

УДК 681.518.3

Спектрально-временные методы оптимальной фильтрации и оценки достоверности сигналов случайных процессов

Виноградова Екатерина Денисовна^{1, 2(*)}

vinogradovae415@gmail.com

Костишин Максим Олегович^{1, 2}

maksim@kostishin.com

¹ ГУАП, Санкт-Петербург, Россия² АО «ОКБ «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Рассмотрены теоретические основы спектрально-временных методов оптимальной фильтрации и оценки достоверности сигналов случайных процессов. Исследуемые алгоритмы основаны на теореме ортогонального проецирования и использовании разложения Карунена — Лозва, что позволяет осуществлять спектральное сжатие информации без потери точности. Предложенные методы обеспечивают универсальную обработку сигналов широкого класса, включая нестационарные и не марковские процессы, а также позволяют оценивать вероятность невыхода случайного процесса за пределы допустимых границ. Результаты сопоставлены с фильтрацией Калмана, при этом продемонстрировано снижение вычислительной сложности и повышение устойчивости и помехозащищенности алгоритмов.

Ключевые слова: спектрально-временная фильтрация, ряд Карунена — Лозва, достоверность сигналов, оптимальная оценка, случайные процессы, вероятность невыхода

Введение. Задачи оптимальной фильтрации и оценки состояния случайных сигналов традиционно решаются с использованием алгоритмов фильтрации Калмана [1]. Однако классические рекуррентные методы требуют марковости моделей сигналов и знания матриц состояния, что ограничивает их универсальность и повышает вычислительные затраты. Для обработки сигналов не марковских и коррелированных процессов актуально применение альтернативных подходов, сохраняющих оптимальность при более простой структуре. Одним из таких направлений является спектрально-временной метод оптимальной фильтрации, основанный на использовании разложения Карунена — Лозва [2].

Методы и материалы. Рассматриваемый метод опирается на теорему ортогонального проецирования, позволяющую формировать оператор оптимальной линейной оценки в пространстве входных измерений. Сигнал представляется в виде конечного ряда Карунена — Лозва, что обеспечивает декорреляцию компонент и минимизацию средней квадратической ошибки. При этом отпадает необходимость решения нелинейного уравнения Риккати, характерного для фильтра Калмана. Для оценки достоверности применено вероятностное моделирование невыхода случайного процесса за симметричные границы поля допуска на определенном интервале времени [3]. Аналитические зависимости вероятности невыхода и среднего времени достижения

границ получены на основе частичных сумм разложения Карунена — Лозва и анализа собственных значений корреляционной функции процесса.

Результаты. В результате численных экспериментов установлено, что при использовании 2–4 спектральных компонент обеспечивается относительная точность аппроксимации 0,9–0,95 при снижении размерности задачи на порядок. Вероятностные оценки, полученные спектрально-временным методом, совпадают с результатами разностных схем с погрешностью не более 0,02 в диапазоне нормированных времен $xT \leq 1$. Метод продемонстрировал устойчивость при изменении параметров корреляционной функции и возможность априорной оценки достоверности сигнала по заданному уровню шума.

Заключение. Спектрально-временные методы оптимальной фильтрации и прогнозирования могут применяться как универсальное средство обработки сигналов случайных процессов и оценки их достоверности без ограничения на марковость модели. Использование разложения Карунена — Лозва позволяет существенно снизить вычислительную сложность и повысить устойчивость алгоритмов при сохранении оптимальной точности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем автоматического и автоматизированного управления, навигации и диагностики сложных технических объектов.

Список источников

- [1] Медич Дж. *Статистически оптимальные линейные оценки и управление*. Москва, Энергия, 1973, 440 с.
- [2] Иванов Ю.П. Универсальный линейный спектрально-финитный квазиоптимальный метод фильтрации результатов измерения. *Инновационное приборостроение*, 2025, т. 4, № 4, с. 54–60. <https://doi.org/10.31799/2949-0693-2025-4-54-60>
- [3] Виноградова Е.Д., Иванов Ю.П. Спектрально-финитный метод оценки априорной достоверности невыхода навигационного параметра (угла атаки) летательного аппарата за пределы поля допуска на заданном интервале времени. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки*, 2025, № 6–3, с. 44–50. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2025.06-3.06>