

Особенности построения модели погрешности микроэлектромеханических датчиков при решении навигационной задачи

М.А. Ломакин

Введение

Современные датчики, базирующиеся на микроэлектромеханических системах (МЭМС), позволяют обнаруживать и измерять ускорение, отклонение, ударные нагрузки, вибрации и скорость вращения, а также осуществлять измерения с несколькими степенями свободы. Своими характеристиками, отсутствием движущихся частей, интегрированной электроникой обработки сигнала, относительно низкой ценой и малыми габаритами, миниатюрностью, функциональностью, надёжностью, малым энергопотреблением МЭМС технологии стали весьма популярны [1].

Концепция МЭМС построена на интеграции микромеханических структур датчиков (сенсорной, измерительной части) и актюаторов (исполнительной, управляющей части) с электроникой, выполняющей функции сбора, анализа, контроля, формирования управляющих сигналов на общей подложке посредством технологий микропроизводства.

В данной статье будут рассмотрены МЭМС - датчики для измерения ускорения (акселерометры) и угловой скорости (гироскопы). Данные устройства активно используются в системах управления летательными аппаратами, для обеспечения безопасности движения автомобилей, в сельскохозяйственной технике, изделиях специального назначения, в инерциальных системах навигации и др. В настоящее время существует достаточно много различных устройств с интегрированными МЭМС датчиками, но существует ряд проблем и недостатков, связанных с работой данных датчиков [2].

Одним из значимых недостатков микроэлектромеханических (МЭМС) инерциальных датчиков является сравнительно низкая точность и зашумленность выходного сигнала дрейф смещения нуля [3], учитывая

характер математических преобразований при решении навигационной задачи (интегрирование), дрейф нуля существенно влияет на качество ее решения [4, 5]. Ниже приведено описание эксперимента, целью которого была разработка математической модели данного вида погрешности МЭМС датчиков (акселерометр и датчик угловых скоростей).

Математическое обоснование

Для построения кривой, которая воспроизводила бы график исходной экспериментальной закономерности (дрейф нуля), т.е. была бы максимально близка к экспериментальным точкам, но в то же время была нечувствительна к случайным отклонениям измеряемой величины, необходимо получить модели погрешности набора экспериментальных данных МЭМС датчиков.

Нахождение погрешности осуществляется при помощи разности между кривой аппроксимирующей функцией и исходным набором данных. Наиболее распространенным методом аппроксимации экспериментальных данных является метод наименьших квадратов (МНК) [6]. Метод позволяет использовать аппроксимирующие функции произвольного вида. Для табличных данных, полученных в результате эксперимента (x_i, y_i) , где $i=0,1,\dots,n$, построим аппроксимирующий многочлен

$$P_m(x) = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (1)$$

причем $m < n$, для которого:

$$S = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

При использовании аппроксимации МНК стоит обратить внимание, что при больших степенях полинома для входных значений может возникнуть «потеря значности» (обращение коэффициентов при высших степенях в ноль). Это чревато ростом погрешности. С одной стороны слишком большая степень полинома ведет к повышенной его осцилляции [7] (явление полиномиального раскачивания). Поэтому к степеням выше 5 - 6 обычно не прибегают. Однако, с другой стороны, слишком малая степень полинома

ведет к росту погрешности аппроксимации и, как следствие, увеличению среднеквадратичного значения (СКЗ) погрешности МЭМС датчиков [8].

Для проведения исследований модели погрешностей МЭМС датчиков было использовано программное обеспечение, разработанное при помощи графического языка программирования «G» фирмы National Instruments (США) LabVIEW. Работая над созданием стенда, с помощью которого можно исследовать процессы поведения модели погрешностей МЭМС датчиков, была разработана структурная схема, в соответствии с рисунком 1.

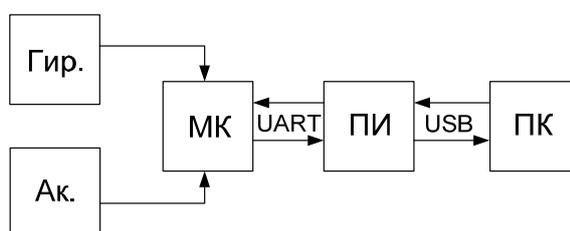


Рисунок 1 - Структурная схема: Ак —акселерометр; Гир —датчик угловых скоростей; МК —микроконтроллер; ПИ—преобразователь интерфейсов; ПК—персональный компьютер

На структурной схеме видно, что полученные данные, поступающие с цифрового выхода МЭМС - датчиков, непосредственно связанного с микроконтроллером, не подвергаются аналоговой фильтрации. Для передачи данных из микроконтроллера в ПК был создан протокол передачи данных. Обмен информации осуществляется путем формирования пакетов данных по каждой из оси трехосевого акселерометра и датчика угловых скоростей. Далее, при помощи преобразователя интерфейсов, данные отправляются по USB 2.0 в ПК, где подвергаются обработке [9, 10].

Описание эксперимента

Для наглядности эксперимента была разработана тестовая программа в среде разработки LabVIEW, в которой отображалась зависимость изменения

показаний МЭМС датчиков от времени. Графики и внешний вид программы представлены на рисунке 2.

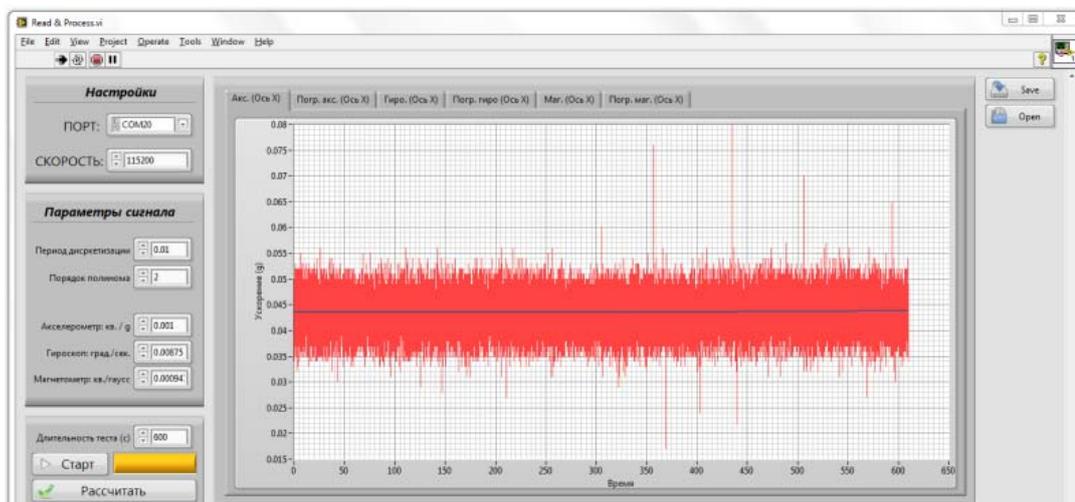


Рисунок 2 - Тестовая программа

Для сравнительного анализа модели погрешности датчиков требуется построение кривых разности между аппроксимирующими функциями различной степени полинома и исходным набором данных. Кривая погрешности МЭМС акселерометра представлена на рисунке 3.

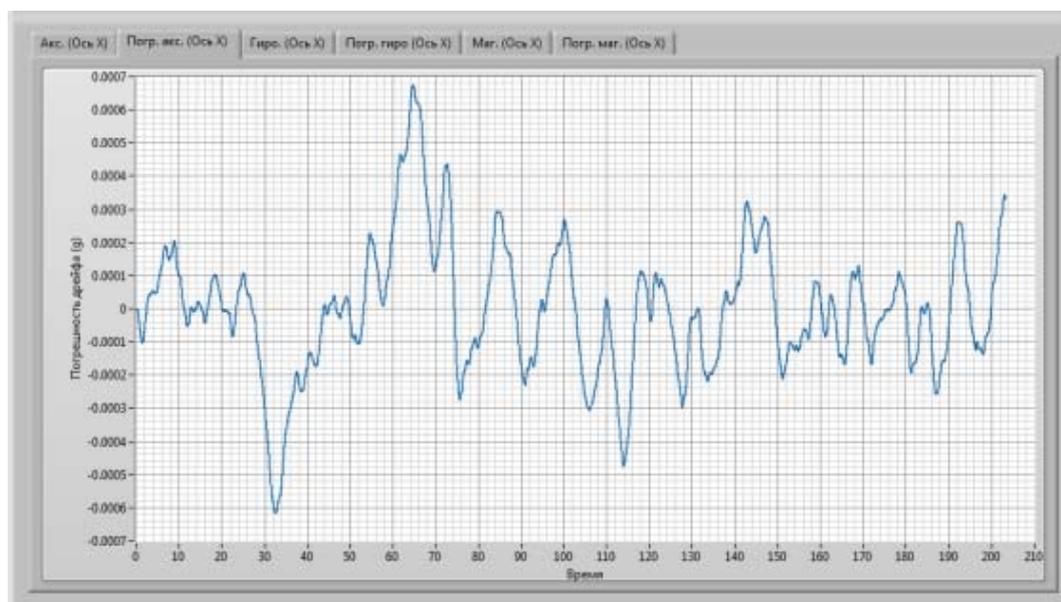


Рисунок 3 - Кривая разности аппроксимации полиномом второй степени и исходным набором данных

На рисунке 4 изображена кривая разности аппроксимации полиномом третьей степени и исходным набором данных погрешности МЭМС акселерометра.

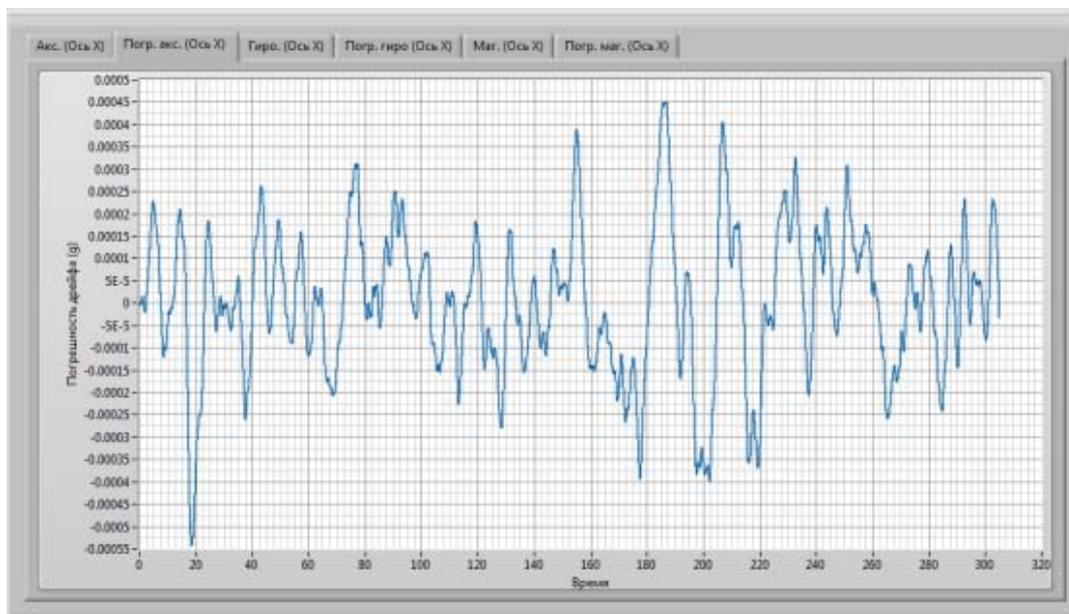


Рисунок 4 - Погрешность МЭМС акселерометра

На рисунке 5 изображена кривая разности аппроксимации полиномом четвертой степени и исходным набором данных погрешности МЭМС акселерометра.

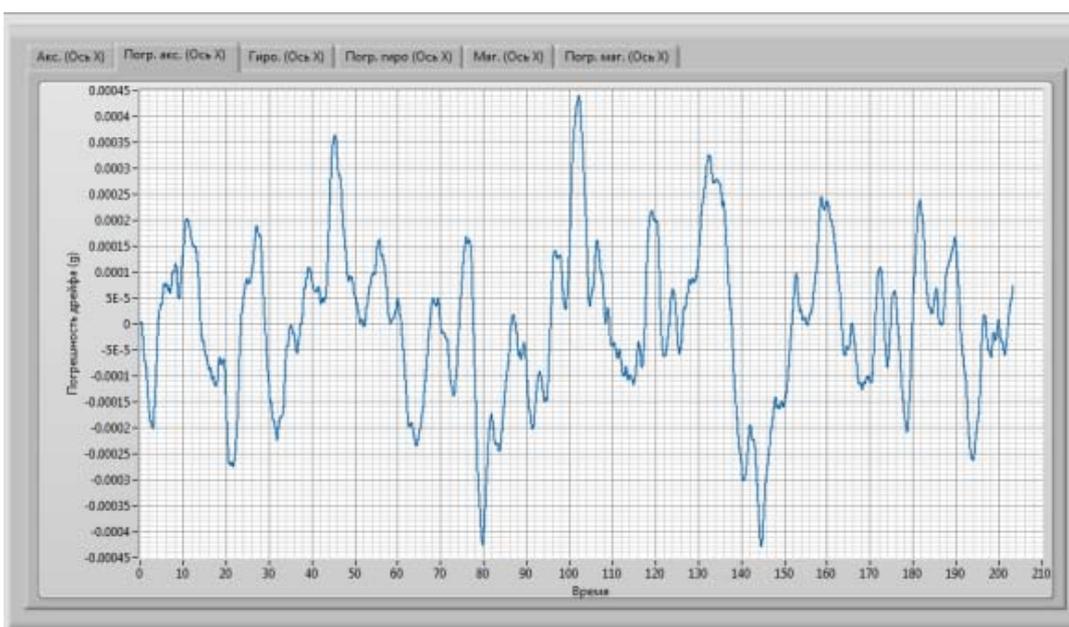


Рисунок 5 - Погрешность МЭМС акселерометра

На рисунке 6 изображена кривая разности аппроксимации полиномом четвертой степени и исходным набором данных погрешности МЭМС акселерометра.

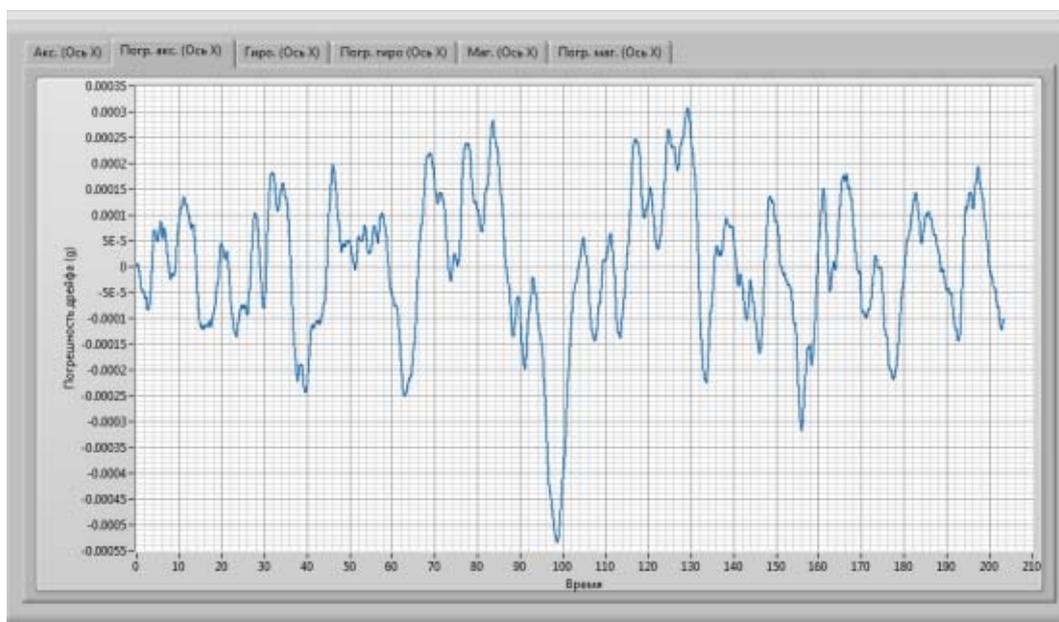


Рисунок 6 - Погрешность МЭМС акселерометра

В таблице 1 представлено среднеквадратичное значение (СКЗ) погрешностей МЭМС датчиков рассчитанных по кривой разности между кривой аппроксимирующего многочлена, вычисленного при помощи метода наименьших квадратов с различными полиномиальными степенями и исходным набором данных.

Таблица 1 – СКЗ погрешностей МЭМС датчиков

	Полином 2-й степени	Полином 3-й степени	Полином 4-й степени	Полином 5-й степени	Полином 6-й степени
Акс.	0,0413791	0,0413444	0,0413134	0,0412643	0,0413811
ДУС	0,6194181	0,6188163	0,6147635	0,6236385	0,6251734

Выводы

Проанализировав полученные коэффициенты СКЗ погрешности МЭМС датчиков, полученных при помощи разности между кривой аппроксимирующего многочлена, вычисленного при помощи метода

наименьших квадратов с различными полиномиальными степенями и исходным набором данных, было выявлено, что дальнейшее увеличение степени полинома нецелесообразно и достаточно ограничиться аппроксимацией экспериментальных данных МЭМС датчиков полиномом четвертой степени методом наименьших квадратов.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВПО ЮФУ.

Литература:

1. Крекотень Ф.В. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры [Текст] / Ф.В. Крекотень // «Петербургский журнал электроники». - №1. - 2011 г. – С. 81 – 96.
2. Б.Г. Коноплев, И.Е. Лысенко, Е.В. Шерова. Интегральный сенсор угловых скоростей и линейных ускорений [Электронный ресурс] / «Инженерный вестник Дона», 2010, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/240> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. И.В. Щербань, С.А. Толмачев, С.О. Красников. Универсальная стохастическая модель произвольного движения наземного транспортного средства [Электронный ресурс] / «Инженерный вестник Дона», 2013, №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2013/1812> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

4. Weston, J. L. Basic Principles Of Strapdown Inertial Navigation Systems [Text] / J. L. Weston // Strapdown Inertial Navigation Technology – 2nd Edition. – Radar, sonar, navigation and avionics, 2004. – Chapter 3. – P. 17 - 59.
5. Sukkarieh, S. Low Cost, High Integrity Aided Inertial Navigation Systems For Autonomous Land Vehicles [Text]: Ph.D. Thesis, Univ. of Sydney, 2000. – 136 p.
6. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю. В. Линник. — 2-е изд. — М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.
7. Поршнева С.В. Компьютерный анализ и интерпретация эмпирических зависимостей [Текст] / А. В. Каплан, В. Е. Каплан, М. В. Машенко, Е. В. Овечкина // под ред. С.В. Поршнева. - Изд-во: Бином-Пресс, 2009 г., 336 с.
8. Среднеквадратическая погрешность [Электронный ресурс] //Большая Энциклопедия Нефти Газа - Режим доступа: <http://www.ngpedia.ru/id271295p1.html> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Пешехонов, В.Г. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации: сб. ст. и докл. [Текст] – СПб.: Электроприбор, 2001. – 235с.
10. Sukkarieh, S. Low Cost, High Integrity Aided Inertial Navigation Systems For Autonomous Land Vehicles [Text]: Ph.D. Thesis, Univ. of Sydney, 2000. – 136 p.