

УДК: 355.469.34

DOI: 10.53816/20753608_2024_1_51

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ****PROCEDURE FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS
OF GROUP USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES***Академик РАН В.П. Кутахов, Г.Н. Насмас, А.Е. Титов, А.Л. Смолин**НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»**V.P. Kutakhov, G.N. Nastas, A.E. Titov, A.L. Smolin*

В статье проведен обзор существующих подходов к определению эффективности применения образцов вооружения, военной техники и воинских формирований. Выбран критерий и показатель эффективности группового применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Приведена разработанная методика оценки эффективности группового применения БПЛА при поражении групповых наземных целей противника. **Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, группа, групповое применение, эффективность.

The article provides an overview of existing approaches to determining the effectiveness of the use of weapons, military equipment and military formations. A criterion and an indicator of the effectiveness of the group use of unmanned aerial vehicles have been selected. The developed methodology for evaluating the effectiveness of group use in defeating group ground targets of the enemy is presented.

Keywords: unmanned aerial vehicle, group, group application, efficiency.

Массовое применение комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) в современных вооруженных конфликтах доказало на практике их высокую боевую эффективность. Опыт применения беспилотной авиации убедительно показывает, что при относительно невысокой стоимости БПЛА их применение может влиять на ход и даже исход боевых действий.

Когда рассматривают групповое применение летательных аппаратов, часто смешиваются два понятия: полет строем, как в строго определенном взаимном расположении летательных аппаратов при их совместном полете, и групповое применение БПЛА, как вид боевых действий, предполагающий решение единой боевой задачи путем рациональной перегруппировки при взаимном информационном, помеховом и огневом взаимодей-

ствии в группе летательных аппаратов. При этом следует выделить основные преимущества группового (коллективного) применения БПЛА: массированное применение средств, больший пространственный охват, возможность реконфигурации группы в полете в зависимости от текущей ситуации и при потере летательных аппаратов, возросший набор выполняемых функций, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемую за счет возможности перераспределения целей между элементами группы, быстрота реагирования при изменении обстановки, взаимное прикрытие при противодействии противника.

Группу (коллектив) БПЛА можно охарактеризовать основными свойствами, влияющими на эффективность применения: количественно-качественным составом, иерархией построения,

способами управления, уровнем интеллектуализации и автономности, способами и тактическими приемами применения.

При оценке эффективности применения необходимо выбрать критерий и показатель боевой эффективности, позволяющие учитывать основные преимущества и особенности БПЛА в составе групп при решении типовых боевых задач.

Рассматриваемая боевая задача должна включать в себя возможность применения разнородных БПЛА, а оценка эффективности должна охватывать весь цикл боевого применения: целеполагание, постановка боевой задачи, процессы поиска заданных целевых объектов, их распознавания, решение задачи рационального распределения обнаруженных и распознанных целей по средствам воздействия (ударным БПЛА), нанесение удара по целевым объектам противника и контроль результатов удара.

Наиболее остро стоит вопрос противодействия средств ПВО группам атакующих БПЛА, поэтому данное направление исследований является активно развивающимся [1–3]. В ОБПЛА-сти оценки эффективности применения групп БПЛА по наземным целям исследовательских работ значительно меньше, что требует проведения дополнительных исследований.

Обзор существующих подходов к определению эффективности применения образцов вооружения, военной техники и воинских формирований

Классическим подходом к оценке эффективности образцов вооружения и военной техники (ВВТ) и оснащенных ими воинских формирований является оценка их боевых потенциалов. Этому направлению посвящен ряд работ отечественных ученых [4, 5]. В основе этой теории использованы экспертные процедуры оценивания и эквивалентирования боевых потенциалов ВВТ и воинских формирований (ВФ) по значениям первичных тактико-технических характеристик. Под боевым потенциалом образца ВВТ понимается интегральная характеристика его предельных боевых возможностей, выраженная через основные функциональные свойства и тактико-технические характеристики (ТТХ) образцов ВВТ, и эта характеристика не учитывает эффект взаимодействия отдельных образцов.

В работе [6] боевые действия авиационных систем представляются в виде замкнутого цикла операций. В данном подходе группа БПЛА представляется в виде сетевой системы, а все ее элементы (БПЛА) считаются узлами и могут быть классифицированы. В этом подходе боевая эффективность поражения цели равна сумме боевых возможностей всех соответствующих операционных циклов.

В рамках исследования потенциальных преимуществ «мозаичного» подхода к боевым действиям американской исследовательской организацией RAND была разработана мультиагентная модель, целью которой была постановка задачи «обработки» группой летательных аппаратов (ЛА) совокупности целевых объектов [7]. Оценке эффективности выполнения коллективных миссий многоагентной гетерогенной группой, состоящей из элементов с различным функциональным назначением, посвящены также работы [8–10]. В данных подходах характеристику эффективности миссии предложено формировать как взвешенную сумму нормированных показателей параметров функций агентов с весами «значимость функции для миссии» и «ценность объекта» для группировки.

В целом, исходя из анализа представленных подходов можно заключить, что классические подходы в основном направлены на оценку эффективности одиночных БПЛА (образцов ВВТ) и не отражают особенности боевых действий БПЛА в составе авиационных групп, тогда как новые методы оценки эффективности еще не до конца отработаны и ОБПЛА-дают различными методологическими недостатками.

Методика оценки эффективности группового применения беспилотных летательных аппаратов

Выбор критерия и показателя эффективности группового применения беспилотных летательных аппаратов

Эффективность боевых действий определяется как степень соответствия их реального результата требуемому, определяемому поставленной боевой задачей. Таким образом, эффективность группового применения БПЛА определяется как мера свойства группы (коллектива) выполнять

БПЛА боевые задачи по предназначению в различных условиях боевой обстановки при рациональном распределении функций между элементами группы и глубокой информационной связи.

Учитывая особенности и многообразие влияющих факторов на групповое применение БПЛА, в методике целесообразно ввести следующие допущения.

В качестве типовой боевой задачи рассматриваются разведывательно-ударные действия группы БПЛА по наземным целевым объектам.

Действия группы БПЛА включают в себя: поиск, обнаружение и распознавание заданных целевых объектов; целераспределение и применение авиационных средств поражения (АСП) по заданным целевым объектам.

Группа БПЛА состоит только из разведывательных (оснащенных разнородными средствами разведки) и ударных (оснащенных высокоточными средствами поражения) БПЛА.

Средства противодействия противника, прикрывающие целевые объекты противника, воздействуют на БПЛА на этапах поиска целей и применения средств поражения.

В качестве целевого объекта рассматривается сложная рассредоточенная групповая цель. Под групповой целью понимается совокупность организационно или функционально связанных элементарных целей (элементов), поражение которых является боевой задачей. При этом элементы отличаются друг от друга по функциональному предназначению, уязвимости и важности с точки зрения влияния на потенциальный ущерб «нашим» войскам.

Рассматривается один боевой вылет группы БПЛА для нанесения максимального ущерба заданному целевому объекту.

В качестве критерия эффективности группового применения БПЛА в методике принимается нанесение максимального ущерба сложной рассредоточенной групповой цели. В данном случае под ущербом понимается поражение максимального числа элементарных целей в составе групповой цели (системы) с учетом важности каждой элементарной цели.

В качестве показателя эффективности группового применения БПЛА в работе принимается математическое ожидание числа пораженных объектов (элементарных целей), также с учетом коэффициента важности, то есть в показателе по-

ражаемых объектов с коэффициентом не просто объекты, а их весовые коэффициенты — их весовая важность v_j . Важность определяется как количественная характеристика функциональных свойств объекта (цели), потенциально влияющая на ход противодействия в конкретной обстановке.

В общем виде показатель эффективности группового применения БПЛА записывается следующим образом:

$$M_y = \sum_{j=1}^M v_j \times \left[1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - P_{\text{обн}_j} \cdot P_{\text{расп}_j} \cdot P_{\text{цраспр}} \cdot P_{\text{пор}_{ij}} \gamma_{ij} \right) \right], \quad (1)$$

где M — количество элементарных целей;

N — количество БПЛА;

v_j — коэффициент важности j -го элементарного объекта в составе групповой цели. Под важностью элементарного объекта в данном случае понимается его функциональный вклад в реализацию боевых возможностей группового объекта;

$P_{\text{обн}_j}$ — вероятность обнаружения группой БПЛА j -го элементарного объекта;

$P_{\text{расп}_j}$ — вероятность распознавания группой БПЛА j -го элементарного объекта;

$P_{\text{цраспр}}$ — вероятность нахождения наилучшего целераспределения элементарных целей между БПЛА огневого поражения;

$P_{\text{пор}_{ij}}$ — вероятность поражения i -м БПЛА j -го элементарного объекта;

γ_{ij} — показатель воздействия i -го БПЛА на j -й элементарный объект из состава групповой цели.

Далее определим каждый компонент выражения (1).

Для определения максимального ущерба необходимо выполнить ранжирование элементарных объектов противника в составе групповой цели по важности, определить вероятности обнаружения и распознавания элементарных целей, а также порядок целераспределения между БПЛА и целевыми объектами.

Определение важности элементарных объектов из состава групповой цели v_j

Ранжирование объектов противника по важности будет основываться на предпочтениях лица, принимающего решение (ЛПР), и мнениях

экспертов штаба по имеющейся разведывательной информации, знаниям местности и условий боевых действий. Задача определения важности объектов группировки противника, как и оценка важности целей группового объекта, принятого к поражению группой БПЛА, являются сложными, так как объекты ОБПЛА имеют различными свойствами и характеристиками, выраженными в разных шкалах измерений. Кроме того, эти характеристики меняются во времени. Характер решаемых задач, условия боевых действий могут менять важность объектов.

Поэтому для ранжирования по важности объектов и целей группировки противника предлагается частная методика, основанная на построении обобщенной функции ценности.

Пусть имеется M объектов противника a_j , имеющих вектор свойств $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$. Каждое свойство x_μ количественно характеризует одно или несколько функциональных свойств объекта и выступает частным показателем важности объекта. При этом свойства линейно независимы. Совокупность описаний всех объектов a_j составляет матрицу объектов-свойств:

$$\mathbf{X} = \mathbf{x}_i(\mathbf{a}_i)_{n \times m} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(\mathbf{a}_1) & \dots & \mathbf{x}_m(\mathbf{a}_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{x}_1(\mathbf{a}_n) & \dots & \mathbf{x}_m(\mathbf{a}_n) \end{bmatrix}.$$

Тогда обобщенная функция важности v_j объекта a_j может быть вычислена по формуле:

$$v_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{\mu=1}^m \lambda_\mu v_\mu(x_\mu(a_j)),$$

где λ_μ — шкалирующий коэффициент.

Значения v_j и ее компонент v_μ находятся в интервале $[0, 1]$, при этом:

$$\sum_{\mu=1}^m \lambda_\mu = 1, \lambda_\mu > 0.$$

Заключительный этап ранжирования объектов группировки противника по важности заключается в упорядочивании элементов вектора с помощью сортировки.

Для выбора элементарных целей, принятых к поражению, по этой методике рассчитываются их важности. В этом случае значение важности

будет учитываться в определении ущерба противника.

Далее, учитывая, что группа ведет разведывательно-ударные действия, важным элементом в оценке эффективности будет оценка эффективности группового поиска.

Определение вероятности обнаружения целевых объектов $P_{\text{обн}j}$

Вероятность обнаружения и распознавания наземных объектов противника будет зависеть от количества средств поиска в группе, типа и характеристик средств обнаружения.

$$P_{\text{обн}ij} = e^{-\left(\frac{D}{D_{\text{обн}}}\right)^\beta},$$

где D — дальность поиска;

$D_{\text{обн}}$ — дальность обнаружения цели;

β — коэффициент, характеризующий средство обнаружения (1 — оптико-электронные средства (ОЭС); 2 — радиоэлектронные средства (РЭС); 3 — радиолокационная разведка (РЛР)).

Вероятность обнаружения j -го объекта при групповом применении средств воздушной разведки определяется по формуле интегральной вероятности:

$$P_{\text{обн}j} = 1 - \prod_{i=1}^L (1 - P_{\text{обн}ij}),$$

где L — количество независимых средств разведки;

$P_{\text{обн}ij}$ — вероятность обнаружения i -м средством поиска j -го объекта.

Таким образом, организованное групповое применение разведывательных БПЛА позволит нарастить поисковый потенциал при поиске объектов противника, уменьшит время поиска и позволит достичь заданных значений вероятности обнаружения целей.

Определение вероятности распознавания целевых объектов $P_{\text{расп}j}$

Для задачи распознавания объектов развернутой (дифференцированной) характеристикой качества распознавания является полная матрица вероятностей распознавания. Матрица вероятностей

распознавания дает вероятностную оценку всех возможных ответов при классификации объектов, которые составляют полную группу.

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{00} & \dots & P_{0j} \\ \dots & \dots & \dots \\ P_{k0} & \dots & P_{kj} \end{bmatrix}.$$

Матрица характеризует эффективность распознавания до самой высокой степени подробности применительно к рассматриваемой классификации.

Вероятность распознавания $P_{\text{расп}}$ представляет частоту правильного распознавания объектов:

$$P_{\text{расп}} = \frac{n_1}{n_2},$$

где n_1 — число правильно распознанных объектов;

n_2 — число объектов, принятых к распознаванию.

Значение разрешения, при котором в каждом конкретном случае реализуется возможность распознавания до заданного уровня детальности, является случайной величиной. Можно полагать, что такие случайные величины подчиняются нормальному закону распределения Гаусса. В этом случае вероятность распознавания можно определить из выражения, параметры которого L_m и L_{m0} известны:

$$P(L_m \geq L_{m0}) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{L_{m0}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx,$$

где L_m — заданное разрешение средства наблюдения;

L_{m0} — полученное разрешение по результатам натурных экспериментов.

Комплексирование средств распознавания предполагает оценку мультипликативного эффекта прироста результативности распознавания:

$$P_{\text{расп}_j} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{\text{расп}_i}),$$

где N — количество средств наблюдения;

$P_{\text{расп}_i}$ — вероятность распознавания i -м средством наблюдения.

Вероятность распознавания определяет вероятность правильного оценивания важности

и ранжирования одиночной цели в формуле (1) и для решения задачи целераспределения.

Решение задачи целераспределения целевых объектов $P_{\text{целерасп}}$

Согласно постановке задачи групповой объект противника представлен M элементарными объектами со своими характеристиками, боевыми возможностями и важностью v_j . Объекты из N и M связаны между собой некоторыми системами отношений. Система геометрических и информационных соотношений определяет взаимное расположение каждого i -го БПЛА относительно целей и возможности получения информации сенсорной системой каждого БПЛА о каждом элементарном элементе групповой цели:

$$\rho(t) = \begin{bmatrix} \rho(t)_{11} & \dots & \rho(t)_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \rho(t)_{N1} & \dots & \rho(t)_{NM} \end{bmatrix};$$

$$s(t) = \begin{bmatrix} s(t)_{11} & \dots & s(t)_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ s(t)_{N1} & \dots & s(t)_{NM} \end{bmatrix}.$$

Система отношений воздействия БПЛА на каждую цель и влияния среды:

$$B(t) = \begin{bmatrix} B(t)_{11} & \dots & B(t)_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ B(t)_{N1} & \dots & B(t)_{NM} \end{bmatrix};$$

$$E(t) = \begin{bmatrix} E(t)_{11} & \dots & E(t)_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ E(t)_{N1} & \dots & E(t)_{NM} \end{bmatrix}.$$

Каждое конкретное целераспределение определяет конкретное прогнозируемое значение эффективности нанесения удара по групповой цели, выражающегося, как мы определили выше, уровнем нанесенного ущерба. Задача целеуказания при этом сводится к максимизации значения критерия $\Xi(t)$.

$$\begin{aligned} \Xi(t) &= \\ &= \max_{\rho(t), s(t), B(t), E(t)} Y(\rho(t), s(t), B(t), E(t); t). \end{aligned}$$

Решением задачи целераспределения в группе БПЛА является матрица показателей воздействия γ_{ij} , состоящая из единиц и нулей, определяющих назначение объекта из множества M элементу из множества N , то есть определяющих каждому конкретному БПЛА действовать по конкретному элементарному объекту:

$$\Gamma = \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NM} \end{vmatrix}.$$

Элементы матрицы воздействия γ_{ij} i -го БПЛА по j -му элементарному объекту принимают значения либо 0, либо 1. Соответственно, $\gamma_{ij} = 1$, когда i -й БПЛА получает задачу воздействия на j -й элементарный объект, и $\gamma_{ij} = 0$, когда i -й БПЛА не получает задачу атаки j -го объекта.

Эта задача является наименее изученной. Точные значения параметров и функциональных отношений, характеризующих достоверность правильного решения задачи целераспределения при коллективном взаимодействии БПЛА представлены быть не могут на этом этапе исследований проблемы. Исходя из этого, в данной методике применяется характеристика целераспределения — вероятность нахождения наилучшего целераспределения $P_{\text{црасп}}$, используемая в обобщенной формуле определения эффективности группового применения БПЛА.

В дальнейших исследованиях, по мере разработки аппарата целераспределения, в методику будут вводиться уточненные описания эффективности этого элемента управления групповым поведением БПЛА.

Определение вероятности поражения элементарных целей

Вероятность поражения элементарной малоразмерной цели (автотранспорт, бронетранспортер и т.д.) равна:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{н}} \cdot P_{\text{у}},$$

где $P_{\text{н}}$ — вероятность накрытия цели оБПЛА-стью (зоной) возможного поражения отстреливаемых АСП;

$P_{\text{у}}$ — условная вероятность поражения цели при накрытии ее данной зоной.

Вероятность $P_{\text{н}}$ определяется по известной методике, учитывающей параметры: радиус круга, равного по площади приведенной площади поражения одиночной цели данным АСП; радиус области (зоны) разлета АСП; среднее квадратическое отклонение технического рассеивания средства поражения; угол пикирования БПЛА при атаке цели; $D_{\text{стр}}$ — дальность применения оружия в пуске; приведенная площадь поражения цели.

Условная вероятность поражения цели при накрытии ее зоной возможного поражения (ЗВП) определяется по формуле:

$$P_{\text{у}} = n_{\text{сп}} \cdot \left(\frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{н}} + r_{\text{т}}} \right)^2 \cdot k,$$

где $n_{\text{сп}}$ — количество АСП, израсходованных за стрельбу;

$r_{\text{н}}$ — радиус круга, равного по площади приведенной площади поражения одиночной цели данным АСП;

$r_{\text{т}}$ — радиус оБПЛА-сти (зоны) разлета АСП;
 k — коэффициент, учитывающий перекрытие АСП в ЗВП.

Определение потерь БПЛА от противодействия противника ввиду ограниченности формата данной статьи не рассматриваем, они рассчитываются по известным методикам.

Вывод

Классические подходы оценки эффективности в основном направлены на оценку эффективности одиночных БПЛА и не отражают особенности боевых действий БПЛА в составе группы. Новые методы оценки эффективности еще не до конца отработаны.

Сложность функционирования группы БПЛА, как сложной многоэлементной системы с обширными управленческими и информационными взаимосвязями между элементами и подгруппами, функционирующей в среде, оБПЛА-дающей высокой степенью неопределенности, требует новых подходов к оценке ее эффективности применения.

Особенности динамичности и скоротечности современных боевых действий определяют требования к пересмотру применяемых показателей и критериев в оценке эффективности.

В статье предложена методика оценки, которая позволяет оценить эффективность группового применения БПЛА при разведывательно-ударных действиях по наземным целям.

Введение элементов интеллектуализации в состав групп БПЛА также потребует новых подходов в исследованиях эффективности применения.

Литература

1. Макаренко С.И., Тимошенко А.В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147–197.

2. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде: монография. М.: Наука, 2013. 168 с.

3. Ростопчин В.В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона — проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. — URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye летательные аппараты_i_protivovozdusnaa_oborona_roblemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения: 29.10.2023).

4. Горчица Г.И., Степанов В.Д. Проблема инвариантности интегральных оценок эффективности авиационных комплексов и пути ее решения // Известия Российской академии ра-

кетных и артиллерийских наук. 2020. № 4 (114). С. 48–54.

5. Брезгин В.С., Буравлев А.И., Цырендоржиев С.Р. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов ВВТ и воинских формирований // Вооружение и экономика. 2009. № 3 (7). С. 4–12.

6. Niping Jia, Zhiwei Yang, and Kewei Yang An operational effectiveness evaluation method of the swarming UAVs air combat system MATEC Web of Conferences 277, 02010 (2019).

7. Timothy R. Gulden, Jonathan Lamb, Jeff Hagen, Nicholas A. O'donoghue Modeling Rapidly Composable, Heterogeneous, and Fractionated Forces // [Электронный ресурс]. 2019. — URL: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4396.html (дата обращения: 29.10.2023).

8. Абросимов В.К., Седов А.Н. Эффективность выполнения коллективной миссии многоагентной гетерогенной группой // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 1 (231). С. 6–19.

9. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 3–24.

10. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения [под ред. В.И. Сырямкина]. Томск: STT, 2018. 140 с.

11. Кутахов В.П., Мещеряков Р.В. Управление групповым поведением беспилотных летательных аппаратов: постановка задачи применения технологий искусственного интеллекта // Проблемы управления. 2022. № 1. С. 67–74.