

О Т З Ы В

на диссертацию Рыбакова Константина Александровича
Спектральный метод анализа и статистического моделирования
непрерывных стохастических систем,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности

2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Основанный на спектральной форме анализ непрерывных стохастических систем, описываемых линейными и нелинейными стохастическими дифференциальными уравнениями, играет важную роль в описании поведения динамических объектов в различных приложениях (системы механики, биологии, микроэлектроники, финансов и др.). В отличие от детерминированных аналогов, моделирование с помощью стохастических дифференциальных уравнений может дать значительное дополнительное представление о реакции динамической системы за счет учета неопределенностей как структурного характера, так и возникающих из-за физически присущей неустранимой случайной изменчивости процесса, сопровождающего ее функционирование. В связи с тем, что точные знания о решениях стохастических дифференциальных уравнений не всегда доступны, то разработка приближенно-аналитических и численных методов получения решений, обеспечивающих приемлемого качества анализ выходных процессов стохастической системы, является проблемой актуальной.

При моделировании процессов в форме стохастических дифференциальных уравнений нередко избегают применения схем интегрирования высокого порядка, поскольку они требуют моделирования повторных стохастических интегралов. Однако существует ряд задач стохастического управления нелинейными системами (например, обеспечения надежности состояния деградирующих конструкций), решение которых требует моделирования повторных стохастических интегралов более высокого порядка, что является вычислительно сложным процессом.

Основные результаты представленного к защите диссертационного исследования связаны с применением спектрального преобразования, под которым понимается переход от описания систем и процессов во временной области к описанию в спектральной области, при этом не требуется выполнения условия стационарности системы, что является немаловажным для расширения областей применимости получаемых при этом результатов.

Полезные свойства спектрального преобразования чрезвычайно вычислительно привлекательны, поскольку операциям умножения, интегрирования и дифференцирования во временной области сопоставлены действия с векторами и матрицами в спектральной области, что открывает возможность простой программной реализации спектрального метода анализа сложных систем. К недостаткам данного подхода относится практическая сложность получения точного решения задачи анализа и необходимость перехода к приближенному решению.

Спектральный метод анализа линейных непрерывных стохастических систем позволяет не только получить в явном виде решение задачи анализа выходных процессов, но и дает возможность моделировать траектории систем, что важно для решения задачи оценивания состояний по косвенным измерениям: фильтрации, сглаживании и прогнозировании.

Самостоятельным результатом работы является представление повторных стохастических интегралов, полученное на основе спектрального метода. Данный результат применяется не только для решения задачи анализа линейных систем, но и в нелинейном случае как составная часть разработанного в диссертации численного метода.

Часть представленных в работе результатов относится к решению задач как в классе непрерывных детерминированных, так и в классе стохастических систем, например, решена проблема учета ограничений на функции в спектральной области.

Отдельно выделены результаты в теории кратных стохастических интегралов. В работе они активно используются для сравнения с точным и приближенным представлениями повторных стохастических интегралов, полученным на основе спектрального метода анализа, а также для вычисления погрешностей приближенного представления.

Научная новизна представленной к защите диссертации состоит в следующих результатах:

1. Разработано алгоритмическое обеспечение представления случайных процессов в спектральной форме математического описания систем управления.
2. Обобщен спектральный метод для анализа и статистического моделирования линейных непрерывных стохастических систем, получены представления некоторых типовых случайных процессов в спектральной форме математического описания систем управления.
3. Обобщен спектральный метод для оценивания состояний (фильтрация, сглаживание и прогнозирование) линейных непрерывных стохастических систем с полиномиальными измерителями.

4. Получены ортогональные разложения кратных стохастических интегралов Ито и Стратоновича произвольной кратности в виде рядов случайных величин, которые необходимы в том числе для статистического моделирования нелинейных непрерывных стохастических систем.

5. Разработаны методы расчета коэффициентов разложения функций многих переменных (относительно полиномов Лежандра, косинусоид, функций Уолша и Хаара, тригонометрических функций), определяющих повторные стохастические интегралы, необходимые для реализации методов статистического моделирования нелинейных непрерывных стохастических систем.

6. Получены представления повторных стохастических интегралов Ито и Стратоновича произвольной кратности на основе спектральной формы математического описания систем управления.

7. Получены формулы для точного вычисления среднеквадратических погрешностей аппроксимации кратных и повторных стохастических интегралов Ито и Стратоновича на основе перехода к симметризованным функциям.

8. Разработан метод аппроксимации множества спектральных характеристик функций одной переменной с ограничениями (типовыми ограничениями на управляющие воздействия или входные/выходные сигналы).

9. Разработано алгоритмическое обеспечение статистического моделирования кратных и повторных стохастических интегралов Ито и Стратоновича на основе спектральной формы математического описания систем управления.

Диссертация содержит такие стандартные разделы, как введение и заключение, библиографический список. Введение содержит необходимые для описания диссертационного исследования элементы: актуальность работы, объект и предмет исследования, цель работы и задачи, методы исследования, достоверность результатов, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, соответствие диссертации паспорту научной специальности, личный вклад соискателя, описание структуры диссертации, основные результаты, апробация работы и сведения о публикациях по теме работы. Заключение подводит итоги диссертационного исследования.

Основные результаты изложены в шести главах. Также имеется приложение с описанием пакета программ спектрального метода.

Первая глава включает сведения об описании детерминированных систем в спектральной области. Даны определения спектральных характеристик, их свойства, формулы для их нахождения относительно пяти базисов (полиномы Лежандра, косину-

соиды, функции Уолша и Хаара, тригонометрические функции). Эта глава по большей части является вводной, однако в ней приведены и новые результаты, в том числе, отнесенные к основным, например, метод аппроксимации множества спектральных характеристик функций одной переменной с ограничениями.

Вторая глава содержит результаты, связанные с описанием случайных процессов и их преобразованием в спектральной области. Даны определения спектральных характеристик, их свойства. Разработано алгоритмическое обеспечение представления случайных процессов в спектральной области. Практический интерес представляют примеры нахождения спектральных характеристик для конкретных случайных процессов, например, винеровского процесса.

Третья глава решает задачу анализа и статистического моделирования линейных непрерывных стохастических систем, а в качестве приложения и задачу оценивания состояний (фильтрация, сглаживание и прогнозирование) линейных непрерывных стохастических систем с полиномиальными измерителями. Обе задачи решаются спектральным методом. Применимость предложенного подхода демонстрируется на модельных примерах и решении прикладной задачи.

В четвертой главе рассмотрены спектральные характеристики функций многих переменных. С позиции теории управления форма математического описания в спектральной области полилинейных детерминированных систем была предложена для анализа систем управления с определенной структурой. В этой же главе представлены разработанные методы расчета коэффициентов разложения функций многих переменных относительно пяти базисов, определяющих повторные стохастические интегралы, необходимые для реализации методов статистического моделирования нелинейных непрерывных стохастических систем.

Пятая глава посвящена представлению кратных стохастических интегралов. Здесь содержатся как довольно общие теоретические результаты, так и частные случаи. Устанавливается связь этих результатов со спектральным преобразованием и спектральным методом. Получены ортогональные разложения кратных стохастических интегралов произвольной кратности в виде рядов случайных величин, которые необходимы в том числе для статистического моделирования нелинейных непрерывных стохастических систем. Полученные теоретические результаты подтверждаются с помощью статистического моделирования.

Шестая глава содержит новые представления повторных стохастических интегралов произвольной кратности. Данный результат непосредственно связан с описани-

ем в спектральной области полилинейных детерминированных систем. Установлены связи с известными результатами. Проведен достаточный объем вычислительных экспериментов, подтверждающих корректность теоретических выводов.

Для записи стохастических дифференциальных уравнений применяется как форма Ито, так и форма Стратоновича. Кратные и повторные стохастические интегралы также рассматриваются в двух вариантах: интегралы Ито и Стратоновича. Часть результатов получена для общего случая, включающего формы Ито и Стратоновича как частные случаи.

Замечания по диссертационной работе относятся, в основном, к форме представления результатов.

1. Во введении описаны численные методы анализа непрерывных стохастических систем, приведены сведения о спектральном методе и его развитии. Однако методы анализа сложных систем не исчерпываются указанными направлениями и упорядочение сведений о других методах повысило бы интерес к обзору и способствовало бы процессу распространения научных результатов, полученных автором, среди специалистов по смежным прикладным областям.
2. Предложенный в разделе 3.4 алгоритм решения задачи оценивания состояний линейных непрерывных стохастических систем кроме спектрального метода использует идею фильтра частиц. Для классического фильтра частиц известна проблема вырождения выборки (стремление к нулю части весовых коэффициентов). В диссертации следовало бы отметить, возникает ли эта проблема в предложенном алгоритме оценивания.
3. При вычислении моментов повторных стохастических интегралов в разделе 6.3 осуществляется переход от стохастических дифференциальных уравнений к уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова для плотности вероятности. И формулы для моментов получаются уже на его основе, хотя их можно получить, опираясь только на стохастические дифференциальные уравнения.
4. В диссертации не поясняется, почему для практической реализации спектрального преобразования выбраны именно эти пять базисов: полиномы Лежандра, косинусоиды, функции Уолша и Хаара, тригонометрические функции.
5. В диссертации дано большое количество теоретических, методических, вычислительных примеров, иллюстрирующих полученные автором результаты. Однако отсутствует явный акцент на данных какого-либо численного сравнительного исследова-

дования, доказывающего преимущество предлагаемого решения конкретной прикладной задачи по сравнению с известными.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. В целом представленная диссертация «Спектральный метод анализа и статистического моделирования непрерывных стохастических систем» представляет собой законченную научную работу, которая выполнена на высокопрофессиональном уровне. Предлагаемые методы решения задачи анализа и статистического моделирования непрерывных стохастических систем являются новыми, а сама задача представляется актуальной. Работа вносит существенный вклад в развитие теории стохастических систем, имеет несомненную практическую значимость. Достоверность теоретических результатов обусловлена строгими доказательствами соответствующих теорем, представленные результаты подтверждаются с помощью вычислительных экспериментов и детального статистического моделирования. Высокий уровень результатов подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Рыбакова Константина Александровича отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым Высшей аттестационной комиссией к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

Официальный оппонент: профессор кафедры компьютерных технологий и программной инженерии института вычислительных систем и программирования ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» (ГУАП)
д.т.н., доцент

Колесникова Светлана Ивановна

Подпись Колесниковой Светланы Ивановны удостоверяю.

(должность)

(подпись)

(Ф.И.О.)

М.П.

Дата

23.09.2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», ул. Большая Морская, д. 67, лит. А, Санкт-Петербург, 190000, Россия.
Тел.: +7(812) 710-65-10
Электронная почта: common@aanet.ru
Веб-сайт: <http://guap.ru>



Заверяю
Сотрудник Управления персоналом
Павлюченко М.В.
23.09.2024 г.

С отзывом ознакомлен
Иванов 02.10.2024