

# Управление в технических системах

© 2024 г. В.С. ВЕРБА, чл.-корр. РАН (vvs.msk@gmail.com),  
В.И. МЕРКУЛОВ, д-р техн. наук (mvipost41@gmail.com)  
(АО “Концерн “Вега”, Москва)

## ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ МЕТОДОВ НАВЕДЕНИЯ НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ИНТЕНСИВНО МАНЕВРИРУЮЩИЕ ЦЕЛИ. ЧАСТЬ 1. ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К СПОСОБАМ ОПТИМИЗАЦИИ МЕТОДОВ НАВЕДЕНИЯ

В воздушно-космическом противоборстве все большее применение находят высокоскоростные летательные аппараты, способные выполнять сложные пространственные маневры, обладающие рядом технико-экономических и тактических преимуществ. В связи с этим весьма актуальной задачей является оптимизация систем перехвата этих целей. На основе анализа траекторных особенностей полета высокоскоростных летательных аппаратов рассмотрены особенности функционирования систем их перехвата. Сформулированы требования к способам оптимизации методов наведения.

*Ключевые слова:* высокоскоростной летательный аппарат, сложный маневр, система перехвата, метод наведения, способ оптимизации, статистическая теория оптимального управления, обратные задачи динамики, градиентный способ, интеллектуальное управление.

DOI: 10.31857/S0005231024110041, EDN: YMDCII

### 1. Введение

Анализ особенностей военно-технического противоборства в воздушно-космической сфере [1] позволяет констатировать усиление роли и значимости высокоскоростных летательных аппаратов (ВСЛА) [2], способных совершать сложные пространственные маневры. Использование таких ЛА в качестве средств поражения позволяет получить в противоборстве целый ряд технико-экономических и тактических преимуществ [3].

Технико-экономические преимущества обусловлены очень высокой затратностью людских, материальных, финансовых и временных ресурсов, направленных на разработку и эксплуатацию систем противодействия, по сравнению с затратами на изготовление и применение ВСЛА как средств поражения.

Тактические преимущества ВСЛА обусловлены [3]:

- значительным сокращением подлетного времени к цели, а соответственно и уменьшением времени на подготовку противодействия, предопределяющим необходимость увеличения дальности действия систем перехвата;

- качественным сокращением арсенала возможных средств перехвата;
- практической невозможностью обеспечения всеракурсного перехвата;
- качественным ухудшением условий их обнаружения и сопровождения;
- неспособностью традиционных методов самонаведения обеспечивать эффективный перехват;
- способностью одновременно реализовать высокие показатели эффективности поражения целей, собственной живучести и динамичности.

В связи с этим все более востребованной является разработка более совершенных систем перехвата ВСЛА, способных нивелировать эти преимущества. Следует подчеркнуть, что в основе функционирования таких систем прежде всего должны лежать более совершенные методы наведения и процедуры их информационного обеспечения, что предопределяет необходимость проведения анализа возможностей различных способов оптимизации по разработке более совершенных методов наведения, обеспечивающих перехват ВСЛА.

Целью статьи является анализ особенностей гипотетических систем перехвата ВСЛА, обоснование на его основе требований к способам оптимизации методов наведения и качественный анализ их возможностей.

## 2. Особенности систем перехвата ВСЛА

Системы перехвата ВСЛА должны обеспечивать:

- устойчивое управление перехватчиком на больших расстояниях при совершении целью сложных маневров в условиях допустимых ограничений на величину сигналов управления;
- управление, предотвращающее при совершении маневров выход за пределы границ потери устойчивости;
- устойчивое наведение при воздействии на перехватчик различного рода возмущений;
- наведение на цель в составе группы;
- реализуемость управления.

Высокая скорость полета ВСЛА предопределяет, в первую очередь, необходимость учета ее влияния на эффективность систем перехвата. Прежде всего это связано с увеличением различного рода запаздываний в реагировании перехватчика на маневр цели, обусловленных его инерционностью. Кроме того, это предопределяет необходимость увеличения дальности действия систем перехвата, компенсирующего уменьшение времени на подготовку противодействия. В свою очередь, увеличение дальности действия систем перехвата приводит к качественному уменьшению угловой скорости линии визирования цели, основного информационного параметра большинства существующих методов самонаведения [4–7]. Эта особенность предопределяет необходимость использования нестационарных методов наведения [8], при реализации которых вначале устраняются угловые ошибки по направлению полета, а затем линейные промахи, основанные на минимизации угловой скорости линии визирования (УСЛВ).

Сложный характер пространственных перемещений высокоскоростных целей со сменой знака производных параметров относительного и абсолютного движения [9] обуславливает ряд особенностей функционирования систем их перехвата:

- неэффективность использования методов наведения в наивыгоднейшую упрежденную точку встречи [4] из-за периодического ее смещения в пространстве при маневре цели;
- принятие специальных мер по уводу носителя от границ потери устойчивости при выполнении им маневра по перехвату цели [10];
- использование в законе наведения высоких производных угловых координат, компенсирующих инерционность перехватчика [11];
- случайный характер времени наведения [4].

Следует подчеркнуть, что наиболее эффективным является использование ВСЛА в составе группы. В связи с этим весьма востребованной становится задача индивидуального наведения перехватчика на цель в составе группы [10–14]. В свою очередь это предопределяет необходимость использования траекторного управления наблюдением [10, 15–17], в рамках которого траектория наведения перехватчика на первом этапе должна обеспечить разрешение участников группы с выделением интересующей цели, а затем наведение на нее с минимизацией промаха.

Реализуемость при заданных ограничениях обеспечивается как минимум тремя условиями:

- соответствующими динамическими свойствами носителя, характеризующими его маневренность;
- возможностью устойчивого формирования оценок всех координат относительного и абсолютного движения цели, используемых в методе наведения;
- выполнением ограничений на рабочий диапазон координат состояния, управляющие перегрузки носителя и ошибки автоматического сопровождения по угловым и линейным координатам.

Высокая степень неопределенности условий применения, широкий спектр возможных маневров и их непредсказуемость предопределяют несовершенство моделей состояния, используемых при синтезе методов наведения и их информационного обеспечения. Эта особенность обуславливает в ряде случаев использование в качестве требуемых координат в законе управления непосредственно результатов измерений с точностью до ошибок измерений, отражающих действительное состояние системы “ВСЛА–перехватчик”.

Использование в качестве основного источника информации бортовой радиолокационной системы (РЛС) предопределяет необходимость учета двух ее особенностей:

- использование открытого радиоканала, по которому могут поступать различного рода радиопомехи;
- зависимость точности и достоверности формируемых измерений от геометрии взаимного расположения носителя РЛС и сопровождаемой цели.

Это требует формирования сигналов управления носителем, которые обеспечивают не только решение конечной задачи, но и наилучшие условия для наблюдений цели [10, 11]. Возможность решения перечисленных выше задач во многом зависит от используемого при проектировании метода оптимизации.

### 3. Особенности систем перехвата ВСЛА

Адаптация динамических свойств носителя к требованиям используемого метода наведения является очень сложной и дорогостоящей задачей. В связи с этим целесообразно оптимизировать метод наведения под готовый носитель, компенсируя его недостаточную динамичность дополнительными корректирующими сигналами на основе высоких производных угловых координат. Необходимо отметить, что формирование оптимальных оценок высоких производных угловых координат при измерении только бортовых пеленгов тоже является достаточно сложной задачей [9].

Противодействие высокоскоростным средствам поражения предопределяет необходимость решения целого ряда теоретических и прикладных задач управленческого и информационного планов, которые должны быть решены в процессе разработки конкретных систем перехвата. При этом основу решения теоретических задач составляет разработка (выбор и обоснование) математического аппарата оптимизации. Суть решения прикладных задач сводится к получению конкретных методов наведения и автоматического сопровождения цели на основе выбранного аппарата оптимизации.

В связи с этим представляет интерес оценка (хотя бы на качественном уровне) потенциальных возможностей различных способов оптимизации при решении задач синтеза методов наведения перехватчиков ВСЛА.

В рамках любого способа оптимизации [10–14, 18–22] необходимо определить:

- критерии (правила), определяющие соответствие оптимизируемой системы своему назначению;
- показатели совершенства, по которым можно качественно определить предпочтительность того или иного варианта разрабатываемой системы перехвата;
- набор ограничений на координаты состояний и величину сигналов управления;
- класс исходных моделей состояния, в рамках которого обеспечивается реализация поставленных задач;
- вид управляющего сигнала, обеспечивающего инвариантность к условиям применения;
- сложность (скорость) формирования сигнала управления (в рамках выбранных критериев), показателей и исходных моделей;
- набор оптимальных оценок координат состояния, необходимый для реализации метода наведения.

С точки зрения размера рабочей области применения, в рамках которой реализуется приемлемая адекватность условиям применения и универсальность формируемых управлений, наиболее целесообразным является использование линеаризованных нестационарных моделей [10], объединяющих достоинства линейных и нелинейных представлений.

При этом используемые модели состояния должны обеспечивать учет различных видов возмущений без расширения вектора состояния.

Несомненное достоинство нестационарных моделей состояния – возможность формирования нестационарных методов наведения, позволяющих изменять управляющие приоритеты в процессе функционирования [5, 8]. При этом для устранения зависимости эффективности управления от высоты, характерной для аэродинамических рулей, в качестве сигналов управления целесообразно выбирать поперечные ускорения.

Следует подчеркнуть, что даже в рамках одного способа оптимизации в зависимости от вида исходной модели и выбранного функционала качества можно получить различные варианты законов управления. Особенности математических моделей в пространстве состояния, их классификация и взаимосвязь с методами оптимизации подробно рассмотрены в [10].

В качестве показателей совершенства сформированных методов наведения систем перехвата ВСЛА, как правило, используются результаты выполнения целевого назначения: текущие и конечный промахи, ошибки наведения по угловым координатам, перегрузки, время наведения и т.д.

В общем случае набор ограничений определяется диапазоном обслуживаемых координат (дальность, скорость, ракурсы перехвата, допустимые промахи и т.д.) и величиной допустимых перегрузок, в рамках которых система реализует свое назначение.

Обобщая изложенное выше, можно прийти к заключению, что в приложении к задаче перехвата ВСЛА математический аппарат оптимизации должен обеспечивать:

- возможность формирования нестационарных методов самонаведения, способных перераспределять управленческие приоритеты в процессе перехвата;
- реализуемость, основанную на возможности использования носителей с реализуемой на практике маневренностью и способности устойчивого формирования всех оценок координат состояния, используемых в методе наведения, в рамках ограничений, накладываемых на диапазон обслуживаемых координат и величину управляющих сигналов;
- эффективный увод носителя и систем информационного обеспечения от границ потери устойчивости, что предопределяет необходимость формирования законов наведения с нелинейной (кубической) зависимостью от ошибок управления [14, 22];
- учет измеряемых возмущений без расширения вектора состояния;

- возможность формирования метода наведения при неизвестном времени перехвата;
- универсальность, характеризующую способность системы перехвата функционировать в широком поле условий применения, в том числе и в условиях их несоответствия моделям, положенным в основу синтеза;
- относительную простоту формирования закона управления в рамках реализуемых требований к вычислительной производительности бортовых вычислителей;
- возможность информационного обеспечения синтезированных методов наведения.

#### 4. Заключение

Далее в серии статей будут рассмотрены возможности различных подходов к оптимизации методов наведения на ВСЛА на основе:

- математического аппарата статистической теории оптимального управления (СТОУ) при минимизации квадратичных и квадратично-биквадратных функционалов качества;
- концепции обратных задач динамики;
- градиентного поиска;
- интеллектуального управления.

При этом в рамках СТОУ будут рассмотрены подходы к синтезу метода наведения на ВСЛА:

- на основе классического варианта [10, 15, 19–21] синтеза управления, оптимального в постановке Летова–Калмана;
- на основе варианта локальной оптимизации с использованием трансформации входных сигналов, воздействующих на заданный тип носителя;
- на основе формирования закона наведения по результатам прогноза положения цели на интервал времени, определяемый инерционностью перехватчика;
- на основе учета несоответствия динамических свойств цели и перехватчика непосредственно в законе наведения;
- на основе минимизации локальных квадратично-биквадратных функционалов качества [14, 22].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верба В.С., Меркулов В.И.* Проблемы выбора методов оптимизации перспективных авиационных систем радиоуправления // Тр. СПИИРАН. 2019. Т. 18. № 13. С. 535–557.
2. *Анцев Г.В., Сарычев В.А.* Системы самонаведения высокоточного оружия. Тезаурус. Справочное издание. М.: Радиотехника, 2020.
3. *Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В.* Проблемы перехвата высокоскоростных летательных аппаратов, маневрирующих по сложным законам. Часть 1 // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 2. С. 5–12.

4. Авиационные системы радиуправления. Учебник для военных и гражданских ВУЗов / Под ред. В.И. Меркулова. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008.
5. *Girard Anouck R.* Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion / Anouck R. Girard, Pierre T. Kabamba // *SIAM Review*. 2015. V. 57. No. 4. P. 611–624.
6. *Palumbo, Neil F.* Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques / Neil F. Palumbo, Ross A. Blauwkamp, Justin M. Lloyd // *Johns Hopkins Apl Technical Digest*. 2010. V. 29. No. 1. P. 42–59.
7. B. Zhu, J. Xu, A. Hanif Bin Zaini, L. Xie. A Three-Dimensional Integrated Guidance Law for Rotary UAV Interception / 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2016), Kathmandu, Nepal. 2016. P. 726–731.
8. Меркулов В.И. Нестационарные методы самонаведения // Вестник ВКО. 2020. № 1. С. 25–39.
9. Верба В.С., Меркулов В.И., Закомолдин Д.В., Лихачев В.Л. Проблемы перехвата высокоскоростных летательных аппаратов, маневрирующих по сложным законам. Часть 2 // Успехи современной радиоэлектроники. 2024. Т. 78. № 4. С. 5–14.
10. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Книга 1. М.: Радиотехника, 2023.
11. Меркулов В.И., Верба В.С. Синтез и анализ авиационных радиоэлектронных систем управления. Книга 2. М.: Радиотехника, 2023.
12. Sensor selection for tracking multiple groups of targets / Farzaneh R. Armaghani, Iqbal Gondal, Joarder Kamruzzaman, David G. Green // *J. Network Comput. Appl.* 2014. V. 46. P. 36–47.
13. Group target tracking via jointly optimizing group partition and association / Xuqi Zhang, Haiqi Liu, Fanqin Meng, Xiaojing Shen // *Automatica*. 2023. V. 153.
14. Donglei Cao, Beihong Jin, Sajal K. Das, Jiannong Cao. On collaborative tracking of a target group using binary proximity sensors // *J. Parallel Distributed Comput.* 2010. V. 70. No. 8. P. 825–838.
15. Григорьев Ф.Н. Управление наблюдениями в автоматических системах / Ф.Н. Григорьев, Н.А. Кузнецов, А.П. Серебровский. М.: Наука, 1986. С. 215.
16. Емельянов Д.Д. Траекторное управление наблюдениями в 3D с борта БПЛА по угломерной информации / Д.Д. Емельянов, Е.Я. Рубинович // Труды института математики и механики УрО РАН. 2020. Т. 26. № 1. С. 112–130.
17. Хуторцев В.В. Траекторное управление процессом наблюдения подвижного пеленгатора в топологии дорожной сети / В.В. Хуторцев // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2022. № 1. С. 165–176.
18. Верба В.С., Меркулов В.И., Капустян С.Г., Харьков В.П. Оптимизация радиоэлектронных систем управления. Методы и алгоритмы синтеза оптимального управления. Части 1–3 // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012 (№ 2); 2013 (№ 3); 2013 (№ 11).
19. Ройтенберг Я.Н. Автоматическое управление. М.: Наука, 1992.
20. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С., III. Оптимальное управление системами. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1982.

21. Черноусько Ф.А., Калмановский В.Б. Оптимальное управление при случайных возмущениях. М.: Наука, 1978.
22. Верба В.С., Меркулов В.И., Руденко Е.А. Линейно-кубическое локально-оптимальное управление линейными системами и его применение для наведения летательных аппаратов // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2020. № 5. С. 129–141.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Галеевым.*

Поступила в редакцию 19.03.2024

После доработки 08.07.2024

Принята к публикации 02.09.2024