

КОМПЛЕКСНЫЙ АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ СОЕДИНЕНИЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ И ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУППЫ УПРАВЛЯЕМЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ С СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

Е.М. Воронов¹

voronov@bmstu.ru

А.М. Кусля^{1,2}

alexander_kuslya@mail.ru

А.Л. Репкин¹

alexr_bmstu@mail.ru

С.И. Сычёв²

sychovsi@gmail.com

Н.В. Хамаев²

stradiot@mail.ru

Д.А. Тимофеев¹

tim.disa001@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»,

г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена и решена задача обнаружения и идентификации объектов соединения надводных кораблей по координатам и типу таких объектов группой управляемых средств поражения в составе группировки. На основе параметров частоты обнаружения объектов группой управляемых средств поражения и надежности идентификации объектов соединения надводных кораблей определена главная цель соединения надводных кораблей. Сформирована и проанализирована матрица обнаружения объектов соединения надводных кораблей группой управляемых средств поражения. Введение ограничений на тактику действий группы управляемых средств поражения и на коэффициент свертки критериев в задаче целераспределения позволяет обеспечить практически полное отсутствие пересечений траекторий управляемых средств поражения. На основе статистического моделирования конфигурации систем и соответствующих вероятностей обнаружения и идентификации показана эффективность разработанного алгоритма. Приведен пример многоэтапного расчета одного варианта из статистического ряда экспериментов с последующей предварительной оценкой целераспределения группой управляемых средств поражения согласно текущим configura-

Ключевые слова

Группировка, группа управляемых средств поражения, соединение надводных кораблей, сетецентрическое управление, обнаружение, идентификация, целераспределение, многофакторный анализ эффективности

циям группы средств поражения и соединения надводных кораблей. Проведенный многофакторный анализ эффективности работы алгоритма на различных конфигурациях систем показал высокую степень идентификации объектов соединения надводных кораблей по сравнению с существующими алгоритмами. Выявлен диапазон значений по вероятностям идентификации типов объектов соединения надводных кораблей группой управляемых средств поражения, на котором обеспечено практически однозначное определение главной цели соединения надводных кораблей

Поступила 27.07.2020

Принята 17.09.2020

© Автор(ы), 2020

Постановка задачи и конфигурация систем. Рассмотрим задачу обнаружения и идентификации объектов соединения надводных кораблей (СНК) группой управляемых средств поражения (ГрУСП) в составе группировки УСП (ГУСП) [1–12]. В модели СНК представлены три типа объектов: тип 1 — главная цель; тип 2 — второстепенная цель; тип 3 — ложная цель (ЛЦ). При необходимости учета других типов объектов-целей они автоматически должны быть причислены к одному из указанных типов: например, если в приоритете для ГУСП находятся еще и транспортные корабли, то они при обнаружении должны быть причислены к типу 1, а если не в приоритете, то к типу 3; для боевых надводных кораблей (НК) должны быть назначены типы 2 (для кораблей, по которым будет вестись воздействие) либо 3 и в этом случае они будут проигнорированы при целераспределении (ЦР) УСП в составе ГрУСП.

Процедура обнаружения и идентификации объектов СНК рассматривается в следующей последовательности.

Этап 1. Выполняется процедура обнаружения объекта СНК с результатом обнаружен/не обнаружен и его принадлежностью к типу 2; пусть вероятность данного события $P_2 = 0,75$.

Этап 2. Среди обнаруженных объектов СНК могут быть ЛЦ; пусть вероятность, что ЛЦ (тип 3) будет выявлена среди всех обнаруженных на этапе 1 объектов СНК, равна $P_3 = 0,75$; следовательно, ЛЦ может быть идентифицирована как реальный НК с вероятностью $P_3' = 1 - P_3 = 0,25$.

Этап 3. По всем обнаруженным объектам СНК проводится определение главной цели (тип 1); пусть базовая вероятность идентификации для данного типа НК задается как $P_1 = 0,8$.

Этап 4. Среди множества ЛЦ, которые на самом деле являются ложными, но видимы со стороны объектов ГрУСП как реальные объекты

СНК (вероятность данного события $P_3' = 0,25$), выполняется равновероятное разделение на типы 1 и 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 ЛЦ имеет место следующее условие результата идентификации:

- при $P \in [0, P_3'')$ ЛЦ считается реальным объектом типа 1 системы ПВО;
- при $P \in [P_3'', P_3')$ ЛЦ считается реальным объектом типа 2 системы ПВО;
- при $P \in [P_3', 1]$ ЛЦ считается обнаруженной (тип 3).

Формирование конфигурации систем. Для объектов ГрУСП задаются следующие параметры:

- число объектов в ГрУСП $N_{\text{ГрУСП}}$;
- диапазоны генерации координат объектов по дальности и фронту, по которым выполняется генерация координат объектов ГрУСП.

Для объектов СНК задаются следующие параметры:

- число реальных объектов СНК $N_{\text{СНК}} = 4$ (заданная базовая конфигурация: один объект — тип 1, три объекта — тип 2); центр СНК — объект типа 1, расположенный в начале координат;
- число ЛЦ $N_{\text{ЛЦ}} = 4$; ЛЦ генерируются случайным образом на расстоянии 1...2 км от реального объекта СНК;
- координаты уточненного нахождения центра СНК.

Далее все объекты СНК, включая ЛЦ, сводятся в единый вектор координат размерностью $N_{\text{СНК}} = N_{\text{СНК}} + N_{\text{ЛЦ}} = 8$, их упорядочение слева направо выполняется так, как при сканировании пространства будет их «видеть» головка самонаведения (ГСН) УСП.

В данном случае алгоритм принадлежности координат каждому обнаруженному объекту СНК при получении данных от всех объектов ГрУСП не рассматривается: подразумевается, что упорядочение проводится сразу при идентификации всей ГрУСП по полученным координатам целей.

Формирование матрицы обнаружения. Для каждого УСП ГрУСП реализуются этапы процедуры обнаружения с формированием матрицы

обнаружения объектов СНК $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ размером $N_{\text{ГРУСП}} \times N_{\text{СНК}}$, состоящей из дискретного множества значений $\{0; 1; 2; 3\}$, согласно указанным типам. Вероятности обнаружения типов НК приведены ранее (см. четыре этапа обнаружения–идентификации). Пример матрицы $\mathbf{A}_{\text{обн}}$ для одного статистического эксперимента базового варианта приведен далее.

Расчет надежности идентификации главной цели СНК. Для формирования параметра надежности идентификации главной цели СНК необходимо выполнить следующие действия.

1. Рассчитать число результатов обнаружения объекта СНК по каждому типу цели среди всех УСП ГРУСП и получить матрицу

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

где $N_{\text{тип}}$ — число типов объектов, имеющих в конфигурации СНК, $N_{\text{тип}} = 3$.

2. Выполнить расчет частоты обнаружения объекта СНК по типу цели:

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

3. Вычесть частоту определения ЛЦ из частоты обнаружения главной цели:

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

при отрицательных значениях $p_{j \text{ обн}}$ принимается равной нулю.

4. Определить максимальный элемент вектора $\mathbf{p}_{\text{обн}}$ и его номер:

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

в исследовании формируется порог для p_{max} — это значение $P_{\text{обн тип 1}}$. При $p_{\text{max}} > P_{\text{обн тип 1}}$ объект СНК считается идентифицированным как главная цель; если $p_{\text{max}} < P_{\text{обн тип 1}}$, то принимается решение, что главная цель не идентифицирована, поскольку слишком много помех, связанных с наличием ЛЦ СНК.

5. Модифицировать матрицу частотного обнаружения объектов СНК по типу цели $\mathbf{P}_{\text{обн}}$ следующим образом:

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

$$p'_{3j \text{ обн}} = \begin{cases} 0, & j = n_{\text{max}}; \\ p_{1j \text{ обн}} + p_{3j \text{ обн}}, & j \neq n_{\text{max}}. \end{cases}$$

Таким образом, если главная цель с номером n_{\max} выделена, то ее элемент матрицы $\mathbf{P}'_{\text{обн}}$ для типа 1 принимается равным единице, остальные типы приравниваются нулю. Для всех остальных объектов СНК, 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. предполагаемая главная цель признается ложной.

Если вдруг в составе СНК имеются несколько главных целей, то в этом случае необходимо повторить процедуру определения в векторе $\mathbf{p}_{\text{обн}}$ следующего максимального элемента, но уже с большими ограничениями $P'_{\text{обн тип 1}} > P_{\text{обн тип 1}}$ — если есть два объекта с $p_{\max} > P'_{\text{обн тип 1}}$, то они оба принимаются как главные цели для ГрУСП. В этом случае вполне возможен вариант, когда ЛЦ будет идентифицирована как вторая главная цель, поэтому для алгоритма идентификации необходимо заранее поставить дополнительное условие возможности наличия второй главной цели СНК. Распределение УСП между главными целями проводится равнозначно.

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

$$p_{j \max} = \max_{i=1, N_{\text{тип}}} (\mathbf{P}'_{\text{обн}}), \quad n_{j \max} = \arg \left(\max_{i=1, N_{\text{тип}}} (\mathbf{P}'_{\text{обн}}) \right), \quad j = \overline{1, N_{\text{СНК}}}; \quad (6)$$

$$a'_{ij} = n_{j \max}, \quad i = \overline{1, N_{\text{ГрУСП}}} \quad \text{при} \quad p_{j \max} > 0,5,$$

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

Таким образом, для каждого объекта СНК в матрице $\mathbf{P}'_{\text{обн}}$ ищем частоту больше 0,5, соответствующий ей индекс считается идентифицированным типом, который проставляется по всем объектам ГрУСП. При наличии равных вероятностей для какого-либо объекта СНК в качестве типа данной цели принимаем более высокий (т. е. в базовом алгоритме для НК из типов 2 и 3 выбираем тип 2).

7. Сформировать вектор $\mathbf{N}_{\text{распред}}$ размерностью $1 \times N_{\text{СНК}}$, элементы которого — это число УСП, направленных на каждый объект СНК в зависимости от тактических действий ГрУСП (см. раздел «Пример многоэтапного расчета...», п. 1.7).

Алгоритм ЦР УСП ГрУСП по объектам СНК. Целераспределение на основе минимизации суммарного расстояния между объектами систем при формировании матрицы назначения проводится на основе модифицированного метода максимального элемента [13–15]. Для этого

необходимо сформировать матрицу эффективности, элементы которой находятся в интервале $[0; 1]$. Поскольку 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 ранее интервале, чтобы свести задачу к методу максимального элемента.

Этапы построения матрицы эффективности.

1. Расчет расстояний между всеми парами объектов ГрУСП и СНК: матрица \mathbf{R} размером $N_{\text{ГрУСП}} \times N_{\text{СНК}}$,

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

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 $\mathbf{R}_{\text{ЦР}}$ размером $N_{\text{ГрУСП}} \times N_{\text{ГрУСП}}$; счетчик объектов СНК $j = 0$, если элемент $n_{\text{распред } k} > 0$, $k = \overline{1, N_{\text{СНК}}}$, то

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

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

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

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

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:

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

$$i = \overline{1, N_{\text{ГрУСП}}}, \quad j = \overline{1, N_{\text{ГрУСП}}}.$$

6. При формировании матрицы эффективности для одного критерия (минимизация по дальности, с матрицей эффективности $\tilde{\mathbf{R}}_{\text{ЦР}}$) может

возникнуть ситуация перекрестного движения объектов ГрУСП [3, 6, 8, 15, 16]. Для уменьшения вероятности возникновения подобных траекторий вводится второй критерий: минимизация суммарной угловой дальности, которая представляет собой модуль разности координат по ординате (параметр y). Матрица \mathbf{H} значений данного критерия при этом формируется следующим образом:

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

Аналогично алгоритму для матрицы \mathbf{R} обнуляются соответствующие элементы матрицы \mathbf{H} . Согласно матрице обнаружения $\mathbf{A}_{\text{обн}}$, выполняется нормирование и приведение ее к варианту максимизации, с формированием итоговой матрицы $\tilde{\mathbf{H}}_{\text{ЦР}}$.

В этом случае при наличии двух критериев матрица эффективности формируется как свертка двух критериев (которые были нормированы ранее) 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 ГрУСП при формировании вектора $\mathbf{N}_{\text{распред}}$, так и на коэффициент α позволяет обеспечить практически полное отсутствие пересечений траекторий УСП 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 [7, 10, 15]. Задача ЦР на основе полученной матрицы $\mathbf{E}_{\text{ЦР}}$ сводится к задаче назначения с бинарными элементами: если назначение объекта ГрУСП 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, 11, 14].

Пример многоэтапного расчета для одного варианта из статистического ряда экспериментов. Рассмотрим работу алгоритма на примере случайной конфигурации объектов со следующими параметрами (табл. 1):

- число УСП в ГрУСП: $N_{\text{ГрУСП}} = 8$; имеет место случайная конфигурация на расстоянии 70...75 км от центра системы ПВО, распределенная по фронту в 20 км; координаты объектов приведены в табл. 1 (система координат XU — плоскость моря);
- вероятности обнаружения следующие: $P_1 = 0,8$; $P_2 = 0,75$; $P_3 = 0,25$.

Таблица 1

Конфигурации систем

Конфигурация объектов СНК								
Тип	1	2	2	2				
X, км	0	-3	4	2				
Y, км	0	-5	-3	6				
Конфигурация ЛЦ СНК								
Тип	3	3	3	3				
X, км	-1,6805	-4,5912	5,9181	3,868				
Y, км	-1,4807	-3,8309	-1,41	7,2556				
Конфигурация ГУСП								
X, км	71,3625	72,2258	72,7462	70,5358	73,7262	73,8382	70,458	73,8034
Y, км	0,4323	7,5791	-4,3177	4,5380	-7,3121	-6,0974	5,3621	9,0049

Этап 1. Расчет вектора распределения объектов ГрУСП по СНК.

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

Таблица 2

Упорядоченная конфигурация объектов СНК

Объекты СНК	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип	2	3	2	3	3	1	2	3
X, км	-3	-4,5912	4	-1,6805	5,9181	0	2	3,868
Y, км	-5	-3,8309	-3	-1,4807	-1,41	0	6	7,2556

1.2. Для каждого УСП реализуются четыре этапа процедуры обнаружения и идентификации с формированием матрицы идентификации $A_{обн}$ размером $N_{ГрУСП} \times N_{СНК}$, состоящей из значений {0; 1; 2; 3}, согласно указанным ранее типам. Матрица обнаружения объектов СНК $A_{обн}$ приведена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица обнаружения объектов СНК ($A_{обн}$)

Объекты ГрУСП	Объекты СНК							
	№ 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

Окончание табл. 3

Объекты ГРУСП	Объекты СНК							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 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 число результатов определения того или иного типа СНК — вектор $N_{обн}$ размерностью $3 \times N_{СНК}$ (табл. 4), а также общее число обнаружений каждого объекта СНК — вектор $N_{обн\ sum}$.

Таблица 4

Матрица числа обнаружения объектов СНК по типам ($N_{обн}$, формула (1))

Число обнаружений со стороны ГРУСП	Объекты СНК							
	№ 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 данных табл. 4 вычисляется частота обнаружения — параметр $P_{обн}$ (табл. 5).

Таблица 5

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

Частота обнаружения со стороны ГРУСП	Объекты СНК							
	№ 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 главная цель:

- формируется разность первой и третьей строк из табл. 5 (табл. 6, строка 1);

- обнуляются отрицательные элементы (см. табл. 6, строка 2);
- определяется номер главной цели как максимум в полученной строке (выделенный элемент в табл. 6).

Главная цель — одна (один положительный элемент вектора), поэтому ветвь алгоритма для варианта двух главных целей не активируется.

Таблица 6

Идентификация объекта СНК типа 1 (n_{ij} , формулы (3), (4))

Надежность	Объекты СНК 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. Матрица $P_{обн}$ пересчитывается в матрицу $P'_{обн}$ по формуле (5) как сумма первой и третьей строк из табл. 5, кроме главной цели (табл. 7).

Таблица 7

Модифицированная частота обнаружения и идентификации объектов СНК по типам ($P'_{обн}$, формула (5))

Вероятность обнаружения со стороны ГУСП	Объекты СНК							
	№ 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. Пересчет матрицы обнаружения по всем $j = \overline{1, N_{СНК}}$ (табл. 8). Если $p'_{ij\ обн} > 0,5$, то для данного объекта СНК с номером j в матрице меняются все значения столбца j на значение i (т. е. для тех УСП, которые либо не обнаружили объект СНК, либо ошиблись в идентификации его типа, присваивается тип объекта, который был идентифицирован алгоритмом с помощью остальных УСП). Затем вычисляется среднее значение по идентифицированным типам СНК (см. табл. 8, последняя строка). Если это среднее значение — целое число, то тип НК определен однозначно, если нет — то оно заменяется отбрасыванием дробной части.

Таблица 8

Модифицированная матрица обнаружения и идентификации объектов СНК

Объекты ГрУСП	Объекты СНК							
	№ 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 НК формируется оптимальное распределение, исходя из выделения доли УСП ГрУСП — 62,5 и 37,5 % на главную и второстепенные цели. Вектор идентификации типов объектов СНК (совпадающий с исходным вектором типов) представлен в первой строке табл. 9, а оптимальное распределение объектов ГрУСП — во второй строке той же таблицы (вектор $N_{\text{распред}}$).

Таблица 9

Идентификация типов объектов СНК и оптимальное распределение объектов подгруппы ГУСП по объектам СНК

Объекты СНК	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
Тип объекта	2	3	2	3	3	1	2	3
Число УСП (вектор $N_{\text{распред}}$)	1	0	1	0	0	5	1	0

Если требуется направить все объекты ГрУСП на главную цель СНК, то это можно сделать сразу после этапа 4. Для равномерного распределения ГрУСП на второстепенные цели СНК необходимо исключить главную цель (в приведенном примере расчета: элемент № 6 перевести из значения 1 в 3 для типа объекта). Следует отметить, что может быть реализована коррекция тактики действий подгруппы ГУСП таким образом, чтобы на каждый идентифицированный объект СНК в обязатель-

ном порядке направлялся минимум один объект ГрУСП (это же можно сделать и путем изменения тактики).

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

2.1. Вычисляется матрица расстояний **R** между объектами систем (табл. 10) (см. формулу (7)).

Таблица 10

Матрица расстояний между объектами (R)

Объекты ГрУСП	Объекты СНК							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	77,6749	79,1908	70,5683	76,1894	68,5915	74,4862	72,6988	70,9462
№ 2	77,0392	78,5088	69,8778	75,4291	67,8416	73,6733	71,6615	69,8572
№ 3	75,1241	76,5211	67,8999	73,3320	65,7811	71,5028	69,1665	67,2917
№ 4	74,6384	76,2896	67,7776	73,5694	66,0161	72,0549	71,0417	69,4864
№ 5	75,0654	76,5108	67,8800	73,3937	65,8155	71,6135	69,5015	67,6764
№ 6	78,6170	80,0538	71,4240	76,9213	69,3482	75,1293	72,9490	71,1053
№ 7	75,4648	77,0106	68,4009	74,0658	66,4672	72,4015	70,7876	69,0790
№ 8	76,1219	77,5385	68,9121	74,3771	66,8143	72,5665	70,3115	68,4535

2.2. Модифицированная матрица расстояний **R** относительно матрицы **A_{обн}** (табл. 11) формируется путем обнуления тех элементов r_{ij} , для которых $a_{ij \text{ обн}} = 0$.

Таблица 11

Модифицированная матрица расстояний между объектами (R)

Объекты ГрУСП	Объекты СНК							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	77,6749	79,1908	70,5683	76,1894	68,5915	0	72,6988	70,9462
№ 2	77,0392	78,5088	0	75,4291	67,8416	0	71,6615	69,8572
№ 3	0	76,5211	67,8999	73,3320	65,7811	71,5028	69,1665	67,2917
№ 4	74,6384	76,2896	67,7776	73,5694	66,0161	72,0549	71,0417	0
№ 5	75,0654	76,5108	67,8800	0	65,8155	71,6135	69,5015	0
№ 6	0	80,0538	0	0	69,3482	75,1293	72,9490	71,1053
№ 7	75,4648	77,0106	68,4009	0	66,4672	0	70,7876	0
№ 8	76,1219	77,5385	68,9121	74,3771	66,8143	72,5665	70,3115	68,4535

2.3. Формирование расширенной матрицы расстояний для ЦР по вектору распределения объекта путем дублирования соответствующих строк матрицы R приведено в табл. 12.

Таблица 12

Расширенная матрица расстояний между объектами ($R_{ЦР}$)

Объекты ГРУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 1	77,6749	70,5683	0	0	0	0	0	72,6988
№ 2	77,0392	0	0	0	0	0	0	71,6615
№ 3	0	67,8999	71,5028	71,5028	71,5028	71,5028	71,5028	69,1665
№ 4	74,6384	67,7776	72,0549	72,0549	72,0549	72,0549	72,0549	71,0417
№ 5	75,0654	67,8800	71,6135	71,6135	71,6135	71,6135	71,6135	69,5015
№ 6	0	0	75,1293	75,1293	75,1293	75,1293	75,1293	72,9490
№ 7	75,4648	68,4009	0	0	0	0	0	70,7876
№ 8	76,1219	68,9121	72,5665	72,5665	72,5665	72,5665	72,5665	70,3115

Нормированная и инвертированная матрица расстояний ($\tilde{R}_{ЦР}$) приведена в табл. 13. Таким образом, чем меньше расстояние, тем больше будет значение нормированной эффективности по данному критерию.

Таблица 13

**Нормированная и инвертированная матрица расстояний $\tilde{R}_{ЦР}$
(формулы (8), (9))**

Объекты ГРУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 1	0,5000	0,5457	0	0	0	0	0	0,5320
№ 2	0,5041	0	0	0	0	0	0	0,5387
№ 3	0	0,5629	0,5397	0,5397	0,5397	0,5397	0,5397	0,5548
№ 4	0,5195	0,5637	0,5362	0,5362	0,5362	0,5362	0,5362	0,5427
№ 5	0,5168	0,5631	0,5390	0,5390	0,5390	0,5390	0,5390	0,5526
№ 6	0	0	0,5164	0,5164	0,5164	0,5164	0,5164	0,5304
№ 7	0,5142	0,5597	0	0	0	0	0	0,5443
№ 8	0,5100	0,5564	0,5329	0,5329	0,5329	0,5329	0,5329	0,5474

2.4. Вычисляется модифицированная матрица угловых расстояний между объектами систем относительно матрицы $A_{обн}$ (табл. 14) (см. формулу (10)).

Таблица 14

Модифицированная матрица угловых расстояний между объектами (Н)

Объекты ГрУСП	Объекты СНК							
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
№ 1	5,9554	5,9356	4,6764	3,9554	2,1983	0,9554	3,0945	5,0446
№ 2	14,2659	14,2461	12,9869	12,2659	10,5087	9,2659	5,2159	3,2659
№ 3	2,0513	2,0711	3,3303	4,0513	5,8085	7,0513	11,1013	13,0513
№ 4	2,8384	2,8581	4,1173	4,8384	6,5955	7,8384	11,8883	13,8384
№ 5	3,6025	3,5827	2,3235	1,6025	0,1547	1,3975	5,4475	7,3975
№ 6	1,1743	1,1546	0,1046	0,8257	2,5828	3,8257	7,8756	9,8257
№ 7	6,6484	6,6286	5,3695	4,6484	2,8913	1,6484	2,4015	4,3516
№ 8	13,1500	13,1302	11,8711	11,1500	9,3929	8,1500	4,1001	2,1500

Формируется расширенная матрица угловых расстояний для ЦР по вектору $N_{распред}$ путем дублирования соответствующих строк матрицы **Н** (табл. 15).

Таблица 15

Расширенная матрица угловых расстояний между объектами

Объекты ГрУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 1	5,9554	3,9554	0,9554	0,9554	0,9554	0,9554	0,9554	5,0446
№ 2	14,2659	12,2659	9,2659	9,2659	9,2659	9,2659	9,2659	3,2659
№ 3	2,0513	4,0513	7,0513	7,0513	7,0513	7,0513	7,0513	13,0513
№ 4	2,8384	4,8384	7,8384	7,8384	7,8384	7,8384	7,8384	13,8384
№ 5	3,6025	1,6025	1,3975	1,3975	1,3975	1,3975	1,3975	7,3975
№ 6	1,1743	0,8257	3,8257	3,8257	3,8257	3,8257	3,8257	9,8257
№ 7	6,6484	4,6484	1,6484	1,6484	1,6484	1,6484	1,6484	4,3516
№ 8	13,1500	11,1500	8,1500	8,1500	8,1500	8,1500	8,1500	2,1500

Нормированная и инвертированная матрица для ЦР приведена в табл. 16.

Таблица 16

Нормированная и инвертированная матрица $\tilde{N}_{ЦР}$ для ЦР

Объекты ГрУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 1	0,7913	0,8614	0,9665	0,9665	0,9665	0,9665	0,9665	0,8232
№ 2	0,5000	0,5701	0,6752	0,6752	0,6752	0,6752	0,6752	0,8855
№ 3	0,9281	0,8580	0,7529	0,7529	0,7529	0,7529	0,7529	0,5426

Окончание табл. 16

Объекты ГРУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 4	0,9005	0,8304	0,7253	0,7253	0,7253	0,7253	0,7253	0,5150
№ 5	0,8737	0,9438	0,9510	0,9510	0,9510	0,9510	0,9510	0,7407
№ 6	0,9588	0,9711	0,8659	0,8659	0,8659	0,8659	0,8659	0,6556
№ 7	0,7670	0,8371	0,9422	0,9422	0,9422	0,9422	0,9422	0,8475
№ 8	0,5391	0,6092	0,7144	0,7144	0,7144	0,7144	0,7144	0,9246

2.5. Сформированная матрица эффективности на основе свертки двух критериев для алгоритма ЦР ($E_{ЦР}$) дана в табл. 17 (см. формулу (11)).

Таблица 17

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

Объекты ГРУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 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

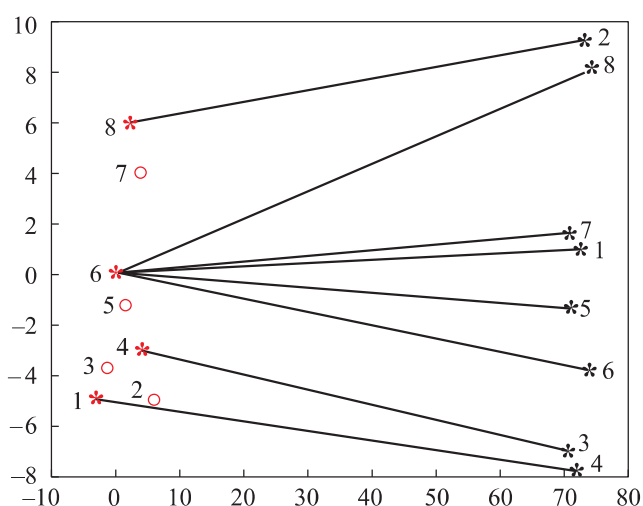
2.6. Итоговая матрица ЦР для модифицированного метода максимального элемента с общим минимальным расстоянием приведена в табл. 18.

Таблица 18

Матрица оптимального ЦР ($Z_{ЦР}$)

Объекты ГРУСП	Обслуживаемые объекты СНК							
	№ 1	№ 3	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 6	№ 7
№ 1	0	0	0	0	0	1	0	0
№ 2	0	0	0	0	0	0	0	1
№ 3	0	1	0	0	0	0	0	0
№ 4	1	0	0	0	0	0	0	0
№ 5	0	0	0	0	0	0	1	0
№ 6	0	0	0	1	0	0	0	0
№ 7	0	0	0	0	1	0	0	0
№ 8	0	0	1	0	0	0	0	0

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



Конфигурация систем ГруСП (справа) и СНК (слева), а также оптимальное ЦР УСП ГруСП для матрицы эффективности на основе свертки двух критериев

Таким образом, на объект СНК № 1 будет направлено УСП № 7, на объект СНК № 3 будет направлено УСП № 1, на объект СНК № 7 будет направлено УСП № 2, а на главную цель СНК № 6 будут направлены пять УСП №№ 3, 4, 5, 6, 8. В исходной матрице обнаружения, продублированной по табл. 3, полученное назначение дополнительно выделено (табл. 19).

Таблица 19

Матрица обнаружения объектов СНК $A_{обн}$ с указанием оптимального целераспределения

Объекты ГруСП	Объекты СНК							
	№ 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
Число УСП	1	0	1	0	0	5	1	0

В результате число назначенных УСП в ГрУСП на объекты СНК 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 УСП в ГрУСП при ЦР по объектам СНК. Таким же образом при необходимости могут быть добавлены и другие дополнительные критерии эффективности.

Многофакторный анализ эффективности работы алгоритма. В результате моделирования различных конфигураций систем выявлена высокая эффективность идентификации объектов СНК. Далее приведены отдельные статистические эксперименты.

Эксперименты многофакторного анализа организуются следующим образом. Задается достаточно большое число экспериментов для моделирования матрицы обнаружения и идентификации. Просчитывается алгоритм при случайных конфигурациях с формированием вектора распределения УСП $N_{\text{распред}}$, который сравнивается с оптимальным распределением. Проводится соответствие идентификации главной цели СНК, после чего определяется процент верной идентификации среди всех экспериментов, а также процент полного соответствия распределения УСП 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 приведены в табл. 20 и 21, из которых следует, что даже при вероятностях обнаружения $\sim 0,5$ главная цель СНК при восьми УСП в ГрУСП выявляется практически однозначно (погрешность определения второстепенных объектов СНК весьма незначительна).

Таблица 20

Процент верной идентификации главной цели

Вероятность P_1	Вероятность 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

Окончание табл. 20

Вероятность P_1	Вероятность P_2										
	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90
0,75	88,37	96,25	97,57	98,80	99,37	99,78	99,90	99,95	100	100	100
0,80	89,87	96	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 21

Процент ошибок относительно оптимального распределения числа УСП в соответствии с данными, приведенными в табл. 9

Вероятность P_1	Вероятность 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	8,80	8,50	8,60	7,50	5,30	5,20	4,60
0,50	34,70	20,30	13,80	13	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	7,20	5	7	5,70	4
0,65	29,60	17,40	13,90	12,30	8,90	10,40	8	5,90	6,20	4,30	4,10
0,70	27,10	17,70	12,80	12,30	9,70	9	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	11,10	11,90	8,70	10,20	6,60	6,70	5,10	5,50	3,90
0,85	25	17,50	15,50	13,30	9,40	7,70	7	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	5,50

2. Варьируется число объектов УСП в ГрУСП при базовой конфигурации систем. Результаты эксперимента приведены в табл. 22.

Таблица 22

Результаты эксперимента

Число УСП в ГрУСП	Процент верной идентификации главной цели	Процент ошибок относительно оптимального распределения
24	100	0,1
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

Показано, что при уменьшении числа УСП в ГрУСП резко увеличивается отклонение от оптимального распределения. Процент верной идентификации также снижается. Следовательно, организация сетецентрического управления в ГрУСП повышает процент идентификации главной цели СНК до значения 98 % уже при шести УСП (при отсутствии сетецентрического управления данный показатель располагается на уровне менее 50 %).

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронов Е.М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно эффективных компромиссов. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
- [2] Воронов Е.М., Латыпова П.А., Репкин А.Л. и др. Формирование оптимального управления ресурсами групп объектов в задаче конфликтного противодействия авиационно-ракетной группировки и системы ПВО. *УМАС-2016. IX Мультиконф. по проблемам управления*, 2016, с. 453–463.
- [3] Неупокоев Ф.К. Противовоздушный конфликт. М., Воениздат, 1989.
- [4] Балыко Ю.П., ред. Методологические основы создания систем и комплексов авиационного ракетного вооружения. М., Дашков и К^о, 2012.
- [5] Дружинин В.В., Конторов Д.С., Конторов М.Д. Введение в теорию конфликта. М., Радио и связь, 1989.
- [6] Айзерман М.А., Алескеров Ф.Т. Выбор вариантов. Основы теории. М., Наука, 1990.
- [7] Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М., ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [8] Семенов С.С., Харчев В.Н., Иоффин А.И. Оценка технического уровня образцов вооружения и военной техники. М., Радио и связь, 2004.
- [9] Боев С.Ф. Сетецентрические системы регионального уровня реального масштаба времени. *Мехатроника, автоматика, управление*, 2009, № 3, с. 64–68.

- [10] Гаврилов В.М. Оптимальные процессы в конфликтных ситуациях. М., Советское радио, 1969.
- [11] Воронов Е.М., Микрин Е.А., Обносков Б.В., ред. Стабилизация, наведение, групповое управление и системное моделирование беспилотных летательных аппаратов. Современные подходы и методы. Т. 2. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [12] Ефремов В.А., Сычёв С.И., Хамаев Н.В. и др. Групповое построение управляемых средств поражения при залповом применении. *Радиоэлектронные технологии*, 2018, № 3, с. 66–69.
- [13] Саати Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М., Радио и связь, 1993.
- [14] Семёнов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В. и др. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М., Эдиториал УРСС, Ленанд, 2016.
- [15] Воронов Е.М., Ефремов В.А., Сычёв С.И. и др. Метод повышения живучести группировки управляемых средств поражения с помощью интегрированного ранжирования и целераспределения систем РЭБ. *Морская радиоэлектроника*, 2015, № 2, с. 30–34.
- [16] Воронов Е.М., Ефремов В.А., Репкин А.Л. и др. 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.

Воронов Евгений Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Куся Александр Михайлович — аспирант кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); заместитель начальника проектно-теоретического отдела АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (Российская Федерация, 141080, Московская обл., г. Королёв, ул. Ильича, д. 7).

Репкин Алексей Леонидович — канд. техн. наук, ведущий инженер НУК ИУ МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Сычёв Станислав Игоревич — заместитель генерального конструктора по инновационному развитию АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (Российская Федерация, 141080, Московская обл., г. Королёв, ул. Ильича, д. 7).

Хамаев Николай Владимирович — начальник бригады отдела бортовых систем управления, наведения и электросхем АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (Российская Федерация, 141080, Московская обл., г. Королёв, ул. Ильича, д. 7).

Тимофеев Денис Андреевич — студент кафедры «Системы автоматического управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронов Е.М., Куся А.М., Репкин А.Л. и др. Комплексный алгоритм обнаружения, идентификации соединения надводных кораблей и целераспределения группы управляемых средств поражения с сетевым управлением. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 4, с. 75–98.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-75-98>

**A COMPREHENSIVE ALGORITHM FOR DETECTION,
IDENTIFICATION OF NAVAL SURFACE FORCES
AND TARGET ALLOCATION
OF NETWORK-CENTRIC CONTROLLED WEAPONS**

E.M. Voronov¹

voronov@bmstu.ru

A.M. Kuslya^{1,2}

alexander_kuslya@mail.ru

A.L. Repkin¹

alexr_bmstu@mail.ru

S.I. Sychov²

sychovsi@gmail.com

N.V. Khamaev²

stradiot@mail.ru

D.A. Timofeev¹

tim.disa001@mail.ru

¹ **Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

² **Tactical Missiles Corporation JSC, Korolev, Moscow Region, Russian Federation**

Abstract

The purpose of the study was to examine and solve the problem of detecting and identifying the objects of naval surface forces by a group of controlled weapons within the group using coordinates and the type of such objects. The main target of naval surface forces was determined according to the parameters of the frequency of detection of the objects by the group of controlled weapons and the reliability of identification of the objects of naval surface forces. A matrix for detecting the objects of naval surface forces by the group of controlled weapons has been formed and analyzed. The introduction of restrictions on the tactics of actions of the group of controlled weapons and on the coefficient of convolution of criteria in the task of target allocation makes it possible to ensure almost complete absence of intersections of trajectories of controlled weapons. On the basis of statistical

Keywords

Grouping, a group of controlled weapons, naval surface forces, network-centric control, detection, identification, target allocation, multivariate analysis of effectiveness

modeling of the configuration of the systems and the corresponding probabilities of detection and identification, the effectiveness of the developed algorithm is shown. An example of a multi-stage calculation of one variant from a statistical series of experiments is given, followed by a preliminary assessment of target allocation by the group of controlled weapons in accordance with the current configurations of the group of weapons and naval surface forces. The multivariate analysis of the efficiency of the algorithm operation on various configurations of the systems showed a high degree of identification of the objects of naval surface forces in comparison with the existing algorithms. A range of values for the probabilities of identifying the types of the objects of naval surface forces by the group of controlled weapons has been identified, which provides an almost unambiguous determination of the main target of naval surface forces

Received 27.07.2020

Accepted 17.09.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Voronov E.M. *Metody optimizatsii upravleniya mnogoob'ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnykh kompromissov* [Optimization methods for controlling multi-object multi-criteria systems based on stable-effective compromises]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001.
- [2] Voronov E.M., Latypova P.A., Repkin A.L., et al. [Forming optimum resource control of objects group in problem of conflict counteraction of an air-missile group and air defense system]. *UMAS-2016. IX Mul'tikonf. po problemam upravleniya* [UMAS-2016. IX Multiconf. on Control Problems], 2016, pp. 453–463 (in Russ.).
- [3] Neupokoev F.K. *Protivovozdushnyy konflikt* [Anti-aircraft conflict]. Moscow, Voenizdat Publ., 1989.
- [4] Balyko Yu.P., ed. *Metodologicheskie osnovy sozdaniya sistem i kompleksov aviatsionnogo raketnogo vooruzheniya* [Methodological foundations for creating systems and complexes of aviation missile weapons]. Moscow, Dashkov i K° Publ., 2012.
- [5] Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. *Vvedenie v teoriyu konflikta* [Introduction into conflict theory]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989.
- [6] Ayzerman M.A., Aleskerov F.T. *Vybor variantov. Osnovy teorii* [Alternative choice. Theory foundations]. Moscow, Nauka Publ., 1990.
- [7] Kryanev A.V., Lukin G.V. *Matematicheskie metody obrabotki neopredelennykh dannykh* [Mathematical methods of processing uncertain data]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2006.

- [8] Semenov S.S., Kharchev V.N., Ioffin A.I. Otsenka tekhnicheskogo urovnya obraztsov vooruzheniya i voennoy tekhniki [Technical level assessment of weapon and military equipment samples]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004.
- [9] Boev S.F. Net-centric systems of regional level of a real time scale. *Mekhatronika, avtomatika, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2009, no. 3, pp. 64–68 (in Russ.).
- [10] Gavrilov V.M. Optimal'nye protsessy v konfliktnykh situatsiyakh [Optimum processes in conflict situations]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969.
- [11] Voronov E.M., Mikrin E.A., Obnosov B.V., eds. Stabilizatsiya, navedenie, gruppovoe upravlenie i sistemnoe modelirovanie bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sovremennye podkhody i metody. T. 2 [Stabilization, guidance, group control and system modeling of unmanned aircraft. Modern approaches and methods. Vol. 2]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018.
- [12] Efremov V.A., Sychev S.I., Khamaev N.V., et al. Group formation of controlled weapons for salvo use. *Radioelektronnye tekhnologii* [Radio Electronic Technology], 2018, no. 3, pp. 66–69 (in Russ.).
- [13] Saati T.L. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, 1980.
- [14] Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskiy A.V., et al. Metody prinyatiya resheniy v zadachakh otsenki kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Decision-making methods in assessment problems of quality and technical level of complex technical systems]. Moscow, Editorial URSS Publ., Lenand Publ., 2016.
- [15] Voronov E.M., Efremov V.A., Sychev S.I., et al. An approach to increase survivability of the guided destruction assets grouping with the help of an integrated ranking and target assigning of the radio engineering protection systems. *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics], 2015, no. 2, pp. 30–34 (in Russ.).
- [16] Voronov E.M., Efremov V.A., Repkin A.L., et al. Functional properties of conflict-optimum prediction in the system of optimization-imitation modeling of interaction between groups of controlled means of destruction. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2013, no. 3, pp. 3–27 (in Russ.).

Voronov E.M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kuslya A.M. — Post-Graduate Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Deputy Head of the Design and Theoretical Department, Tactical Missiles Corporation JSC (Ilichy ul. 7, Korolev, Moscow Region, 141080 Russian Federation).

Repkin A.L. — Cand. Sc. (Eng.), Lead Engineer, Scientific and Educational Complex of Computer Science and Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sychov S.I. — Deputy General Designer for Innovative Development, Tactical Missiles Corporation JSC (Ilichа ul. 7, Korolev, Moscow Region, 141080 Russian Federation).

Khamaev N.V. — Head of the Brigade, Department of Onboard Control Systems, Guidance and Electrical Circuits, Tactical Missiles Corporation JSC (Ilichа ul. 7, Korolev, Moscow Region, 141080 Russian Federation).

Timofeev D.A. — Student, Department of Automatic Control Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Voronov E.M., Kusya A.M., Repkin A.L., et al. A comprehensive algorithm for detection, identification of naval surface forces and target allocation of network-centric controlled weapons. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 4, pp. 75–98 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-4-75-98>