

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ СТАНЦИЙ НАВЕДЕНИЯ

Н.В. ХАДЖИНОВА, М.П. РЕВОТЮК, О.В. КОТ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена задача оптимальной координации станций наведения в терминах задачи о динамическом назначении, когда множества целей, а также средств их подавления с оценками эффективности формируются в реальном времени. Предложена модель и алгоритм построения оптимального назначения, на основе которых формируется программа ориентации антенн станций наведения.

Ключевые слова: координация станций наведения, метод динамического программирования,

Abstract. The problem of optimal coordination of the guidance stations in terms of the dynamic assignment problem is considered, when sets of targets, as well as their suppression means with efficiency estimates are generated in real time. A model and an algorithm for constructing the optimal assignment are proposed, on the basis of which a program for the orientation of the antennas of the guidance stations is formed.

Keywords: coordination of the guidance stations, dynamic programming method.

Постановка задачи

Создание систем защиты от ракетного нападения связано с необходимостью решения в реальном времени разнообразных задач распределения ресурсов на основе данных мониторинга текущей обстановки, характеристик целей и технологии функционирования средств защиты. Такие задачи связаны с давно обсуждаемой проблемой распределения целей, для решения которой необходимы модели разной степени подробности описания [1,2]. При этом общим методом является решение линейных задач назначения [3] на основе скалярной свертки векторных критериев эффективности использования выделяемых ресурсов. Предмет обсуждения – модель планирования использования станций наведения при обработке цели. С целью компактности изложения, но без потери общности, будем рассматривать проекцию всех процессов на двумерную плоскость (рис. 1). Предполагается далее, что для любого прогнозируемого интервала обработки (отрезки АВ) цели во времени и пространстве, а также данных о координатах размещения станций наведения (СНР) и пусковых установок (ПУ) можно проецировать возможные траектории полета антиракет на угловые координаты сектора наведения таких траекторий относительно станций наведения. На этапе планирования необходимо обеспечить ориентацию сектора обзора станции наведения так, что в любой момент времени сектор наведения полностью включен в сектор обзора. Очевидно, что углы сектора наведения и сектора обзора в общем случае не совпадают. Если угол сектора обзора больше угла сектора наведения, то ориентация сектора наведения может оставаться фиксированной на всем интервале обработки цели. В противном случае потребуются учесть необходимость поворота сектора обзора. Поворот требуется также при переходе на обслуживание очередной цели. Далее рассмотрим предлагаемую модель планирования работы станций наведения на основе геометрических понятий [1].

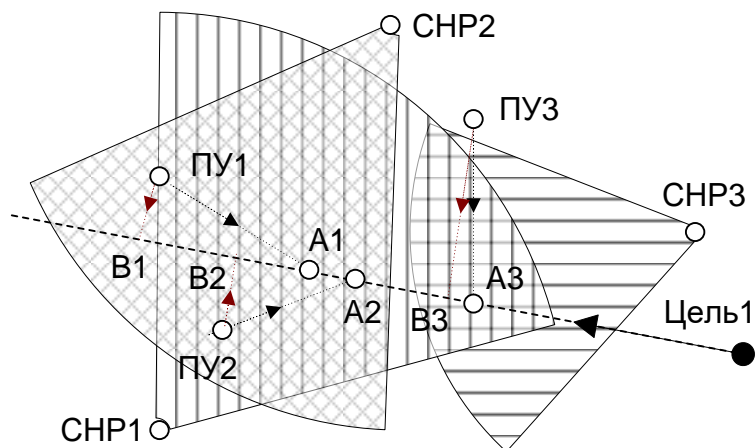


Рис. 1. Схема вариантов обработки цели с двукратным резервированием станций наведения

Модель планирования работы станций наведения

Планирование использования станций наведения должно для каждого интервала обработки цели сформировать список достаточного количества резервируемых станций наведения с ориентацией их секторов обзора. Область поиска решений удобно представить после проецирования сектора обзора и возможных траекторий полета антиракет в полярных координатах на ось времени (рис. 2).

Траектории полета антиракет от каждой пусковой установки к конкретной цели для пригодных для наведения станций будут представлены на оси времени отрезками с некоторыми значениями времени начала и конца полета. Фактически при этом используется для простоты изложения абстрагирование реального процесса пуска антиракеты и его сопровождения линейной моделью движения точки. Однако в реализации алгоритма планирования учет более подробных факторов потребует лишь замены соответствующих функций-операторов.

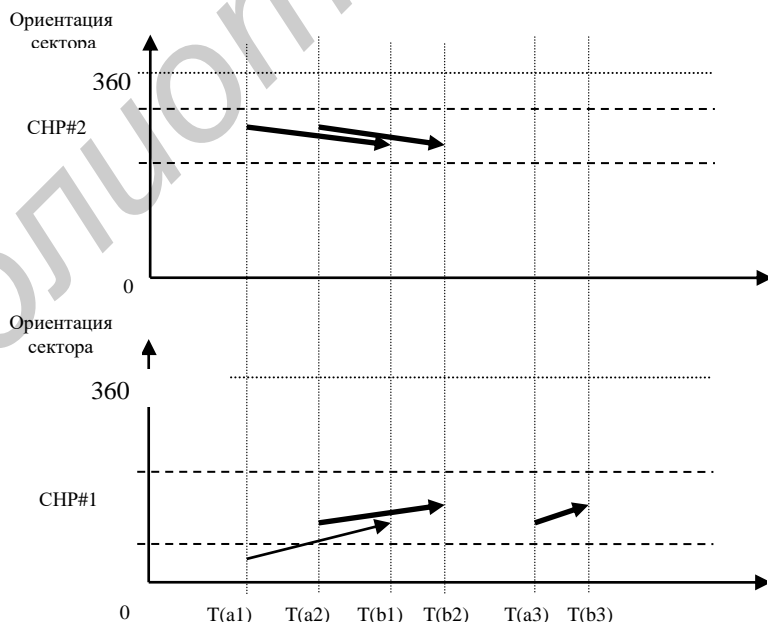


Рис. 2. Схема связи интервала обработки цели с ориентацией станций наведения

Очевидно, что для разных станций наведения одна и та же цель может иметь разную степень удобства обслуживания. Чем меньше абсолютная величина изменения ординат отрезка

проекция полета, тем меньше потребность в повороте сектора и влияние на обслуживание других целей.

Строго говоря, закон изменения проекции цели на угол ориентации сектора линейным от времени не является. Пусть в начальный момент времени координаты цели (x_0^T, y_0^T) , скорость цели – V_T , курс цели – K_T , а координаты станции наведения – (x_U, y_U) и от времени не зависят. Угол ориентации сектора станции наведения на цель обозначим $K_T^U(t)$. Его значение от времени t зависит следующим образом

$$K_T^U(t) = \operatorname{arctg}((x_0^T + V_T \cos(K_T)t - x_U) / (y_0^T + V_T \sin(K_T)t - y_U)).$$

Однако практическая потребность отображения угла ориентации сектора станции наведения на его ограниченную ширину может служить основанием для использования линейной зависимости по среднему значению. При этом легко оценивается погрешность аппроксимации, которая может быть учтена далее на этапе планирования.

Угловая ширина и ориентация сектора наведения позволяют характеризовать возможность наведения любого подмножества антиракет (рис. 3).

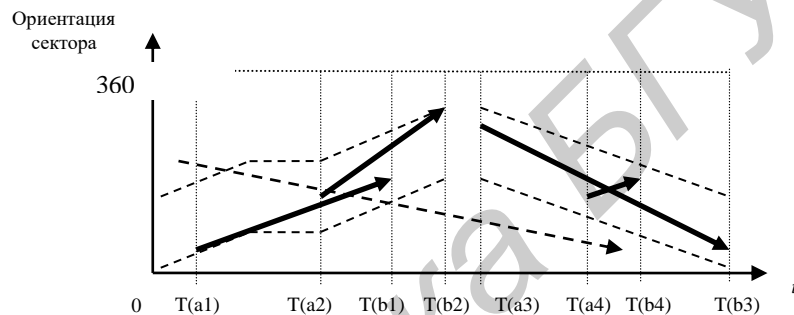


Рис. 3. Схема ориентации станции наведения со непрерывным поворотом сектора

Здесь жирными сплошными линиями со стрелками обозначены проекции целей, которые находятся в секторе станции наведения. Штриховая линия со стрелкой соответствует цели, которая не сопровождается.

Оценка реализуемости плана работы станций наведения

Очевидно, что проверка условия реализуемости сопровождения нескольких пусков для линейной схемы аппроксимации модели перемещения должна выполняться в моменты, соответствующие начальной и конечной точкам отрезков проекций траекторий полета антиракет. Это обстоятельство учтем далее для построения эффективной вычислительной схемы учета последствий появления новой или пересмотра плана подавления старой цели в реальном времени.

Обозначим A_T^L и B_T^L начальный и конечный моменты времени для сопровождаемых траекторий полета антиракет, запускаемых из пусковой установки L к цели T ; C_U – угловая ширина сектора станции наведения U .

Наблюдаемость и реализуемость рассматриваемого процесса соответствует условию $B_T^L > A_T^L$.

Однократная предварительная проверка истинности такого условия в реальном времени в момент получения данных о новой цели гарантирует отсутствие исключительных ситуаций в процедурах планирования.

Для любой станции наведения U проекции траекторий полета антиракет, запускаемых из пусковой установки L к цели T , соответствуют отрезкам $(A_T^L, K_T^U(A_T^L)) \rightarrow (B_T^L, K_T^U(B_T^L))$ на плоскости $(t, K_T^U(t))$. Длина таких отрезков всегда больше нуля.

Множество планируемых на обслуживание станцией наведения U траекторий характеризуется тем, что любые точки проекций таких траекторий должны попадать в интервал, соответствующий углу сектора C_U . Отсюда следует алгоритм проверки условий реализуемости наведения для новой цели с учетом реализуемости наведения ранее запланированных целей.

Уравнение движения ординаты точки проекции любой цели в случае линейной модели

$$k_T^U(t) = K_T^U(A_T^L) + \beta_T^U(t - A_T^L), \quad \beta_T^U = (K_T^U(B_T^L) - K_T^U(A_T^L)) / (B_T^L - A_T^L).$$

Рассмотрим вначале моменты времени начальной и конечной точки отрезка, соответствующего новой цели. Попадание в сектор шириной C_U проекции новой цели T^+ и ранее

запланированных целей T_U^* для обслуживания станцией наведения U в этом случае будет при условии $\max\{\overline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\} - \min\{\underline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\} \leq C_U, t \in \{A_{T^+}^L, B_{T^+}^L\}$ (рис. 2).

Здесь для каждой начальной или конечной точки отрезков, соответствующих ранее запланированным целям, но которые должны рассматриваться совместно с новой целью, определены значения

$$\overline{M}_T^U(t) = \max\{k_T^U(t), T \in T_+^*(t)\}, \quad \underline{M}_T^U(t) = \min\{k_T^U(t), T \in T_+^*(t)\},$$

$$T_+^*(t) = \{T \mid (T \in T_U^*) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L])\}.$$

Так как после принятия решения о включении в план цели T^+ всегда выполняется операция

$$T_U^* \leftarrow T_U^* \cup T^+, \text{ то для новой цели}$$

$$\overline{M}_{T^+}^U(t) = \max\{\overline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\}, \quad \underline{M}_{T^+}^U(t) = \min\{\underline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\}, t \in \{A_{T^+}^L, B_{T^+}^L\}.$$

Рассмотрим далее моменты времени начальной или конечной точек отрезков проекций ранее запланированных целей, попадающие в интервал $(A_{T^+}^L, B_{T^+}^L)$. Попадание в сектор шириной C_U

отрезка новой цели T^+ и конечных точек отрезков проекций ранее запланированных целей T_U^* в этом случае будет при условии (рис. 2)

$$\max\{\overline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\} - \min\{\underline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\} \leq C_U, \quad (t \in \{A_{T^+}^L, B_{T^+}^L\}) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L]), (T \in T_U^*).$$

Так как после принятия решения о включении в план цели T^+ выполняется операция

$$T_U^* \leftarrow T_U^* \cup T^+, \text{ то для ранее запланированных целей}$$

$$\overline{M}_T^U(t) \leftarrow \max\{\overline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\},$$

$$\underline{M}_T^U(t) \leftarrow \min\{\underline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\}, (t \in \{A_T^L, B_T^L\}) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L]), (T \in T_U^*).$$

Истинность последнего условия соответствует отображению всех альтернатив подавления цели на состояние пусковых установок и станций наведения с учетом ранее принятых решений. При этом можно ограничить ветвление от уровня пусковых установок, предварительно решив задачу выбора ориентации секторов наведения с целью учета требования наведения антиракет несколькими станциями наведения.

Оптимизация распределения станций наведения

Ориентации сектора наведения учитывается при решении динамической задачи назначения [1,2] пусковых установок для подавления цели на фазах поиска назначения и планирования расписания реализации оптимального назначения. Используя метод прямого динамического программирования, для каждого интервала обработки целей после их упорядочения по времени последовательно решается линейная задача о назначении [3], где особенности цели и средств ее подавления отражены скалярной сверткой критериев их оценки.

На фазе поиска назначения учитывается лишь наличие минимального количества станций наведения, необходимого для обеспечения работы пусковой установки. При этом на основе ранее рассмотренных моделей оценивается физическая реализуемость перехода из состояния станций наведения на предшествующем интервале планирования.

После выбора назначения для каждой станции наведения необходимо задать расписание ее работы, для которого минимизировано количество поворотов сектора наведения. Схема решения такой задачи жадным алгоритмом очевидна, если уточнить возможности управления физической ориентацией сектора.

Например, станция наведения может непрерывно поворачивать сектор с заданной скоростью (рис. 3). Реализация равномерного поворота требует задания в расписании моментов времени, скорости поворота и угловых границ.

Другой вариант – ступенчатый поворот сектора с фиксированной скоростью до заданного угла ориентации (рис. 4). Реализация ступенчатого поворота требует задания в расписании моментов времени и угла ориентации. Однако выбор схемы поворота и ее реализацию может выполнять станция наведения.

В любом случае алгоритм окончательного формирования расписания работы станций наведения для обоих вариантов имеет одинаковый вид. Общим этапом при этом наверняка будет предоставление фрагментов данных на непрерывных интервалах использования станции наведения с указанием номеров целей, моментов времени и ориентации сектора.

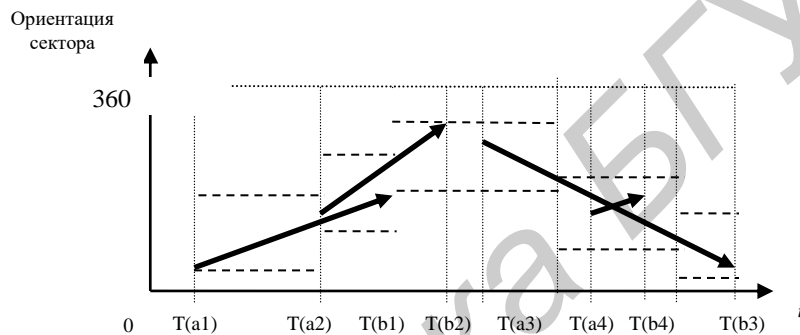


Рис. 4. Схема ориентации станции наведения со ступенчатым поворотом сектора

Рассмотрим процедуру формирования таких данных из результатов поиска решения. Исходные данные для окончательного формирования расписания представим отношением S со схемой $\langle a_{\max}, a_{\min}, t_{LTU}, L_{TU}, T_{LU}, U_{LT}, d_{LTU} \rangle$, где a_{\max}, a_{\min} – максимальный и минимальный требуемый угол обзора всех запланированных целей; t_{LTU} – момент времени, соответствующий начальной либо конечной точке отрезка проекции цели; L_{TU} – номер пусковой установки; T_{LU} – номер цели; U_{LT} – номер станции наведения, d_{LTU} – признак начала точки отрезка, используемый для выявления интервала простоя станции наведения.

Первичный ключ отношения здесь составной. Его образуют элементы $\langle L_{TU}, T_{LU}, U_{LT} \rangle$, однозначно характеризующие уникальную ассоциацию пусковой установки, цели и станции наведения. При этом неявно подразумевается, что моменты времени, относящиеся к цели с некоторым номером, остаются неизменными, а каждой пусковой установке соответствует неизменный тип антиракеты. Если такое предположение будет нарушено, то следует выполнить новую нумерацию цели либо пусковой установки.

Для каждой отдельной станции наведения U строки таблицы рассматриваемого отношения заполняются на основе переменных состояния процедуры выбора подходящих станций. Для этого сформируем согласно схеме отношения S множество строк для начальных точек

отрезков $S^U = \{ \overline{M}_T^U(A_T^L), \underline{M}_T^U(A_T^L), A_T^L, L, T, U, 1 \}, (T \in T_U^*)$, а затем добавим к нему множество строк для конечных точек отрезков

$$S^U \leftarrow S^U \cup \{ \overline{M}_T^U(B_T^L), \underline{M}_T^U(B_T^L), B_T^L, L, T, U, 0 \}, (T \in T_U^*).$$

Далее следует упорядочить строки по моментам времени t_{LTU} :

$$S^U \leftarrow \{ S_i^U \mid S_i^U \cdot t_{LTU} \leq S_{i+1}^U \cdot t_{LTU}, i = 1, |S^U| - 1 \}.$$

По определению, $S_1^U \cdot d_{LTU} = 1$, а $S_{|S^U|}^U \cdot d_{LTU} = 0$.

Так как строки таблицы S^U упорядочены по неубыванию моментов времени t_{LTU} , то отсюда следует процедура выделения интервалов простоя станции наведения:

если $(S_i^U \cdot t_{LTU} < S_{i+1}^U \cdot t_{LTU}) \wedge (S_i^U \cdot d_{LTU} = 0) \wedge (S_{i+1}^U \cdot d_{LTU} = 1)$, то указываемый значением i интервал времени $(S_i^U \cdot t_{LTU}, S_{i+1}^U \cdot t_{LTU})$ есть интервал простоя, $i = 1, |S^U| - 1$.

Однако в таблице отношения S^U могут оказаться строки, для которых справедливо

$$(|S_i^U \cdot a_{\min} - S_{i+1}^U \cdot a_{\min}| > C_U) \vee (|S_i^U \cdot a_{\min} - S_{i+1}^U \cdot a_{\min}| > C_U), i = 1, |S^U| - 1.$$

Это соответствует целям, угол наведения для которых превышает угловую ширину сектора станции. Для таких строк необходимо провести их формальное расщепление для отражения моментов смены ориентации сектора. Подобным приемом следует отражать возможные ограничения на скорость поворота сектора. После добавления строк таблица отношения S^U должна оставаться упорядоченной по моментам времени t_{LTU} .

Для простоты изложения схемы алгоритма рассмотрим вариант ступенчатого поворота сектора с фиксированной скоростью до заданного угла ориентации (рис. 4).

Построим множество R^U , содержащее индексы строк таблицы S^U , соответствующих моменту переключения режима станции наведения U :

$$i = 0; n_U = |S^U|; R^U = \emptyset;$$

while ($i < n_U$) {

$$i \leftarrow i + 1; R^U \leftarrow R^U \cup \{i\};$$

$$b_{\max} = S_i \cdot a_{\min} + C_U; k = i;$$

$$\text{while } ((S_k \cdot a_{\max} \leq b_{\max}) \wedge (k < n_U)) \quad k \leftarrow k + 1;$$

$$b_{\min} = S_i \cdot a_{\max} - C_U; j = i;$$

$$\text{while } ((S_j \cdot a_{\min} \geq b_{\min}) \wedge (j < n_U)) \quad j \leftarrow j + 1;$$

$$i = \min(j, k);$$

}

$$R^U \leftarrow R^U \cup \{n_U + 1\};$$

В результате множества R^U и S^U представляют расписание работы станции наведения U в виде структуры смежности в форме FSF (Forward Star Form). Количество элементов

расписания (режимов работы) – $m_U = (|R^U| - 1)$. Элементы расписания представляют непересекающиеся последовательно расположенные отрезки времени, на которых станция наведения U должна обеспечивать некоторый фиксированный режим ориентации сектора.

Элемент расписания с номером j , $j \in 1, m_U$, представлен в таблице S^U строками с

$$\text{номера } i \in N_j^U, N_j^U = R_j^U, R_{j+1}^U - 1.$$

Если желательно разместить сектор так, что проекции целей находятся в центре, то ориентация сектора уточняется

$$M_j^U = (\max\{S_i^U \cdot a_{\max}, i \in N_j^U\} - \min\{S_i^U \cdot a_{\min}, i \in N_j^U\}) / (R_{j+1}^U - R_j^U).$$

Заключение

Таким образом, наличие списка пригодных для обработки целей и средств их поражения позволяет ставить задачу об оптимальном назначении по критерию минимума суммы весов или оптимальном марьяже, если учесть предпочтения целей пусковыми установками. Оптимизация назначения требует решения последовательности линейных задач о назначении с

полиномиальной вычислительной сложностью, однако отражение технологий использования разделяемых ресурсов приводит к росту порядка вычислительной сложности. Построенные модели функционирования станций наведения в кусочно-линейном виде допускают эффективную конечно-автоматную реализацию в приращениях переменных состояния. Модель поиска решений представима в сетевом виде с выделением сильно связанных переменных слабо связанных локальных областей. Переходы на сети ассоциируются с конкретными переменными состояниями. В результате алгоритм оптимизации назначения может исключать повторные обходы ранее рассмотренных альтернатив, что снижает его вычислительную сложность.

Список литературы / References

Leboucher C., Shin H-S., Le M.enec S.[et al.] Optimal Weapon Target Assignment Based on an Geometric Approach//19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, September 2-6, 2013. Würzburg, Germany. P. 341-346.

Leboucher C., Shin H-S., Siarry P. [et al.] A Two-Step Optimisation Method for Dynamic Weapon Target Assignment Problem. [Electronic data]. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.5772/53606> – Date of access: 20.09.2016.

Pentico D.W. Assignment problems: A golden anniversary survey// European Journal of Operational Research, vol. 176(2), 2007. P. 774-793.

Сведения об авторах

Хаджинова Н.В., старший преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Ревотюк М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кот О.В., м.т.н., аспирант кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Khajunova N.V., senior lecturer of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Revotjuk M.P., PhD, associate professor, associate professor of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kot O.V., M. Sci., PG student of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Ревотюк Михаил Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics
tel. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Revotjuk Mikhail Pavlovich