

# Современное состояние и перспективы развития сверхбольших оптических гироскопов для применения в геодезии и сейсмологии

А.А.Великосельцев, Д.П.Лукьянов, В.И.Виноградов, К.-У.Шрайбер

*Приведены краткие сведения из истории создания и развития сверхбольших лазерных гироскопов (СБЛГ). Изложены основные результаты, достигнутые с использованием СБЛГ в геодезии, сейсмологии, фундаментальной физике и других областях. Рассматриваются концепции построения СБЛГ, особенности их конструкции и исполнения, а также перспективы применения современных оптических технологий в лазерной гироскопии. Анализируются возможности использования волоконно-оптических гироскопов в сейсмологических исследованиях и приводятся результаты предварительных экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** сверхбольшие лазерные гироскопы, волоконно-оптические гироскопы, геодезия, сейсмология, стабилизация, повышение чувствительности.

## 1. Введение

После первой успешной демонстрации лазерного гироскопа (ЛГ) в 1963 г. дальнейшее его развитие определялось прежде всего нуждами инерциальной навигации, что, в свою очередь, требовало снижения влияния зоны захвата на выходную характеристику ЛГ и уменьшения массогабаритных параметров. Возможность использования ЛГ как высокоточного активного интерферометра для регистрации сверхмалых угловых скоростей не рассматривалась довольно долго. В конце 80-х гг. прошлого века группой исследователей из Университета Кентербери (Крайстчёрч, Новая Зеландия) была начата серия экспериментов по созданию «большого» ЛГ для решения довольно амбициозной задачи – проверки теории относительности [1].\* Идея заключалась в том, чтобы получить высокую чувствительность ЛГ за счёт увеличения его периметра и исключения внутррезонаторных элементов для повышения добротности контура. В 1989 г. был создан ЛГ с площадью контура 0.748 м<sup>2</sup> (периметр 3.47 м), который позволял регистрировать скорость вращения Земли без ис-

пользования неважных элементов [2]. В дальнейшем этой научной группой при участии исследователей из Государственного университета Оклахомы (США), Технического университета Мюнхена и Федерального ведомства картографии и геодезии Германии, были реализованы технически более совершенные ЛГ с периметром резонатора от 4 до 121 м [3–7].

## 2. Основные результаты, достигнутые с использованием сверхбольших ЛГ

Последовательное усовершенствование конструкций больших ЛГ (БЛГ) в совокупности с увеличением их периметра и использованием новых высококачественных оптических зеркал привело к достижению беспрецедентной чувствительности, позволяющей регистрировать короткопериодные вариации вектора угловой скорости Земли [8, 9], что иллюстрирует рис. 1. На нём приведены данные БЛГ G, полученные на протяжении 20 дней, и

\* Следует отметить, что первый образец ЛГ, выполненный Мацеком и Дэвисом 50 лет назад, был одновременно и самым большим. В 1963 г. его резонатор имел форму прямоугольника с периметром 4 м и четырьмя газоразрядными трубками в каждом плече длиной ~1 м. Здесь, очевидно, сказался опыт разработки первых образцов линейных газовых лазеров в 1960 г.

**А.А.Великосельцев, Д.П.Лукьянов.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина), Россия, 197376 С.-Петербург, ул. Проф. Попова, 5; e-mail: avelikoseltsev@gmail.com, dplukyanov@mail.ru

**В.И.Виноградов.** ОАО "Тамбовский завод «Электроприбор»", Россия, 392000 Тамбов, Моршанское ш., 36; e-mail: valentin.vinogradov@gmail.com

**К.-У.Шрайбер.** Forschungseinrichtung Satellitengeodaesie, Technische Universitaet Muenchen, Geodaetisches Observatorium Wettzell, Sackenrieder str. 25, 93444 Bad Koenzting, Deutschland; e-mail: schreiber@fs.wettzell.de

Поступила в редакцию 29 января 2014 г., после доработки – 15 июля 2014 г.

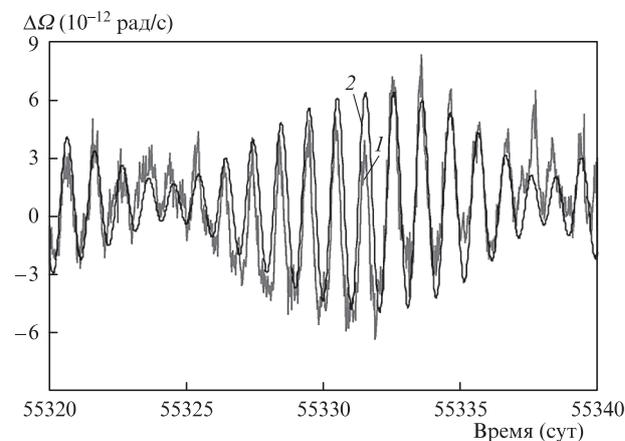


Рис.1. Выходной сигнал БЛГ G (1) и данные модели суточного движения полюса (2). Данные представлены в единицах угловой скорости после компенсации постоянной составляющей угловой скорости Земли. Время – модифицированная юлианская дата (дни, отсчитываемые от полуночи с 16 на 17 ноября 1858 г.).

данные модели суточного движения полюса для того же временного периода. Видно, что результаты измерений и моделирования достаточно хорошо совпадают, при этом их незначительные различия вызваны реальными процессами, такими как изменения погодных условий, деформация поверхности Земли и т. п.

Традиционно определение параметров ориентации Земли (длительность суток и координаты полюса) осуществляется посредством радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) – сложной системы радиотелескопов, распределённых по поверхности планеты. Большие ЛГ могут регистрировать изменения этих параметров путём точечных измерений в реальном масштабе времени. Выходные сигналы БЛГ G и РСДБ приведены на рис.2. Здесь кривая 2 представляет результаты измерений параметров вращения Земли с помощью РСДБ, а именно изменения координат полюса, пересчитанные в единицы угловой скорости. Кривая 1 показывает измеренные БЛГ изменения угловой скорости Земли. Временной отрезок на рис.2 равен ~60 сут. Наблюдаемый тренд данных БЛГ G и РСДБ является чандлеровским движением полюса [10], полный период которого составляет 428 сут. Следует отметить, что РСДБ генерирует данные два раза в неделю, в то время как ЛГ измеряет угловую скорость с интервалом в один час. Зашумлённость выходного сигнала БЛГ обусловлена малыми колебаниями периметра, вызывающими случайные изменения параметров обратного рассеяния.

С помощью БЛГ также впервые были зарегистрированы вращательные компоненты сейсмических волн

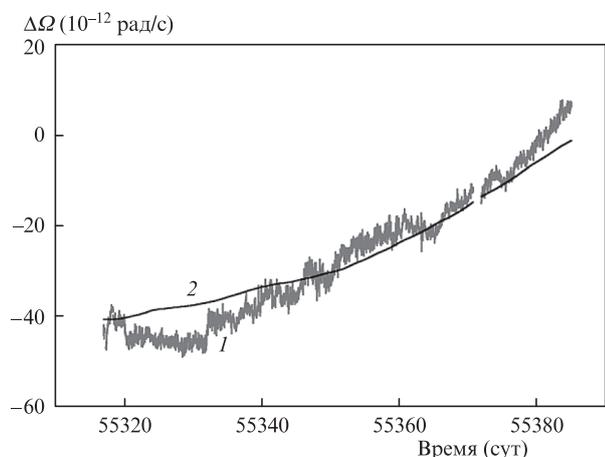


Рис.2. Выходные сигналы БЛГ (1) и РСДБ (2), иллюстрирующие движение полюса с периодом Чандлера. Данные представлены в единицах изменения угловой скорости после компенсации постоянной составляющей угловой скорости Земли и короткопериодных её вариаций. Время – модифицированная юлианская дата (дни, отсчитываемые от полуночи с 16 на 17 ноября 1858 г.).

Табл.1. Основные параметры БЛГ.

Модель	Площадь контура (м <sup>2</sup> )	Периметр контура (м)	Добротность	Частота биений (Гц)	Чувствительность (рад/с)
С-II	1	4	$5.3 \times 10^{11}$	79.4	$146.2 \times 10^{-12}$
GEOsensor	2.56	6.4	$3 \times 10^{12}$	102.6	$108.1 \times 10^{-12}$
G-0	12.25	14	$2.5 \times 10^{12}$	288.6	$11.6 \times 10^{-12}$
G	16	16	$3.5 \times 10^{12}$	348.6	$12 \times 10^{-12}$
UG1	367.5	77	$1.2 \times 10^{12}$	1512.8	$17.1 \times 10^{-12}$
UG2	834.34	121.4	$1.5 \times 10^{12}$	2180	$7.8 \times 10^{-12}$

[11–13], до тех пор считавшиеся пренебрежимо малыми и не играющими роли в сейсмологических исследованиях. Анализ совокупности данных по линейным и вращательным компонентам сейсмических сигналов показал возможность получения новой информации о структуре недр, что крайне затруднительно при использовании только лишь традиционных сейсмометров [14–16].

Большинство работающих БЛГ выполнены в рамках одной концепции: прямоугольные резонаторы сформированы четырьмя зеркалами с низкими (менее  $50 \times 10^{-6}$ ) потерями, отсутствуют внутрирезонаторные элементы и все полости резонатора заполнены рабочей газовой смесью He–Ne с равным соотношением изотопов неона. Накачка осуществляется высокочастотным разрядом СВЧ диапазона, давление газовой смеси (~4–8 мбар) повышено для увеличения однородного уширения линии неона. Одномодовый непрерывный режим работы лазера реализован путём ограничения коэффициента усиления, когда все продольные моды, кроме одной, подавляются выбором мощности накачки активной среды (см. разд.3 этой статьи).

Конструктивно БЛГ можно разделить на монолитные (модели С-II, отчасти G) и модульные (модели GEOsensor, G-0, UG1 и UG2). Монолитные приборы выполнены из материала с низким коэффициентом теплового расширения (Zerodur), в то время как модульные изготовлены из специальных вакуумных труб, соединяющих угловые камеры с фиксаторами зеркал. Основные параметры БЛГ приведены в табл.1.

Предельная чувствительность ЛГ в отсутствие технических флуктуаций определяется квантовым шумом и в случае измерения скорости вращательного движения может быть представлена в виде

$$\delta\Omega = \frac{cL}{4AQ} \sqrt{\frac{hf}{Pt}},$$

где  $c$  – скорость света;  $L$  – периметр резонатора;  $A$  – площадь его контура;  $Q$  – добротность резонатора;  $h$  – постоянная Планка;  $f$  – частота генерации;  $P$  – мощность внутри резонатора;  $t$  – время усреднения. Добротность контура БЛГ определяется путём измерения времени жизни фотонов  $\tau$  в резонаторе как  $Q = 2\pi/\tau$ . Мощность генерации  $P$  находится через измеренную на выходе ЛГ мощность  $P_{out}$  и время жизни фотонов  $\tau$  как  $P = P_{out}L/(cT\tau)$ , где  $T$  – известный коэффициент пропускания зеркала. Расчётные значения предельной чувствительности БЛГ приведены в табл.1 [17].

На сегодняшний день области применения БЛГ – это геодезия, сейсмология и исследования в области фундаментальной физики. Задачи, стоящие перед исследователями, заключаются в дальнейшем повышении чувствительности БЛГ и их долговременной стабильности. Первое

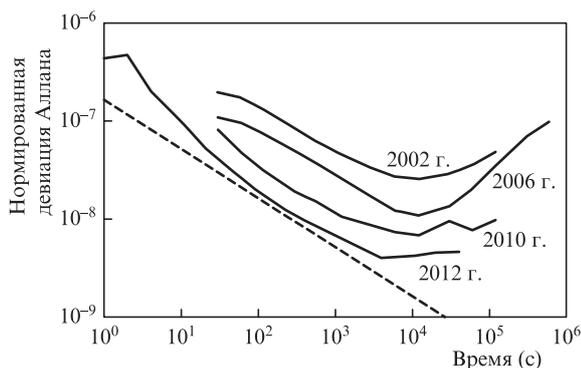


Рис.3. Характеристики чувствительности БЛГ Г, представленные в виде нормированных на постоянную скорость вращения Земли девиаций Аллана. Штриховая кривая – теоретический квантовый предел для данного прибора. Сплошные кривые – эволюция чувствительности БЛГ по мере его модернизации: нестабилизированный БЛГ (2002 г.), замена зеркал на более качественные (2006 г.), совершенствование систем стабилизации периметра (2010 и 2012 гг.).

обеспечит возможность измерения вариаций длительности суток, что позволит повысить точность определения параметров ориентации Земли при комплексировании с РСДБ [18]. Второе приведёт к достоверной регистрации низкочастотных геофизических сигналов, обусловленных земными приливами, изменениями океанских и атмосферных кинетических моментов. Активно ведутся работы в этом направлении, осуществляется стабилизация контура резонатора с использованием частотных гребёнок и управления давлением в изолирующем саркофаге [17]. Дополнительные контуры активной стабилизации периметра уже сегодня позволяют обеспечить флуктуации частоты генерации в пределах  $\pm 1$  кГц [19]. Постепенное повышение разрешающей способности БЛГ иллюстрирует рис.3. Путём использования вышеупомянутых мер стабилизации и модернизации самого прибора удалось повысить чувствительность БЛГ Г на порядок и практически приблизиться к предельному теоретическому уровню, определяемому квантовым шумом.

### 3. Перспективные оптические технологии в лазерной гироскопии

Одним из возможных путей повышения точности БЛГ в непрерывном режиме является снижение потерь на зеркалах резонатора. В ходе эксплуатации БЛГ UG-2 с периметром 121.4 м было отмечено, что добротность резонатора не так высока, как можно было ожидать от ЛГ такого размера. Данное обстоятельство интерпретировалось как следствие высоких потерь на зеркалах, поскольку при увеличении длины плеч резонатора увеличивается область засветки их поверхности [17]. Поперечный размер светового пучка в БЛГ UG-2 выходил за пределы апертуры зеркал, что приводило к росту дифракционных потерь. Вследствие этого был сделан вывод о нецелесообразности дальнейшего увеличения геометрических размеров контура при существующем уровне технологий производства диэлектрических зеркал.

Используемые в большинстве БЛГ зеркала изготовлены по хорошо зарекомендовавшей себя технологии ионно-лучевого напыления слоёв  $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  на кварцевую подложку и имеют потери  $\sim 10^{-6}$ . Подобные зеркала применяются в настоящее время в интерферометрических детекторах гравитационных волн и оптических атомных часах.

Однако даже наилучшим образцам диэлектрических зеркал присущ тепловой шум, вызывающий случайные колебания их поверхности, что является фундаментальным ограничением чувствительности интерферометрических систем [20]. Существующие методы снижения влияния теплового шума значительно усложняют структуру приборов. В случае больших кольцевых лазеров тепловые шумы покрытий зеркал приводят к изменению длин плеч резонаторов, что порождает случайные вариации масштабного коэффициента и параметров обратного рассеяния.

Относительно недавно была предложена перспективная технология изготовления оптических зеркал [21]. В основе её лежит использование монокристаллических гетероструктур AlGaAs в качестве материала для формирования оптических слоёв. На базовой пластине из арсенида галлия методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращиваются четвертьволновые слои GaAs (с большим показателем преломления) и AlGaAs (с малым показателем преломления). После этого сформированная структура снимается с базовой пластины и устанавливается на основную подложку с помощью соединения, аналогичного оптическому контакту. Основной подложкой служит полированное кварцевое стекло. Полученные экспериментальные образцы кристаллических зеркал имеют потери на пропускание  $4 \times 10^{-6}$ , потери на рассеяние и поглощение составляют  $\sim 4 \times 10^{-6}$  и  $\sim 12 \times 10^{-6}$  соответственно. Созданные зеркала продемонстрировали десятикратное уменьшение уровня теплового шума по сравнению с диэлектрическими. Дальнейшее совершенствование этой технологии позволит создавать зеркала с низкими потерями и необходимым радиусом кривизны. Единственным недостатком на данный момент представляется то, что спектр отражения кристаллических зеркал лежит в ИК области (1.03–1.14 мкм). Данное обстоятельство затрудняет процесс визуального контроля хода лучей в резонаторе и его юстировки. Тем не менее возможность повышения стабильности оптической частоты в контуре ЛГ путём снижения флуктуаций его периметра за счёт уменьшения влияния теплового шума представляется весьма перспективным направлением развития БЛГ и требует экспериментальной проверки.

Увеличение периметра ЛГ приводит к уменьшению межмодового интервала, что, в свою очередь, диктует необходимость снижения превышения усиления над потерями для обеспечения режима одномодовой генерации. Таким образом, увеличение периметра каждого из вновь создаваемых сверхбольших ЛГ неизбежно сопровождалось снижением мощности лазерного излучения в резонаторе ЛГ, и, как следствие, возникали вопросы о потенциальных ограничениях предельных значений периметров сверхбольших кольцевых лазеров.

Одно из возможных ограничений может быть связано с характером спектра частот, возбуждаемых в резонаторе ЛГ. Напомним, что количество типов колебаний, возникающих в резонаторе, определяется в первую очередь ширинами спектральной линии излучения активной среды и резонансной кривой интерферометра (рис.4) [22].

Число генерирующих мод с частотами  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$  определяется периметром резонатора  $L$  и шириной линии излучения  $\Delta\nu$ :

$$N = \frac{\Delta\nu}{c} L.$$

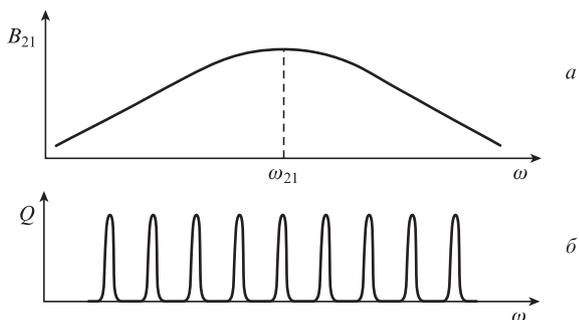


Рис.4. Зависимость от частоты  $\omega$  коэффициента индуцированного излучения  $B_{21}$  атома Ne (а) и резонансная кривая интерферометра (кольцевого резонатора) для аксиальных мод TEM<sub>00</sub> (б).

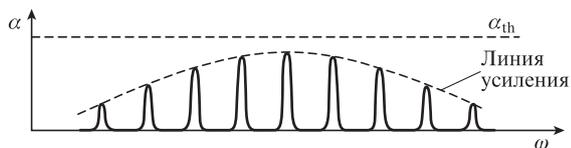


Рис.5. Зависимость коэффициента усиления  $\alpha$  от частоты  $\omega$  в случае, когда пороговое условие генерации не выполняется ни для одной из мод.

Если инверсия населённостей мала настолько, что ни для одной из мод резонатора не выполняется пороговое условие, то генерация отсутствует (рис.5).

При увеличении инверсии коэффициент усиления активной среды увеличивается и генерация возникает на частотах  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  (рис.6). Подбором коэффициента усиления можно добиться генерации только на одной частоте  $\omega_2$  и одновременно подавления колебаний на частотах  $\omega_1$  и  $\omega_3$ .

Однако это оказывается всё более затруднительным по мере увеличения периметра  $L$ , когда наступает перекрытие амплитудно-частотных характеристик соседних мод и традиционный линейчатый спектр возбуждаемых колебаний начинает приближаться к сплошному. Одновременно с уширением спектра будет снижаться и мощность одночастотного излучения из-за необходимости селекции продольных мод с частотами, близкими к частоте генерации. Это обстоятельство может оказаться доминирующим, ограничивающим предельные значения периметра  $L$  сверхбольших ЛГ.

Приведём в качестве примера оценку возможности построения сверхбольшого ЛГ с резонатором, эквивалентным интерферометру Майкельсона–Геля с периметром 1874 м (размер 603×334 м). В этом случае межмодовое расстояние  $c/L$  составит

$$\frac{3 \times 10^8 \text{ м/с}}{1874 \text{ м}} \approx 1.6 \times 10^5 \text{ Гц} = 160 \text{ кГц}$$

и окажется меньше межмодового расстояния 18.75 МГц сверхбольшого ЛГ типа G более чем на два порядка.

Вместе с тем результаты исследований, выполненных в работах [23, 24], показывают, что наибольшего повышения чувствительности оптических гироскопов можно до-

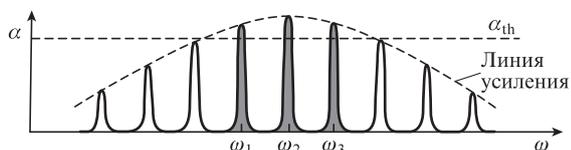


Рис.6. То же, что и на рис.5, но в случае, когда пороговое условие генерации выполняется для частот  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ .

стичь увеличением мощности генерации в резонаторе. Основная проблема – получение генерации с максимально высокой мощностью в спектральном диапазоне, равном ударной ширине линии излучения или меньшем ее, без введения в резонатор дополнительных оптических элементов, увеличивающих потери резонатора и усложняющих конструкцию ЛГ.

Для решения подобной задачи в оптике используется внешний резонатор, связанный с основным через общее зеркало. При такой конфигурации оптической схемы возбуждается генерация в широком частотном диапазоне, а в узкой области центральной частоты генерация подавляется. В рассматриваемом случае необходим обратный эффект – наличие генерации в области центральной частоты одной продольной моды рабочего перехода неона и ее отсутствие вне этого диапазона. Это может быть получено за счёт конкуренции с рабочим переходом  $3S_2-2P_4$  ( $\lambda_1 = 0.6328$  мкм) оптических переходов  $3S_2-3P_4$  ( $\lambda_2 = 3.39$  мкм) или  $2S_2-2P_4$  ( $\lambda_3 = 1.1523$  мкм), имеющих с ним общие верхний ( $3S_2$ ) или нижний ( $2P_4$ ) энергетические уровни. Иными словами, если вспомогательный резонатор с соответствующими параметрами настроен, например, на длину волны 3.39 мкм, то на этой длине волны генерации в определенном частотном диапазоне в основном резонаторе не будет из-за высоких потерь на пропускание (до 92%) общего дисперсионного (связанного) резонатора, но будет генерация на основном переходе с рабочей длиной волны 0.63 мкм. В остальном же частотном диапазоне (вне зоны подавления генерации) будет генерироваться конкурирующее излучение на длине волны 3.39 или 1.15 мкм, которое будет подавлять генерацию на рабочей длине волны. При этом дополнительный резонатор никак не влияет на работу основного кольцевого лазера с  $\lambda_1 = 0.63$  мкм, поскольку излучение на этой длине волны выводится из него, не возвращаясь обратно, посредством дисперсионной призмы, включаемой в состав вспомогательного резонатора [25].

В процессе экспериментальных исследований двухволновой режим генерации был реализован в кольцевом лазере с периметром 200 см одновременно на двух длинах волн (0.63 и 1.15 мкм) при использовании равноизотопной смеси неона и гелия. Стабильность разностной частоты была не хуже, чем при работе на одной длине волны  $\lambda_1 = 0.63$  мкм.

Таким образом, представляется возможным на несколько порядков увеличить мощность излучения в одной продольной моде сверхбольших кольцевых лазеров, значительно уменьшив предельную ширину линии излучения и соответственно повысив разрешающую способность данных кольцевых лазеров. При этом не требуется введения дополнительных оптических элементов в основной резонатор. Понятно, что реализация такого режима работы при сохранении высокой стабильности показаний потребует дополнительной экспериментальной оптимизации параметров сверхбольших ЛГ со связанным резонатором.

Дополнительные сведения о двухчастотной селекции продольных мод с целью повышения мощности излучения в резонаторах сверхбольших ЛГ можно найти в работе [25].

Эффективным средством дальнейшего повышения чувствительности сверхбольших ЛГ может явиться переход к импульсному режиму [26]. В этом случае генерируются две последовательности коротких импульсов, встречно распространяющихся в замкнутом контуре. В области на-

ложения импульсов образуется интерференционная картина, по которой оценивается величина разностной частоты.

Потенциальными преимуществами использования импульсного режима являются существенно меньшая степень нелинейной связи между встречно распространяющимися волнами и отсутствие конкуренции встречных мод в активной среде с однородным уширением. Наличие эффекта Саньяка и уменьшение зоны захвата в импульсных ЛГ было продемонстрировано в ряде исследований [27–29]. Данные работы подтверждают возможность реализации оптического гироскопа с применением лазеров на красителях с синхронизацией мод, а также твердотельных и волоконных лазеров. Проведённые исследования демонстрируют возможность достижения разрешающей способности  $\sim 5 \times 10^{-13}$  рад/с [30]. В случае использования импульсных лазеров в оптическом контуре с большим периметром представляется возможным получить как увеличение чувствительности ЛГ, так и снижение влияния обратного рассеяния на выходной сигнал.

#### 4. Волоконно-оптические гироскопы как высокоточные датчики угловой скорости

Повышение чувствительности оптических датчиков угловой скорости возможно не только путём увеличения размеров резонатора активного кольцевого интерферометра. Широко распространённым и перспективным датчиком является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Наилучшие образцы промышленно выпускаемых ВОГ имеют уровень дрейфа  $\sim 1.5 \times 10^{-9}$  рад/с [31, 32]. К преимуществам ВОГ относятся возможность получения высокой точности при небольших размерах, технологичность производства и относительно невысокая стоимость. Повышение чувствительности ВОГ, являющегося пассивным оптическим интерферометром, достигается путём увеличения длины светопроводящего волокна и/или диаметра волоконной катушки. В то время как в навигации увеличение размеров прибора нежелательно, в геодезии и сейсмологии это не играет решающей роли. Таким образом, можно реализовать ВОГ с достаточно большой длиной волокна (несколько километров) и с диаметром катушки, превышающим обычные размеры (более десяти сантиметров).

Эксперимент по оценке возможности повышения масштабного коэффициента ВОГ путём увеличения диаметра катушки был проведён в Геодезической обсерватории Ветцелля (Германия). Одномодовое волокно длиной 2.2 км было намотано вокруг стеклокерамического диска диаметром 4 м, являющегося составной частью БЛГ G. Полученные результаты позволяют оценить разрешающую способность такого ВОГ в  $0.5 \times 10^{-6}$  рад/с [18]. Выходной сигнал ВОГ показан на рис. 7.

Следует учитывать, что намотка оптического волокна проводилась вручную, не квадрупольным методом, и использовался маломощный источник света. Таким образом, несмотря на формальное повышение масштабного коэффициента большого ВОГ по сравнению с БЛГ G в 143 раза, его чувствительность оказалась на два порядка меньше, чем у БЛГ вследствие высокого уровня шума. Замена источника света на суперфлуоресцентный и использование усовершенствованной цифровой схемы управления позволят повысить точность данного ВОГ. В перспективе сверхбольшой ВОГ может быть с успехом использован для сейсмологических исследований, а ком-

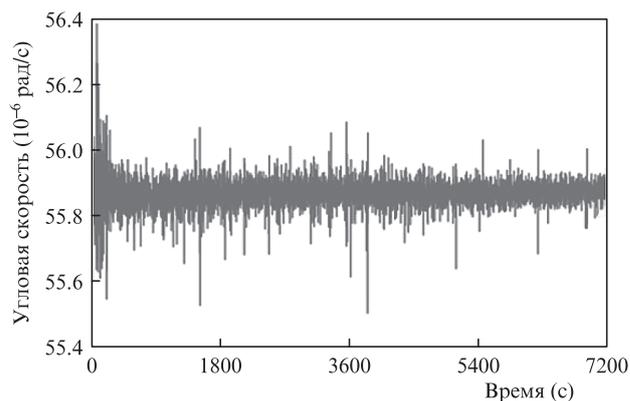


Рис. 7. Выходной сигнал ВОГ с большим диаметром катушки. Среднее значение сигнала соответствует вертикальной проекции скорости вращения Земли в месте расположения прибора.

плексирование его показаний с данными БЛГ поможет точнее охарактеризовать погрешности обоих приборов.

Увеличение размеров катушки оптического волокна помимо очевидного повышения точности измерений имеет и обратную сторону. Несмотря на общее отсутствие ограничений на размеры измерительного оборудования в сейсмологии, для выполнения ряда исследовательских задач все-таки нужно обеспечить компактность приборов. В частности, это необходимо для оперативности и лёгкости установки ВОГ в районах повышенной сейсмической активности. Использование БЛГ затруднено в данном случае — они могут быть задействованы лишь в качестве реперных станций. Компромиссным решением представляется использование высокоточных ВОГ с относительно малыми размерами [33]. В настоящее время активно проводятся эксперименты по созданию специализированных ВОГ для сейсмологических измерений. Разработано несколько ВОГ с диаметром катушки волокна от 40 до 68 см и длиной волокна от 11 до 15 км. Диапазон чувствительности таких приборов оценен авторами как  $2.3 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-9}$  рад/с [34, 35]. Из-за значительных размеров катушки температурные эффекты оказывают существенное влияние на выходной сигнал больших ВОГ, вследствие чего в их конструкции предусмотрены изолирующие тефлоновые слои и квадрупольная намотка оптического волокна. Подобные приборы могут быть с успехом использованы для регистрации вращательных компонент сейсмических волн в непосредственной близости от очага землетрясения (сейсмология ближнего поля).

Развитие технологий производства оптических волокон в перспективе может вывести ВОГ на новый уровень. В частности, использование фотонно-кристаллического волокна сулит массу преимуществ при реализации оптических датчиков угловой скорости. Одним из таких волокон является волокно с фотонной запрещённой зоной в определённом диапазоне длин волн, где свет может распространяться по сердцевине с показателем преломления, меньшим показателя преломления оболочки. Таким образом, возможно распространение света в волокне с поллой сердцевиной (в воздухе), что позволяет как увеличить мощность вводимого излучения, так и значительно снизить нелинейные эффекты в таком волокне [36]. Все это весьма благоприятно может сказаться на характеристиках ВОГ с подобным типом световода. Экспериментальные исследования показывают, что при использовании полового фотонно-кристаллического волокна в катушке ВОГ можно получить снижение эффекта Керра в 170 раз, эф-

фекта Шупа в 6.5 раз и эффекта Фарадея в 20 раз [37]. Для гироскопа «минимальной» конфигурации с длиной оптического волокна 235 м была достигнута чувствительность  $\sim 3.8 \times 10^{-6}$  рад/с, ограниченная практически лишь избыточным шумом источника излучения. Однако на сегодняшний день полое фотонно-кристаллическое волокно имеет высокие потери ( $\sim 12-20$  дБ/км) и стоимость (500–1000 \$ за 1 м). Есть надежда, что по мере развития технологий потери будут снижены: уже существует волокно с потерями  $\sim 1.2$  дБ/км и возможно дальнейшее их снижение до 0.1 дБ/км [38]. Проблема может быть решена усовершенствованием технологического процесса, т. к. потери в полое фотонно-кристаллическом волокне обусловлены рассеянием излучения вследствие шероховатости поверхности канала волновода.

Результаты исследования, изложенные в работе [37], внушают определённый оптимизм в плане перспектив разработки систем регистрации угловых сейсмических колебаний, поскольку открытая схема обработки выходного сигнала ВОГ позволяет использовать стандартные сейсмологические устройства сбора данных. В случае применения ВОГ с замкнутой схемой обработки выходного сигнала, представляющего собой цифровой сигнал, требуется создание отдельных устройств сбора данных, что снижает привлекательность использования оптических датчиков для сейсмологического сообщества. Таким образом, представляется перспективным создание ВОГ условно большого диаметра (десятки сантиметров) с катушкой из фотонно-кристаллического волокна.

## 5. Заключение

В статье рассмотрено современное состояние разработок сверхбольших ЛГ, ориентированных на высокоточные измерения в геодезии, сейсмологии и фундаментальной физике. Несмотря на то, что на данный момент эти приборы имеют беспрецедентную разрешающую способность, позволяющую регистрировать колебания вектора вращения Земли в реальном масштабе времени, для решения поставленных задач необходимо дальнейшее улучшение рабочих параметров БЛГ. Представлены основные перспективные направления исследований по повышению чувствительности и стабильности ЛГ. Рассмотрены также возможности использования ВОГ для высокоточных измерений в геодезии и сейсмологии и методы повышения их точностных характеристик.

В настоящей работе разд.1,2 выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-00693), разд.3,4,5 – при поддержке Министерства образования и науки (проект № 8.752.2014/К).

1. Stedman G.E. *Rep. Prog. Phys.*, **60** (6), 615 (1997).
2. Stedman G.E., Bilger H.R., Ziyuan L., Poulton M.P., Rowe C.H., Vetharaniam I., Wells P.V. *Austr. J. Phys.*, **46**, 87 (1993).
3. Schreiber K.U., Rowe C.H., Wright D.N., Cooper S.J., Stedman G.E. *Appl. Opt.*, **37** (36), 8371 (1998).
4. Rowe C.H., Schreiber U., Steven S.J., King B.T., Poulton M., Stedman G.E. *Appl. Opt.*, **38** (12), 2516 (1999).
5. Schreiber U., Velikoseltsev A., Klugel T., Stedman G.E., Schluter W. *Proc. Symp. Gyro Technology* (Stuttgart, 2001, pp.8.0–8.7).
6. Dunn R.W., Schreiber U., Steven S.J., King B.T., Poulton M., Stedman G.E. *Appl. Opt.*, **41** (9), 1685 (2002).
7. Hurst R.B., Stedman G.E., Schreiber K.U., Thirkettle R.J., Graham R.D., Rabeendran N., Wells J.-P.R. *J. Appl. Phys.*, **105** (11), 113115 (2009).
8. Schreiber K.U., Klugel T., Stedman G.E. *J. Geophys. Res.*, **108** (B2), 19 (2003).
9. Schreiber K.U., Velikoseltsev A., Rothacher M., Klugel T., Stedman G.E., Wiltshire D.L. *J. Geophys. Res.*, **109** (B6), B06405 (2004).
10. Schreiber K.U., Klugel T., Wells J.-P.R., Hurst R.B., Gebauer A. *Phys. Rev. Lett.*, **107** (17), 173904 (2011).
11. Stedman G.E., Li Z., Bilger H.R. *Appl. Opt.*, **34** (24), 5375 (1995).
12. McLeod D.P., Stedman G.E., Webb T.H., Schreiber U. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **88** (6), 1495 (1998).
13. Pancha A., Webb T.H., Stedman G.E., McLeod D.P., Schreiber K.U. *Geophys. Res. Lett.*, **27** (21), 3353 (2000).
14. Suryanto W., Igel H., Wassermann J., Cochard A., Schuberth B., Vollmer D., Scherbaum F., Schreiber U., Velikoseltsev A. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96** (6), 2059 (2006).
15. Bernauer M., Fichtner A., Igel H. *Geophysics*, **74** (6), WCD41 (2009).
16. Hadziioannou C., Gaebler P., Schreiber U., Wassermann J., Igel H. *J. Seismol.*, **16** (4), 787 (2012).
17. Schreiber K.U., Wells J.-P.R. *Rev. Sci. Instrum.*, **84** (4), 041101 (2013).
18. Cerveira M., Schuh H., Klugel T., Velikoseltsev A., Schreiber U. *Proc. Fifth IVS General Meeting «Measuring the Future»* (St. Petersburg, 2008).
19. Schreiber K.U., Gebauer A., Wells J.-P.R. *Opt. Lett.*, **38**, 3574 (2013).
20. Evans M., Ballmer S., Fejer M., Fritschel P., Harry G., Ogin G. *Phys. Rev. D*, **78**, 102003 (2008).
21. Cole G.D., Zhang Wei, Martin M.J., Ye Jun, Aspelmeyer M. *Nat. Photonics*, **7** (8), 644 (2013).
22. Батраков А.С. *Квантовые приборы* (Л.: Энергия, 1972).
23. Мазанько И.П., Молчанов М.И., Ярошенко Н.Г. *Радиотехника и электроника*, **19** (8), 1698 (1974).
24. Виноградов В.И. *Авиакосмическое приборостроение*, №9, 8 (2005).
25. Виноградов В.И. *Оптика и спектроскопия*, **111**, 1 (2011).
26. Галкин С.Л., Кружалов С.В., Николаев В.М., Пахомов Л.Н., Петрунькин В.Ю. *Письма в ЖТФ*, **2**, 150 (1976).
27. Dennis M.L., Diels J.-C.M., Lai M. *Opt. Lett.*, **16** (7), 529 (1991).
28. Lai M., Diels J.-C., Dennis M.L. *Opt. Lett.*, **17** (21), 1535 (1992).
29. Dennis M.L., Diels J.-C.M. *Appl. Opt.*, **33** (9), 1659 (1994).
30. Braga A., Diels J.-C., Jain R., Wang R.K.L. *Opt. Lett.*, **35** (15), 2648 (2010).
31. Sanders G.A., Szafraniec B., Strandjord L., Bergh R., Kaliszek A., Dankwort R., Lange C., Kimmel D. *OSA Technical Digest Series* (Williamsburg, OSA, 1997, vol.16, paper OWB1).
32. Honthaas J., Buret T., Paturel Y., Gaiffe T. *OSA Technical Digest Series* (Cancun, Mexico, OSA, 2006).
33. Velikoseltsev A., Schreiber K.U., Yankovsky A., Wells J.-P.R., Boronachin A., Tkachenko A. *J. Seismol.*, **16** (4), 623 (2012).
34. Jaroszewicz L.R., Krajewski Z., Solarz L., Teisseyer R. *Meas. Sci. Technol.*, **17** (5), 1186 (2006).
35. Jaroszewicz L.R., Krajewski Z., Kowalski H., Mazur G., Zinowko P., Kowalski J. *Acta Geophys.*, **59** (3), 578 (2011).
36. Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.S.J., Roberts P.J., Allan D.C. *Science*, **285**, 1537 (1999).
37. Dignonnet M., Blin S., Kim H.K., Dangui V., Kino G. *Meas. Sci. Technol.*, **18** (10), 3089 (2007).
38. Roberts P.J., Couny F., Sabert H., Mangan B.J., Williams D.P., Farr L., Mason M.W., Tomlinson A., Birks T.A., Knight J.C., Russell P.S. *Opt. Express*, **13** (1), 236 (2005).