

УДК 681.396.96

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МНОГОФАКТОРНОГО ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

С.В. КРУГЛИКОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 11 ноября 2012

Рассмотрена методика решения задачи многофакторного целераспределения, позволяющая рационально и эффективно использовать разнородные и разнотипные объекты управления в условиях агрессивной внешней среды, на примере группировки средств противовоздушной обороны.

Ключевые слова: целераспределение, эффективность, автоматизированная система управления, показатель качества управления, экономическая целесообразность.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития Вооруженных Сил является совершенствование систем управления войсками и оружием. Наиболее быстрым и экономичным путем, позволяющим значительно увеличить боевой потенциал войск и повысить эффективность применения всех видов оружия при существующем составе, является использование автоматизированной системы управления (АСУ). При этом необходимо отметить, что в настоящее время наблюдается возрастание значимости сил и средств противовоздушной обороны (ПВО), т. к. она является одной из главных составляющих в общей системе мер по обеспечению готовности государства к защите от вооруженного нападения, в частности, от массированного ракетного авиационного удара (МРАУ).

Эффективность боевых действий группировки ПВО при отражении МРАУ существенно зависит от качества и оперативности принимаемых решений по закреплению объектов управления (ОУ) за воздушными целями (в данном случае – огневые средства ПВО) [1, 2]. Системообразующим элементом группировки ПВО является АСУ, представляющая собой сложную эргатическую организационно-техническую систему сетевой архитектуры, разнесенную в пространстве и работающую в реальном масштабе времени.

Основной целью процесса поддержки принятия решения, реализованного в АСУ, является обеспечение реализации предельных боевых возможностей ОУ, а именно, огневых средств или средств поражения (СП), группировки ПВО с учетом тактики действия противника. Эффективность принимаемых решений определяется качеством информации о воздушном противнике [3], оптимальностью алгоритмов целераспределения (ЦР), своевременностью и точностью постановки задач СП на уничтожение цели [4]. Настоящая работа посвящена решению задачи оптимизации алгоритмов ЦР в современных АСУ войск ПВО.

Выбор исходных данных

В качестве исходных данных решения задачи ЦР определим, что каждое огневое средство характеризуется границами зоны поражения по высоте H_{\min} и H_{\max} и дальности

D_6 и D_d , определяющими рубеж воздействия (РВ) огневое средство, возможностью обстрела цели по скорости $v_{пред}$ и параметру $S_{пред}$, вероятностью поражения цели $P_{пор}$, циклом стрельбы $T_{ц}$, а каждая цель – высотой полета $H_{ц}$, скоростью $v_{ц}$, курсовым параметром $S_{ц}$, подлетным временем достижения j -й цели рубежа воздействия i -го ОС $t_{подлji}$.

Тогда обслуживание цели огневым средством возможно при следующих ограничениях:

$$\begin{cases} H_{i \min} \leq H_{ц} \leq H_{i \max} & - \text{ по высоте;} \\ v_{ц} \leq v_{i \text{ пред}} & - \text{ по скорости;} \\ S_{ц} \leq S_{i \text{ пред}} & - \text{ по курсовому параметру;} \\ t_{подлji} > T_{цi \min} + t_{занi(j-1)} & - \text{ по подлетному времени,} \end{cases} \quad (1)$$

где $T_{цi \min}$ – минимальный цикл стрельбы i -го ОС; $t_{занi(j-1)}$ – время занятости i -го ОС по обстрелу ранее назначенной $(j-1)$ -й цели.

Определение показателя качества управления

Решение задачи ЦР в группировке ПВО, осуществляемое АСУ, представляет собой формализованный вариант, выполняющий функцию интеллектуальной поддержки принимаемых командиром решений на боевые действия [1, 4, 5]. Сущность процесса ЦР заключается в выявлении огневых средств, способных с заданной вероятностью уничтожить цель на основе оптимизации выбранного показателя качества управления (ПКУ).

Показатель качества управления характеризует степень выполнения группировкой ПВО поставленной задачи, что соответствует принципу выбора целевой функции, сформулированному академиком А.Н. Колмогоровым.

В качестве ПКУ целесообразно использовать показатель, характеризующий предотвращенный ущерб объекту обороны, который определяется исходя из ущерба, наносимого противником объекту обороны, прикрываемому группировкой ПВО [4–6], и записывается в виде

$$Q = \sum_{r=1}^R C_r \left(\sum_{j=1}^N C_{jr} P_{jr}^{30} - \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M C_{jr} P_{jr}^{30} P_{ij}^{3B} P_{ij}^{B3} m_{ij} \right), \quad (2)$$

где C_r – важность r -го отдельного объекта обороны; $r \in \overline{1, R}$ – номера отдельных объектов; C_{jr} – степень опасности j -й цели для r -го объекта обороны; P_{jr}^{30} – вероятность входа j -й цели в зону опасности r -го объекта обороны; P_{ij}^{3B} – вероятность входа j -ой цели в зону воздействия i -го огневое средство; P_{ij}^{B3} – вероятность выполнения боевой задачи i -м огневым средством по j -й цели; N – количество целей; M – количество огневых средств; m_{ij} – параметр управления, характеризующий закрепление j -й цели за i -м огневым средством.

Математическая модель данного ПКУ описывается выражением

$$F_{пу}^* = \text{opt}(\{N\} \cup \{M\}, m_{ij}) = \max_{W_{бд}^* \in \{W_{бд}\}} F_{пу}(W_{бд}^*),$$

где $F_{пу}^*$ – ПКУ в виде предотвращенного ущерба объекту обороны; $\{N\}, \{M\}$ – множество целей и ОС соответственно; $F_{пу}$ – функция предотвращенного ущерба; $W_{бд}^*$ – наилучший вариант развития боевых действий; $\{W_{бд}\}$ – множество вариантов развития боевых действий.

При использовании данного ПКУ, учитывающего степень опасности цели, следует использовать критерий, характеризующий ущерб объекту по глубине проникновения целей

$D_{пр}$ в зону опасности объекта, который определяется выражением $D_{пр} = \sum_{j=1}^N V_{цj} t_j^{30}$, где t_j^{30} – время нахождения j -й цели в зоне опасности объекта.

Минимизация $D_{пр}$ возможна путем минимизации проникновения каждой цели в зону опасности объекта. Это означает, что для уничтожения j -й цели нужно назначать, то i -е средство, подлетное время цели до рубежа воздействия которого является наименьшим с учетом ограничений (1). Этот ПКУ получил название минимума подлетного времени, так как минимизирует возможный ущерб объекту обороны при равноважных целях.

Оптимизация ПКУ [5, 6] заключается в нахождении таких значений параметров управления m_{ij} , которые обращают ПКУ (2) в минимум при следующих ограничениях:

$$\sum_{i=1}^M m_{ij} = 1 \quad (j = \overline{1; N}), \quad \sum_{j=1}^N m_{ij} = 1 \quad (i = \overline{1; M}), \quad (3)$$

которые означают запреты сосредоточения огня нескольких средств по одной цели и назначения нескольких целей одному средству соответственно.

Представленный ПКУ удовлетворяет всем основным требованиям (обладает физической сущностью, является функцией параметров обстановки и параметров управления, прост в вычислениях), однако он не в полной мере удовлетворяет условиям современной войны и не учитывает особенностей применения массированного воздушного удара. Проведенный в [5, 6] анализ свидетельствует, что в группировке ПВО, управляемой АСУ и имеющей в своем составе разнотипные ОС, не обеспечивается их рациональное распределения по воздушным целям, входящим в состав МРАУ, а предпочтение отдается ОС, имеющим наибольшие рубежи воздействия и циклы стрельбы, что приводит к пропуску низколетящих целей и неоптимальному расходу боезапаса группировки ПВО.

Выбор факторов целераспределения

В целях реализации потенциальных возможностей разнородных огневых средств ПВО необходимо их замкнуть в единую АСУ ВВС и войск ПВО. При этом рациональное решение по ЦР должно носить многофакторный характер и учитывать, помимо вероятностных характеристик, тип конкретного огневого средства [4, 5]. Тогда критерий оптимизации целераспределения является многофакторным (F) и учитывает: степень важности (опасности) цели ($f_{C_{jr}}$), экономическую целесообразность обстрела цели огневым средством ($f_{U_{унij}}$), цикл стрельбы огневого средства ($f_{T_{ОСij}}$) и подлетное время цели до рубежа воздействия огневого средства ($f_{T_{подij}}$).

В общем виде многофакторный критерий (МФК) оптимизации запишем:

$$F = F(X) = \left\{ f_{C_{jr}}, f_{U_{унij}}, f_{T_{ОСij}}, f_{T_{подij}} \right\}. \quad (4)$$

Формально оптимальное решение \bar{X} имеет следующий вид:

$$\bar{F} = \bar{F}(\bar{X}) = \underset{W_{бд}^* \in \{W_{бд}\}}{\text{opt}} F(X),$$

где \bar{F} – оптимальное решение интегрального критерия; \bar{X} – оптимальное решение управляемых параметров.

При решении задачи ЦР в ЕАСУ локальные критерии являются равноважными, поэтому коэффициент относительной важности каждого критерия можно не учитывать в процессе оптимизации.

Значения частных показателей критерия (4) представляют собой элементы матриц:

$$C_{jr} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1R} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{N1} & C_{N2} & \dots & C_{NR} \end{pmatrix}, \quad U_{унij} = \begin{pmatrix} U_{ун11} & U_{ун12} & \dots & U_{ун1N} \\ U_{ун21} & U_{ун22} & \dots & U_{ун2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{унM1} & U_{унM2} & \dots & U_{унMN} \end{pmatrix},$$

$$T_{Цij}^{OC} = \begin{pmatrix} T_{Ц11}^{OC} & T_{Ц12}^{OC} & \dots & T_{Ц1N}^{OC} \\ T_{Ц21}^{OC} & T_{Ц22}^{OC} & \dots & T_{Ц2N}^{OC} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{ЦM1}^{OC} & T_{ЦM2}^{OC} & \dots & T_{ЦMN}^{OC} \end{pmatrix}, \quad T_{подл ij} = \begin{pmatrix} T_{подл11} & T_{подл12} & \dots & T_{подл1N} \\ T_{подл21} & T_{подл22} & \dots & T_{подл2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{подлM1} & T_{подлM2} & \dots & T_{подлMN} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, МФК ЦР $\bar{F}_{ЦРij}$ представляет собой совокупность четырех частных критериев, а направление оптимизации минимизация и записывается в виде:

$$\bar{F}_{ЦР ij} = \max_{\substack{\{N\} \rightarrow \{M\} \\ mij}} \min_{\substack{C_{jr}^{-1} \in \{C^{-1}\} \\ U_{унij} \in \{U_{ун}\} \\ T_{Цij}^{OC} \in \{T_{Ц}^{OC}\} \\ T_{подл ij} \in \{T_{подл}\}}} F(C_{jr}^{-1}, U_{унij}, T_{Цij}^{OC}, T_{подл ij}). \quad (5)$$

Ограничениями процесса оптимизации являются:

- равнозначность параметров обстановки, т. е. возможность участия в процессе ЦР всех огневых средств, способных уничтожить рассматриваемые цели;
- определение направления изменения параметров оптимизации, в целях достижения максимального предотвращенного ущерба объекту обороны;
- предварительное ранжирование целей противника по важности, что позволяет не пропустить наиболее опасные цели к объектам обороны;
- учет экономической целесообразности использования огневых средств;
- нормировка параметров оптимизации.

С учетом ограничения $T_{подл ij} \leq T_{ЦР ij}$, где $T_{подл ij} = \frac{D_{обнj} \pm \Delta - d_{дi}}{V_{Цj}}$ – подлетное время j -й цели до рубежа воздействия i -го огневого средства; $T_{ЦР ij}$ – время ЦР i -го огневого средства по j -й цели.

Методика решения задачи целераспределения

Так как обстановка в ходе противовоздушного боя постоянно меняется, то решение всех задач управления повторяется периодически через определенный промежуток времени (цикл решения задач управления). В каждом цикле последовательно осуществляется следующее.

1. Обработка радиолокационной информации о цели, данные о которой поступили на на автоматизированный командный пункт первыми, в рамках которой определяется важность цели.
2. Формирование матрицы важности (опасности) целей $\|C_{jr}\|$.
3. Формирование матрицы целераспределения $\|A_{ij}\|$ [5].
4. Отбор огневых средств, способных обстрелять цель на основе $\|A_{ij}\|$ [5].
5. Отбор огневых средств по критерию «эффективность – стоимость» [7].

Формулировка задачи отбора огневых средств по критерию «эффективность–стоимость» звучит следующим образом: при заданных значениях параметров $P_{ij}^{БЗ}$ (вероятность выполнения боевой задачи по уничтожению j -й цели i -м ОС в составе группировки ПВО, управляемой АСУ), параметров $P_{ij}^{ЗВ}$ (вероятность входа j -й цели в зону воздействия i -го ОС на соответствующем РВ) необходимо найти оптимальные решения R_{ij} , которые обращают в минимум критерий ($F_{М.З}$) затрат на уничтожение (экономической целесообразности обстрела i -м ОС j -й цели, при наличии альтернатив) i -м ОС j -й цели, определяемый выражением:

$$F_{М.З} = \min_{\min C_{jr}^{-1} \in \{C^{-1}\}} \sum_{j=1}^{N_{РВ}} \sum_{i=1}^{M_{РВ}} U_{ун\ ij} R_{ij}, \quad (6)$$

где $N_{РВ}$ – количество целей, выходящих на РВ группировки ПВО смешанного состава; $M_{РВ}$ – количество ОС способных уничтожать цели на соответствующем РВ; $U_{ун\ ij} = P_{ij}^{ЗВ} P_{ij}^{БЗ} \bar{C}_{р.р\ ij}$ – элементы матрицы экономической целесообразности обстрела i -м ОС j -й цели (14); $P_{ij}^{БЗ} = P_{ЦУ\ ij} P_{пор\ ij}$; $P_{ЦУ\ ij}$ – вероятность успешного ЦУ i -му ОС по j -й цели; $P_{пор\ ij} = 1 - (1 - P_1)^n$ – вероятность поражения i -м ОС j -й цели за цикл стрельбы; P_1 – вероятность поражения цели одной ракетой; n – количество ракет назначенных на цель для достижения гарантированной вероятности ее поражения, не ниже 0,75; $\bar{C}_{р.р\ ij}$ – математическое ожидание стоимости расхода ракет:

$$\bar{C}_{р.р} = \sum_{j=1}^{N_{РВ}} \sum_{i=1}^{M_{РВ}} C_{ЦС\ i} W_{ij}, \quad (7)$$

где $C_{ЦС\ i}$ – нормированное значение стоимости цикла стрельбы i -го ОС относительно максимального значения; W_{ij} – число циклов стрельбы (залпов) i -го огневого средства по j -й цели для ее поражения с гарантированной вероятностью не ниже 0,75; R_{ij} – параметр управления, характеризующий возможность обслуживания i -м ОС j -ой цели,

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-е ОС способно обслужить } j\text{-ю цель} \\ & \text{с вероятностью не ниже } 0,75, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Задача оптимизации заключается в нахождении таких значений R_{ij} , которые обращают критерий (6) в минимум, и решается при ограничениях: на загрузку каждой группы ОС, т. е.

$$\sum_{j=1}^{N_{РВ}} a_{ij} R_{ij} \leq \eta_i, \quad i = \overline{1, M_{РВ}}, \quad a_{ij} = \lambda t_{ij}, \quad \text{на время обслуживания всех групп целей, т. е.}$$

$$\sum_{j=1}^{N_{РВ}} \sum_{i=1}^{M_{РВ}} t_{ij} R_{ij} \leq t_{зад}, \quad \sum_{i=1}^{M_{РВ}} R_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, N_{РВ}}, \quad (8)$$

где λ_j – интенсивность поступления целей для обслуживания; t_{ij} – время обслуживания j -й цели i -м ОС; η_i – допустимая нагрузка i -го ОС; $t_{зад}$ – заданное время на обслуживание целей группировкой ПВО.

Задачи (6)–(8) являются типичными задачами линейного программирования.

Оптимизация $\|U_{унij}\|$ проводится последовательно по шагам, начиная с наименьшего элемента строки матрицы. На каждом шаге среди всех не исключенных на предыдущих шагах элементов строки матрицы находится наименьший $U_{ун \hat{ij}}^{\min}$ и \hat{j} -я цель закрепляется за \hat{i} -м ОС. После закрепления \hat{j} -я строка исключается из дальнейшего рассмотрения.

6. Выбор огневого средства с минимальным циклом стрельбы из числа отобранных по данной цели из матрицы $\|T_{Цij}^{ОС}\|$ при ограничениях (3):

$$\begin{aligned} \min_{C_{jr}^{-1} \in \{C^{-1}\}} & \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M T_{Цij}^{ОС} m_{ij} \\ \min_{U_{унij} \in \{U_{ун}\}} & \end{aligned}$$

Выбор огневого средства с минимальным циклом стрельбы производится в интересах повышения эффективности поражения воздушных целей за счет возможности неоднократного их обстрела с учетом кратковременности пребывания воздушного противника в зоне огня группировки ПВО. Таким образом, из отобранных ЕАСУ огневых средств, удовлетворяющих неравенству (1), т. е. способных обстрелять цель, необходимо отобрать огневые средства с минимальным циклом стрельбы согласно выражению

$$T_{Цij}^{ОС} = \min_i \{T_{Ц \text{ отобр } ij}^{ОС}\},$$

где $\{T_{Ц \text{ отобр } ij}^{ОС}\}$ – множество отобранных огневых средств по данной цели, имеющих свой цикл стрельбы, определяемый согласно [4].

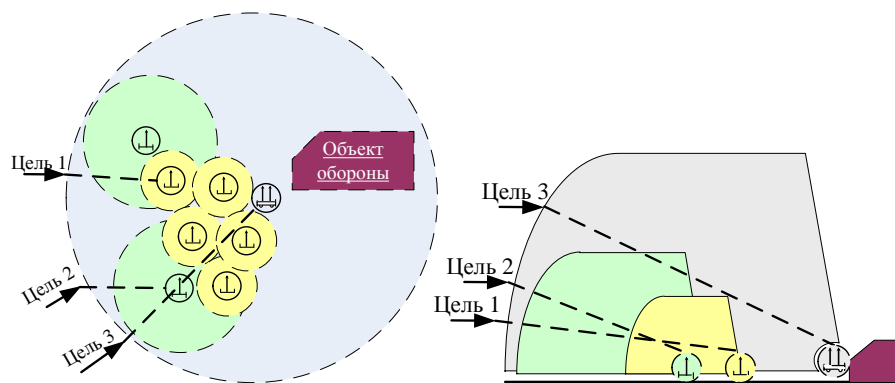
7. При наличии двух и более огневых средств с одинаково минимальным циклом стрельбы из матрицы $\|T_{подл ij}\|$ выбирается огневое средство, подлетное время цели до рубежа воздействия которого наименьшее при ограничениях (3):

$$\begin{aligned} \min_{C_{jr}^{-1} \in \{C^{-1}\}} & \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M T_{подл ij} m_{ij} \\ \min_{U_{унij} \in \{U_{ун}\}} & \\ \min_{T_{Цij}^{ОС} \in \{T_{Цij}^{ОС}\}} & \end{aligned}$$

При заданных ограничениях показатель (8) соответствует критерию Вальда [8], реализующему достижение гарантированного результата в самых неблагоприятных условиях.

В следующем цикле все повторяется сначала и в случае необходимости (например, при маневре целей или при появлении новых целей) рекомендации по ЦР корректируются.

На рисунке приведен вариант решения задачи ЦР в ЕАСУ согласно МФК, поясняющий реализацию ЦР среди ОС предлагаемой группировки ПВО, из которого следует, что низковысотные цели из состава МРАУ будут обстреляны ОС ближнего боя, цикл стрельбы и зона поражения которых наименьшие. Более высотные цели будут обслуживаться соответствующими их характеристикам ОС, тем самым обеспечивая максимальную эффективность боевых действий группировки ПВО.



Горизонтальная и вертикальная проекция варианта целераспределения в ЕАСУ

Заключение

Использование предложенного многофакторного критерия поддержки принятия решения характеризуется универсальностью применения для решения задач ЦР в АСУ (для оптимизации процесса ЦР на АКП и АПУ группировки ПВО всех уровней иерархии); учетом важности целей, временных возможностей огневых средств в совокупности с их боевой эффективностью и экономической целесообразностью по поражению целей; возможностью своевременного поражения высокоточных средств поражения из состава МРАУ группировкой ПВО, управляемой ЕАСУ; способностью эффективной реализации предлагаемого варианта группировки ПВО смешанного состава. Реализация многофакторного критерия ЦР позволит увеличить количество автоматически решаемых функций при управлении средствами ПВО и их группировкой.

TECHNIQUE OF SOLVING MULTIFACTORIAL TARGET ALLOCATION IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

S.V. KRUGLIKOV

Abstract

The technique of multivariate target distribution allowing to realize rational and effective utilization of diverse and heterogeneous objects of control in an aggressive environment is considered.

Список литературы

1. Кругликов С.В. Автоматизация процессов организационного управления силами и средствами. Минск, 2007.
2. Колодяжный В.В. // Сб. науч. ст. ВА РБ. 2004. № 7.
3. Кругликов С.В., Липатов А.А., Потетенко С.В. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10, № 9. С.18–25.
4. Справочник офицера Военно-воздушных сил и войск противовоздушной обороны / Под ред. И.П. Азаренко. Минск, 2010.
5. Кругликов С.В. // Сб. науч. ст. докторантов, адъюнктов, соискателей. 2008. № 14. С. 80–88.
6. Кругликов С.В., Кибалко И.П. // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2011. № 2 (31). С.66–74.
7. Кругликов С.В., Лемешевский С.Л. // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. 2010. №2 (27). С.32–38.
8. Меньков А.В. Теоретические основы автоматизированного управления. М., 2005.