

УДК: 623.4

DOI: 10.53816/20753608_2021_3_63

**МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСОМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ
НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ**

**CONTROL METHOD FOR COMPLEX OF ELECTRONIC WARFARE BASED
ON NEW PHYSICAL PRINCIPLES**

По представлению академика РАРАН Г.А. Лавринова

О.Н. Неплюев

ЦНИИ ВКС МО РФ

O.N. Neplyuev

Предлагается метод управления комплексом радиоэлектронной борьбы на новых физических принципах как задача оптимизации расписания обработки конечного множества заданий в системе с ограниченными ресурсами.

Ключевые слова: комплекс радиоэлектронной борьбы на новых физических принципах, расписание, управление, эффективность.

Control method for the complex of the Electronic Warfare based on new physical principles as optimization problem for schedule of processing for the finite set of problems at the system with limited resources.

Keywords: complex of electronic warfare based on physical principles, schedule, control, efficiency.

Комплексы радиоэлектронной борьбы на новых физических принципах (КРЭБ НФП) являются перспективными средствами решения задач противовоздушной обороны (ПВО). Наибольшее развитие КРЭБ НФП получили в части создания радиочастотных комплексов (РЧК) и лазерных комплексов (ЛК) [1, 2].

Перед традиционным вооружением РЧК и ЛК имеют ряд принципиально важных преимуществ:

1. Практически мгновенный характер доставки поражающего воздействия до целей;

2. Отсутствие вещественных средств поражения (ракет, пушечных выстрелов и пр.). На поражение целей необходимы затраты только электроэнергии, что существенно снижает стоимость поражения целей;

3. Практически неограниченный запас «выстрелов» (воздействий по целям).

При этом РЧК, в отличие от ЛК и прочих средств ПВО, может обеспечить одновременное воздействие по нескольким воздушным целям, что принципиально важно при реализации противником тактики «роя» [1, 2].

При типовой тактической ситуации наличия в зоне боевой работы КРЭБ НФП нескольких воздушных целей возникает необходимость в определении последовательности (порядка, приоритетности) воздействий («обстрела») по целям, реализация которой обеспечит максимальную эффективность КРЭБ НФП. Определение такой последовательности при изменяющейся обстановке в заданном временном цикле и выдача её в виде целеуказания является задачей управления КРЭБ НФП.

В существующих методах [3–5] решение данной задачи состоит в ранжировании

(выстраивании) воздушных целей в порядке, соответствующему критерию минимального полетного времени целей к дальней (ближней) границе зоны воздействия (поражения), либо минимального времени пребывания целей в этой зоне. Такой подход эффективен в случае, когда имеется возможность воздействия по всем целям из состава налета.

Цель работы — разработать метод управления КРЭБ НФП, обеспечивающий максимальную эффективность его боевого применения за счет определения оптимальной последовательности воздействий по целям.

Эффективность боевого применения КРЭБ НФП может оцениваться обобщенным показателем — математическим ожиданием числа пораженных целей, взвешенных по важности [3–7]:

$$M_n = \sum_{j=1}^N \omega_j P_j, \quad (1)$$

где N — количество целей в налете; ω_j — важность j -й цели; P_j — вероятность поражения j -й цели КРЭБ НФП.

Значение данного показателя зависит от последовательности воздействий по целям — расписания, которое рассматривается как однозначное отображение, присваивающее каждой цели в каждый момент времени определенный набор ресурсов (воздействий) [3, 5–7].

Расписание является предметом исследования теории расписаний [9–11]. В её терминах задача управления КРЭБ НФП может быть сформулирована следующим образом.

На одном процессоре (КРЭБ НФП) требуется выполнить множество $N = \{1, 2, \dots, n\}$ требований (воздействий по целям). Для каждого требования $j \in N$ определены ω_j — вес требования (важность ВЦ), длительность выполнения $p_j > 0$, время поступления требования на процессор $r_j \geq 0$ и крайний директивный срок $D_j > 0$, к которому требование должно быть выполнено. Процессор готов к выполнению требований с момента времени 0 и может выполнять одновременно только одно требование. Прерывания при выполнении любого требования запрещены. Необходимо построить расписание выполнения требований $\pi = \{S_j\}$, при котором все условия задачи соблюдены и оптимизируется значение целевой функции $\dot{Y}(\pi)$. То есть необходимо для каждого требования $j \in N$ опре-

делить момент начала выполнения S_j такой, что $S_j \geq r_j$ и момент окончания выполнения $C_j = S_j + p_j \leq D_j$. Причем если $S_j < S_i$, то $S_j + p_j \leq S_i$, где S_i — момент начала выполнения другого требования $i \in N, i \neq j$.

Формально

$$\pi^* = \arg \max_{\pi \in \Omega} \dot{Y}(\pi),$$

$$\dot{Y}(\pi) = \sum_{j=1}^N \dot{Y}_j(S_j) = \sum_{j=1}^N \omega_j(S_j) P_j(S_j), \quad (2)$$

где $\pi = \{S_j\}$, Ω — область допустимых расписаний, определяемая ограничениями

$$\begin{aligned} S_j &\geq r_j, C_j = S_j + p_j \leq D_j, \\ S_j < S_i &\Rightarrow S_j + p_j \leq S_i, \forall i \neq j, i, j \in N. \end{aligned} \quad (3)$$

По аналогии с принятым делением [6, 7] процесс функционирования КРЭБ НФП можно разбить на следующие основные фазы:

1) фаза подготовки: обнаружение целей и их захват, определение упрежденных координат целей (выработка данных счетно-решающим прибором), принятие решения о порядке воздействия (построение расписания), выдача целеуказания;

2) фаза наведения: наведение на цели системы поражения (луча воздействия);

3) фаза воздействия: воздействие на цели и удержание их в луче воздействия в течение заданного времени (автосопровождение системой поражения).

Фаза подготовки начинается с поступления информации о цели от средств разведки и заканчивается в момент выдачи целеуказания. Оценить успешное выполнение данной фазы можно с помощью вероятности $P_i^{\Phi 1}$ своевременной выдачи целеуказания с учетом поражения цели до заданного рубежа.

Фаза наведения длится с момента получения целеуказания до момента встречи луча воздействия с целью. Задача фазы наведения — обеспечить встречу луча воздействия с целью с требуемой точностью. Успешное выполнение этой фазы можно оценить условной вероятностью $P_i^{\Phi 2}$ встречи луча воздействия с целью, с требуемой точностью в зоне поражения.

Фаза воздействия на цели начинается с момента встречи луча воздействия с целью

и продолжается в течении заданного времени, необходимого для поражения цели. Фаза воздействия на цели оценивается условной вероятностью $P_i^{\Phi_3}$, которая зависит от:

– характеристик целей (уязвимости к воздействию, пространственного положения, размеров, скорости, маневренных возможностей и пр.);

– характеристик поражающего воздействия (мощности, длительности и пр.);

– возможностей следящей системы по удержанию целей в луче воздействия в течение заданного времени.

Изложенный подход к оценке процесса функционирования КРЭБ НФП позволяет получить следующее общее выражение для определения вероятности поражения цели КРЭБ НФП:

$$P_i(\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3) = P_i^{\Phi_1}(\Phi_1) \times P_i^{\Phi_2}(\Phi_2 / \Phi_1) \cdot P_i^{\Phi_3}(\Phi_3 / \Phi_1 \Phi_2), \quad (4)$$

где $P_i(\Phi_1 \Phi_2 \Phi_3)$ — вероятность поражения i -й цели КРЭБ НФП;

$P_i^{\Phi_1}(\Phi_1)$ — вероятность успешного выполнения фазы подготовки (событие Φ_1);

$P_i^{\Phi_2}(\Phi_2 / \Phi_1)$ — условная вероятность успешного выполнения фазы наведения (событие Φ_2);

$P_i^{\Phi_3}(\Phi_3 / \Phi_1 \Phi_2)$ — условная вероятность успешного выполнения фазы воздействия (событие Φ_3).

Вероятности $P_i^{\Phi_1}$, $P_i^{\Phi_2}$, $P_i^{\Phi_3}$ могут быть определены аналогично [6, 7].

Выполнение ограничений (3) определяется балансом времени КРЭБ НФП, под которым понимается соотношение между временем, располагаемым КРЭБ НФП для осуществления воздействия по цели, и временем, необходимым для осуществления воздействия по цели.

На рис. 1 представлены временные характеристики процесса функционирования КРЭБ НФП, где для i -й цели:

$t_i^{\text{об}}$ — время обнаружения и захвата цели на сопровождение;

t_i^y — рабочее время счетно-решающего прибора (решение задачи встречи) и принятие решения о порядке воздействия, выдача целеуказания;

t_i^h — время наведения системы поражения на цель;

t_i^b — время воздействия по цели;

$t_i^{\text{вх}}, t_i^{\text{вых}}$ — время движения цели от обнаружения до входа в зону воздействия и выхода из нее соответственно;

$t_i^p(t_i^{\text{hb}})$ — рабочее время КРЭБ НФП (время движения цели с момента обнаружения до начала воздействия по ней);

$t_i^{\text{кв}}$ — время движения цели с момента обнаружения до окончания воздействия по ней;

$t_i^{\text{расп}}$ — располагаемое время КРЭБ НФП или время движения цели с момента обнаружения до заданной границы $D_i^{\text{тр}}$ в зоне воздействия;

$t_i^{\text{зап}}$ — запас времени КРЭБ НФП на подготовку и воздействие или время движения цели с момента обнаружения до заданной границы $D_i^{\text{тр}}$ в зоне воздействия.

На рис. 1 показаны дальности до цели $D_i^{\text{об}}$, D_i^{hb} , $D_i^{\text{кв}}$ соответствующие интервалам времени $t_i^{\text{об}}$, t_i^{hb} , $t_i^{\text{кв}}$.

Располагаемое время средства КРЭБ НФП $t_i^{\text{расп}}$ равно времени движения цели с момента обнаружения до заданной границы $D_i^{\text{тр}}$ в зоне воздействия. Под заданной границей в зоне воздействия понимается геометрическое место точек, до которого требуется завершить воздействие по цели. В частном случае этой границей может быть ближняя граница зоны воздействия (в этом случае $t_i^{\text{расп}} = t_i^{\text{вх}}$).

При этом должны выполняться следующие условия

$$t_i^{\text{hb}} \geq t_i^{\text{вх}}, \quad (5)$$

т.е. цель должна быть в зоне воздействия и

$$t_i^{\text{расп}} \geq t_i^{\text{кв}}, \quad (6)$$

т.е. воздействие по цели должно закончиться до заданной границы $D_i^{\text{тр}}$.

Очевидно, что если условие (6) не выполняется, то КРЭБ НФП не в состоянии осуществлять воздействие по i -й цели.

На рис. 1 рабочее время средства КРЭБ НФП t_i^p и время движения цели с момента обнаружения до начала воздействия по ней t_i^{hb} совпадают. Этого может и не быть, так как к концу рабочего времени цель может еще не находиться в зоне воздействия (условие (5) не выполняется). Как следствие

$$t_i^{\text{hb}} \geq t_i^m, \quad t_i^m = \max(t_i^{\text{вх}}, t_i^p), \quad (7)$$

где $t_i^p = t_i^y + t_i^h$.

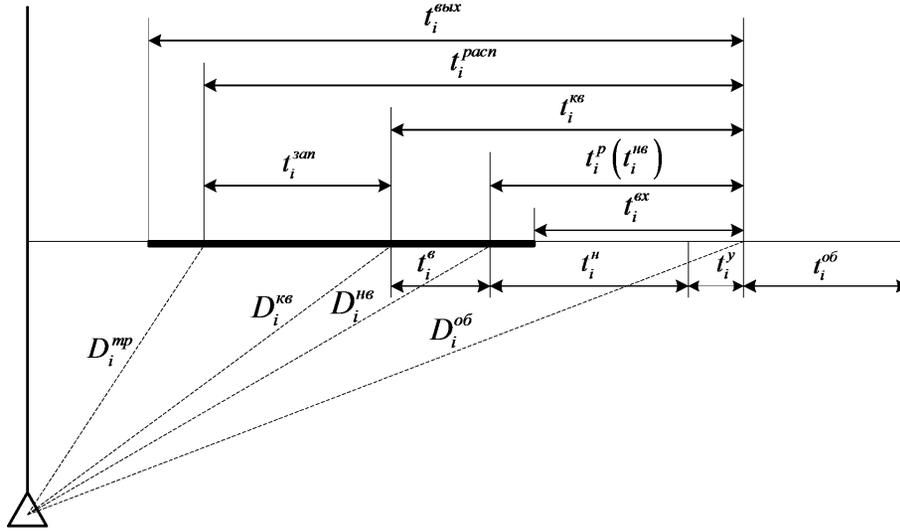


Рис. 1. Временные характеристики процесса функционирования КРЭБ НФП

Для заданного цикла управления КРЭБ НФП $t_{\text{ц}}^{\text{упр}}$ имеет место допущение

$$t_{\text{ц}}^{\text{упр}} \geq t_i^{\text{об}} + t_i^y = t^{\text{уп}}, t^{\text{уп}} \approx \text{const},$$

$$t^{\text{уп}} \ll t_i^{\text{н}} \quad \forall i \in N. \quad (8)$$

Определение $t_i^{\text{вх}}$, $t_i^{\text{вых}}$ возможно с применением способа, описанного в [8].

Время наведения системы поражения на цель $t_i^{\text{н}}$ определяется выражением

$$t_i^{\text{н}} = \left| \frac{Q_i - Q_{\text{тек}}^{\text{л}}}{\omega^{\text{л}} - \omega_i} \right|, \quad (9)$$

где $Q_i = \{\beta_i, \varepsilon_i\}$ — направление на i -ю цель;
 $Q_{\text{тек}}^{\text{л}} = \{\beta_{\text{тек}}^{\text{л}}, \varepsilon_{\text{тек}}^{\text{л}}\}$ — текущее положение луча воздействия в пространстве;

ω_i — угловая скорость перемещения i -ой цели относительно КРЭБ НФП;

$\omega^{\text{л}}$ — угловая скорость перемещения луча воздействия.

Для сформулированной задачи (2), (3) имеет место соответствие:

$$r_j = t_j^{\text{м}}, S_j = t_j^{\text{нв}}, p_j = t_j^{\text{в}}, D_j = t_j^{\text{расп}}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены граф возможных состояний КРЭБ НФП (расписаний) при воздействии по трем целям ($N = \{1, 2, 3\}$) и один из вариантов порядка воздействия (расписания $\pi_1 = \{S_1, S_2, S_3\}$, $S_1 < S_2 < S_3$), соответствующий выделенной ветви графа.

В соответствии с рис. 2

$$S_1 \geq t^{\text{уп}} + t_1^{\text{н}}, S_2 \geq S_1 + t_1^{\text{в}} + t_2^{\text{н}}, S_3 \geq S_2 + t_2^{\text{в}} + t_3^{\text{н}}. \quad (11)$$

В общем случае

$$S_{j+1} \geq S_j + p_j + t_{j+1}^{\text{н}} \quad \forall j \in N, j \neq 1. \quad (12)$$

В [9] приведены алгоритмы решения задачи (2), (3), оценена их трудоёмкость и показано, что она относится к классу NP-трудных задач.

В этой связи, для решения данного класса задач предлагается применять приближенные методы ограниченного перебора [9–11]. Эти методы могут быть основаны на идеологии «жадных» методов, то есть таких, в которых включенная в строящееся решение работа (операция) не может быть исключена из него на последующих шагах построения. При этом на каждом шаге процесса решения единичное приращение дается той переменной, которая обеспечивает максимальное приращение целевой функции в данной точке.

Предлагаемый метод решения задачи (2), (3) состоит в следующем.

На первом шаге определяется, какая цель будет обслуживаться первой. Для этого по каждой цели находится возможное время начала и окончания воздействия.

$$S_j = \max(t_j^{\text{вх}}, t_j^{\text{п}}), C_j = S_j + p_j, \quad \forall j \in N. \quad (13)$$

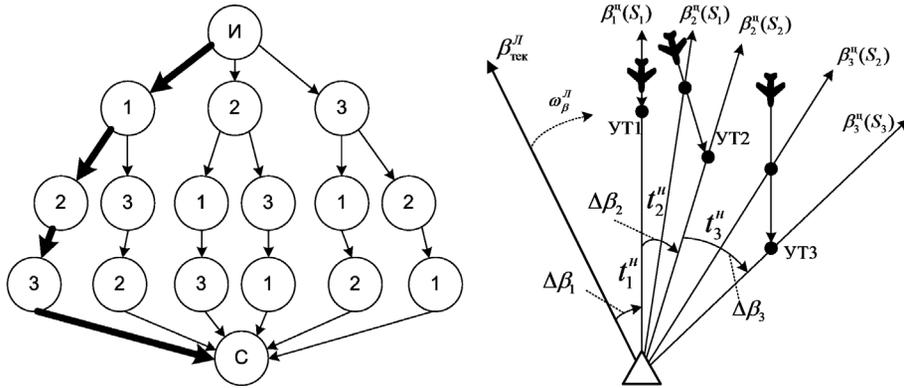


Рис. 2. Граф возможных состояний КРЭБ НФП и вариант порядка воздействия

Определяется значение элементов целевой функции с учетом директивных сроков

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = \{ \mathcal{E}_j(S_j) \}, \quad /C_j > D_j \rightarrow \mathcal{E}_j = 0, \\ \forall j \in N. \end{aligned} \quad (14)$$

Далее из всех элементов целевой функции находится максимальный, а соответствующие ему время начала воздействия и номер цели ставится в расписание. Время окончания воздействия по первой цели принимается за «текущее», а соответствующий элемент целевой функции обнуляется.

$$\begin{aligned} j^* = \arg \max_{j \in N} \mathcal{E}_j, \quad j_1 = j^*, \quad \pi = \{ S_{j_1} \}, \\ t^{\text{тек}} = C_{j_1}, \quad \mathcal{E}_{j_1} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

На втором шаге определяется, какая цель будет обслуживаться второй. По каждой цели, для которой элемент целевой функции не равен нулю, находится возможное время начала и окончания воздействия с учетом «текущего» времени на данном шаге.

$$\begin{aligned} S_j = \max(t_j^{\text{вх}}, t_j^{\text{п}} + t^{\text{тек}}), \quad C_j = S_j + p_j, \\ \forall j \in N \ \& \ \mathcal{E}_j \neq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Процедуры (14), (15) повторяются для второго шага.

$$\begin{aligned} j^* = \arg \max_{j \in N} \mathcal{E}_j, \quad j_2 = j^*, \quad \pi = \{ S_{j_1}, S_{j_2} \}, \\ t^{\text{тек}} = C_{j_2}, \quad \mathcal{E}_{j_2} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

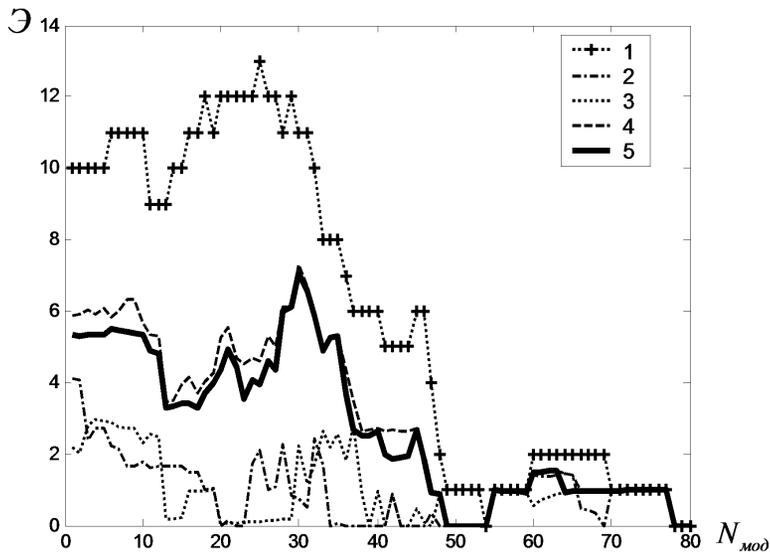


Рис. 3. Результаты оценки эффективности применения КРЭБ НФП

Аналогично второму осуществляются третий и последующие шаги. Максимальное количество шагов равно количеству целей N .

Решение задачи заканчивается, когда все элементы целевой функции равны нулю: $\mathcal{E}_j = 0$, $\forall j \in N$. Значение целевой функции определяется построенным расписанием

$$\mathcal{E}(\pi) = \sum_{j=1}^k \mathcal{E}_j(S_j), \quad \pi = \{S_{j_1}, S_{j_2}, \dots, S_{j_k}\},$$
$$k \leq N. \quad (18)$$

Результаты оценки эффективности применения КРЭБ НФП по показателю (2) для различных реализаций взаимного расположения КРЭБ НФП — цель и количества целей представлены на рис. 3.

На рис. 3 график 1 соответствует количеству целей входящих и находящихся в зоне поражения КРЭБ НФП, график 2 — расписание строится по критерию минимального подлетного времени целей к ближней границе зоны поражения, график 3 — расписание строится по критерию минимального времени пребывания целей в зоне поражения, график 4 — расписание определяется точным методом (полным перебором), график 5 — расписание определяется предлагаемым методом.

Приведенные результаты показывают, что использование предлагаемого метода может обеспечить прирост эффективности применения КРЭБ НФП в среднем до 64 %.

Литература

1. Макаренко С.И. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 4. Функциональное поражение сверхвысокочастотным и лазерным излучениями // Системы управления, связи и безопасности №3. 2020. С. 122–157.

2. Евграфов В.А. Разработка радиочастотного оружия за рубежом // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 1 (790). С. 36–40.

3. Неупокоев Ф.К. Противовоздушный бой. — М.: Воениздат. 1989. 262 с.

4. Верба В.С., Меркулов В.И., Садовский П.А., Чернов В.С., Иванов И.Ю. Способ двухэтапного ранжирования воздушных целей по степени опасности в радиолокационных информационно-управляющих системах. Патент RU 2 686 482 С1, Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вега». — М.: Роспатент. 2019.

5. Воронин В.В., Залевский Г.С., Скорик А.Б., Зубрицкий Г.Н. Метод решения задачи отбора целей для уничтожения многоканальным зенитным ракетным комплексом в условиях воздушного налета высокой интенсивности // Системы обработки информации. Зб. наук. пр. Вип. 3 (43). — Х.: ХУ ПС. 2005. С. 41–47.

6. Справочник офицера воздушно-космической обороны / под общей редакцией С.К. Бурмистрова. — Тверь: ВАВКО. 2005. 564 с.

7. Петухов С.И., Степанов А.Н. Эффективность ракетных средств ПВО. — М.: Воениздат. 1976. 104 с.

8. Безяев В.С. Способ построения интегральной зоны поражения группировки огневых средств. Патент RU 2 430 384 С1, Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин» (ОАО «НПП «Рубин»). — М.: Роспатент. 2010.

9. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний задачи и алгоритмы. — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2011. 222 с.

10. Танаев В.С., Шкурба В.В. Введение в теорию расписаний. — М.: Наука. 1975. 256 с.

11. Танаев В.С., Гордон В.С., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Одностадийные системы. — М.: Наука. 1984. 562 с.