Алгоритм оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов

Algorithm of optimal target assignment for an autonomous group of attack unmanned aerial vehicles

Мефёдов / Mefedov A.
Александр Викторович
(777vvs@inbox.ru)
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» МО РФ, адъюнкт
г. Воронеж

Ключевые слова: беспилотный летательный целераспределение – optimal target assignment; групповое применение – group application; автономная группа – autonomous group; информационно-управляющая система – information and control system.

В данной статье описано решение задачи оптимального целераспределения автономной группы ударных беспилотных летательных аппаратов в условиях противодействия противовоздушной обороны противника с помощью предлагаемого алгоритма, написанного венгерским методом и методом полного перебора, а также запрограммированного на языке С++ в среде Visual Studio 2013. Представлен график сравнения полученных результатов.

This article describes the solution to the problem relating to the optimal target assignment for an autonomous group of attack unmanned aerial vehicles exposed to enemy's anti-aircraft defense countermeasures by using the suggested algorithm developed by applying the Hungarian method and full enumeration method programmed in C++ in the Visual Studio 2013D-моделей ригидных объектов по косвенным изображениям методом environment. The article also shows a findings comparison graph.

Введение

В военных конфликтах последних десятилетий активно стали применяться и приобретать большое значение ударные (разведывательно-ударные) беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Тактико-технические характеристики (ТТХ) современных ударных (разведывательно-ударных) БПЛА практически вплотную приблизились к ТТХ пилотируемых истребителей. Это даёт основание предполагать, что в скором времени пилотируемые истребители будут существенно сокращены и заменены на ударные БПЛА. Одним из основных преимуществ БПЛА перед пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА) является отсутствие лётчика на борту, что снимает многие ограничения связанные с человеческим фактором.

Отдельно стоит остановиться на групповом применении ударных БПЛА. Известно, что воздушный удар группой БПЛА имеет существенно большую эффективность по сравнению с атакой одиночного БПЛА [1]. Однако при типовом групповом применении БПЛА возникает ряд существенных проблем, которые необходимо решать.

Современное состояние и основные проблемы в области группового применения БПЛА. Постановка задачи.

Известен недавний опыт применения террористами в Сирии группы из тринадцати самодельных малоразмерных БПЛА, несущих авиационные средства поражения (АСП). Десять БПЛА приближались к авиабазе Хмеймим и еще три БПЛА к пункту материально-технического обеспечения Военно-морского флота (ВМФ) России в Тартусе. В результате было перехвачено управление шестью БПЛА боевиков. Из них три были посажены на подконтрольную территорию вне базы, другие три взорвались после столкновения с землей. Оставшиеся семь БПЛА были сбиты зенитным ракетно-пушечным комплексом (ЗРПК) «Панцирь-С1»[2]. На практике видны основные проблемы типового группового применения БПЛА:

– каналы управления и передачи данных могут быть легко перехвачены, подавлены средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ) противника, в результате чего может быть обнаружена и уничтожена вся группа БПЛА;

– высока вероятность поражения большей части группы БПЛА при пролете насыщенной зоны противовоздушной обороны (ПВО) противника, что требует повторного решения задачи целераспределения для максимизации нанесённого ущерба;

– при типовом варианте группового применения БПЛА необходимо оценить потребное количество операторов управления, необходимо согласовать их действия между собой.

Данные проблемы могут быть разрешены, если иметь БПЛА с автономным режимом боевого применения. Режим автономного боевого применения группы БПЛА можно реализовать в информационно-управляющей системе (ИУС) БПЛА, алгоритмы функционирования которой могут базироваться на теории мультиагентных систем. Основная идея заключается в том, что если на борту каждого БПЛА поставленная перед группой задача будет решаться по одинаковым алгоритмам, то результирующее решение будет также одинаковым и в результате не потребуется передача сигналов управления группе БПЛА.

Например, типовой вариант удара группой БПЛА по нескольким целям противника, состоит из следующих этапов:

– ввод данных о поражаемых целях группой с учетом их важности и первичное целераспределение;

– взлет и построение в заданный боевой порядок (БП);

– полет к линии боевого соприкосновения (ЛБС) и преодоление ПВО;

– режим оценки собственных сил и вторичное целераспределение;

– полет к зонам применения АСП и нанесение удара;

– возвращение в район аэродрома посадки.

Для автономных действий БПЛА над территорией противника необходимо автоматизировать решение задачи оценки собственных сил и вторичного целераспределения. Для чего предлагается использовать единый алгоритм целераспределения и управления сетью БПЛА, установленный на борту каждого участника сети.

При этом на борту всех БПЛА должны быть забиты все координаты атакуемых наземных целей с коэффициентами их «важности». «Важность» целей можно определить, например, используя метод анализа иерархий (МАИ) [3]. На борту каждого БПЛА предполагается устанавливать единую информационно-управляющую систему (ИУС) с едиными алгоритмами решения задачи целераспределения. Для работы такой ИУС необходима информация об оставшихся БПЛА и их координатах после пролёта активной зоны ПВО противника, т.е режим информационной осведомленности:

– каждый БПЛА имеет уникальный сетевой номер, в заданный момент времени происходит излучение каждым БПЛА в пространство кодовой посылки, содержащей свой номер и текущие координаты;

– на каждом БПЛА в ИУС формируется таблица с функционирующими БПЛА группы и их координаты. На основе анализа этой таблицы необходимо произвести перецелераспределение оставшихся БПЛА с учетом коэффициентов «важности» целей.

Согласно схеме, указанной на рис. 1, в качестве примера, необходимо уничтожить наиболее значимые объекты противника.

Показателями эффективности групповых действий являются [4]:

– вероятность поражения всех целей;

– вероятность уничтожения не менее заданного числа целей;

– математическое ожидание числа уничтоженных целей.

Эффективность одного БПЛА на одну цель целесообразно оценивать вероятностью его боевого успеха $W_{бу}$. В общем случае задача целераспределения БПЛА может быть решена различными методами на основе анализа матрицы размерностью $n \times m$,

$$\begin{bmatrix} W_{бу\,11} & W_{бу\,11} & \dots & W_{бу\,1m} \\ W_{бу\,21} & W_{бу\,22} & \dots & W_{бу\,2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{бу\,n1} & W_{бу\,n2} & \dots & W_{бу\,nm} \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где n и m – число целей и БПЛА. Задача целераспределения является нелинейной оптимизационной задачей [5], которую традиционные алгоритмы решают с заметными временными задержками из-за большого количества операций.

Необходимо отметить, что в качестве элементов матрицы (1) могут быть выбраны другие показатели эффективности и другие критерии оптимизации решения задачи целераспределения в зависимости от постановки боевой задачи, соотношения числа БПЛА и целей, типа целей, используемых АСП и т.д. Решение задачи целераспределения можно представить в виде коэффициентов инцидентной матрицы [6]:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $x_{ij} = 1$ если j-му БПЛА назначается для атаки i-я цель, а в остальных случаях $x_{ij} = 0$,причем одному БПЛА не может быть назначено больше одной цели, т.е.

$$\sum_{i=1}^{N} x_{ij} = 1, V_j \in [1, M]$$

В общем случае, число матриц (решений целераспределения) со всеми возможными комбинациями пар БПЛА-цель равно $\max\{n,m\}!$. При этом решающий функционал для каждой возможной k-той комбинации пар $D(k)$ будет иметь вид:

$$\underset{\{D(k):x_{ij}\in\{0,1\}\}}{F} = \sum_{i=1}^{N} V_i \prod_{j}^{M} \left(1 - P_{ij}\right)^{x_{ij}}, \tag{3}$$

3 2018.indd 168 26.09.2018 10:06:01

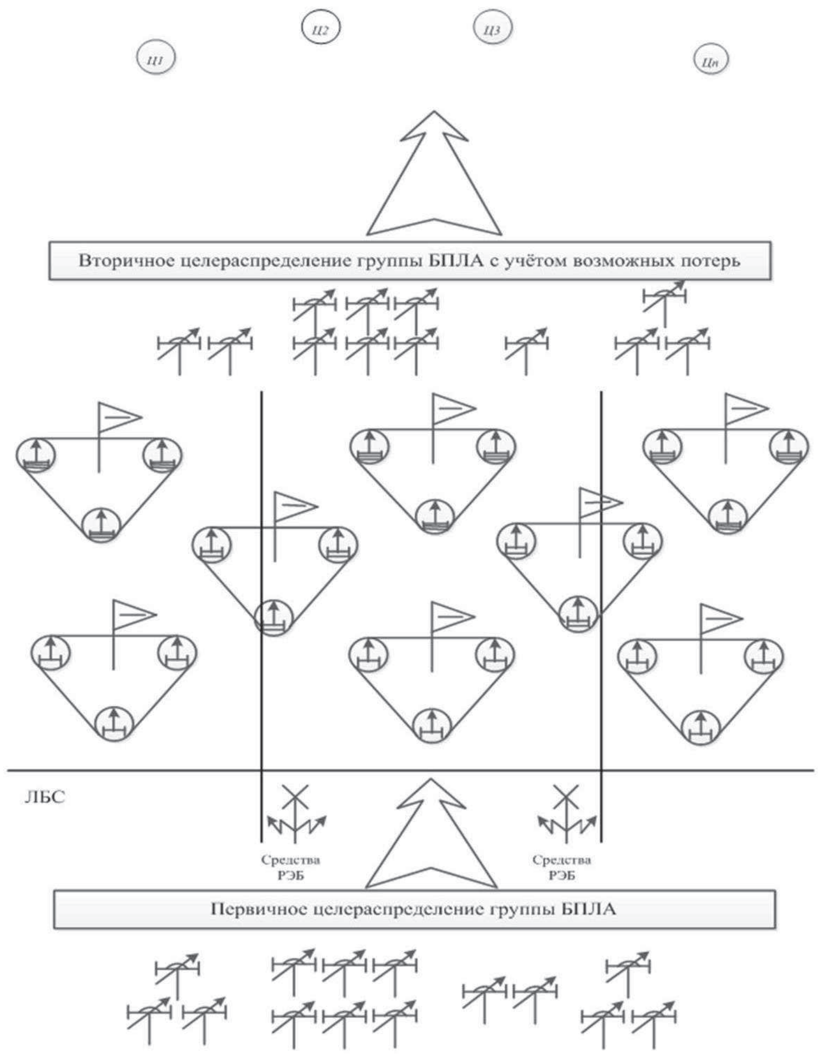

Рис. 1. Схема координированной атаки группой ударных БПЛА

где V_i – коэффициент, характеризующий важность цели, P_{ij} – вероятность того, что j-ый БПЛА уничтожит i-ю цель.

В этом случае задача целераспределения решается путем нахождения минимума из ряда решающих функционалов

$$R = \min\{F_{\{D(k)\}}\}. \tag{4}$$

Таким образом, задача целераспределения сводится к нахождению матрицы (1), расчета решающих функционалов (3), определению наилучшей комбинации по правилу (4), а значит и соответствующей матрицы решений (2) [7].

Алгоритм решения задачи целераспределения БПЛА

Поставленная задача в матричной форме представляет собой пример классической задачи о назначениях. Венгерский алгоритм позволяет решать данную задачу за время $O(n^4)$, а при применении дополнительных оптимизаций, временная оценка становится равной $O(n^3)$.

Перейдем непосредственно к описанию алгоритма. Назовём потенциалом два произвольных массива чисел $u[1\ldots n]$ и $v[1\ldots n]$ таких, что выполняется условие:

$$u[i] + v[j] \le \alpha[i][j] \ (i = 1 \ldots n, j = 1 \ldots n), \tag{5}$$

где u – вектор, соответствующий строкам матрицы, v – соответствует столбцам, α – матрица распределения.

Назовём f значением потенциала сумму его чисел:

$$f = \sum_{i=1}^{n} u[i] + \sum_{i=1}^{n} v[i]. \tag{6}$$

С одной стороны, легко заметить, что стоимость искомого решения *sol* не меньше значения любого потенциала:

$$sol \geq f. \tag{7}$$

С другой стороны, оказывается, что всегда существует решение и потенциал, на которых это неравенство обращается в равенство. Венгерский алгоритм, описанный ниже, будет конструктивным доказательством этого факта. Пока же лишь обратим внимание на то, что если какое-либо решение имеет стоимость, равную по величине какому-либо потенциалу, то это решение – оптимально.

Зафиксируем некоторый потенциал. Назовём ребро (i, j) жёстким, если выполняется условие:

$$u[i] + v[j] = a[i][j]. \tag{8}$$

В начале алгоритма потенциал полагается равным нулю $u[i]= v[i]=1$ и паросочетание M полагается пустым. Далее, на каждом шаге алгоритма мы пытаемся, не меняя потенциала, увеличить мощность текущего паросочетания M на единицу (паросочетание ищется в графе жёстких рёбер H). Для поиска максимального паросочетания в двудольных графах используется алгоритм Куна. Все рёбра паросочетания M ориентируются по направлению от второй доли к первой, все остальные рёбра графа H ориентируются в противоположную сторону. Вершина называется насыщенной, если ей смежно ребро из текущего паросочетания. Вершина, которой не смежно ни одно ребро из текущего паросочетания, называется ненасыщенной. Путь нечётной длины, в котором первое ребро не принадлежит паросочетанию, а для всех последующих рёбер происходит чередование (принадлежит / не принадлежит) – называется увеличивающим путём [8]. Из всех ненасыщенных вершин первой доли запускается обход в глубину/в ширину. Если в результате обхода удалось достигнуть ненасыщенной вершины второй доли, то это означает, что мы нашли увеличивающий путь из первой доли во вторую. Если прочередовать рёбра вдоль этого пути (т.е. первое ребро включить в паросочетание, второе исключить, третье включить, и т.д.), то тем самым мы увеличим мощность паросочетания на единицу. Если же увеличивающего пути не было, то это означает, что текущее паросочетание M – максимально в графе H, поэтому в таком случае переходим к следующему пункту. Если на текущем шаге не удалось увеличить мощность текущего паросочетания, то производится пересчёт потенциала таким образом, чтобы на следующих шагах появилось больше возможностей для увеличения паросочетания.

Обозначим через Z_1 множество вершин первой доли, которые были посещены обходом алгоритма Куна при попытке поиска увеличивающей цепи. Через Z_2 множество посещённых вершин второй доли.

Посчитаем величину Δ:

$$\Delta = \min_{i \in Z_1, j \notin Z_2} \{a[i][j] - u[i] - v[j]\}. \tag{9}$$

Теперь пересчитаем потенциал таким образом: для всех вершин $i \in Z_1$ сделаем $u[i] += \Delta$, а для всех вершин $j \in Z_2$ сделаем $v[j] -= \Delta$. Получившийся потенциал по-прежнему останется корректным потенциалом.

Кроме того, старое паросочетание M из жёстких рёбер можно будет оставить, т.е. все рёбра паросочетания останутся жёсткими.

Наконец, чтобы показать, что изменения потенциала не могут происходить бесконечно, заметим, что при каждом таком изменении потенциала количество вершин, достижимых обходом, т.е. $|Z_1| + |Z_2|$ строго увеличивается. (При этом нельзя утверждать, что увеличивается количество жёстких рёбер).

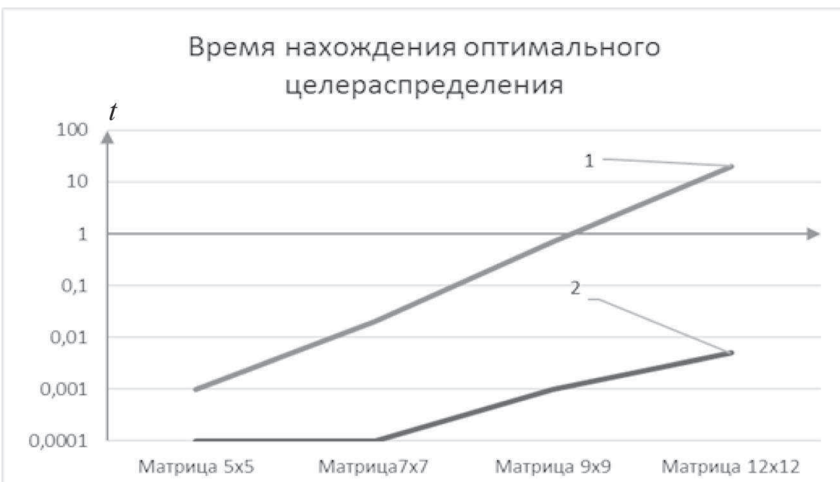

Рис. 2. Зависимость времени оптимального целераспределения от размеров матрицы

Таким образом, всего может происходить не более n пересчётов потенциала, прежде чем обнаружится увеличивающая цепочка и мощность паросочетания M будет увеличена. Рано или поздно будет найден потенциал, которому соответствует совершенное паросочетание M, являющееся ответом на задачу.

Если говорить об асимптотике алгоритма, то она составляет $O(n^4)$, поскольку всего должно произойти n увеличений паросочетания, перед каждым из которых происходит не более n пересчётов потенциала, каждый из которых выполняется за время $O(n^2)$ [8].

Данный алгоритм, вместе с полным перебором, был запрограммирован на языке *C++* в среде *Visual Studio* 2013. Результаты работы представлены на рис. 2. По вертикальной оси обозначено логарифмическое время оптимального целераспределения, цифрой 1 обозначена зависимость времени нахождения целераспределения полным перебором, цифрой 2 обозначено время нахождения целераспределения венгерским алгоритмом.

Из рисунка видно, что венгерский алгоритм позволяет получить решение задачи целераспределения за время, значительно меньшее, чем затрачивается на полный перебор.

Литература

1. Верба, В. С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. Монография / В.С. Верба. – М.: Радиотехника, 2014. – 528 с.

2. Война дронов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://life.ru/t/сирия/1076718/voina_dronov] (Дата обращения – 05.05.2018).

3. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати ; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.

4. Бабич, В. К. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / В.К. Бабич, Л.Е. Баханов, Г.П. Герасимов ; под ред. Е.А. Федосова. – М.: Дрофа, 2001. – 816 с.

5. Уоссермен, Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Ф. Уоссермен ; пер. с англ.Ю.А. Зуев, В.А. Точенов. – М.: Радио и связь, 1992. – 184 с.

6. Райзер, Г. Дж. Комбинаторная математика / Г. Дж. Райзер ; пер. с англ. К.А. Рыбников. – М.: Мир, 1965. – 154 с.

7. Broeder, G. G. "On Optimum Target Assignments" / G.G. Broeder, G.G. Ellison, R.E. Emerling // Operations Research, Vol. 7. – P. 322–326.

8. Kuhn, H. W., On the origin of the Hungarian Method / H.W. Kuhn // History of mathematical programming;a collection of personal reminiscences. North Holland. – Amsterdam: CWI, 1991. – P. 77–81.