.

Целью статьи является постановка задачи оптимального распределения энергетических (временных) ресурсов МФ РЛС ЗРК в режиме поиска и обнаружения целей.

Изложение материалов исследований

Наиболее общим показателем, определяющим эффективность системы ПВО, является математическое ожидание предотвращённого ущерба:

$$\eta = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \eta_{ik} P_{im} P_{ik} P_{nim} P_{rim} x_{im}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1, I}$ – количество средств нападения (целей);

$k = \overline{1, K}$ – количество обороняемых объектов;

$m = \overline{1, M}$ – количество средств обороны; η_{ik} – средний ущерб, который может нанести k -му объекту прорвавшаяся к нему i -я цель; P_{im} – вероятность обнаружения i -й цели m -м средством обороны;

P_{ik} – вероятность атаки i -й целью k -го объекта;

$P_{nim} = 1 - (1 - P_{li})^{s_i}$ – вероятность поражения i -й цели m -м огневым комплексом при стрельбе s_i ракетами; P_{li} – вероятность поражения i -й цели одной зенитной управляемой ракетой; s_i – количество ЗУР назначенных для уничтожения i -й це-

ли; P_{rij} – вероятность того, что i -я цель, атакуя k -й объект, войдет в зону поражения m -го огневого комплекса; x_{im} – элемент матрицы целераспределения, принимающий значения единица, если на i -ую цель назначен m -й огневой комплекс, или значение ноль в противоположном случае.

Анализ выражения (1) показывает, что величина математического ожидания предотвращенного ущерба зависит от реализации потенциальных возможностей МФ РЛС в каждом из функциональных режимов, в том числе режиме поиска и обнаружения целей.

При постановке задачи распределения энергетических (временных) ресурсов при реализации функционирования МФ РЛС, под энергетическими (временными) ресурсами понимается суммарное количество временных дискрет, которое выделяется на реализацию всех радиолокационных функций в цикле её работы [5, 6].

Исходя из этого, количество временных дискрет которое выделяется на реализацию конкретной радиолокационной функции, пропорционально количеству энергии, а значит, и энергетическому (временному) ресурсу, затрачиваемого РЛС на выполнение этой функции [5].

Введем коэффициент энергопотребления МФ РЛС - ξ [7], который будет показывать, какая доля общего энергетического (временного) ресурса МФ РЛС расходуется на выполнение j -й радиолокационной функции за цикл управления:

$$\xi_j = \frac{t_j}{T} = \frac{n_j}{N_T} = \frac{E_j}{E} = \frac{S_j}{S}, \quad (2)$$

где t_j – время, выделяемое на реализацию j -й радиолокационной функции; T – общее время работы МФ РЛС; n_j – количество зондирований направления, выделяемое на реализацию j -й радиолокационной функции; N_T – общее число зондирований за время T ; E_j – энергия МФ РЛС, выделяемая на реализацию j -й радиолокационной функции; E – общий энергетический (временной) ресурс станции; S_j – количество сеансов связи, выделяемое на реализацию j -й радиолокационной функции; S – общее количество сеансов связи.

Известно, что в режиме поиска и обнаружения возможности станции определяются вероятностью правильного обнаружения D .

$$P\{[x(t) + n(t)] > z_0\} = D, \quad (3)$$

где $x(t)$ – сигнал, отраженный от цели; $n(t)$ – шум (помеха) на выходе приемника; z_0 – порог, при превышении которого принимается решение о наличии цели.

Эта вероятность зависит от отношения мощностей сигнала и шума – q [6].

В режиме поиска и обнаружения МФ РЛС отношение сигнал/шум можно выразить как:

$$\rho^2 = \frac{P_{CP} G_A \lambda^2 \sigma_{Ц}}{(4\pi)^2 N_{Ш} k T^0 L_0} \frac{T}{\Omega R_0^4} \xi_0, \quad (4)$$

где P_{CP} – средняя мощность передатчика; G_A – коэффициент усиления совмещенной антенны МФ РЛС; λ – длина волны излучаемых колебаний; $\sigma_{Ц}$ – эффективная поверхность рассеивания цели; $N_{Ш}$ – коэффициент шума приемника; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Вт / Гц – постоянная Больцмана; T^0 – абсолютная температура источника сигнала; L_0 – обобщенный множитель потерь при реализации поиска и обнаружения; Ω – величина сектора обзора, в котором реализуется обнаружение целей; R^0 – дальность до обнаруженной цели; ξ_0 – коэффициент энергопотребления режима поиска и обнаружения.

Предыдущее выражение можно записать как

$$\rho^2 = C_0 \xi_0, \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{P_{CP} G_A \lambda^2 \sigma_{Ц}}{(4\pi)^2 N_{Ш} k T^0 L_0} \frac{T}{\Omega R_0^4} \xi_0, \quad (6)$$

Следовательно, потенциальные погрешности измерения координат будут рассчитываться соотношением:

$$\sigma_R^2 = \left(\frac{C}{2}\right)^2 \frac{1}{\Delta f^2 4\pi C_0 \xi_0}, \quad (7)$$

$$\sigma_\theta^2 = \frac{3}{4\pi^2} \frac{\lambda^2}{L_\theta^2 \cos \alpha_\theta C_0 \xi_0}, \quad (8)$$

Из выше полученных соотношений можно сделать заключение, что качество решения задачи поиска и обнаружения целей зависит от доли энергетических (временных) ресурсов МФ РЛС, выделенной на реализацию функционального режима поиска и обнаружения.

Исходя из вышеизложенного, доля ресурсов, выделяемая на осуществление поиска и обнаружения объекта в одном угловом направлении пространства, буде определяться как:

$$\xi_{oi} = \sum_{i=1}^I \frac{E_{oi}}{E} = \sum_{i=1}^I \frac{t_{oi}}{T} = \sum_{i=1}^I \frac{n}{N}, \quad (9)$$

где I – количество угловых направлений области пространства, в котором проводится поиск и обнаружение целей; E_{oi} – энергия МФ РЛС, выделяемая на реализацию поиска и обнаружения в одном угловом направлении; E – общий энергетический (временной) ресурс станции; t_{oi} – время, выделяемое на реализацию i -й радиолокационной функции в одном угловом направлении; T – общее время работы МФ РЛС; n_{oi} – количество зондирований одного углового направления, выделяемое на реализацию i

радиолокаційної функції; N – загальне число зондувань за час роботи МФ РЛС.

Таким образом ξ_{oi} визначає величину пошукового зусилля в вибраному кутовому напрямку.

Для рішення задачі оптимізації розподілення енергетичних (часових) ресурсів МФ РЛС в режимі пошуку і виявлення цілей необхідно вибрати деякий показник оптимальності, характеризуючий особливості режиму пошуку і виявлення як фізичного процесу, тобто показник якості виду:

$$I = I(U_k), \quad (10)$$

де $U_k, k = 1, k$ – управляемі параметри (оптимізуемі характеристики) розглядаваного режиму пошуку і виявлення цілей, і по фізичному значенню відповідають ξ_{oi} .

При цьому для пошуку оптимальних значень управляемих параметрів $U_k^{\text{опт}}$ необхідно розв'язати наступне рівняння:

$$I(U_k^{\text{опт}}) = \left\{ \min_{U_k} \right\} I(U_k), \quad (11)$$

з урахуванням відповідних обмежень, накладуваних характером процесу пошуку і виявлення цілей.

Кінцевою метою роботи МФ РЛС в режимі пошуку і виявлення є виявлення траєкторій об'єктів [8, 9]. Отже, показник $I(U_k)$ ефективності повинен достатньо повно характеризувати функціональний режим пошуку і виявлення з точки зору виконання його кінцевої задачі і витрат ресурсів на реалізацію.

Висновки

Для підвищення ефективності застосування ЗРК необхідно повністю реалізовувати наявні потенціальні можливості МФ РЛС. Це можливо за рахунок розподілення енергетичного ресурсу в основних режимах функціонування

РЛС з урахуванням складової обстановки в робочій зоні МФ РЛС.

Для рішення такої задачі в режимі пошуку і виявлення цілей необхідно обґрунтувати показник ефективності функціонування МФ РЛС, який зв'язує витрати енергетичного ресурсу для виконання цієї функції і враховує особливості функціонування МФ РЛС на кожному з етапів даного режиму.

Список литературы

1. Числов В. Подавление системы ПВО / В. Числов // *Зарубежное военное обозрение*. – 1993. – № 1. – С. 35-39.
2. Алексеев Я. Состояние и перспективы развития зарубежных ЗРК большой и средней дальности / Я. Алексеев, О. Данилов // *Зарубежное военное обозрение*. – 2006. – № 11. – С. 35-43.
3. Кузьмин С. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. Кузьмин. – К.: КВЦ, 2000. – 428 с.
4. Абчук В.А. Поиск объектов / В.А. Абчук, В.Г. Суздаль. – М.: Сов. радио, 1977. – 336 с.
5. Кадубенко С.В. Метод оптимального управления режимом наведения многофункциональной РЛС / С.В. Кадубенко, А.В. Гомозов, В.П. Тарактей // *Збірник наукових праць*. – Х.: ХАІ, 2001. – Вип. 21. – С. 47-53.
6. Кун А.А. Основы построения зенитных ракетных комплексов / А.А. Кун. – М.: Воениздат, 1985. – 343 с.
7. Кадубенко С.В. Обґрунтування критерію ефективності керування енергетичним ресурсом багатofункціональної радіолокаційної станції зенітного ракетного комплексу в режимі наведення зенітних керованих ракет РЛС / С.В. Кадубенко, Г.В. Мегельбей // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: науково-технічний журнал Національного аерокосмічного університету ім. Н.С. Жуковського «ХАІ»*. – 2006. – Вип. 4 (30). – С. 65-70.
8. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я.Д. Ширман. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
9. Конторов Д.С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Сов. радио, 1971. – 367 с.

Поступила в редколлегию 27.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.В. Ермаков, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ (ЧАСОВИХ) РЕСУРСІВ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОЇ РЛС ЗРК У РЕЖИМІ ПОШУКУ ТА ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

С.В. Кадубенко, Г.А. Зливка

У статті розглядаються шляхи підвищення ефективності інформаційних засобів сучасних і перспективних зенітних ракетних комплексів. Розглядається режим пошуку та виявлення повітряних цілей багатofункціональної РЛС зенітного ракетного комплексу. Обґрунтовано необхідність рішення завдання оптимального розподілу енергетичних (часових) ресурсів МФ РЛС ЗРК у режимі пошуку та виявлення цілей.

Ключові слова: енергетичні (часові) ресурси, режим пошуку та виявлення, критерій ефективності керування.

FORMULATION OF THE PROBLEM OF OPTIMAL ALLOCATION OF ENERGETIC (TIME) RESOURCES MULTIFUNCTION RADAR SAMS SEARCH MODE AND DETECTION OF AIR TARGETS

S.V. Kadubenko, G.A. Zlyvka

This article discusses ways of increasing effectiveness of information tools modern and prospective antiaircraft rocket complexes. Consider the mode of search and detection of air targets multifunctional RLS air defense missile systems. The necessity of solving the problem of optimal allocation of energy (time) resources multifunctional radar SAM mode search and detection of air targets.

Keywords: energy (temporary) resources, search and discovery, the criterion of the effectiveness of management.