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,…,n, построим аппроксимирующий многочлен

|  |  |
| --- | --- |
| $$P\_{m}\left(x\right)=a\_{0}+a1x^{1}+a2x^{2}+…a\_{m}x^{m}$$ |  (1) |

причем$ m<n$, для которого:

|  |  |
| --- | --- |
| $$S=\sum\_{i=0}^{n}ε\_{i}^{2}\rightarrow min$$ | (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](http://ru.wikipedia.org/wiki/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.

|  |
| --- |
| F:\Files\Снимок1.PNG |
| 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.

|  |
| --- |
| D:\kvant\3_stage\статьи\дивноморск\200_2_1.PNG |
| Рисунок 3 - Кривая разности аппроксимации полиномом второй степени и исходным набором данных |

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

|  |
| --- |
| D:\kvant\3_stage\статьи\дивноморск\200_3_1.PNG |
| Рисунок 4 - Погрешность МЭМС акселерометра |

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

|  |
| --- |
| D:\kvant\3_stage\статьи\дивноморск\200_4_1.PNG |
| Рисунок 5 - Погрешность МЭМС акселерометра |

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

|  |
| --- |
| I:\200_5_1.PNG |
| 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](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%91.%D0%93.+%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B5%D0%B2), [И.Е. Лысенко](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%98.%D0%95.+%D0%9B%D1%8B%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE), [Е.В. Шерова](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%95.%D0%92.+%D0%A8%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0). 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](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%98.%D0%92.+%D0%A9%D0%B5%D1%80%D0%B1%D0%B0%D0%BD%D1%8C), [С.А. Толмачев](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%A1.%D0%90.+%D0%A2%D0%BE%D0%BB%D0%BC%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%B2), [С.О. Красников](http://www.ivdon.ru/magazine/search?search=%D0%A1.%D0%9E.+%D0%9A%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2). 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](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C_%D0%AE%D1%80%D0%B8%D0%B9_%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87_%28%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%29). Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений [Текст] / Ю. В. [Линник](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C_%D0%AE%D1%80%D0%B8%D0%B9_%D0%92%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87_%28%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%29). — 2-е изд. — М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.
7. Поршнев С.В. Компьютерный анализ и интерпретация эмпирических зависимостей [Текст] / А. В. Каплан, В. Е. Каплан, М. В. Мащенко, 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.