

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.С. Болотнов

bolotnovas@student.bmstu.ru

SPIN-код: 2102-2943

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены перспективы использования робототехнических комплексов (РТК) и роль инерциальных навигационных систем в их управлении. Показано преимущество лазерных гироскопов по сравнению с гироскопами других типов при построении инерциальных систем. Проанализированы требования к погрешностям лазерных гироскопов как датчиков первичной информации бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) 1–3-го класса точности. Предложен алгоритм выбора малогабаритных лазерных гироскопов для применения в БИНС контура управления подводного РТК. Подход апробирован в ходе экспериментальных исследований ряда приборов ГЛ-18. Результаты испытаний подтвердили возможность применения малогабаритного серийного лазерного гироскопа КЛ-18 при разработке БИНС 3-го класса точности для контура управления подводного РТК.

Ключевые слова

Робототехнический комплекс, кольцевой лазер, лазерный гироскоп, навигация, ориентация, автономный необитаемый подводный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, испытания

Поступила в редакцию 15.05.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. Автоматизация процессов управления с использованием современной вычислительной техники и программного продукта привела к созданию нового вида объектов — робототехнических комплексов (РТК). Перспективность применения РТК заключается, в первую очередь, в безопасности жизни персонала, управляющего ими дистанционно. Кроме того, автономность, нечувствительность к внешним помехам, а также возможность работы в условиях агрессивных, экологически небезопасных сред определяет безальтернативность применения робототехники [1–3]. Основным звеном системы управления, обеспечивающим автономность и помехоустойчивость РТК при отсутствии человеческого фактора, является система инерциальной навигации [4].

Инерциальные навигационные системы (ИНС) — это устройства, определяющие вектор скорости и координаты объекта на основе показаний датчиков ускорения (акселерометров), которые определенным образом ориентированы в пространстве. Ориентацию систем в пространстве определяют с помощью гироскопических датчиков, являющихся датчиками угловой скорости (ДУС). Инерциальные навигационные системы являются автономными устройствами, для их

функционирования, включая процесс начального ориентирования, кроме исходных данных о местоположении в определенной системе координат, не требуется какое-либо дополнительное оборудование. В силу автономности функционирования ИНС обладают чрезвычайно высокой помехозащищенностью.

Конструктивно навигационные системы разделяют на платформенные и бесплатформенные. Достигнутый уровень точности отечественных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) характеризуется погрешностью курсоуказания 1...2 угл. мин и скоростью нарастания погрешности определения местоположения 1,8 км/ч, что соответствует мировому уровню работы в инерциальном режиме (без комплексирования с данными спутниковых навигационных систем). Показатели массы и объема отечественных высокоточных БИНС удалось снизить соответственно до 12...15 кг и 12...14 дм³, что в 1,2–1,5 раза уступает показателям лучших мировых образцов [5].

Чувствительными элементами, определяющими высокую точность БИНС, являются оптические гироскопы (ОГ), используемые в качестве ДУС. Оптические гироскопы подразделяют на лазерные (ЛГ) и волоконно-оптические (ВОГ). Основными достоинствами ЛГ являются линейная выходная характеристика с нелинейностью уровня 10^{-5} и его частотный выход. По сравнению с аналоговым выходом ВОГ это является значительным преимуществом, особенно в прецизионных системах управления.

Таким образом, для обеспечения высокой эффективности применения для РТК должна быть решена задача построения БИНС на основе ЛГ, характеризующейся высокой точностью, малыми габаритами и массой, большим временем непрерывной работы, расширенным диапазоном рабочих температур и повышенной точностью относительно ВОГ.

В настоящей работе на примере навигационной системы для разрабатываемого в настоящее время РТК морского применения — автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) — анализируются точностные характеристики лазерных гироскопов с точки зрения их применимости в конкретной БИНС. На основе проведенного анализа формулируются критерии отбора кольцевого ЛГ для высокоточной БИНС, требования к которой определены задачами, решаемыми подводным аппаратом. Такой подход апробирован в ходе экспериментальных исследований лазерного прибора КЛ-18 [5].

Требования к точности ориентации АНПА и влияние на нее погрешностей гироскопов. Согласно ГОСТ РВ 52 339–2005, по точности БИНС подразделяются на три класса. Погрешности координатных уходов за 1 ч работы для БИНС 1-го класса составляют 0,95 км, или половина морской мили, 2-го класса — 1,85 км, или одна морская миля, третьего класса — 3,7 км, или две морские мили [6, 7]. В работе [8] показано, что для систем 1-го класса погрешность определения курса должна составлять величину порядка 1,8 угл. мин, а 2-го — 3,6 угл. мин. Продолжая этот ряд, получим, что для систем 3-го класса эта характеристика будет равна 7,2 угл. мин. Там же определено, что начальная выставка БИНС 1-го класса на широтах до 60° потребует использования гироско-

пов со стабильностью $0,2 \cdot 10^{-3} \dots 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}$, для второго класса — $5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{ч}$, и, соответственно, для третьего — $10^{-2} \dots 2 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ/\text{ч}$. Кроме того, в работе [3] показано, что шумовая составляющая дрейфа для систем первого класса должна составлять $10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}^{1/2}$, для второго — $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}^{1/2}$, а для третьего — $3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ/\text{ч}^{1/2}$. Очевидно, что БИНС для АНПА относится к системе 3-го класса с соответствующими этому классу требованиями к точности гироскопов.

Примером такого гироскопа может являться серийно выпускаемый ООО «Научно-производственный комплекс «Электрооптика»» малогабаритный лазерный гироскоп КЛ-18. Согласно техническим условиям на прибор КЛ-18, составляющая стабильности нулевого сигнала $\Delta\omega$ при часовом осреднении составляет не более $0,02 \text{ }^\circ/\text{ч}$ с учетом алгоритмической компенсации температурной погрешности. Воспроизводимость нулевого сигнала прибора от включения к включению σ_0 в течение всего срока службы составляет не более $0,02 \text{ }^\circ/\text{ч}$ при работающей алгоритмической компенсации температурной погрешности.

В работе [8] показано, что для определения класса точности систем достаточно провести ряд испытаний гироскопов, которые включают в себя оценку стабильности нулевого сигнала в запуске при нормальных климатических условиях, в условиях повышенной и пониженной температуры и оценку стабильности от запуска к запуску.

Экспериментальные исследования и выбор лазерных гироскопов для БИНС. Рассмотрим и проанализируем результаты экспериментальных исследований ряда приборов, которые проводились в следующем порядке:

- 1) испытания в нормальных климатических условиях при температуре $t = +25 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 10 ч);
- 2) испытания при $t = +15 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 2 ч);
- 3) испытания в условиях пониженной температуры окружающей среды при $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 4 ч);
- 4) испытания при $t = +15 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 2 ч);
- 5) испытания в условиях повышенной температуры окружающей среды при $t = +70 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 4 ч);
- 6) испытания при $t = +15 \text{ }^\circ\text{C}$ (запуск длительностью 2 ч).

Для экспериментального определения шумовой составляющей погрешности проведен запуск прибора длительностью 3 ч в нормальных климатических условиях. Измерено значение угла поворота прибора в результате вращения Земли в градусах за время измерения 1, 10 и 100 с соответственно. Зависимость дисперсии (σ_{RW}^2) измеренного ЛГ угла поворота от времени измерения и ее линейная регрессия показаны на рис. 1

Испытания проводились для серии из 10 приборов (номера от 1 до 10 соответственно). Для прибора № 1 приведены подробные результаты испытаний (рис. 2). Для всех полученных зависимостей по оси ординат отложено значение проекции угловой скорости вращения Земли Ω_3 на вертикальную ось ЛГ на широте проведения эксперимента. Результаты испытаний остальных приборов сведены в таблицу.

Результаты испытаний лазерного гироскопа КЛ-18

Номер прибора	$\Delta\omega_{(+25)}, ^\circ/\text{ч}$	$\sigma_{0(+15)}, ^\circ/\text{ч}$	$\Delta\omega_{(-40)}, ^\circ/\text{ч}$	$\Delta\omega_{(+70)}, ^\circ/\text{ч}$	$\sigma_{RW}, (^\circ/\text{ч})^{1/2}$
1	0,0073	0,0131	0,0181	0,0183	$1,5 \cdot 10^{-3}$
2	0,0129	0,0195	0,0154	0,0153	$1,2 \cdot 10^{-3}$
3	0,0104	0,0067	0,0176	0,0187	$2,3 \cdot 10^{-3}$
4	0,0144	0,0109	0,0092	0,0174	$1,6 \cdot 10^{-3}$
5	0,0086	0,0037	0,0071	0,0043	$0,8 \cdot 10^{-3}$
6	0,0062	0,0032	0,0084	0,0094	$1,0 \cdot 10^{-3}$
7	0,0047	0,0191	0,0121	0,0154	$1,8 \cdot 10^{-3}$
8	0,0152	0,0043	0,0254	0,0116	$2,5 \cdot 10^{-3}$
9	0,0182	0,0343	0,0475	0,0250	$2,8 \cdot 10^{-3}$
10	0,0156	0,0145	0,0237	0,0071	$2,1 \cdot 10^{-3}$

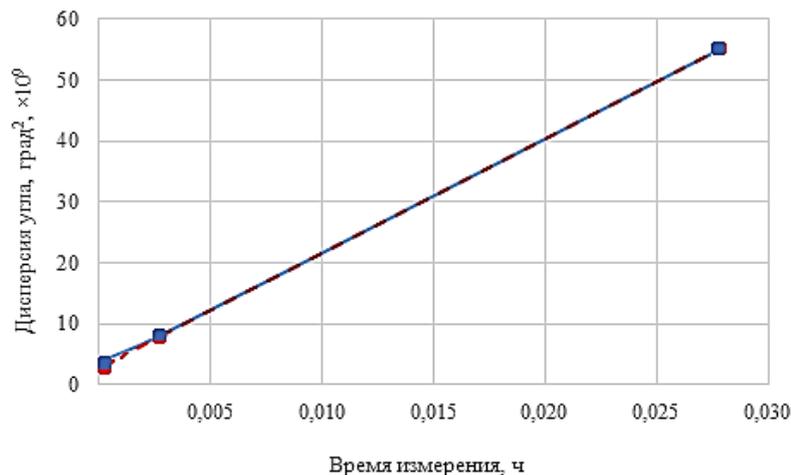


Рис. 1. Оценка изменения угла поворота при различных временах измерения за время усреднения $\sigma_{RW} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ/\text{ч}^{1/2}$

Обсуждение полученных результатов. Анализ результатов испытаний показал, что из десяти испытанных приборов КЛ-18 критериям применения для подводного робототехнического комплекса соответствуют первые семь (№ 1–7), причем пять из них могут быть отнесены к приборам третьего класса точности (№ 1–4 и 7), а два гироскопа (№ 5 и 6) соответствуют системам 2-го класса. Приборы № 8 и 10 можно признать условно годными и отправить на дополнительную регулировку и испытания, поскольку в них вне допуска находится лишь один параметр — смещение нулевого сигнала в запуске при пониженной температуре окружающей среды. Прибор № 9 следует признать бракованным.

Кроме того, необходимо отметить, что испытания всех десяти приборов КЛ-18 удовлетворяют предъявляемым требованиям по шумовой компоненте. По этому критерию два прибора (№ 5 и 6) соответствуют системам 1-го класса, два прибора (№ 1 и 2) — системам 2-го класса, а остальные шесть — системам 3-го класса [9].

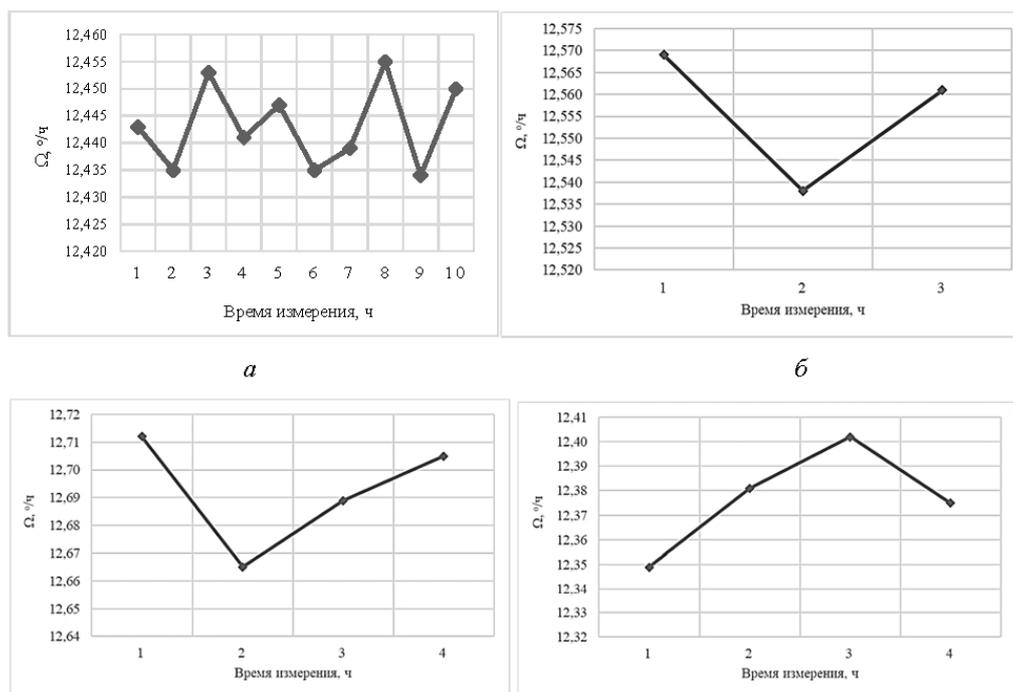


Рис. 2. Пример испытаний прибора № 1 серии гироскопов КЛ-18:

a — результаты измерения в запуске длительностью 10 ч и температуре $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$: среднее значение $\Omega_{\text{cp}} = 12,443 \text{ }^\circ/\text{ч}$; $\Delta\omega_{(+25)} = 0,0073 \text{ }^\circ/\text{ч}$; *б* — результаты измерения воспроизводимости от включения к включению в трех запусках при температуре $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$: среднее значение $\Omega_{\text{cp}} = 12,556 \text{ }^\circ/\text{ч}$; $\sigma_{0(+15)} = 0,0131 \text{ }^\circ/\text{ч}$; *в* — результаты измерения сдвига нуля при запуске длительностью 4 ч и температуре $t = -40 \text{ }^\circ\text{C}$: среднее значение $\Omega_{\text{cp}} = 12,693 \text{ }^\circ/\text{ч}$; $\Delta\omega_{(-40)} = 0,0181 \text{ }^\circ/\text{ч}$; *г* — результаты измерения сдвига нуля при запуске длительностью 4 ч и температуре $t = +70 \text{ }^\circ\text{C}$: среднее значение $\Omega_{\text{cp}} = 12,377 \text{ }^\circ/\text{ч}$; $\Delta\omega_{(+70)} = 0,0189 \text{ }^\circ/\text{ч}$

Выводы. На основе теоретических и экспериментальных исследований серии приборов подтверждена возможность использования малогабаритного серийного лазерного гироскопа КЛ-18 при разработке БИНС 3-го класса точности для контура управления подводного робототехнического комплекса.

Литература

- [1] Иванов М.С., Аганесов А.В., Крылов А.А. и др. Беспилотные летательные аппараты. Воронеж, Научная книга, 2015.
- [2] Чиров Д.С., Новак К.В. Перспективные направления развития робототехнических комплексов специального назначения. *Вопросы безопасности*, 2018, № 2, с. 50–59.
- [3] Целицкий С.В. Автономные необитаемые подводные аппараты и опасность гонки подводных вооружений. *Пути к миру и безопасности*, 2018, № 2(55), с. 132–136. DOI: <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2018-2-132-136>
- [4] Серегин В.В., Кукулиев Р.М. Лазерные гироскопы и их применение. М., Машиностроение, 1990.

-
- [5] Лазерные гироскопы ГЛ-1Д, ГЛ-2Д, ГЛ-18. *electrooptika.ru: веб-сайт*. URL: <http://www.electrooptika.ru/index.php/produktsiya/bazovye-elementy> (дата обращения: 15.05.2020).
- [6] Анучин О.Н., Емельянец Г.Н. Интегрированные навигационные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов, СПб., ЦНИИ Электроприбор, 2003.
- [7] ГОСТ РВ 52339-2005. Системы бесплатформенные инерциально-навигационные на лазерных гироскопах. М., Стандартинформ, 2005.
- [8] Болотнов А.С. Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 10 (39). URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>
- [9] Бычков С.И., Лукьянов Д.П., Бакаляр А.И. Лазерный гироскоп. М., Советское радио, 1975.

Болотнов Альберт Сергеевич — студент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Вереникина Нина Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Болотнов А.С. Исследование малогабаритного лазерного гироскопа для применения в подводных робототехнических комплексах. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 07(48). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-07-630>

STUDY OF A SMALL-SIZED LASER GYROSCOPE FOR USE IN UNDERWATER ROBOTIC SYSTEMS

A.S. Bolotnov

bolotnovas@student.bmstu.ru

SPIN-code: 2102-2943

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the prospects of using robotic systems (RS) and the role of inertial navigation systems in their control. The advantage of laser gyroscopes is shown in comparison with gyroscopes of other types in the construction of inertial systems. The requirements are analyzed for the errors of laser gyroscopes as sensors of primary information of strapdown inertial navigation systems (SINS) of the 1–3rd accuracy class. An algorithm is proposed for the selection of small-sized laser gyroscopes for use in the SINS of the control loop of an underwater RS. The approach was tested in the course of experimental studies of a number of GL-18 devices. The test results confirmed the possibility of using a small-sized serial laser gyroscope KL-18 in the development of SINS of the 3rd accuracy class for the control loop of an underwater RS.

Keywords

Robotic complex, ring laser, laser gyroscope, navigation, orientation, autonomous unmanned underwater vehicle, strapdown inertial navigation system, testing

Received 15.05.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Ivanov M.S., Aganesov A.V., Krylov A.A., et al. *Bespilotnye letatel'nye apparaty* [Unmanned aircraft]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2015 (in Russ.).
- [2] Chirov D.S., Novak K.V. Development prospects of special-purpose robotic complexes. *Voprosy bezopasnosti*, 2018, no. 2, pp. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.25136/2409-7543.2018.2.22737> (in Russ.).
- [3] Tselitskiy S.V. Autonomous unmanned submarines and hazard of underwater armaments drive. *Puti k miru i bezopasnosti*, 2018, no. 2(55), pp. 132–136. DOI: <https://doi.org/10.20542/2307-1494-2018-2-132-136> (in Russ.).
- [4] Seregin V.V., Kukuliev P.M. *Lazernye girometry i ikh primeneniye* [Laser gyrometers and their application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990 (in Russ.).
- [5] *Lazernye giroskopy GL-1D, GL-2D, GL-18* [GL-1D, GL-2D, GL-18 laser gyroscopes]. *electrooptika.ru: website* (in Russ.). URL: <http://www.electrooptika.ru/index.php/produktsiya/bazovye-elementy> (accessed: 15.05.2020).
- [6] Anuchin O.N., Emel'yantsev G.N. Integrated navigation and orientation systems for marine moving objects. Sankt-Petersburg, TsNII Elektropribor Publ., 2003 (in Russ.).
- [7] GOST RV 52339-2005. *Sistemy besplatformennye inertsiial'no-navigatsionnye na lazernykh giroskopakh* [State standard RV 52339-2005. Strapdown inertial navigation systems on laser gyroscopes]. Moscow, Standartinform Publ., 2005 (in Russ.).

- [8] Bolotnov A.S. The use of a laser gyroscope in strapdown inertial systems. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 10(39). URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533> (in Russ.).
- [9] Bychkov S.I., Luk'yanov D.P., Bakalyar A.I. Lazernyy giroskop [Laser hyroscope]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975 (in Russ.).

Bolotnov A.S. — Student, Department of Radioelectronic Systems and Devices, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Verenikina N.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Bolotnov A.S. Study of a small-sized laser gyroscope for use in underwater robotic systems. *Politekhnicheskii molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 07(48). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-07-630.html> (in Russ.).