

УДК 623.765.4

DOI:10.22213/2413-1172-2022-2-23-33

Математическая модель решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО надводного корабля (системе ПВО группы кораблей) при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет

В. А. Галий, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

С. Н. Иванищев, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В. Н. Букрий, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Перспективным направлением в организации построения и эффективного боевого применения таких сложных систем, как контур противовоздушной обороны (ПВО) одиночного надводного корабля и система ПВО группы надводных кораблей, является совершенствование алгоритмов обработки информации и управления системами вооружения в сочетании с их автоматизацией, что позволяет существенно сокращать время от момента обнаружения воздушных целей до их уничтожения.

Переход к созданию и применению высокоточного оружия большой дальности – противокорабельных крылатых ракет (ПКР) – позволяет поражать корабли с удаленных рубежей без входа в зону действия истребительной авиации и досягаемости зенитных ракетных комплексов.

Некачественное решение задачи целераспределения зенитных огневых средств корабля (группы кораблей) при отражении атак противокорабельных крылатых ракет не позволяет реализовывать боевые возможности контура (системы) ПВО в целом, что приводит к потере боеспособности корабля (кораблей).

Основное отличие предлагаемой математической модели решения задачи целераспределения от реализованных в боевых информационно-управляющих системах надводных кораблей состоит в том, что в ней предусмотрена возможность оценки своих зенитных огневых средств и ПКР противника при выработке оптимального плана целераспределения на основе детального учета дальности обнаружения ПКР, согласования зон поражения, секторов обстрела, рубежей выполнения задач ПКР, мер взаимной безопасности, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, т. е. с учетом действующих зон поражения зенитных огневых средств, а также решение задачи целераспределения во времени. Решение поставленной задачи производится как непосредственно в ходе противовоздушного боя, так и при угрозе атак ПКР. Последнее, в свою очередь, позволяет осуществлять оптимизацию построения системы зенитного огневого прикрытия и системы ПВО в целом, как одиночного надводного корабля, так группы надводных кораблей и оптимизацию решения задачи целераспределения, в частности.

Представленная математическая модель и разработанные на ее основе алгоритм и программа после соответствующей доработки могут быть рекомендованы для включения как в системы автоматизированного боевого управления, так и в боевые информационно-управляющие системы соединений надводных кораблей и одиночных кораблей соответственно, что позволит решать задачу целераспределения в масштабе времени, близком к реальному.

Ключевые слова: противовоздушная оборона, противокорабельная крылатая ракета, целераспределение зенитных огневых средств, рубеж обнаружения радиолокационной станции, степень опасности воздушной цели, рабочее время комплекса.

Введение
Под целераспределением зенитных огневых средств в контуре ПВО надводного корабля (системе ПВО группы надводных кораблей) понимается назначение каждому комплексу таких групп и такого количества целей, при которых последний наилучшим образом реализует свои боевые возможности с учетом степени опасности воздушных целей.

При этом под группой понимается совокупность однотипных ПКР, атакующих с одного направления, на одной высоте и с одинаковым, как правило, минимально возможным интервалом времени [1].

Несмотря на то, что решению задачи целераспределения зенитных огневых средств надводных кораблей при отражении атак противокорабельных крылатых ракет посвящено боль-

шое количество научных исследований, поставленная задача, по мнению авторов, решена не в полном объеме.

Некоторые результаты исследований по данной тематике отражены в частности в следующих опубликованных научных статьях.

Оркин Б. Д., Оркин С. Л., Дьячук А. К. Структура алгоритма целераспределения средств противовоздушной обороны (Труды МАИ, 2012). Представлена структура алгоритма целераспределения палубных истребителей, зенитных ракетных комплексов большой, средней и малой дальности и зенитных артиллерийских комплексов;

Письменная В. А., Якутин А. В. Повышение эффективности решения задачи целераспределения в системах воздушно-космической обороны (Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей», 2017). Рассмотрены методы решения задачи целераспределения ракетных комплексов противоракетной обороны.

Митрофанов Д. Г., Ковынев А. В., Бортовик В. В. К вопросу о селекции ложных воздушных целей (Военная мысль, 2021). Изложен метод распознавания воздушных целей по характерным признакам отраженных от целей радиолокационных сигналов.

Каменский И. Е., Советов В. А., Субботин А. В., Кэссиди К. А. Особенности общей постановки задачи целераспределения в системе противовоздушной обороны (Вестник Ярославского высшего военного училища ПВО, 2018). Рассмотрены некоторые особенности при постановке задачи целераспределения в системе противовоздушной обороны и проанализирован показатель эффективности боевых действий системы.

Шустова Н. А., Степанов В. В. Основы моделирования системы поддержки принятия решений по комплексному применению сил и средств ПВО корабля (Программные продукты и системы, 2021). Рассмотрены общие проблемы решения задачи целераспределения при разработке имитационно-моделирующего стенда противовоздушной обороны надводных кораблей.

Статьи представляют непосредственный интерес для исследователей, однако в представленных работах не нашли достаточного отражения при решении задачи целераспределения следующие существенные факторы. Во-первых, учет реальных боевых возможностей зенитных огневых средств и атакующих крылатых ракет противника при выработке оптимального плана целераспределения на основе детального учета дальности обнаружения ПКР, согласования зон

поражения, секторов обстрела, рубежей выполнения задач ПКР, мер взаимной безопасности и безопасности при работе с самолетами истребительной авиации, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, т. е. с учетом действующих зон поражения. Во-вторых, учет времени пребывания ПКР в пределах действующих зон поражения зенитных огневых средств и количества стрельб, выполняемых последними при отражении атакующих крылатых ракет, т. е. решение задачи целераспределения во времени.

Принципиально новым в предлагаемой работе является постановка и решение задачи целераспределения на этапе планирования боевых действий, что является необходимым условием для оптимизации построения системы зенитного огневого прикрытия и системы ПВО в целом ордеров надводных кораблей при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет.

Особенность решения задачи ЦР состоит в следующих определенностях:

- количественный состав, характеристики воздушных целей и параметры налета [2, 3];
- согласование количества и типов целей, назначенных каждому комплексу, с числом стрельб, которые он способен будет выполнить по этим целям, пока они находятся в зоне его действия, т. е. решение задачи во времени;
- решение задачи в реальном масштабе времени, обеспечивающем процесс целераспределения зенитных огневых средств в контуре (системе) ПВО [4, 5].

Цель исследования – разработка математической модели решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО одиночного надводного корабля (системе ПВО группы надводных кораблей) при угрозе нападения и при отражении атак ПКР.

Формулируется следующая задача оптимизации процесса целераспределения: определить количество и порядковые номера воздушных целей j -типа (группы), которые необходимо назначить для обстрела k -му зенитному огневому средству i -го типа с тем, чтобы максимизировать его суммарные боевые возможности по поражению атакующих ПКР с учетом их степени опасности (функции веса).

Результатом решения этой задачи будет построение матрицы – плана целераспределения (n_{kij}) , каждый элемент которой n_{kij} есть число ПКР j -го типа (группы), которые следует назначить для поражения k -му зенитному комплексу i -го типа.

Поскольку неопределенность параметров и характеристик налета имеет случайную природу, то для ее раскрытия могут быть использованы вероятностные методы.

Решение задачи целераспределения, в свою очередь, включает в себя решение следующих задач:

- определение степени опасности целей;
- определение момента выхода ПКР на рубеж обнаружения;
- определение времени пребывания ПКР в зоне действия комплекса;
- определение вероятности выбора для обстрела ПКР j -го типа (группы);
- определение возможности повторного назначения ПКР j -го типа (группы).

Учет перечисленных выше факторов и устранение отмеченных недостатков, присущих ранее разработанным математическим моделям, положен в основу предлагаемой математической модели решения задачи целераспределения. При этом оптимальному решению поставленной задачи будет соответствовать только оптимальный вариант построения контура ПВО одиночного надводного корабля и системы ПВО группы надводных кораблей в целом.

Математическая модель, алгоритм и программа представлены в Методике автоматизированного решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО одиночного надводного корабля (системе ПВО группы кораблей) при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет.

Основные результаты решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО надводного корабля (системе ПВО группы надводных кораблей)

Учитывая ограниченные рамки публикуемой статьи, ниже приводятся только основные результаты решения каждой из отмеченных во введении частных задач и задачи целераспределения в целом.

Задача 1. Определение степени опасности воздушных целей

Степень опасности для l -го корабля ПКР j -го типа определяется его функцией веса C_{jl} следующим образом:

$$c_{jl} = \frac{b_{jl}}{\sum_{j=1}^J b_{jl}}, \quad (1)$$

$$b_{jl} = \frac{A_l W_{jl} W_l}{\sum_{j=1}^J W_{jl}}, \quad (2)$$

где A_l – относительная «ценность» l -го корабля; W_{jl} – вероятность поражения l -го корабля залпом n_j ПКР j -го типа (группы) ($j = 1, 2, \dots, J$); W – вероятность поражения l -го корабля одним смешанным залпом из J типов (групп) ПКР.

Величина J определяется следующим образом:

– если число направлений (секторов) атаки \geq числа типов ПКР, то J равно числу направлений (секторов);

– если число направлений (секторов) атаки $<$ числа типов ПКР и типы в каждом из направлений (секторе) не повторяются, то J равно числу типов ПКР;

– если число направлений (секторов) атаки $<$ числа типов ПКР и типы хотя бы в одном из направлений (секторе) повторяются, то J равно числу типов ПКР плюс $\sum_{m=1}^K n_{mi} - 1$,

где n_{mi} – число направлений (секторов), в каждом из которых повторяется i -й тип ПКР; K – общее число повторяющихся типов ПКР; m – порядковый номер повторяющегося типа ПКР ($m = \overline{1, K}$).

В наиболее простом случае – в схеме независимых выстрелов – выражение (2) принимает вид

$$b_{jl} = A_l \frac{\left\{ 1 - \left[1 - \frac{P_{jl} Q_{mexj} Q(n_{jl})}{\varpi_{jl}} \right]^{n_{jl}} \right\}}{\sum_{j=1}^J \left\{ 1 - \left[1 - \frac{P_{jl} Q_{mexj} Q(n_{jl})}{\varpi_{jl}} \right]^{n_{jl}} \right\}} \times \left\{ 1 - \prod_{j=1}^J \left[1 - \frac{P_{jl} Q_{mexj} Q(n_{jl})}{\varpi_{jl}} \right]^{n_{jl}} \right\}, \quad (3)$$

где P_{jl} – вероятность попадания ПКР j -го типа (группы) в l -й корабль; Q_{mexj} – техническая надежность ПКР j -го типа; $Q(n_{jl})$ – вероятность непоражения каждого из n_{jl} ПКР j -го типа (группы) зенитных огневых средств корабля; ϖ_{jl} – среднее необходимое число попаданий ПКР j -го типа для поражения l -го корабля,

$$Q(n_{jl}) = \prod_{v=1}^M [1 - P_{vj}]^{m_{vjl}}, \quad (v = \overline{1, M}); \quad (4)$$

P_{vj} – вероятность поражения ПКР j -го типа (группы) за одну стрельбу v -м зенитным огневым средством (характеристика зоны поражения); m_{vjl} – количество стрельб, выполненных v -м зенитным огневым средством по ПКР j -го типа (группы), атакующих l -й корабль; M – общее число зенитных огневых средств, участвующих в отражении атаки ПКР.

Использование в расчетах только коэффициентов веса (2) имеет тот недостаток, что не выполняется условие нормировки, так как выражение в знаменателе под знаком суммы (1) не равно единице, то есть учитывается возможность промаха и возможность непоражения корабля атакующим ПКР. При решении задачи целераспределения должна ставиться задача обстрела всех ПКР независимо от возможности промаха или недостаточной эффективности части из них. Этому принципу отвечает функция веса – формула (1).

Относительная ценность l -го корабля – экспертная оценка A_l – определяется исходя из решений задач более высокого уровня. В противном случае охраняемые корабли считаются равноценными, и значения A_l принимаются равными единице.

Следует отметить, что специально проведенные исследования эвристических способностей человека позволили установить, что интуитивные решения отклоняются от точных, как правило, не более чем на 5...15 %, причем меньшие отклонения соответствуют более сложным в смысле постановки задачам.

Отсутствие достаточной определенности основных характеристик воздушных целей и параметров налета делает проблематичной саму идею определения функции веса. Тем не менее разрешение этой неопределенности с достаточно высокой степенью надежности возможно с использованием известных методов распознавания (например, с помощью методов кластерного анализа, сверточных нейронных сетей (CNN) [6–8] и др.).

Знание тактико-технических характеристик конкретных образцов средств воздушного нападения позволяет учитывать это при моделировании процесса целераспределения и последующей оптимизации построения контура ПВО как одиночного надводного корабля, так и системы ПВО группы надводных кораблей при уг-

розе атак противокорабельных крылатых ракет [9]. Однако зачастую сведения о количестве и конкретных образцах используемых ПКР будут приближительны, и в этом случае при отсутствии достоверных данных разведки, которые безусловно должны учитываться, в расчетах целесообразно использовать их обобщенные тактико-технические характеристики. Это допустимо, так как при всем многообразии типов ПКР их технические характеристики не выходят за пределы небольших по величине диапазонов, а тактические приемы боевого применения имеют определенную устойчивость [10, 11].

Задача 2. Определение момента выхода ПКР на рубеж обнаружения РЛС

Под рубежом обнаружения понимается фиксируемая дальность обнаружения ПКР j -го типа (группы) радиолокационной станцией обнаружения корабля в конкретных условиях обстановки.

При моделировании процесса целераспределения и при построении контура ПВО как одиночного надводного корабля, так и системы ПВО группы надводных кораблей при угрозе атак ПКР в качестве рубежа обнаружения может быть использована гарантированная дальность обнаружения ПКР j -го типа (группы) $D_{ог}$ как минимально реализуемая дальность обнаружения ПКР с заданным гарантированным уровнем вероятности в заданных условиях обстановки [12].

В общем случае момент выхода ПКР j -го типа (группы) на рубеж обнаружения радиолокационной станцией корабля определяется временем его полета от точки пуска до рубежа обнаружения $T_{пj}$ и временем задержки в пуске

$\Delta T_{пj}$:

$$T_{пj} = \varphi [D_j; V_j(t)], \quad (5)$$

где $D_j = D_{стрj} - D_{обнj}$ – дальность полета ПКР j -го типа (группы) от точки пуска до рубежа обнаружения; $D_{стрj}$ – дальность до точки пуска ПКР j -го типа (группы); $D_{обнj}$ – дальность (рубеж) обнаружения ПКР j -го типа (группы); $V_j(t)$ – скорость полета ПКР j -го типа (группы).

Если за начало координатной оси времени считать момент пуска самого первого из ПКР различных типов (групп), а $\Delta \bar{t}_{пj}$ – задержка в пуске первого ПКР j -го типа (группы) относительно самого первого из всех ПКР, то математическое ожидание времени полета на рубеж

обнаружения первого из ПКР j -го типа (группы) определится как сумма времени задержки в пуске и времени полета ПКР j -го типа (группы) до рубежа обнаружения:

$$\bar{t}_{\text{и}j} = \Delta \bar{t}_{\text{и}j} + \frac{\bar{d}_j}{V_j}, \quad (6)$$

$$\bar{t}_{\text{и}j} = \Delta \bar{t}_{\text{и}j} + \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\bar{d}_{ji} - \bar{d}_{j,i+1}}{\bar{V}_{ji}} \right). \quad (7)$$

Считая началом координат на оси времени момент обнаружения ПКР, пришедшего на рубеж обнаружения РЛС первым, т. е. $\Delta \bar{t} = \min_{(j)} \bar{t}_{\text{и}j}$, получим математическое ожидание времени запаздывания в выходе на рубеж обнаружения первого ПКР j -го типа (группы):

$$\Delta \bar{t}_j = \bar{t}_{\text{и}j} - \Delta \bar{t}, \quad (j=1, 2, \dots, J). \quad (8)$$

Задача 3. Определение времени пребывания ПКР в зоне действия зенитного комплекса

Время, которым располагает для обстрела ПКР каждый зенитный комплекс от момента обнаружения первого атакующего ПКР j -го типа (группы) до момента выхода из пределов его действующей зоны поражения последнего из обстреливаемых ПКР, определяется как

$$T_j = T_{\text{и}j} + \Delta T_{aj}, \quad (9)$$

где $T_{\text{и}j}$ – время полета первого ПКР от момента его обнаружения до выхода за ближнюю границу действующей зоны поражения зенитных огневых стрельб; ΔT_{aj} – размах залпа всех ПКР, которые могут быть без пропуска обстреляны зенитным комплексом.

По аналогии с (7) математическое ожидание времени полета ПКР определяется выражением

$$\bar{t}_{\text{и}j} = \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\bar{d}_{ji} - \bar{d}_{j,i+1}}{V_{ji}} \right), \quad (10)$$

или, при $V_j = \text{const}$,

$$\bar{t}_{\text{и}j} = \frac{\bar{d}_{\text{обн}j} - \bar{d}_{\text{стр}j}^{\text{min}}}{\bar{V}_{ji}}. \quad (11)$$

Математическое ожидание размаха залпа всех $[m_j]$ ПКР j -го типа (группы), которые могут быть обстреляны без пропуска данным зенитным комплексом $\Delta \bar{t}_{aj}$, определяется как

$$\Delta \bar{t}_{aj} \approx \frac{2\sigma_{\text{и}j}}{\sqrt{\pi}} \sum_{v=1}^{[m_j]-1} \left(\frac{1}{V} e^{-\frac{v^2 a_j^2}{\sigma_{\text{и}j}^2}} \right) + 2a_j \sum_{v=1}^{[m_j]-1} \Phi \left(\frac{va_j \sqrt{2}}{\sigma_{\text{и}j}} \right), \quad (12)$$

где $[m_j]$ – целая часть числа стрельб зенитного комплекса по ПКР j -го типа (группы) – число обстрелянных без пропуска ПКР; $2a_j$ – интервал пуска ПКР j -го типа (группы); $\sigma_{\text{и}j}$ – среднеквадратическое отклонение рассеивания ПКР j -го типа (группы) во времени.

Режим огня для каждого зенитного огневого средства принимается следующий: одна стрельба по каждой из назначенных противокорабельных крылатых ракет. Следует отметить, что режим огня может быть выбран любым, но в качестве допущения в математической модели принимается, что выбранный режим огня в процессе отражения налета не меняется.

Особенностью данной задачи является то, что до ее решения должно быть определено количество стрельб, которое комплекс способен выполнить без пропуска по ПКР j -го типа (группы) целей (Антонов Ю. С. Теоретические основы построения системы зенитного огневого прикрытия соединения надводных кораблей в интересах противоракетной обороны : дис. ... д-ра техн. наук, 1990):

$$m_j = \sum_{k=1}^{K_{\text{и}}} \left\{ \frac{1}{\ln(1+\gamma)} \right\} \times \ln \left[\frac{d^{\wedge} - V_{\text{и}j} t_{\text{раб}} - (k-1)V_{\text{и}j} (2\tau_{\text{и}} - t_{aj})}{d_{\text{вых}} + V_p (T - k_{\text{и}} t_{aj})} + \frac{V_p (1+\gamma)(T - k_{\text{и}} t_{aj})}{d_{\text{вых}} + V_p (T - k_{\text{и}} t_{aj})} \right], \quad (13)$$

$$d^{\wedge} = \begin{cases} \frac{d_{\text{ог}} - V_{\text{и}j} t_{\text{раб}}}{1+\gamma} & \text{при } d_{\text{ог}} < d_{\text{вх}} (1+\gamma) + V_{\text{и}j} t_{\text{раб}} \\ d_{\text{вх}} & \text{при } d_{\text{ог}} \geq d_{\text{вх}} (1+\gamma) + V_{\text{и}j} t_{\text{раб}} \end{cases},$$

где $d_{\text{ог}}$ – гарантированная дальность обнаружения ПКР [13]; $V_{\text{и}j}$ – скорость ПКР; V_p – скорость зенитной управляемой ракеты; $\gamma = V_{\text{и}j} (V_p)^{-1}$; $K_{\text{и}}$ – количество целевых каналов зенитных огневых средств; $d_{\text{вх}}$, $d_{\text{вых}}$ – удаление

дальней и ближней границ действующих зон поражения зенитных огневых средств; t_{aj} – временной интервал между ПКР; τ_n – интервал пуска зенитных управляемых ракет; $t_{\text{раб}}$ – рабочее время по подготовке и производству первого залпа зенитных управляемых ракет; $T = t_{\text{раб}} + t_{\text{исх}} + t_{\text{з.у.р}}$; $\tau_{\text{раб}}$ – рабочее время по подготовке и производству второго и последующих залпов зенитных управляемых ракет; $t_{\text{исх}}$ – время приведения зенитного ракетного комплекса в готовность к приему целеуказания; $t_{\text{з.у.р}}$ – интервал времени между разрывами первой и последней зенитных управляемых ракет в районе цели; $t_{\text{раб}} = t_{\text{п.р.ц}} + \max\{t_{\text{подг}}; t_{\text{п.п}}\} + t_{\text{ст}}$; $t_{\text{подг}}$ – рабочее время зенитной батареи по подготовке пуска; $t_{\text{п.п}}$ – время предстартовой подготовки зенитной управляемой ракеты; $t_{\text{ст}}$ – время от нажатия кнопки «пуск» до схода первой зенитной управляемой ракеты; $t_{\text{п.р.ц}}$ – рабочее время поста распределения целей;

$$t_{aj} = \frac{2}{n_j - 1} \sum_{v=1}^{n_j-1} \left[\frac{\sigma_{ij}}{v\sqrt{\pi}} e^{-\frac{v^2 a_j^2}{\sigma_{ij}^2}} + a_j \Phi\left(\frac{v\sqrt{2}a_j}{\sigma_{ij}}\right) \right], \quad (14)$$

где n_j – количество атакующих ПКР j -го типа (группы).

Задача 4. Определение вероятности выбора для обстрела ПКР j -го типа (группы)

Если в налете участвуют ПКР различных типов, атакующие в составе различных групп, то необходимо определить, какие группы ПКР и какое количество воздушных целей из этих групп следует назначить для обстрела каждому данному комплексу с тем, чтобы с учетом времени пребывания этих целей в его зоне действия реализовать максимум его боевых возможностей [14].

Для этого необходимо определить, какое количество стрельб способен выполнить каждый зенитный комплекс по ПКР данного типа (группы) для данных параметров налета, какова вероятность поражения данной воздушной цели за одну его стрельбу, каким временем располагает комплекс для обстрела воздушных целей от момента обнаружения первой цели до выхода из пределов действующей зоны поражения последней из обстреливаемых целей.

Если есть факторы, по которым может быть определена степень опасности для l -го корабля каждой из атакующих ПКР (например, функция

веса C_{jl}), то в последующем это должно быть учтено.

Задача целераспределения для одного комплекса в частности может быть сформулирована следующим образом: определить количество стрельб, которое данный комплекс должен выполнить по каждой группе ПКР, чтобы реализовать максимум своих боевых возможностей в интересах обеспечения боевой устойчивости охраняемого корабля (кораблей).

Формула для определения вероятности выбора для обстрела ПКР j -го типа (группы) имеет вид

$$P_j = \sum_{i=j}^J \left\{ \frac{\min[\Delta t_{i+1}; \max(t_j + \Delta t_j; \Delta t_i)] - \Delta t_i}{\sum_{k=1}^i [\max(t_k + \Delta t_k; \Delta t_i) - \Delta t'_k]} \right\}, \quad (15)$$

$$\Delta t'_k = \begin{cases} \Delta t_j & \text{при } k \leq j, \\ \Delta t'_k & \text{при } k > j, \end{cases}$$

где t_j – время, которым располагает зенитный комплекс для обстрела ПКР j -го типа (группы) от момента обнаружения до момента выхода из пределов действующей зоны поражения последней из воздушных целей j -го типа (группы); Δt_j – запаздывание в выходе на рубеж обнаружения первой ПКР j -го типа (группы) относительно момента времени выхода на указанный рубеж первой из ПКР J атакующих групп.

Если известна функция веса ПКР j -го типа (группы), то выражение (15) примет вид

$$P_j = \sum_{i=j}^J \left\{ \frac{\min[\Delta t_{i+1}; \max(C_j t_j + \Delta t_j; \Delta t_i)] - \Delta t_i}{\sum_{k=1}^i [\max(C_k t_k + \Delta t_k; \Delta t_i) - \Delta t'_k]} \right\}. \quad (16)$$

Задача 5. Определение возможности повторного выбора для обстрела средств воздушного нападения j -го типа (группы)

Так как минимальными возможностями по обстрелу ПКР, т. е. возможностью выполнения хотя бы одной стрельбы, комплекс обладает, когда дальность выдачи целеуказания обеспечивает обстрел цели на ближней границе действующей зоны поражения, то можно заключить, что обстрел очередного ПКР j -го типа (группы) без пропусков данным комплексом возможен, если первая из потока необстрелянных целей будет обнаружена на дальности не менее $D_{\text{обн}j}$:

$$D_{\text{обн}j} = D_{\text{стр}j}^{\min} + \int_0^{t_{\text{н} \min}} V_{\text{ц}j}(t) dt + \int_0^{t_{\text{раб}}} V_{\text{ц}j}(t) dt. \quad (17)$$

Так как дальность до первой из необстрелянных воздушных целей j -го типа (группы)

$$D_{\text{стр}j}^{\min} + \int_0^{t_{\text{н} \max}} V_{\text{ц}j}(t) dt + \int_0^{t_j} V_{\text{ц}j}(t) dt, \quad (18)$$

то условие возможности повторного выполнения хотя бы одной стрельбы по ПКР j -го типа (группы) можно определить как

$$\begin{aligned} D_{\text{стр}j}^{\min} + \int_0^{t_{\text{н} \max}} V_{\text{ц}j}(t) dt + \int_0^{t_j} V_{\text{ц}j}(t) dt \geq \\ \geq D_{\text{стр}j}^{\min} + \int_0^{t_{\text{н} \min}} V_{\text{ц}j}(t) dt + \int_0^{t_{\text{раб}}} V_{\text{ц}j}(t) dt, \end{aligned} \quad (19)$$

где t_j – размах во времени $[m_j]$ обстрелянных в предыдущем цикле целераспределения ПКР j -го типа (группы).

Решением (19) и будет определение значения работного времени комплекса $t_{\text{раб}}$, при котором становится возможным повторный обстрел ПКР j -го типа (группы).

Выражение (19) существенно упрощается, если есть возможность представить постоянными скорость цели и зенитной ракеты (снаряда):

$$V_{\text{ц}j}(t) = \text{const} = V_{\text{ц}j} \quad \text{и} \quad V_{\text{р}}(t) = \text{const} = V_{\text{р}}.$$

Тогда из (19) получаем

$$\begin{aligned} \bar{V}_{\text{ц}j}(\bar{t}_{\text{н} \max} + \bar{t}_j) \geq \bar{V}_{\text{ц}j} \bar{t}_{\text{н} \min} + \bar{V}_{\text{ц}j} \bar{t}_{\text{раб}}, \\ \bar{t}_{\text{раб}} \leq \bar{t}_j + \bar{t}_{\text{н} \max} - \bar{t}_{\text{н} \min}. \end{aligned} \quad (20)$$

Выполнение неравенства (20) определяет возможность выполнения комплексом хотя бы одной повторной стрельбы без пропусков по ПКР j -го типа (группы).

Если же условие (19) не выполняется, то количество пропущенных целей $n_{\text{ц}j}$ определится как

$$n_{\text{ц}j} = [m_j^{\wedge}] - [m_j], \quad (21)$$

где $[m_j]$ – число ПКР j -го типа (группы), обстрелянных зенитным комплексом в предыдущем цикле; $[m_j^{\wedge}]$ – решение уравнения

$$\bar{t}_j^{\wedge} = \frac{2\sigma_j}{\sqrt{\pi}} \sum_{v=1}^{m_j^{\wedge}-1} \left(\frac{1}{V} e^{-\frac{v^2 a_j^2}{\sigma_j^2}} \right) + 2a_j \sum_{v=1}^{m_j^{\wedge}-1} \Phi \left(\frac{va_j \sqrt{2}}{\sigma_j} \right), \quad (22)$$

причем $\bar{t}_j^{\wedge} = \bar{t}_{\text{раб}} + \bar{t}_{\text{н} \min} - \bar{t}_{\text{н} \max}$.

На основании результатов решения частных задач задача целераспределения решается следующим образом.

Зная число стрельб, которое данный комплекс способен выполнить по ПКР j -го типа (группы) за время \bar{t}_j , можно определить количество воздушных целей каждого типа (группы) из состава смешанного залпа, которые следует назначить для обстрела данному комплексу:

$$\bar{x}_j = m_j P_j. \quad (23)$$

В общем случае \bar{x}_j – не целочисленная величина.

Алгоритм перехода к целочисленному значению и проверки оптимальности полученного плана целераспределения (в смысле максимума предотвращенного ущерба) приведен в Методике автоматизированного решения задачи целераспределения с указанием конкретных образцов вооружения и имеет закрытый характер. Поскольку главный критерий, отражающий боевые возможности данного комплекса в системе ПВО, зависит от числа стрельб, которое может быть им выполнено, и от эффективности каждой стрельбы, постольку достаточно полной характеристикой боевых возможностей зенитного комплекса в этом случае служит потенциал поражения средств воздушного нападения j -го типа (группы) $\bar{x}_j p_j$, математическое ожидание числа поражающих стрельб зенитного комплекса по ПКР j -го типа (группы). В последнем выражении величина p_j – вероятность поражения за стрельбу ПКР j -го типа (группы), характеризующая зону поражения конкретного зенитного комплекса.

Окончательными результатами решения являются выработанный план первого, а в случае возможности – повторного целераспределения. План представляет собой матрицу, в которой для каждого зенитного огневого средства указано рекомендуемое для обстрела количество ПКР конкретной атакующей группы. Элементы матрицы рассчитываются с использованием значений матриц количества стрельб, вероятностей выбора для обстрела и поражающих потенциалов зенитных огневых средств. При наличии

нумерации ПКР как в группах, так и общей выработанный план целераспределения предполагает привязку зенитных огневых средств к конкретным номерам ПКР

После рассмотрения последней строки матрицы, то есть после получения целераспределения для последнего зенитного комплекса, проверяется возможность назначения ПКР, оставшихся не обстрелянными после первого этапа целераспределения, каждому освободившемуся зенитному огневому средству. Для этого проверяется выполнение двух условий:

– после назначения целей последнему зенитному огневому средству часть целей хотя бы одной из групп осталась не обстрелянной;

– зенитный комплекс способен выполнить еще хотя бы одну стрельбу по оставшимся не обстрелянными ПКР.

После этого получают новые значения матриц количества стрельб, вероятностей выбора и поражающих потенциалов. В соответствии с этими матрицами аналогично первому определяется повторный план целераспределения по оставшимся не обстрелянным воздушным целям.

Если второе условие не выполняется, то часть ПКР будет пропущена. Определяется количество пропущенных целей, а для оставшихся – повторный план целераспределения.

Если ПКР какой-либо группы больше не осталось, то эта группа из дальнейшего рассмотрения исключается.

Если какой-либо зенитный комплекс выведен из строя, то соответствующий ему вектор из дальнейшего рассмотрения исключается.

Окончательными результатами решения являются выработанный план первого, а в случае возможности – повторного целераспределения.

План повторного целераспределения не вырабатывается в любом из следующих двух случаях:

– когда все ПКР включены в план первого целераспределения;

– когда ни одна из не включенных в план первого целераспределения ПКР не может быть включена в план повторного целераспределения.

Результаты исследования и их обсуждение

Следует отметить, что в рассмотренной математической модели задача сохранения максимума боеспособности охраняемого корабля (максимума вероятности его не поражения) заменялась задачей распределения зенитных огневых средств – определение плана целераспределения, обеспечивающего максимальную эффективность каждого зенитного огневом средства по группам ПКР с учетом их опасности (функция веса) – так называемый метод весовых

коэффициентов. (Правомерность такого подхода обоснована в работе Берзина Е. А. «Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем», 1974.)

По существу данного метода получение матрицы целераспределения представляет собой динамический процесс, на каждом шаге которого распределяется только одно зенитное огневое средство, но:

– во-первых, непрерывно (от шага к шагу) пересчитываются весовые коэффициенты (и функции веса) и ограничивающие условия (количество оставшегося боезапаса, количество стрельб, количество оставшихся необстрелянных целей) [15];

– во-вторых, каждое новое зенитное огневое средство распределяется наилучшим образом, гарантирующим максимальный прирост целевой функции [16].

Следует также подчеркнуть, что предлагаемая математическая модель решения задачи целераспределения зенитных огневых средств применима для любого взаимного расположения кораблей ядра и кораблей охранения в порядке, однако оптимальному (целесообразному) варианту решения задачи в смысле максимума предотвращенного ущерба будет отвечать только оптимальный (целесообразный) вариант построения системы зенитного огневом прикрытия и системы ПВО порядка кораблей в целом. При этом слово целесообразный соответствует определенной степени уверенности в том, что искомый экстремум найден.

Не подтверждаются расчетами и являются необоснованными следующие утверждения [17]:

«Зенитные ракетные комплексы большей дальности при целераспределении имеют большую ценность, чем средней... При целераспределении в первую очередь назначение на цель получают зенитные ракетные комплексы того корабля, для которого они представляют наибольшую угрозу, то есть обеспечивается сочетание коллективной обороны и самообороны... Зенитные ракетные комплексы большой и средней дальности могут решать задачи как коллективной обороны, так и самообороны, а зенитные ракетные комплексы малой дальности – только самообороны».

В приведенных утверждениях не принимаются во внимание не только конкретные тактико-технические характеристики каждого из зенитных огневых средств, но и такие важные для оценки эффективности стрельбы факторы, как длины обстреливаемых участков в пределах

действующих зон поражения зенитных комплексов, в частности тот факт, что зенитные огневые средства, предназначенные для работы на больших и средних дальностях, имеют серьезные ограничения по работе в ближней зоне, то есть в зоне непосредственного отражения атак низколетящих воздушных целей.

Выводы

В соответствии с поставленной целью исследования представлена математическая модель и разработанная на ее основе Методика, опубликованная в работах, имеющих закрытый характер, позволяют автоматизировать процесс выработки плана целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО как одиночного корабля, так и в системе ПВО группы надводных кораблей при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет, а потому могут быть рекомендованы для использования в боевых информационно-управляющих системах, как одиночных надводных кораблей, так и в системах автоматизированного боевого управления группы надводных кораблей [18].

Необходимо отметить, что если в противовоздушном бою для решения задачи целераспределения в реальном масштабе времени используется фактически регистрируемая дальность обнаружения ПКР радиолокационными станциями обнаружения надводного корабля (группы кораблей) [19], то при моделировании процесса целераспределения и при оптимизации построения системы зенитного огневого прикрытия и системы ПВО в целом при угрозе атак противокорабельных крылатых ракет в расчетах используется гарантированная дальность обнаружения как квантиль функции распределения непрерывной случайной величины для заданного уровня вероятности обнаружения, а также прогнозируемые направления атаки и тактико-технические характеристики атакующих ПКР, полученные по результатам разведки и анализа обстановки. При этом в расчетах уделяется внимание степени готовности и режиму работы радиолокационных станций обнаружения, критериям обнаружения [20], характеристикам противокорабельных крылатых ракет [21], радиолокационной обстановке, в том числе радиолокационным помехам (активным, пассивным, комбинированным), которые в состоянии создавать противник [22].

Основное отличие рассмотренной модели от реализованных, в частности, в БИУС «Корень», «Пойма», «Лесоруб», «Требование-М», «Сигма-Э», состоит в том, что в ней предусмотрена

возможность оценки своих зенитных огневых средств и ПКР противника при выработке оптимального плана целераспределения на основе детального учета дальности обнаружения ПКР, согласования зон поражения, секторов обстрела, рубежей выполнения задач ПКР, мер взаимной безопасности, электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и др., то есть с учетом действующих зон поражения зенитных огневых средств, а также решение задачи целераспределения во времени.

Алгоритм и программа решения задачи целераспределения с использованием конкретных образцов вооружения представлены в работах, имеющих закрытый характер.

Библиографические ссылки

1. Солдаткин А. Перспективные решения – задачи совершенствования ЗРК МД // Национальная оборона. 2020. № 9. С. 128–131.
2. Шустова Н. А., Степанов В. В. Основы моделирования системы поддержки принятия решений по комплексному применению сил и средств ПВО надводных кораблей // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34, № 2. С. 344–353.
3. Kousalya B., Vasanthi T. Protection of k-out-of-n systems under intentional attacks using imperfect false elements. *International Journal of Performability Engineering*, 2013, 9, 529-537.
4. Мамуиас А., Масленникова Т., Корсунский А. Интегрированные системы управления для надводных кораблей ВМФ // Морской сборник. 2018. № 10. С. 53–55.
5. Guo J., Zhao Z., Zhou J. Evaluation of Intelligent Air Defense algorithm based on Machine Learning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 769, 042118.
6. Обнаружение и классификация малоразмерных объектов на изображениях, полученных радиолокационными станциями с синтезированной апертурой / Е. А. Казачков, С. Н. Матюгин, И. В. Попов, В. В. Шаронов // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2018. № 1. С. 10–15.
7. Денисов М. Модернизация американской многофункциональной системы управления оружием «Иджис» // Зарубежное военное обозрение. 2021. № 7. С. 77–79.
8. Wang H., Chen S., Xu F., Jin Y.-O. Application of deep-learning algorithms to MSTAR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, 3743-3745.
9. Корабельников А. П., Крилицкий Ю. В. Тенденции применения сил и средств воздушного нападения и направления совершенствования ПВО // Военная мысль. 2021. № 2. С. 28–35.
10. Смирнов М. А. Методика оценки эффективности информационных средств ЗРК (ЗРС) при обнаружении ГЗКР с учетом динамики ЭПР цели //

Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2019. № 1. С. 18–23.

11. Hampton B. Weapons Systems: *Background and Issues for Congress*, 2018.

12. Федоров А., Листовский В. Любая цель будет уничтожена // Национальная оборона. 2020. № 8. С. 36–43.

13. Друзин С. В., Горевич Б. Н. Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 2. С. 6–31.

14. Созинов П. А. Актуальные задачи математического моделирования систем ВКО // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 3. С. 17–26.

15. Сильников М. В., Лазоркин В. И. Формализация системы противовоздушной обороны и системы активной защиты объектов и средств поражения в условиях массированного налета средств воздушно-космического нападения // Известия РАН. 2021. Вып. 117. С. 25–32.

16. Горев А. Г., Козлов И. Л. Количественное обоснование решений на основе аналитического моделирования // Военная мысль. 2020. № 7. С. 117–122.

17. Оркин Б. Д., Оркин С. Л., Дьячук А. К. Структура алгоритма целераспределения средств противовоздушной обороны // Труды МАИ. 2012. № 62. С. 145–149.

18. Бурькин А.А. Реализация элементов технологии искусственного интеллекта в перспективных АСУ надводного корабля и АСУ временного формирования сил ВМФ // Военная мысль. 2021. № 4. С. 50–58.

19. Измайлов Роман. Вчера, сегодня и завтра противовоздушной обороны кораблей ВМФ России // Национальная оборона. 2021. № 8. С. 94–101.

20. Бубенищев А. А., Болдырев А. А. Оценка эффективности анализа радиоэлектронной обстановки в условиях контррадиоподавления // Военная мысль. 2019. № 7. С. 99–104.

21. Егоров К. Перспективы развития высокоточных средств поражения класса «воздух – земля» // Зарубежное военное обозрение. 2020. № 12. С. 42–55.

22. Обеспечение стойкости корабельных радиоэлектронных систем / А. Харланов, Л. Попов, И. Кузнецов, А. Жидков // Морской сборник. 2019. № 6. С. 65–68.

References

1. Soldatkin A. [Promising solutions - the tasks of improving AMS of SR]. *Natsional'naya oborona*, 2020, no. 9, pp. 128-131 (in Russ.).

2. Shustova N.A., Stepanov V.V. Fundamentals of modeling a decision support system for the integrated use of surface ship air defense forces and assets. *Software products and systems*, 2021, vol. 34, no. 2, pp. 344-353 (in Russ.).

3. Kousalya, B., Vasanthi, T. Protection of k-out-of-n systems under intentional attacks using imperfect false

elements. *International Journal of Performability Engineering*, 2013, 9, pp. 529-537.

4. Mattias A., Maslennikova T., Korsunskiy A. Integrated control systems for surface ships of the Navy. *Marine collection*, 2018, no. 10, pp. 53-55 (in Russ.).

5. Guo, J., Zhao, Z., Zhou, J. Evaluation of Intelligent Air Defense algorithm based on Machine Learning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 769, 042118.

6. Kazachkov E.A., Matyugin S.N., Popov I.V., Sharonov V.V. Detecting and classifying of small objects on images obtained by synthetic aperture radar stations. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2018, no. 1, pp. 10-15 (in Russ.).

7. Denisov M. Modernization of American multifunctional weapon control system "Aegis". *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2021, no. 7, pp. 77-79 (in Russ.).

8. Wang H., Chen S., Xu F., Jin Y.O. Application of deep-learning algorithms to MSTAR data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2015, 3743-3745.

9. Korabel'nikov A.P., Krinitskii Yu.V. [The trends in the use of air attack forces and means and air defense improvement lines]. *Voennaya mysl'*, 2021, no. 2, pp. 28-35 (in Russ.).

10. Smirnov M.A. [Methodology for evaluating effectiveness of air defense missile system (ADMS) information resources when detecting a hypersonic cruise missile, with account for the dynamic target scattering crossover]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2019, no. 1, pp. 18-23 (in Russ.).

11. Hampton B. Weapons Systems: *Background and Issues for Congress*, 2018.

12. Fedorov A., Listovskii V. [Any target will be destroyed]. *Natsional'naya oborona*, 2020, no. 8, pp. 36-43 (in Russ.).

13. Druzin S.V., Gorevich B.N. [Methodology for developing a conceptual design of radar stations for prospective air defence weapon systems]. *Vestnik Koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2020, no. 2, pp. 6-31 (in Russ.). DOI: 10.38013/2542-0542-2020-2-6-31.

14. Sozinov P.A. [Crucial tasks of mathematical modeling of aerospace defense systems]. *Vestnik koncerna VKO "Almaz - Antey"*, 2017, no. 3, pp. 17-26 (in Russ.).

15. Sil'nikov M.V., Lazorkin V.I. [Formalization of the air defence system and active object protection systems from means of destruction in conditions of massive raid of means of aerospace attack]. *Izvestiya RARAN*, 2021, vol. 117, pp. 25-32 (in Russ.).

16. Gorev A.G., Kozlov I.L. [Quantitative justification of decisions based on analytical modeling]. *Voennaya mysl'*, 2020, no. 7, pp. 117-122 (in Russ.).

17. Orkin B.D., Orkin S.D., Dyachuk A.K. [The structure of the target allocation algorithm for air defense means of a ship group]. *Trudy MAI*, 2012, no. 62, pp. 145-149 (in Russ.).

18. Burykin A.A. Implementing elements of the artificial intelligence technology in advanced ACS of the

surface ship and ACS of a provisional Navy force formation. *Voennaya mysl'*, 2021, no. 4, pp. 50-58 (in Russ.).

19. Izmailov R. [Yesterday, today and tomorrow of air defense of RN ships]. *Natsional'naya oborona*, 2021, no. 8, pp. 94-101 (in Russ.).

20. Bubenshchikov A.A., Boldyrev A.A. Assessing the efficiency of electronic situation analysis in condi-

tions of counter-suppression. *Voennaya mysl'*, 2019, no. 7, pp. 99-104 (in Russ.).

21. Egorov K. [Development prospects of precision-guided weapon of "air-ground" class]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2020, no. 12, pp. 42-55 (in Russ.).

22. Kharlanov A., Popov L., Kuznetsov I., Zhidkov A. [Stability providing of shipboard electronic systems]. *Morskoi sbornik*, 2019, no. 6, pp. 65-68 (in Russ.).

Mathematical Model for Solving Problem of Target Allocation of Antiaircraft Fire Weapons in AD Contour of Surface Ship (in AD System of Group of Ships) in Case of Attack Threat and Repelling Attacks of Anti-Ship Cruise Missiles

V.A. Galiy, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

S.N. Ivanishev, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.N. Bukriy, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The improvement of the algorithms of processing information and controlling of weapons systems in combination with their automation, which can significantly reduce time from the moment of detection of air targets to their destruction, is a promising direction in organizing of building and effective combat use of such complex systems as the contour of antiaircraft defense (AD) of a single surface ship and the AD system of a group of the surface ships.

The transition to the creation and use of the precision-guided long-range munition, e.g. anti-ship missiles (AShM), allows to destroy ships from remote lines without entering the zone of the fighter aircraft action and reach of the anti-aircraft missile system.

When repelling attacks of anti-ship cruise missiles, a poor-quality solution of the problem of the target allocation of the antiaircraft fire weapons of a ship (group of ships) does not allow to realize the combat capabilities of the AD contour (system) as a whole, which leads to a loss of combat capability of the ship (ships).

The main difference between the proposed mathematical model for solving the target allocation problem and those implemented in the combat information and controlling systems of the surface ships is the fact that it provides the possibility of evaluating own antiaircraft fire weapons and enemy's AShM when developing an optimal target allocation plan based on a detailed account of the AShM detection range, coordination of the destruction zones, sectors of fire, lines of the implementation of the AShM tasks, mutual security measures, electromagnetic compatibility of the electronic means, i.e. taking into account the existing zones of the destruction of the antiaircraft fire weapons, as well as solving the problem of the target allocation in time. The solution of the task is carried out both directly during the antiaircraft combat, and in the case of the attack threat of the AShM. In its turn, the last one makes it possible to optimize building of the antiaircraft fire covering system and the AD system of both a single surface ship and the group of the surface ships as a whole, and to optimize the solution of the target allocation problem, in particular.

The presented mathematical model and the algorithm and program developed on its basis can be recommended after appropriate modification for inclusion in both automated combat control systems and respectively combat information and control systems of connections of surface ships and single ships, that allows to solve the problem of the target allocation on a time scale close to real.

Keywords: antiaircraft defense, anti-ship cruise missiles, target allocation of antiaircraft fire weapons, detection line of radar station, degree of danger of air target, dead time of complex.

Получено 25.03.2022

Образец цитирования

Галий В. А., Иванисhev С. Н., Букрий В. Н. Математическая модель решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО надводного корабля (системе ПВО группы кораблей) при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 2. С. 23–33. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-23-33.

For Citation

Galiy V.A., Ivanishev S.N., Bukriy V.N. [Mathematical Model for Solving Problem of Target Allocation of Antiaircraft Fire Weapons in AD Contour of Surface Ship (in AD System of Group of Ships) in Case of Attack Threat and Repelling Attacks of Anti-Ship Cruise Missiles]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 23-33 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-2-23-33.