

Using an IMU Array for cycle slip detection and repair

Artem Novichkov¹, Ilya Goncharov¹

¹Bauman Moscow State Technical University

23 September 2021

Содержание

- 1 Введение
- 2 IMU Cluster
- 3 Оценка выходных погрешностей
- 4 Интеграция ИНС/ГНСС
- 5 Сравнение кластера и аналогичного по характеристикам IMU

Аннотация

Текст аннотации

1 Введение

Режимы PPP и RTK являются одними из самых точных режимов позиционирования на сегодняшний день, предоставляя пользователю возможность определять свою позицию с миллиметровой точностью путем обработки фазовых измерений спутниковой навигационной системы. RTK нашел широкое практическое применение в различных областях: геодезия, сельское хозяйство, строительство. Не смотря на это, задача позиционирования в условиях прерывания непрерывного слежения за фазой радионавигационного сигнала до сих пор является актуальной и ее решение востребовано на практике, особенно в условиях городской среды.

В данной работе рассматривается схема интеграции инерциальной навигационной системы на базе кластера из четырех микромеханических инерциальных блоков MPU6050 и двухчастотного спутникового навигационного приемника с целью детектирования и исправления cycle slip-ов, возникающих вследствие прерывания слежения за фазой радионавигационного сигнала.

2 IMU Cluster

В настоящее время широкое распространение получили блоки инерциальных чувствительных элементов на базе MEMS-технологии. Их основными преимуществами являются: низкая стоимость, малые массогабаритные характеристики и низкое энергопотребление. Однако подобные приборы обладают низкой точностью: нестабильность нуля у гироскопов единицы-десятки градусов в час, а у акселерометров сотые-десятые доли милли-г.

Одним из путей повышения точности микромеханических бчэ является объединение их в массив (кластер). [ссылка на работы по кластеру]. Кластерные бчэ позволяют уменьшить шум в информационном сигнале в \sqrt{N} раз, где N - количество отдельных используемых бчэ. [ссылка]

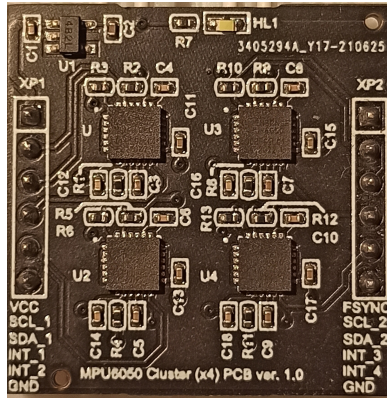


Рис. 1: Печатная плата с кластерным БЧЭ

Для проверки и подтверждения характеристик кластерного бчэ в ходе данной работы была создана печатная плата (Рис. 1).

В состав разработанного кластерного БЧЭ входят шестиосные датчики фирмы InvenSense MPU6050 (трехосный акселерометр и трехосный датчик угловых скоростей). Данные БЧЭ были выбраны вследствие их наибольшей распространенности и доступности. Каждый из MPU6050 располагается на печатной плате в вершинах квадрата со стороной 10 мм. Кроме того, они установлены так, чтобы соответствующие оси чувствительности каждого датчика были параллельны между собой.

В работе использовались следующие настройки для чувствительных элементов из состава MPU6050: диапазон измеряемых угловых скоростей - ± 500 °/s; диапазон измеряемых линейных ускорений - $\pm 4g$. Съем информации с датчиков производился на частоте 100 Гц. Данные параметры были выбраны в предположении установки разрабатываемого устройства на маломаневренных, наземных объектах.

Таблица 1: Смещение нуля и дрейф от запуска к запуску акселерометров MPU6050

| Position | Axis | Mean, g | RTR, mg |
|----------|------|----------|---------|
| Pos.1 | X | 0.0686 | 0.068 |
| | Y | -0.0250 | 0.06 |
| | Z | 1.0199 | 0.2413 |
| Pos.2 | X | 0.0541 | 0.0943 |
| | Y | -0.0086 | 0.0501 |
| | Z | -1.0121 | 0.2652 |
| Pos.3 | X | 1.0567 | 0.1836 |
| | Y | -0.0246 | 0.0878 |
| | Z | 0.0028 | 0.1113 |
| Pos.4 | X | -0.9377 | 0.1664 |
| | Y | -0.0045 | 0.0966 |
| | Z | -0.00004 | 0.2716 |
| Pos.5 | X | 0.0486 | 0.0729 |
| | Y | -1.0271 | 0.0152 |
| | Z | -0.0071 | 0.2099 |
| Pos.6 | X | 0.0731 | 0.2276 |
| | Y | 0.9929 | 0.1313 |
| | Z | 0.0171 | 0.2973 |

Таблица 2: Смещение нуля и дрейф от запуска к запуску гироскопов MPU6050

| Position | Axis | Mean, °/s | RTR, °/h |
|----------|------|-----------|----------|
| Pos.1 | X | -1.0739 | 44.8406 |
| | Y | -1.0022 | 17.3611 |
| | Z | 1.2711 | 22.4487 |
| Pos.2 | X | -1.0246 | 59.2236 |
| | Y | -0.9897 | 15.8603 |
| | Z | 1.2628 | 27.1911 |
| Pos.3 | X | -1.0122 | 66.8934 |
| | Y | -0.9913 | 16.7310 |
| | Z | 1.2515 | 34.0154 |
| Pos.4 | X | -1.0254 | 17.4720 |
| | Y | -0.9991 | 7.7416 |
| | Z | 1.2946 | 12.8763 |
| Pos.5 | X | -1.0106 | 13.5531 |
| | Y | -0.9849 | 3.7527 |
| | Z | 1.2519 | 7.4237 |
| Pos.6 | X | -1.0095 | 1.7701 |
| | Y | -0.9878 | 12.9651 |
| | Z | 1.2655 | 19.6326 |

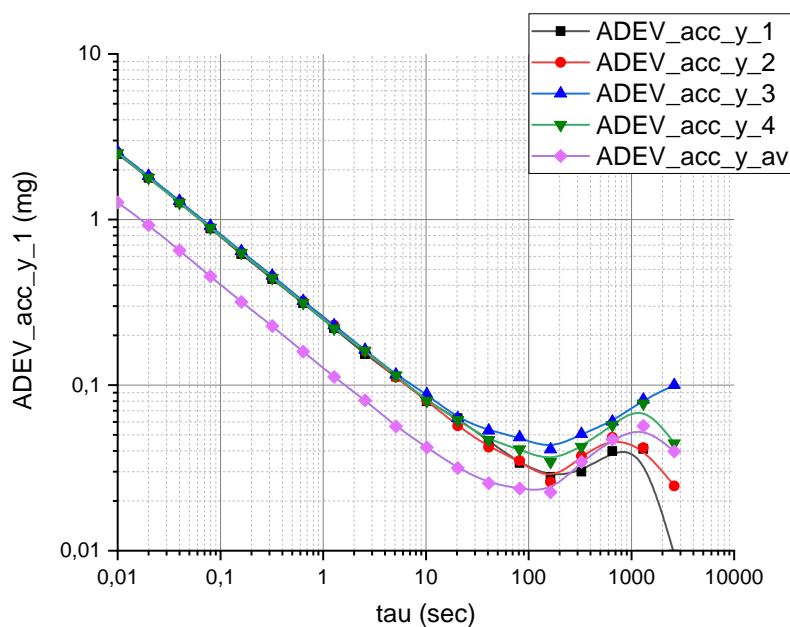


Рис. 2: Девияция Аллана акселерометров по оси Y

Таблица 3: Нестабильность смещения нуля акселерометров MPU6050, mg

| Ось | IMU_1 | IMU_2 | IMU_3 | IMU_4 | Average |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------|
| X | 0.0467 | 0.0409 | 0.0417 | 0.0417 | 0.0264 |
| Y | 0.0278 | 0.0259 | 0.0409 | 0.0344 | 0.0225 |
| Z | 0.0764 | 0.0704 | 0.0714 | 0.0692 | 0.0472 |

3 Оценка выходных погрешностей

Для оценки точности автономной работы БИНС на базе кластерного блока чувствительных элементов были использованы уравнения ошибок автономной работы ИНС. Данные уравнения учитывают медленно

Таблица 4: Velocity random walk (VRW) of accelerometers MPU6050, $\text{mg}/\sqrt{\text{Hz}}$

| Ось | IMU_1 | IMU_2 | IMU_3 | IMU_4 | Average |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| X | 0.24014 | 0.22564 | 0.24332 | 0.24124 | 0.11715 |
| Y | 0.22065 | 0.23029 | 0.22929 | 0.22040 | 0.11211 |
| Z | 0.35402 | 0.35872 | 0.36701 | 0.37358 | 0.18599 |

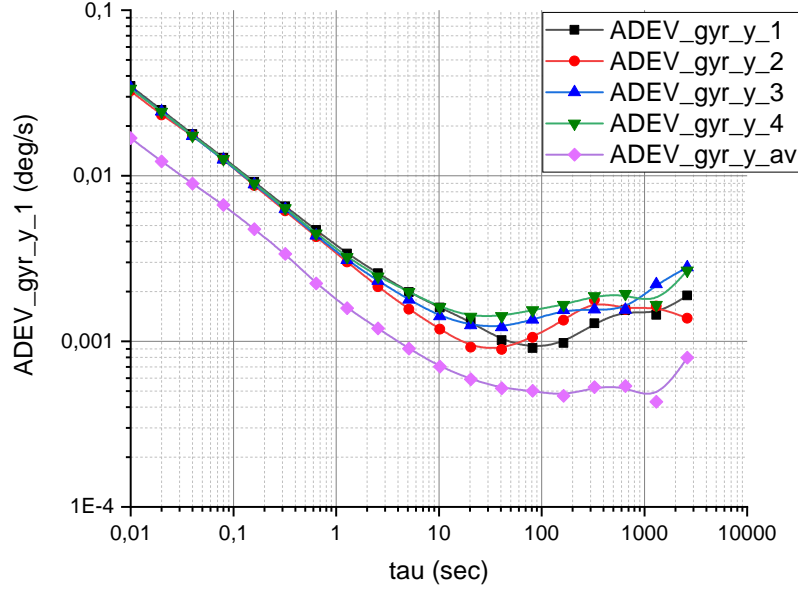


Рис. 3: Девиация Аллана гироскопов по оси Y

Таблица 5: Нестабильность смещения нуля гироскопов MPU6050, $^{\circ}/\text{h}$

| Ось | IMU_1 | IMU_2 | IMU_3 | IMU_4 | Average |
|-----|-------|-------|-------|-------|---------|
| X | 4.644 | 3.553 | 3.780 | 4.327 | 2.416 |
| Y | 3.272 | 3.215 | 4.370 | 5.087 | 1.685 |
| Z | 3.740 | 2.696 | 3.503 | 2.693 | 1.580 |

Таблица 6: Angular random walk (ARW) of gyroscopes MPU6050, $^{\circ}/\sqrt{\text{hr}}$

| Ось | IMU_1 | IMU_2 | IMU_3 | IMU_4 | Average |
|-----|--------|--------|--------|--------|---------|
| X | 0.2022 | 0.1872 | 0.2382 | 0.2010 | 0.1044 |
| Y | 0.2028 | 0.1812 | 0.1854 | 0.1938 | 0.0954 |
| Z | 0.1638 | 0.2106 | 0.1884 | 0.1944 | 0.0972 |

изменяющуюся составляющую ошибки, не зависящую от горизонтального ускорения объекта. Нестационарные погрешности, зависящие от ускорения и обусловленные погрешностью масштабных коэффициентов акселерометров, представляют собой высокочастотную ошибку, модулирующую медленно изменяющуюся шулеровскую, не учитываются в данной модели.

Для связи выходных параметров ИНС (крен, тангаж, курс, широта, долгота) использованы следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \Phi_x(t) = \Phi_x(0) \cos \nu t - U \cos \phi \frac{\sin \nu t}{\nu} \Phi_z(0) - \frac{\sin \nu t}{\nu R} \delta V_y(0) + \frac{\sin \nu t}{\nu} \xi_x - \\ U \cos \phi \frac{1 - \cos \nu t}{\nu^2} \xi_z - \frac{1 - \cos \nu t}{\nu^2 R} B_y(0) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Phi_y(t) = \Phi_y(0) \cos \nu t + \frac{\sin \nu t}{\nu R} \delta V_x(0) + \frac{\sin \nu t}{\nu} \xi_y + \frac{1 - \cos \nu t}{\nu^2 R} B_y(0) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Phi_z(t) = & \Phi_x(0) U \cos \phi t + \Phi_y(0) \operatorname{tg} \phi + \frac{\operatorname{tg} \phi \sin \nu t}{\nu R} \delta V_x(0) - \\ & (t - \frac{\sin \nu t}{\nu}) \operatorname{tg} \phi \xi_y + \operatorname{tg} \phi \frac{1 - \cos \nu t}{\nu^2 R} B_x(0) + \\ & \Phi_z(0) + \xi_z t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\delta V_e(t) = -\Phi_y(0) R \sin \nu t + \delta V_x(0) \cos \nu t - \xi_y R (1 - \cos \nu t) + \frac{\sin \nu t}{\nu} B_x(0) \quad (4)$$

$$\delta V_n(t) = -\Phi_x(0) R \sin \nu t + \delta V_y(0) \cos \nu t + \xi_x R (1 - \cos \nu t) + \frac{\sin \nu t}{\nu} B_y(0) \quad (5)$$

$$\lambda(t) = \int \frac{\delta V_e(t)}{R \cos \phi} dt \quad (6)$$

$$\phi(t) = \int \frac{\delta V_n(t)}{R \cos \phi} dt \quad (7)$$

где $\nu = \sqrt{\frac{g}{R}}$ - шулеровская частота колебания;

$B_x(0), B_y(0)$ - смещения нулей акселерометра;

ξ_x, ξ_y, ξ_z - дрейф гироскопа;

Для оценки остаточной случайной составляющей погрешности акселерометра и гироскопа, с целью использования данных значений в уравнениях (1) — (7) проведена запись показаний чувствительных элементов на протяжении 2-ух часов. По результатам измерений построены графики девиации Аллана.

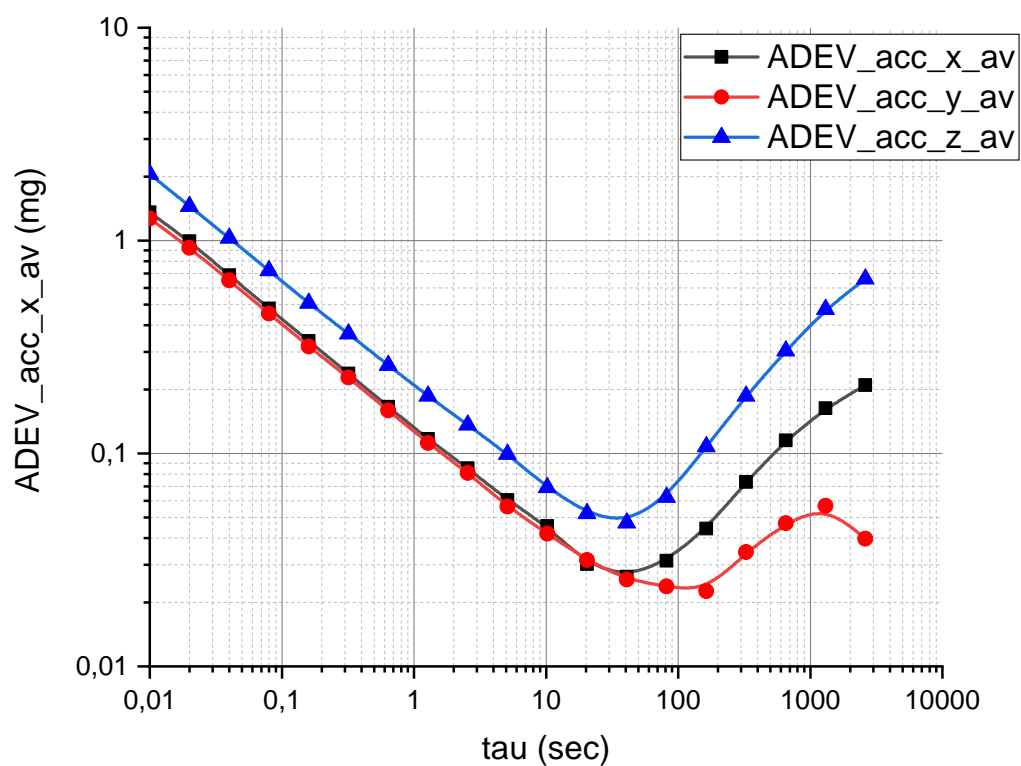


Рис. 4: График девиации Аллана

Полученный график Рис.4 девиации Аллана позволяет оценить остаточную случайную погрешность, которая будет присутствовать в выходных данных показаний акселерометров в составе кластерного инерциального измерительного блока. Исходя из уравнений (1) – (7) остаточная погрешность акселерометра не вносит существенный вклад в ошибку определения выходных координат. Данная ошибка будет влиять исключительно на расчет пространственной ориентации.

Ниже представлены графики нарастания ошибки определения угла тангажа и крена в течение 5 секунд автономной работы кластерной инерциальной навигационной системы.

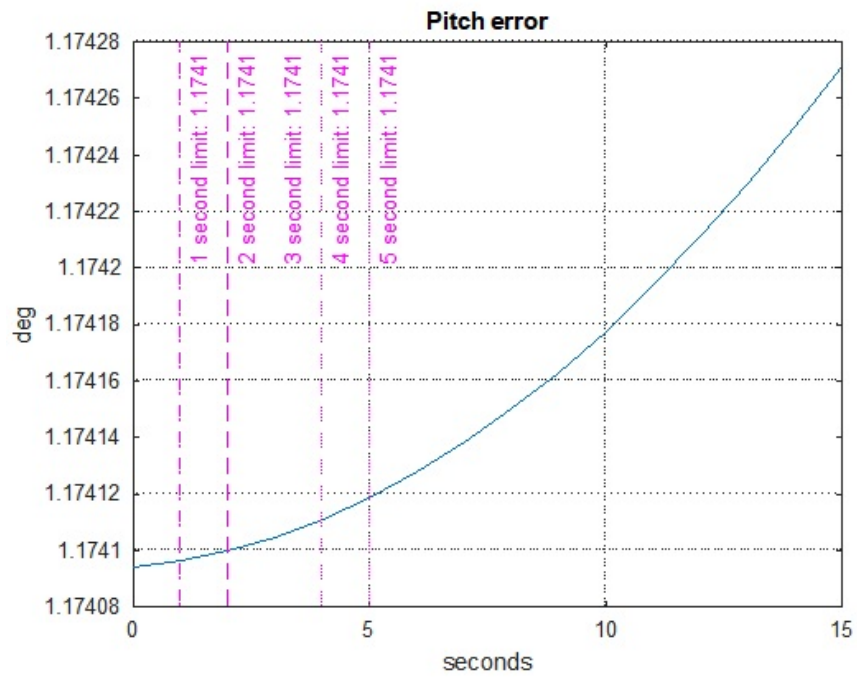


Рис. 5: Нарастание ошибки в определении тангажа

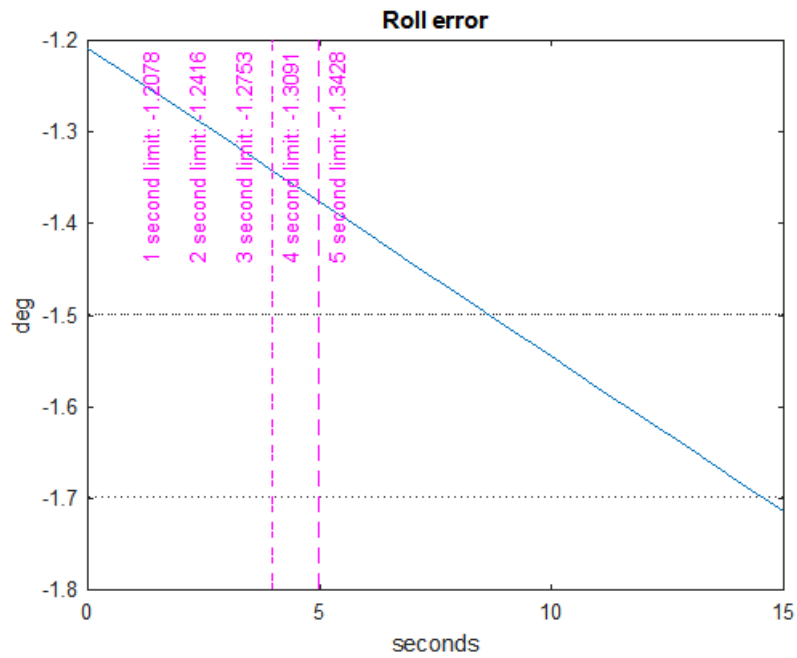


Рис. 6: Нарастание ошибки в определении крена

Дрейф гироскопов является основной составляющей ошибки определения координат в процессе автономной работы ИНС. Именно поэтому основной задачей исследования точности чувствительных элементов был анализ остаточных погрешностей гироскопов. Из графика (Рис.7) видно, что значение дрейфа на интервале осреднения 0.01 с. не превышает 0.03375 °/с

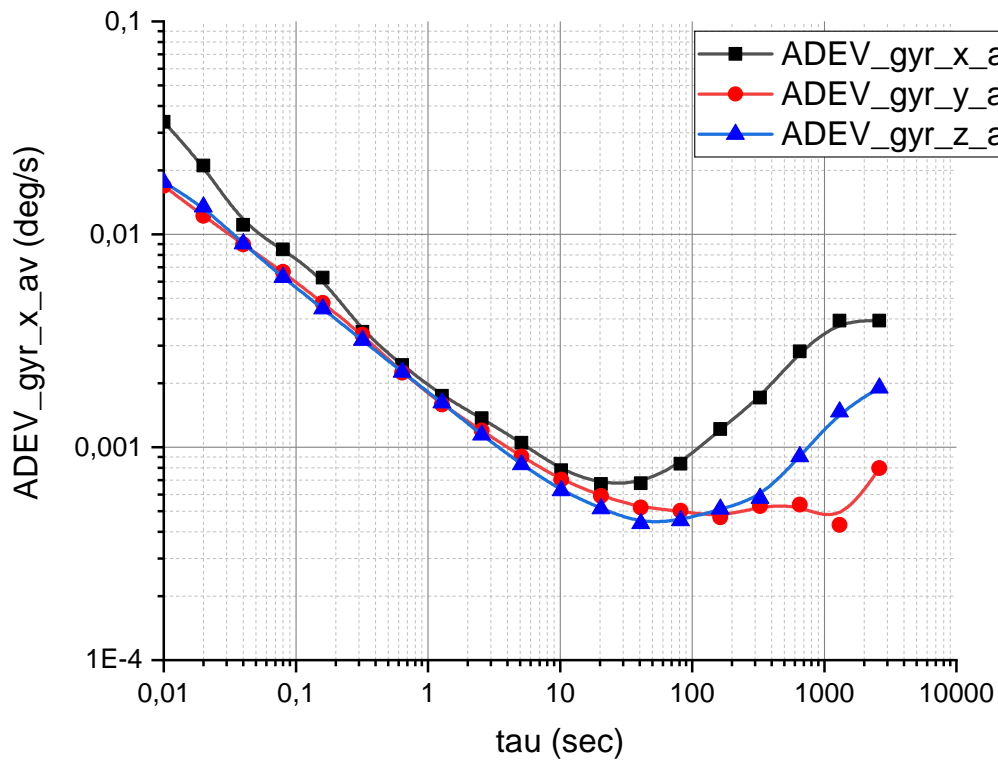


Рис. 7: График девиации Аллана

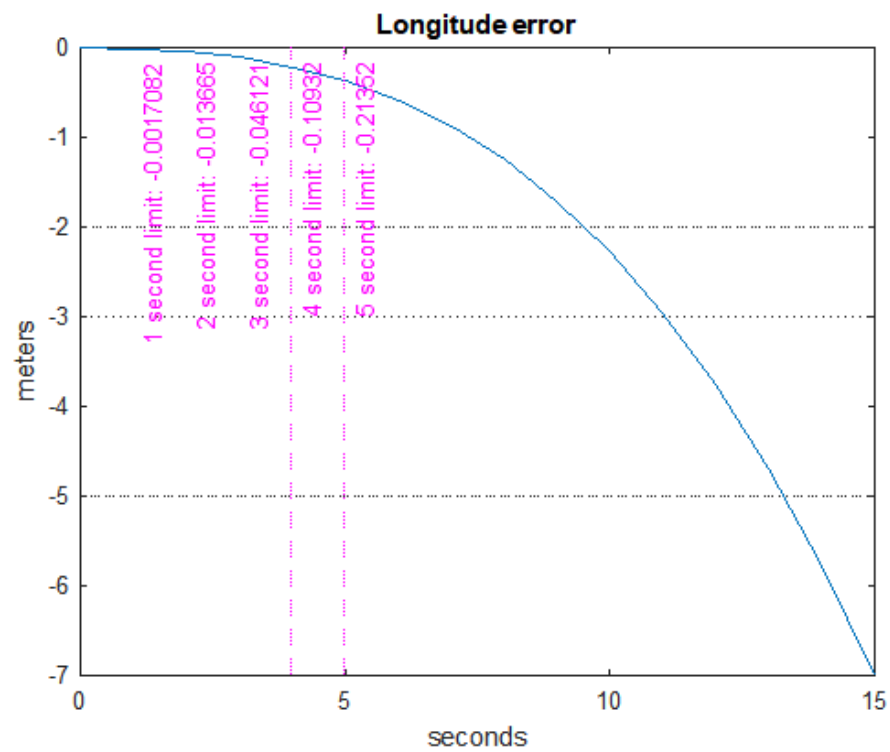


Рис. 8: График нарастания ошибки в определении долготы места

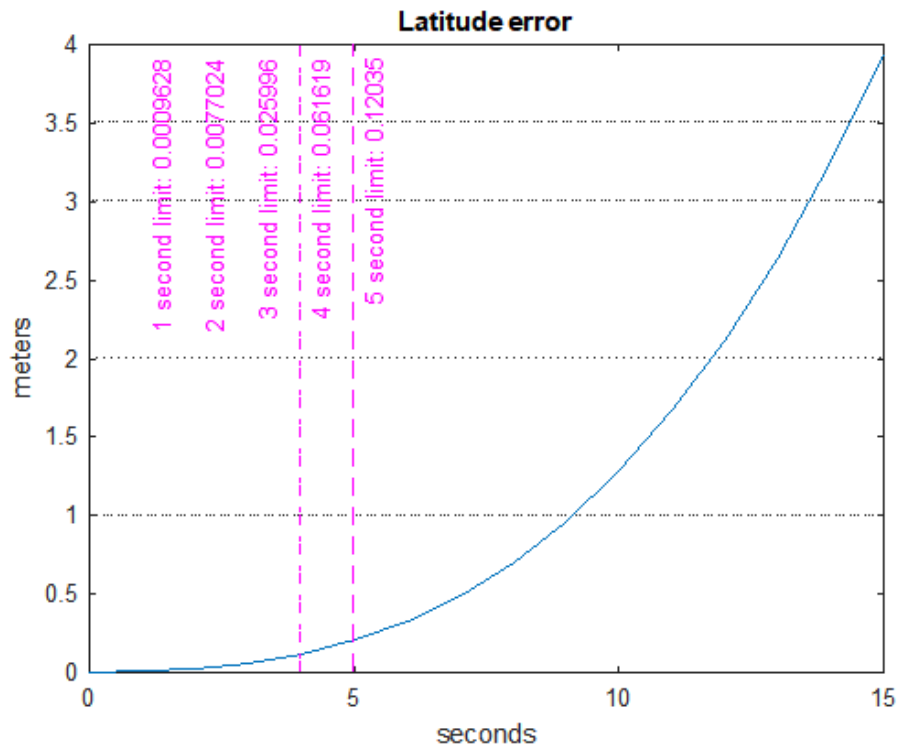


Рис. 9: График нарастания ошибки в определении широты места

4 Интеграция ИНС/ГНСС

Основной целью интеграции кластерного инерциального блока с навигационным приемником является повышение надежности и точности выдаваемого им решения. Для обеспечения максимальной надежности интегрированного алгоритма позиционирования необходимо воспользоваться соответствующей схемой интеграции двух систем. В данной работе используется OEM плата спутникового навигационного приемника компании NTLab. Данная плата позволяет пользователю получить доступ к срезу кодовых и фазовых измерений на текущую эпоху. Таким образом, тесная схема интеграции ИНС и СНС, которая предполагает использование псевдодальностей СНС и псевдодальности ИНС, видится наиболее оптимальным вариантом.

Модель системы для расчета углов ориентации, скорости и координат ИНС:

(8)

(9)

(10)

5 Сравнение кластера и аналогичного по характеристикам IMU

Я считаю, что было бы круто сравнить данный кластер со схожим по характеристикам IMU, так как я в abstract писал, что у нас COST-EFFECTIVE решение.

Список литературы

[1] Author1 Article1