

## Аппаратная реализация кватернионной алгебры для использования в БИНС на лазерных гироскопах

А.Б. Тарасенко, Ларионов П.В.

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Кафедра квантовой электроники

ЛГ в составе БИНС формируют значения угловой скорости с частотой порядка 1кГц, в то же время требуемая частота выдачи инерциальных данных БИНС в самолетные системы (например, по ARINC 429) составляет 100 ÷ 200Гц, поэтому сохраняется актуальность задачи понижения частоты обработки инерциальных данных без существенной потери точности. Здесь будет рассмотрен случай лишь плоского вращения.

Сравним кватернионы, полученные при накоплении показаний гироскопов  $M_{ang}$  и соответствующее «подмножество» более высокочастотных кватернионов  $M_{qe}$ , при помощи кватерниона невязки из него получим ошибку определения угла и построим её зависимость от степени понижения частоты и от угловой скорости, получаемой от гироскопов. Такт выдачи углов – 1600 Гц. Кватернион невязки  $Q_k$ , а точнее его скалярную компоненту  $Q_{r_0}$ , получим умножением сравниваемых кватернионов, один из которых берётся сопряжённым, а ошибку угла поворота системы  $\psi$  получим из его скалярной компоненты через арккосинус.

$$Q_{r_0} = M_{qt_0} M_{ang_0} + M_{qt_x} M_{ang_x} + M_{qt_y} M_{ang_y} + M_{qt_z} M_{ang_z} \quad (1)$$

$$\psi = \frac{180}{\pi} \times 2 \times \arccos(Q_{r_0}) \quad (2)$$

Между делом выясняем, что при накоплении углов нормированность кватернионов утрачивается быстрее, что может оказаться существенным при больших скоростях, если производить нормировку вовне блока, пересчитывающего углы в кватернионы.

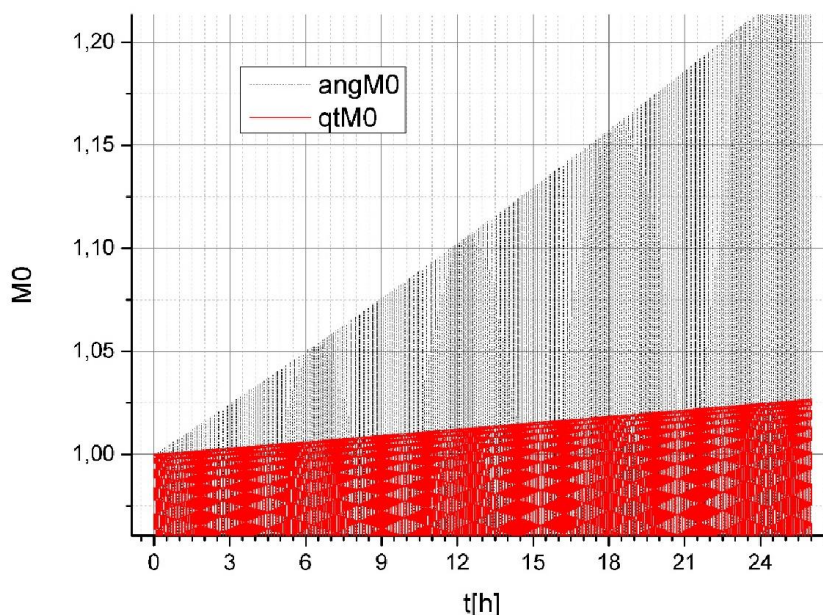


Рисунок 1 - разнормировка компонент  $M_0$  при разных способах понижения частоты

Также вычислим методическую ошибку, возникающую при нормировании кватернионов вовне алгоритма, их вычисляющего. Сравнение компонент  $M_0$  нежелательно, поскольку их разница часто оказывается на пределе машинной точности (для типа double  $\epsilon$  составляет  $2.20e-16$ ).

При использовании кватерниона невязки ошибка угла определяется на уровне  $2 \times 10^{-6}$  °, такая ошибка в методике не представляет серьезной угрозы для точности определения угла поворота.

При накоплении угла для понижения частоты  $\psi$  растёт линейно со временем и только в

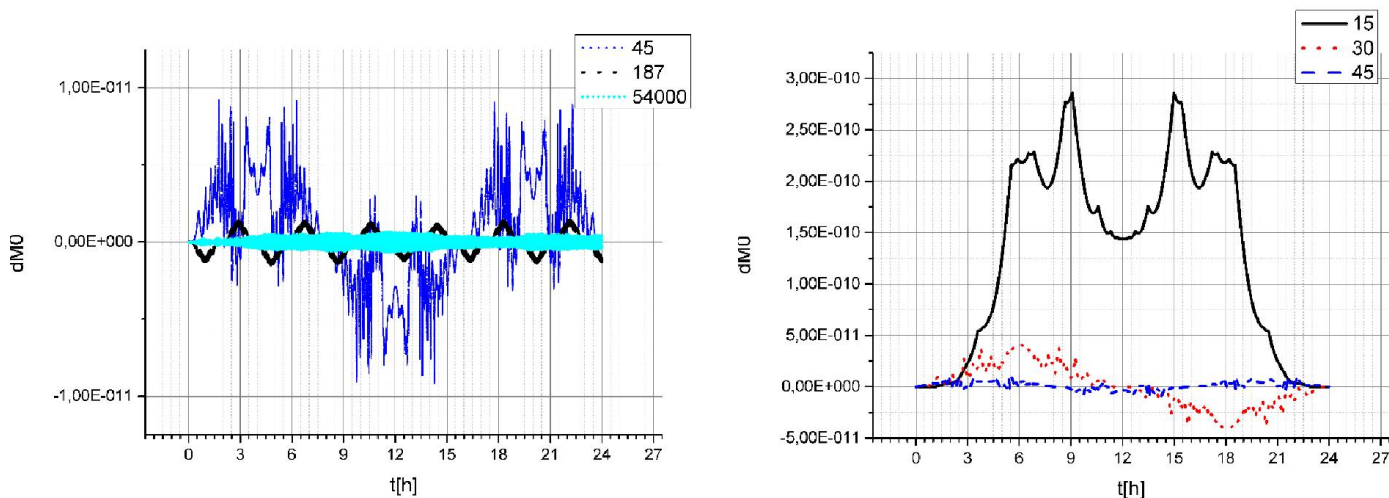


Рисунок 2- разность между компонентами  $M0$  при нормировке внутри и вовне алгоритма вычисления кватернионов

динамике (в статике остаётся близким к нулю). Учитывая, что  $400 \text{ }^\circ/\text{с} = 1440000 \text{ }^\circ/\text{ч}$  - предельное значение угловой скорости вращения для БИНС по ГОСТ РВ 52339-2005, а  $15 \text{ }^\circ/\text{ч}$  – скорость вращения Земли, выберем соответствующий диапазон скоростей, изучим зависимость  $\psi$ , накопленного за 10 минут (близко к времени выхода БИНС в режим навигации), от скорости вращения. Представим результаты в виде таблицы 1 (для кратности накопления  $n=8$ ). Как видим, вносимая ошибка незначительна вплоть до экстремальных скоростей, которые вызывают заметную ошибку (сотые доли градуса) через несколько секунд.

Таблица 1 - зависимость ошибки накопленного угла за 10 минут от скорости постоянного вращения

| $W[^\circ/\text{ч}]$ | 15 | 30 | 150 | 500              | 5000              | 20000             | 50000 | 100000 | 144000            | 1440000           |
|----------------------|----|----|-----|------------------|-------------------|-------------------|-------|--------|-------------------|-------------------|
| $\Psi[^\circ]$       | 0  | 0  | 0   | $1,7\text{E}-06$ | $2,41\text{E}-06$ | $6,43\text{E}-05$ | 0,001 | 0,008  | $2,40\text{E}-02$ | $2,40\text{E}+01$ |

Рассмотрим  $n$  в пределах от 1 до 1600 (понижение частоты выдачи до 1 Гц). В статике влияние этой величины незаметно (см. таблицу 2), тогда как на предельной скорости  $1440000 \text{ }^\circ/\text{ч}$  при понижении частоты в 8 раз мы видим относительную ошибку в 0.01% (за час накапливается лишних  $144 \text{ }^\circ$ ), что несколько больше нестабильности масштабного коэффициента, но в целом не превосходит точности определения масштабного коэффициента.

Таблица 2- зависимость ошибки накопленного за 10 минут угла от n

| n    | $\psi$ [°] |               |                  |
|------|------------|---------------|------------------|
|      | w=15[°/ч]  | W=50000 [°/ч] | W=1440000 W[°/ч] |
| 1    | 0          | 0             | 0                |
| 2    | 0          | 4,78113E-5    | 1,1423           |
| 4    | 0          | 2,39105E-4    | 5,71132          |
| 8    | 0          | 0,001         | 23,98437         |
| 16   | 0          | 0,00406       | 97,02722         |
| 50   | 0          | 0,03984       | 224,85884        |
| 100  | 0          | 0,15939       | 102,54742        |
| 800  | 0          | 10,18762      | 134,62733        |
| 1600 | 0          | 40,51776      | 234,65886        |

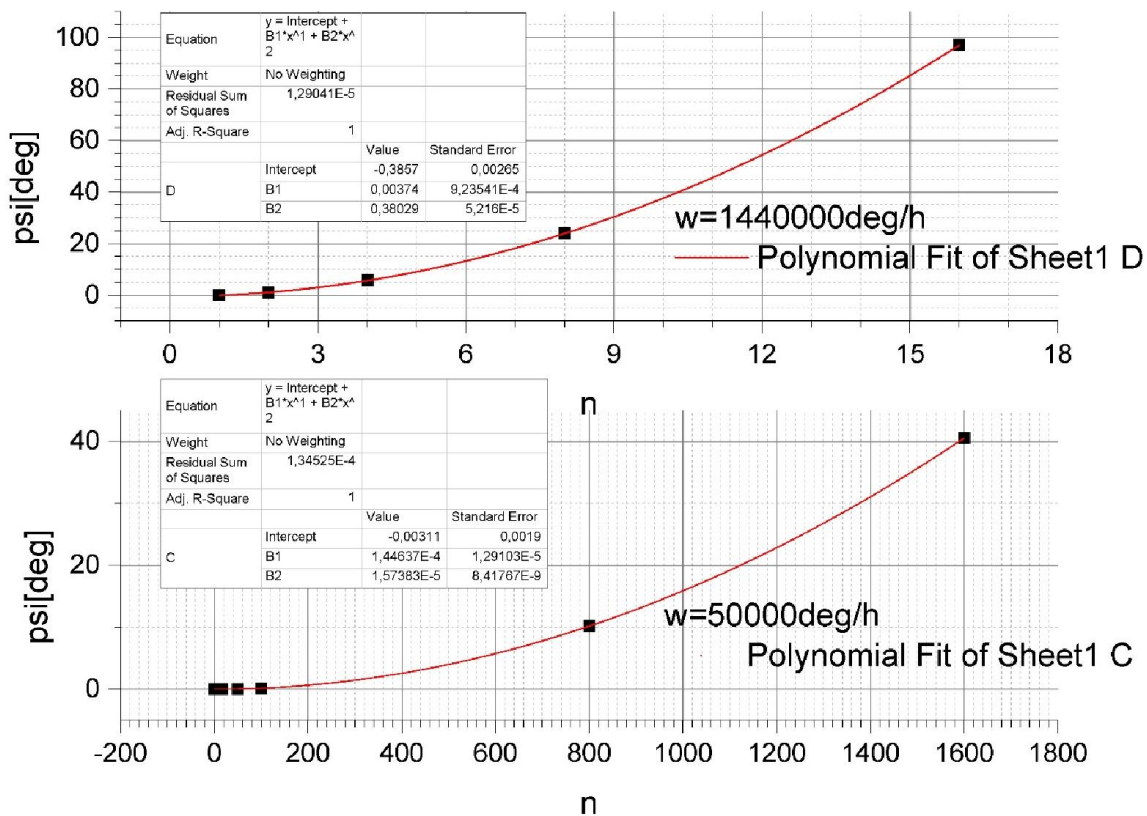


Рисунок 3 – зависимость ошибки накопленного за 10 минут угла на двух разных скоростях от кратности понижения частоты

В итоге мы получаем следующий результат:

- 1) при вычислении углов из кватернионов, полученных при «внешней» нормировке методическая ошибка накопленного получается пренебрежимо малой ( $2 \times 10^{-6}$  °);
- 2) для практических целей (понижение частоты выдачи кватернионов в системе НСИ-2010м до 200 Гц) приемлемым оказывается метод накопления углов, поскольку вносимая им ошибка даже на предельных скоростях не превышает реальную точность определения масштабного коэффициента датчиков ( нестабильность масштабного коэффициента не более 10<sup>-5</sup> отн.ед.);
- 3) ошибка определения накопленного угла, связанная с понижением частоты, при накоплении гироскопических данных линейно зависит от скорости вращения и квадратично от кратности понижения.

### Литература

1. Ароновиц Ф. Лазерные гироскопы. / В «Применения лазеров» пер. с английского под ред. Тычинского В.П., М.: Мир, 1974.
2. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных систем . Спб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009.