РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ MEMS-АКСЕЛЕРОМЕТРА В СРЕДЕ SIMULINK

Д.В.Павлов, К.Г.Лукин, М.Н.Петров*

DEVELOPMENT OF IMITATING MODEL OF THE MEMS ACCELEROMETER USING SIMULINK ENVIRONMENT

D.V.Pavlov, K.G.Lukin, M.N.Petrov*

3AO «ЭЛСИ», Великий Новгород, lukinkg@mail.ru *Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mikhail.Petrov@novsu.ru

Приведена методика разработки имитационной модели MEMS-акселерометра MMA7331L на базе физической модели датчика с коррекцией значений выходного сигнала с учетом дестабилизирующих факторов за счет шумовых и температурных погрешностей. Получены температурные зависимости шумов и дрейфа нуля акселерометра в виде аппроксимирующих полиномов. Результаты исследования реализованы в виде имитационной модели в среде Simulink. Проведено сравнение выходной характеристики данной модели с экспериментальной характеристикий реального акселерометра MMA7331L. *Ключевые слова: MEMS-акселерометр, имитационная модель, передаточная функция, чувствительный элемент, дрейф нуля, выходной сигнал*) This paper presents the method for development of imitating model of the MEMS accelerometer MMA7331L based on using the physical model and output values correction. This method takes into account some destabilizing factors which are the noise and temperature errors. Temperature dependences of noise and drift of zero for this accelerometer are obtained in the form of approximating polynoms. The research results are realized in the form of imitating model in the environment of Simulink. We carried out the comparison of output signals of imitating model with a signal of real model of the accelerometer MMA7331L. *Keywords: MEMS accelerometer, imitating model, transfer function, sensitive element, drift of zero, output signal*

Введение

MEMS-акселерометр MMA7331L входит в состав автономного бесплатформенного инерциального измерительного модуля (ИИМ), предназначенного для решения навигационной задачи на борту самолёта-истребителя.

Данная статья является продолжением работы [1], в которой была получена физическая модель MEMS-акселерометра MMA7331L в виде передаточной функции. Здесь приведено исследование шумового состава выходного сигнала путем измерения температурных зависимостей его отдельных составляющих. Получены температурные зависимости шумов и дрейфа нуля акселерометра в виде аппроксимирующих полиномов.

Выбор программной среды моделирования

Развитие навигационных систем сопровождается совершенствованием конструктивных решений и повышением уровня сложности, связанной с интеграцией различных комплектующих: цифровых, аналоговых, радиочастотных и разнообразных сенсоров. Это вызывает необходимость использования эффективных средств моделирования и проектирования, которые должны удовлетворять ряду требований: универсальности (в смысле возможности одновременного моделирования разнообразных по природе физических систем) и эффективности, связанной с высокой скоростью моделирования.

Первое требование исключает возможность использования Spice-подобных Ouartusили подобных систем моделирования вследствие их жесткой привязки к определенному типу проектов (чисто аналоговых или цифровых). Второй аспект связан со скоростью расчета нестационарных процессов. Так, в реальных системах переходные процессы для различных компонентов системы происходят в разных временных масштабах. Например, время готовности и время выдачи аналоговых данных с гироскопа составляет порядка 1-10 мс, а время зарядки/разрядки конденсаторов в схеме может составить 1мкс. Использование для повышения сходимости минимальных значений постоянной времени приводит к резкому увеличению времени счета.

Для решения указанных проблем нами использован модуль Simulink, входящий в систему компьютерной математики MatLab [2]. Использование этого модуля обеспечивает возможность моделирования как цифровых, так и аналоговых устройств, включая разнообразные сенсоры, причем в разных временных масштабах и с разным шагом модельного времени.

Разработка модели MEMS-акселерометра MMA7331L

Ранее в работе [1] была синтезирована математическая модель акселерометра MMA7331L в виде передаточной функции. Определены коэффициенты этой передаточной функции и показана частотная характеристика акселерометра:

$$W(\mathbf{p}) = \frac{U(\mathbf{p})}{a(\mathbf{p})} = \frac{K}{\alpha \cdot p^2 + \beta \cdot p + 1}.$$
 (1)

Здесь K — статический масштабный коэффициент датчика по каналу ускорение — выходное напряжение; $\alpha = T_1 \cdot T_2$, $\beta = T_1$ — коэффициенты, в которых T_1 — постоянная времени микромеханической системы, показанной в виде одномерной механической модели в работе [1], T_2 — постоянная времени фильтра внутренней электрической цепи акселерометра.

Для исследуемого акселерометра значения статического масштабного коэффициента K и коэффициентов α , β определенны для комнатной температуры из экспериментальных данных:

$$K = 84,4 \frac{\text{MB}}{g} = \frac{0,0844 \text{ B}}{9,8 \frac{\text{M}}{\text{c}^2}} \approx 0,0086 \frac{\text{B} \cdot \text{c}^2}{\text{M}}$$
$$\alpha = 2,63 \cdot 10^{-8}, \quad \beta = 9,81 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, передаточная функция имеет вид:

$$W(\mathbf{p}) = \frac{0,0086}{2,63 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 9,81 \cdot 10^{-4} \cdot p + 1}.$$
 (2)

Следует отметить, что модель акселерометра с передаточной функцией (2) будет востребована для навигационных систем в сверхзвуковой и гиперзвуковой авиации будущего поколения. Так, в случае сверхзвуковой авиации могут возникать дополнительные нелинейные эффекты, связанные с преодолением самолетом сверхзвукового барьера и появлением скачка уплотнения.

На современном уровне развития авиации для моделирования акселерометра можно ограничиться использованием статической модели (p = 0), для которой $W(\mathbf{p}) \approx K = 0,0086 \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{c}^2}{M}$

ИЛИ

$$U_{out} = K \cdot a, \tag{3}$$

где U_{out} — выходное напряжение; a — линейное ус-корение.

Здесь величина коэффициента *К* определена на экспериментальных измерениях для комнатной температуры.

Для получения более точной (индивидуальной) модели акселерометра следует учесть температурную зависимость выходных сигналов, что приводит к необходимости оценки аддитивных и мультипликативных погрешностей, входящих в состав выражения (3). Мультипликативная погрешность связана с погрешностью масштабного коэффициента. Аддитивные погрешности представляют собой суперпозицию шумов, перекрестных связей и дрейфа нуля выходного сигнала.

Анализ наличия дестабилизирующих факторов

На основании принципа суперпозиции выходные сигналы трехосного MEMS-акселерометра можно записать в виде:

$$\begin{aligned} Uout_{x}(T) &= k_{x}(T) \cdot a_{x} + U_{dx}(T) + U_{0x}(T) + S_{yz} + N_{x}(T), \\ Uout_{y}(T) &= k_{y}(T) \cdot a_{y} + U_{dy}(T) + U_{0y}(T) + S_{xz} + N_{y}(T), \\ Uout_{z}(T) &= k_{z}(T) \cdot a_{z} + U_{dz}(T) + U_{0z}(T) + S_{yx} + N_{z}(T), \end{aligned}$$

где $Uout_i(T)$ — выходное напряжение акселерометра по каналу *i*-й оси, B; $k_i(T)$ — масштабный коэффициент по каналу *i*-й оси, B/g; a_i — ускорение объекта вдоль *i*-й оси, g; $U_{di}(T)$ — дрейф нулевого значения сигнала по каналу *i*-й оси, B; $U_{0i}(T)$ — напряжение на выходе при 0g по каналу *i*-й оси, B; S_{ij} — перекрестная связь (влияние измерения кажущего ускорения по осям *i* и *j* на измерение кажущего ускорения по *k*-й оси, B); $N_i(T)$ — шум акселерометра по каналу *i*-й оси, B.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что при плавном изменении температуры (со скоростью нагрева порядка $0,05^{\circ}$ С/мин) на 10 градусов, относительная погрешность масштабного коэффициента $\Delta K/K$ составляет ~3,5%, что на порядок ниже влияния на выходной сигнал аддитивных погрешностей. Поэтому в данной работе мультипликативной погрешностью можно пренебречь.

Моделирование влияния перекрестных связей

Погрешность выходного сигнала акселерометра, связанная с перекрестными связями *S*_{ij}, включает две компоненты. Первая из них обусловлена неточностью совмещения измерительных осей акселерометра с местной вертикалью при установке ИИМ. Вторая связана с неидеальностью внутренней микромеханической конструкции и схемой преобразования сигналов акселерометра.

Природа первой составляющей ошибки перекрёстной связи связана с тем, что в результате ускорения объекта только по одной из осей (например, *X*) две другие составляющие показаний акселерометра по осям *Y* и *Z* будут также отличаться от нуля.

Ориентация косоугольных базисов, которые образованы осями чувствительности акселерометра MMA7331L, описывается матрицей направляющих косинусов *S*_{ext} относительно бортовой инерциальной системы координат ИИМ:

$$S_{ext} = \begin{pmatrix} \cos \delta_{xx} & \cos \delta_{xy} & \cos \delta_{xz} \\ \cos \delta_{yx} & \cos \delta_{yy} & \cos \delta_{yz} \\ \cos \delta_{zx} & \cos \delta_{zy} & \cos \delta_{zz} \end{pmatrix},$$
(5)

где δ_{kn} — угол между *k*-й осью ИИМ и *n*-й осью чувствительности акселерометра (*k*, *n* = *x*, *y*, *z*).

Для минимизации первой составляющей ошибки перекрестной связи необходима точная привязка измерительных осей акселерометра и системы координат ИИМ к местной вертикали, которая совпадает с вектором ускорения силы тяжести g.

Результатом выполнения этого условия будет равенство нулю углов между одноименными осями ($\delta_{kk} \approx 0$), а углы между разноименными осями $\delta_{kn} \approx \pi/2$ ($k \neq n$). В результате матрица направляющих косинусов примет вид:

$$S_{ext} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$
 (6)

В итоге первой составляющей ошибки перекрестных связей можно пренебречь. Поэтому результирующая ошибка будет определяться в основном второй составляющей перекрестной связи.

Величина этой составляющей может достигать 5% от общей чувствительности акселерометра в заданных режимах работы (4g или 12g) [3].

Моделирование дрейфа нуля

Для получения количественной оценки параметров температурной зависимости шума и дрейфа нуля акселерометра были проведены экспериментальные исследования выходного сигнала гироскопа от температуры в климатической камере в диапазоне от -30° C до $+55^{\circ}$ C.

При длительной эксплуатации акселерометров будет наблюдаться дрейф нуля двух типов: переменная составляющая (краткосрочный дрейф) и длительный дрейф. Переменная составляющая дрейфа случайные отклонения выходного напряжения со спектром частот, показанных в работе [6]. Длительный дрейф представляет собой систематическое нарастание или уменьшение среднего значения выходного сигнала на временных интервалах от нескольких до тысячи часов.

На данный момент нет расчетного и экспериментального подтверждения точной граничной частоты между переменной составляющей дрейфа нуля и шумом (СКО). Поэтому случайные отклонения выходного сигнала с полосой частот < 0,1 Гц [5, 6] будем принимать за СКО.

В данной работе температурная зависимость длительного дрейфа нуля акселерометра моделируется путем аппроксимации выходного сигнала гироскопа *Uout* полиномом второй степени.

Ниже приведены аппроксимирующие полиномы для каждой из осей акселерометров:

$$U_{dx}(T) = 2,27 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,68 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,57 \cdot 10^{-2};$$

$$U_{dy}(T) = 4,01 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,73 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,30 \cdot 10^{-2};$$
 (7)

$$U_{dz}(T) = 1,52 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,23 \cdot 10^{-2},$$

где T – значение температуры (в °C) согласно показаниям температурного датчика на ИИМ, который установлен рядом с акселерометром.

Оценка параметров температурной зависимости шума

В данной модели шум (составляющие выходного сигнала N_x , N_y и N_z в формуле (4)) представлен в виде случайной составляющей выходного сигнала. Для правильной идентификации температурных зависимостей шумового сигнала необходимо исследовать гипотезу о законе распределения шума. Для данной модели акселерометра была выдвинута гипотеза о нормальном распределении шумовой составляющей акселерометра.

На рис.1 приведена гистограмма распределения шумового сигнала с математическим ожиданием, равным нулю.



Рис.1. Гистограмма распределения шумового сигнала MEMSакселерометра MMA7331L

Приведенная на рис.1 гистограмма показывает хорошее соответствие нормальному закону распределения. Гипотеза о нормальном законе распределения подтверждается критерием согласия χ^2 Пирсона. В случае нормированного нормального распределения

шума для моделирования эффекта температурной зависимости достаточно оценить только одну величину — среднеквадратическое отклонение СКО $(\sigma_i(T))$.

На рис.2 показана зависимость шумового сигнала акселерометра от температуры по оси *Y*.

Результаты аппроксимации шумовой составляющей представлены ниже:

$$N_x(T) = \sigma_x(T) = 0,000203 \cdot T + 0,003652;$$

$$N_v(T) = \sigma_v(T) = 0,000363 \cdot T + 0,001781;$$
(8)

 $N_z(T) = \sigma_z(T) = 0,000448 \cdot T + 0,001158.$

Реализация имитационной модели MMA7331L в Simulink

Синтез имитационной модели акселерометра MMA7331L выполнен в среде Simulink [4], поскольку эта программа использована для моделирования всей навигационной системы ИИМ.

Структурная схема модели включает следующие элементы:

 блок выбора чувствительности акселерометра (рис.3);

2) блок перекрестных связей по осям (рис.4);

 модели выходных сигналов и температурные зависимости длительного дрейфа нуля и шумов акселерометра (описанные выражениями (1), (3) и (4));

4) передаточная функция акселерометра, полученная в работе [1].

Согласно паспортным данным [3], акселерометр имеет два режима чувствительности ($\pm 4g$ и $\pm 12g$), при которых величина масштабного коэффициента имеет значения 0,308 B/g и 0,0836 B/g соответственно. Для реализации обоих режимов работы сенсора необходимо создать для каждой оси по две параллельные ветви преобразования величины ускорения в напряжение (рис.3). Выбор режима работы задается при помощи переключателей Switch1, Switch2 и Switch3.



Рис.2. Температурная зависимость шумового сигнала акселерометра



Рис.3. Блок выбора чувствительности акселерометра

На рис.4 представлена схема блока, реализующего эффект взаимного влияния измерений по осям.



Рис.4. Блок имитации перекрёстных связей по осям

На рис.5 приведена полная имитационная модель трехосного MEMS-акселерометра MMA7331L.

Экспериментальная проверка модели

Проверка адекватности разработанной модели проводилась путем сравнения сигналов реального акселерометра после температурной коррекции и его имитационной модели для диапазона рабочих температур от -30° С до $+55^{\circ}$ С. Плата с установленным на нее акселерометром размещалась на неподвижном изолированном основании. Выходные сигналы снимались по одной из осей чувствительности, ортогональной вектору ускорения силы тяжести \vec{g} .

На рис.6 показан спектральный состав реально-



Рис.6. Спектральный состав шумового сигнала реальной (а) и имитационной (б) модели акселерометра в режиме ±12g



Рис.5. Имитационная модель MEMS-акселерометра MMA7331L

Спектральный состав сигналов реального акселерометра и его модели отличается в основном значениями максимумов и их положениями в частотной области. Такие максимумы являются единичными «выбросами», которые представляют собой события с исчезающе малыми вероятностями. Эти события можно отнести к устранимым ошибкам, так как такие отклонения практически не влияют на спектральный состав шумового сигнала.

Спектр шумового сигнала имитационной модели акселерометра близок к спектру сигнала его реальной модели. Наблюдаемое небольшое отличие спектров на рис.6а,б связано с вычислительной погрешностью интенсивности шумов имитационной модели порядка 4%. Кроме спектра, реальная модель акселерометра и его имитационная модель практически одинаково описывают изменение выходного сигнала напряжения от линейного ускорения. Поэтому можно утверждать, что полученная имитационная модель акселерометра практически идентична реальной модели. Следовательно, данная имитационная модель акселерометра может существенно помочь при разработке и имитационном моделировании акселерометрического канала программно-аппаратного комплекса ИИМ.

Выводы

В данной работе получена имитационная модель MEMS-акселерометра MMA7331LT. Получены температурные зависимости дрейфа нуля и шума MMA7331LT, которые представлены в виде аппроксимирующих полиномов 2-го и 1-го порядков, соответственно. Адекватность синтезированной имитационной модели акселерометра доказана методом сравнением с экспериментальными данными. Учет модели дестабилизирующих факторов в виде аддитивных погрешностей позволил снизить погрешность математической модели акселерометра MMA7331LT с 16% до 7%.

- Павлов Д.В., Лукин К.Г., Петров М.Н. Разработка математической модели MEMS-акселерометра // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2015. №8(91). С.22-25.
- Simulink Simulation and Model-Based Design: [Эл. pecype]. URL: http://www.mathworks.com/products/simulink
- ±4g, ±12g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer Data Sheet // Freescale / http://www.datasheetdir.com/MMA7331L+download (дата обращения: 10.06.2016).
- Simulink Simulation and Model-Based Design http://www.mathworks.com/products/simulink/
- Harrison L. Current Sources & Voltage References. Newnes, 2005. 569 p. (Electronics & Electrical).
- Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков [Эл. pecypc]. URL: http://www.sgu.ru/ sites/default/files/textdocsfiles/2014/02/09/analog_devices._meto dy_prakticheskogo_konstruirovaniya_pri_normirovanii_signalov _s_datchika.pdf (дата обращения: 11.06.2016)

References

- Pavlov D.V., Lukin K.G., Petrov M.N. Razrabotka matematicheskoi modeli MEMS-akselerometra [Development of mathematical model of the MEMS accelerometer]. Vestnik NovGU. Ser. Tekhnicheskie nauki – Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2015, no. 8(91), pp. 22-25.
- Simulink Simulation and Model-Based Design. Available at: http://www.mathworks.com/products/simulink/.
- ±4g, ±12g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer Data Sheet. Freescale. Available at: http://www.datasheetdir.com/MMA7331L+download.
- Simulink Simulation and Model-Based Design. Available at: http://www.mathworks.com/products/simulink/.
- Harrison L. Current Sources & Voltage References. Newnes, 2005. 569 p. (Electronics & Electrical).
- Metody prakticheskogo konstruirovaniia pri normirovanii signalov s datchikov [Practical design techniques for sensor signal conditioning]. Available at: http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2014/02/09/a nalog_devices_metody_prakticheskogo_konstruirovaniya_pri_ normirovanii_signalov_s_datchika.pdf (accessed 11.06.2016)