

Анализ проблемы динамического противодействия с использованием метода Монте-Карло

© А.А. Валишин, И.Д. Колесник

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

²АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, 143960, Российская Федерация

Рассмотрена задача динамического противодействия между двумя наземными объектами, один из которых осуществляет запуск ударного летательного аппарата для поражения другого, защищающегося с использованием перехватчика. Актуальность исследования обусловлена развитием высокоточных ударных средств и необходимостью повышения эффективности систем противодействия. В качестве метода решения используется моделирование с применением метода Монте-Карло, что позволяет учитывать вероятностный характер параметров движения и условий применения техники. В ходе исследования проведен сравнительный анализ различных тактических схем использования ударного летательного аппарата и вариантов действия стороны, осуществляющей перехват. Полученные результаты демонстрируют влияние изменений параметров пуска, маневра и времени реакции на исход противоборства. Сделанные выводы могут быть использованы при разработке алгоритмов боевого применения, оценке эффективности комплексов перехватов, а также при формировании требований к перспективным системам динамического противодействия. Работа расширяет представление о факторах, определяющих исход взаимодействия ударных и защитных средств в динамической среде.

Ключевые слова: летательный аппарат, методы наведения, динамическое противодействие, метод Монте-Карло, ситуационное моделирование, исследование операций

Введение. Современные условия ведения вооруженной борьбы характеризуются широким применением ударных летательных аппаратов (УЛА), обладающих высокой маневренностью, возможностью полета на малых высотах и использованием сложных профилей траекторий. Для оценки их эффективности важно учитывать не только характеристики самого ударного средства, но и потенциальные меры противодействия со стороны обороняющегося объекта, проводя анализ траекторий нападения и перехвата в рамках единой динамической модели. При этом задача корректного прогноза исхода противоборства осложняется неопределенностью параметров, временем реакции систем управления, а также вероятностным характером поведения объектов. Для учета данной неопределенности в ряде исследований применяется метод Монте-Карло [1, 2].

В теоретической базе исследования используются подходы дифференциальных игр и областей достижимости, развитые в работе [3]. Приведенные О.А. Толпегиным исследования позволяют формализовать

множество возможных траекторий объектов с учетом их ограничений по маневру и времени. Дополнительно в работе [4] авторами предложены подходы к моделированию ситуационного управления, позволяющие адаптировать стратегию движения аппарата в реальном времени. Однако в случае применения этих методов к анализу вероятностных сценариев с учетом изменчивости исходных параметров потребуются использовать вычислительные методы статистического моделирования.

В настоящей работе рассматривается ситуация динамического противодействия двух наземных объектов, показанная на рис. 1. Объект **A** производит запуск УЛА для поражения объекта **B**, который для защиты использует летательный аппарат-перехватчик (ЛАП), поражающий УЛА при встрече. Если УЛА не был перехвачен, то при достижении объекта **B** он его поражает.

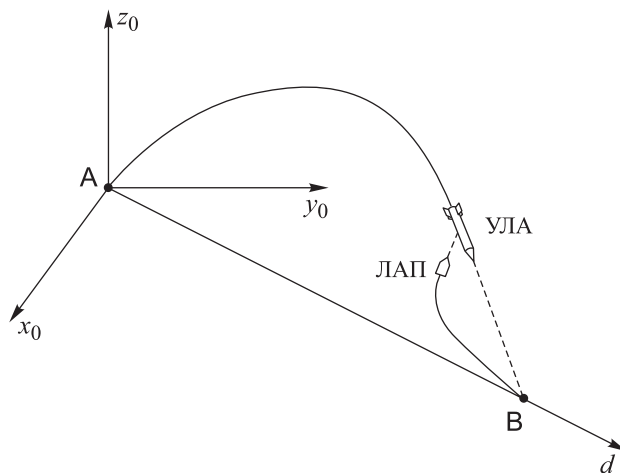


Рис. 1. Схема динамического противодействия:

A — объект, производящий запуск УЛА; **B** — объект, защищающийся с помощью ЛАП; x_0, y_0, z_0 — оси стартовой системы координат УЛА; d — вспомогательная ось, проходящая через точки **A** и **B**

Цель данной работы — оценка эффективности траекторий УЛА в зависимости от применяемого типа ЛАП.

Для УЛА рассматриваются две типовые траектории полета, различающиеся маршевым участком: с имеющим вид S-образной кривой и вид прямолинейного отрезка. Движение ЛАП определяется алгоритмами [5] на базе метода прямого наведения [6, 7] и предсказания [8, 9].

В работе рассматриваются следующие варианты ЛАП: маломаневренный (с предельно допустимым ускорением $a_{\max} = 20 \text{ м/с}^2$), среднemanевренный ($50 \text{ м/с}^2 \leq a_{\max} \leq 100 \text{ м/с}^2$) и высокоманевренный ($a_{\max} = 200 \text{ м/с}^2$).

Вероятность поражения объекта **В** без учета противодействия характеризуется величиной P . В результате запуска ЛАП успешный перехват оппонента осуществляется с вероятностью Q или не осуществляется с вероятностью $(1-Q)$. При проведении исследования были выбраны следующие исходные данные.

1. Координаты контрольных точек траектории УЛА и значения его скорости в них (табл. 1) в проекции на плоскость, заданную осями z_0 и d (см. рис. 1). Траектория, заданная этими точками, приведена на рис. 2.

2. В начальный момент времени ЛАП обладает скоростью $v_0 = 10$ м/с, в конечный — $v_k = 1200$ м/с.

Таблица 1

Исходные данные проводимого исследования

Имя точки	Высота точки, м	Удаленность от точки старта УЛА, $\times 10^3$ м	Скорость УЛА, м/с
О	0	0	22,36
А	50	0	0
В	100	2	884
С	15	4	680
Д	15	80	680
Е	30	85	500
F	0	90	850

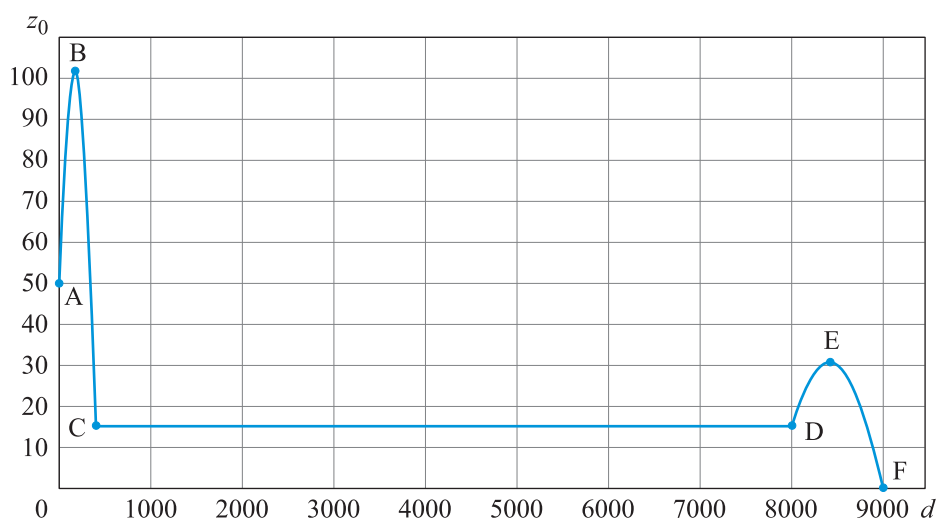


Рис. 2. Траектория движения УЛА в плоскости Oz_0d

3. Допустимое отклонение УЛА при поражении объекта **В** — не более 5 м.
4. Дистанция для успешного перехвата — не более 20 м.
5. Объект **В** осуществляет запуск ЛАП в случайный момент времени после старта УЛА.

Моделирование траектории УЛА. Основываясь на данных из табл. 1, была построена пространственная конфигурация двух типовых траекторий движения УЛА (рис. 3). Под № 1 понимается траектория с маршевым участком в виде прямолинейного отрезка, под № 2 — с S-образной кривой.

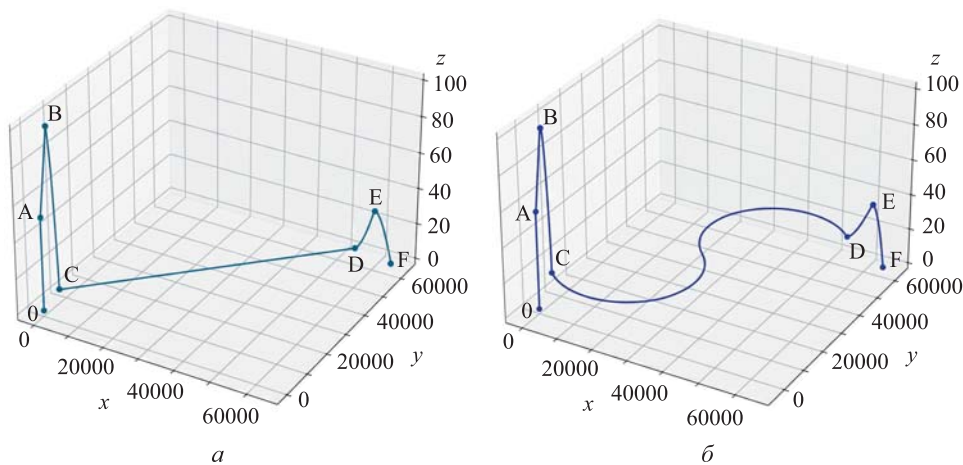


Рис. 3. Траектории УЛА № 1 (а) и № 2 (б)

При моделировании конфликтного взаимодействия УЛА с объектом **В** необходимо определить вероятность поражения цели с учетом допустимого отклонения. Основываясь на [10], она оценивается как отношение

$$P \approx \frac{k}{n}, \quad (1)$$

где k — количество реализаций траектории, попавших в область с допустимым отклонением; n — общее число смоделированных траекторий.

Учет противодействия. Одним из основных факторов, влияющих на движение ЛАП при осуществлении перехвата УЛА, является его маневренность, которая существенно ограничивает его технические характеристики, наиболее значимая из которых — предельно допустимая перегрузка [11].

Для ее учета в ходе полета ЛАП на проекции n_x, n_y вектора перегрузки \vec{n} накладываются ограничения. Исходя из [12], они могут быть заданы следующими соотношениями:

$$n_x = \frac{a_x}{g} \leq a_{\max_x}; \quad (2)$$

$$n_y = \frac{a_y}{g} \leq a_{\max_y}, \quad (3)$$

где a_x, a_y — проекции ускорения перехватчика на оси связанной с ним системы координат, м/с^2 ; a_{\max_x}, a_{\max_y} — проекции предельно допустимого ускорения, определяемого конструктивными особенностями рассматриваемого перехватчика, на оси связанной с ним системы координат, м/с^2 .

Здесь выражение (2) характеризует допустимые перегрузки, возникающие при повороте в горизонтальной плоскости летательного аппарата во время движения по криволинейной траектории, а (3) — при его вращении вокруг своей поперечной оси.

Поскольку вращение перехватчика вокруг своей поперечной оси не оказывает существенного влияния на суть проводимого в данной работе исследования, было принято допущение об ограничении максимально возможного ускорения в следующем виде:

$$a_x \leq a_{\max}. \quad (4)$$

Вероятность осуществления перехвата Q в заданных условиях оценивается по формуле, аналогичной (1):

$$Q \approx \frac{r}{n}. \quad (5)$$

где r — количество реализаций траекторий ЛАП с дистанцией до противника менее 20 м.

Используя алгоритм метода Монте-Карло [13], были смоделированы различные сценарии исхода динамического противодействия. Результаты отображены на рис. 4–7 (зеленым цветом обозначен успешный перехват УЛА, красным — промах).

Результаты динамического противодействия ударному летательному аппарату для различных перехватчиков приведены в табл. 2.

Анализ полученных данных демонстрирует для обеих рассматриваемых траекторий УЛА монотонное увеличение вероятности его успешного перехвата с ростом предельно допустимого ускорения ЛАП, что подтверждает определяющую роль маневренных возможностей перехватчика в решении задачи динамического противодействия.

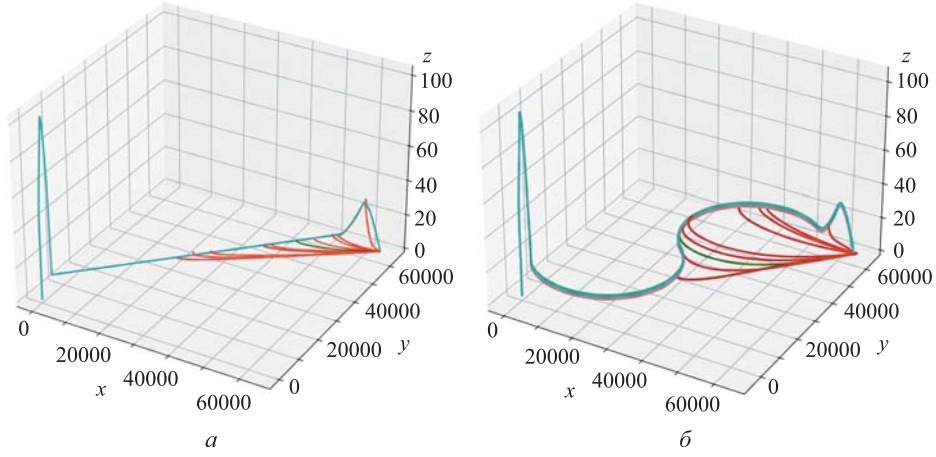


Рис. 4. Реализации исходов динамического противодействия при $a_{\max} = 20 \text{ м/с}^2$

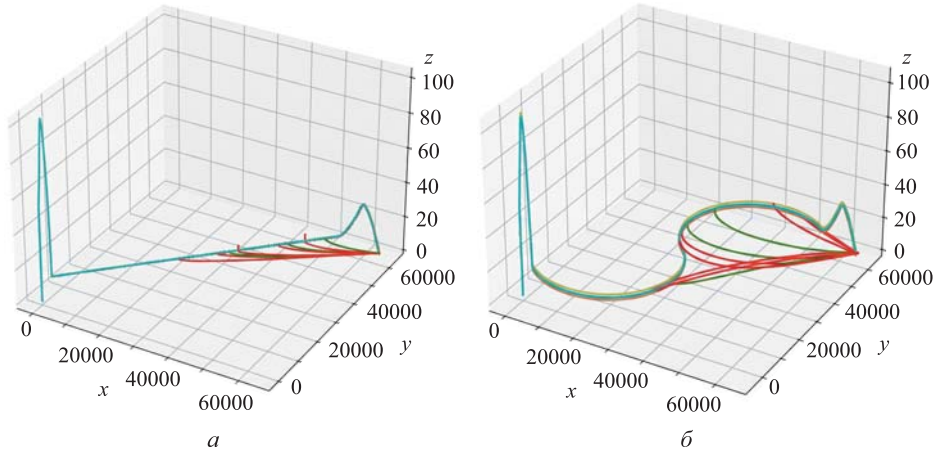


Рис. 5. Реализации исходов динамического противодействия при $a_{\max} = 50 \text{ м/с}^2$

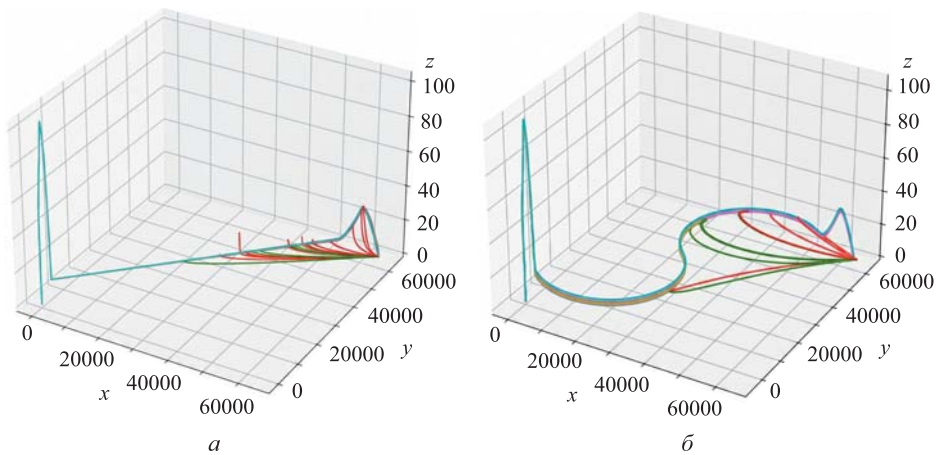


Рис. 6. Реализации исходов динамического противодействия при $a_{\max} = 100 \text{ м/с}^2$

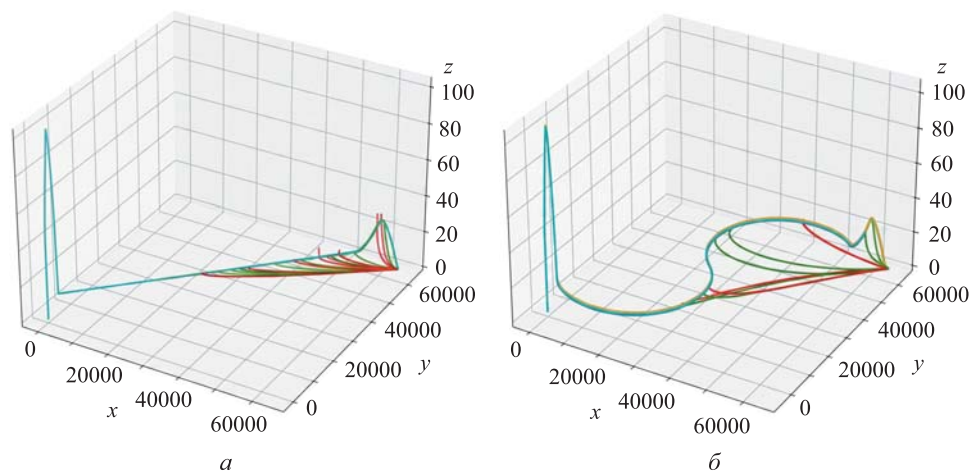


Рис. 7. Реализации исходов динамического противодействия при $a_{\max} = 200 \text{ м/с}^2$

Таблица 2

Результаты динамического противодействия

Траектория УЛА	Предельно допустимое ускорение ЛАП a_{\max} , м/с^2	Вероятность перехвата УЛА Q
С прямолинейным маршевым участком (№ 1)	20	0,376
	50	0,520
	100	0,684
	200	0,912
С S-образным маршевым участком (№ 2)	20	0,255
	50	0,355
	100	0,471
	200	0,883

При движении УЛА на маршевом участке по S-образной кривой вероятность перехвата снижается по сравнению с прямолинейным отрезком для всех рассмотренных типов перехватчиков. Однако использование ЛАП с предельно допустимым ускорением до 50 м/с^2 можно считать неэффективным для противодействия УЛА с любой из приведенных траекторий. При этом часть зафиксированных промахов может быть обусловлена особенностями применяемого алгоритма наведения, что позволяет предположить возможность повышения эффективности перехвата при использовании альтернативных методов выбора упреждения.

Исследование эффективности УЛА. Для сравнения траекторий УЛА при учете возможного противодействия ЛАП в качестве критерия

был выбран показатель эффективности, определенный в работе [14] следующим образом:

$$W = P(1 - Q) \cdot 100\%. \quad (6)$$

Результаты оценки эффективности УЛА для каждого из рассмотренных случаев приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты оценки эффективности УЛА

Траектория УЛА	Вероятность P поражения объекта В	Показатель эффективности УЛА W , %
С прямолинейным маршевым участком (№ 1)	0,987	60,53
		45,91
		31,19
		8,69
С S-образным маршевым участком (№ 2)	0,964	71,82
		64,12
		47,43
		11,28

На основе данных табл. 3 была построена диаграмма (рис. 8), отражающая изменение показателя эффективности УЛА в зависимости от предельно допустимого ускорения ЛАП.

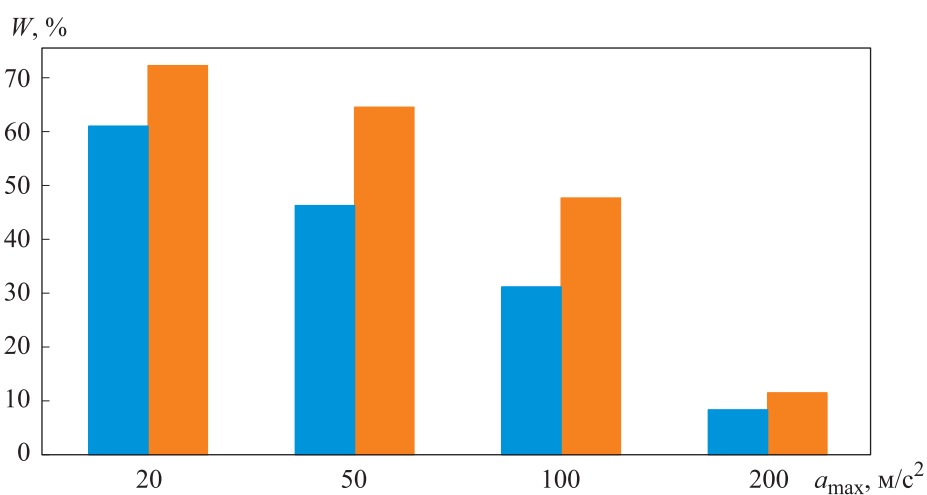


Рис. 8. Зависимость показателя эффективности УЛА от предельно допустимого ускорения ЛАП:
■ — траектория № 1; ■ — траектория № 2

Заключение. В данной работе с использованием метода Монте-Карло был проведен анализ модели динамического противодействия между УЛА и ЛАП в различных сценариях.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что при движении УЛА по *S*-образной траектории вероятность его перехвата существенно ниже для всех разновидностей перехватчиков. Разница в успехе перехвата существенна при применении мало- и среднеманевренных ЛАП и незначительна для высокоманевренных.

Большинство исследованных сценариев показало обилие промахов ЛАП при прохождении УЛА второго изгиба *S*-образной траектории. Наблюдаются также случаи промахов маломаневренных ЛАП при траектории УЛА с линейным участком движения, которые, возможно, могут быть скорректированы за счет использования более совершенных алгоритмов наведения.

При прохождении УЛА участка *DEF* (см. рис. 2), требуемые от ЛАП перегрузки оказываются выше возможностей большинства перехватчиков, отчего перехват на данном участке в рассмотренных сценариях выполняется только высокоманевренными ЛАП. Возможно, использование иного алгоритма выбора упреждения также способно устранить данные промахи.

Предложенные в работе методики и алгоритмы могут быть использованы при разработке и испытаниях новых систем и комплексов, предназначенных для решения задач аэрокосмической сферы. Дальнейшие исследования могут быть направлены на усложнение модели, например, путем учета неидеальных условий полета, помех и более сложных алгоритмов управления как УЛА, так и ЛАП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yiming L., Ziming X., Jian W., Derong W. Monte Carlo-based analysis and experimental validation of the interception-damage probability of the new active interception net. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, vol. 2022, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/5438023 (дата обращения: 22.03.2026).
- [2] Li A., Meng Y., He Z. *Simulation research on new model of air-to-air missile attack zone*. URL: https://www.researchgate.net/publication/341797884_Simulation_Research_on_New_Model_of_Air-to-Air_Missile_Attack_Zone. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084793 (дата обращения: 22.03.2026).
- [3] Толпегин О.А. *Методы управления движением беспилотных летательных аппаратов на основе теории дифференциальных игр*. Санкт-Петербург, Наука, 2021, 331 с.
- [4] Шалыгин А.С., Лысенко Л.Н., Толпегин О.А. *Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 2012, 584 с.
- [5] Сихарулидзе Ю.Г. *Баллистика и наведение летательных аппаратов*. Москва, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015, 407 с.
- [6] Кринецкий Е.И. *Системы самонаведения*. Москва, Машиностроение, 1970, 236 с.

- [7] Han S.C., Bang H., Yoo C.S. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 553–565. DOI: 10.1007/s12555-009-0407-1 (дата обращения: 22.03.2026).
- [8] Лысенко Л.Н. *Наведение и навигация баллистических ракет*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 672 с.
- [9] Kumar V.A., Ghose D. Radar-assisted collision avoidance/guidance strategy for planar flight. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, vol. 37 (1), pp. 77–90.
- [10] Вентцель Е.С. *Введение в исследование операций*. Москва, Советское радио, 1964, 392 с.
- [11] Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. *Динамика полета беспилотных летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1973, 616 с.
- [12] Ахмедьянов И.С., Савельев Л.М. *Нагрузки летательных аппаратов*. Самара, Изд-во СГАУ, 2007, 60 с.
- [13] Войтишек А.В. *Основы метода Монте-Карло*. Новосибирск, Изд-во НГУ, 2010, 108 с.
- [14] Вентцель Е.С. *Исследование операций: задачи, принципы, методология*. 2-е изд. Москва, Наука, 1988, 208 с.

Статья поступила в редакцию 16.02.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Валишин А.А., Колесник И.Д. Анализ проблемы динамического противодействия с использованием метода Монте-Карло. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 6. EDN YEYUWH

Валишин Анатолий Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: enf@mail.ru.

Колесник Илья Дмитриевич — инженер-программист отдела ситуационного моделирования АО «ВПК «НПО машиностроения»; бакалавр кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: ilya-kolesnik@mail.ru

Dynamic Counteraction Problem Analysis Using the Monte Carlo Method

© A.A. Valishin¹, I.D. Kolesnik²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

²JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya», Reutov, 143960, Russian Federation

A dynamic counteraction problem between two ground-based objects is considered, in which one object launches a strike aircraft to engage the other, while the defending side employs an interceptor for protection. The relevance of the study is driven by the development of high-precision strike systems and the need to improve the effectiveness of counteraction systems. A Monte Carlo simulation approach is used to solve the problem, which makes it possible to account for the probabilistic nature of motion parameters and operational conditions. The study includes a comparative analysis of different tactical schemes for employing the strike aircraft and various response strategies of the intercepting side. The obtained results demonstrate the influence of changes in launch parameters, maneuvering, and reaction time on the outcome of the engagement. The conclusions can be applied in the development of combat employment algorithms, in assessing the effectiveness of interception systems, and in formulating requirements for advanced dynamic counteraction systems. The work expands the understanding of the factors determining the outcome of interactions between strike and defensive assets in a dynamic environment.

Keywords: aircraft, guidance methods, dynamic counteraction, Monte Carlo method, situational modeling, operations research

REFERENCES

- [1] Yiming L., Ziming X., Jian W., Derong W. Monte Carlo-based analysis and experimental validation of the interception-damage probability of the new active interception net. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, vol. 2022, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/5438023 (accessed March 22, 2026).
- [2] Li A., Meng Y., He Z. Simulation research on new model of air-to-air missile attack zone. In: *Proc. ITNEC, 2020*. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9084793
- [3] Tolpegin O.A. *Metody upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov na osnove teorii differentsial'nykh igr* [Methods of motion control of unmanned aerial vehicles based on differential game theory]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 2021, 331 p.
- [4] Shalygin A.S., Lysenko L.N., Tolpegin O.A. *Metody modelirovaniya situatsionnogo upravleniya dvizheniem bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Methods for modeling situational control of unmanned aerial vehicle motion]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2012, 584 p.
- [5] Sikharulidze Yu.G. *Ballistika i navedenie letatelnykh apparatov* [Ballistics and guidance of aircraft]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2015, 407 p.
- [6] Krinetskiy E.I. *Sistemy samonavedeniya* [Homing systems]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1970, 236 p.
- [7] Han S.C., Bang H., Yoo C.S. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 553–565. DOI: 10.1007/s12555-009-0407-1 (accessed March 22, 2026).
- [8] Lysenko L.N. *Navedenie i navigatsiya ballisticheskikh raket* [Guidance and navigation of ballistic missiles]. Moscow, BMSTU Press, 2007, 672 p.

- [9] Kumar B.A., Ghose D. Radar-assisted collision avoidance/guidance strategy for planar flight. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, vol. 37, no. 1, pp. 77–90.
- [10] Venttsel E.S. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964, 392 p.
- [11] Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. *Dinamika poleta bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Flight dynamics of unmanned aerial vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 616 p.
- [12] Akhmedyanov I.S., Savelyev L.M. *Nagruzki letatelnykh apparatov* [Aircraft loads]. Samara, SSAU Publ., 2007, 60 p.
- [13] Voytishchek A.V. *Osnovy metoda Monte-Karlo* [Fundamentals of the Monte Carlo method]. Novosibirsk, NSU Publ., 2010, 108 p.
- [14] Venttsel E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: problems, principles, methodology]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1988, 208 p.

Valishin A.A., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Calculus Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: enf@mail.ru.

Kolesnik I.D., Software Engineer of the Situational Modeling Department, MIC “NPO Mashinostroyeniya”; Bachelor of the Department of Calculus Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: ilya-kolesnik@mail.ru