

Компактные блоки чувствительных элементов БЧЭ200 и БЧЭ400 на базе ВОГ с применением МЭМС-акселерометров: разработка и исследование характеристик

Ю.Н. Коркишко, В.А. Федоров, С.В. Прилуцкий, Д.В. Обухович, В.Е. Прилуцкий, В.Г. Пономарев, И.В. Федоров, А.И. Зуев, В.К. Варнаков, С.М. Кострицкий, И.В. Морев
ООО НПК «Оптолинк», Москва, Россия, opto@optolink.ru

Аннотация—В настоящее время интерферометрические волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) широко используются в бесплатформенных ИНС, и в широком спектре приложений заменили своего основного конкурента и предшественника - кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ). Чтобы охватить новый спектр перспективных приложений с потребностью в недорогих и компактных, но точных инерциальных датчиках, в НПК «Оптолинк» были разработаны новые продукты: компактные инерциальные измерительные блоки БЧЭ200 и БЧЭ400. Целью данной работы была разработка пилотных устройств БЧЭ200 и оценка характеристик БЧЭ200 и БЧЭ400 с помощью прямых измерений, а также с помощью методов моделирования БИНС. Габаритно-массовые характеристики (ГМХ) БЧЭ200: $75 \times 75 \times 60$ мм, $< 0,5$ кг, $1/3$ л, ≤ 6 Вт. Основные параметры гироскопов и акселерометров БЧЭ200: случайное блуждание угла (ARW) = $0,015^\circ/\sqrt{\text{час}}$, нестабильность нуля (НН) = $0,02^\circ/\text{час}$; случайное блуждание скорости (VRW) = $40 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$, НН = 6 мкг . Для БЧЭ400, разработанного до БЧЭ200, ГМХ следующие: $80 \times 95 \times 62$ мм, $< 0,7$ кг, $1/2$ л, ≤ 7 Вт. Основные точностные параметры БЧЭ400: случайное блуждание угла = $0,007^\circ/\sqrt{\text{час}}$, НН = $0,01^\circ/\text{час}$; случайное блуждание скорости = $40 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$, НН = 6 мкг . Ожидаемые точности БИНС (макс): для БЧЭ200 точность определения курса $0,4^\circ \times \text{сек}(\varphi)$, для БЧЭ400 $\sim 0,2^\circ \times \text{сек}(\varphi)$ (1 σ , 10 минут).

Ключевые слова—волоконно-оптический гироскоп, блок чувствительных элементов, компактный, инерциальный измерительный блок, МЭМС-акселерометр, миниатюрный.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в бесплатформенных инерциальных навигационных системах (БИНС) широко используются интерферометрические волоконно-оптические гироскопы (ВОГ). В замкнутой конфигурации ВОГ обратная связь (ОС) поддерживает нулевой сигнал, компенсируя фазовый сдвиг Саньяка дополнительным встречным сдвигом, это значение сдвига используется для быстрого расчета угловой скорости [1–4]. Благодаря присущему низкому уровню случайного шума и масштабируемости технология ВОГ является уникальной, способной удовлетворить требования приложений, требующих высоких точностей в сочетании с низкой стоимостью и малыми габаритно-массовыми характеристиками (ГМХ) [1, 4].

В НПК «Оптолинк» разработаны и выпускаются одноосные ВОГ ОИУС5000, ОИУС 2000, ОИУС1000, ОИУС501 и ОИУС 200 с различной длиной и диаметром волоконных катушек, а также трехосные ВОГ ТИУС500 и блоки чувствительных элементов (БЧЭ) БЧЭ400С,

БЧЭ500, БЧЭ501, БЧЭ1000 [5] и БЧЭ5000 [6] на основе трех каналов ВОГ и трех прецизионных кварцевых маятниковых акселерометров. Выпускаются космические трехосные гироскопы ВОБИС, данные приборы успешно работают на спутниках ГСО [7].

II. КОНСТРУКЦИЯ И СХЕМА БЧЭ200 И БЧЭ400

Последними разработками НПК «Оптолинк» являются компактные инерциальные измерительные блоки БЧЭ200 и БЧЭ400. Целью настоящей работы была разработка пилотных устройств БЧЭ200 и оценка характеристик БЧЭ200 и БЧЭ400 с помощью прямых измерений, а также с помощью моделирования работы БИНС – косвенного, но репрезентативного способа оценки характеристик БЧЭ.

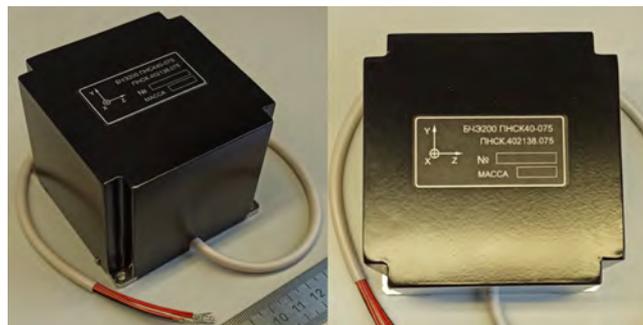


Рис. 1. Внешний вид БЧЭ200

ГМХ БЧЭ200 (рис. 1): $75 \times 75 \times 60$ мм, $< 0,5$ кг, $1/3$ л, ≤ 6 Вт. В БЧЭ традиционная круглая форма катушек, а его корпус полностью изготовлен из магнитомягкого материала. ВОГ реализуются от одного источника света. Для уменьшения размера кварцевые маятниковые акселерометры заменены на МЭМС, БЧЭ имеет два 3-осевых МЭМС акселерометра (АКС), всего 6 каналов. Ускорение по каждой оси определяет из 2 низкошумных сигналов, и хотя температурная компенсация масштабных коэффициентов и смещений выполняется как единое целое, поправки на рассогласование выполняются отдельно для каждой из 2 триад перед совместной обработкой. Данная обработка сигналов в каждом канале позволяет взаимно компенсировать нестабильности дрейфов и масштабных коэффициентов, а также температурные зависимости, при этом разнесения центров масс каналов не превышают 5 мм.

ГМХ БЧЭ400 (рис. 2): $80 \times 95 \times 62$ мм, $< 0,7$ кг, $1/2$ л, ≤ 7 Вт. Схема ВОГ работает от единого источника света, форма катушек прямоугольная со скругленными углами.

Для обоих приборов БЧЭ200 и БЧЭ400 доступны версии ТИУС, без акселерометров в составе прибора.



Рис. 2. Внешний вид БЧЭ400

БЧЭ400 имеет в составе 3 физических триады МЭМС-акселерометров, с 6 низкошумными (и составляющими 2 рабочие триады) и 3 менее точными каналами ускорения, пренебрегаемыми. Значение ускорения по каждой оси в результате обработки образуются из 2 сигналов от разных физических триад. Разнесения центров масс каналов не превышает 10 мм.

III. ХАРАКТЕРИСТИКИ БЧЭ

Пилотные БЧЭ200 имеют характеристики: ВОГ – ARW 0,015 $^{\circ}/\sqrt{\text{час}}$, нестабильность нуля (НН) 0,02 $^{\circ}/\text{час}$, нестабильность от запуска к запуску 0,03 $^{\circ}/\text{час}$, ошибка МК 100 ppm; Каналы акселерометров аналогичны БЧЭ400, характеристики указаны ниже.

Характеристики серийных БЧЭ400 (более 100 приборов поставлено): ВОГ – ARW 0,007 $^{\circ}/\sqrt{\text{час}}$, НН 0,01 $^{\circ}/\text{час}$, от запуска к запуску 0,02 $^{\circ}/\text{час}$, ошибка МК 100 ppm; Акселерометры – VRW 40 мкг/ $\sqrt{\text{Гц}}$, НН 6 мкг, от запуска к запуску 20 мкг, ошибка МК 150 ppm.

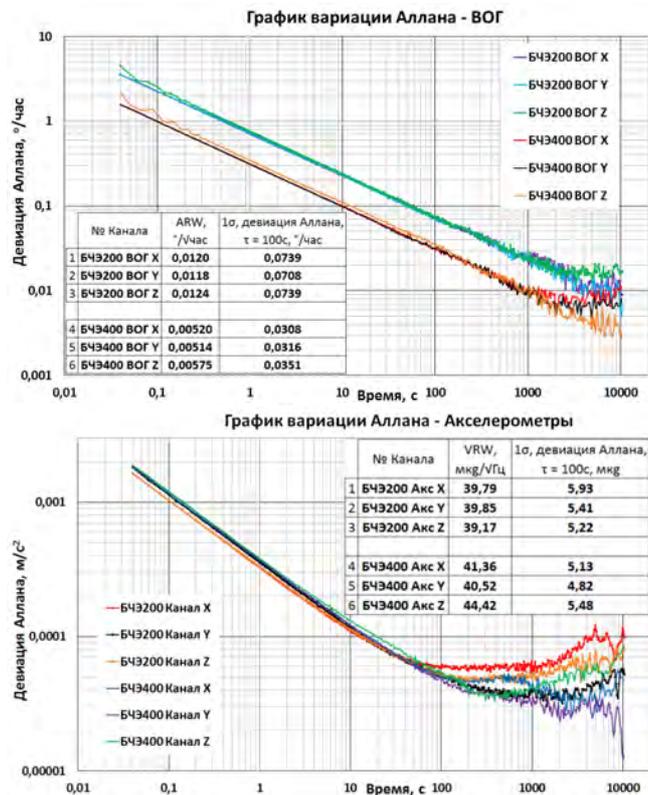


Рис. 3. Графики вариации Аллана для БЧЭ200 и БЧЭ400

Графики вариации Аллана пилотных БЧЭ200 и серийных БЧЭ400 показаны на рис. 3. БЧЭ400 имеет по ВОГ уровень шума (ARW) в 2 раза меньше, чем БЧЭ200, результаты для акселерометра не отличаются из-за идентичных каналов и используемой схемы. Температурные дрейфы нулей каналов ВОГ и акселерометров БЧЭ200 показаны на рис. 4. Графики по ВОГ для БЧЭ400 показаны на рис. 5. Благодаря традиционной конструкции волоконной катушки БЧЭ200 обладает более стабильным температурным профилем смещения нуля ВОГ и зависимостями масштабного коэффициента, по сравнению с БЧЭ400. Графики дрейфов ВОГ, показанные на рис. 4, показывают, что БЧЭ200 может успешно соответствовать стандартным результатам БЧЭ400 [9] с СКО < 0,1 $^{\circ}/\text{час}$ в рабочем диапазоне температур. Лучшие катушки БЧЭ400 дают результаты СКО < 0,04 $^{\circ}/\text{час}$.

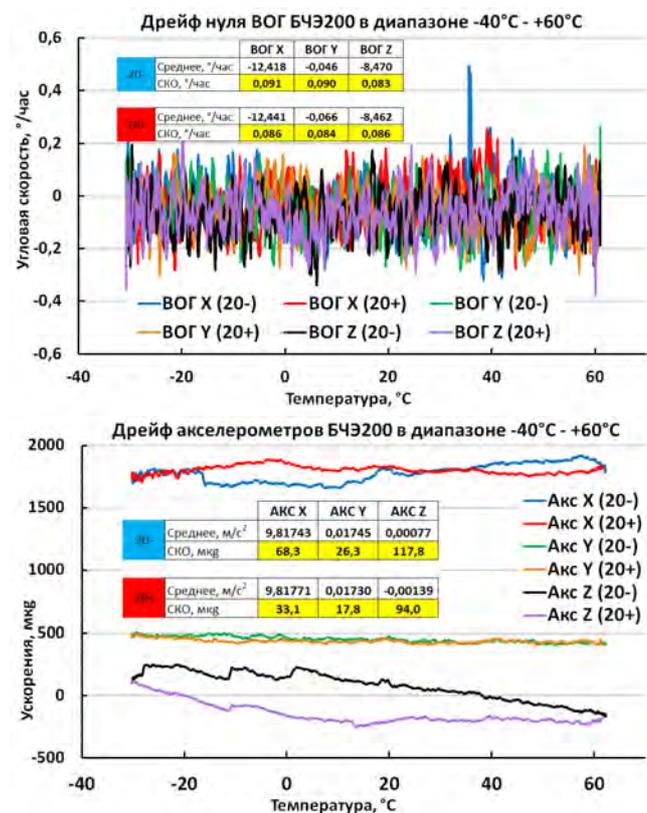


Рис. 4. Графики дрейфов нулей ВОГ и АКС БЧЭ200 в диапазоне температур -40 $^{\circ}\text{C}$ – +60 $^{\circ}\text{C}$ с постоянной скоростью изменения температур +20 $^{\circ}\text{C}/\text{час}$ (20+) и -20 $^{\circ}\text{C}/\text{час}$ (20-). Абс. значения смещены

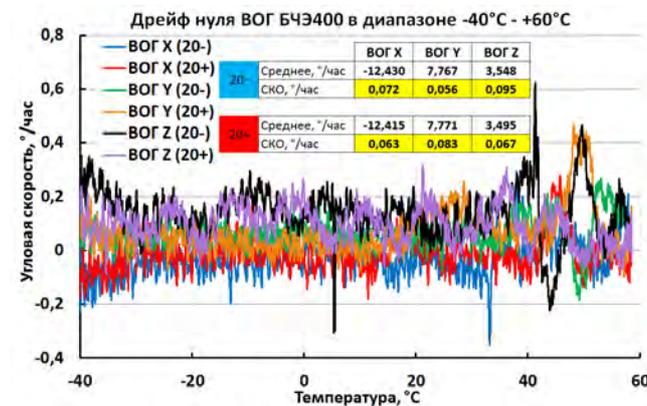


Рис. 5. Графики дрейфов нулей ВОГ БЧЭ400 в диапазоне температур 40 $^{\circ}\text{C}$ – +60 $^{\circ}\text{C}$ с постоянной скоростью изменения температуры +20 $^{\circ}\text{C}/\text{час}$ (20+) и -20 $^{\circ}\text{C}/\text{час}$ (20-). Абсолютные значения смещены

Для удобства читателя, данные температурных испытаний представлены на графике в единой шкале величин. Для этого, показания ВОГ и АКС были смещены на константы: -12,4, 0, -8,4 °/час для ВОГ X,Y,Z соответственно, и 9,8, 0,013 м/с² для АКС X,Y на рис.4; -12,4, 7,7, 3,4°/час для гироскопов X,Y,Z на рис.5. Несмещенные данные средних значений/СКО поканально представлены на вставках на рис. 4, 5.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ БИНС

В НПК «Оптолинк» БИНС проходят испытания для подтверждения уровней точности [8]. Ключевой параметр БИНС – точность начальной выставки гироскомпасированием. Каждая БИНС несколько раз проходит серию тестов, на 4-х и более румбах. Данный тест в дополнение к шумовой составляющей датчика (СКО рыскания по отношению к его среднему значению) показывает средние ошибки курса для каждого направления. Данные ошибки в основном вызваны систематиками ВОГ и их стабильностью во времени [9].

Точностные характеристики БЧЭ при прецизионной калибровке проверяются с использованием того же подхода, при помощи программного обеспечения для моделирования работы БИНС. Статистика выставок показывает СКО по курсу 0,5° для БЧЭ200 и 0,3° для БЧЭ400 (широта φ=56°с.ш., рис. 6 и 7 соответственно). Минимально достижимое обусловленное шумом СКО по курсу - 0,2°×sec(φ) для БЧЭ200, 0,1°×sec(φ) для БЧЭ400.

| Курс, ° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Среднее курса, ° | Дисперсия ошибки | СКО ошибки курса, ° |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|------------------|---------------------|
| 0 | -0,374 | 0,300 | 0,279 | 0,388 | 0,077 | 0,108 | 0,1296 | 0,0793 | 0,282 |
| 90 | 89,315 | 89,669 | 89,358 | 90,038 | 89,444 | 89,343 | 89,5277 | 0,2889 | 0,537 |
| 180 | 179,961 | 179,503 | 180,123 | 179,465 | 179,766 | 179,861 | 179,7797 | 0,1042 | 0,323 |
| 270 | 270,489 | 271,323 | 270,342 | 270,973 | 270,405 | 270,703 | 270,7061 | 0,6189 | 0,787 |
| 0 | 0,834 | 0,481 | 0,181 | 0,006 | -0,226 | 0,731 | 0,2560 | 0,1957 | 0,442 |

| Смещ. нуля, °/час | | | Общее СКО | |
|-------------------|--------|--------|-----------|-----------|
| X | Y | Z | Среднее | Общее СКО |
| тест1 | -0,071 | -0,026 | -0,052 | 0,3019 |
| тест2 | -0,029 | -0,036 | -0,047 | 0,549 |

| Румб | | | | | Среднее |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0° | 90° | 180° | 270° | 0° | |
| СКО (отн. среднего), ° | 0,274 | 0,281 | 0,258 | 0,380 | 0,316 |

Рис. 6. Статистика нач.выставок БЧЭ200 (гироскомпасирование 10мин.), 4 румба. Общее СКО = 0,549° (широта Москвы 55.97°). Обусловленная шумом ошибка 0,316°~ 0,2°×sec(φ). Указаны ошибки систематики ВОГ

| Курс, ° | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Среднее курса, ° | Дисперсия ошибки | СКО ошибки курса, ° |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------|------------------|---------------------|
| 0 | 0,195 | 0,034 | 0,380 | 0,002 | 0,098 | 0,279 | 0,1647 | 0,0452 | 0,212 |
| 90 | 90,339 | 90,513 | 90,541 | 90,276 | 90,051 | 90,398 | 90,3531 | 0,1514 | 0,389 |
| 180 | 179,857 | 179,605 | 179,770 | 179,926 | 179,778 | 179,731 | 179,7779 | 0,0594 | 0,244 |
| 270 | 269,555 | 269,798 | 269,531 | 269,476 | 269,569 | 269,804 | 269,6221 | 0,1597 | 0,400 |
| 0 | 0,011 | -0,192 | -0,278 | -0,023 | 0,145 | 0,115 | -0,0226 | 0,0211 | 0,145 |

| Смещ. нуля, °/час | | | Общее СКО | |
|-------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| X | Y | Z | Среднее | Общее СКО |
| тест1 | 0,028 | 0,054 | -0,019 | 0,0979 |
| тест2 | 0,036 | 0,040 | 0,008 | 0,313 |

| Румб | | | | | Среднее |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 0° | 90° | 180° | 270° | 0° | |
| СКО (отн. среднего), ° | 0,147 | 0,179 | 0,110 | 0,142 | 0,153 |

Рис. 7. Статистика нач.выставок БЧЭ400 (гироскомпасирование 10мин.), 4 румба. Общее СКО = 0,313° (широта Москвы 55.97°). Обусловленная шумом ошибка 0,146°~ 0,1°×sec(φ). Указаны ошибки систематики ВОГ

Изменение систематики ВОГ от теста к тесту составило 0,043 °/час и 0,027 °/час для БЧЭ200 и БЧЭ400, соответственно.

После точного учета систематики ВОГ, БЧЭ200 в тесте на 4 румбах демонстрирует дрейф координат 8 морских миль за 5 часов в инерциальном некорректируемом режиме, при 30-минутной выставке гироскомпасированием (рис. 8, 9). Восточная и северная ошибки по скорости достигают 2,7 м/с и 5 м/с.

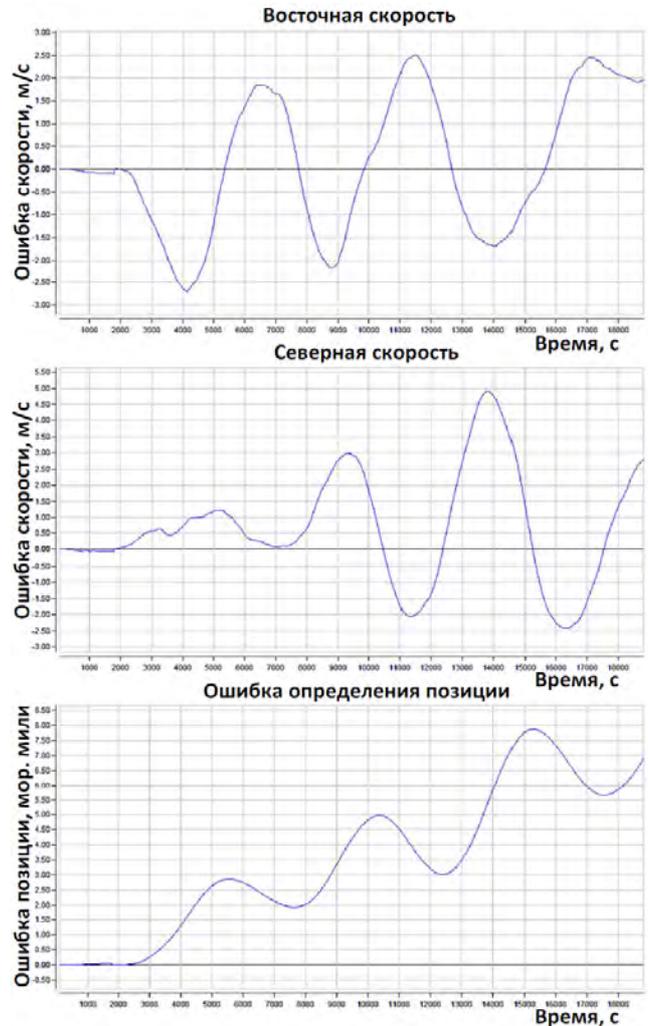


Рис. 8. Уход БЧЭ200 в инерциальном режиме (статика), 5 часов, без коррекции, гироскомпасирование 30мин., 4 румба

В то же время, после точного учета систематики ВОГ, БЧЭ400 в тесте на 4 румбах демонстрирует дрейф координат 5 морских миль за 8 часов в инерциальном некорректируемом режиме, при 20-минутной выставке гироскомпасированием (рис. 9). Восточная и северная ошибки по скорости достигают 2 м/с и 4 м/с.

В дополнение к моделированию БИНС на основе данных БЧЭ400 в статике во времени, на рис. 10 представлены реальные навигационные данные БЧЭ. Данные БЧЭ были записаны в ходе поездок на автомобиле. Для каждого теста запись БЧЭ начинается с 10 минут статики, необходимой для начальной выставки, затем начинается движение. Поскольку БЧЭ единственное устройство в тестах, коррекция и комплексование данных не проводились. Данные сигнала ГНСС для построения истинной траектории (синие графики на рис. 10)

записаны до тестов БЧЭ, поскольку используемые для проведения тестов маршруты фиксированы.

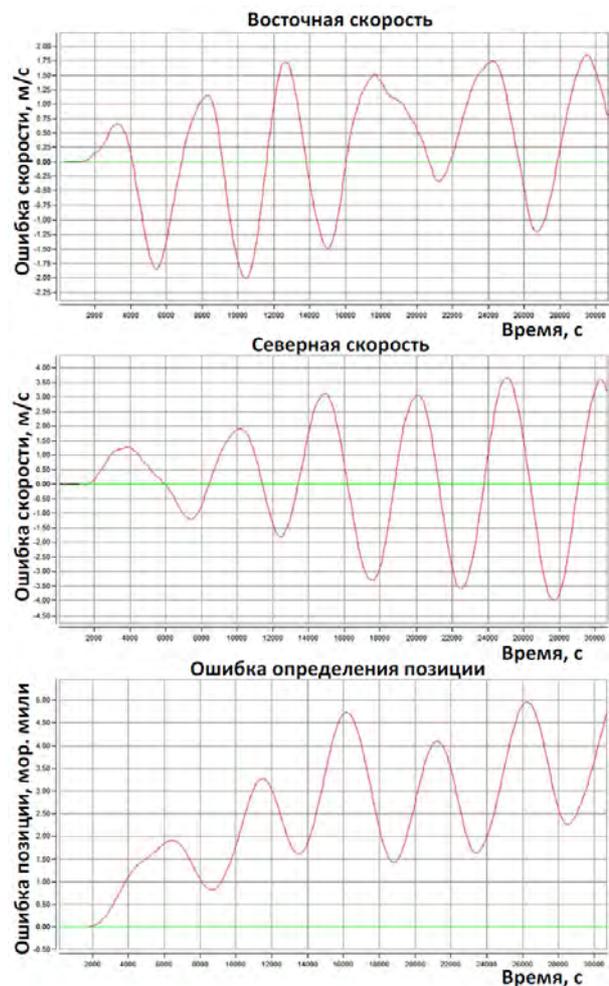


Рис. 9. Уход БЧЭ400 в инерциальном режиме (статика), 8 часов, без коррекции, гироскомпасирование 20мин., 4 румба

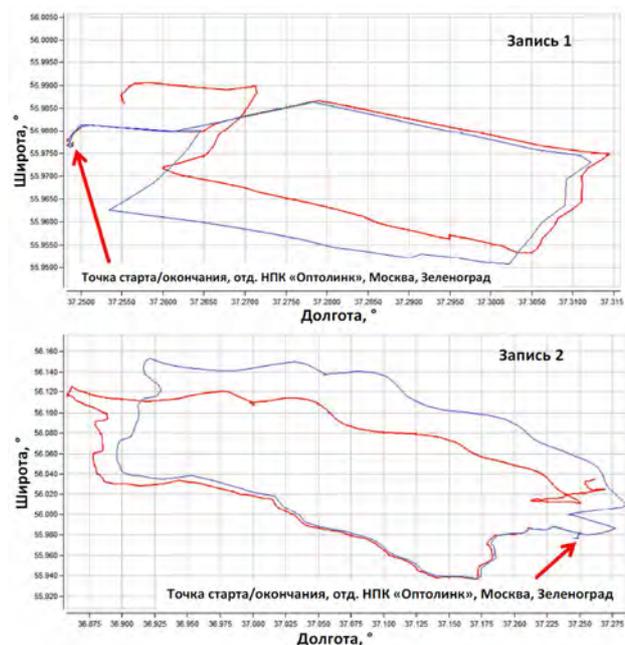


Рис. 10. Результаты уходов БЧЭ400 по координатам в инерциальном режиме с коррекцией по нулевой скорости (ZUPT), 2 записи: ~30 км (1км ошибка), ~110 км (10км ошибка). Зелёная линия – результат постобработки данных БЧЭ, синяя линия – истинная траектория (GPS)

Единственной коррекцией, которая была использована при постобработке данных БЧЭ400 в поездках, была коррекция по нулевой скорости (ZUPT) и фильтрация Калмана во время ZUPT. На Рис. 10 показаны траектории, построенные по двум записям данных БЧЭ400. Первая запись – путь 30 км, 30 минут движения автомобиля. Вторая запись – путь 110 км, 100 минут движения автомобиля. На основании представленных графиков, результаты уходов БЧЭ400 в навигации – ошибка позиции ~1 км для 1-го трека, ошибка ~10 км для 2-го трека. Данные результаты несопоставимо лучше в сравнении с любыми МЭМС или ВОГ с открытым контуром ОС для той же задачи. Указанные типы приборов, как правило, даже не измеряются в некорректируемом инерциальном режиме.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены характеристики БЧЭ200 и БЧЭ400, а также результаты испытаний данных приборов. Полученные данные позволяют рассматривать БЧЭ200 и БЧЭ400 как приборы тактического и околонавигационного класса точности. БЧЭ хорошо подходят для различных задач, в частности для аэронавигации и БПЛА. Случайное блуждание угла БЧЭ400 составляет $ARW \sim 0,007^\circ/\sqrt{\text{час}}$, в то время как для БЧЭ200 в 2 раза выше: $ARW \sim 0,015^\circ/\sqrt{\text{час}}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Lefevre, H.C., The Fiber-Optic Gyroscope, Second Edition, Boston, Artech House, 2014.
- [2] Burns, W.K., Ed., Optical Fiber Rotation Sensing, Boston, Academic Press, 1994.
- [3] Udd, E. and Digonnet, M., Eds., Design and Development of Fiber Optic Gyroscopes, Bellingham, Washington, SPIE Press, 2019.
- [4] Lefevre, H.C., The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective, *Gyroscopy and Navigation*, 2012, vol.3, pp.223–226.
- [5] Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Morev, I.V., Kostritskii, S.M., Zuev, A.I., Varnakov, V.K., Interferometric closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications, *Proc.SPIE*, 2012, vol.8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 842107.
- [6] Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Fedorov, I.V., Kostritskii, S.M., Morev, I.V., Obuhovich, D.V., Prilutskii, S.V., Zuev, A.I., Varnakov, V.K., High-precision inertial measurement unit IMU-5000, *Proc. 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, pp.111–114 (doi: 10.1109/ISISS.2018.8358121)
- [7] Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Morev, I.V., Morev, A.I., Obuhovich, D.V., Kostritskii, S.M., Zuev, A.I., Varnakov, V.K., Belashenko, A.V., Yakimov, E.N., Titov, G.V., Ovchinnikov, A.V., Abdul'minov, I.B., Latyntsev, S.V., Space grade fiber optic gyroscope: R&D results and flight tests, *Proc. 2016 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*, Karlsruhe, Germany, 20–21 September 2016, pp. 21.1–21.19 (doi: 10.1109/InertialSensors.2016.7745682).
- [8] Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Скрипников С.Ф., Хмелевская М.И., Буравлев А.С., Кострицкий С.М., Федоров И.В., Зуев А.И., Варнаков В.К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2014. №1 (84). С. 14–25 (doi: 10.1134/S2075108714040154).
- [9] Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskii, V.E., Ponomarev, V.G., Prilutskii, S.V., Obuhovich, D.V., Fedorov, I.V., Zuev, A.I., Varnakov, V.K., Kostritskii, S.M., Morev, I.V., Ultra-compact navigation-grade Inertial Measurement Unit IMU400, *Proc. 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems* (doi: 10.1109/INERTIAL48129.2020.9090072).