

10. Trahanias, P.E. An approach to QRS complex detection using mathematical morphology / P.E. Trahanias // IEEE Trans. Biomed. Eng. – 1993. – Vol. 40, №. 2. – P. 201–205.

11. Леонова, А.В. Модификация алгоритма распознавания QRS комплексов в реальном времени Пана-Томпкинса / А.В. Леонова, А.А. Агейченко // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2. – С. 72–76.

12. Юлдашев, М. Многоуровневая интеллектуальная система удаленного мониторинга состояния здоровья людей с хроническими заболеваниями / М. Юлдашев, Е.А. Пустозеров, А.А. Анисимов // Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы. – 2016. – № 5. – С. 2–8.

13. Magrupov, T.M. ECG processing and analysis technique based on neural network learning vector quantization / T.M. Magrupov, Sh.K. Nematov, Y.T. Talatov // Chemical Technology, Control and Management. – 2020. – Iss. 4, Article 3. – P. 15–22.

14. Talatov, Y.T. Algorithmic and software analysis and processing of ECG signals / Y.T. Talatov, T.M. Magrupov // Conference Proceedings. SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 403–406.

15. A Technique for Classifying the ECG Signal into Various Possible States of the Cardiovascular System / Y.T. Talatov [et al.] // Conference Proceedings. 2020 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). – 2020. – P. 127–131.

16. Talatov, Y.T. A Device for Measuring of Frequency Response Function of Biopotentials / Y.T. Talatov, T. Magrupov, A. Radjabov // Conference Proceedings. SIBIRCON 2019 – International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, Proceedings. – 2019. – P. 7–10.

17. Methodology for processing and analysis of diagnostic indicators electrocardiogram based on Labview / Y.T. Talatov [et al.] // 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020. – 2020. – P. 9351478.

18. An ECG Processing and Analysis Technique Based on Neural Network / Y.T. Talatov [et al.] // International Conference on Information Science and Communications Technologies, ICISCT 2020. – 2020. – P. 9351478.

19. Talatov, Y.T. A method for classifying ecg signals with different possible states on a multilayer perceptron / Y.T. Talatov, Sh.K. Nematov // Technical Science and Innovation. – 2020. – № 4. – P. 71–79.

УДК 531.383

ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Матвеев В.В.

*ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. Рассматриваются погрешности бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), вызванные инструментальными погрешностями датчиков первичной информации. Приводятся соотношения для оценки средних квадратических отклонений погрешностей БИНС, вызванных шумом гироскопов и акселерометров. Даны оценки погрешностей БИНС на коротком интервале времени для уровня шума микромеханических датчиков первичной информации.

Ключевые слова: бесплатформенная инерциальная навигационная система, гироскоп, акселерометр, погрешность.

ERRORS OF STRAPDON INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

Matveev V.V.

*Tula State University
Tula, Russian Federation*

Abstract. Errors in strapdown inertial navigation systems (SINS) caused by instrumental errors in primary information sensors are considered. Relations are given for estimating the standard deviations of SINS errors caused by the noise of gyroscopes and accelerometers. Estimates of SINS errors over a short time interval are given for the noise level of micromechanical sensors.

Key words: strapdown inertial navigation system, gyroscope, accelerometer, error.

*Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru*

Введение. Сегодня не вызывает сомнений вопрос о перспективности использования бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) на подвижных объектах наземного, морского и воздушного базирования [1; 2]. БИНС не требуют информации о магнитном поле Земли, местоположении небесных светил, ветровых и морских течений. Координаты местоположения

подвижного объекта в БИНС определяются автономно на основе показаний гироскопов и акселерометров. Основная идея инерциальной навигации – это двойное интегрирование измеренных акселерометрами ускорений. Гироскопы служат для обеспечения информацией об угловой ориентации измерительных осей акселерометров путем численного интегрирования кинематических уравнений.

Наряду с несомненными преимуществами БИНС по сравнению с другими неавтономными средствами навигации, существенным их недостатком является накопление погрешностей с течением времени. Выходные сигналы датчиков первичной информации (ДПИ) содержат различного рода инструментальные погрешности (шум, нестабильность масштабного коэффициента, смещение нулевого сигнала и др.), которые приводят к искажениям в измерении угловых скоростей и ускорений подвижного объекта, что в конечном счете сказывается на точности решения задач ориентации и навигации. Обзору погрешностей БИНС и посвящен настоящий доклад.

Влияние шума датчиков. Для характеристики шума гироскопов обычно задается величина ARW (*Angle Random Walk* – случайное блуждание угла) с размерностью $[^\circ/\sqrt{ч}]$ или $[^\circ/\sqrt{с}]$, имеющая смысл квадратного корня из спектральной плотности белого шума. Шум акселерометров соответственно характеризуют величиной VRW (*Velocity Random Walk* – случайное блуждание скорости) с размерностью $[м/с^{3/2}]$.

Погрешности БИНС в определении параметров ориентации и навигации, вызванные шумом гироскопов можно оценить по следующим зависимостям [3; 4]:

$$\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} ARW \sqrt{t + \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t) = \frac{g}{\sqrt{2}\omega_0} ARW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t) = \frac{g \cdot ARW}{\omega_0^2} \sqrt{\frac{3t}{2} - \frac{2 \sin \omega_0 t}{\omega_0} + \frac{\sin 2\omega_0 t}{4\omega_0}}, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \sqrt{g/R}$ – частота Шулера (если принять $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $R = 6371000 \text{ м}$, то $\omega_0 = 0,00124 \text{ с}^{-1}$); $\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t)$, $\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t)$, $\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t)$ – СКО погрешностей БИНС в определении угловой ориентации, скорости и координаты соответственно.

Влияние шума акселерометров можно оценить по следующим зависимостям:

$$\sigma_{\Delta\theta}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}R\omega_0} VRW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (4)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} VRW \sqrt{t + \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{acc}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}\omega_0} VRW \sqrt{t - \frac{\sin 2\omega_0 t}{2\omega_0}}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\Delta\theta}^{acc}(t)$, $\sigma_{\Delta V}^{acc}(t)$, $\sigma_{\Delta X}^{acc}(t)$ – СКО погрешностей БИНС в определении угловой ориентации, скорости и координаты соответственно.

Если рассматривается вариант создания БИНС на датчиках первичной информации низкого класса точности, то вряд ли придется надеяться на

длительный автономный режим работы и учитывать шулеровские, а тем более суточные колебания погрешностей. В этом случае зависимости (1)–(6) можно рассмотреть на коротком интервале времени (до 10 мин) [2]:

$$\sigma_{\Delta\alpha}^{gyro}(t) \approx ARW \sqrt{t}, \quad \sigma_{\Delta\alpha}^{acc}(t) \approx \frac{1}{\sqrt{3}R} VRW \cdot t^{3/2}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(t) \approx \frac{g \cdot ARW}{\sqrt{3}} t^{3/2}, \quad \sigma_{\Delta V}^{acc}(t) \approx VRW \sqrt{t}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(t) \approx \frac{g \cdot ARW}{2\sqrt{5}} t^{5/2}, \quad \sigma_{\Delta X}^{acc}(t) \approx \frac{VRW}{\sqrt{3}} \cdot t^{3/2}. \quad (9)$$

Например, микромеханические гироскопы семейства *Analog Devices* имеют шум $ARW = 0,05^\circ / \sqrt{с}$ ($8,727 \cdot 10^{-4} \text{ рад}/\sqrt{с}$), тогда за время 3 мин, будет накоплена погрешность по углам ориентации

$$\sigma_{\alpha}^{gyro}(180) = 0,05 \sqrt{180} = 0,671^\circ \quad (1\sigma).$$

В соответствии с приведенными выше формулами СКО погрешностей БИНС по скорости и пройденному пути имеют значения:

$$\sigma_{\Delta V}^{gyro}(180) = \frac{9,81}{\sqrt{3}} 8,727 \cdot 10^{-4} \cdot 180^{3/2} = 11,9 \text{ м/с},$$

$$\sigma_{\Delta X}^{gyro}(180) = \frac{9,81}{2\sqrt{5}} 8,727 \cdot 10^{-4} \cdot 180^{\frac{5}{2}} = 832,1 \text{ м}.$$

Оценим погрешности БИНС, например для микромеханического акселерометра *ADIS16003* с уровнем шума $110 \text{ мкг}/\sqrt{Гц} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^{3/2}$. В этом случае СКО погрешностей БИНС по скорости и координате будут иметь следующие значения:

$$\sigma_{\Delta V}^{acc}(t) = 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{180} = 0,015 \text{ м/с},$$

$$\sigma_{\Delta X}^{acc}(180) \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 180^{\frac{3}{2}} = 1,534 \text{ м}.$$

Данные оценки показывают, что влияние шума гироскопов на погрешности БИНС по координатам может быть существенно. Шум акселерометров в целом оказывает меньшее влияние. Для определения максимальных значений погрешностей БИНС при гауссовом распределении, полученные значения необходимо снабдить множителем 3, в соответствии с правилом «трех сигм».

Влияние систематических погрешностей

Систематические погрешности (*Systematic error*) данного акселерометра $\Delta\omega_{\text{sys}}$ (гироскопа $\Delta\omega_{\text{sys}}$), как правило, будут отличаться от систематической погрешности другого экземпляра акселерометра (гироскопа) этого же типа, либо отличаться от запуска к запуску. Вследствие чего для группы однотипных акселерометров (гироскопов) систематические погрешности зачастую рассматриваются как случайные величины со среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{\text{sys}}^{acc}$ и

$\sigma_{\text{сист}}^{\text{gyro}}$. Если $\Delta a_{\text{сист}}$, $\Delta \omega_{\text{сист}}$ – постоянные в данном запуске систематические погрешности гироскопов и акселерометров, то погрешности БИНС могут быть оценены по зависимостям

$$\Delta \alpha = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{g} (1 - \cos \omega_0 t) + \frac{\Delta \omega_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t, \quad (10)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta a_{\text{сист}}}{\omega_0} \sin \omega_0 t + R \cdot \Delta \omega_{\text{сист}} (\cos \omega_0 t - 1), \quad (11)$$

$$\Delta X = R \left(\frac{\Delta a_{\text{сист}} (1 - \cos \omega_0 t)}{g} + \Delta \omega_{\text{сист}} \left(\frac{\sin \omega_0 t}{\omega_0} - t \right) \right). \quad (12)$$

Соотношения (10)–(12) показывают, что погрешности БИНС носят характер колебаний с частотой Шулера. Соотношение (12) содержит, так называемый, «вековой» член, приводящий к неограниченному росту погрешностей БИНС в определении координат. При необходимости, путем разложения в степенные ряды зависимости (10)–(12), можно получить оценки погрешностей БИНС на коротком интервале времени.

УДК 538.9; 537.6/8; 544.2; 535; 621.37; 621.38

ПЕРСПЕКТИВЫ III-НИТРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИХ РАЗВИТИЕ В БЕЛАРУСИ

Луценко Е.В.

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены последние достижения в области роста слоев и гетероструктур III-нитридов, а также создания на их основе различных устройств опто-, СВЧ и силовой электроники. Рассматривается текущий уровень таких разработок в Беларуси. Обсуждаются пути развития и перспективы III-нитридной силовой и СВЧ электроники, УФ оптоэлектроники, лазеров, фотоники и акустооптики, возможности сопряжения их с традиционной кремниевой микроэлектроникой.

Ключевые слова: III-нитрид (GaN, AlN, InN), молекулярно-лучевая эпитаксия, УФ-светодиоды, УФ-фотодетекторы, транзисторы.

PROSPECTS FOR III-NITRIDE TECHNOLOGIES AND THEIR DEVELOPMENT IN BELARUS

Lutsenko E.V.

*B.I. Stepanov Institute of Physics, NASB
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. The latest achievements in the field of growth of layers and heterostructures of III-nitrides, as well as the creation of various opto-, microwave and power electronics devices based on them, are presented. The current level of such developments in Belarus is considered. The development paths and prospects of III-nitride power and microwave electronics, UV optoelectronics, lasers, photonics and acousto-optics, and the possibility of pairing them with traditional silicon microelectronics are discussed.

Key words: III-nitride (GaN, AlN, InN), molecular beam epitaxy, UV LEDs, UV photodetectors, transistors.

*Адрес для переписки: Луценко Е.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: e.lutsenko@ifanbel.bas-net.by*

Развитие эпитаксиальных технологий тонких пленок III-нитридов (GaN, AlN, InN) привело к впечатляющему экономическому эффекту. К настоящему времени практически все освещение осуществляется с помощью «белых» светодиодов, содержащих «синий» [1] светодиодный

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме FEWG-2022-0002.

Литература

1. Матвеев, В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие для студ. Вузов / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. В.Я. Распопова; Гос. науч. центр РФ ОАО Концерн ЦНИИ «Электроприбор». – СПб, 2009. – 280 с.
2. Навигация летательных аппаратов в околосреднем пространстве / Л.И. Августов [и др.]; под ред. проф. Г.И. Джанжгавы. – М. : ООО «Научтехлитиздат», 2015. – 592 с.
3. Матвеев В.В. Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В.В. Матвеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 9 (2). – С. 251–267.
4. Матвеев, В.В. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС-датчиках: учеб. Пособие / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – 225 с.

кристалл и желтый люминофор для получения белого цвета. Именно «за изобретение эффективных синих светодиодов, которые позволили создать яркие и энергосберегающие источники белого света» т. е. фактически за то, какое влияние это оказало на общество, и были удостоены в 2014