

## ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ

В.Г. Слугин, А.А. Зубарев, О.Ю. Шевцов, А.Я. Мехтиев, В.А. Ковешников

Отмечено, что эффективность функционирования комплекса противоздушной обороны определяется техническими возможностями и качеством управления участниками операции. Разработан метод, позволяющий за доли секунды сформировать эффективное решение задачи целераспределения для произвольного числа целей и боевых машин с учетом полной либо частичной загрузки боекомплекта каждой из них и обеспечивающий их равномерную загрузку.

**Ключевые слова:** целераспределение, эффективность, моделирование, оптимизация, декомпозиция, исследование операций.

### ВВЕДЕНИЕ

В задаче целераспределения сложность принятия решений достаточно высока, так как вариантов целераспределения чрезвычайно много. Разумеется, нас интересует одно либо несколько решений, наиболее подходящих для достижения поставленной цели. Строго говоря, реальная эффективность определяется конечным результатом, и проследить (оценить) вклад целераспределения на итог операции сложно, так как наряду с целераспределением существует множество организационных и технических факторов, каждый из которых влияет на эффективность военных действий.

Наибольший интерес представляет критериальный подход, основанный на динамике изменения пространственно-временных характеристик в системе «цель — боевая машина (БМ)» и который непосредственно влияет на эффективность целераспределения. Очевидно, как бы мы не привязывали цели к БМ, может оказаться, что все они будут либо ликвидированы, либо продолжат свое существование, причина такой неопределенности — наличие множества других важных факторов. Неоспоримо лишь, что для эффективного ведения боевых действий все подсистемы БМ должны быть надежными и гибкими в управлении.

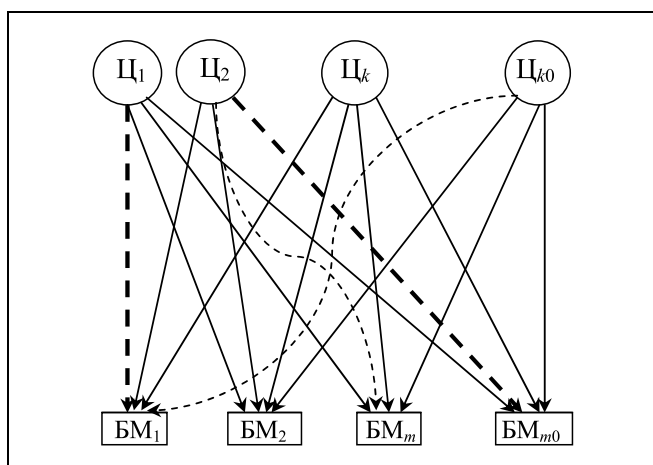
### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОПТИМАЛЬНОСТЬ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

В самом общем случае задача целераспределения формулируется следующим образом: необхо-

димо передать на сопровождение и обеспечить ракетный обстрел нескольких предварительно зафиксированных целей, при этом число БМ не превышает  $m_0$  единиц, а число целей —  $k_0$  единиц. Особенность задачи заключается в том, что в каждый момент времени состояние системы меняется и, в принципе, всякое решение будет отставать относительно текущей ситуации независимо от скорости принятия решения и его реализации.

Решение задачи целераспределения затрагивает анализ состояния двух подсистем: БМ собственной группировки и набор целей противника (рисунков). Наиболее ценная информация в контексте рассматриваемой задачи — местоположение цели и скорость ее перемещения. Среди нескольких дополнительных факторов отметим количественные (число ракет) и качественные (типы ракет) характеристики систем вооружения БМ, а также индикаторы связи целей с каждой БМ, фиксирующие отказы работы БМ с целью как результат работы любой подсистемы этой БМ. Логика указывает на перспективу поиска для каждой цели ( $C_j$ ) близко расположенной боевой машины ( $БМ_j$ ), так как в этом случае вероятность своевременного поражения цели наиболее высока, а значит и защищенность отдельной БМ и батареи в целом возрастает, т. е. в качестве критерия взаимодействия между ними ( $f_{ij}$ ) выступает расстояние  $r_{ij}$ , следовательно,  $f_{ij} = r_{ij}$ .

Однако если типы целей разные, то и скорости перемещения могут существенно различаться. В этом случае в качестве критерия значимости це-



**Типы взаимосвязей набора целей со структурным подразделением боевых машин:**  $\leftarrow$  — нормальная взаимосвязь;  $\leftarrow \cdots \cdots$  — недопустимая взаимосвязь;  $\leftarrow \cdots \cdots$  — недопустимая взаимосвязь по вооружению

ли целесообразно рассматривать подлетное время до БМ, т. е.  $f_{ij} = r_{ij}/v_{ij} = t_{ij}$ . Именно такая гипотеза положена в основу решения рассматриваемой задачи.

С формальной точки зрения задача сводится к поиску варианта распределения набора целей между БМ батареи, при котором значение критерия суммарного подлетного времени будет минимальным с учетом ограничений по наличию ракет на каждой БМ и их типам (недопустимая взаимосвязь по вооружению), а также требований (ограничений) других подсистем БМ по реализации конкретного распределения (недопустимая взаимосвязь).

Расстояние в системе «цель — БМ» служит основой критерия данной задачи и определяется согласно зависимости

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2},$$

где  $x_i, y_i, z_i, i = \overline{1, m}$  — координаты расположения  $m$  БМ в момент принятия решений,  $x_j, y_j, z_j, j = \overline{1, k}$  — координаты расположения  $k$  целей в тот же момент времени.

Необходимо определить набор значений целочисленных (булевых) переменных  $\Psi_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$ , при которых целевая функция (суммарное подлетное время всех ракет) достигает минимального значения

$$f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k f_{ij} \Psi_{ij}(t_0) \rightarrow \min_{i,j} \quad (1)$$

при ограничениях

$$\psi_i(t_0) = \sum_{j=1}^k \psi_{ij}(t_0) \leq \psi_{i0}(t_0), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \psi_{ij}(t_0) = 1, \quad j = \overline{1, k}, \quad (3)$$

$$\Psi_{i_1 j_1}(t_0) = 0, \quad \Psi_{i_2 j_2}(t_0) = 0, \quad \dots, \quad \Psi_{i_a j_a}(t_0) = 0, \quad \dots, \quad (4)$$

$$i_\alpha = \overline{1, m}, \quad j_\alpha = \overline{1, k}, \quad n \leq m,$$

$$\psi(t_0) = (\psi_{i_1 1}(t_0) = 1) \wedge (\psi_{i_2 2}(t_0) = 1) \wedge \dots \wedge (\psi_{i_k k}(t_0) = 1), \quad (5)$$

где  $k$  — число целей,  $m$  — число БМ,  $\Psi_{i0}(t_0)$  — число ракет на  $i$  БМ в момент принятия решения  $t_0$ ,  $\psi_i(t_0)$  — число ракет, планируемых к пуску в этот момент времени на  $i$  БМ с учетом всех целей,  $\Psi_{ij}(t_0)$  — индикатор взаимосвязи  $i$  БМ с  $j$ -й целью и равен единице, если  $j$ -я цель может использоваться для сопровождения  $i$  БМ в момент времени  $t_0$  (внешняя функция, отображающая возможность применения БМ, ее работоспособность).

Ограничения (4) определяют недопустимые связи БМ с целью, их может не быть вообще, т. е. любая цель может обрабатываться любой БМ (тогда  $\Psi_{ij}(t_0) = 1, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, k}$ ). Либо некоторые БМ нельзя применить для обстрела определенных целей (тогда  $\Psi_{i_1 j_1}(t_0) = 0, \dots, \Psi_{i_n j_n}(t_0) = 0$ ), такая взаимосвязь возникает случайно в результате сбоя в работе любой из подсистем БМ. Ограничение (5) фиксирует факт распределения именно всех целей по БМ (если целей больше, то, как упоминалось ранее, распределению подлежат только наиболее важные из них в количестве, равном суммарному числу ракет по всем БМ). Ограничения (3) свидетельствуют о том, что для каждой цели предназначается одна ракета. Ограничения (2) указывают на ограниченность ресурсов, на каждой БМ в момент времени  $t_0$  число ракет составляет  $\Psi_{i0}(t_0)$  единиц, и все они могут быть использованы, но не более того.

Таким образом, в стандартной постановке (аналогично для транспортной задачи, задачи о назначениях и др.) проблема сводится к поиску набора связей «цель — БМ» (индексов  $i, j$ ), при которых значение критерия (1) минимально, а все ограничения типа (2)—(5) выполнены.

Если число целей превышает объем вооружения, то ситуация меняется принципиально как в боевом отношении, так и в плане управления ею. Задача усложняется также с формальной точки зрения, переходит в разряд нестандартных нели-

нейных дискретных задач с нарушенным балансом ресурсов [1, 3], при этом многовариантность может достигать значений, сравнимых с  $10^{78}$  (при шести БМ и 100 целях). В этом случае решение не гарантировано ни одним из известных оптимизационных методов. Поэтому необходимо декомпозировать задачу, т. е. преобразовать ее, учитывая специфику, упростить так, чтобы решение было близким к оптимальному как для случая правильного, так и неправильного баланса. При этом время решения должно быть минимальным, сравнимым с долями секунды, так как управление ведется в реальном режиме времени в боевых условиях, и громоздкие вычислительные процедуры неуместны.

## 2. ДЕКОМПОЗИЦИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Оценим сложность, трудоемкость решения задачи целераспределения с позиций многовариантности ( $N$ ). Если число БМ составляет  $m$  ед., а число целей —  $k$  ед., то число альтернативных вариантов  $N = m^k$ , один из которых искомым. Для оценки возможности решить эту задачу методом перебора на компьютере подсчитаем число вариантов взаимодействия, например, для случая шести БМ и 100 целей. Будем считать, что каждая цель может быть обстреляна любой из шести машин, тогда вариантность  $N = 6^{100} \approx 10^{78}$ . Реализация такого числа вариантов невозможна, поэтому требуется некоторое упрощение, декомпозиция задачи, позволяющая разрешить эту ситуацию, уменьшить объем вычислений, значительно сократив время расчета.

Любая декомпозиция приводит к погрешности, а значит, необходима проверка точности приближенного метода [3]. В этой связи точное решение целесообразно определить именно методом перебора, так как ни одно из гипотетических решений здесь не остается вне поля зрения. Полный перебор, по существу, должен послужить основой для оценки качества декомпозиционного подхода, его привлекательности и надежности выносимого решения. Тогда для десяти целей и шести БМ неопределенность целераспределения составит  $6^{10} = 60\,466\,176$  вариантов, что потребует всего лишь нескольких секунд при реализации на компьютере и обеспечивает условия проверки.

Рассмотрим процедуру ранжирования по критерию — подлетное время ракеты до цели. Тогда перспективные решения будут располагаться в ограниченной области, исследовав которую проще найти эффективное решение, близкое к оптимальному. После выполнения такой процедуры ранжирования оптимизация будет более эффективной, на этой же основе может быть построен и субоптимизационный метод.

Запишем связь 1-й цели с шестью машинами батареи по критерию  $f$  в виде:

$$\Pi_r^1: f_{11}, f_{21}, f_{31}, f_{41}, f_{51}, f_{61}; \quad (6)$$

для 2-й цели:

$$\Pi_r^2: f_{12}, f_{22}, f_{32}, f_{42}, f_{52}, f_{62}; \quad (7)$$

для  $k$ -й цели:

$$\Pi_r^k: f_{1k}, f_{2k}, f_{3k}, f_{4k}, f_{5k}, f_{6k}. \quad (8)$$

Как было отмечено ранее, символ  $f_{ij}$  предполагает либо расстояние между  $i$ -й БМ и  $j$ -й целью, либо подлетное время.

Если в соответствии с записями (6)—(8) поставить номера БМ, то все они будут представлять собой последовательность целых чисел, расположенных по возрастанию, т. е. (1, 2, 3, 4, 5, 6). Числа, по существу, играют роль меток для различия БМ.

Выполним ранжирование по возрастанию расстояния (времени) для каждой цели — строки, тогда исходная соответствующая последовательность номеров БМ (1, 2, 3, 4, 5, 6) поменяет свой порядок, например, (5, 2, 6, 1, 3, 4). Это будет означать, что данную цель лучше всего передать БМ под номером 5, несколько уступает ей БМ под номером 2, затем БМ под номерами 6, 1, 3, вплоть до менее востребованной БМ под номером 4. В общем случае результат ранжирования (первого уровня) отобразим следующим набором записей, поменяв символ  $f$  на  $\rho$ :

$$\Pi_p^1: \rho_{11}, \rho_{21}, \rho_{31}, \rho_{41}, \rho_{51}, \rho_{61},$$

$$\Pi_p^2: \rho_{12}, \rho_{22}, \rho_{32}, \rho_{42}, \rho_{52}, \rho_{62},$$

... ..

$$\Pi_p^k: \rho_{1k}, \rho_{2k}, \rho_{3k}, \rho_{4k}, \rho_{5k}, \rho_{6k},$$

где для каждой цели (строки) значения  $\rho$  выстроены в порядке возрастания значений критерия. Соответствующие последовательности номеров БМ в общем случае запишем в виде

$$\Pi_n^i: n_{1i}, n_{2i}, n_{3i}, n_{4i}, n_{5i}, n_{6i}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (9)$$

Запись (9) указывает, что цель под номером  $i$  лучше всего отдать на сопровождение БМ под номером  $n_{1i}$ , а наихудший вариант соответствует БМ под номером  $n_{6i}$ .

После ранжирования становится ясно, какую БМ следует применить для каждой из имеющихся целей. Казалось бы, результат достигнут, но проблема остается, так как одна и та же БМ может применяться для сопровождения разных целей, и возможно состояние «перегрузки» либо по определенным причинам некоторые связи «цель — БМ» в момент принятия решений о целераспределении



оказываются недопустимыми. Очередное ранжирование значительно проясняет ситуацию.

Факт ранжирования второго уровня — по строкам, в порядке возрастания первого элемента строки, обозначим символом  $\mu$  и набором записей:

$$\begin{aligned} \Pi_{\mu}^1: & \mu_{11}, \mu_{21}, \mu_{31}, \mu_{41}, \mu_{51}, \mu_{61}, \\ \Pi_{\mu}^2: & \mu_{12}, \mu_{22}, \mu_{32}, \mu_{42}, \mu_{52}, \mu_{62}, \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \\ \Pi_{\mu}^k: & \mu_{1k}, \mu_{2k}, \mu_{3k}, \mu_{4k}, \mu_{5k}, \mu_{6k}. \end{aligned}$$

Соответствующие последовательности номеров БМ запишем в виде

$$\Pi_{\mu}^i: m_{1i}, m_{2i}, m_{3i}, m_{4i}, m_{5i}, m_{6i}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (10)$$

При этом самая опасная цель зафиксирована в последовательности  $\Pi_{\mu}^1$ , номер выделенной для нее БМ — число  $m_{11}$ , следующая по ответственности цель зафиксирована в последовательности  $\Pi_{\mu}^2$ , номер ее БМ — число  $m_{12}$ , и так далее вплоть до  $m_{1k}$ . Может оказаться, что набор чисел — номеров БМ  $m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1k}$  — представляет собой искомое оптимальное решение, но это может произойти только в частном случае, когда целей немного и расположены они в пространстве равномерно относительно БМ. В общем случае, если таким образом выбирать БМ, можно перейти в состояние «перегрузки» одной или нескольких из них, т. е. оказаться в тупиковой ситуации, не получив требуемое решение. Поэтому важнейшим дополнением к логике получения эффективного решения служат дальнейшие рассуждения.

Имея последовательность номеров БМ для каждой цели (10), следует распределять ресурсы — БМ (с учетом количества имеющихся в наличии ракет в текущий момент) согласно логике: передать самой опасной цели наиболее эффективный ресурс — первую в порядке следования БМ, если там имеется вооружение; если ракеты отсутствуют, то перейти к следующей БМ из этого ранжированного списка и рассуждать аналогично. Действовать так далее вплоть до последней БМ в рейтинговом списке данной цели. Если на очередном шаге распределение состоялось, то это означает, что очередная рассматриваемая цель «привязана» к БМ, причем лучшим образом.

Далее переходим к реализации аналогичной процедуры для следующей в порядке значимости цели с учетом занятости всех БМ на текущий момент и действуем так вплоть до последней цели. Завершающей процедурой служит обратное ранжирование, позволяющее зафиксировать номера БМ в исходной первоначальной нумерации и обеспе-

чить необходимое соответствие между БМ и выделенными для них целями, записать по существу искомое решение.

Если некоторую цель распределить не удастся, то это происходит либо по причине занятости всех БМ, либо в связи с запретом применения БМ ее определенными подсистемами. В реальной ситуации на основе такой логики может оказаться, что все цели успешно распределены либо распределены только часть целей. При этом решение может быть как оптимальным, так и приближенным. Если оно мало отличается от оптимального и время реализации приемлемо, можно утверждать об эффективности субоптимизационного подхода, о создании нового субоптимизационного метода.

Единственный способ получения точного, оптимального решения в данной нелинейной дискретной NP-задаче — это метод перебора, который с учетом быстродействия компьютера дает решение (заведомо оптимальное) лишь в задачах средней размерности, около 10—12 целей и шести БМ. Это обстоятельство целесообразно учитывать для обоснования правомерности рассматриваемого субоптимального метода.

### 3. ПРИМЕР СУБОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ ШЕСТИ БОЕВЫХ МАШИН И ДЕСЯТИ ЦЕЛЕЙ

Рассмотрим возможности изложенного подхода, оценим точность, достоверность и качество получаемых решений, выполнив соответствующие расчеты на конкретных примерах. Допустим, имеется шесть БМ и десять целей. В другом случае рассмотрим 100 целей и шесть БМ. Несложно подсчитать число просматриваемых вариантов, получаем соответственно  $N = 6^{10} = 60\,466\,176$  и  $N = 6^{100} \approx 10^{78}$ . Отметим, что для 1000 целей  $N = 6^{1000} \approx 10^{780}$ .

Допустим, БМ расположены по линии: 1)  $X_1 = 0$ ,  $Y_1 = 1000$ ; 2)  $X_2 = 1000$ ,  $Y_2 = 1000$ ; 3)  $X_3 = 2000$ ,  $Y_3 = 1000$ ; 4)  $X_4 = 3000$ ,  $Y_4 = 1000$ ; 5)  $X_5 = 4000$ ,  $Y_5 = 1000$ ; 6)  $X_6 = 5000$ ,  $Y_6 = 1000$ . При этом число ракет для БМ1, БМ2, ..., БМ6 составляет соответственно 2, 2, 2, 2, 4, 3 ед.

Далее положим, что в момент принятия решения для первой и второй БМ недопустима работа с 10-й целью, т. е. связи типа 1—10 и 2—10 в решении о целераспределении должны отсутствовать. Текущие координаты целей 1—10 пусть будут такими:

- 1)  $x_{ц1} = 9000$ ,  $y_{ц1} = 3000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;
- 2)  $x_{ц2} = 8000$ ,  $y_{ц2} = 3000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;
- 3)  $x_{ц3} = 7000$ ,  $y_{ц3} = 3000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;
- 4)  $x_{ц4} = 6000$ ,  $y_{ц4} = 3000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;

- 5)  $x_{ц5} = 5000$ ,  $y_{ц5} = 6000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;  
 6)  $x_{ц6} = 4000$ ,  $y_{ц6} = 16\ 000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;  
 7)  $x_{ц7} = 3000$ ,  $y_{ц7} = 6000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;  
 8)  $x_{ц8} = 2000$ ,  $y_{ц8} = 6000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;  
 9)  $x_{ц9} = 1000$ ,  $y_{ц9} = 26\ 000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ ;  
 10)  $x_{ц10} = 0$ ,  $y_{ц10} = 6000$ ,  $z_{ц1} = 1000$ .

В результате обработки представленных данных на первом этапе ранжирования получена информация, представленная в табл. 1. В первом столбце указан номер цели в порядке следования, это, по существу, ее идентификатор. В строках представлены номера БМ, а в скобках возрастающие расстояния (в метрах) между БМ и целью, определяемой номером строки. Отсюда видно, что первую цель лучше всего обрабатывать на шестой БМ, вторую, третью, четвертую, пятую цели также целесообразно обрабатывать на шестой БМ, для шестой цели лучшей является пятая БМ и т. д. Очевидно противоречие, шестая БМ перегружена, там в текущий момент имеется только 3 ракеты!

В табл. 2 представлена информация, соответствующая второму этапу ранжирования. Здесь строки следуют в порядке возрастания значений второго столбца так, что самая сильная связь находится в левом верхнем углу таблицы с показателем критерия (расстояния между четвертой целью и шестой БМ) равным 2240 м; т. е. связь «четвертая цель — шестая БМ» наиболее значимая, поэтому для четвертой цели следует выделить лучшие ресурсы, а именно БМ под номером 6. Далее распределение выполняется для следующей по важности цели под номером 3. Ей также отдается лучший ресурс, БМ под номером 6. Аналогичные действия выполняются для последующих целей с учетом оставшихся ресурсов. Отметим, что в скобках первого столбца указана исходная нумерация целей.

В результате применения *субоптимизационного метода* получаем следующую последовательность целей и связанных с ней БМ:

номер цели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
номер БМ	5	6	6	6	5	5	4	3	2	3

значение критерия: 74 539 м,  
 время решения: 0,0000001 с.

Таблица 1

**Результаты первого этапа ранжирования**

Номер цели	Номера БМ и расстояние о БМ до цели					
1	6 (4470)	5 (5390)	4 (6320)	3 (7280)	2 (8250)	1 (9220)
2	6 (3610)	5 (4470)	4 (5390)	3 (6320)	2 (7280)	1 (8250)
3	6 (2830)	5 (3610)	4 (4470)	3 (5390)	2 (6320)	1 (7280)
4	6 (2240)	5 (2830)	4 (3610)	3 (4470)	2 (5390)	1 (6320)
5	6 (5000)	5 (5100)	4 (5390)	3 (5830)	2 (6400)	1 (7070)
6	5 (15 000)	4 (15 000)	6 (15 000)	3 (15 100)	2 (15 300)	1 (15 500)
7	4 (5000)	3 (5100)	5 (5100)	2 (5390)	6 (5390)	1 (5830)
8	3 (5000)	2 (5100)	4 (5100)	1 (5390)	5 (5390)	6 (5830)
9	2 (25 000)	1 (25 000)	3 (25 000)	4 (25 100)	5 (25 200)	6 (25 300)
10	1 (5000)	2 (5100)	3 (5390)	4 (5830)	5 (6400)	6 (7070)

Таблица 2

**Результаты второго этапа ранжирования**

Номер цели	Номера БМ и расстояние о БМ до цели					
1 (4)	6 (2240)	5 (2830)	4 (3610)	3 (4470)	2 (5390)	1 (6320)
2 (3)	6 (2830)	5 (3610)	4 (4470)	3 (6390)	2 (6320)	1 (7280)
3 (2)	6 (3610)	5 (4470)	4 (5390)	3 (6320)	2 (7280)	1 (8250)
4 (1)	6 (4470)	5 (5390)	4 (6320)	3 (7280)	2 (8250)	1 (9220)
5 (5)	6 (5000)	5 (5100)	4 (5390)	3 (5830)	2 (6400)	1 (7070)
6 (7)	4 (5000)	3 (5100)	5 (5100)	2 (5390)	6 (5390)	1 (5830)
7 (8)	3 (5000)	2 (5100)	4 (5100)	1 (5390)	5 (5390)	6 (5830)
8 (10)	1 (5000)	2 (5100)	3 (5390)	4 (5830)	5 (6400)	7 (7070)
9 (6)	5 (15 000)	4 (15 000)	6 (15 000)	3 (15 100)	2 (15 300)	1 (15 500)
10 (9)	2 (25 000)	1 (25 000)	3 (25 000)	4 (25 000)	5 (25 200)	6 (25 300)





Если решить ту же задачу, *отбросив ограничения* для БМ 1 и 2 относительно цели 10, получим следующий результат:

номер цели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
номер БМ	5	6	6	6	5	5	4	3	2	1

значение критерия: 74 154 м,  
время решения: 0,0000001 с.

При этом значение критерия улучшилось (с 74 539 до 74 154 м), для цели 10 вместо БМ 3 используется БМ 1. Это естественно, так как возможностей стало больше. Незначительное отличие критерия объясняется расположением БМ и целей, в других случаях расхождение может быть значительным.

*Методом полного перебора* получается следующее решение:

номер цели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
номер БМ	6	6	6	5	5	5	4	3	2	3

значение критерия: 74 219 м,  
время решения: 6,48 с.

Разумеется, значение критерия 74 219 м лучше, чем полученное декомпозиционным методом — 74 539 м.

Определенный интерес представляет *противоположное решение*, фиксирующее наихудший результат, это позволяет на фоне оптимального ре-

шения более четко понять сущность целераспределения, переходя от количественных оценок к качественному восприятию проблемы. В связи с этим имеем

номер цели	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
номер БМ	1	1	2	2	3	3	6	6	5	6

значение критерия: 93 606 м,  
время решения: 6,47 с.

Заметное различие значений критерия в 74 219 и 93 606 м и принципиально разный список номеров БМ свидетельствуют, что оптимизация для данной задачи дает заметный эффект.

#### 4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СЛУЧАЕ МАССИРОВАННОЙ АТАКИ

Данный пример затрагивает гипотетический случай, более напоминающий стратегическое управление противовоздушной обороной в случае массированной атаки противника, здесь боекомплект группировки насчитывает 800 ракет на фоне 990 активных целей. Тогда, естественно, 190 целей не могут быть распределены между имеющимися БМ. При этом число возможных целераспределений составляет  $7^{990}$ , что сопоставимо с числом  $10^{780}$ .

Таблица 3

Результаты решения задачи в случае большого числа целей и семи БМ

Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ
1	6	2	6	3	6	4	6	5	4	6	3	7	-1	8	3	9	2	10	3
11	4	12	1	13	-1	14	2	15	5	16	1	17	6	18	3	19	5	20	5
21	5	22	6	23	1	24	6	25	6	26	6	27	6	28	6	29	6	30	5
31	6	32	6	33	6	34	6	35	6	36	5	37	5	38	5	39	4	40	6
41	6	42	2	43	4	44	6	45	6	46	6	47	6	48	5	49	3	50	1
51	6	52	4	53	6	54	5	55	6	56	6	57	4	58	5	59	6	60	4
61	5	62	-1	63	4	64	5	65	5	66	6	67	6	68	6	69	5	70	6
71	4	72	5	73	6	74	6	75	6	76	6	77	6	78	2	79	6	80	3
81	4	82	6	83	1	84	6	85	4	86	6	87	6	88	4	89	6	90	6
91	6	92	1	93	-1	94	3	95	5	96	5	97	6	98	4	99	6	100	3
101	6	102	6	103	6	104	6	105	5	106	5	107	6	108	6	109	6	110	6
.....																			
881	1	882	1	883	4	884	2	885	3	886	1	887	3	888	-1	889	-1	890	2
891	-1	892	1	893	3	884	3	885	-1	896	3	897	3	898	2	899	-1	900	-1
901	-1	902	-1	903	-1	904	-1	905	1	906	-1	907	1	908	2	909	2	910	4
911	2	912	4	913	-1	914	2	915	3	916	1	917	1	918	-1	919	4	920	4
921	1	922	4	923	3	924	-1	925	3	926	3	927	-1	928	2	929	3	930	2
931	-1	932	-1	933	-1	934	3	935	-1	936	3	937	-1	938	-1	939	-1	940	4
941	1	942	-1	943	-1	944	1	945	2	946	-1	947	1	948	1	949	1	950	2
951	-1	952	3	953	-1	954	-1	955	-1	956	2	947	1	958	4	959	4	960	1
961	3	962	-1	963	-1	964	2	965	4	966	3	967	7	968	3	969	7	970	-1
971	2	972	2	973	-1	974	3	975	3	976	2	977	2	978	4	979	1	980	-1
981	7	982	2	983	1	984	-1	985	-1	986	-1	987	2	988	2	989	3	990	-1
Время счета (процессорное) — 0,14062500000000 с. Общее время работы программы — 0,17199999998661 с.																			

**Результаты решения задачи целераспределения в случае недостающего вооружения**

Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ	Цель	БМ
1	-1	2	-1	3	4	4	6	5	6	6	1	7	1	8	-3	9	-1	10	3
11	1	12	6	13	-1	14	6	15	5	16	5	17	1	18	-1	19	6	20	-1
21	-1	22	-1	23	3	24	6	25	-1	26	6	27	-1	28	4	29	6	30	-1
31	6	32	5	33	-1	34	-1	35	6	36	5	37	-1	38	4	39	3	40	2
41	5	42	-1	43	6	44	3	45	5	46	2	47	4	48	5	49	2	50	-1
51	4	52	4	53	4	54	1	55	1	56	1	57	4	58	3	59	3	60	3
61	2	62	2	63	-1	64	2	65	-1	66	6	67	3	68	-1	69	1	70	2
71	4	72	-1	73	1	74	1	75	5	76	-1	77	3	78	-1	79	2	80	4
81	1	82	5	83	4	84	4	85	-1	86	3	87	3	88	5	89	5	90	2
91	1	92	1	93	2	94	-1	95	5	96	2	97	2						

В усеченной табл. 3 в каждом столбце указан номер цели, второй — установленный в процессе оптимизации номер БМ. Минус единица символизирует состояние свободной, не привязанной к БМ цели. При этом распределенные цели согласно методу представляют наибольшую угрозу, и работа с ними должна проводиться в первую очередь, для них вооружение выделяется по правилу «наиболее важным целям выделять лучшие ресурсы»; более того, они также проранжированы по возрастанию значений критерия — времени подлета. Характерно, что время оценки состояния системы обороны с учетом собственных возможностей и действий противника минимально и составляет доли секунды, что важно в современных условиях ведения боевых действий.

### 5. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ НЕДОСТАЮЩЕМ ВООРУЖЕНИИ

Данный пример затрагивает случай большого числа целей (97 единиц) и вооружений (72 ракеты для шести БМ) с превосходством первых, когда 25 целей остаются свободными (отмечены как минус единица). При этом наиболее актуальные цели, их 72, равномерно распределены по имеющимся БМ с учетом времени подлета и количества вооружений на каждой из них (табл. 4).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод решения задачи распределения целей между боевыми машинами батареи с учетом ограничений по боекомплекту на каждой из них, а также требований-ограничений других подсистем боевой машины, позволяющий распределять до 1000 целей между боевыми машинами батареи.

В качестве критерия принятия решений принято подлетное время между боевой машиной и целью. С формальной точки зрения содержание критерия не является принципиальным — т. е., если связь «цель — боевая машина» определять по-другому, то методика принятия решений не изменится, что важно в смысле развития и преимущества метода.

Установлено, что время реализации алгоритма незначительно даже при числе целей порядка 100 и более (1000 целей). Это особенно важно в перспективе, так как возможности систем вооружений постоянно нарастают. При этом задача целераспределения решается в динамике, когда время реакции системы управления на текущие события должно быть минимальным.

Метод применим для различных систем вооружения с множеством целей и несколькими единицами однотипных боевых машин в состояниях полного либо частичного наличия боекомплекта.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и трудно решаемые задачи. — М.: Мир, 1982. — 416 с.
2. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
3. Гиг ван Дж. Прикладная общая теория систем. — М.: Мир, 1981. — 336 с.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.*

**Слугин Валерий Георгиевич** — гл. конструктор,

**Зубарев Александр Анатольевич** — зам. гл. конструктора, нач. отделения,

**Шевцов Олег Юрьевич** — зам. гл. конструктора, нач. отделения,

**Мехтиев Аббас Ядулла-оглы** — нач. отдела,

**Ковешников Владимир Алексеевич** — канд. техн. наук, вед. инженер,

АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова», г. Тула, ✉ kbkedr@tula.net.