

19. Savinkova S.A. Razrabotka metoda otslezhivaniya peremeshcheniy ob"ektov [Development of a method for tracking the movement of objects], *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of modern research], 2021, No. 1-6 (39), pp. 28-36.
20. Zhang J., Shao L., Zhang L., Jones G. Intelligent video event analysis and understanding, *Studies in Computational Intelligence*. Berlin, Germany: Springer, 2010, Vol. 332. DOI: 10.1007/978-3-642-17554-1.
21. Abrosimov V.K., Nikonorov V.I. Metodika razmetki dannykh o kompaktnykh skopleniyakh ob"ektov interesa v zadachakh mashinnogo obucheniya [Methodology for marking data on compact clusters of objects of interest in machine learning problems], *Polet* [Polet], 2022, No. 10, pp. 21-28.
22. Mehtap Erguven Influences of Measurement Theory on Statistical Analysis & Stevens' Scales of Measurement, *Journal of Technical Science and Technologies*, 2014, Vol. 2, Issue 1. DOI: <https://doi.org/10.31578/v2i1.52>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. И.В. Соколов.

Абросимов Вячеслав Константинович – Главный научно-исследовательский испытательный межвидовой центр перспективного вооружения Министерства обороны РФ; e-mail: avk787@yandex.ru; г. Москва, Россия; тел.: +79168153512; д.т.н.; с.н.с.; советник РАРАН; в.н.с.

Лапин Сергей Михайлович – e-mail: serg110687@ya.ru; тел.: +79219792431; старший инженер-испытатель.

Abrosimov Viacheslav Konstantinovich – The Main Research and Testing Interspecific Advanced Weapons Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation; e-mail: avk787@yandex.ru; Moscow, Russia; phone: +79168153512; dr. of eng. sc.; senior researcher; advisor to RARAN; leading researcher.

Lapin Sergey Michailovich – e-mail: serg110687@ya.ru; phone: +79219792431; senior test engineer.

УДК 007.52:005: 623.094

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-43-57

Д.Н. Гонтарь, В.В. Соловьев, Р.Ю. Джаныбеков, А.В. Палеев, В.В. Семак

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ БОЕВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-УДАРНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В современной системе вооруженного конфликта, где актуальны гибридные и информационные способы решения боевых задач, становится всё более важным разрабатывать эффективные методы оценки боевых возможностей разведывательно-ударных робототехнических систем. Данное исследование направлено на создание универсального метода для оценки таких систем в условиях реальной боевой среды, обеспечивая комплексный подход к измерению их эффективности. Авторы делают акцент на интеграции алгоритмических решений, предназначенных для анализа эффективности современного вооружения и военной техники, что позволяет учесть широкий диапазон переменных и тактико-технических характеристик, характерных для нынешней боевой обстановки. В работе особое внимание уделено выявлению ключевых характеристик наземных боевых роботизированных комплексов и исследованию их использования в группах. Это открывает пути для повышения боевой эффективности, уменьшения рисков для личного состава и улучшения процессов принятия решений. С учетом внедрения автономных технологий исследование подчеркивает значимость роботизации в контексте военных действий, акцентируя на необходимости использования машин в местах высокого риска для человека. Проанализировав существующие методики оценки боевой эффективности ударно-разведывательных образцов вооружения и военной техники, авторы предложили алгоритм, который принимает во внимание уникальные требования и характеристики роботизированных систем, включая их огневую мощь, мобильность и выживаемость. Этот алгоритм может стать основой для разработки систем управления роботизированными комплексами следующего поколения, что обеспечит их повышенную боевую эффективность и способность к эффективной работе в составе групп

военных операций. Таким образом, результаты данного исследования представляют значительный вклад в область военной робототехники, предлагая подходы, которые помогут в разработке и оптимизации роботизированных боевых систем. Эти наработки могут служить основой для улучшения стратегий применения таких систем на поле боя.

Робототехнический комплекс; боевая эффективность; группа; алгоритм; боевой потенциал.

D.N. Gontar, V.V. Soloviev, R.Yu. Dzhanbekov, A.V. Paleev, V.V. Semak

ALGORITHM FOR ASSESSING THE COMBAT EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF A RECONNAISSANCE-STRIKE ROBOTIC COMPLEX FOR MILITARY PURPOSES

In the modern system of armed conflict, where hybrid and informational methods of solving combat tasks are relevant, it becomes increasingly important to develop effective methods for assessing the combat capabilities of reconnaissance-strike robotic systems. This research is aimed at creating a universal method for evaluating such systems in real combat conditions, ensuring a comprehensive approach to measuring their effectiveness. The authors emphasize the integration of algorithmic solutions designed to analyze the effectiveness of modern weapons and military equipment, allowing for a wide range of variables and tactical-technical characteristics typical of the current combat situation. The work pays special attention to identifying key characteristics of ground combat robotic complexes and investigating their use in groups. This opens paths for increasing combat effectiveness, reducing risks for personnel, and improving decision-making processes. Considering the implementation of autonomous technologies, the study highlights the significance of robotization in the context of military actions, focusing on the necessity of using machines in high-risk areas for humans. By analyzing existing methodologies for assessing the combat effectiveness of reconnaissance-strike samples of weapons and military equipment, the authors proposed an algorithm that takes into account the unique requirements and characteristics of robotic systems, including their firepower, mobility, and survivability. This algorithm can become the basis for the development of control systems for the next generation of robotic complexes, ensuring their increased combat effectiveness and ability to work effectively as part of groups in military operations. Thus, the results of this research represent a significant contribution to the field of military robotics, offering approaches that will help in the development and optimization of robotic combat systems. These developments can serve as a basis for improving strategies for the use of such systems on the battlefield.

Robotic complex; combat effectiveness; group; algorithm.

Введение. Современные вызовы в военной сфере требуют от Вооруженных Сил РФ адаптации к быстро меняющейся обстановке, основываясь на стратегии разработки и внедрения нового вооружения в рамках госпрограммы вооружений на 2018-2027 годы. Увеличение динамики и технологического уровня ведения войн подчеркивает необходимость пересмотра военного планирования. Согласно [1], «отдельным важным направлением развития системы вооружения должна стать роботизация – создание и внедрение в войсках роботизированных комплексов воздушных (дистанционно пилотируемых летательных аппаратов), наземных, надводных, подводных. Это не дань моде, а осознанный шаг, обусловленный необходимостью замены военнослужащего при выполнении задач, сопряженных с риском для жизни, либо тех, которые не могут быть выполнены пилотируемыми комплексами».

Развитие роботизированных систем в военной сфере является ключевым аспектом модернизации вооружения и военной техники, направленным на внедрение автономных технологий [2, 3]. Целью такой модернизации является не только повышение эффективности военной техники, но и существенное уменьшение рисков для жизни военнослужащих. Внедрение беспилотных систем становится фундаментом для создания вооружения нового поколения и открывает перспективы для кардинального изменения тактики боевых действий, делая их более безопасными и эффективными.

В ВС РФ наблюдается отсутствие методик для группового использования робототехнических комплексов (РТК) в разных условиях, что ограничивает их эффективность на основе экспертных оценок и опыта [4]. Для повышения эффективности РТК необходимо разработать инструменты для поддержки решений, прогнозирующих исходы операций. Современные вызовы требуют пересмотра подходов к военному планированию и разработку новых методологий для оценки боевых возможностей и оптимизации состава войск.

Анализ методов и подходов. Для оценки боевых возможностей вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ) на практике часто прибегают к двум основным методам: анализу статистических данных о прошлых военных операциях, включая опыт Второй мировой войны, и использованию метода боевых потенциалов для определения оперативно-тактических параметров. Эти методы продолжают оставаться актуальными, хотя и требуют дополнительного анализа и адаптации к меняющимся условиям ведения современных военных действий. Их совершенствование поможет улучшить точность прогнозов и эффективность планирования операций, учитывая новые военные технологии и методы ведения боев.

В современной практике для оценки боевого потенциала новейших видов вооружения и военной техники часто используются методы экспертного оценивания [5–7]. К таким методам относятся определение коэффициентов относительной важности [8], анализ иерархий [9], классификация [8] и другие. Эти методы позволяют комплексно оценить характеристики и возможности военной техники, учитывая мнения экспертов в различных областях. Они предоставляют более точную и актуальную информацию о боевом потенциале, что особенно важно при планировании современных военных операций и разработке новых образцов вооружения.

Процесс оценки боевого потенциала военной техники включает в себя ключевые этапы [11, 12]:

1. Определение целей и координация – формируется команда управления с задачей координации оценки, включая специалистов из разных областей.
2. Выбор экспертов – отбираются квалифицированные эксперты через методы самооценки и взаимной оценки.
3. Экспертиза – эксперты оценивают военную технику, используя анкеты, интервью.
4. Анализ результатов – данные анализируются для формирования выводов о боевом потенциале.

Этот сжатый подход обеспечивает объективную оценку, необходимую для военного планирования и развития вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ).

Методы экспертного оценивания военной техники основываются на предположении о простоте и суммируемости боевых действий, а также на интуитивном понимании сравнения различных типов вооружения. Оценка боевого потенциала зависит не от объективных характеристик военной техники, а от субъективной информации от экспертов. Доверие к этой информации опирается на компетентность, опыт и психологическую устойчивость экспертов. Однако, при включении в оценку боевого потенциала элементов, таких как разведывательные и управляющие системы, методы сталкиваются с проблемами из-за необходимости присвоения коэффициентов на основе субъективного суждения, без возможности объективной проверки. Это подход не учитывает специфику, масштабы и условия военных действий, что ограничивает его точность и надежность.

Вторая группа методов для определения боевого потенциала вооружения основана на вычислении коэффициентов боевой соизмеримости [12–15]. Эти методы включают в себя анализ технико-тактических характеристик (ТТХ), огневых возможностей, моделирование боевых действий и компенсацию для оценки сравнимых образцов военной техники.

Метод сопоставления ТТХ заключается в сравнении характеристик, определяющих боевые свойства военной техники. Преимуществом является простота и наглядность, но метод страдает от неопределенности в выборе критически важных ТТХ для расчета [16].

Метод сопоставления огневых возможностей углубляет анализ, сосредотачиваясь на количественных данных о боевых возможностях вооружения, что придает ему большую объективность. Однако сложность возрастает при оценке многоаспектных характеристик, например, сравнении эффективности разных систем ПВО на разных высотах.

Оба метода представляют собой попытки количественного сравнения боевых возможностей военной техники, при этом каждый имеет свои преимущества и ограничения, требующие дальнейшей доработки и уточнения в процессе их применения.

Метод моделирования боя позволяет точно рассчитывать потери и испытывать разные сценарии боевых действий, но ограничен начальным периодом и ближним боем. Метод компенсации сравнивает различные типы ВВСТ, требуя математической модели для стратегического анализа [4]. Основываясь на типичном сценарии, он моделирует изменения в численности войск, оценивая влияние на исход операции и определяя эффективность ВВСТ по перемещению линии фронта. Эти методы предоставляют субъективную оценку боевых возможностей, подчеркивая сложность точного определения необходимых сил и средств для операций.

Доверие к оценкам боевого потенциала военной техники, полученным через экспертные методы, ограничено из-за их зависимости от квалификации и субъективности экспертов. Попытки включить разнообразные коэффициенты в анализ только усиливают эту проблему, так как такие коэффициенты зачастую присваиваются без возможности их объективного подтверждения, что затрудняет точное определение боевых возможностей и необходимого состава войск. Кроме того, процесс вычисления боевых потенциалов сложен и затратен по времени.

Анализ методов второй группы выявил, что для получения коэффициента боевой соизмеримости необходимо определить либо коэффициент важности ТТХ, либо коэффициент снижения эффективности, что делает эти оценки субъективными. Это уменьшает доверие к данным методам. Также, для оперативных расчетов необходимы две модели: одна для расчета боевых потенциалов, другая для оценки боевых возможностей, что усложняет процесс. Среди активных исследований в этой области в интересах ВС РФ выделяются работы Буравлева А.И., Буренка В.М., и Брезгина В.С., направленные на развитие госпрограммы вооружений и оценку боевых возможностей новых образцов ВВСТ. Предложенная методика оценки боевой эффективности робототехники устраняет недостатки существующих подходов, используя заранее подготовленные сценарии для оценки боевых потенциалов.

Под боевым потенциалом (боевыми возможностями) образца ВВСТ понимается интегральный показатель, характеризующий максимальный объем боевых задач, который может выполнить образец ВВСТ по своему функциональному назначению в заданных (расчетных) условиях применения за время своего существования [5, 17].

Необходимо понимать, что РТК ВН является одним из образцов ВВСТ и к нему также возможно применение метода боевых потенциалов ВВСТ.

Робототехнический комплекс военного назначения – группа робототехнических платформ (РТП), функционально взаимосвязанных между собой для выполнения одной или нескольких задач по ведению (обеспечению ведения) боевых действий.

Робототехническая платформа – совокупность шасси установленного типа (гусеничное, колесное или др.) и полезной нагрузки (система приема-передачи данных, система технического зрения, бортовой вычислитель, средства огневого поражения, разведки и др.), действующая автономно или дистанционно управляемая, в целях выполнения задач по ведению (обеспечению ведения) боевых действий.

В иерархии системы показателей оценки эффективности образца ВВСТ боевой потенциал занимает самый высокий уровень (рис. 1). На среднем уровне находятся боевые свойства (БС), которые являются обобщенными показателями эффективности образцов ВВСТ [19].

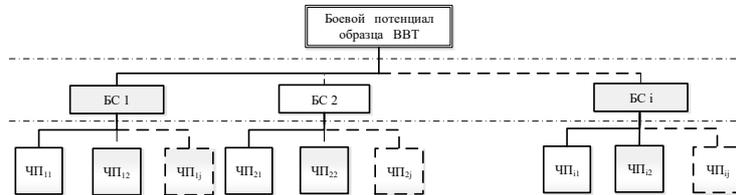


Рис. 1. Иерархия системы показателей эффективности образцов ВВСТ

На нижнем уровне БС представляют свертку ряда частных показателей (ЧП), значения которых непосредственно зависят от тактико-технических характеристик образцов ВВСТ.

Для образцов ВВСТ, имеющих различное функциональное назначение, частные показатели могут отличаться.

В военно-научных кругах при оценке эффективности вооружения и военной техники активно используются обобщенные показатели боевых свойств. Однако до сих пор не сформировалось единого подхода к определению структуры и содержания этих показателей. Исследователи расходятся во мнениях относительно того, какие характеристики следует учитывать, предлагая различные наборы боевых свойств, начиная от трех основных (точность, мощность, применимость) и заканчивая более расширенными списками, включающими огневую мощь, живучесть, запас хода и проходимость.

Для определения комплекса боевых свойств, адекватно описывающих боевой потенциал ВВСТ, важно обратиться к основам военного искусства, отражающим принципы использования военной техники в соответствии с объективными законами ведения боевых действий. Согласно одному из источников, четыре боевых свойства - боевая мощь, мобильность, применимость и живучесть - являются ключевыми для полного раскрытия функциональной сущности ВВСТ и ее способности выполнять боевые задачи в разнообразных условиях.

Метод оценки боевых потенциалов робототехнических комплексов. В предложенной методике оценки боевой эффективности робототехнических комплексов военного назначения основное внимание уделено трем боевым свойствам: боевая мощь, мобильность и живучесть. Применимость, как четвертое свойство, не рассматривается отдельно, поскольку она предполагается в качестве исходного условия боевой задачи, для решения которой и рассчитывается боевой потенциал, и таким образом считается априорной характеристикой [18, 19].

Оценка боевой эффективности группового применения робототехнического комплекса военного назначения складывается из трех боевых свойств: боевая мощь, мобильность, живучесть. Боевое свойство «применимость» не рассматривается отдельно, в связи с тем, что оно отражается в исходных данных поставленной боевой задачи, для выполнения которой рассчитывается боевой потенциал и тем самым является априорной информацией [20].

Структура системы показателей боевой эффективности применения РТК ВН, предназначенного для решения огневых задач, представлена на рис. 2.

Предложенная выше система показателей позволяет на достаточном уровне проводить оценку боевой эффективности применения РТК ВН, предназначенного для решения огневых задач, и использована для разработки программного обеспечения, предназначенного для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВН, представленного на рис. 3.

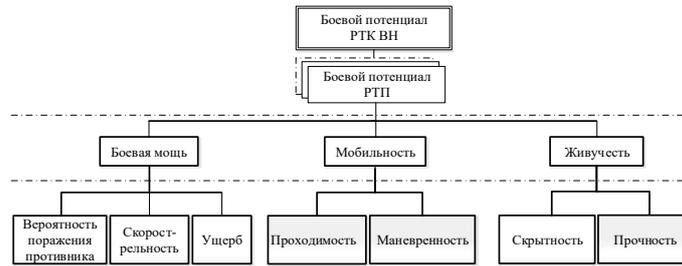


Рис. 2. Структура системы показателей боевой эффективности применения РТК ВВ, предназначенного для решения огневых задач

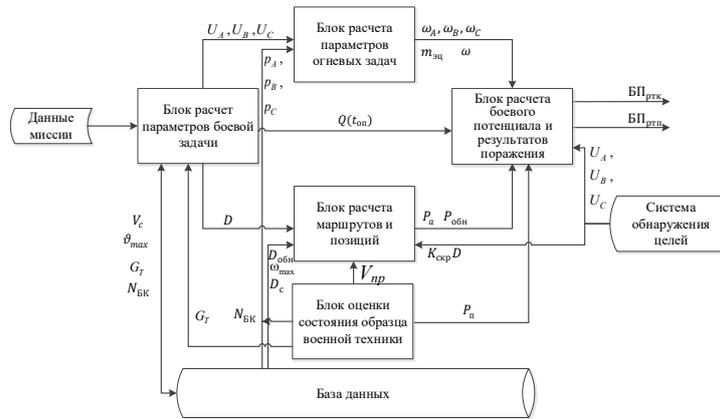


Рис. 3. Структура программного обеспечения для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВВ

Блок расчета параметров боевой задачи предназначен для формирования частных показателей боевых свойств РТП на основании, полученных от высших звеньев управления (ВЗУ) данных об операции.

Данные об операции должны быть максимально актуальными и исчерпывающими.

Основные данные об операции, необходимые для формирования частных показателей:

- ◆ характеристики боевой задачи (уничтожение, подавление и др.);
- ◆ разведывательные данные о противнике (местоположение, вооружение и военная техника, характер действий (оборона, нападение и т.д.);
- ◆ метеобстановка на период проведения операции и др. данные.

Исходные данные хранятся в базе данных, а также определяется блоком оценки состояния РТП через показатели основных узлов и агрегатов:

- ◆ величина боекомплекта – $N_{БК}$;
- ◆ запас хода – G_T ;
- ◆ максимальная скорость РТП – v_{max} ;
- ◆ средний темп стрельбы – V_c .

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ продолжительность цикла применения РТП - $t_{цик}$;
- ◆ оперативно-тактические нормы минимального времени небоеспособности объектов при поражении их по типу A, B, C - t_A, t_B, t_C , (A – небоеспособность объекта не менее семи суток; B – небоеспособность не менее одних суток; C – небоеспособность не менее трех часов);

- ◆ величины U_A, U_B, U_C характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C , где под элементарной целью понимается отдельный объект;
- ◆ выполняющий определенные функции и неделимый на составные части;
- ◆ каждая из которых могла бы действовать самостоятельно;
- ◆ степень ущерба элементарной цели противника – $Q(t_{оп})$.

Блок расчета параметров огневых задач предназначен для расчета частных показателей, необходимых для огневого поражения противника.

Частные показатели, рассчитываемые в блоке расчета огневых задач:

- ◆ среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам A, B, C – $\omega_A, \omega_B, \omega_C$;
- ◆ средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба – ω ;
- ◆ число элементарных целей, которые могут быть поражены – $m_{эц}$.

Исходными данными для расчета огневых задач являются:

- ◆ боекомплект – $N_{БК}$;
- ◆ p_A, p_B, p_C – вероятность поражения типовой цели одним СП только по типу A , по типу B , по типу C ;
- ◆ величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C .

Блок расчета маршрутов и позиций предназначен для расчета частных показателей мобильности, необходимых для оптимального выбора маршрутов и выбора позиций РТП в целях создания благоприятных условий для ведения стрельбы, создания эффекта внезапности и сохранения живучести РТП на необходимом уровне.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ оптимальные маршруты;
- ◆ оптимальные позиции;
- ◆ маршруты и позиции отхода при существенном снижении боевого потенциала РТП;
- ◆ вероятность выхода в атаку – P_a ;
- ◆ вероятность обнаружения объекта поражения – $P_{обн}$.

Исходные данные:

- ◆ данные навигационных систем РТП и системы обнаружения целей;
- ◆ коэффициент скрытности объекта (цели) $K_{скр}$;
- ◆ дальность до объекта – D ;
- ◆ средняя дальность обнаружения – $D_{обн}$;
- ◆ ω_{max} – максимальная угловая скорость разворота при прицеливании;
- ◆ $V_{пр}$ – линейная скорость движения носителя ВВСТ при прицеливании;
- ◆ дальность стрельбы – D_c .

Блок оценки состояния образца военной техники предназначен для отслеживания параметров работоспособности основных узлов, а также контроля расхода боекомплекта и топлива, в целях поддержания живучести на необходимом уровне.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

- ◆ вероятность поражения образца ВВСТ противником – P_n ;
- ◆ интенсивность воздействия противника – λ ;
- ◆ показатель живучести – ρ .

Исходными данными для расчета являются:

- ◆ количество неизрасходованных боеприпасов (боекомплект) – $N_{БК}$;
- ◆ остаток запаса хода – G_T ;
- ◆ показатели функционирования основных узлов и агрегатов;
- ◆ показатели динамической защиты, а также активных средств защиты РТП.

Блок расчета боевого потенциала и результатов поражения предназначен для расчета боевого потенциала до операции, а также отслеживания его изменений в ходе нее в зависимости от характеристик окружающей среды, данных о состоянии РТП и оценки результатов поражения противника.

В данном блоке рассчитываются следующие частные показатели:

◆ боевой потенциал РТП – $BP_{\text{РТП}}$;

◆ боевой потенциал РТК – $BP_{\text{РТК}}$.

Исходные данные для расчета:

◆ вероятность выхода в атаку – P_a ;

◆ вероятность обнаружения объекта поражения – $P_{\text{обн}}$;

◆ степень ущерба элементарной цели противника – $Q(t_{\text{оп}})$;

◆ среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам А, В, С – $\omega_A, \omega_B, \omega_C$;

◆ вероятность поражения образца ВВСТ противником – $P_{\text{п}}$;

◆ средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба – ω ;

◆ число элементарных целей, которые могут быть поражены – $m_{\text{эц}}$;

◆ величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу А, В, С.

Модуль оценки боевых потенциалов может быть реализован в следующих системах:

◆ в автономных РТК ВН – для расчета и оценки своих боевых возможностей и противника для последующего моделирования боевых действий;

◆ в системах поддержки принятия решений должностными лицами – для расчета и оценки боевых потенциалов различных группировок войск с учетом их технической оснащенности при моделировании боевых действий.

Данный модуль предусматривает изменение состояния воздействий на РТП, окружающей среды и характеристик РТП, что позволяет отслеживать изменения своего боевого потенциала в целях сохранения живучести и дальнейшей оценки вероятности выполнения боевых задач операции.

В определении боевого потенциала содержатся несколько ключевых признаков, которые требуют дополнительного пояснения:

◆ функциональное предназначение образца;

◆ объем боевых задач;

◆ заданные (расчетные) условия применения;

◆ время существования РТП.

Таким образом, для эффективной оценки БП РТП необходимо задавать типовые боевые задачи по предназначению, выражаемые через количественные характеристики и максимальное время его функционирования. Моделирование процесса боевого применения является ведущим методологическим принципом оценки боевого потенциала РТК, не требующим в процессе привлечения экспертов.

На основании вышеизложенного разработано программное обеспечение для оценки боевой эффективности группового применения РТК ВН. Рассмотрим основные принципы его реализации.

В рамках теории боевой эффективности оценка результатов боевого применения базируется на следующих критериях:

◆ вероятность успешного выполнения боевой задачи;

◆ математическое ожидание количества пораженных одиночных целей;

◆ средний ущерб, нанесенный групповым целям.

Затраты на выполнение задач измеряются через:

◆ количество использованных боеприпасов;

◆ количество выполненных самолетовылетов;

◆ запасы горюче-смазочных материалов и другие параметры.

Таким образом, боевой потенциал робототехнического комплекса можно оценить через средний ущерб, причиненный врагу за время его функционирования, до момента поражения.

Процесс боевого применения РТК включает последовательные этапы:

1. Перемещение из исходной позиции в район боевых действий.
2. Обнаружение цели.
3. Занятие позиции для нанесения удара.
4. Нанесение удара по целям противника (стрельба, бомбометание, запуск ракет).
5. Восполнение боекомплекта, топлива и других ресурсов.

Далее этот цикл повторяется либо до момента окончания операции $t_{оп}$, либо до момента поражения РТК противником. Средняя продолжительность цикла боевого применения $t_{цикл}$ определяется величиной располагаемых штатных боевых ресурсов – запаса ГСМ и величины боекомплекта СП.

Необходимо отметить, что разработанный алгоритм является полностью аналитическим, поэтому, если в течение боевой операции, после каждого цикла применения ведется учет расходуемых средств, то появляется возможность периодической оперативной оценки изменения боевых возможностей РТК по мере протекания операции. Это позволяет определить момент времени, когда РТК снижают свою эффективность, и его дальнейшее использование в данной операции становится не целесообразным.

Рассматриваемый алгоритм включает следующие шаги:

1. Продолжительность цикла использования РТК

$$t_{цикл} = \min \left\{ \frac{G_{ВВСТ}}{V_{ВВСТ} \div 60}, \frac{N_{БК}}{v_c} \right\} / 60,$$

где $G_{ВВСТ}$ – запас хода, км; $V_{ВВСТ}$ – максимальная скорость ВВСТ, км/ч; $N_{БК}$ – величина боекомплекта (средств поражения СП), ед; v_c – среднее число выстрелов в минуту.

2. Вероятность поражения РТК противником

$$P_{П} = 1 - e^{-\lambda \rho t_{цикл}},$$

где λ – интенсивность воздействия противника; ρ – показатель живучести.

Формула корректна для использования в контексте, где $P_{П}$ оценивает вероятность того, что цель будет поражена или выведена из строя за время $t_{цикл}$ при заданных интенсивности (λ) и живучести (ρ). Это типичный пример использования в теории надежности, где через экспоненциальную функцию описывается вероятность выживания или поражения объекта в зависимости от внешних факторов и характеристик самого объекта.

3. Степень ущерба элементарной цели противника (вероятность небоеспособного состояния пораженных образцом ВВСТ целей за время боя):

$$Q(t_{оп}) = Q_A(t_{оп})U_A + Q_B(t_{оп})U_B + Q_C(t_{оп})U_C.$$

где

$$Q_A(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_A}{t_{оп}}, 1 \right\}, Q_B(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_B}{t_{оп}}, 1 \right\}, Q_C(t_{оп}) = \min \left\{ \frac{t_C}{t_{оп}}, 1 \right\},$$

где $t_{оп}$ – продолжительность операции в часах; t_A, t_B, t_C – оперативно-тактические нормы минимального времени небоеспособности объектов при поражении их по типу A, B, C . Величины U_A, U_B, U_C – характеризуют долю пораженных элементарных целей только по типу A, B, C . Их значения определяются условиями боевой задачи.

Формула выражает общую эффективность поражения вражеских целей в течение операции, учитывая разные типы целей и их вклад в общую картину боевых действий. Она позволяет оценить, какая часть целей будет небоеспособна после определенного периода времени, исходя из предположения о поражении и воздействии на разные типы объектов.

Сумма $Q(t_{оп})$ не может быть больше единицы, поскольку каждый компонент $Q_A(t_{оп}), Q_B(t_{оп}), Q_C(t_{оп})$ ограничен значением 1 (что соответствует 100% вероятности небоеспособности), а U_A, U_B, U_C представляют доли, сумма которых также не может превышать 100%. Таким образом, формула рассчитывает общую долю пораженных целей в пределах от 0 до 1, где 1 соответствует полной небоеспособности всех рассматриваемых целей.

4. Среднее число средств поражения (СП), необходимых для поражения целей по типам A, B, C :

$$\omega_A = \frac{1}{p_A}; \quad \omega_B = \frac{1}{p_B}; \quad \omega_C = \frac{1}{p_C},$$

где p_A, p_B, p_C – вероятность поражения типовой цели одним СП только по типу A , по типу B , по типу C .

Вышеуказанные формулы прямо связаны с геометрическим распределением, показывая, что среднее число СП, необходимых для поражения цели, обратно пропорционально вероятности поражения цели одним таким средством. Это представляет собой классическое применение геометрического распределения в анализе вероятности и математическом ожидании количества попыток до достижения первого успеха.

5. Средний расход СП для поражения целей с заданной структурой ущерба:

$$\omega = \omega_A U_A + \omega_B U_B + \omega_C U_C.$$

При этом сумма $U_A + U_B + U_C$ представляет собой общую долю или процент всех целей, распределенных по типам A, B , и C в рамках заданной структуры ущерба. Поскольку каждый коэффициент U отражает долю целей определенного типа в общей массе рассматриваемых целей, их сумма должна равняться 1 (или 100%, если выражать в процентах). Это предполагает, что все цели полностью охвачены этими тремя категориями. Таким образом, $U_A + U_B + U_C = 1$ означает, что вся структура ущерба полностью описывается через эти три категории целей, и других категорий целей нет.

6. Вероятность обнаружения объекта поражения:

$$P_{обн}(D) = \begin{cases} k_{скр} e^{-\left(\frac{D}{\bar{D}_{обн}}\right)^\beta}, \\ 0, & D > \bar{D}_{обн}, \end{cases}$$

где $k_{скр}$ – коэффициент скрытности объекта (цели), ($0 \leq k_{скр} \leq 1$); D – дальность до объекта (цели), км; $\bar{D}_{обн}$ – средняя дальность действия средств обнаружения, км; тип цели: $\beta = 1$ – визуально обнаруживаемая; $\beta = 1,5$ – тепловизионная; $\beta = 2$ – радиоизлучающая; $\beta = 4$ – радиоотражающая; $\beta = 6$ – ультразвукоизлучающая; $\beta = 8$ – ультразвукоотражающая.

7. Вероятность выхода в атаку (зависит от распределения углов визирования на полуплоскости $(-\pi/2, \pi/2)$) определяется по формулам:

$$P_a = \begin{cases} 0, & P_{обн} \leq 0,8, \\ P_{расч}, & P_{обн} > 0,8, \end{cases}$$

$$P_{расч} = \frac{2\phi_{пр}}{\pi} \text{ – равномерное, } P_{расч} = \sin(\phi_{пр}) \text{ – по «синусу»},$$

$$P_{расч} = \frac{4\phi_{пр}}{\pi} \left(1 - \frac{\phi_{пр}}{\pi}\right) \text{ – треугольное,}$$

где $P_{расч}$ – расчетная вероятность выхода в атаку, которая может быть определена разными способами (равномерно, по "синусу", треугольное распределение) в зависимости от задачи, $\phi_{пр}$ – предельный угол визирования цели.

$$\phi_{пр} = \begin{cases} \text{неопределяется,} & D > D_c \\ \arcsin\left(\min\left\{\frac{\omega_{max}}{2V_{пр} + \omega_{cmax}}; 1\right\}\right), & D \leq D_c \end{cases}$$

Здесь ω_{max} – максимальная угловая скорость разворота при прицеливании, $V_{пр}$ – линейная скорость движения носителя ВВСТ при прицеливании.

Вышеуказанные формулы позволяют оценить вероятность выхода в атаку на основе геометрических и физических параметров взаимодействия носителя ВВСТ и цели, учитывая углы визирования и скоростные характеристики, а также обеспечивая гибкость в оценке возможностей атаки в различных условиях.

8. Вероятность поражения цели за время операции:

$$W_{ВВСТ}(D_c) = P_{обн}(D)P_a Q(t_{оп}).$$

Данная формула выражает вероятность поражения цели как произведение трех основных факторов:

1. Вероятность обнаружения ($P_{обн}(D)$): это первоначальное условие для любой операции поражения. Цель должна быть сначала обнаружена, прежде чем можно будет организовать атаку. Вероятность обнаружения зависит от многих факторов, включая дальность, тип средств обнаружения и условия окружающей среды.

2. Вероятность выхода в атаку (P_a): даже если цель обнаружена, не всегда возможно или целесообразно осуществить атаку. Эта вероятность может зависеть от тактической ситуации, правил военных действий, распределения углов визирования и других оперативных соображений.

3. Вероятность небоеспособного состояния целей ($Q(t_{оп})$): определяет, какая часть пораженных целей станет небоеспособной за время операции. Этот параметр учитывает эффективность вооружения, тактику поражения и живучесть целей.

9. Среднее число циклов применения РТП за время операции:

$$m_{цикл} = \begin{cases} N_{БК}, & m_{расч} \geq N_{БК}, \\ m_{расч}, & m_{расч} < N_{БК}, \end{cases}$$

где $N_{БК}$ – штатный боекомплект СП,

$$m_{расч} = \frac{(1-P_{П})}{P_{П}} \left[1 - (1 - P_{П})^{\frac{t_{оп}}{t_{ц}}} \right],$$

где $P_{П}$ – вероятность поражения противника.

Данная формула предназначена для расчета ожидаемого количества попыток (или циклов), которые потребуются для успешного поражения целей с учетом заданной вероятности успеха за один цикл. При этом в контексте вероятности, если у нас есть событие, вероятность успеха которого составляет $P_{П}$, то среднее ожидаемое количество попыток для достижения одного успеха можно рассчитать, как обратное значение этой вероятности, т.е. $1/P_{П}$. Это основное правило вероятности, применимое во многих сферах, от теории игр до статистического анализа. В данном случае формула расширяется за счет учета не просто одного успеха, но и ожидаемого количества успехов (или поражений цели) за определенный период времени, с учетом общей продолжительности операции и длительности одного цикла. Фактор $\left[1 - (1 - P_{П})^{\frac{t_{оп}}{t_{ц}}} \right]$ учитывает накопительный эффект вероятности поражения за множество циклов, предоставляя более точную оценку для длительных операций.

10. Число элементарных целей, которые могут быть поражены с заданной структурой ущерба при выполнении одной и той же боевой задачи:

$$m_{эц} = \frac{N_{БК}}{\omega}.$$

11. Боевая мощь РТП:

$$БМ_j = W_{ВВСТ}(D)m_{цикл j}.$$

12. Показатель подвижности РТП.

Показатель подвижности характеризует динамические возможности РТП в зависимости от массы РТП и мощности двигателя [9]:

$$R_{\Pi} = \frac{N_{уд}}{(V_{max}^{ш} + V_{max}^{\Gamma})},$$

где $V_{max}^{ш}$ – максимальная скорость на шоссе, км/ч; V_{max}^{Γ} – максимальная скорость на грунте, км/ч; $N_{уд}$ – удельная мощность двигателя, л.с/т.

13. Показатель живучести РТП.

Показатель живучести образца военной техники может быть вычислен в соответствии с выражением [20]:

$$R_{ж} = P_{обн_{\Pi}} R_{бз},$$

где $P_{обн_{\Pi}}$ – вероятность обнаружения РТП противником, $R_{бз}$ – показатель бронезащиты.

$$P_{обн}(D) = k_{скр} \begin{cases} 0, & D > \bar{D}_{обн} \\ e^{-\left(\frac{D}{\bar{D}_{обн}}\right)^{\beta}}, & \end{cases},$$

где $k_{скр}$ – коэффициент скрытности РТП, ($0 \leq k_{скр} \leq 1$); D – дальность до объекта (цели), км; $\bar{D}_{обн}$ – средняя дальность действия средств обнаружения противника, км; тип цели: $\beta = 1$ – визуально обнаруживаемая; $\beta = 1,5$ – тепловизионная; $\beta = 2$ – радиоизлучающая; $\beta = 4$ – радиоотражающая; $\beta = 6$ – ультразвукоизлучающая; $\beta = 8$ – ультразвукоотражающая.

Показатель бронезащиты может быть вычислен в соответствии с выражением [20]

$$R_{бз} = \frac{b^{0,4}}{d^{0,5}},$$

где b – толщина брони, мм; d – калибр пушки (снаряда) противника, мм.

14. Боевая эффективность РТК:

$$БП = K_{ком} \sum_{j=1}^l (\gamma_1 БМ_j + \gamma_2 R_{nj} + \gamma_3 R_{жj}).$$

где l – число типов РТП; $K_{ком}$ – коэффициент, обусловленный совместным использованием РТП комплекса, $K_{ком} > 1$ [6, 7]; γ_i – весовые коэффициенты ($\sum_{i=1}^3 \gamma_i = 1$).

Формула боевой эффективности РТК учитывает комплексное взаимодействие различных аспектов вооружений и их характеристик, а введение весовых коэффициентов и коэффициента синергии позволяет количественно оценить совместный эффект их применения. Весовые коэффициенты позволяют сбалансировать вклад различных факторов в общий боевой потенциал, делая формулу гибкой и адаптивной к различным условиям и задачам.

Реализация данного алгоритма в среде MATLAB показала достоверные результаты оценки боевых возможностей различных РТК наземного базирования, предназначенных для решения разведывательных и огневых задач. Используя данный алгоритм возможно решать задачи целераспределения в системе группового управления робототехническими комплексами.

Выводы. Предложенный научный подход оценки боевой эффективности группового применения робототехнического комплекса военного назначения, является гибким инструментом, способным дополнить модели боевых действий разнородных группировок войск различного масштаба.

Главной особенностью является исключение экспертов из процесса расчётов, что позволяет заложить его основы в алгоритмах автономного управления РТК ВН.

В рамках данной работы ведется разработка программного обеспечения в среде моделирования MatLab, на основе изложенной выше методики оценки боевого потенциала, позволяющего при небольшом объеме исходных данных о ТТХ РТК ВН, противнике и сценарии выполнения боевых задач, оценить боевой потенциал как отдельной РТП, так и РТК ВН в целом.

Также с использованием данной методики возможно отследить изменение боевого потенциала РТК ВН в ходе проведения операции при изменении частных показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шойгу С.К. Новые аспекты военно-технической политики РФ в современных условиях // Сб. "Федеральный справочник. Оборонно-промышленный комплекс России". – 2014. – № 10. – С. 99-103.
2. Мосиенко С.А., Лохтин В.И. Концепция построения наземного робототехнического ударного комплекса. – М.: «САМПОЛИГРАФИСТ», 2014. – 122 с.
3. Halem H. Ukraine's lessons for future combat: unmanned aerial systems and deep strike // The US Army War College Quarterly: Parameters. – 2023. – No. 53 (4). – P. 19-32.
4. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения // Экстремальная робототехника. – 2018. – Т. 1, № 1. – С. 279-285.
5. Буравлев А.И., Цырендоржиев С.Р., Брезгин В.С. Основы методологического подхода к оценке боевых потенциалов образцов ВВСТ и воинских формирований // Вооружение и экономика. – 2009. – № 3 (7). – С. 4-12.
6. Han S. Analysis of Relative Combat Power with Expert System // Journal of Digital Convergence. – 2016. – No. 14. – P. 143-150.
7. Wang P., Zhou Y., Wang J., Zhu C., Chen C., & Zhang W. A framework for key element evaluation of combat system // 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – 2017. – P. 3101-3106.
8. Евланов Л.Г., Кутузов В.А. Экспертные оценки в управлении: – М.: Экономика, 1978. – 133 с.
9. Саати Т. Аналитическое планирование. – М.: Радио и связь, 1991. – 223 с.
10. Naryshkin V.G. Indicators of the combat potential of military units // Military Thought. – 2009. – Vol. 18, No. 1. – P. 113-119.
11. Naryshkin V.G. Methodological bases for assessing and calculating the indicators of combat worthiness for subunits and units // Military Thought. – Jan.-Mar. 2009. – Vol. 18, No. 1. – P. 120-134.
12. Rao D., Mehra P.K. A methodology to evaluate combat potential and military force effectiveness for decision support // Journal of Battlefield Technology. – 2016. – No. 16(1). – P. 27-34.
13. Raymond, A.D. Assessing Combat Power: A Methodology for Tactical Battle Staffs. Свободный режим доступа: – <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA259261> (дата обращения: 20.02.2023).
14. Zanella J.A. Combat Power Analysis is Combat Power Density. – Свободный режим доступа: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a566701.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).
15. Reach C., Kilambi V., Cozad M. Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means, RAND Corporation, RR-4235-OSD, 2020. – Свободный режим доступа: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4235.html (дата обращения 20.02.2023).
16. Zaitsev Col. A.S., Col. V.I., Grebenyuk. Determining rational composition of missile forces and artillery weapons in an operation (combat) // Military Thought. – 12, 2003. – No. 1. – P. 141-149.
17. Цыгичко В.И., Стокли Ф. Метод боевых потенциалов: история и настоящее // Военная мысль. – 1997. – № 4. – С. 23-28.
18. Бонин Л.С. Боевые свойства и эффективность вооружения и военной техники // Военная мысль. – 2005. – № 1. – С. 65-68.
19. Томашев В.Н. О совершенствовании методов оценки боевых возможностей войск // Наука и военная безопасность. – 2006. – № 2. – С. 18-22.
20. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники: монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 196 с.

REFERENCES

1. Shoygu S.K. Novye aspekty voenno-tekhnicheskoy politiki RF v sovremennykh usloviyakh [New aspects of russian military technical policy in modern conditions], Sb. "Federal'nyy spravochnik. Oboronno-promyshlennyy kompleks Rossii" [Collection "Federal directory. Defense and industrial complex of Russia"], 2014, No. 10, pp. 99-103.
2. Mosienko S.A., Lokhtin V.I. Kontseptsiya postroeniya nazemnogo robototekhnicheskogo udarnogo kompleksa [Concept of constructing a ground robotic strike complex]. Moscow: «SAMPOLIGRAFIST», 2014, 122 p.
3. Halem H. Ukraine's lessons for future combat: unmanned aerial systems and deep strike, *The US Army War College Quarterly: Parameters*, 2023, No. 53 (4), pp. 19-32.
4. Ermolov I.L., Khripunov S.P. Problemy gruppovogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov i puti ikh resheniya [Problemy grupovogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov i puti ikh resheniya], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme robotics], 2018, Vol. 1, No. 1, pp. 279-285.

5. *Buravlev A.I., TSyrendorzhiev S.R., Brezgin V.S.* Osnovy metodologicheskogo podkhoda k otsenke boevykh potentsialov obraztsov VVST i voinskikh formirovaniy [Fundamentals of methodological approach to the assessment of combat potentials of samples of military equipment and troops formations], *Vooruzhenie i ekonomika* [Armament and Economy], 2009, No. 3 (7), pp. 4-12.
6. *Han S.* Analysis of Relative Combat Power with Expert System, *Journal of Digital Convergence*, 2016, No. 14, pp. 143-150.
7. *Wang P., Zhou Y., Wang J., Zhu C., Chen C., & Zhang W.* A framework for key element evaluation of combat system, 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2017, pp. 3101-3106.
8. *Evlanov L.G., Kutuzov V.A.* Ekspertnye otsenki v upravlenii [Expert estimates in management]. Moscow: Ekonomika, 1978, 133 p.
9. *Saati T.* Analiticheskoe planirovanie [Analytical planning]. Moscow: Radio i svyaz', 1991, 223 p.
10. *Naryshkin V.G.* Indicators of the combat potential of military units, *Military Thought*, 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 113-119.
11. *Naryshkin V.G.* Methodological bases for assessing and calculating the indicators of combat worthiness for subunits and units, *Military Thought*, Jan.-Mar. 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 120-134.
12. *Rao D., Mehra P.K.* A methodology to evaluate combat potential and military force effectiveness for decision support, *Journal of Battlefield Technology*, 2016, No. 16 (1), pp. 27-34.
13. *Raymond, A.D.* Assessing Combat Power: A Methodology for Tactical Battle Staffs. Available at: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA259261> (accessed 20 February 2023).
14. *Zanella J.A.* Combat Power Analysis is Combat Power Density. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a566701.pdf> (accessed 20 February 2023).
15. *Reach C., Kilambi V., Cozad M.* Russian Assessments and Applications of the Correlation of Forces and Means, RAND Corporation, RR-4235-OSD, 2020. Available at: https://www.rand.org/pubs/research_reports/RR4235.html (accessed 20 February 2023).
16. *Zaitsev Col. A.S., Col. V.I., Grebenyuk.* Determining rational composition of missile forces and artillery weapons in an operation (combat), *Military Thought*, 12, 2003, No. 1, pp. 141-149.
17. *Tsygichko V.I., Stokli F.* Metod boevykh potentsialov: istoriya i nastoyashchee [Method of combat potentials: history and present], *Voennaya mysl'* [Military thought], 1997, No. 4, pp. 23-28.
18. *Bonin L.S.* Boevye svoystva i effektivnost' vooruzheniya i voennoy tekhniki [Combat properties and effectiveness of weapons and military equipment], *Voennaya mysl'* [Military thought], 2005, No. 1, pp. 65-68.
19. *Tomashev V.N.* O sovershenstvovanii metodov otsenki boevykh vozmozhnostey voysk [On improving the methods of evaluating the combat capabilities of troops], *Nauka i voennaya bezopasnost'* [Science and military security], 2006, No. 2, pp. 18-22.
20. *Anipko O.B., Borisyuk M.D., Busyak Yu.M.* Kontseptual'noe proektirovanie ob'ektov bronetankovoy tekhniki: monografiya [Conceptual design of armored vehicles]. Khar'kov: NTU «KHPI», 2008, 196 p.

Статью рекомендовал к опубликования к.т.н. А.Е. Титов.

Гонтарь Дмитрий Николаевич – Военный учебный центр при Южном федеральном университете; e-mail dgontar@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79896340449; старший преподаватель; м.н.с.

Джаныбеков Руслан Юсуфович – e-mail dzhanybekov@sfedu.ru; тел.: +79185845504; начальник цикла; старший преподаватель.

Палеев Александр Викторович – e-mail apaleev@sfedu.ru; тел.: +78634680890, доб. 15408; к.э.н; начальник центра.

Семак Виталий Викторович – e-mail semak@sfedu.ru; тел.: +78634680890, доб. 15414; начальник кафедры радиоэлектронной борьбы.

Соловьев Виктор Владимирович – Научная лаборатория "Научно-технологическая лаборатория "Проектирования бортовых систем робототехнических комплексов"" Южного федерального университета; e-mail vsolovev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +79043438844; с.н.с.

Gontar Dmitry Nikolaevich – Military training center at Southern federal university; e-mail: dgontar@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79896340449; senior lecturer; junior researcher.

Dzhanybekov Ruslan Yusufovich – e-mail: dzhanybekov@sfedu.ru; phone: +79185845504; head of the course; senior lecturer.

Paleev Alexander Viktorovich – e-mail: apaleev@sfnedu.ru; phone: +78634680890, ext. 15408; can. of ec. sc.; head of the center.

Semak Vitaly Viktorovich – e-mail: semak@sfnedu.ru; phone: +78634680890, ext. 15414; head of the department of electronic warfare.

Solovyev Viktor Vladimirovich – Scientific laboratory "Scientific and Technological Laboratory of Designing Onboard Systems for Robotic Complexes" at Southern federal university; e-mail: vvsolovev@sfnedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +79043438844; senior researcher.

УДК 007:52

DOI 10.18522/2311-3103-2024-1-57-68

Б.С. Лапин, И.Л. Ермолов, О.П. Гойдин, С.А. Собольников

ПОСТРОЕНИЕ КАРТЫ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ

Целью исследования является формирование геометрической модели среды, содержащей информацию о параметрах подстилающей поверхности для использования в системе планирования движений группы роботов строем на высокой скорости. В статье исследована задача построения карты опорных поверхностей. Приведен анализ существующих исследований по теме определения характеристик опорных поверхностей мобильными роботами. Приведена классификация способов оценки характеристик опорной поверхности на дистанционные и контактные. На основе анализа преимуществ и недостатков известных дистанционных и контактных методов в работе предлагается комбинированный подход, позволяющий использовать преимущества обоих методов. Подход основан на дистанционном разделении пространства на кластеры по внешним параметрам подстилающей поверхности с потенциально одинаковыми внутренними свойствами, одновременном определении внутренних параметров подстилающей поверхности контактным методом и дальнейшем их объединении. При этом осуществляется постоянное уточнение параметров поверхности во время перемещения. Подход использует ограниченный перечень стандартных бортовых средств мобильного робота и не требует больших вычислительных затрат по сравнению с методами машинного обучения. Приводится описание дистанционного определения внешних параметров подстилающей поверхности, в основе которых лежат алгоритмы сегментации облака точек, не требующие предварительного обучения. В качестве аргументов для сегментации используются: координаты точек облака, цвет каждой точки и перепад высот в окрестности каждой точки. Описан алгоритм определения внутренних характеристик поверхности контактным способом. В качестве внутренних параметров рассматриваются коэффициенты трения между каждым колесом и текущей поверхностью. Эти коэффициенты позволяют определить предельные ускорения для каждого робота группы, которые необходимы для реализации системы планирования движений. В работе приводятся результаты экспериментальных исследований дистанционного определения параметров подстилающей поверхности в рамках предложенного подхода на данных из публичного набора KITTI. Результаты исследования подтверждают возможность формирования геометрической модели среды, сегментированной на области с различными характеристиками опорной поверхности без обучения с использованием стандартных аппаратных возможностей робота.

Картографирование; система технического зрения; опорная проходимость; планирование движения; кластеризация.

B.S. Lapin, I.L. Ermolov, O.P. Goydin, S.A. Sobolnikov

BUILDING A MAP OF REFERENCE SURFACES TO SOLVE THE PROBLEM OF PLANNING THE MOVEMENT OF A GROUP OF GROUND ROBOTS

The purpose of the study is to form a geometric model of the environment containing information about the parameters of the underlying surface for use in a system for planning the movements of a group of robots in formation at high speed. The article examines the problem of con-