

Д. А. НИКИФОРОВСКИЙ, И. Г. ДЕЙНЕКА, И. А. ШАРКОВ, И. К. МЕШКОВСКИЙ

МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАНИЯМИ ГИРОСКОПА И НЕСКОЛЬКИХ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассматривается задача компенсации температурного дрейфа волоконно-оптического гироскопа при наличии показаний нескольких распределенных по контуру гироскопа датчиков температуры. Предложен алгоритм обработки показаний датчиков в виде взвешенной суммы значений температуры и ее производной.

Приведены результаты сопоставления предложенного алгоритма с алгоритмом, использующим осредненные показания датчиков. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает повышение точности компенсации дрейфа до 50%.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, термокомпенсация, датчики температуры.

1. Введение

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) – класс устройств высокой точности, применяемых в навигации в составе инерциальных навигационных систем. Принцип работы заключается в использовании эффекта Саньяка для измерения угловой скорости [1]. Интерферометрическая природа ВОГ позволяет достигать класса точности приборов на его основе вплоть до 0,001 °/ч и выше [2]. В то же время ВОГ подвержен тепловому воздействию, что влечет за собой погрешность измерения угловой скорости [3, 4].

Для достижения более высокой точности и улучшения эксплуатационных характеристик влияние величин, не связанных с вращением, должно быть устранено, например за счет использования алгоритмической коррекции. Среди факторов, влияющих на чувствительный элемент гироскопа – волоконно-оптический контур (ВОК), наиболее велико тепловое воздействие, при этом чаще всего применяется линейная коррекция [5]:

$$\Omega_{corr} = \Omega_{FOG} - k_1 T - k_2 \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

Никифоровский Данила Алексеевич. Инженер-исследователь, Университет ИТМО (С.-Петербург). ORCID 0000-0002-6677-9999.

Дейнека Иван Геннадьевич. Кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования и программирования, Университет ИТМО. ORCID 0000-0003-1557-8035.

Шарков Илья Александрович. Кандидат технических наук, ассистент института «Высшая инженерная школа», Университет ИТМО. ORCID 0000-0002-2047-5738.

Мешковский Игорь Касьянович. Доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского центра световодной фотоники, Университет ИТМО. ORCID 0000-0003-3470-1000.

где Ω_{corr} – скорректированная угловая скорость, Ω_{FOG} – сигнал ВОГ, T – значение температуры, зарегистрированной датчиком, установленным внутри ВОК, $\frac{\partial T}{\partial t}$ – скорость ее изменения. Значения коэффициентов k_1 и k_2 могут быть определены в процессе испытаний на неподвижном основании. Набор данных, содержащий сигнал ВОГ, показания температуры датчика МИОС и скорость изменения температуры датчика ВОК, записывается в ходе выполнения определенной программы (термоцикла) в климатической камере. Затем значения k_1 и k_2 выбираются таким образом, чтобы обеспечить минимум абсолютной величины коэффициента корреляции скорректированной угловой скорости Ω_{corr} и величин, не связанных с вращением (в данном случае T и $\frac{\partial T}{\partial t}$).

В научных работах встречаются подходы, основанные на алгоритмической компенсации с использованием нелинейных зависимостей дрейфа сигнала ВОГ от температуры [6, 7]. Такой подход, например с применением нейронной сети для компенсации дрейфа, может быть эффективен, однако в предлагаемой статье авторы ограничиваются использованием линейных моделей.

Следует заметить, что данные о температуре, получаемые от одного датчика, зачастую не достаточны для обеспечения эффективности компенсации, поскольку температура, измеренная в одной точке, не отображает всю картину распространения теплового воздействия в ВОК и в разных его местах может сильно отличаться.

Настоящая работа посвящена исследованию эффективности применения нескольких разнесенных по катушке датчиков для решения задачи компенсации температурного дрейфа. Проводимый в рамках этого исследования анализ данных ВОГ при высоких скоростях изменения температуры показал значимость изменения градиента температуры и необходимость использования 8 датчиков [10].

Структура работы следующая: в разделах 2 и 3 описаны предлагаемая модель компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ВОГ и эвристический алгоритм вычисления ее коэффициентов. В разделе 4 представлены результаты экспериментальной проверки предложенного метода и сравнение с алгоритмом, использующим усредненные показания датчиков. В заключении приводятся выводы по проделанной работе и обозначается направление дальнейших исследований по совершенствованию модели компенсации температурного дрейфа.

II. Модель компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ВОГ с учетом распределенных по катушке датчиков измерения температуры

Предлагается следующая модель компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ВОГ, учитывающая наличие нескольких распределенных по ВОК датчиков:

$$\Omega_{corr} = \Omega_{FOG} - \sum_{i=1}^n \varphi_i T_i - \sum_{i=1}^n \psi_i \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (3)$$

где T_i – значение температуры, считанное i -м датчиком; $\frac{\partial T_i}{\partial t}$ – скорость изменения температуры, считанной i -м датчиком; n – число датчиков. Количество коэффициентов, которые необходимо определить (φ_i и ψ_i), равно $2n$, а критерий их выбора – обеспечение минимальной статистической зависимости Ω_{corr} от T_i и $\frac{\partial T_i}{\partial t}$.

Чтобы вычислить коэффициенты компенсации в соответствии с уравнением (3), далее описывается предлагаемый эвристический алгоритм, направленный на сни-

жение статистической взаимосвязи между показаниями ВОГ и распределенных по волоконному контуру датчиков температуры.

III. Алгоритм вычисления коэффициентов модели температурного дрейфа

Компенсация теплового воздействия может быть разделена на два этапа. На первом этапе происходит вычисление коэффициентов компенсации в результате обработки данных, полученных при испытаниях на неподвижном основании. После того как коэффициенты найдены, возможно их использование на втором этапе компенсации, представляющем собой непосредственное определение значения скомпенсированной угловой скорости в реальном времени.

Во время испытаний на неподвижном основании формируются массивы данных сигнала угловой скорости ВОГ, показания датчиков температур и их производных. Рассмотрим набор данных, составленный из этих величин и представленный в следующем виде:

$$\begin{aligned} X_1 &= \Omega_{FOG}, \\ X_2 &= T_1, X_3 = T_2, \dots, X_{n+1} = T_n, \\ X_{n+2} &= \frac{\partial T_1}{\partial t}, X_{n+3} = \frac{\partial T_2}{\partial t}, \dots, X_{2n+1} = \frac{\partial T_n}{\partial t}, \end{aligned} \quad (4)$$

где n – количество датчиков температуры, размещенных в ВОГ. При этом каждый из X_i представляет собой массив записанных данных. Все они должны иметь одинаковую размерность $1 \times s$, где s – количество отсчетов. Для вычисления статистических параметров данные ВОГ должны быть предварительно усреднены на некотором интервале времени.

Для набора данных X , представляющего собой обучающую выборку, можно построить матрицу A размерностью $(2n+1) \times (2n+1)$:

$$A: A(i, j) = cov(X_i, X_j) = \frac{1}{s} \sum_{k=1}^s (X_i(k) - E(X_i))(X_j(k) - E(X_j)), \quad (5)$$

где $E(X_i)$ – выборочное среднее значение величины X_i .

Рассмотрим обратный квадратный корень матрицы A в качестве матрицы преобразования набора данных. Пусть вектор $\vec{Y} = A^{-\frac{1}{2}} \vec{X}$. Тогда

$$cov(Y_k, Y_l) = A^{-\frac{1}{2}} A^{-\frac{1}{2}} A = I. \quad (6)$$

Таким образом, в наборе данных Y устранены статистические взаимосвязи между компонентами. По определению $X_1 = \Omega_{FOG}$, т.е. является массивом показаний ВОГ. Введем Y_1 – массив величин, вычисляемый по формуле

$$Y_1 = \sum_{i=1}^{2n+1} A^{-\frac{1}{2}}(1, i) X_i. \quad (7)$$

Если исходить из предположения, что вес изначального сигнала ВОГ в сконструированном массиве должен быть равен 1, поскольку мы ищем решение задачи кор-

рекции в виде уравнения (3), матрицу $A^{-\frac{1}{2}}$ необходимо разделить на $A^{-\frac{1}{2}}(1,1)$, что приводит к решению, представленному в виде

$$\Omega_{corr} = \Omega_{FOG} + \sum_{i=1}^n \frac{A^{-\frac{1}{2}}(1,i+1)}{A^{-\frac{1}{2}}(1,1)} T_i + \sum_{i=1}^n \frac{A^{-\frac{1}{2}}(1,i+n+1)}{A^{-\frac{1}{2}}(1,1)} \frac{\partial T_i}{\partial t}. \quad (8)$$

Исследования, проводимые в рамках данной работы, показали, что полученный в соответствии с предлагаемым методом массив можно рассматривать в качестве скорректированного сигнала угловой скорости. Таким образом, по результатам испытаний на неподвижном основании, вычисления матрицы ковариации и ее обратного квадратного корня определяют коэффициенты термокомпенсации. На втором этапе компенсации записанные в память цифрового устройства обработки сигнала гироскопа коэффициенты могут быть использованы для вычисления скомпенсированного значения угловой скорости в рамках штатной работы прибора в соответствии с выражением (3) в режиме реального времени.

Задача нахождения обратного квадратного корня матрицы вычислительно сложна [11]. Для обращения матрицы можно использовать метод Гаусса–Жордана [12], разложение Холецкого [13], для нахождения квадратного корня – метод Денмана–Биверса [14].

Если известно спектральное разложение матрицы ковариации

$$A = VDV^{-1}, \quad (9)$$

то обратный квадратный корень матрицы A может быть вычислен следующим образом:

$$A^{-\frac{1}{2}} = VD^{-\frac{1}{2}}V^{-1}. \quad (10)$$

Поскольку D – диагональная матрица, ее обратный корень S может быть найден поэлементно:

$$S_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{D_{ii}}}, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}. \quad (11)$$

Таким образом, матрица $A^{-\frac{1}{2}}$ может быть представлена в виде

$$A^{-\frac{1}{2}} = VS^{-1}V^{-1}, \quad (12)$$

а поскольку матрица A является симметричной, возможно ее дальнейшее упрощение до вида

$$A^{-\frac{1}{2}} = VS^{-1}V^T. \quad (13)$$

Существует несколько способов для нахождения спектрального разложения матрицы: QR-разложение [15], метод множественных относительно робастных представлений (Multiple Relatively Robust Representations, MRRR) [16], алгоритм Якоби [17] и др.

IV. Результаты эксперимента

Для того чтобы доказать работоспособность подхода, были проведены испытания ВОГ на неподвижном основании. На волоконно-оптический контур ВОГ было установлено 8 температурных датчиков – в два слоя по высоте, в каждом из которых 4 датчика, равноудаленных от центра контура. На рис. 1 представлены показания датчиков температуры в ходе испытаний.

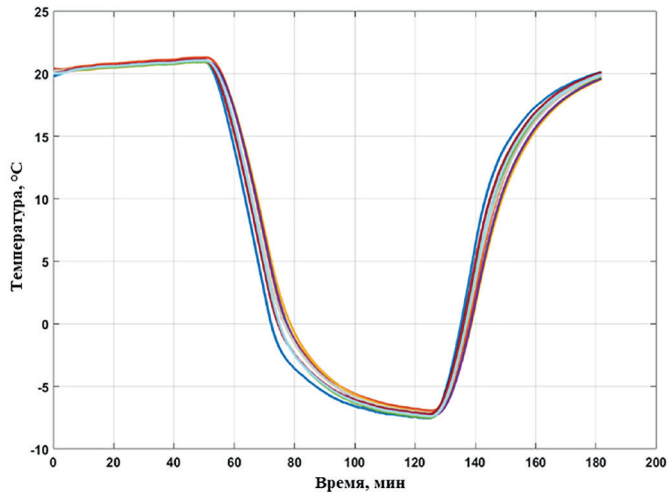


Рис. 1. Показания термодатчиков во время испытаний на неподвижном основании в климатической камере

В ходе испытаний ВОГ находился в климатической камере, запрограммированной таким образом, чтобы оценить вклад температуры и скорости ее изменения. Для этого в программу были заложены чередующиеся периоды малого изменения температуры и резкого ($2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) нагрева/охлаждения. На рис. 2 представлены скорости изменения температур, записанных датчиками с 5-го по 8-й.

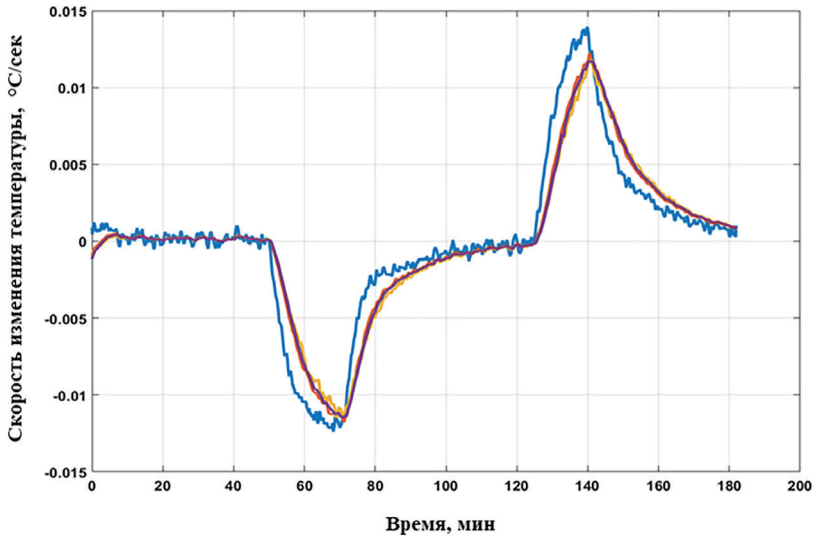


Рис. 2. Скорость изменения температуры по показаниям датчиков 5–8 во время испытаний на неподвижном основании в климатической камере

Периоды быстрых изменений температуры задавались между 48-й и 79-й и между 123-й и 158-й минутами. Как показано на рис. 3, они наиболее значительно влияют на погрешность ВОГ.

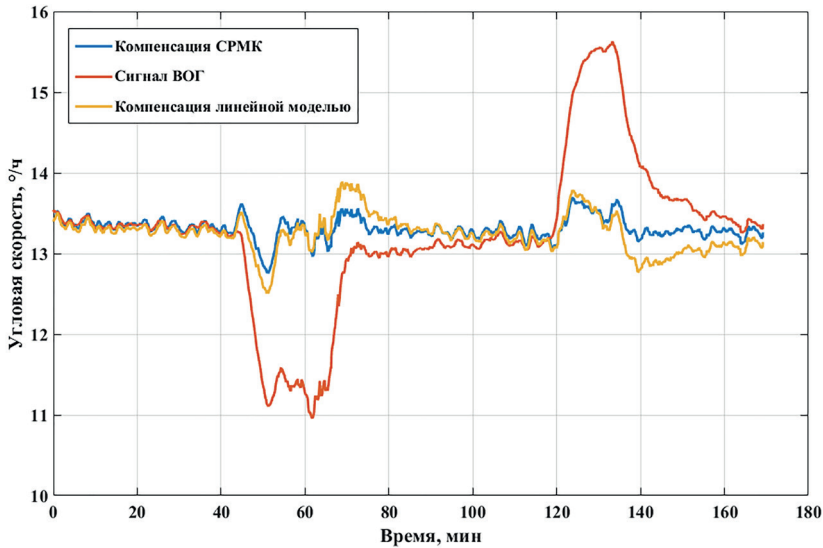


Рис. 3. Сравнение показаний ВОГ до компенсации, сигнала, скорректированного полиномиальной моделью и сигнала, полученного рассматриваемым методом

Для того чтобы произвести коррекцию, была модифицирована цепь цифровой обработки сигнала: внесены дополнительные арифметические блоки и блоки памяти для сбора и выдачи данных для дальнейшего использования в вычислениях. Угловая скорость, температура и ее производная записывались во время трехчасового участка термоцикла. Значения угловой скорости были усреднены на интервале в 100 с.

Для оценки параметров компенсации проводилось сравнение результатов рассматриваемого метода с результатами работы линейной модели, использующей среднее значение температурных датчиков [18, 19]. В рамках сравнения значения температуры и ее производных в уравнении (1) рассчитывались исходя из среднего значения записанных показаний тех же 8 температурных датчиков, которые применялись для построения матрицы. Значения коэффициентов линейной модели при этом рассчитывались с помощью метода наименьших квадратов.

На рис. 3 представлены результаты компенсации на термоцикле, использовавшемся для определения коэффициентов (обучающей выборке), и их сравнение с линейной моделью. Для проверки работоспособности алгоритма целесообразно оценить применение полученных ранее коэффициентов на контрольной выборке.

На рис. 4 приведено сравнение результатов компенсации с использованием набора данных, полученного при проведении повторных испытаний на неподвижном основании (контрольная выборка). Для термокомпенсации были применены коэффициенты, вычисленные при помощи рассматриваемого метода на обучающей выборке. Таким образом оценивается, могут ли коэффициенты, найденные в ходе испытаний на неподвижном основании в рамках изначальной калибровки, быть использованы в дальнейшем при работе прибора.

Проведенные испытания показали значительное улучшение температурной стабильности дрейфа сигнала ВОГ. Как следует из таблицы, размах скорректированно-

го сигнала сократился в 1,46 раза по сравнению с компенсацией линейной моделью на выборке, применяемой для построения матрицы ковариации, и в 1,11 раза на контрольной выборке.

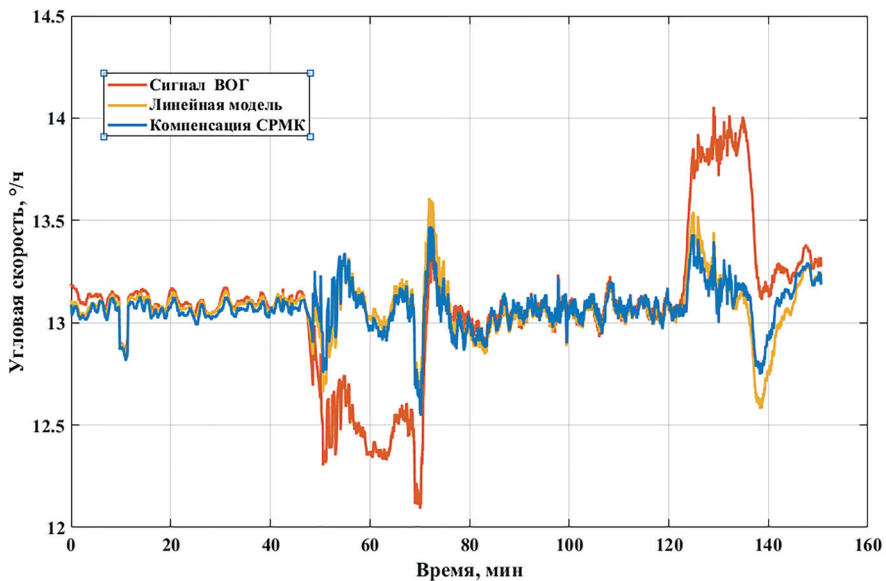


Рис. 4. Контрольная выборка: сравнение показаний ВОГ до компенсации, сигнала, скорректированного полиномиальной моделью, и сигнала, скорректированного с применением коэффициентов, полученных предложенным методом на контрольной выборке

Т а б л и ц а

Сравнение параметров сигналов до и после коррекции (усреднение 100 с)

	СКП (°/ч)	Пиковый размах (°/ч)	СКП (в отношении к сигналу ВОГ)	Пиковый размах (в отношении к сигналу ВОГ)
Сигнал ВОГ	0,9068	4,676	1	1
Линейная модель	0,2235	1,385	0,2465	0,2962
Предложенный метод	0,1331	0,948	0,1468	0,2027
Сигнал ВОГ (контрольная выборка)	0,3363	1,965	1	1
Линейная модель (контрольная выборка)	0,1311	1,031	0,3898	0,5247
Предложенный метод (контрольная выборка)	0,1068	0,9264	0,3176	0,4714

Влияние теплового воздействия, особенно скорости изменения температуры, было уменьшено. Тем не менее, поскольку существует необходимость применения

нескольких датчиков температуры для повышения эффективности температурной компенсации, увеличивается чувствительность к выбросам и шумам в наборе данных. Вследствие этого возрастают требования к самим термодатчикам и к устранению шумов и уменьшению наводок.

В ходе исследований выявлено, что при высоких скоростях изменения температуры (единицы °С/мин) в скорректированном алгоритмически сигнале ВОГ присутствуют выбросы, вызванные в том числе задержкой детектирования температуры в чувствительном элементе [20]. В результате предварительного анализа выяснилось, что путем введения временных задержек в показания каждого температурного датчика и их варьирования относительно сигнала ВОГ можно существенно повысить эффективность термокомпенсации. Значения задержек могут быть найдены путем минимизации результирующей СКП скомпенсированной угловой скорости с использованием известных методов оптимизации, таких как метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) [21], алгоритм искусственного косяка рыб (Novel Artificial Fish Swarm Algorithm, NAFSA) [22] и др.

Заключение

Рассматривается задача компенсации температурного дрейфа ВОГ при наличии показаний нескольких распределенных по контуру гироскопа датчиков температуры. Предложен алгоритм обработки показаний датчиков в виде взвешенной суммы значений температуры и ее производной. Вычисление в камеральном режиме коэффициентов, соответствующих каждому датчику температуры и значениям производных по времени, производилось с помощью описанного в работе эвристического алгоритма. Полученные коэффициенты передаются в качестве параметров в тракт цифровой обработки сигнала ВОГ, где они используются в режиме реального времени. Отмечается, что аппаратная платформа цифрового тракта ВОГ позволяет реализовать рассматриваемый алгоритм на нужных частотах обработки и с требуемой точностью, что делает возможным его применение в режиме реального времени. Показано, что по сравнению с алгоритмом, в котором применяются осредненные показания датчиков, удается повысить точность компенсации до 50%.

Предварительный анализ показал, что целесообразно учитывать временные задержки в показаниях каждого температурного датчика относительно сигнала ВОГ, что может существенно повысить эффективность термокомпенсации. В этом направлении требуется проведение дальнейших исследований.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

ЛИТЕРАТУРА

1. Lefevre, H.C., *The Fiber Optic Gyroscope*, Boston, MA, USA, Artech House, 2014, pp. 8–14.
2. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 3 (98). С. 78–85. DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.3.078-085.

3. Wang, G., Wang, Q., Zhao, B., Wang, Z., Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine, *Appl. Opt.*, 2016, vol. 55, pp. 1061–1066.
4. Кубланова И.Л., Шулепов В.А., Куликов А.В. Исследование интерферометрического волоконно-оптического гироскопа с модулятором двулучепреломления // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29 №4. С. 134–142. DOI 10.17285/0869-7035.0081.
5. Vahrameev, E.I., Galyagin, K.S., Oshivalov, M.A., Savin, M.A., Method of numerical prediction and correction of thermal drift of the fiber-optic gyro, *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2017, vol. 60, pp. 32–38.
6. Климкович Б.В. Влияние случайной погрешности температурных датчиков на качество температурной компенсации смещения нуля ВОГ нейронной сетью // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №4 (111), С. 53–70. DOI 10.17285/0869-7035.0049.
7. Dranitsyna, E., Gontar, D.A., Compensation for the Temperature Dependence of the Fog Output Signal, *International Workshop Navigation and Motion Control (NMC 2021), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2022, vol. 1215 (2022), no. 012003, pp. 1–5.
8. IEEE Standard Specifying and Testing Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, IEEE Std 952-2020 (Revision of IEEE Std 952-1997).
9. Song, R., Chen, X., Analysis of fiber optic gyroscope vibration error based on improved local mean decomposition and kernel principal component analysis, *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no.8, pp. 2265–2272.
10. Nikiforovskii, D., Smirnov, D., Deyneka, I., Nikitenko, A., Rupasov, A., The investigation of FOG output signal dependency on environment temperature at high rates of temperature change, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1864, no. 012009.
11. Hall, D.L., McMullen, S.A.H., *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*, Norwood, MA, USA, Artech House, 2004.
12. Higham, N.J., Stable iterations for the matrix square root, *Numerical Algorithms*, 1997, vol. 15, no. 2, pp. 227–242.
13. Grcar, J.F., Mathematicians of Gaussian elimination, *Notices of the American Mathematical Society*, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 782–7929.
14. Dereniowski, D., Kubale, M., Cholesky Factorization of Matrices in Parallel and Ranking of Graphs, *5th International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics, Lecture Notes on Computer Science*, 2004, vol. 3019, pp. 985–992.
15. Golub, G.H., Van Loan, C.F., *Matrix Computations* (3rd ed.), Baltimore, MD, USA, Johns Hopkins University Press, 1996.
16. Parlett, B.N., The QR algorithm, *Computing Sci. Eng.*, 2000, vol. 2, pp. 38–42.
17. Dhillon, I., Parlett, B.N., Vomel, C., The Design and Implementation of the MRRR Algorithm, *ACM Transactions on Mathematical Software*, 2006, vol. 32, no. 4.
18. Meshkovskij I.K., Miroshnichenko G.P., Strigalev V.E., Rupasov A.V., Sharkov I.A., Influence of Thermal Effect on Performances of the Fiber Optic Gyroscope, *21st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, Proceedings*, 2014, pp. 243–245.
19. Рупасов А.В. Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа. Дисс. ... к.т.н. СПб.: Университет ИТМО, 2014. 135 с.
20. Смирнов Д.С., Дейнека И.Г., Девятьяров Д.Р., Скляров Ф.В., Мухтубаев А.Б., Востриков Е.В. Оценка задержки детектирования температуры чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 6. С. 817–822. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-6-817-822.
21. Wang, W., Chen, X., Temperature drift modeling and compensation of fiber optical gyroscope based on improved support vector machine and particle swarm optimization algorithms, *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 23, pp. 6243–6250.
22. Gao, Y., Guan, L., Wang, T., Sun, Y., A Novel Artificial Fish Swarm Algorithm for Recalibration of Fiber Optic Gyroscope Error Parameters, *Sensors*, 2015, vol. 2015, no. 15, pp. 10547–10568.

Nikiforovskii, D.A., Deyneka, I.G., Sharkov, I.A., and Meshkovsky, I.K. (ITMO University, St. Petersburg, Russia)

A Method for Fiber Optic Gyroscope Temperature Drift Compensation Using Correlations between the Readings of the Gyroscope and Several Temperature Sensors, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2022, vol. 30, no. 2 (117), pp. 71–80.

Abstract. The paper discusses the problem of temperature drift compensation in a fiber-optic gyroscope, using a number of temperature sensors distributed along the gyroscope coil. An algorithm is proposed for processing the sensors' data in the form of weighted sum of temperature values and its derivative. The results of the proposed algorithm comparison with an algorithm that uses averaged readings of sensors are presented. It is shown that the proposed algorithm increases the compensation accuracy up to 50%.

Key words: fiber-optic gyroscope, thermal compensation, temperature sensors.

Материал поступил 22.11.2021