

УДК 621.396.969.34

Разработка моделей траекторий сверхманевренной цели

Казанцев Д.А., Костров В.В.

Данная работа посвящена разработке моделей, позволяющих подробно анализировать траектории движения сверхманевренных объектов. В ходе исследования рассматриваются различные параметры, влияющие на маневренность, такие как скорость, высота полета, а также аэродинамические характеристики.

Ключевые слова: сверхманевренная цель, модели траекторий, аэродинамические характеристики, параметры движения.

Введение

В настоящее время эффективное управление и наведение объектов, таких как ракеты, беспилотные летательные аппараты и другие системы, становится всё более важным во многих сферах, включая оборону, охрану и гражданскую авиацию. Моделирование траекторий позволяет более точно предсказывать поведение движущихся объектов, что критически важно для повышения точности наведения и минимизации рисков при выполнении операций. Особенно это актуально в условиях современного боя, где скоростные и маневренные цели требуют применения сложных алгоритмов управления и адаптивных технологий.

Системы управления, способные эффективно отслеживать и корректировать траектории сверхманевренных целей, обеспечивают значительное преимущество. Поэтому исследование методов и моделей, позволяющих эффективно моделировать такие траектории, представляет собой важную задачу современных технологий.

Целью данного исследования является разработка и анализ моделей для эффективного прогнозирования траекторий сверхманевренных целей в системах управления и наведения.

Методы моделирования траекторий сверхманевренных целей

Сверхманевренные объекты, такие как ракеты, беспилотные летательные аппараты и боевые самолеты, способны выполнять слож-

ные маневры, что требует глубокого понимания динамики их движения и использования различных моделей для предсказания их траекторий. В этом разделе проводим анализ существующих моделей, выделяя их основные характеристики, преимущества и недостатки.

1) Аналитические методы

Аналитические методы моделирования основываются на расчетах с использованием математических уравнений, которые описывают движение тела. Они полезны для решения базовых задач, но могут быть недостаточно точными для моделирования сложных маневров [1].

Преимущества:

- Быстрота расчетов;
- необходимость в минимальных вычислительных ресурсах;
- простота анализа и интерпретации результатов.

Недостатки:

- Ограниченность моделируемых ситуаций;
- невозможность учета сложных аэродинамических взаимодействий в реальном времени;
- низкая точность при высокоскоростных маневрах.

2) Численные методы

Численные методы используются для более сложных задач, когда аналитические методы не могут быть эффективно применены.

Они позволяют учитывать множество факторов, таких как аэродинамические силы, изменения в условиях движения и др [1].

Преимущества:

- высокая точность решений;
- возможность учета динамических и статических факторов, таких как изменение условий окружающей среды;
- удобство в работе с нелинейными и многомерными системами.

Недостатки:

- Высокие вычислительные затраты и время на обработку данных;
- сложность в настройке параметров численной модели.

3) Эмпирические модели

Эмпирические модели основаны на обработке экспериментальных данных и статистических методов. Они создаются на основе анализа реальных полетов и маневров объектов [2].

Преимущества:

- Высокая точность предсказаний на основании реальных данных;
- учет индивидуальных особенностей маневренных объектов.

Недостатки:

- Зависимость от доступности и качества экспериментальных данных;
- ограниченность в применении для новых или нестандартных объектов.

4) Модели на основе машинного обучения

Модели, основанные на машинном обучении, используют алгоритмы и нейронные сети для анализа больших объемов данных о траекториях. Такие модели способны адаптироваться и улучшать свои предсказания на основе новых данных.

Преимущества:

- Способность к самообучению и адаптации к изменяющимся условиям;
- возможность анализа сложных зависимостей и факторов.

Недостатки:

- Необходимость в большом количестве данных для обучения;

- сложность интерпретации и объяснения принимаемых решений.

5) Интеграция моделей

Одним из наиболее перспективных направлений является интеграция различных подходов к моделированию. Комбинация аналитических, численных, эмпирических и моделей на основе машинного обучения может значительно повысить точность прогнозирования и надежность систем управления [1].

Анализ существующих моделей траекторий сверхманевренных объектов показывает многообразие подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Комбинация различных методов может привести к созданию более точных и надежных предсказательных моделей, способствующих улучшению систем управления и наведения на современные высокотехнологичные цели. В будущем оптимизация интеграции моделей и использование новейших технологий, таких как машинное обучение, будут способствовать росту эффективности и адаптивности систем.

Математическое описание

Для описания движения сверхманевренной цели будем использовать законы классической механики, в частности, законы Ньютона. Основные принципы, на которых базируется моделирование, заключаются в следующем:

Второй закон Ньютона – дифференциальный закон движения, описывающий взаимосвязь между приложенной к материальной точке силой и получающимся от этого ускорением данной точки, описывается соотношением [3].

$$F = m \cdot a,$$

где F — результирующая сила, m — масса тела, a — ускорение.

Для описания движения сверхманевренной цели в трехмерном пространстве используем векторную форму записи, что позволяет учитывать все компоненты движения. Вектор состояния можно представить следующим образом:

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix},$$

где x , y , и z — координаты положения объекта в пространстве. Уравнения движения можно записать через силы, действующие на объект, включая силы тяги, аэродинамические силы и силы тяжести.

Система уравнений движения может быть представлена как:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F_x - D_x, \\ m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = F_y - D_y - m \cdot g, \\ m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} = F_z - D_z, \end{cases}$$

где F_x, F_y, F_z — компоненты силы тяги; D_x, D_y, D_z — аэродинамические силы.

Для целей моделирования можно выделить горизонтальные и вертикальные компоненты движения.

Горизонтальная скорость может быть описана с использованием уравнений:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F_x - D_x}{m},$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{F_y - D_y - m \cdot g}{m}.$$

Эти уравнения позволяют рассчитывать изменение положения объекта по горизонтали.

Вертикальная скорость аналогично может быть описана:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{F_z - D_z}{m}.$$

Кроме линейного движения, необходимо учитывать вращение объекта. Для этого используется уравнение вращения, которое описывает динамику углового движения:

$$I \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} = M - D_{moment},$$

где: I — момент инерции объекта, θ — угол поворота, M — момент силы, D_{moment} — аэродинамический момент сопротивления, который также зависит от формы объекта и потока воздуха.

Эти уравнения позволяют полностью описать динамику сверхманевренных целей.

Масса (m) является одним из основных параметров, определяющих динамические характеристики движения сверхманевренной цели. Она оказывает влияние на инерцию объекта, что в свою очередь определяет, как быстро объект может менять свою скорость или направление. Чем больше масса объекта, тем больше энергии требуется для изменения его состояния движения.

$$a = \frac{F}{m},$$

Момент инерции (I) — это величина, которая характеризует распределение массы относительно оси вращения и определяется как сумма произведений масс отдельных элементов на квадрат расстояния от оси вращения до этих элементов:

$$I = \sum m_i \cdot r_i^2,$$

где m_i — масса i -й элемента, r_i — расстояние от оси вращения до i -й элемента.

Момент инерции влияет на угловую динамику объекта. При приложении момента силы можно использовать следующую формулу для углового ускорения:

$$\alpha = \frac{M}{I},$$

где α — угловое ускорение, M — момент силы, действующий на объект. Чем больше момент инерции, тем меньше угловое ускорение при приложении фиксированного момента.

Динамические силы, действующие на сверхманевренную цель, включают в себя:

Сила тяги (F_t) создается двигателем и представляет собой силу, которая вытягивает объект вперед. Она может варьироваться в за-

висимости от режима работы двигателя, конфигурации цели и условий окружающей среды. В общем виде силу тяги можно выразить как:

$$F_t = C_t \cdot P,$$

где C_t — коэффициент тяги, P — мощность двигателя. Силу тяги также следует учитывать в зависимости от скорости и угла атаки, так как они влияют на аэродинамические характеристики устройства, и на эффективность двигателя.

Аэродинамические силы нужны для учета воздействия окружающей среды.

Подъемная сила (L) — это сила, создаваемая на крыльях или других поверхностях самолета, которая направлена вверх и противодействует силе тяжести. Она зависит от площади крыла, скорости и угла атаки. Подъемная сила может быть выражена как:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_L(\alpha),$$

где: ρ — плотность воздуха, v — скорость относительного движения, S — площадь крыла, $C_L(\alpha)$ — коэффициент подъемной силы, зависящий от угла атаки α .

Сопrotивляющаяся сила (D) — это сила, которая препятствует движению самолета и направлена против направления полета. Она также зависит от скорости, площади сечения и формы объекта:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_D(\alpha),$$

где $C_D(\alpha)$ — коэффициент сопротивления, который зависит от угла атаки и формы объекта.

Таким образом, понимание этих ключевых параметров поможет более точно моделировать и прогнозировать движение сверхманевренной цели в различных условиях.

Результаты моделирования

Модели, представленные ниже, рассчитаны с помощью программы MATLAB с использованием соотношений, приведенных в 1 разделе.

Летно-технические характеристики Су-57 [4]:

Размер крыла – 14 метров.

Длина самолета – 19,7 метров.

Высота самолета – 4,8 метров.

Площадь крыла – 82 квадратных метра.

Масса пустого самолета – 18500 килограмм.

Масса нормальная взлетная – 30610 килограмм.

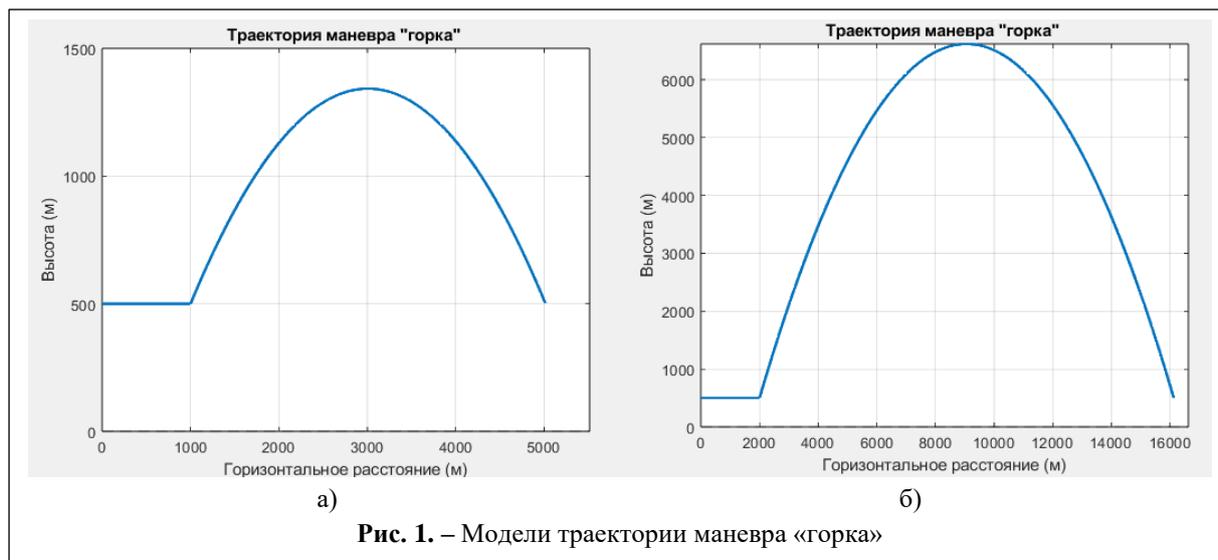
Масса максимальная взлетная – 37000 килограмм.

Масса топлива – 11100 килограмм.

Максимальная скорость – 2600 километр/час.

На рис. 1 приведены траектории маневра "горка", которые были смоделированы с начальной скоростью 200 м/с и углом наклона 40 градусов (рис. 1 (а)). Исходя из этих параметров, была рассчитана траектория, начиная с прямолинейного движения на высоте 500 метров и заканчивая маневром "горка".

В данном случае, с начальной скоростью 200 м/с самолет проделывает значительное горизонтальное расстояние перед началом выполнения маневра. Угловая компонента начальной скорости позволяет достичь предельной высоты. На начальном этапе полета траектория представлена в виде прямолинейного движения на высоте 500 метров. В это время самолет может оценивать окружающую обстановку перед выполнением маневра, а также находиться на безопасной высоте для



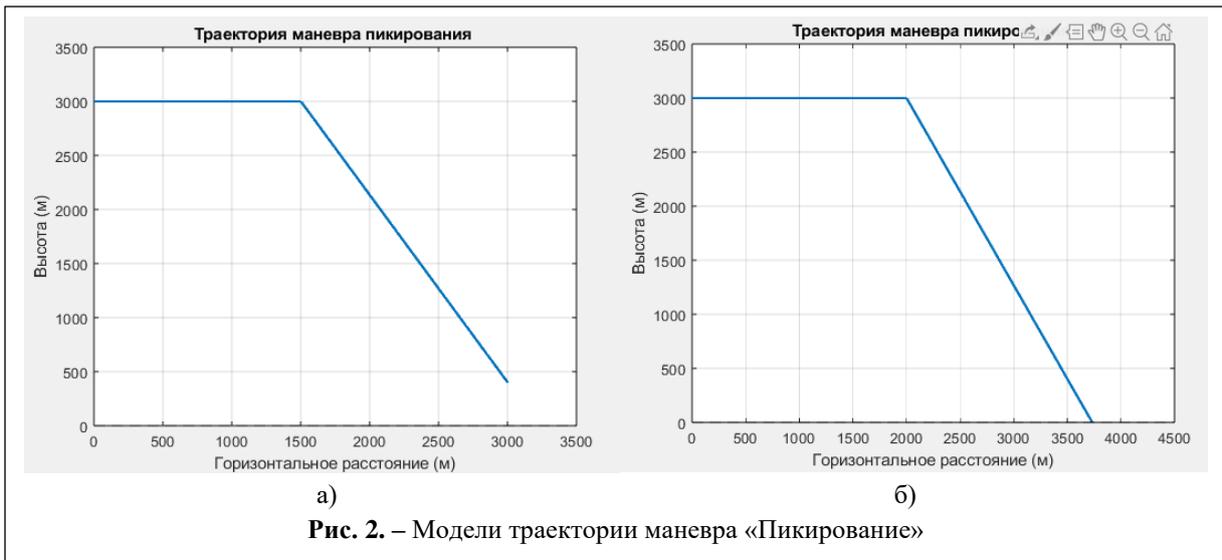
определения дальнейших действий. После завершения этапа прямолинейного полета стартует фаза маневра "горка". В этой фазе самолет начинает подниматься на высоту 1300 метров при движении вперед. Важно отметить, что в ходе маневра происходит значительное изменение высоты, что подчеркивает важность управления на высоте и сохранения оптимальных аэродинамических характеристик. В зависимости от угла броска и вертикальной скорости, истребитель демонстрирует способность сохранять скорость при выполнении маневров, что важно для его способности выполнять боевые задачи. Кинематические параметры, такие как вертикальная и горизонтальная скорость, меняются в зависимости от времени, что также учитывается в расчетах. Визуализация траектории, представленная графически, демонстрирует характерную параболическую форму маневра "горка". Эта форма позволяет оценить как высоту, так и расстояние, преодолеваемое самолетом в процессе маневра, что может быть полезно для дальнейших исследовательских работ и практических применений.

На рис. 1 (б) представлена траектория движения маневра "горка" с начальной скоростью 400 м/с и углом наклона 60 градусов. Сравнивая две траектории видны значительные изменения, а именно:

- 1) С увеличением скорости до 400 м/с самолет будет двигаться быстрее по горизонтали. Это приведет к увеличению расстояния, которое он будет проходить за фиксированный промежуток времени.
- 2) Увеличение времени в маневре.
- 3) Изменение угла наклона на 60 градусов значительно повлияет на вертикальную составляющую скорости, что приводит к значительному увеличению высоты, которую самолет сможет достичь во время маневра.
- 4) График траектории также отличается. Форма траектории будет более выраженной и высокой, что указывает на то, что самолет поднимается на большую высоту за меньший промежуток времени.

Применение более высокой начальной скорости и увеличенного угла броска способствуют повышению эффективности маневра "горка".

Модель описывает прямолинейное движение на высоте 3000 метров до начала маневра, после чего самолет выполняет пикирование (рис. 2 (а)). Это исследование направлено на анализ влияния указанных параметров на траекторию полета. На первом этапе (в течение первых 5 секунд) самолет движется прямолинейно на заданной высоте. Это время позволяет пилоту оценить боевую обстановку и



подготовиться к маневру. Высота в 3000 метров может быть выбрана как оптимальная для укрытия от обнаружения и сопровождения противником, а также для выполнения дальнейших маневров.

После завершения времени прямолинейного полета, самолет переходит в фазу пикирования. При этом происходит резкое изменение как вертикальной, так и горизонтальной составляющей движения. Использование угла -45 градусов создает оптимальные условия для быстрого снижения высоты и маневрирования в диапазоне близком к земле, что может быть стратегически важно для увеличения шансов на успешное выполнение боевой задачи. График, полученный в результате моделирования, показывает, что траектория пикирования истребителя представляет собой характерную форму. На первом этапе линия остается на высоте 3000 метров, а затем, начиная с момента маневра, высота быстро уменьшается. Это свидетельствует о том, что истребитель, выполняющий пикирование, может значительно быстрее сократить расстояние до цели.

Изменение скорости и угла пикирования существенно повлияет на траекторию маневра. Теперь рассмотрим, как изменение скорости до 400 м/с и угла пикирования до -60 градусов отразится на траектории рис. 2 (б):

1) На этапе прямолинейного полета истребитель пройдет 2000 метров, прежде чем начнет маневр пикирования. Это увеличение горизонтального расстояния позволяет истребителю быстрее достигать позиции для атаки цели.

2) Угол пикирования -60 градусов значительно изменяет вертикальную составляющую скорости. Это указывает на то, что истребитель будет значительно быстрее терять высоту при нашем новом угле пикирования по сравнению с предыдущими значениями.

3) Увеличение скорости вместе с более агрессивным маневрированием позволит самолету быстрее реализовать стратегическую позицию, что является важным аспектом в боевой ситуации.

Изменение скорости до 400 м/с и угла пикирования до -60 градусов позволяет значительно повысить свою маневренность и боевые возможности. Графическое представление показывает более агрессивный и эффективный маневр, что способствует быстрому снижению высоты и сокращению расстояния до цели. Поэтому такие изменения в параметрах маневрирования могут быть решающими в реализации боевых задач на высоком уровне конкурентного воздушного боя.

Заключение

Успешно разработаны и реализованы модели, которые позволяют с высокой точностью воспроизводить траектории сверхманевренных объектов. Использование различных подходов к моделированию позволило учесть сложные маневры и динамику движения.

Рекомендации по дальнейшему развитию и улучшению моделей:

- Углубленное моделирование: Рекомендуется провести более глубокий анализ влияния внешних факторов, таких как ветер, погодные условия и изменение массы объекта, на динамику маневров.

- Интеграция с системами искусственного интеллекта: Следующим этапом может стать интеграция разработанных моделей с алгоритмами машинного обучения и нейронными сетями для улучшения предсказательной способности и адаптивности моделей.

- Проверка на реальных объектах: Важно провести полевые испытания на реальных маневренных системах, чтобы подтвердить результаты симуляций и оценить практическую применимость разработанных моделей.

Успешное моделирование траекторий сверхманевренных объектов имеет огромное значение для повышения эффективности управления в авиации и военной технике. Это позволяет создавать более эффективные системы наведения и управления, которые могут реагировать на изменения окружающей среды и адаптироваться к новым условиям.

Поступила 15 мая 2024 г.

This work is devoted to the development of models that allow detailed analysis of the trajectories of supermaneuverable objects. The study examines various parameters that affect maneuverability, such as speed, altitude, and aerodynamic characteristics.

Key words: Super-maneuverable target, trajectory models, aerodynamic characteristics, motion parameters.

Казанцев Даниил Аркадьевич – магистрант кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

E-mail: kazancev.02@mail.ru

Костров Виктор Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Адрес: 602264, г. Муром, ул. Орловская, 23.

- В гражданских приложениях, таких как авиационные навигационные системы или беспилотные летательные аппараты, качественные модели траекторий обеспечивают безопасное и предсказуемое движение, что, в свою очередь, способствует повышению уровня безопасности полетов и оптимизации маршрутов.

- В целом, развитие технологий моделирования траекторий не только улучшит существующие системы, но и откроет новые горизонты для инновационных решений в области управления движением, что будет способствовать дальнейшему прогрессу в различных отраслях.

Таким образом, результаты данного исследования подчеркивают важность и актуальность разработки моделей траекторий сверхманевренных объектов, а также их значимость для будущих технологий и практических приложений.

Литература

1. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – С.21
2. Н.М. Оскорбин, С.И. Суханов. Теоретические и эмпирические модели процессов и их приложения. – Алтайский государственный университет.
3. Маркеев А.П. Теоретическая механика. — М.: ЧеРО, 1999. — С. 87. — 572 с.
4. Истребитель пятого поколения Су57:летно-технические характеристики – РИА Новости, 03.03.2020 [Электронный ресурс] – режим доступа к статье: <https://ria.ru/20191224/1562757163.html>