

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА ДЛЯ ОЧИСТКИ СИГНАЛА ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИЙ ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ахметзянов Г.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Аваков С.М.— д-р техн. наук, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация. Разработан метод фильтрации и отсеивания шумов и паразитных сигналов, рассмотрены стандартный и предиктивный методы фильтрации Калмана, вейвлет-преобразования, их преимущества перед традиционными методами фильтрации, а также возможности их использования в контексте фотолитографического оборудования

Ключевые слова. фильтрация Калмана, отсеивание шума, сглаживатель, вейвлет-преобразования, фотолитография

Введение. В современном литографическом оборудовании, таком как сканеры и степперы, предъявляются экстремальные требования к точности позиционирования, достигающей единиц нанометров. Фотоэлектронные датчики, включая лазерные интерферометры и емкостные датчики уровня, являются ключевыми элементами систем измерения положения стола и контроля фокусировки. Однако их сигналы подвержены интенсивному воздействию вибраций, возникающих из-за работы сервоприводов, клиновых редукторов, пьезодвигателей, газостатических направляющих, внешних фундаментных возмущений и собственных резонансных мод конструкции. Традиционные методы фильтрации, такие как фильтры нижних частот или скользящее среднее, в этих условиях либо вносят недопустимые фазовые задержки, либо недостаточно эффективны из-за нестационарного характера помех. В связи с этим применение алгоритма фильтрации Калмана становится необходимым инструментом для обеспечения требуемой точности измерений.

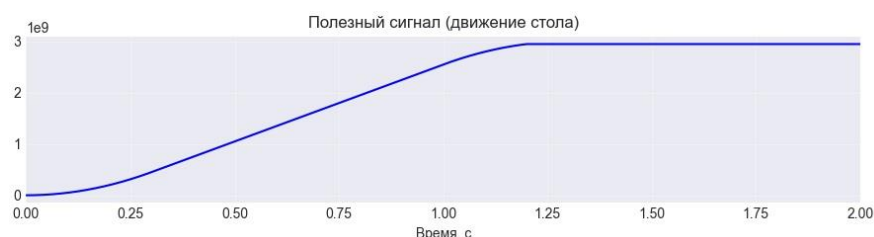


Рисунок 1 — Модель движения стола; координата x обозначает время работы стола в с, координата y — перемещение стола в мм

Задача. В идеальной системе позиционирования существует модель движения стола, представленная на рисунке 1. Однако при работе реального фотолитографического оборудования наблюдаются помехи, подобные тем, что представлены на рисунке 2. Чтобы устранить или, по крайней мере, минимизировать влияние вибраций и внешних шумов, необходимо разработать фильтр, создающий математическую модель, компенсирующую посторонние нежелательные эффекты.

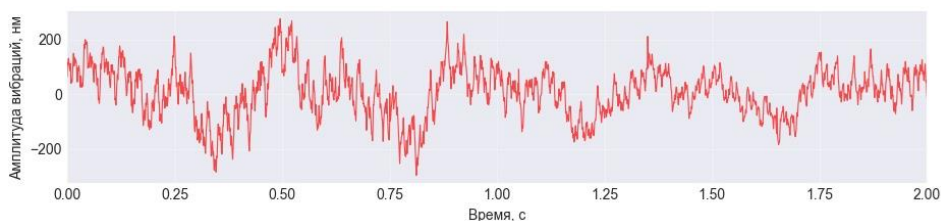


Рисунок 2 — Моделируемые вибрации (гармоники + импульсы)

Основная часть. Практическая реализация начинается с идентификации системы: необходимо снять спектр вибраций с помощью акселерометров, выделить доминирующие частоты и построить модели формирующих фильтров. Настройка ковариаций шума процесса и измерений должна учитывать физические ограничения динамики стола и реальный уровень шумов, полученный при неподвижном оборудовании. Критически важным аспектом является учет временных задержек, вносимых аналоговой частью датчиков и аналого-цифровыми преобразователями. Для компенсации этих задержек применяются фильтры Калмана со смещенной моделью или с функцией предсказания, что необходимо для предотвращения потери устойчивости на резонансных частотах сервоконтура [2].

Основой для синтеза фильтра служит модель динамики измеряемого параметра и модель измерительного тракта. В литографии наиболее адекватной является модель постоянной скорости или постоянного ускорения, где вектор состояния включает положение, скорость и, при необходимости, ускорение. Для литографического оборудования адекватной является модель постоянной скорости или постоянного ускорения (*модель Сигала*):

$$x_k = Fx_{k-1} + w_k, \quad w_k \sim N(0, Q), \quad (1)$$

где вектор состояния обычно включает:

p – положение (измеряемая величина);

v – скорость;

a – ускорение (опционально, для учета рывков при движении стола).

Матрица перехода F (для модели с постоянной скоростью, интервал времени Δt):

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Процесс измерения описывается *уравнением наблюдения*, в котором шум измерения в условиях вибраций не является белым, а содержит коррелированные составляющие на частотах от десятков до сотен герц. Фотоэлектронные датчики (например, лазерные интерферометры или емкостные датчики) выдают сигнал, искаженный вибрациями. Уравнение измерения:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (3)$$

где $H = [1, 0]$ (измеряем только положение),

v_k – шум измерения. В условиях вибраций v_k не является белым шумом; он содержит коррелированные компоненты на частотах вибраций (десятки-сотни Гц).

При создании фильтра Калмана используется два вида шумов: Q (шум процесса) — Определяется физикой движения стола (максимальное ускорение, рывок); обычно задается как малая величина, соответствующая неопределенности модели движения. R (*шум измерения*) — Оценивается по статическим измерениям (стол неподвижен), а также анализ спектра вибраций; для адаптивных версий задается начальное приближение [1]. Стандартный фильтр Калмана предполагает априорно известные ковариации шумов (Q и R), однако вибрационный фон в оборудовании существенно меняется в зависимости от фазы цикла

экспонирования – разгона стола, стабилизации, самой экспозиции и торможения. Для решения этой проблемы применяются адаптивные модификации, в частности адаптивный фильтр Калмана, который оценивает ковариацию шума (Q и R) измерения в реальном времени на основе анализа инновационной последовательности (невязки). Это позволяет фильтру динамически подстраиваться под изменение амплитуды вибраций. Адаптивный фильтр Калмана (AKF) используется для оценки ковариации шума измерения R в реальном времени. Наиболее эффективен метод на основе инновационной последовательности (невязки):

$$\check{z}_k = z_k - H^x_{k|k-1}. \quad (4)$$

Эмпирическая ковариация инновации вычисляется как:

$$\hat{S}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \check{z}_i \check{z}_i^T. \quad (5)$$

Теоретическая ковариация инновации:

$$S_k = H P_{k|k-1} H^T + R_k. \quad (6)$$

Более эффективным подходом к подавлению узкополосных вибраций является использование формирующих фильтров, реализуемое через расширение вектора состояния. В этой модели вибрации описываются собственными динамическими уравнениями, а расширенный вектор состояния объединяет физические переменные движения и компоненты вибрационного воздействия.

Модель вибрации (например, для одной гармоники) описывается формирующим фильтром:

$$d_{k+1} = A_d d_k + w_{d,k}. \quad (7)$$

Расширенный вектор состояния:

$$x_k^{aug} = \begin{bmatrix} x_{physics} \\ d_{vibration} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Такой подход позволяет фильтру Калмана не просто сглаживать зашумленный сигнал, а вычитать из измерений оцененную составляющую вибрации, выделяя полезный сигнал перемещения стола практически без фазовых искажений. Дополнительная сложность возникает в замкнутых системах управления, где датчики работают в контуре активной виброизоляции и сервоприводов. Здесь в уравнения состояния вводится управляющее воздействие, а при корреляции шумов процесса и измерений применяются специализированные модификации фильтра, например, с коррелированными шумами.

Для сверхточных применений, таких как иммерсионная или EUV-литография, часто используются гибридные схемы. Сочетание вейвлет-преобразования с фильтром Калмана позволяет эффективно разделять нестационарные ударные воздействия от полезного сигнала и последующей фильтрации каждого уровня декомпозиции. Для задач пост-обработки, например при калибровке датчиков или анализе качества экспозиции, применяется сглаживатель Калмана, который обрабатывает данные не только в прямом, но и в обратном времени, обеспечивая нулевую фазовую задержку.

Исходя из рисунка 3, видно, что гибридная фильтрация (вейвлет + Калман) наиболее эффективна и приближена к полезному сигналу.

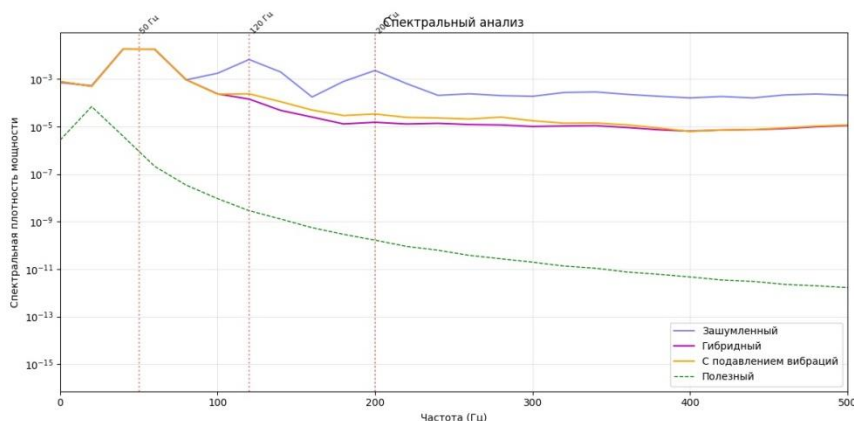


Рисунок 3 — Спектральный анализ различных методов фильтрации

По сравнению с классической фильтрацией, калмановский подход обеспечивает отсутствие фазового набега в полосе пропускания полезного сигнала, что критически важно для синхронизации движения стола и ретикла. Кроме того, фильтр предоставляет оценку ненаблюдаемых переменных, таких как скорость и ускорение, с существенно меньшим уровнем шума, чем при численном дифференцировании, что позволяет улучшить работу предиктивных контроллеров. Адаптивность алгоритмов обеспечивает стабильность работы в переходных режимах разгона и торможения, где статические фильтры становятся неэффективными.

Заключение. Таким образом, применение расширенных и адаптивных фильтров Калмана с формирующими фильтрами для учета цветного шума вибраций является оптимальным решением для обеспечения нанометровой точности совмещения и фокусировки в современном литографическом оборудовании.

Список литературы

1. Теория фильтрации зашумленных сигналов / Балакришнан А.В. // Адыгейский государственный университет – 2014, Майкоп, Адыгея
2. Метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика на основе адаптивного альфа-бета-фильтра Калмана / Волков Д.М., Савельев А.И. // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Математика. Механика. Физика – 2024, Том 16, № 4, стр. 16–23.
3. Vibration Sensing Demodulation Method Based on Unscented Kalman Filter / Fan, R., Chu, F., & Bian, Z. // Journal of Shanghai University of Electric Power – 2024, Vol. 40, No. 6, pp. 564–570.

UDC 621.3

A KALMAN FILTERING ALGORITHM FOR CLEANING PHOTOELECTRONIC SENSORS SIGNAL UNDER VIBRATIONS OF LITHOGRAPHIC EQUIPMENT

G.D. Akhmetzyanov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

S.M. Avakov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Electronic and TFT

Annotation. Methods for filtering and eliminating noise and spurious signals, gradient and predictive Kalman filtering standards, wavelet transforms, their advantages over filtering methods, and the potential for their use in 10x photolithographic equipment are developed.

Keywords: Kalman filtering, noise elimination, smoother, wavelet transforms, photolithography