



Федеральное государственное
унитарное предприятие

**НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
АВТОМАТИКИ И ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
имени академика Н.А. ПИЛЮГИНА
(ФГУП «НПЦАП»)**

ОГРН 1027739552642, ИНН 7728171283
117342, Москва, ул. Введенского, 1.
Телефон (495) 535-39-16, факс (495) 334-83-80
Телетайп Москва, 112635, 417814, ЗАПАД
E-mail: info@prсар.ru

27. 10. 2020 № 453/524

На № _____ от _____

«Утверждаю»

И.о. генерального директора
ФГУП «НПЦАП», доктор
технических наук, профессор,
Е.Л. Межирицкий



10 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственный центр автоматики и приборостроения имени академика Н.А.Пилюгина» на диссертационную работу Подвигиловой Елены Олеговны на тему: «Моделирование состояния подвижных объектов в условиях неопределённости с разработкой численного метода полиэдральной аппроксимации», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Представленная на рассмотрение диссертационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Актуальность исследований

На практике большое значение имеют задачи оценивания состояния и управления для подвижных объектов, функционирующих в условиях внешних возмущений, шумов измерений, при малом объёме измерительной информации, априорной неопределённости характеристик.

Исп.
Тел.

Задача оценивания в условиях неопределённости особенно важна для объектов ракетно-космической техники, в системах управления летательными аппаратами, в задачах навигации, в связи с тем, что не представляется возможным провести большое число экспериментов. Классические подходы к оцениванию основаны на предположении, что статистические характеристики возмущений и помех, действующих на подвижный объект, известны. Однако во многих ситуациях, когда проводится единственная реализация процесса, предположение о случайности возмущений и шумов является неоправданным, чаще известно лишь, что все возмущения и шумы являются ограниченными. В этом случае необходимо строить не вероятностные оценки, а гарантированные, то есть в виде множества, в котором гарантированно находится вектор состояния. Гарантированное оценивание является вычислительно сложным из-за необходимости выполнять операции над множествами. Существующие подходы к гарантированному оцениванию, такие как эллипсоидальное оценивание, интервальный подход, требуют меньше вычислительных ресурсов, но приводят к потере точности. Поэтому актуальной остается разработка эффективных алгоритмов построения гарантированных оценок вектора состояния высокоточных систем управления различными подвижными объектами.

Целью данной работы является разработка методов моделирования состояния подвижных объектов, разработка численных алгоритмов полиэдральной аппроксимации информационного множества и их реализация в виде программного комплекса, для чего решены следующие задачи:

- разработаны методы моделирования состояния подвижных объектов с учётом дополнительной информации о модели и характере процесса;
- разработаны методы моделирования гарантированных оценок возмущений и помех;
- разработан численный алгоритм полиэдральной аппроксимации информационных множеств;
- проведено сравнение разработанных алгоритмов гарантированного оценивания, основанных на полиэдральной аппроксимации информационных множеств, с существующими алгоритмами оценивания;
- реализованы разработанные алгоритмы в виде комплекса программ и проведены вычислительные и натурные эксперименты для различных подвижных объектов.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа представляет собой завершённую научно-квалификационную структура, содержание которой удовлетворяет требованиям определённым Положением № 842 «Положение о присуждении учёных степеней» и состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (173 наименования), четырех приложений. Содержит 185 страниц основного текста, в том числе 84 рисунка и 4 таблицы.

Во введении обоснована актуальность работы, проведён краткий обзор состояния вопроса, сформулированы цель и задачи исследования; изложены научная новизна и практическая ценность работы; приведены основные положения работы, выносимые на защиту; отражены вопросы апробации полученных результатов.

В первой главе проведен анализ методов оценивания состояния подвижных объектов в условиях неполной информации о начальном состоянии объекта, внешних возмущений и помехах в измерительных каналах. Сделан обзор детерминированных и вероятностных методов (наблюдатель Люенбергера, фильтр Калмана, метод максимума правдоподобия, байесовский фильтр), методов гарантированного оценивания и аппроксимации информационных множеств (эллипсоидальное оценивание, интервальный подход, метод двойного описания и др.). Отмечены преимущества и недостатки существующих подходов. Установлены объём и содержание исследований, необходимых для решения поставленной задачи.

Во второй главе представлен подход к описанию информационного множества объекта на всём интервале наблюдения системами линейных уравнений и неравенств на основе модели процесса и имеющихся ограничений на возмущения, помехи и начальное состояние в виде многогранников. Приведён алгоритм аппроксимации информационных множеств, основанный на описанной модели информационного множества и решении задач линейного программирования. Использование такой модели описания информационного множества дает возможность получать гарантированную оценку без выполнения операций над множествами. Алгоритм позволяет строить гарантированную оценку вектора состояния подвижного объекта на один шаг, а для большей точности есть возможность проводить обработку на окне измерений.

В третьей главе описаны алгоритмы гарантированного оценивания, учитывающие особенности модели возмущений и помех, что может быть использовано для повышения точности оценивания. Особый интерес

представляет случай разложения возмущения по системе функций, который широко используется на практике, в частности при разложении ветровых возмущений при движении летательного аппарата в атмосфере. В работе описан алгоритм, позволяющий получать гарантированную оценку вектора состояния, а также коэффициентов разложения по системе заданных функций. Также рассмотрен отдельный класс моделей подвижных объектов, используемых в различных технических приложениях – переключаемые системы, которые представляют собой семейство подсистем и закона переключения. Для таких моделей описан алгоритм гарантированного оценивания вектора состояния. Исследован случай аномальных измерений при использовании гарантированного подхода к оценке вектора состояния, получено аналитическое выражение величины выброса помехи измерений, которая гарантировано может быть обнаружена.

В четвертой главе продемонстрирована работа разработанных алгоритмов на примере вычислительных и натурных экспериментов. Проведены вычислительные эксперименты по оцениванию вектора состояния для модели бокового движения летательного аппарата и бесплатформенной инерциальной навигационной системы шестого и третьего порядков, соответственно. Для летательного аппарата с помощью разработанного алгоритма гарантированного оценивания по двум координатам оценка стянулась в точку, то есть была получена точная оценка. При использовании фильтра Калмана оценка не всегда попадала в доверительную область. При оценке состояния бесплатформенной инерциальной навигационной системы учёт информации о среднем значении возмущений позволяет уточнить оценку в 1,5...5 раз без значительного увеличения вычислительных затрат. Показана оценка коэффициентов в разложении быстрых колебаний по системе хаотических функций в измерениях по результатам обработки измерительной информации, полученной с волоконно-оптического гироскопа, что позволило снизить неопределённость в измерениях 2 раза. Это может быть использовано при прогнозировании вектора состояния. Показано гарантированное оценивание состояния автомобильной дроссельной заслонки, математическая модель которой является переключаемой системой. Рассмотрено применение гарантированного подхода в задаче динамических измерений температуры для уменьшения времени получения реального значения температуры. Время получения температуры удалось уменьшить в 1,7...2 раза, что особенно важно при определении перегрева.

В пятой главе описан программный комплекс, реализующий

описанные алгоритмы. Комплекс предназначен для проведения вычислительных экспериментов и исследований гарантированных оценок состояния при различных исходных данных. Программный комплекс позволяет на этапе проектирования систем управления исследовать точность и время вычисления оценок вектора состояния подвижных объектов, полученных при различных условиях функционирования объекта.

В заключении сформулированы основные выводы и приведены результаты работы в соответствии с целью и задачами исследований. Даны рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования и перспективы дальнейшего исследования.

Степень обоснованности научных результатов обеспечивается комплексным и всесторонним рассмотрением поставленной задачи, корректным использованием математического аппарата, проведением вычислительных и натурных экспериментов.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 26 публикациях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 7 – в изданиях, входящих в международную базу Scopus. Основные материалы и результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на конференциях всероссийского и международного уровня.

Научная новизна и значимость работы характеризуется следующими результатами:

1. Предложен алгоритм получения гарантированных оценок вектора состояния на основе полиэдральной аппроксимации информационных множеств, использующий предложенный способ описания модели информационных множеств системами линейных уравнений и неравенств. При таком подходе исключается выполнение операции суммы и пересечения множеств. Предложена не только одношаговая процедура, но и процедура на окне измерений, что позволяет уменьшить размеры информационного множества и повысить точность гарантированных оценок.

2. Разработанный алгоритм позволяет оценивать не только вектор состояния, но и вектор возмущений, действующих на объект, и помех в измерительных каналах. Данный результат представляет большой интерес при разработке адаптивных алгоритмов оценивания в системах управления, а также при использовании оценки возмущений в контуре управления объектами.

3. Разработан алгоритм оценивания вектора состояния, когда имеется дополнительная информация о возмущениях и помехах, кроме множеств

возможных значений, например, при ограничении на среднее значение возмущений, на скорость изменения возмущений, при разложении возмущений и помех по системе базисных функций. Учёт дополнительной информации позволяет повысить точность оценивания.

4. Разработан программный комплекс, реализующий разработанные алгоритмы.

Практическая значимость работы и реализация её результатов:

1. Разработанные алгоритмы гарантированного оценивания могут быть использованы для различных задач управления объектами ракетно-космической техники, подвижными объектами, технологическими процессами, а также в задачах обработки информации в условиях неполноты информации о начальном состоянии объекта, возмущениях и помехах.

2. Разработан программный комплекс, реализующий разработанные алгоритмы, на который получено свидетельство о регистрации программы ЭВМ. Комплекс позволяет на этапе проектирования системы управления подвижным объектом и разработки математического обеспечения бортовых цифровых вычислительных машин оценить время вычисления оценок, точность оценивания, анализировать гарантированные оценки состояния объекта при различных исходных данных.

3. Результаты диссертационной работы использованы в АО «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова» (г. Екатеринбург) для решения задачи обработки информации и исследования точности измерительной информации волоконно-оптического гироскопа и в ООО «ДСТ-УРАЛ» (г. Челябинск) при разработке систем управления, что подтверждается актами использования.

Рекомендации по использованию результатов и выводов работы

Алгоритмы гарантированного оценивания, разработанные в диссертационной работе, могут быть использованы в системах управления летательных аппаратов, объектов ракетно-космической техники различного назначения, подвижных объектов, функционирующих в условиях неполной информации, в задачах навигации, обработки результатов испытаний, телеметрии, в автоматизированных системах управления технологическими процессами. С помощью разработанного программного комплекса можно анализировать гарантированные оценки вектора состояния объекта при различных составах измерительных систем, характеристиках точности измерительных приборов и датчиков, реализациях возмущений и помех, параметрах математической модели движения объекта.

В качестве **замечаний** к работе следует отметить:

1. В работе не полностью обоснован метод вычисления точечной оценки вектора состояния при применении гарантированного подхода.
2. В работе не отмечено, что границы полученных гарантированных оценок изменяются резко, а не плавно с течением времени.
3. Отсутствует зависимость точности гарантированного оценивания от окна измерений.
4. Не приведена оценка вычислительных ресурсов в вычислительных и натурных экспериментах, описанных в главе 4.
5. В работе не объяснён выбор начального ограничения на коэффициенты разложения быстрых колебаний по системе хаотических функций.

Однако, сделанные замечания не снижают общей положительной оценки теоретической и практической значимости выполненного исследования.

Заключение по диссертации

Анализ диссертационной работы Подвильовой Елены Олеговны на тему: «Моделирование состояния подвижных объектов в условиях неопределённости с разработкой численного метода полиэдральной аппроксимации» в целом позволяет сделать следующие выводы:

1. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».
2. Представленная диссертационная работа Подвильовой Елены Олеговны является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны, внутреннего единства, научной и практической значимости. Диссертация написана грамотно, чётким и ясным языком. Изложение текста сопровождается большим количеством графического материала, поясняющего и иллюстрирующего результаты основных положений и технических решений.
3. Диссертация полностью соответствует критериям, установленным п.п. 9 - 14 Положения о присуждении учёных степеней ВАК Министерства образования и науки РФ, а её автор, Подвильова Елена Олеговна, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Материалы диссертации Подивиловой Елены Олеговны и отзыв ведущей организации рассмотрены и одобрены на заседании НТС теоретического отделения 01 ФГУП «НПЦАП». (Протокол № 12 от 21 октября 2020 года).

Заместитель генерального конструктора - начальник теоретического отделения 01 ФГУП «НПЦАП», доктор технических наук, профессор



Румянцев Геннадий Николаевич

Почтовый адрес: 117342 г. Москва, ул. Введенского, д.1, ФГУП «НПЦАП», тел. 89104674539.

Начальник отдела организационно-методической координации научных функций Центра, учёный секретарь НТС ФГУП «НПЦАП», заведующий аспирантурой, доктор технических наук, профессор



Никифоров Виталий Меркурьевич

Почтовый адрес: 117342 г. Москва, ул. Введенского, д.1, ФГУП «НПЦАП», тел. 89104098416, адрес электронной почты: v.m.nikiforov@mail.com

« 27 » октября 2020г.