

УДК 621.383

ББК 34.96

DOI 10.51955/23121327_2022_1_101

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

*Андрей Анатольевич Санько,
orcid.org/0000-0002-6287-2571,
кандидат технических наук, доцент,
Белорусская государственная академия авиации,
ул. Уборевича, 77
Минск, 220044, Республика Беларусь
tin.777.144@mail.ru*

*Алексей Алексеевич Шейников,
orcid.org/0000-0003-2725-6412,
кандидат технических наук,
Военная академия Республики Беларусь,
пр-т Независимости, 220
Минск, 220057, Республика Беларусь
af.varb.ao@yandex.ru*

*Гафур Шокирович Туганов,
orcid.org/0000-0001-7520-9579,
заместитель начальника кафедры авиационного оборудования
Высшего военного авиационного училища Республики Узбекистан,
ул. Амира Темура, 11
Чирчик, 702100, Республика Узбекистан
gafurtuganov8080@ru*

Аннотация. В статье представлены результаты исследований законов распределения выходных сигналов микроэлектромеханических датчиков, используемых для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты (БЛА) малой массы. В качестве объекта исследования был использован датчик GY-91 (датчик), выполненный по микроэлектромеханической технологии и имеющий инерциально-измерительный блок, состоящий из трех ортогонально расположенных: измерителя угловой скорости, акселерометра, магнитометра и одноканального барометра. Приводятся формулы аппроксимации среднеквадратических отклонений показаний перегрузки, угла тангажа и угловой скорости от различных условий испытаний. Полученные зависимости рекомендуется использовать при выполнении калибровки акселерометров и датчиков угловых скоростей. Даются рекомендации по использованию различных методов фильтрации в зависимости от законов распределения выходных параметров датчика. Рассматриваются различные фильтры, используемые для датчиков БИНС, такие как: фильтр Калмана, медианный фильтр, АВ-фильтр и комплементарный фильтр. Проведен сравнительный анализ алгоритмов фильтрации выходных сигналов микроэлектромеханических датчиков по значению коэффициента сигнал/шум для БЛА самолетного типа при различных оборотах его винта. Даются

рекомендации по использованию полученных результатов исследований для алгоритмического обеспечения навигационных систем БЛА малой массы.

Ключевые слова: датчики, гироскоп, акселерометр, погрешности, закон распределения.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DISTRIBUTION LAWS OF OUTPUT SIGNALS OF MICROELECTROMECHANICAL NAVIGATION SENSORS OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

*Andrei A. Sanko,
orcid.org/0000-0002-6287-2571,
candidate of technical sciences, associate professor
Belarusian State Aviation Academy,
77, Uborevich St.,
Minsk, 220044, Republic of Belarus
min.777.144@mail.ru*

*Aliaksey A. Sheynikov,
orcid.org/0000-0003-2725-6412,
candidate of technical sciences,
Military academy of the Republic of Belarus,
220, Independence Ave,
Minsk, 220057, Republic of Belarus
af.varb.ao@yandex.ru*

*Gafur Sh. Tuganov,
orcid.org/0000-0001-7520-9579,
deputy head of the aviation equipment
department of higher military aviation school of the Republic of Uzbekistan,
11, Amir Temur St.,
Chirchik, 702100, Republic of Uzbekistan
gafurtuganov8080@ru*

Abstract. The article presents the results of studies of distribution laws of output signals of microelectromechanical sensors used for platformless inertial navigation systems (INS) installed on lightweight unmanned aerial vehicles (UAV). As object of study, the GY-91 sensor was used which is made with the use of microelectromechanical technology and has an inertial measuring unit consisting of three elements located orthogonally: a turn meter, an accelerometer, a magnetometer and a single-channel barometer. Formulas for approximating the mean square deviations of overload, pitch angle and angular velocity indications for various test conditions are given. It is recommended to use the obtained dependences when calibrating accelerometers and angular velocity sensors. Recommendations on the use of different filtering methods depending on the distribution laws of the output parameters of the sensor are given. Various filters used for platformless INS sensors, such as the Kalman filter, the median filter, the AB filter and the complementary filter, are considered. A comparative analysis of algorithms for filtering the output signals of microelectromechanical sensors according to the value of signal-to-noise ratio for an aircraft-type UAV at different propeller speeds was performed. Recommendations are given on the use of the obtained research results for the algorithmic support of lightweight UAV navigation systems.

Key words: sensors, gyroscope, accelerometer, errors, distribution law.

Введение

Для БЛА малой массы широкое распространение получили БИНС на основе микроэлектромеханических (МЭМ) датчиков – акселерометров и гироскопов. Преимуществом таких датчиков перед традиционно применяемыми является то, что они имеют значительно меньшую массу, габариты, а также стоимость и энергопотребление. Однако МЭМ датчики обладают и существенными недостатками, связанными с высоким уровнем внутренних шумов [Maluf et al., 2006, p. 304]. Погрешности МЭМ датчиков разделяются на систематические и случайные [Малкин, 2012, с. 11-15; Shin, 2001, p. 137]. Систематические погрешности, как правило, оцениваются при калибровке и частично компенсируются в процессе функционирования системы [Syed, 2009, p. 230], так МЭМ датчики имеют разброс параметров при изготовлении до 3 % [Капля и др., 2018, с. 11-19; Иванов, 2007, с. 25-26].

Для снижения уровня случайных погрешностей МЭМ датчиков применяются различные алгоритмы фильтрации [Николаев и др., 2014, с. 95-105; Малкин, 2012, с. 11-15; Голубев и др., 2018, с. 98-103; Аванесов и др., 2013, с. 51-63]. Выбор типа и параметров алгоритма фильтрации является трудной задачей и зависит от знания априорной информации об интенсивности шума измерения и законов распределения случайных величин (выходных сигналов датчиков) на различных условиях эксплуатации БЛА [Малкин, 2012, с. 11-15].

Таким образом, целью данной работы является: анализ законов распределения выходных сигналов МЭМ датчиков БИНС при различных условиях эксплуатации БЛА малой массы; сравнительный анализ использования алгоритмов фильтрации сигналов от МЭМ датчиков и выработка рекомендаций для алгоритмического обеспечения навигационных систем БЛА.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи, в качестве инерциально-измерительного блока был использован датчик GY-91, имеющий в своем составе три ортогонально расположенных: измерителя угловой скорости, акселерометра, магнитометра и одноканального барометра. Выбор датчика GY-91 обусловлен его низкой стоимостью, масса-габаритными (размер 21x15 мм) и точностными характеристиками. Параметры датчика: диапазон регистрируемой перегрузки: ± 16 g, угловой скорости ± 1000 $^{\circ}/с$, измерение магнитного потока в диапазоне ± 4800 мкТл.

В качестве связанной системы координат блока чувствительных элементов БИНС выбрана правая ортогональная система координат *OXYZ*. Информацию, поступающую с GY-91 (рис. 1-2), обрабатывает микроконтроллер *dsPIC33EP256MU806*.



Рисунок 1 – Место установки датчика GY-91



Рисунок 2 – Испытательный стенд

Место установки датчика GY-91 на БЛА, было выбрано в районе его центра масс (рис. 1). Испытательный стенд (УПГ-56 и КПА-5) представлен на рис. 2. Стенд ориентируется относительно плоскостей горизонта и меридиана, может вращаться и разворачиваться на постоянные углы.

Анализ и результаты

На рис. 3-4, представлено значение перегрузки и функции ее плотности распределения по трем осям (угловая скорость – $\omega_x, \omega_y, \omega_z = 0$) и (тангаж – ϑ , крен – $\gamma \approx 0$). Как видно из рис. 3-4, закон распределения перегрузки может быть: Гамбеловским – $a, в$; Вейбуловским – $б$. Для анализа принадлежности генеральной совокупности заданному закону распределения использовался тест Колмогорова-Смирнова при критическом уровне значимости – $Kp = 0,05$ [Брандт, 1975, с. 312]. Параметры законов распределения величины перегрузки имеют вид:

$$F(N_x) = \sigma^{-1} e^{\left(\frac{N_x - \mu}{\sigma}\right)} e \left(e^{\left(\frac{N_x - \mu}{\sigma}\right)} \right),$$

где $\mu = \log A$ – параметр масштаба; $\sigma = 1/B$ – параметр формы функции. Для $N_x > 0$ – $A = 0,066$; $B = 0,0047$, для $N_z > 0$ – $A = 1,027$; $B = 0,005$.

$$F(N_y > 0) = B \cdot A^{-B} (N_y)^{B-1} e^{-\left(\frac{N_y}{A}\right)^B}, \text{ где } A = 0,03; B = 8,61.$$

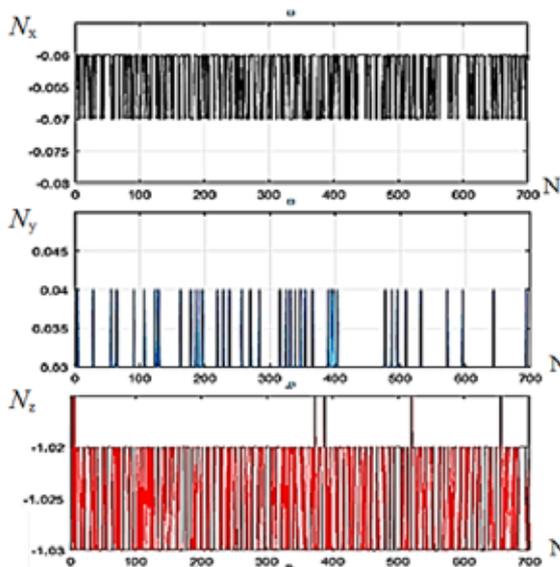


Рисунок 3 – Значения перегрузки по трем осям

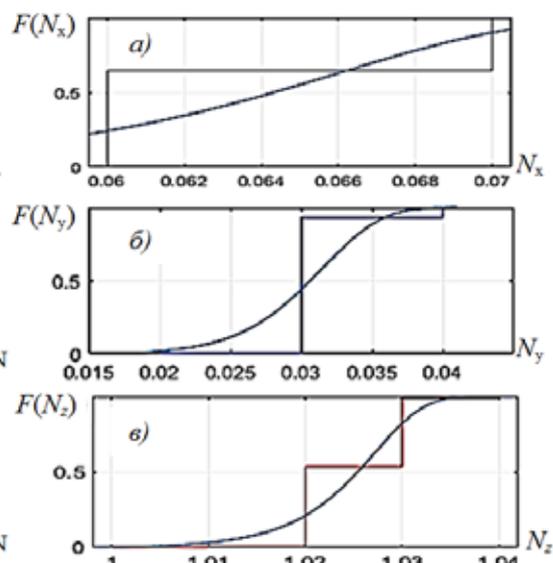


Рисунок 4 – Значение функции плотности распределения перегрузки по трем осям

На рис. 5 представлены гистограммы распределения значений перегрузки, направленной по нормали к поверхности Земли, при: (ω_x и $\omega_z = 0$, $\omega_y \neq 0$, $\gamma \approx 85^\circ$ и $0 < \vartheta < 4^\circ$), (в процессе измерения углы ориентации акселерометра изменялись на величину, близкую к 90° [Капля и др., 2018, с. 11-19]). Из рис. 5 видно, что по мере увеличения угловой скорости объекта ($\omega_y > 1\%$ от $\omega_y^{max} = 250^\circ/\text{с}$) закон распределения значений перегрузки N_y становится близким к нормальному.

На рис. 6, а представлена экспериментальным путем полученная зависимость среднеквадратического отклонения (СКО) вычисленного значения перегрузки N_y от угловой скорости – $\delta_{\text{ош}}$, которую можно описать полиномом 3-й степени:

$$\sigma_{N_y} = 2e-05 \omega_y^3 - 0,0027 \omega_y^2 + 0,1613 \omega_y + 4,1565. \quad (1)$$

Значение СКО – $\sigma_{N_y} \approx$ от 0,42 до 15 % и имеет предсказуемую математическую зависимость (1), которую можно использовать при осуществлении фильтрации (или калибровки) значений перегрузки, направленной по нормали к поверхности земли.

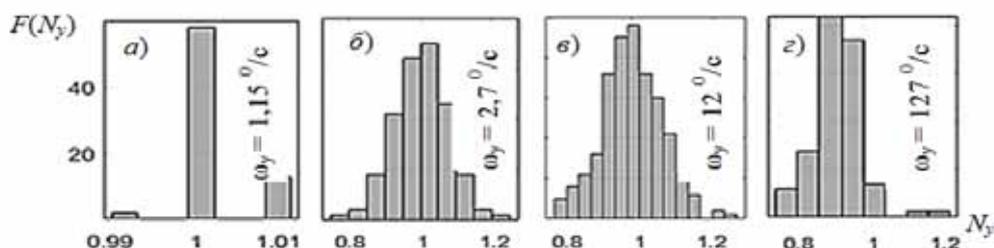


Рисунок 5 – Гистограмма значений вертикальной перегрузки, при $\omega_y \neq 0$:
а – вейбуловское; б, в, г – нормальное распределение

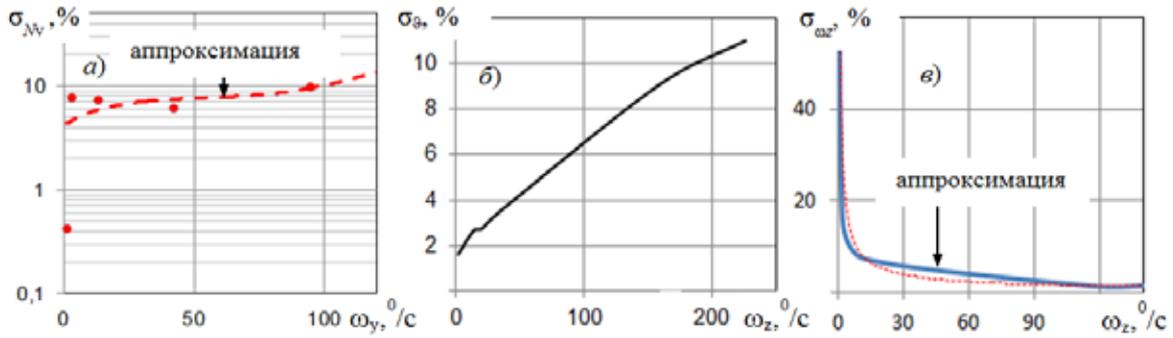


Рисунок 6 – Зависимости: а – $\sigma_{Ny} = f(\delta_{ош})$; б – $\sigma_{\vartheta} = f(\delta_{ош})$; в – $\sigma_{\delta_{ош}} = f(\delta_{ош})$

СКО перегрузок ($\sigma_{Nx} = f(\omega_y)$ или $\sigma_{Nz} = f(\omega_y)$), отличные от линии нормали к поверхности земли, изменяются в широких пределах от 8 до 230 %, что вызывает трудности при их математическом описании. Полученный результат можно объяснить воздействием множества случайных факторов на чувствительный элемент датчика, таких как: дрейф нуля, погрешности АЦП, инструментальные погрешности измерений, погрешности, обусловленные внешними возмущениями и т.д.

Проведенный факторный эксперимент показал, что:

1) Значение σ_{ϑ} (см. рис. 6, б) имеет сильную (коэффициент детерминации $R^2 = 0.99$) нелинейную зависимость от угловой скорости вращения носителя:

$$\sigma_{\vartheta} = -8e-05\omega_z^2 + 0,0594 \omega_z + 1,6332. \quad (2)$$

2) Значение $\sigma_{\delta_{ош}}$ с увеличением $\delta_{ош}$ изменяется по экспоненциальному закону (см. рис.6, в). Для параметров $\sigma_{\delta_{ош}}$ и $\sigma_{\delta_{ошy}}$ тип зависимости аналогичен, отличия только в значениях коэффициента R^2 из-за инструментальных погрешностей проведения измерений, коэффициента масштабирования датчика по оси измерения и т.д.:

$$\sigma_{\omega_z} = 47,2\omega_z^{0,738}. \quad (3)$$

На рис. 7 представлены гистограммы и графики функций плотности распределения значений угла ϑ , при: ($\omega_z \neq 0$, $\vartheta \approx 45^\circ$ и $0 < \gamma < 4^\circ$). Как видно из рис. 7, закон распределения значений угла ϑ при $\omega_z \approx 0$, имеет логнормальное распределение.

По мере увеличения угловой скорости носителя ($\omega_z > 1\%$ от $\omega_z^{max} = 250^\circ/c$), закон распределения значений угла ϑ становится близкий к нормальному. Значение углов вычислялось как:

$$\gamma_N = \text{atan}\left(N_y / \sqrt{N_x^2 + N_z^2}\right) \frac{180}{\pi}, \quad \vartheta_N = \text{atan}\left(-N_x / \sqrt{N_y^2 + N_z^2}\right) \frac{180}{\pi}.$$

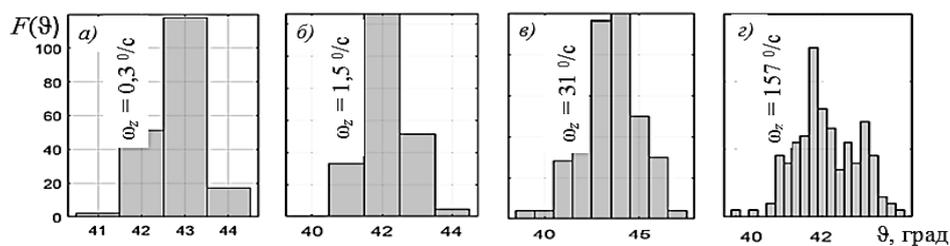


Рисунок 7 – Гистограмма значений угла ϑ , при $\omega_z \neq 0$:
 а – логнормальное; б, в, г – нормальное распределение

На рис. 8 представлены гистограммы плотности распределения значений угловой скорости носителя при $\omega_z \neq 0$, $\vartheta \approx 0$ и $\gamma \approx 0$.

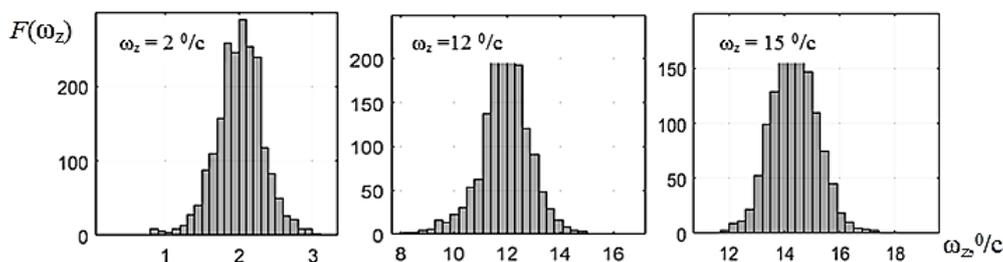


Рисунок 8 – Гистограммы значений плотности распределения угловой скорости ω_z

Как видно из рис. 8, распределение случайной составляющей угловой скорости БЛА при $\omega_z \neq 0$, в отличие от перегрузки и угла ориентации, подчиняется нормальному закону распределения.

На рис. 9-14 представлены результаты экспериментальных исследований законов распределения сигналов, получаемых от датчиков ускорений, при: (ω_x , ω_y , $\omega_z = 0$, ϑ , $\gamma \approx 0$ и изменении оборотов винта БЛА – n [%]) (рис. 9-10).

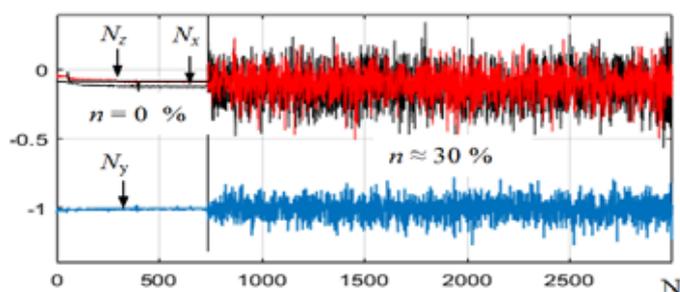


Рисунок 9 – Значения перегрузки по трем осям при различных оборотах винта БЛА

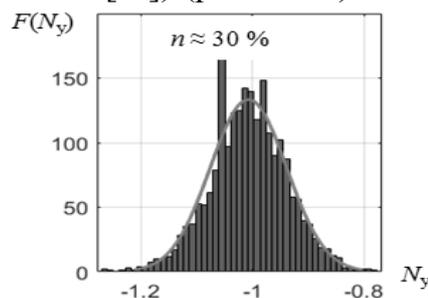


Рисунок 10 – Значение функции плотности распределения N_y

В качестве объекта исследования был выбран БЛА самолетного типа (рис. 1) массой 4 кг и тягой винта 6 кг. Способ взлета через катапульту в ручном режиме. По критерию согласия Колмогорова лучше всего подходит для:

- перегрузки N_y (рис.10) гамма – распределение, $Kp = 0,00147$. Для N_x и N_z аналогично;
- угла ϑ (рис. 11-12): при $n = 0\%$ – логнормальное распределение,

$Kp = 0,03194$; при $n = 10\%$ – нормальное распределение, $Kp = 0,12513$; при $n = (30\% \text{ и } 50\%)$ – рэлеевское распределение, $Kp = 0,110$ и $0,135$ соответственно.

Параметры случайного процесса (рис. 11): при $n \approx 50\%$ – $m_{\vartheta} = -12,42$ град, $\sigma_{\vartheta} = 9,3$ град, что составляет, примерно 75% от полезного сигнала; при $n = 30\%$ – $m_{\vartheta} = -15,12$ град, $\sigma_{\vartheta} = 6,41$ град, что составляет примерно 40% от полезного сигнала, $n \approx 10\%$ – $m_{\vartheta} = -14,9$ град, $\sigma_{\vartheta} = 0,718$ град, что составляет примерно $0,65\%$ от полезного сигнала; при $n = 0\%$ – $m_{\vartheta} = -14,9$ град, $\sigma_{\vartheta} = 0,2$ град, что составляет примерно $0,14\%$ от полезного сигнала.

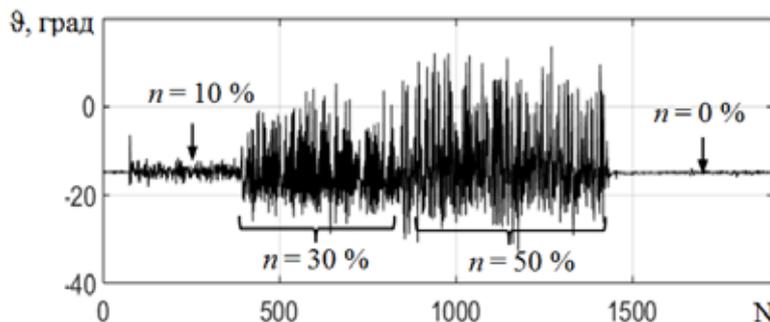


Рисунок 11 – Значения тангажа при различных оборотах винта БЛА

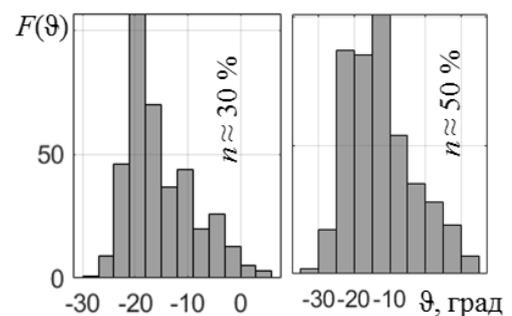


Рисунок 12 – Значение функции плотности распределения угла ϑ

Таким образом, работа двигательной-винтовой группы БЛА (обуславливающая вибрацию его корпуса) вносит существенный вклад в ошибки датчиков ускорений; закон распределения значения угла ϑ при $n > 30\%$ и не подчиняется нормальному. Данный факт необходимо учитывать при выборе алгоритма фильтрации значений углов ориентации БЛА.

В настоящее время для фильтрации информации, поступающей от датчиков БЛА, получили широкое применение такие фильтры, как: комплементарный фильтр, фильтр Калмана, медианный фильтр и АВ-фильтр [Малкин, 2012, с. 11-15]. Для проведения сравнительного анализа алгоритмов фильтрации по значению коэффициента сигнал/шум для БЛА самолетного типа при условии распределения случайной величины (угол ϑ) различным законам распределения был проведен натурный эксперимент.

Исходные данные для АВ-фильтра и фильтра Калмана: значения случайного шума по углу $\vartheta - \sigma_{\text{шум}} = 0,3' - 0,15$ град [Мелешко, 2011, с. 171] и СКО – σ_{ϑ}^k : 2, 4 и 8 град. Результаты натурального эксперимента представлены на рис. 13-14.

Для комплементарного фильтра итоговая величина угла представляет собой сумму интегрированного значения гироскопа и мгновенного значения акселерометра:

$$\vartheta_{\text{дус}}(t) = \vartheta_{\text{дус}}(t-1) + \omega_z(t)dt; \quad \vartheta(t) = \vartheta_{\text{дус}}(t-1)(1 - F_k) + F_k \vartheta_N(t),$$

где ω_z – значения угловой скорости; $F_k = 0,7$ – коэффициент комплементарного фильтра (может принимать значение в диапазоне от $0,7$ до $0,1$) [Зинова, 2018,

с. 1-13]. Следует отметить, что данный фильтр имеет ряд достоинств: независимость работы от величины σ_{ϑ}^k и простота реализации алгоритма.

Медианный фильтр находит среднее значение, но не усредняя, а выбирая его из представленных. Для решения поставленной задачи использовался медианный фильтр 3-го порядка.

АВ-фильтр тесно связан с фильтрами Калмана и линейными наблюдателями состояний, используемыми в теории управления. Его основным преимуществом является то, что он не требует модели системы [Коновалов, 2014, с. 180]. Значения *альфа* и *бета* коэффициентов вычислялись, как:

$$\lambda = \frac{\sigma_{\vartheta}^k t^2}{\sigma_{\text{шум}}}; r = \frac{(4 + \lambda - \sqrt{8\lambda + \lambda^2})}{4}; \alpha = 1 - r^2; \beta = 2(2 - \alpha) - 4\sqrt{1 - \alpha},$$

где λ – коэффициент усиления фильтра; r – значение градиента фильтра; $\alpha=0,025$; $\beta=0,003$ ($\sigma_{\vartheta}^k = 2$ град, $\sigma_{\text{шум}} = 0,15$ град) – *альфа* и *бета* коэффициенты.

Параметры фильтра вычислялись из интервала выборки $t = 0,005$ с. Такой выбор параметров минимизирует среднюю квадратическую погрешность [Blair, 1992, р. 68; Gray, 1993, pp. 1064-1065].

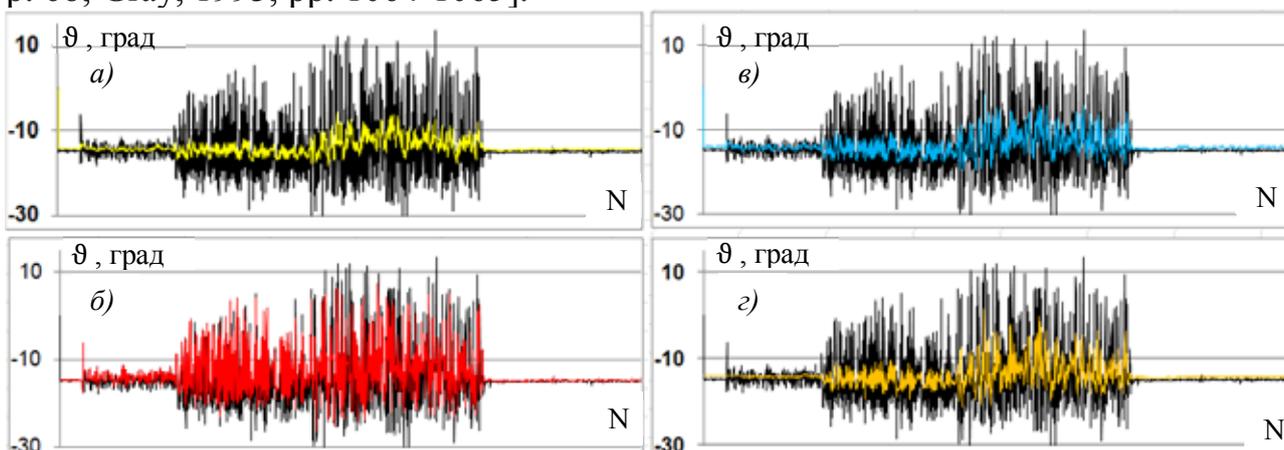


Рисунок 13 – Значения сигналов угла тангажа при различных оборотах винта БЛА и используемых методов фильтрации:

а – комплементарный фильтр; *б* – медианный фильтр 3-го порядка; *в* – АВ-фильтр (при $\sigma_{\text{шум}} = 0,15$ град и $\sigma_{\vartheta} = 4$ град); *г* – фильтр Калмана (при $\sigma_{\text{шум}} = 0,15$ град и $\sigma_{\vartheta} = 4$ град)

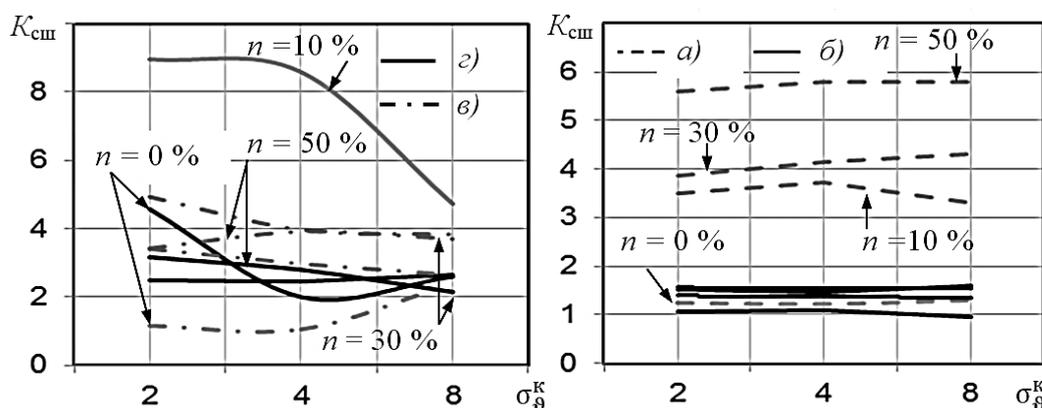


Рисунок 14 – Значения коэффициента сигнал/шум при различных оборотах винта БЛА и используемых методов фильтрации значений угла ϑ :

а – комплементарный фильтр; *б* – медианный фильтр 3-го порядка; *в* – АВ-фильтр; *г* – фильтр Калмана

Анализ зависимостей коэффициента сигнал/шум – $K_{сш}$ при различных оборотах винта БЛА (рис. 14) показал, что:

Комплементарный фильтр (рис.14, а). В режиме начальной выставки углов ориентации ($n = 0...10$ %) фильтр показал результат примерно в 4 раза хуже, чем при использовании фильтра Калмана. При $n \approx 50$ % значение коэффициента $K_{сш}$ возрастает и примерно в 3 раза выше, чем при использовании фильтра Калмана и АВ-фильтра.

Медианный фильтр 3-го порядка (рис. 14, б) работает хуже рассмотренных фильтров ($K_{сш} \approx 1,3$) независимо от режимов работы винта.

АВ-фильтр (рис.14, в). В режиме начальной выставки углов ориентации (при логнормальном распределении угла ϑ) значение $K_{сш}$ примерно в 4 раза меньше, чем при использовании фильтра Калмана. С ростом оборотов винта ($n > 10$ %) значение коэффициента $K_{сш}$ примерно на 15-20 % выше, чем при использовании фильтра Калмана, но меньше по отношению $K_{сш}$ при использовании комплементарного фильтра.

Фильтр Калмана (рис.14, г). В режиме начальной выставки углов ориентации (при логнормальном распределении сигнала угла ϑ) показывает лучшие результаты по отношению к рассмотренным фильтрам с учетом выбора соответствующего значения σ_{ϑ}^k . С ростом оборотов винта $n > 10$ % происходит снижение значения коэффициента $K_{сш}$ в 2-2,5 раза независимо от σ_{ϑ}^k . Это приводит к проигрышу по отношению использования комплементарного фильтра.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование законов распределения выходных сигналов МЭМ датчиков, используемых на БЛА малой массы самолетного типа. Получены математические зависимости СКО вертикальной перегрузки и СКО угла тангажа и крена от угловой скорости БЛА (1-3). Для фильтрации значений углов ориентации БЛА в режиме начальной выставки самым лучшим (по значению коэффициента сигнал/шум) является фильтр Калмана, при оборотах винта более 10 % – комплементарный фильтр.

Полученные результаты рекомендуется использовать для алгоритмического обеспечения навигационных систем БЛА.

Библиографический список

- Аванесов Г. А.* Вопросы применения микромеханических гироскопов для космических проектов / Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, С. А. Дятлов, А. Н. Куркина, В. В. Сазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 51-63.
- Брандт З.* Статистические методы анализа наблюдений / под ред. В. Ф. Писаренко. М.: Мир, 1975. 312 с.
- Голубев В. Д.* Фильтрация случайных помех выходного сигнала для земановских лазерных гироскопов в процессе технологических испытаний / В. Д. Голубев, А. О. Синельников // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 5. С. 98-103.
- Зинова В. В.* Синтез и исследование алгоритмов фильтрации, применяемых на этапе вторичной обработки радиолокационной информации // Политехнический молодежный журнал. МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2018. № 8. С. 1-13.

- Иванов Ю. В.* Исследование статистических характеристик микромеханических датчиков инерциального модуля // Датчики и системы. 2007. № 1. С. 25-26.
- Капля В. И.* Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений различной ориентацией / В. И. Капля, И. В. Савицкий, Д. А. Мاستиков // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. [Электронный ресурс] – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4963; (дата обращения: 10.10.21).
- Коновалов А. А.* Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. Ч. 2. 180 с.
- Малкин В. А.* Адаптивные фильтры сглаживания сигналов датчиков в системах микроавионики // Приборы и методы измерений. 2012. № 1 (4). С. 11-15.
- Мелешко В. В.* Бесплатформенные инерциальные навигационные системы: учебное пособие. Кировоград: ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. 171 с.
- Николаев С. Г.* Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок / С. Г. Николаев, Ю. В. Ившина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 4. С. 95-105.
- Blair W. D.* Fixed-gain two-stage estimators for tracking maneuvering targets. Naval Surface Warfare Center, 1992. 68 p.
- Gray J. E., Murray W. J.* A derivation of an analytic expression for the tracking index for the alpha-beta-gamma filter. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. № 29. 1993. P. 1064-1065.
- Maluf N., Williams K.* An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. ARTECH HOUSE, INC, 2006. 304 p.
- Shin E. H.* Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications: PHD Thesis. Calgary, Canada: The University of Calgary, 2001. 137 p.
- Syed Z.* Design and implementation issues of a portable navigation system: PHD Thesis. Calgary, Canada: The University of Calgary, 2009. 230 p.

References

- Avanesov G. A., Bessonov R. V., Dyatlov S. A., Kurkina A. N., Sazonov V. V.* (2013). Application of micromechanical gyroscopes for space projects. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. Т. 10. 4: 51-63. (In Russian).
- Blair W. D.* (1992). Fixed-gain two-stage estimators for tracking maneuvering targets. Naval Surface Warfare Center. 68 p.
- Brandt Z., Pisarenko V. F* (eds) (1975). Statistical methods of analysis of observations. Moscow: Mir. 312 p. (In Russian).
- Golubev V. D., Sinelnikov A. O.* (2018). Filtration of random noise in the output signal for Zeman laser gyroscopes in the process of technological tests. *Bulletin of TulSU. Technical science*. 5: 98-103. (In Russian).
- Gray J. E., Murray W. J.* (1993). A derivation of an analytic expression for the tracking index for the alpha-beta-gamma filter. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 29: 1064-1065.
- Ivanov Yu. V.* (2007). Investigation of the statistical characteristics of micromechanical sensors of the inertial module. *Sensors and Systems*. 1: 25-26. (In Russian).
- Kaplya V. I., Savitsky I. V., Mastikov D. A.* (2018). Calibration of a triaxial accelerometer according to a number of measurements with different orientations. *Electronic scientific journal Engineering Bulletin of the Don*. 2. [Electronic source] – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4963; (accessed: 10.10.21). (In Russian).
- Konovalev A. A.* (2014). Fundamentals of trajectory processing of radar information: in 2 hours. St. Petersburg: Publishing house of ETU "LETI", Part 2. 180 p. (In Russian).
- Malkin V. A.* (2012). Adaptive filters for smoothing sensor signals in microavionics systems. *Instruments and measurement methods*. 1 (4): 11-15. (In Russian).
- Maluf N., Williams K.* (2006). An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering. ARTECH HOUSE. 304 p.

- Meleshko V., Nesterenko O.* (2011). Strapdown inertial navigation systems. Tutorial. Kirovograd. POLYMED – Service. 171 p. (In Russian).
- Nikolayev S. G., Ivshina Y. U.* (2014). Calibration of strapdown inertial navigation systems using output signals of error model. *St. Petersburg Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Sys.* 4: 95-105. (In Russian).
- Shin E. H.* (2001). Accuracy improvement of low cost INS/GPS for land applications: PHD Thesis. Calgary, Canada: The University of Calgary. 137 p.
- Syed Z.* (2009). Design and implementation issues of a portable navigation system: PHD Thesis. Calgary, Canada: The University of Calgary. 230 p.
- Zinova V. V.* (2018). Synthesis and research of filtering algorithms used at the stage of secondary processing of radar information. *Polytechnic Youth Journal.* MSTU them. N. E. Bauman. 8: 1-13. (In Russian).