

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОГИРОСКОПА В УСЛОВИЯХ СЛУЧАЙНОЙ СРЕДЫ

В.Л. Волков¹, А.В. Улюшкин², Н.Н. Желтова³
(Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ,
г. Арзамас)

Определены условия обеспечения эффективности микро электромеханической системы (МЭМС) – микрогироскопа в условиях широкополосных случайных вибраций (ШСВ) на основе фильтра Калмана.

Ключевые слова – МЭМС, микрогироскоп, фильтрация, моделирование, эффективность, ШСВ.

1. Введение

Технологии изготовления МЭМС позволяют производить достаточно точные микроминиатюрные датчики для измерения механических величин мобильных объектов управления (роботов, беспилотных управляемых аппаратов и т.п.). Однако, на практике сигналы с датчиков искажаются помехами, что приводит к значительному уровню погрешности в измерениях. Для ослабления помех необходимы дополнительные стадии преобразования и обработки сигналов.

В литературе активно обсуждаются вопросы разработки и исследования МЭМС для измерения механических величин [1–

¹ Валерий Ленидович Волков, кандидат технических наук, доцент, (г. Арзамас, Нижегородская обл., Новоквартальная площ., д. 6, тел. +79875534349). (vv1_arzamas@mail.ru)

² Александр Вениаминович Улюшкин, кандидат технических наук, ст. преподаватель (apu@apingu.edu.ru)

³ Наталья Николаевна Желтова, магистрант (2008natally@list.ru)

6, 8], в том числе в условиях случайных измеряемых физических процессов при воздействии помех. С этой целью уже разработаны технологии оптимальной обработки сигналов, способные функционировать в условиях неблагоприятной среды [4, 9].

Как отмечено в работах [1–6], МЭМС, как правило, выполняются по интегральной технологии и для обеспечения достаточной точности имеют компенсационную схему измерений. Их точность определяется статическими и динамическими характеристиками. Обеспечению статической и динамической точности МЭМС посвящено множество работ. В работах [2, 5] для разных МЭМС были сформулированы требования к параметрам корректирующего устройства (КУ) типа ПИД-регулятора из условия обеспечения минимальных значений динамических ошибок. Результаты по обеспечению точности конкретных микромеханических датчиков, полученные в работах [2, 4, 5], применимы для большого класса МЭМС независимо от их назначения и принципа действия.

Компенсационная схема измерения, применяемая в МЭМС, использует для обеспечения крутизны статической характеристики коэффициент передачи чувствительного элемента $K_{чз}$ и коэффициент обратной связи $K_{ос}$: $K = K_{чз}/K_{ос}$. Это предъявляет повышенные требования к стабильности этих параметров при работе МЭМС в условиях возмущенной среды.

2. Постановка задачи

Условия реальной среды предполагают случайные отклонения измеряемых механических величин от стационарных значений, и воздействие случайных помех при измерениях. Кроме того, при измерении механических величин можно выделить режим медленно и быстро меняющихся процессов (то и другое свойственно динамическим объектам управления). Среди измерительных шумов особенно опасными являются широкополосные случайные вибрации (ШСВ), имеющие большое сходство с белыми шумами [10]. В работе [4] традиционно исследовалась задача фильтрации исключительно при белых шумах.

При синтезе стохастических фильтров обычно берут неизвестные помехи в виде винеровского процесса [10]. В работе [8], где акселерометр с фильтром Калмана использовался для измерения продольного и вертикального ускорения автомобиля при эксплуатационных испытаниях, мощность помех, искажающих информацию, поступающую от датчика, считалась достаточно малой, что не дает возможности сделать вывод о погрешностях в широком диапазоне отношений мощности сигнала к помехе.

В работе [4] отмечалась эффективность применения традиционного калмановского алгоритма фильтрации для оценивания полезных процессов в МЭМС широкого применения (акселерометрах и датчиках угловых скоростей – ДУС).

В продолжение исследований применения фильтра Калмана в данной работе исследуется получение оптимальных оценок при помехах в виде ШСВ. Причем рассматривается такое соотношение спектров полезного сигнала, помехи и микрогироскопа – ДУС, что спектр частотной характеристики ДУС перекрывает спектр полезного сигнала, а спектр помехи перекрывает в свою очередь спектр частотной характеристики ДУС.

При исследованиях используется гипотеза о некоррелированности шумов с измеряемыми процессами. Все процессы предполагаются стационарными, эргодическими с нормальными законами распределения. В фазовый вектор фильтра Калмана, кроме переменных состояния ДУС, нужно включить еще и переменные для случайной составляющей измеряемого процесса и шумового процесса (при ШСВ помехе).

Задача исследования фильтра Калмана состоит в определении предельной ошибки и коэффициента эффекта фильтрации (на границе диапазона) при различных соотношениях мощности сигнала к мощности помехи.

Экспериментальное исследование проводится так же, как в работе [4] на основе программного обеспечения *Matlab* с использованием опубликованных ранее алгоритмов моделирования МЭМС ДУС со случайными сигналами [3].

3. Математическая модель микрогирискапа

Для анализа работы МЭМС микрогирискапа в условиях реальной среды по аналогии с работами [1, 2, 4, 5] составлена общая математическая модель в виде структурной схемы (см. Рис. 1).

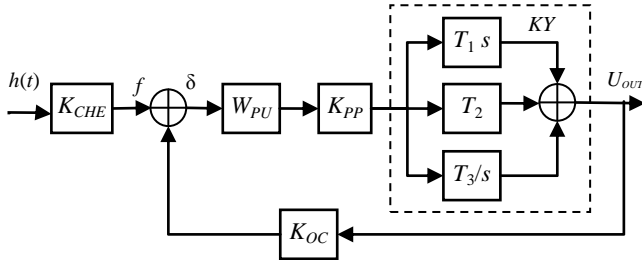


Рис. 1. Структурная схема МЭМС ДУС

K_{CHE} – коэффициент передачи чувствительного элемента;
 W_{PU} – передаточная функция подвижного узла;
 K_{PP} – коэффициент преобразователя перемещений;
 T_1, T_2, T_3 – коэффициенты корректирующего устройства;
 K_{OC} – коэффициент передачи звена обратной связи.

Общая передаточная функция МЭМС ДУС, согласно структурной схеме, вычисляется в виде

$$W_D(s) = K_{CHE} \frac{W_{PU} K_{PP} W_{KY}}{1 + W_{PU} K_{PP} W_{KY} K_{OC}}. \quad (1)$$

где $W_{KY} = T_1 \cdot s + T_2 + T_3/s$ – передаточная функция корректирующего устройства типа ПИД-регулятора (пропорционально-интегрирующе-дифференцирующего регулятора).

Основные математические модели чувствительного элемента, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи для разных конструкций датчиков приведены в учебнике по МЭМС [6]. Для микрогирискапа LL типа, рассматриваемого в данной работе, расчетные формулы более подробно представлены в [5].

С целью расчета конструктивных параметров МЭМС ДУС и построения его математической модели было разработано про-

граммное обеспечение на основе *Matlab*. Управляющая программа *control* для расчета параметров конструкции ДУС и его математических моделей вызывает программу-функцию $[Z, W_{pu}, W_{che}, W_{be}, W] = \text{dus}(P)$ [3]. В этой программе: P – вектор входных параметров датчика (подвижного узла, блока электроники, конструкции). Основными выходными параметрами программы-функции являются передаточные функции: W_{pu} – подвижного узла; W_{che} – чувствительного элемента; W_{be} – блока электроники; W – полная передаточная функция датчика. Z – представляет дополнительный ряд выходных параметров.

Для программы-функции $\text{dus}(P)$ задаются входные данные P , которые для ЧЭ и других элементов читаются из файла *in-put.dat* текстового формата *ascii*.

$Po = \text{load}('input.dat'); P = Po;$

$[Z, W_{pu}, K_{che}, W_{be}, W] = \text{dus}(P)$ % вызов программы.

В работе [6] приведены результаты расчета МЭМС ДУС для диапазона измерения 120 град/с. С учетом ПИД корректирующего устройства была получена оптимальная передаточная функция датчика в виде:

$$W_D(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (2)$$

где T – постоянная времени ($T = 5 \cdot 10^{-4}$);

K – коэффициент передачи сенсора ($K = 2,3873$).

Математические модели спектральных плотностей случайной составляющей $g(t)$ и ШСВ помехи заданы в виде простых дробно-рациональных функций, имитирующих большинство процессов механических перемещений и ШСВ помех рассматриваемых динамических объектов управления

$$S_G(\omega) = \frac{2\sigma_G^2 \alpha_G}{\omega^2 + \alpha_G^2}, \quad S_N(\omega) = \frac{2\sigma_N^2 \alpha_N}{\omega^2 + \alpha_N^2}, \quad (3)$$

где σ_G , α_G , σ_N , α_N – среднеквадратические отклонения и постоянные корреляции соответственно процессов $g(t)$ и $n(t)$.

Математическая модель ДУС во взаимодействии с сигналами и шумами далее рассматривается в виде объекта наблюдения, схема которого представлена на Рис. 2.

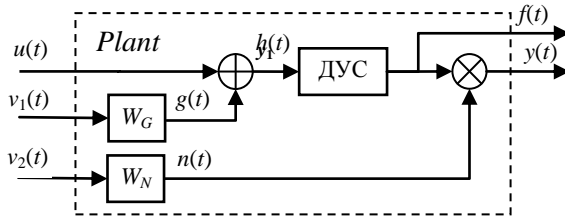


Рис. 2. Структурная схема объекта наблюдения

Объект наблюдения содержит входной детерминированно-стохастический процесс $h(t)$, сенсор (ДУС) и цветной шум $n(t)$, он имеет три входа u , v_1 , v_2 и два выхода f , y .

На схеме обозначено: W_G , W_N – формирующие фильтры соответственно случайной составляющей входного процесса $g(t)$ и помехи $n(t)$; $v_1(t)$, $v_2(t)$ – возмущающие белые шумы для формирующих фильтров; $u(t)$, $g(t)$ – детерминированная и случайная составляющие измеряемого процесса; $n(t)$ – помеха в виде ШСВ; $h(t)=u(t)+g(t)$ – полный полезный измеряемый сигнал; $y(t)=h(t)+n(t)$ – измерение; $f(t)$ – выходной сигнал с ДУС.

Математические модели формирующих фильтров процессов $g(t)$ и $n(t)$ могут быть получены при факторизации спектральных плотностей $S_G(s)$ и $S_N(s)$ из (3) в виде

$$W_G(s) = \frac{\sigma_G \sqrt{2\alpha_G}}{s + \alpha_G}, \quad W_N(s) = \frac{\sigma_N \sqrt{2\alpha_N}}{s + \alpha_N}. \quad (4)$$

Дифференциальные уравнения первого порядка, соответствующие передаточным функциям $W_D(s)$, $W_G(s)$, $W_N(s)$, далее определяют матричную модель объекта наблюдения *Plant*, выделенного пунктиром на схеме Рис. 2. Расчет матричной модели ведется в стандартной форме [11].

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU, \\ Y = CX + DU \end{cases}$$

где X – вектор состояния системы; $U=[u, v_1, v_2]$ – вектор входа; $Y=[f, y]$ – вектор выхода; A , B – переходные матрицы состояния

(матрицы коэффициентов); C, D - матрицы линейного преобразования для выхода.

Для получения матриц A, B, C, D используются модели (2), (4), записанные в виде дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} T \frac{df}{dt} + f(t) = K \cdot h(t), \\ \frac{dg}{dt} + \alpha_G g(t) = \sigma_G \sqrt{2\alpha_G} v(t), \\ \frac{dn}{dt} + \alpha_N n(t) = \sigma_N \sqrt{2\alpha_N} v(t). \end{cases}$$

Обозначая переменные состояния как: $f(t)=x_1$, $g(t)=x_2$, $n(t)=x_3$, запишем далее полученные уравнения в виде

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T}x_1 + \frac{K}{T}x_2 + \frac{K}{T}u, \\ \frac{dx_2}{dt} = -\alpha_G x_2 + \sigma_G \sqrt{2\alpha_G} v_1, \\ \frac{dx_3}{dt} = -\alpha_N x_3 + \sigma_N \sqrt{2\alpha_N} v_2. \end{cases} \quad (5)$$

Матрицы A, B, C, D для полной модели *Plant* на основе (5) и с учетом $y=f+n$ получают вид

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & \frac{K}{T} & 0 \\ 0 & -\alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_N \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{K}{T} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_G \sqrt{2\alpha_G} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_N \sqrt{2\alpha_N} \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Непрерывная матричная модель объекта наблюдения, соответствующая рассчитанным матрицам (6) в *Matlab* составляется в виде: $Plant=ss(A,B,C,D,'inputname',\{'u','v1','v2'\},'outputname',\{'f','y'\})$.

4. Фильтр Калмана для МЭМС ДУС

Задача применения фильтра Калмана для микромеханических датчиков возникает в случае обеспечения повышенной точности МЭМС в условиях интенсивных измерительных шумов. В случае воздействия шумов в виде ШСВ для проектирования фильтра Калмана использовалась теория из работы [11].

Фильтр Калмана, как непрерывный - *kalmN*, так и дискретный - *kalmD* рассчитывается с использованием *Matlab* функции *kalman* на основе модели *Plant* (подробно это рассмотрено в работе [7]). Здесь для примера приведена *Matlab* команда для расчета непрерывного фильтра Калмана:

$$[kalmN, L, Pn] = kalman(Plant, Q, sn^2).$$

Дискретный фильтр Калмана основан на дискретной модели объекта контроля, полученной из непрерывной с помощью *Matlab* функции *c2d* с учетом периода дискретности *dt* [6].

Моделирование и исследование полученной измерительной системы (ИС), состоящей из МЭМС ДУС и фильтра Калмана, далее проведено с помощью визуальной среды *Matlab Simulink*. Схема моделирования ИИС представлена на Рис. 3.

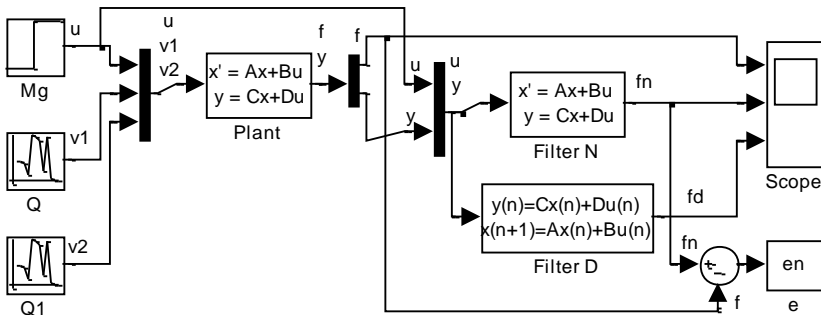


Рис. 3. Схема моделирования ИС на основе фильтра Калмана

На схеме размещены: объект наблюдения *Plant*, непрерывный *FilterN* и дискретный *FilterD* фильтры Калмана. С выхода *Plant* снимается векторный сигнал $[f, y]$, на входе фильтров сформирован векторный сигнал $[u, y]$. На схеме предусмотрен

также блок, вычисляющий ошибки фильтрации одного из фильтров (в данном случае – непрерывного).

5. Результаты моделирования

Спектральные функции процессов $g(t)$, $n(t)$ и амплитудно-частотная характеристика датчика имеют следующие свойства: спектр полезного сигнала достаточно широк, соответствует так называемым быстрым сигналам (спектр полезного сигнала находится в полосе частот примерно до 400 Гц), помеха ШСВ является широкополосной – ее спектр перекрывает как спектр полезного сигнала, так и частотный диапазон датчика (частотный диапазон пропускания датчика соответствует примерно 1500 Гц, а спектр помехи составляет примерно 10000 Гц).

На Рис. 4 представлены графики, полученные при моделировании ИС с фильтром Калмана.

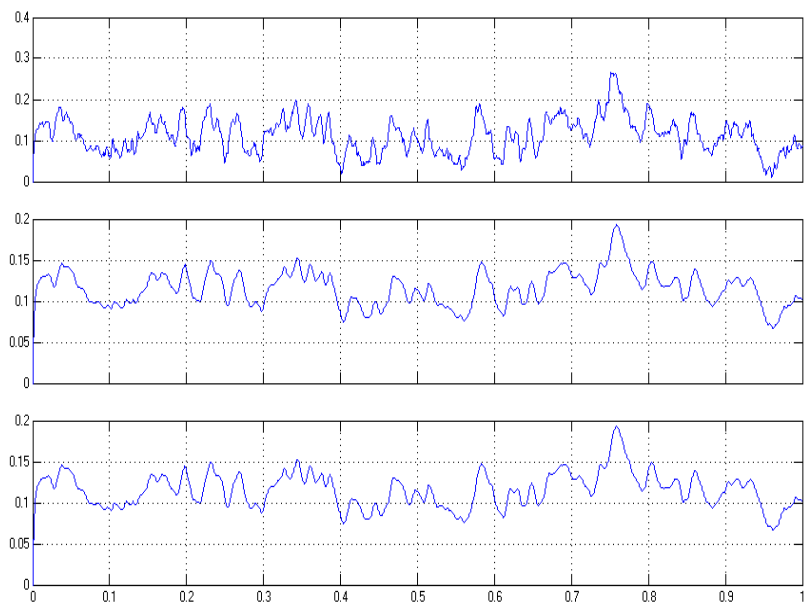


Рис. 4. Графики процессов ИИС (верхний процесс с выхода f , средний и нижний – соответственно с выходов fn и fd)

При этом помеха выбрана достаточно мощной (при соотношении сигнал/шум $P_c/P_n=1$ величина предельной ошибки в измерениях для МЭМС ДУС равна 0,473 рад/с или $\xi=22,5\%$ от диапазона – 2,09 рад/с).

В этом случае по результатам моделирования средний квадрат ошибки фильтра составляет СКО=0,015, эффект фильтрации – $kd=8,17$ (ошибка измерений уменьшается более чем в 8 раз). По данным СКО предельная ошибка фильтра составляет примерно: $\delta=2,5\%$ или 0,06 рад/с.

Проведено также моделирование фильтров Калмана (непрерывного и дискретного) при соотношении сигнал/шум – P_c/P_n в диапазоне от 0,01 до 100. Графики процессов, полученные при моделировании, имеют похожий на рис. 4 вид. Обобщенные результаты исследования рассматриваемой ИИС представлены на Рис. 5. Это график зависимости предельной ошибки фильтра от соотношения сигнал/шум $\delta=f(P_c/P_n)$.

Эффективность фильтра Калмана при этом оказывается довольно высокой – погрешность остается на уровне 1,0 – 2,7% во всем диапазоне P_c/P_n .

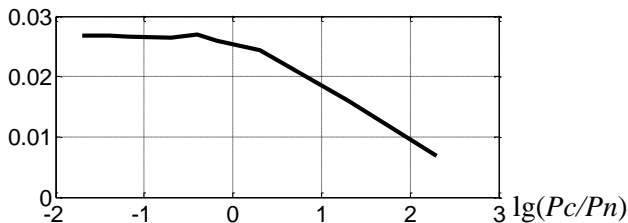


Рис. 5. График предельной ошибки в зависимости от соотношения сигнал/шум $\delta=f(P_c/P_n)$

Главным условием применения фильтра Калмана при этом является необходимость его достаточно точной настройки на оптимальный режим. Это условие трудно выполнить на практике – надо знать точные значения параметров процессов: их дисперсии и постоянные корреляции.

Все результаты фильтрации, полученные ранее (см. Рис. 4, Рис.5), были при достаточно быстром входном процессе $g(t)$ (частотный диапазон до 400 Гц). Необходимо также исследовать

возможность ослабления помехи при других данных спектральной функции, соответствующей медленным процессам $g(t)$.

Для моделирования медленного процесса выбран частотный диапазон спектральной функции не более 5 Гц.

Обобщая результаты исследования фильтра Калмана при различном соотношении (P_c/P_n) для медленного процесса, представим график зависимости предельной ошибки фильтра от P_c/P_n (соотношение P_c/P_n изменяется в диапазоне от 0,01 до 100) – на Рис. 6.

Результаты оказались вполне приемлемыми – ошибка ИС на основе фильтра Калмана оказалась в диапазоне от 0,4% до 2,8%.

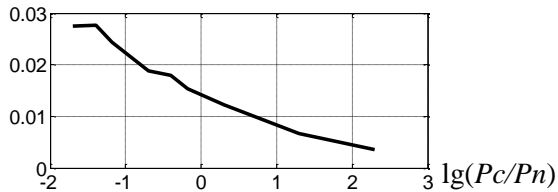


Рис. 6. График предельной ошибки фильтра Калмана от соотношения сигнал/шум $\delta=f(P_c/P_n)$ для медленного процесса

6. Заключение

Полученные результаты доказывают эффективность применения адаптивного фильтра Калмана при различной интенсивности помех, как для быстрых, так и для медленных измеряемых процессов. Однако, для настройки фильтра в этом случае приходится проводить дополнительную идентификацию мощности помехи и сигнала.

Характеристики точности фильтрации, как и следовало ожидать, инвариантны по отношению к среднему уровню полезного сигнала.

Список литературы

1. ВАВИЛОВ В.Д., ВОЛКОВ В.Л., УЛЮШКИН А.В. *Оптимизация параметров микромеханического акселерометра.* / В.Д. Вавилов.– Н.Новгород: Труды НГТУ, 2010. № 3 (82). с. 308 – 314.

2. ВОЛКОВ В.Л. *Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра.* / В.Л. Волков. – Н.Новгород: Труды НГТУ, 2011. № 2 (87). с. 288 - 295.
3. ВОЛКОВ В.Л. *Математическое моделирование в приборных системах.* УМО “Приборостроение”. / В.Л. Волков. – Н.Новгород: НГТУ, 2014. 148 с.
4. ВОЛКОВ В.Л., ЖИДКОВА Н.В., ЖИДКОВ А.А. *Эффективность работы микромеханических датчиков в условиях помех.* / В.Л. Волков. – Н.Новгород: Труды НГТУ, 2014. № 2 (102).
5. ВОЛКОВ В.Л., ХРИСАНОВА М.В. *Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости.* / В.Л. Волков. – Н.Новгород: Труды НГТУ, 2013. № 2 (99). с. 329 – 338.
6. ЛАЗАРЕВ Ю. *Моделирование процессов и систем в MATLAB: учебный курс.* / Ю. Лазарев. – СПб.: BHV, 2005. – 512 с.
7. РАСПОПОВ В.Я. *Микромеханические приборы.* Учебное пособие. / В.Я. Распопов -М.: Машиностроение, 2007. - 400 с.
8. HERNANDEZ W. A survey on optimal signal processing techniques applied to improve the performance of mechanical sensors in automotive applications. / W. Hernandez // Sensors. - 2007. - Vol. 7. - P. 84-102.
9. HERNANDEZ W. Improving the responses of several accelerometers used in a car under performance tests by using Kalman filtering. / W. Hernandez // Sensors. - 2001. -Vol. 1. - P. 38-52.
10. PAPOULIS A. Probability, random variables, and stochastic processes/A. Papoulis. -NY: McGraw-Hill, 2001. -571 p.
11. WELCH G., BISHOP G. An Introduction to the Kalman Filter. TR 95-041, Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill. July 24, 2006.