

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

10, октябрь 2016

Платунова А. В.¹, Клишин А. Н.¹, Илюхин С. Н.^{1,*}

УДК: 623.466.55

¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[*iljukhin.stepan@rambler.ru](mailto:iljukhin.stepan@rambler.ru)

Введение

Сегодня одной из актуальных задач отечественных инженеров является разработка высокоточных ракетных комплексов, способных эффективно преодолевать противоракетную оборону противника и при этом осуществлять гарантированное поражение цели. Решение этой задачи достаточно важно с точки зрения обеспечения требований национальной безопасности государства, что в условиях современной геополитической обстановки в мире приобретает первостепенную важность.

Одним из путей решения проблемы повышения эффективности ракетных оперативно-тактических комплексов при преодолении противоракетной обороны (ПРО) противника является возможность совершения противоракетных маневров на подходе к зоне ПРО. Кроме того, траектории ракет формируются программами, рассчитываемыми перед стартом или непосредственно в полете. Рассчитанная программная траектория определяется, в общем случае, дальностью пуска и ограничениями на фазовые координаты. Фактически, зная место старта и дальность пуска, можно получить необходимую траекторию с той или иной степенью точности, и это не представляет трудностей для современных расчётных комплексов противника, благодаря работе которых определяется движение ракеты-перехватчика. Наиболее простым решением этой проблемы будет расширение границы “трубки попадающих траекторий”, при этом траектория движения не будет свободной, но возрастёт гибкость её выбора, и, как следствие, движение ракеты станет более непредсказуемым для противника.

Участки управления

Как правило, оперативно-тактическая ракета управляется на всем протяжении полета. При этом всю траекторию ракеты можно разделить на несколько участков:

- полет на активном участке траектории (АУТ);
- полет на восходящей ветви пассивного участка траектории (ПУТ) до выхода из атмосферы;
- полет на безатмосферном участке ПУТ;

- полет на нисходящей ветви ПУТ после входа в атмосферу.

На активном участке траектории полет ракеты характеризуется скоротечностью, высокой динамичностью протекания процессов. Для него характерно наличие сильных высококолебательных процессов в контуре системы управления (СУ).

Полет на восходящей ветви ПУТ протекает в условиях воздействия возмущающих факторов со стороны атмосферы. Нестационарность аэродинамики на этом участке полета приводит к необходимости настройки системы управления с учетом постоянно изменяющихся условия движения. В безвоздушном пространстве применение аэродинамических рулей становится невозможным, что сильно ограничивает возможности СУ, управление осуществляется только посредством газоструйных рулей. Полет летательного аппарата (ЛА) на нисходящей ветви ПУТ происходит в атмосфере, аэродинамические характеристики ракеты при этом также нестационарны. Кроме того, именно на нисходящей ветви ПУТ возникает необходимость совершения маневров с целью преодоления ПРО противника и поражения цели. Это требует высокой точности работы СУ и быстрого действия выработки требуемых для управления команд.

Следует отметить, что качество традиционных методов управления тем выше, чем больше имеется априорной информации о самом объекте и условиях его функционирования. На практике достаточно трудно обеспечить точное математическое описание объекта управления. Более того, характеристики объекта в процессе его функционирования могут существенно изменяться. Динамические характеристики ЛА в значительной степени зависят от режима полета, технологических разбросов конструкции, состояния атмосферы. В этих условиях традиционные методы часто оказываются вовсе неприемлемыми, либо дают неудовлетворительные результаты [4].

В качестве одного из решений данной проблемы можно рассматривать адаптивные системы, которые способны «приспосабливаться» к постоянно изменяющимся условиям функционирования, позволяя тем самым снизить влияние исходной неопределенности на качество управления, компенсируя недостаток априорной информации на этапе проектирования систем. Эффект «приспособления» к текущим условиям в адаптивных системах достигается за счет накопления и обработки информации о поведении объекта в процессе его функционирования. Соответственно, адаптивная система - это такая система, которая автоматически определяет нужный закон управления посредством анализа поведения объекта при его текущем управлении [4].

Анализируя участки управляемого полета оперативно-тактической ракеты, можно сделать вывод, что наибольшую эффективность адаптивные законы управления будут иметь при движении в атмосфере на ПУТ. На активном участке использование адаптивных систем будет нецелесообразным по причине высокой динамичности процессов, протекающих на этом участке. На безатмосферном участке необходимость в адаптации отпадает в связи с отсутствием возмущений и полной неэффективностью аэродинамических рулей.

Следует подчеркнуть, что для построения классической СУ ЛА с тем или иным алгоритмом управления необходимо обладать точными значениями аэродинамических коэффициентов, которые определяются в результате проведения серии полунатурных и летных испытаний, что требует определенных материальных и временных затрат. Использование адаптивных систем управления позволяет значительно сократить эти затраты и, как следствие, уменьшить стоимость разрабатываемой ракеты и время ее разработки, что также является актуальной задачей [2, 7].

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что исследования методов адаптивного управле-

ния ЛА, разработки его методического и алгоритмического обеспечения является одним из наиболее перспективных направлений в теории систем автоматического управления.

Методы синтеза адаптивных систем управления

Условно все методы синтеза адаптивных систем можно разделить на эвристические и теоретические [4, 8]. В эвристических методах отсутствует строгое обоснование устойчивости адаптивной системы, и, как следствие, условия применимости рассматриваемых методов.

Теоретические (строго обоснованные) методы можно разделить на два класса: точные и приближенные. В соответствии с двухуровневой схемой адаптивной системы задача разделяется на два этапа: синтез основного контура и контура адаптации.

В основе приближенных подходов лежат методы декомпозиции, основанные на упрощении модели и синтез по упрощенной модели. К ним относятся: метод усреднения, метод сингулярных возмущений, методы скалярных и векторных функций Ляпунова, методы теории возмущений и др. Среди точных методов синтеза основного контура наибольшее распространение получили: метод инвариантности, метод модального управления и оптимальный синтез.

В данной работе рассматривается адаптивная система управления с оптимальным синтезом, которая предполагает выполнение трех (в общем случае взаимосвязанных) процедур:

- определение динамических характеристик управляемого объекта в процессе его функционирования;
- оценивание состояния управляемого объекта;
- формирование управляющих сигналов с использованием информации, получаемой с помощью первых двух процедур.

В достаточно общем виде структура многопараметрической адаптивной оптимальной СУ представлена на рис.1 [1].

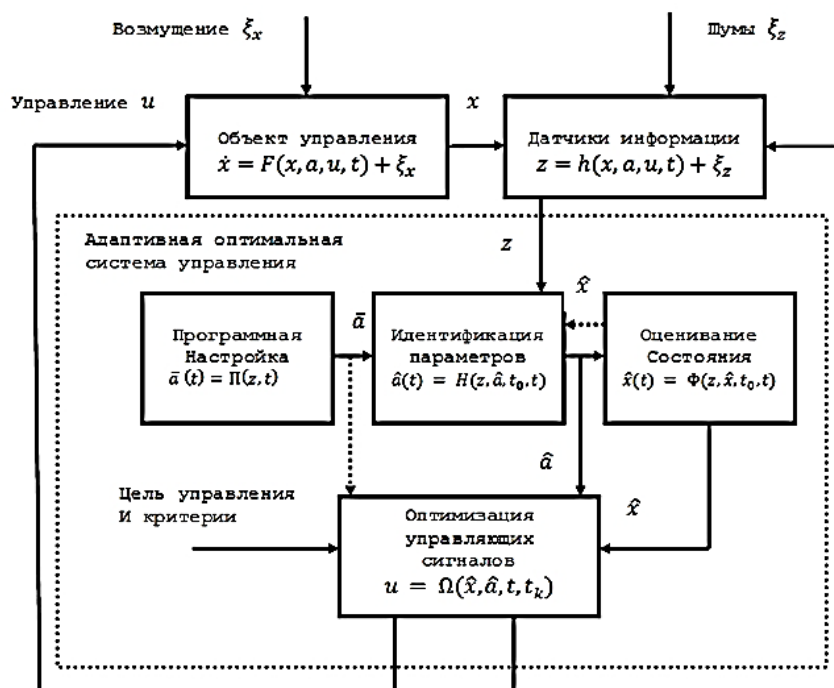


Рис.1. Структурная схема адаптивной оптимальной СУ

Рассмотрим объект управления, динамические характеристики которого известны с точностью до g -мерного вектора a . ЛА подвержен воздействию, как неконтролируемых возмущений, так и формируемых управлений. Положим также, что движение объекта описывается дифференциальным уравнением:

$$\dot{x} = F(x, a, u, t) + \xi_x, \quad (1.1)$$

где x - n -мерный вектор состояния объекта, определенный в пространстве X^n ;

a - g -мерный вектор параметров, принимающий значения из множества A^g и определяемый параметрами среды;

u - m -мерный вектор управляющих воздействий, формируемый системой управления и принадлежащий множеству U_m ,

t - текущее время, принадлежащее отрезку $[t_0, t_k]$ на котором определено уравнение (1.1);

ξ_x - n -мерный вектор неконтролируемых возмущений;

F - n -мерная векторная функция указанных аргументов, известная, по предположению, на основе теоретических и экспериментальных исследований объекта.

Наблюдение за движением объекта осуществляется с помощью комплекса датчиков, измеряющих компоненты состояния объекта и управления, поступающие на объект или известные в общем случае с точностью до параметров функции [1]:

$$z = h(x, a, u, t) + \xi_z, \quad (1.2)$$

Здесь z - одномерный вектор наблюдений в пространстве Z^1 ;

ξ_z - одномерный вектор аддитивных шумов, искажающих показания датчиков;

h - одномерная векторная функция указанных аргументов, известная на основе теоретических и экспериментальных исследований датчиков и информации.

Результаты измерений поступают в адаптивную оптимальную систему управления, где используются для определения и оптимального (субоптимального) оценивания его состояния.

Рассматриваемая структура предусматривает два типа методов определения характеристик объекта. Первый из них реализует программное восстановление основных характеристик объекта непосредственно по сигналам датчиков. В общем случае программа описывается векторной функцией [1]:

$$\bar{a}(t) = \Pi(z, t), \quad (1.3)$$

где $\bar{a}$ - g -мерный вектор из области программных значений параметров $A_{\text{пр}}^g$ пространства A^g .

Функция (1.3) может быть непрерывной или дискретной. При построении этой программы может использоваться вся располагаемая информация о динамических свойствах объекта и законах изменения его параметров.

Проанализировав данный способ восстановления параметров объекта (для ЛА - это аэродинамические коэффициенты, инерционно-массовые характеристики, энергетические параметры или коэффициенты уравнений динамики) можно выделить его следующие достоинства:

- относительно высокое быстродействие, позволяющее увеличить скорость адаптации системы управления;
- возможность хранения информации о редких, но крайне важных ситуациях, своевременная идентификация которых маловероятна.

Эти факторы повышают безопасность полетов с адаптивной системой управления. Кроме того, помимо вектора $\bar{a}$ возможно восстановление дополнительной информации, такой как значения доверительного интервала программных параметров или среднего квадратического отклонения истинных параметров от программных, статистические характеристики шумов и т.д. В качестве недостатка данного метода следует указать сложность учета большого числа факторов, влияющих на функцию (1.3), и необходимость значительного объема памяти.

В связи с этим, реализуемый объем программы является компромиссом между располагаемой информацией об объекте, аппаратурными возможностями системы управления и достигаемым результатом.

Вторым методом определения динамических характеристик объекта является параметрическая идентификация, использующая входные и выходные сигналы объекта.

Идентификация необходима для восстановления параметров объекта управления с требуемой для поставленной задачи точностью. При этом использование информации блока программ в значительной степени упрощает проведение идентификации. Так, в качестве начальных оценок вектора параметров могут использоваться значения, определяемые функцией (1.3). Дополнительная программная информация служит для обеспечения устойчивости и высокой скорости сходимости процессов идентификации.

В общем случае процесс идентификации описывается оператором:

$$\hat{a}(t) = H(z, \hat{a}, t_0, t), \quad (1.4)$$

где $\hat{a}$ – r -мерный вектор оценок компонент вектора a .

В рассматриваемой структуре полагается, что идентификация осуществляется в некоторой окрестности программного значения вектора параметров. В процессе идентификации система управления учитывает факторы, влияющие на динамические свойства объекта и не включенные в функцию (1.3) либо ввиду своей априорной неопределенности, либо в силу нецелесообразности. Облик этой части системы может в значительной степени изменяться в зависимости от соотношения ролей, отводимых указанным способом восстановления параметров объекта.

На основе информации, получаемой с датчиковой аппаратуры, и оценок параметров объекта осуществляется оптимальное (или субоптимальное) оценивание состояния объекта, позволяющее в значительной мере повысить точность информации о векторе x . Оператор, описывающий оценивание, в общем случае имеет следующий вид [1]:

$$\hat{x}(t) = \Phi(z, \hat{x}, t_0, t), \quad (1.5)$$

где $\hat{x}$ – n -мерный вектор оценок компонент вектора x .

Как и при идентификации, при оценивании состояния может использоваться дополнительная информация, восстанавливаемая программно. Это относится, например, к статистическим характеристикам шумов и средним квадратическим отклонениям начальных оценок $\hat{x}$ от истинных значений x . Получаемые оценки вектора состояния могут использоваться при идентификации параметров. Такая ситуация, например, возникает при использовании алгоритмов одновременного оценивания параметров и состояния. Допускается и отсутствие оценивания состояния в тех случаях, когда точность измерения компонент вектора состояния (1.2) достаточна для решения задач управления, стоящих перед системой.

Завершающим этапом синтеза многопараметрической адаптивной оптимальной системы управления является процедура оптимизации управляющих сигналов на основе задаваемых цели управления и критериев оптимизации. Оператор, формально описывающий формирование вектора оптимальных управлений, имеет вид:

$$u = \Omega(\hat{x}, \hat{a}, t, t_k). \quad (1.6)$$

Цель управления представляется заданным состоянием объекта $X_{\text{зад}}$ в A^n , которое определяется «верхним уровнем» иерархии управления объектом. Это заданное состояние может, например, выбираться экипажем, пилотирующим КА, или формироваться автоматически в навигационном комплексе ЛА.

Сформированные заранее критерии оптимальности определяют величину, отталкиваясь от которой алгоритм управления находит наилучший вариант достижения объектом заданного состояния x . Структура оператора $\Omega(\cdot)$ зависит от способа задания цели управления, минимизируемых критериев и выбора метода оптимизации. Входной информацией для оператора являются оценки состояния объекта $\hat{x}$, его параметров $\hat{a}$ и в общем случае время t . Для повышения оперативности адаптации управления может быть предусмотрено использование в (1.6) программного вектора параметров (1.3). Полученный вектор управления используется для воздействия на объект и контролируется системой датчиков.

Наиболее универсальным способом реализации процесса оптимизации управляющих сигналов в системе управления, структура которой представлена на рис.1, является способ, основанный на так называемом «совмещенном» синтезе управления [3].

Традиционный путь создания системы управления содержит следующие этапы:

- 1) формулирование критериев оптимальности;
- 2) разработка математической модели объекта;
- 3) синтез законов (алгоритмов) оптимального управления;
- 4) разработка алгоритмов адаптации (настройки) законов управления по режимам функционирования объекта;
- 5) осуществление полученных законов, в частности, с помощью управляющих центральных вычислительных машин (ЦВМ).

Такой подход позволяет достичь относительно невысокого объема вычислений, выполняемых в процессе управления (этап 5), но приводит к существенному сужению возможностей управляющих алгоритмов, так как структура и значительная часть параметров алгоритмов выбираются для конкретных условий [5].

Объединение трех последних этапов позволяет создать на базе ЭВМ управляющую систему, осуществляющую синтез оптимальных управлений и само управление практически одновременно в процессе функционирования объекта. Приспосабливаемость системы управления при этом обеспечивается непосредственным решением полной задачи оптимизации.

Реализация совмещенного синтеза законов управления приводит к тому, что практически единственным управляющим входом адаптивной оптимальной системы управления является задание конкретной формы критериев оптимальности. Этими критериями определяются цель и качество управления движением.

Разработка математической модели объекта управления является вторым из перечисленных выше этапов и последним "предварительным" этапом для системы совмещенного синтеза законов управления. Математическая модель, описывающая движение объекта управления и положенная в основу разрабатываемого алгоритмического обеспечения системы управления, определяет "глубину" управляемых и, следовательно, оптимизируемых процессов. Полнота отражения моделью динамических свойств объекта влияет на эффективность и трудоемкость как процессов идентификации и оценивания, так и процессов оптимизации.

Алгоритмы идентификации в реальном масштабе времени, используемые в адаптивных системах управления, строятся, как правило, на основе гипотезы квазистационарности характеристик объекта управления. В соответствии с этой гипотезой идентифицируемые параметры при выбранной структуре модели объекта или постоянны во времени, или изменяются с незначительной скоростью, пренебрежение которой практически не ухудшает оценок, получаемых на ограниченном временном интервале наблюдения. В силу не строгости гипотезы (параметры реального объекта изменяются во времени) и в связи с неизбежными ошибками в используемой априорной статистической информации процесс идентификации может сопровождаться накоплением ошибок, приводящих к снижению эффективности алгоритма.

Заключение

Адаптивные системы, безусловно, являются крайне перспективным направлением развития систем управления автоматическими летательными аппаратами. При этом наиболее чётко прослеживаются преимущества таких систем на конечном участке траектории летательных аппаратов, движущихся в сложной обстановке противодействия. В подобных условиях возникают предпосылки к рассмотрению задачи согласно теории «игр», поэтому на первые позиции выходят оптимальные методы синтеза адаптивных систем. Возрастание вычислительных мощностей при этом открывает всё новые возможности оптимизации и идентификации, в том числе, и описанные в данной работе.

Список литературы

- [1]. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука. 1987. 232 с.
- [2]. Кочубей С. Совершенствование противокорабельного ракетного комплекса «Гарпун» // Зарубежное военное обозрение. 1990. № 7. С. 46-52.
- [3]. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. М.: Наука. 1977. 272 с.
- [4]. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т. 3. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 748 с.

- [5]. Справочник по теории автоматического управления / под ред. Красовского А.А. М.: Наука. 1987. 713 с.
- [6]. Платунова А.В. Методика определения требуемых параметров системы стабилизации оперативно-тактической ракеты на начальной стадии проектирования // Молодёжный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 6. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/723395.html> (дата обращения 05.11.2014).
- [7]. Илюхин С.Н. Метод импульса силы для оценки энергетики управления полётом // Молодёжный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 8. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/606165.html> (дата обращения 05.11.2014).
- [8]. Грабин В.В., Крылов И.В. Оптимальное и квазиоптимальное наведение летательного аппарата на движущуюся цель. Методические указания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999. 20 с.
- [9]. Солунин В.Л., Гурский Б.Г., Лющанов М.А., Спирин В.Л. Основы теории систем управления высокоточных ракетных комплексов сухопутных войск / под ред. В.Л. Солунина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2001. 328 с.