

MATHEMATICAL SCIENCES

УДК 681.51

COMPLEX ALGORITHM FOR DETECTING, IDENTIFYING AND TARGETING A GROUP OF CONTROLLED OBJECTS

Voronov Ye.,*Doctor of Technical Sciences, professor of «Informatics and Control Systems» department,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia***Repkin A.,***Candidate of Technical Sciences, senior researcher of Scientific Educational Complex
«Informatics and Control Systems», Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia***Kuslya A.,***Head of design-theoretical department of JSC «Tactical Missiles Corporation»,
Korolyov, Moscow Oblast, Russia***Sychov S.***Deputy general designer for innovative development of JSC «Tactical Missiles Corporation»,
Korolyov, Moscow Oblast, Russia*

КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ И ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ГРУППЫ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Воронов Е.М.*Доктор технических наук, профессор кафедры «Информатика и системы управления», Московский
государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия***Репкин А.Л.***Кандидат технических наук, научный сотрудник научно-учебного комплекса «Информатика и си-
стемы управления», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г.
Москва, Россия***Куся А.М.***Начальник проектно-теоретического отдела, АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооруже-
ние», г. Королёв Московской обл., Россия***Сычёв С.И.***Заместитель генерального конструктора по инновационному развитию, АО «Корпорация «Такти-
ческое ракетное вооружение», г. Королёв Московской обл., Россия
<https://doi.org/10.5281/zenodo.10629071>*

Abstract

The task of detection and identification of group of target dynamic objects (GTDO) objects by coordinates and type of objects for group of controlled objects (GCO) as part of the network-centric group of GWO has been considered and solved, with determination of a main object of GTDO based on parameters of detection frequency of GTDO objects for GCO and reliability of identification of GTDO objects, with formation and analysis of the detection matrix of GTDO objects from the GCO. Based on statistical modeling of the configuration of systems and the corresponding probabilities of detection and identification, the effectiveness of the developed algorithm is shown, and a multifactor analysis of the efficiency of the algorithm on various configurations of GCO and GTDO systems is carried out.

Аннотация

Рассмотрена и решена задача обнаружения и идентификации группы целевых динамических объектов (ГЦДО) по координатам и типу объектов группой управляемых объектов (ГУО) в составе сетецентрической группировки ГУО, с определением главного объекта ГЦДО на основе параметров частоты обнаружения объектов ГЦДО для ГУО и надежности идентификации объектов ГЦДО, с формированием и анализом матрицы обнаружения объектов ГЦДО со стороны ГУО. На основе статистического моделирования конфигурации систем и соответствующих вероятностей обнаружения и идентификации показана эффективность разработанного алгоритма, а также проведен многофакторный анализ эффективности работы алгоритма на различных конфигурациях систем ГУО и ГЦДО.

Keywords: group of controlled objects, group of target dynamic objects, network-centric control, detecting, identifying, target assignment, multifactor analysis of effectiveness.

Ключевые слова: группа управляемых объектов, группа целевых динамических объектов, сетецентрическое управление, обнаружение, идентификация, целераспределение, многофакторный анализ эффективности.

Постановка задачи и конфигурация систем.

Рассматривается задача обнаружения и идентификации группы целевых динамических объектов (ГЦДО) сетцентрической группой УО (ГУО) в составе общей группировки ГУО [1–10]. В модели ГЦДО представлены объекты трех типов: 1 — главный объект; 2 — второстепенный объект; 3 — ложный объект (ЛО). При необходимости учета других типов объектов-целей они автоматически должны быть причислены к одному из указанных типов: например, если в приоритете для ГУО находятся дополнительные приоритетные объекты, то они при обнаружении должны быть причислены к типу 1, а не являющиеся приоритетными — к типу 3; обычным объектам ГЦДО должен быть назначен тип 2 или тип 3, в этом случае они могут быть проигнорированы при целераспределении УО в составе ГУО.

Процедура обнаружения и идентификации объектов ГЦДО рассматривается в следующей последовательности этапов:

1) выполняется процедура обнаружения объекта ГЦДО с результатом «обнаружен/не обнаружен», с его принадлежностью к типу 2; пусть вероятность данного события $P_2 = 0,75$;

2) среди обнаруженных объектов ГЦДО могут быть ложные объекты: пусть вероятность того, что ложный объект (тип 3) будет выявлен среди всех обнаруженных на этапе 1 объектов ГЦДО, равна $P_3 = 0,75$; соответственно, ложный объект может быть идентифицирован как реальный объект с вероятностью $P'_3 = 1 - P_3 = 0,25$ (см. этап 4);

3) по всем обнаруженным объектам ГЦДО производится определение главного объекта (тип 1); пусть базовая вероятность идентификации для данного типа задается как $P_1 = 0,8$;

4) среди множества ложных объектов, которые на самом деле являются ложными, но видимы со стороны объектов ГУО как реальные объекты ГЦДО (вероятность данного события $P'_3 = 0,25$), производится равновероятное разделение на тип 1 и тип 2 (пусть вероятность разделения на тип 1 и 2 равна $P_4 = 0,5$).

Этапы 2 и 4 можно объединить следующим образом: на интервале $[0, 1]$ задается точка $P'_3 = 1 - P_3 = 0,25$ (программно задается именно это значение) и середина интервала $[0, P'_3]$ — точка $P''_3 = P'_3 \cdot P_4 = 0,125$. В этом случае при розыгрыше равномерно распределенной случайной величины для ЛО имеет место следующее условие результата идентификации:

- при $P \in [0, P''_3]$ ЛО будет считаться реальным объектом ГЦДО типа 1;
- при $P \in [P''_3, P'_3]$ ЛО будет считаться реальным объектом ГЦДО типа 2;

- при $P \in [P'_3, 1]$ ЛО будет считаться обнаруженным (тип 3).

Формирование конфигурации систем. Для объектов ГУО задаются следующие параметры:

- количество объектов в ГУО: $N_{\text{ГУО}}$;
- диапазоны генерации координат объектов по дальности и фронту, по которым производится генерация координат отдельных объектов ГУО.

Для объектов ГЦДО, в качестве рассмотренного далее расчетного примера, задаются следующие параметры:

- количество реальных объектов ГЦДО: $N'_{\text{ГЦДО}} = 4$ (заданная базовая конфигурация: 1 объект — тип 1, 3 объекта — тип 2); центр ГЦДО — объект типа 1, расположенный в начале координат (см. табл. 1), где система координат $xу$ — плоскость моря;

- количество ЛО: $N_{\text{ЛО}} = 4$; их генерация производится случайным образом на расстоянии от 1 до 2 км от реального объекта ГЦДО (см. табл. 1);

- координаты уточненного нахождения центра ГЦДО.

Далее производится сведение всех объектов ГЦДО в единый вектор координат, включая ложные объекты, размерностью $N_{\text{ГЦДО}} = N'_{\text{ГЦДО}} + N_{\text{ЛО}} = 8$, и их упорядочивание «слева–направо», как будет их видеть объект ГУО (см. табл. 2).

В данном случае алгоритм принадлежности координат каждому обнаруженному объекту ГЦДО при получении данных от всех объектов ГУО не рассматривается: подразумевается, что упорядочивание проводится сразу при идентификации для всей ГУО по полученным координатам объектов ГЦДО.

Формирование матрицы обнаружения. Для каждого УО в ГУО реализуются этапы процедуры обнаружения с формированием матрицы обнаружения объектов ГЦДО $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ размерностью $N_{\text{ГУО}} \times N_{\text{ГЦДО}}$, состоящей из дискретного множества значений $\{0; 1; 2; 3\}$ согласно указанным выше типам. Вероятности обнаружения типов объектов ГЦДО приведены выше (4 этапа обнаружения–идентификации). Пример матрицы $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ для одного из статистических экспериментов базового варианта приведен далее в табл. 3.

Расчет надежности идентификации главной цели ГЦДО. Для формирования параметра надежности идентификации главного объекта ГЦДО необходимо выполнить следующие действия:

1. Расчет количества результатов обнаружения объекта ГЦДО по каждому типу объекта среди всех УО в ГУО дает матрицу

$$\mathbf{N}_{\text{обн}} = \{n_{ij\text{обн}}\}, i = \overline{1, N_{\text{тип}}}, j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{тип}}$ — количество типов объектов, имеющих в конфигурации ГЦДО; $N_{\text{тип}} = 3$.

2. Расчет частоты обнаружения объекта ГЦДО по типу цели:

$$\mathbf{P}_{\text{обн}} = \{p_{ij \text{ обн}}\}, p_{ij \text{ обн}} = \frac{n_{ij \text{ обн}}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{тип}}} n_{ij \text{ обн}}}, j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}. \quad (2)$$

3. Вычитание из частоты обнаружения главного объекта частоты определения ложных объектов ГЦДО:

$$\mathbf{P}_{\text{обн}} = \{p_{j \text{ обн}}\}, p_{j \text{ обн}} = p_{1j \text{ обн}} - p_{3j \text{ обн}}, j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}. \quad (3)$$

При отрицательных $p_{j \text{ обн}}$ принимается $p_{j \text{ обн}} = 0$.

4. Нахождение максимального элемента вектора $\mathbf{P}_{\text{обн}}$ и его номера:

$$p_{\text{max}} = \max(\mathbf{P}_{\text{обн}}); n_{\text{max}} = \arg(\max(\mathbf{P}_{\text{обн}})). \quad (4)$$

В исследовании формируется порог для p_{max} : значение $P_{\text{обн тип 1}}$. При $p_{\text{max}} > P_{\text{обн тип 1}}$ объект ГЦДО считается идентифицированным как главный. Если же $p_{\text{max}} < P_{\text{обн тип 1}}$, то принимается решение, что главный объект ГЦДО не идентифицирован.

5. Производится модификация матрицы частотного обнаружения объектов ГЦДО по типу цели $\mathbf{P}_{\text{обн}}$ следующим образом:

$$\mathbf{P}'_{\text{обн}} = \{p'_{ij \text{ обн}}\}, p'_{1j \text{ обн}} = \begin{cases} 1, & j = n_{\text{max}}; \\ 0, & j \neq n_{\text{max}}; \end{cases} p'_{3j \text{ обн}} = \begin{cases} 0, & j = n_{\text{max}}; \\ p_{1j \text{ обн}} + p_{3j \text{ обн}}, & j \neq n_{\text{max}}. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, если главный объект ГЦДО с номером n_{max} выделен, то для него элемент матрицы $\mathbf{P}'_{\text{обн}}$ для типа 1 принимается равным 1, а остальные типы приравниваются нулю, а для всех остальных объектов ГЦДО, для которых имеют место ненулевые частоты идентификации, элементы матрицы $\mathbf{P}'_{\text{обн}}$ для типа 3 дополняются элементами для типа 1 (так как частотные элементы по типу 1 ошибочны и должны быть отнесены к типу 3), т. е. предполагаемый главный объект признается ложным.

Если в составе ГЦДО имеются несколько главных объектов, то в этом случае необходимо повторить процедуру нахождения в векторе $\mathbf{P}_{\text{обн}}$ следующего максимального элемента, но уже с большей величиной ограничения $P'_{\text{обн тип 1}} > P_{\text{обн тип 1}}$: если есть два объекта с $p_{\text{max}} > P'_{\text{обн тип 1}}$, то они оба принимаются для ГУО как главные объекты ГЦДО. В этом случае вполне возможен вариант, когда ложный объект будет идентифицирован как второй главный объект, поэтому для алгоритма идентификации необходимо заранее поставить дополнительное условие возможности наличия второго главного объекта ГЦДО. Распределение УО между главными объектами ГЦДО проводится равнозначно.

6. Присваиваются идентификационные типы объектов ГЦДО путем модификации матрицы обнаружения $\mathbf{A}_{\text{обн}}$:

$$p_{j \text{ max}} = \max_{i=1, N_{\text{тип}}}(\mathbf{P}'_{\text{обн}}), n_{j \text{ max}} = \arg\left(\max_{i=1, N_{\text{тип}}}(\mathbf{P}'_{\text{обн}})\right), j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}; \\ a'_{ij} = n_{j \text{ max}}, i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}} \text{ при } p_{j \text{ max}} > 0,5, \quad (6)$$

где a'_{ij} – элемент модифицированной матрицы обнаружения $\mathbf{A}'_{\text{обн}}$.

Таким образом, для каждого объекта ГЦДО в матрице $\mathbf{P}'_{\text{обн}}$ ищется частота больше 0,5, и для нее соответствующий индекс считается идентифицированным типом, который проставляется по всем объектам ГУО. При наличии равных вероятностей для какого-либо объекта ГЦДО в качестве типа данного объекта принимается более высокий (т. е. в базовом алгоритме для объектов ГЦДО из типов 2 и 3 выбирается тип 2).

7. Формируется вектор $\mathbf{N}_{\text{распред}}$ размерностью $1 \times N_{\text{ГЦДО}}$, (см. табл. 9), элементами которого является количество УО, направленных на каждый объект ГЦДО в зависимости от тактических действий ГУО (в расчетном примере, п. 1.7, принято оптимальное распределение в количестве 62,5 % всех УО на главную цель ГЦДО и 37,5 % – на второстепенные объекты ГЦДО).

Алгоритм целераспределения УО в ГУО по объектам ГЦДО. Целераспределение на основе минимизации суммарного расстояния между объектами систем ГУО и ГЦДО при формировании матрицы назначения производится на основе модифицированного метода максимального элемента [11–13]. Для этого необходимо формирование матрицы эффективности, элементы которой находятся в интервале [0; 1].

Так как используется критерий минимума расстояния, то для корректной работы алгоритма ЦР, максимизирующего эффективность, необходимо не только нормировать матрицу, но и инвертировать ее ненулевые элементы в указанном выше интервале, чтобы свести задачу к методу максимального элемента.

Этапы построения матрицы эффективности:

1. Расчет расстояний между всеми парами объектов ГУО и ГЦДО: матрица $\mathbf{R}$ размерностью $N_{\text{ГУО}} \times N_{\text{ГЦДО}}$;

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}, \quad j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}. \quad (7)$$

2. Обнуление элементов матрицы $\mathbf{R}$, для которых не было обнаружения согласно матрице обнаружения: если $a_{ij \text{ обн}} = 0$, то $r_{ij} = 0$.

3. На основе вектора $\mathbf{N}_{\text{распред}}$ создается матрица $\mathbf{R}_{\text{ЦР}}$ размерностью $N_{\text{ГУО}} \times N_{\text{ГУО}}$; принимается счетчик объектов ГЦДО $j = 0$, если элемент $n_{\text{распред } k} > 0$, $k = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}$, то

$$r_{\text{ЦР } ij} = r_{ik}, \quad j = \overline{1, n_{\text{распред } k}}, \quad i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}},$$

и параметр j увеличивается на 1. Одновременно создается вектор номеров объектов ГЦДО, по которым будет произведено ЦР: $\mathbf{N}_{\text{ЦР}}$ с элементами $n_{\text{ЦР } j} = k$, $j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}$.

4. Нормирование матрицы $\mathbf{R}_{\text{ЦР}}$: формирование матрицы $\bar{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}}$ с элементами

$$\bar{r}_{\text{ЦР } ij} = \frac{r_{\text{ЦР } ij}}{2 \cdot \max_i \max_j \bar{r}_{\text{ЦР } ij}}, \quad i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}, \quad j = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}. \quad (8)$$

В результате значения элементов матрицы будут находиться в интервале $[0; 0,5]$.

5. Приведение матрицы $\bar{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}}$ к требованиям алгоритма ЦР по максимизации критерия:

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}} = \{\tilde{r}_{\text{ЦР } ij}\}; \quad \tilde{r}_{\text{ЦР } ij} = \begin{cases} 1 - \bar{r}_{\text{ЦР } ij}, & \bar{r}_{\text{ЦР } ij} > 0, \\ 0, & \bar{r}_{\text{ЦР } ij} = 0, \end{cases} \quad i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}, \quad j = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}. \quad (9)$$

6. При формировании матрицы эффективности для одного критерия (минимизация по дальности, с матрицей эффективности $\tilde{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}}$) может возникать ситуация перекрестного движения объектов ГУО [3, 6, 10, 13, 14]. Для уменьшения вероятности возникновения подобных траекторий вводится второй критерий: минимизация суммарной угловой дальности, которая представляет собой модуль разницы координат по ординате (параметр y). Матрица $\mathbf{H}$ значений данного критерия при этом формируется следующим образом:

$$\mathbf{H} = \{h_{ij}\}, \quad h_{ij} = |y_i - y_j|, \quad i = \overline{1, N_{\text{ГУО}}}, \quad j = \overline{1, N_{\text{ГЦДО}}}. \quad (10)$$

Аналогично алгоритму для матрицы $\mathbf{R}$, для матрицы $\mathbf{H}$ проводится обнуление соответствующих элементов согласно матрице обнаружения $\mathbf{A}_{\text{обн}}$, нормирование и приведение ее к варианту максимизации, с формированием итоговой $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{ЦР}}$.

В этом случае, при наличии двух критериев, матрица эффективности формируется как свертка двух критериев (которые уже были нормированы заранее) с весовым коэффициентом их значимости $\alpha \in [0; 1]$:

$$\mathbf{E}_{\text{ЦР}} = \alpha \cdot \tilde{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}} + (1 - \alpha) \cdot \tilde{\mathbf{H}}_{\text{ЦР}}. \quad (11)$$

Введение дополнительного ограничения как на тактику действий ГУО при формировании вектора $\mathbf{N}_{\text{распред}}$, так и на коэффициент α позволяет обеспечить практически полное отсутствие пересечений траекторий УО при осуществлении ЦР.

7. При анализе различных методов решения задачи ЦР, формируемой рассматриваемым алгоритмом обнаружения и идентификации, установлено, что ЦР наиболее эффективно реализуется именно методом максимального элемента [5, 10, 13]. Задача ЦР на основе полученной матрицы $\mathbf{E}_{\text{ЦР}}$ сводится к задаче назначения с бинарными элементами: если назначение объекта ГУО с номером i произошло на объект $n_{\text{ЦР } j}$, то $z_{ij} = 1$, в противном случае $z_{ij} = 0$. Результат решения задачи ЦР – матрица $\mathbf{Z}_{\text{ЦР}}$ аналогичной размерности с бинарными элементами [1, 9, 12].

Пример многоэтапного расчета для одного варианта из статистического ряда экспериментов. Рассмотрим работу алгоритма на примере случайной конфигурации объектов ГУО и ГЦДО, параметры которой следующие (табл. 1):

- количество УО в ГУО: $N_{\text{ГУО}} = 8$; имеет место случайная конфигурация на расстоянии 70–75 км от центра ГЦДО, распределенная по фронту в 20 км; координаты объектов приведены в табл. 1;
- вероятности обнаружения: $P_1 = 0,8$; $P_2 = 0,75$; $P_3 = 0,25$.

Таблица 1

Конфигурации систем ГЦДО и ГУО							
Конфигурация объектов ГЦДО							
Тип	1	2	2	2			
X, км	0	-3,0000	4,0000	2,0000			
Y, км	0	-5,0000	-3,0000	6,0000			
Конфигурация ЛО ГЦДО							
Тип	3	3	3	3			
X, км	-1,6805	-4,5912	5,9181	3,8680			
Y, км	-1,4807	-3,8309	-1,4100	7,2556			
Конфигурация ГУО							
X, км	71,3625	72,2258	72,7462	70,5358	73,7262	73,8382	70,4580
Y, км	0,4323	7,5791	-4,3177	4,5380	-7,3121	-6,0974	5,3621
							9,0049

Этап 1. Расчет вектора распределения объектов ГУО по ГЦДО.

1.1. Конфигурация объектов ГЦДО, упорядоченных слева–направо, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Упорядоченная конфигурация ГЦДО								
Номер	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип	2	3	2	3	3	1	2	3
X, км	-3,0000	-4,5912	4,0000	-1,6805	5,9181	0	2,0000	3,8680
Y, км	-5,0000	-3,8309	-3,0000	-1,4807	-1,4100	0	6,0000	7,2556

1.2. Для каждого УО реализуются этапы 1–4 процедуры обнаружения и идентификации (табл. 3), с формированием матрицы идентификации $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ размерностью $N_{\text{ГУО}} \times N_{\text{ГЦДО}}$, состоящей из значений $\{0; 1; 2; 3\}$ согласно указанным выше типам.

Матрица обнаружения объектов ГЦДО $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ приведена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица обнаружения объектов ГЦДО ($\mathbf{A}_{\text{обн}}$)								
Объекты ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	2	3	2	3	3	0	2	3
№ 2	2	3	0	3	3	0	2	3
№ 3	0	2	2	3	1	1	2	3
№ 4	2	1	2	2	3	1	2	0
№ 5	2	2	2	0	2	1	2	0
№ 6	0	3	0	0	3	2	2	3
№ 7	2	1	2	0	2	0	2	0
№ 8	2	2	2	3	1	2	2	3

1.3. Вычисляется количество результатов определения того или иного типа объекта ГЦДО – параметр $\mathbf{N}_{\text{обн}}$ размерностью $3 \times N_{\text{ГЦДО}}$ (табл. 4), а также общее количество обнаружений каждого объекта ГЦДО – вектор $\mathbf{N}_{\text{обн sum}}$.

Таблица 4

Матрица количества обнаружения объектов ГЦДО по типам ($N_{обн}$, формула (2))

Количество обнаружений со стороны ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип 1	0	2	0	0	2	3	0	0
Тип 2	6	3	6	1	2	2	8	0
Тип 3	0	3	0	4	4	0	0	5
Всего ($N_{обн\ sum}$)	6	8	6	5	8	5	8	5

На основе табл. 4 вычисляется частота обнаружения – параметр $P_{обн}$ (табл. 5).

Таблица 5

Частота обнаружения объектов ГЦДО по типам ($P_{обн}$, формула (2))

Частота обнаружения со стороны ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип 1	0	0,25	0	0	0,25	0,6	0	0
Тип 2	1	0,375	1	0,2	0,25	0,4	1	0
Тип 3	0	0,375	0	0,8	0,5	0	0	1

1.4. Определяется главный объект ГЦДО:

- формируется разность 1-й и 3-й строк (табл. 6, строка 1);
- обнуляются отрицательные элементы (табл. 6, строка 2);
- определяется номер главного объекта ГЦДО как максимум в полученной строке (выделенный элемент в табл. 6).

Главный объект ГЦДО – один (один положительный элемент вектора), поэтому ветвь алгоритма для варианта двух главных объектов не активируется.

Таблица 6

Идентификация объекта ГЦДО типа 1 (формулы (3), (4))

Надежность	Объект ГЦДО типа 1							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Значение	0	-0,125	0	-0,8	-0,25	0,6	0	-1
Значение после обнуления	0	0	0	0	0	0,6	0	0

1.5. Пересчитывается матрица $P_{обн}$ в матрицу $P'_{обн}$ по формуле (5) как сумма строк 1 и 3, кроме главной цели (табл. 7).

Таблица 7

Модифицированная частота обнаружения и идентификации объектов ГЦДО по типам

($P'_{обн}$, формула (5))

Вероятность обнаружения со стороны ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип 1	0	0	0	0	0	1	0	0
Тип 2	1	0,375	1	0,2	0,25	0	1	0
Тип 3	0	0,625	0	0,8	0,75	0	0	1

1.6. Пересчитывается матрица обнаружения по всем $j = \overline{1, N_{ГЦДО}}$ (табл. 8): если $p'_{ij\ обн} > 0,5$, то для данного объекта ГЦДО с номером j в матрице меняются все значения столбца j на значение i , (т. е. для тех УО, которые либо не обнаружили объект ГЦДО, либо ошиблись в идентификации его типа, присваивается тип объекта, который был идентифицирован алгоритмом при помощи остальных УО) а затем вычисляется среднее значение по идентифицированным типам ГЦДО (табл. 8, последняя строка). Если это среднее – целое число, то тип объекта ГЦДО определен однозначно, если нет – то оно заменяется отбрасыванием дробной части.

Таблица 8

Модифицированная матрица обнаружения и идентификации объектов ГЦДО

Объекты ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 2	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 3	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 4	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 5	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 6	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 7	2	3	2	3	3	1	2	3
№ 8	2	3	2	3	3	1	2	3
Среднее	2	3	2	3	3	1	2	3

1.7. На основе ранжирования по важности объектов ГЦДО формируется оптимальное распределение, исходя из выделения доли УО ГУО в количестве 62,5 % на главный объект и 37,5 % – на второстепенные. Вектор идентификации типов объектов ГЦДО (как видно, совпадающий с исходным вектором типов) представлен в первой строке табл. 9, а оптимальное распределение объектов ГУО – во второй (вектор $N_{\text{распред}}$).

Таблица 9

Идентификация типов объектов ГЦДО и оптимальное распределение объектов ГУО по объектам ГЦДО

Объекты ГЦДО	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип объекта	2	3	2	3	3	1	2	3
Количество УО (вектор $N_{\text{распред}}$)	1	0	1	0	0	5	1	0

Если требуется направить все объекты ГУО на главный объект ГЦДО, то это можно сделать сразу после этапа 1.4в. Для равномерного распределения ГУО на второстепенные объекты ГЦДО необходимо исключить главный объект (в приведенном выше примере расчета: 6-й элемент перевести из значения «1» в «3» для типа объекта). Следует отметить, что может быть реализована коррекция тактики действий ГУО таким образом, чтобы на каждый идентифицированный объект ГЦДО в обязательном порядке направлялся минимум один объект ГУО (это же можно сделать и путем изменения тактики).

Этап 2. Расчет матрицы ЦР для УО ГУО. На данном этапе проводится выбор УО на основе реальных конфигураций систем (по дальности и ракурсу).

2.1. Вычисляется матрица расстояний R между объектами систем (формула (7)).

2.2. Модифицированная матрица расстояний R относительно матрицы $A_{\text{обн}}$ формируется путем обнуления тех элементов r_{ij} , для которых $a_{ij \text{ обн}} = 0$.

2.3. Формируется расширенная матрица расстояний для ЦР по вектору распределения объекта путем дублирования соответствующих строк матрицы R . Далее формируется нормированная и инвертированная матрица расстояний ($\tilde{R}_{\text{ЦР}}$): чем меньше расстояние, тем больше будет значение нормированной эффективности по данному критерию.

2.4. Вычисляется модифицированная матрица угловых расстояний между объектами систем относительно матрицы $A_{\text{обн}}$ (формула (10)). Далее формируется расширенная матрица угловых расстояний для ЦР по вектору $N_{\text{распред}}$ путем дублирования соответствующих строк матрицы H , а также нормированная и инвертированная матрица для ЦР ($\tilde{H}_{\text{ЦР}}$).

2.5. Сформированная матрица эффективности на основе свертки двух критериев для алгоритма ЦР ($E_{\text{ЦР}}$) дана в табл. 10 (формула (11)).

Матрица эффективности ($E_{ЦР}$) для ЦР

Объекты ГУО	Номера «обслуживаемых» объектов ГЦДО							
	1	3	6	6	6	6	6	7
№ 1	0,6539	0,7115	0,7518	0,7518	0,7518	0,7518	0,7518	0,6859
№ 2	0,5027	0,5607	0,6022	0,6022	0,6022	0,6022	0,6022	0,7153
№ 3	0,7306	0,7175	0,6515	0,6515	0,6515	0,6515	0,6515	0,5499
№ 4	0,7120	0,6988	0,6327	0,6327	0,6327	0,6327	0,6327	0,5309
№ 5	0,7018	0,7593	0,7502	0,7502	0,7502	0,7502	0,7502	0,6502
№ 6	0,7337	0,7620	0,6965	0,6965	0,6965	0,6965	0,6965	0,5959
№ 7	0,6480	0,7058	0,7461	0,7461	0,7461	0,7461	0,7461	0,7047
№ 8	0,5196	0,5776	0,6188	0,6188	0,6188	0,6188	0,6188	0,7316

При равной значимости критериев ($\alpha = 0,5$) вариант ЦР будет выглядеть следующим образом (рис. 1); $E_{ЦР} = 0,5 \cdot \tilde{R}_{ЦР} + 0,5 \cdot \tilde{H}_{ЦР}$.

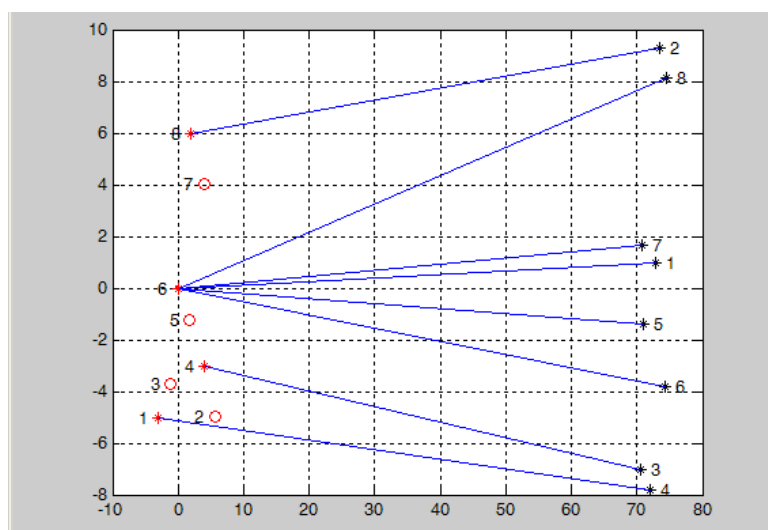


Рис. 1. Конфигурация систем ГУО (справа) и ГЦДО (слева), а также оптимальное ЦР УО ГУО для варианта матрицы эффективности на основе свертки двух критериев

Таким образом, на объект ГЦДО № 1 будет направлен УО № 7, на объект ГЦДО № 3 будет направлен УО № 1, на объект ГЦДО № 7 будет направлен УО № 2, а на главный объект ГЦДО № 6 будут направлены 5 УО с номерами №№ 3, 4, 5, 6, 8. В исходной матрице обнаружения, продублированной по табл. 3, полученное назначение дополнительно выделено (табл. 11).

Таблица 11

Матрица обнаружения объектов ГЦДО $A_{обн}$ с указанием оптимального ЦР

Объекты ГУО	Объекты ГЦДО							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	2	3	2	3	3	0	2	3
№ 2	2	3	0	3	3	0	2	3
№ 3	0	2	2	3	1	1	2	3
№ 4	2	1	2	2	3	1	2	0
№ 5	2	2	2	0	2	1	2	0
№ 6	0	3	0	0	3	2	2	3
№ 7	2	1	2	0	2	0	2	0
№ 8	2	2	2	3	1	2	2	3
Количество УО	1	0	1	0	0	5	1	0

В результате количество назначенных УО в ГУО на объекты ГЦДО полностью соответствует полученному на этапе 1 распределению. Как видно, за счет возможного ухудшения по суммарной дальности получен более выгодный результат с точки зрения перекрестного движения УО ГУО при ЦР по объектам ГЦДО. Таким же образом при необходимости могут быть добавлены и другие дополнительные критерии эффективности.

Многофакторный анализ эффективности работы алгоритма. Проведенное моделирование различных конфигураций систем показало высокую эффективность идентификации объектов ГЦДО. Ниже приведены отдельные статистические эксперименты.

Организация экспериментов многофакторного анализа: задается достаточно большое количество экспериментов для моделирования матрицы обнаружения и идентификации, просчитывается алгоритм при случайных конфигурационных данных с формированием вектора распределения УО $N_{\text{распред}}$, который сравнивается с оптимальным распределением, и проводится соответствие идентификации главного объекта ГЦДО, после чего определяется процент верной идентификации среди всех экспериментов, а также процент полного соответствия распределения УО оптимальному. Данная процедура расчета повторяется при варьировании одного из начальных параметров алгоритма.

1. Фиксированные вероятности: $P_3 = 0,25$; P_1, P_2 – варьируются. Результаты эксперимента даны в табл. 12 и 13, которые показывают, что даже при вероятностях обнаружения около 0,5 главный объект ГЦДО при 8 УО в ГУО выявляется практически однозначно, при весьма незначительных погрешностях при определении второстепенных объектов ГЦДО.

Таблица 12

Процент верной идентификации главного объекта ГЦДО

P_1	P_2										
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
0,40	68,60	97,30	98,02	98,70	99,50	99,70	99,95	99,93	100	100	100
0,45	73,20	96,02	97,48	99,22	99,33	99,63	99,88	100	100	100	100
0,50	77,03	97,20	97,78	98,85	99,28	99,87	99,80	99,95	99,98	100	100
0,55	79,37	97,23	97,48	99,12	99,45	99,73	99,88	99,90	100	100	100
0,60	82,60	96,03	97,47	98,87	99,43	99,73	99,90	99,95	99,98	100	99,98
0,65	85,23	95,88	98,28	98,98	99,32	99,80	99,80	99,93	99,98	100	100
0,70	87,08	96,35	98,32	98,85	99,25	99,73	99,92	99,92	99,98	100	100
0,75	88,37	96,25	97,57	98,80	99,37	99,78	99,90	99,95	100	100	100
0,80	89,87	96,00	98,18	98,78	99,62	99,68	99,87	99,92	99,98	99,98	100
0,85	91,27	97,07	97,50	99,08	99,43	99,65	99,88	99,97	100	100	100
0,90	92,72	97,50	97,90	98,72	99,55	99,63	99,93	99,93	99,98	100	100

Таблица 13

Процент ошибок относительно оптимального распределения количества УО
в соответствии с табл. 9

P_1	P_2										
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
0,40	41,70	15,10	15,70	10,50	8,20	8,10	8,80	6,80	5,40	4,90	5,60
0,45	38,80	18,50	13,70	12,00	8,80	8,50	8,60	7,50	5,30	5,20	4,60
0,50	34,70	20,30	13,80	13,00	8,70	8,30	7,90	6,90	6,90	4,60	4,50
0,55	34,40	18,70	12,90	12,50	10,80	7,30	8,10	6,60	6,80	4,50	5,50
0,60	32,50	19,20	13,70	10,40	10,50	9,00	7,20	5,00	7,00	5,70	4,00
0,65	29,60	17,40	13,90	12,30	8,90	10,40	8,00	5,90	6,20	4,30	4,10
0,70	27,10	17,70	12,80	12,30	9,70	9,00	7,70	6,50	5,20	6,20	5,60
0,75	25,90	18,40	14,40	13,70	8,10	7,80	6,10	7,50	5,80	3,70	3,60
0,80	23,20	21,00	11,10	11,90	8,70	10,20	6,60	6,70	5,10	5,50	3,90
0,85	25,00	17,50	15,50	13,30	9,40	7,70	7,00	7,30	6,30	5,30	3,20
0,90	24,30	19,60	16,90	10,10	9,80	10,20	7,50	8,10	6,60	5,00	5,50

2. Варьируется количество объектов УО в ГУО при базовой конфигурации систем. Результаты эксперимента даны в табл. 14.

Таблица 14

Результаты эксперимента

Количество УО в ГУО	Процент верной идентификации главного объекта	Процент ошибок относительно оптимального распределения
16	100	0,2
12	99,93	1,7
8	99,58	6,1
6	98,43	11,9
4	92,77	14,6
3	83,81	40,8
2	66,00	42,1

При уменьшении вероятностей обнаружения $P_1 = P_2 = 0,4$; $P_3 = 0,55$ результаты эксперимента имеют вид, приведенный в табл. 15.

Таблица 15

Результаты эксперимента

Количество УО в ГУО	Процент верной идентификации главного объекта	Процент ошибок относительно оптимального распределения
24	84,50	33,8
12	61,82	62,9
8	48,43	77,6
6	37,28	82,0
3	21,41	89,1
2	17,52	84,2

Показано, что при уменьшении количества УО в ГУО резко увеличивается отклонение от оптимального распределения. Процент верной идентификации также снижается. Следовательно, организация сетецентрического управления в ГУО повышает процент идентификации главного объекта ГЦДО до 98 % уже при 6 УО (при отсутствии сетецентрического управления данный показатель предполагается на уровне меньше 50 %).

Заключение. Таким образом, разработанный алгоритм обнаружения и идентификации объектов (ГЦДО) со стороны ГУО при наличии сетецентрического управления и обмена информацией между УО в ГУО показал высокую эффективность как идентификации главного объекта ГЦДО, так и выявления ложных объектов ГЦДО. При этом выявлены вероятности идентификации типов объектов ГЦДО со стороны УО, позволяющие обеспечить практически 100%-е определение главного объекта, с последующим ЦР объектов ГУО при условии отсутствия перекрещивания траекторий УО согласно текущим конфигурациям систем. Результаты алгоритма напрямую используются в процедуре ЦР с выбором конкретных УО по идентифицированным объектам ГЦДО.

Список литературы:

1. Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных компромиссов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, 576 с.
2. Воронов Е.М., Латыпова П.А., Репкин А.Л., Сычёв С.И., Хамаев Н.В. Формирование оптимального управления ресурсами групп объектов в задаче конфликтного противодействия авиационно-ракетной группировки и системы ПВО. Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2016). IX Мультиконференция по проблемам управления, 2016, с. 453–463.
3. Неупокоев Ф.К. Противовоздушный конфликт. М., Воениздат, 1989, 262 с.
4. Методологические основы создания систем и комплексов авиационного ракетного вооружения / Ю.П. Балыко, Г.И. Горчица, О.В. Ермолин и др.; под ред. Ю.П. Балыко. М., «Дашков и Ко», 2012, 686 с.
5. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М., Физматлит, 2006, 216 с.

6. Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М., Радио и связь, 2004, 552 с.

7. Боев С.Ф. Сетецентрические системы регионального уровня реального масштаба времени. Мехатроника, автоматика, управление, 2009, № 3, с. 145–148.

8. Воронов Е.М., Куся А.М., Репкин А.Л., Сычёв С.И., Тимофеев Д.А., Хамаев Н.В. Комплексный алгоритм обнаружения, идентификации соединения надводных кораблей и целераспределения группы управляемых средств поражения с сетецентрическим управлением. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение», 2020, № 4, с. 75–98.

9. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы: в 2-х т. Т. 2 / [Б.В. Обносов, Е.М. Воронов и др.]; под ред. Е.М. Воронова, Е.А. Микрина, Б.В. Обносова. М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 520 с.

10. Ефремов В.А., Сычёв С.И., Хамаев Н.В., Фомичёв А.А., Ботнев В.Н. Групповое построение управляемых средств поражения при залповом применении. Информационно-аналитический журнал «Радиоэлектронные технологии», 2018, № 3, с. 66–69.

11. Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. М., Радио и связь, 1993, 314 с.

12. Семёнов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М., Эдиториал УРСС, Ленанд, 2016, 520 с.

13. Воронов Е.М., Ефремов В.А., Сычёв С.И., Ботнев В.Н., Хамаев Н.В. Метод повышения живучести группировки управляемых средств поражения с помощью интегрированного ранжирования и целераспределения систем РЭБ. Морская радиоэлектроника, 2015, № 2, с. 30–34.

14. Воронов Е.М., Ефремов В.А., Репкин А.Л., Сычёв С.И. Функциональные свойства конфликтно-оптимального прогноза в системе оптимизационно-имитационного моделирования взаимодействия группировок управляемых средств поражения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение», 2013, № 3, с. 3–27.