

## ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

PACS 42.60.Da; 42.62.Eh; 91.10.Nj; 91.10.P-

Усовершенствованные кольцевые лазеры – новый измерительный инструмент для наук о Земле<sup>\*, \*\*</sup>

К.У.Шрайбер, Т.Клюгель, Ж.-П.Уэллс, Дж.Холдауэй, А.Гебауэр, А.Великосельцев

Обсуждается прогресс в технологии создания больших кольцевых лазеров, приведший к увеличению чувствительности к инструментальному вращению в три раза, до  $\delta\Omega = 1.2 \times 10^{-11}$  рад·с<sup>-1</sup>·Гц<sup>-1/2</sup>, что делает область изменения угловой скорости вращения Земли  $\Delta\Omega/\Omega \approx 10^{-9}$  доступной для измерений датчиком локального вращения. Наши исследования показали, что наибольший вклад в наблюдаемое отклонение рабочих характеристик датчика от расчетного предела, обусловленного дробовыми шумами, вносит микросейсмическая фоновая активность Земли. Нами была улучшена стабильность датчика, включая коррекцию дрейфовых эффектов, обусловленных «старением» газа в лазере, фиксацию нестабильностей масштабного коэффициента, вызванных вариациями атмосферного давления, и минимизацию вариаций температуры, связанных с соответствующими адиабатическими расширением и сжатием воздуха в непосредственной близости от устройства. Для этого мы использовали стабилизирующий давление сосуд размером чуть больше, чем кольцевой лазер, который охватывает все устройство. За счет непрерывного мониторинга оптической частоты в резонаторе кольцевого лазера и стабилизации масштабного коэффициента в замкнутой петлевой системе с сосудом, стабилизирующим давление, стало возможным расширение диапазона стабильности датчика от краткосрочной (1–3 дня) до хорошей среднесрочной (более 40 дней) стабильности и, возможно, даже далеко за эти рамки. Расширение диапазона стабильности открывает доступ к исследованию геофизических сигналов на существенно более низких частотах, чем наблюдались ранее при использовании кольцевых лазеров.

**Ключевые слова:** кольцевой лазер, стабилизация оптической частоты, вращение Земли, космическая геодезия.

## 1. Введение

Скорость вращения Земли и ориентация оси ее вращения в пространстве являются связующими величинами между наземной и небесной системами отсчета. До сих пор единственным способом определения скорости вращения Земли (как и вариаций ориентации оси ее вращения) с достаточной точностью было использование набора квазаров, рассматриваемых как объекты, формирующие внешний набор маркеров по отношению к соответствующим системам отсчета. В настоящее время точность лучше 10 мкс при измерении долготы дня и столь малая точность как 0.5 нрад (0.1 угл. мс) при измерении положе-

ния полюсов обычно достигаются с помощью сети VLBI-радиотелескопов и системы GPS [1, 2] благодаря сервисам Международной ассоциации геодезии. Функционирование такой большой сети требует значительного количества дорогостоящего оборудования и очень существенных усилий по поддержанию ее работоспособности. В каждой серии измерений регистрируются огромные объемы данных, что требует их физической транспортировки на большие расстояния для того, чтобы сделать возможным проведение процесса корреляции в центрах анализа данных. Латентность данных в сочетании с отсутствием непрерывных измерений наводит на мысль о необходимости развития дополнительных методов прецизионных оценок скорости вращения Земли, а также независимых методов измерения для выявления систематических ошибок (если они существуют).

Кольцевые лазеры потенциально могут использоваться для такого альтернативного метода измерения. Они широко применяются в авиационной навигации и могут обеспечить абсолютные измерения скорости вращения, т. е. безотносительные к внешней системе отсчета. Однако требования к таким устройствам чрезвычайно высоки и существующие коммерческие установки не могут им удовлетворить. Сформулируем эти требования:

- чувствительность к вращению 0.1 прада/с при интегрировании в течение  $\sim 1$  ч;
  - стабильность датчика  $10^{-9}$  в течение нескольких месяцев (необходимая, например, для измерения колебаний земной оси);
  - точность определения ориентации датчика  $\sim 1$  нрад, соответствующая полярному движению  $\sim 1$  см на полюсе.
- Это означает, что необходимо существенное улучшение технологии изготовления датчика по сравнению с

\* Доложена на конф. «Оптика лазеров», Россия, С.-Петербург, июль 2010 г.

\*\* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

**K.U.Schreiber, A.Gebauer.** Forschungseinrichtung Satellitengeodaesie, Technische Universitaet Muenchen, Geodaetisches Observatorium Wettzell, Sackenrieder Strasse 25, 93444 Bad Koetzing, Germany; e-mail: schreiber@fs.wettzell.de, gebauer@fs.wettzell.de

**T.Kluegel.** Bundesamt fuer Kartographie und Geodaesie, Geodaetisches Observatorium Wettzell, Sackenrieder Strasse 25, 93444 Bad Koetzing, Germany; e-mail: kluegel@fs.wettzell.de

**J.-P.Wells, J.Holdaway.** Department of Physics and Astronomy, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch 8140, New Zealand; e-mail: jon-paul.wells@canterbury.ac.nz, john.holdaway@pg.canterbury.ac.nz

**А.Великосельцев.** Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Россия, 197376 С.-Петербург, ул. проф. Попова, 5; e-mail: avelikoseltsev@gmail.com

имеющимся навигационным инструментарием для того, чтобы сделать возможным применение кольцевых лазеров в космической геодезии. Разработка большого кольцевого лазерного гироскопа Grossring (G) является одним из способов приближения к выполнению этих требований [3]. Такой гироскоп представляет собой кольцевой лазер, имеющий периметр 16 м, с гелием и неоном в качестве активной среды и во многом схож с системами, используемыми в авиационной навигации. Вместе с тем увеличенный до максимально возможного размера кольцевой лазер обеспечивает намного лучшую чувствительность к входным сигналам, чем навигационные кольцевые лазеры. Тщательная оптимизация механической стабильности корпуса кольцевого лазера G допускает уровень производительности, который позволяет удовлетворить приведенным выше требованиям. В настоящее время параметры G-лазера всего лишь на полпорядка величины меньше, чем нужно для достижения наших целей. Особую трудность представляет подходящая связь датчика с Землей, поскольку для столь чувствительного устройства даже очень слабые геофизические эффекты являются существенными и не могут быть проигнорированы при анализе данных.

## 2. Большие кольцевые лазеры

Двунаправленные кольцевые лазеры измеряют скорость вращения относительно инерциальной системы отсчета с помощью эффекта Саньяка. В пассивном интерферометре этот эффект возникает из-за того, что два идентичных световых пучка, распространяющихся по замкнутому контуру (огораживающему ненулевую площадь) по одинаковому пути, но в противоположных направлениях, будут иметь фазовый сдвиг, когда контур вращается [4]. Точное значение фазового сдвига зависит от размеров контура и пропорционально скорости вращения. Следовательно, при условии, что длина пути пучка внутри контура точно известна, измерение фазового сдвига дает точное значение скорости вращения датчика. Этот фазовый сдвиг пересчитывается в разность частот двух встречных световых пучков в тех случаях, когда свет распространяется по активной среде кольцевого резонатора [5]. Можно записать, что разность частот пучков

$$\Delta f = S |n \times \Omega| = \frac{4A}{\lambda L} |n \times \Omega|, \quad (1)$$

где  $n$  – нормаль к плоскости лазерных пучков;  $\Omega$  – угловая скорость вращения;  $S$  – масштабный коэффициент, определяемый площадью  $A$ , окруженной лазерными пучками, периметром резонатора  $L$  и оптической длиной волны  $\lambda$ . Поскольку наблюдаемая частота биений двух лазерных пучков пропорциональна скорости вращения, коэффициент  $S$  определяет разрешение измеряемой величины. Если масштабный коэффициент выбран существенно большим типичного значения для авиационного гироскопа, то в конечном счете будет получена чувствительность, достаточная для применения метода интерферометрии Саньяка в космической геодезии. Это и есть основная концепция проекта нашего кольцевого лазера. На практике обнаружено, что имеется компромисс между размером датчика и необходимой механической стабильностью всего устройства.

Резонатор кольцевого лазера G имеет форму квадрата с длиной стороны 4 м. Четыре поворотных зеркала, которые посажены на оптический контакт на концы больших стержней из ситалла, задают оптический резонатор. Эти стержни расположены на верхней стороне механически и термически стабильного массивного диска из ситалла с диаметром 4.2 м и толщиной 25 см. Стержни из ситалла скомпонованы в форме креста, чтобы сделать максимальной доступную площадь вложенного резонатора на опоре из ситалла. Путь пучка между четырьмя зеркалами проходит в трубах из нержавеющей стали, так что резонатор кольцевого лазера может быть сначала вакуумирован, а затем заполнен газовой смесью гелия и неона при низких давлениях, необходимых для получения генерации. Капилляр диаметром 6 мм и два электрода с поданным на них радиочастотным управляющим сигналом используются для генерации плазмы, которая обеспечивает непрерывную лазерную генерацию на длине волны 632.8 нм. Из-за механически жесткой конструкции, использования материала с низким тепловым расширением и оптического контакта зеркал в системе нет юстируемых элементов для подстройки лазерного резонатора. Главное преимущество этой жесткой конструкции состоит в гарантии того, что кольцевой лазер G не подвержен механическим нестабильностям, которые присущи любой механической юстировочной детали в такой чувствительной установке. На рис.1 показана полумонолитная ситалловая конструкция кольцевого лазера G.

Функционирование кольцевого лазера G вблизи порога генерации приводит к генерации одной продольной моды для каждого направления распространения излучения без использования каких-либо внутрирезонаторных устройств для селекции мод. Это позволяет получить режим одномодовой генерации несмотря на малую область дисперсии интерферометра (18.75 МГц). Добротность резонатора  $Q$  в последнее время была улучшена и теперь составляет  $\sim 3 \times 10^{12}$ , что приводит к снижению обусловленного дробовым шумом предела теоретического разрешения датчика до  $\delta\Omega = 1.2 \times 10^{-11}$  рад·с<sup>-1</sup>·Гц<sup>-1/2</sup>. Важной целью дизайна кольцевого лазера G было создание нового датчика вращения с настолько большим масштабным коэффициентом, насколько это осуществимо с доступными материалами. Ограничивающим фактором при построении датчика оказалась доступность больших блоков из ситалла, и поэтому размер кольцевого лазера G полностью определялся размером ситалловых блоков, которые могли быть использованы. Блоки из ситалла



Рис.1. Конструкция кольцевого лазера G в подземной лаборатории геодезической обсерватории г. Ветцель (Германия).

были изготовлены фирмой SCHOTT Glasworks Mainz (Германия), в то время как корпус кольцевого лазера G вместе с подземной лабораторией, необходимой для его размещения, был создан фирмой Carl Zeiss (Оберкохен, Германия). Другие очень важные особенности кольцевого лазера G включают в себя высокую степень симметрии конструкции. Все четыре плеча были сделаны идентичными, насколько это возможно, благодаря чему под влиянием изменений атмосферного давления кольцевой лазер сжимается или расширяется почти на одну и ту же величину в каждом из плеч. Такая же высокосимметричная конструкция использовалась для четырех стальных труб, образующих стороны квадратного резонатора кольцевого лазера. Наконец, все четыре зеркала, установленные в каждом из углов кольцевого лазера G, имели одинаковый радиус кривизны, равный 4 м. В результате мелкомасштабные однородные изменения температуры и атмосферного давления не вызывают дополнительного «рысканья» пучка в резонаторе.

Выходной сигнал типичного кольцевого лазера содержит компоненту на частоте биений двух распространяющихся навстречу друг другу в резонаторе пучков гелий-неонового лазера. Интерферограмма получается посредством совмещения двух лазерных пучков, «утекающих» через одно из зеркал с малым пропусканием, в светоделителе 1:1 и путем подачи сигнала биений, созданных двумя световыми волнами, на фотодетектор. В случае кольцевого лазера G (г. Ветцель), который размещен горизонтально на  $\sim 49.16^\circ$  северной широты, частота биений, созданных вращением Земли, составляет  $\sim 348.518$  Гц. Точное значение неизвестно по нескольким причинам. Из уравнения (1) видно, что частота Саньяка зависит как от масштабного коэффициента, так и от ориентации вектора нормали кольцевого лазера по отношению к мгновенной оси вращения Земли. В настоящее время ориентация установки относительно мгновенной оси вращения известна с точностью до 10 нрад, а неопределенность в масштабном коэффициенте, связанная с наличием активной среды в резонаторе кольцевого лазера, установлена с точностью хуже  $10^{-6}$ .

### 3. Применение гироскопа G в науках о Земле

Кольцевой лазер G работает в самом центре замкнутой и изолированной лаборатории, которая была специально спроектирована для минимизации теплового потока вокруг установки. В камере кольцевого лазера нет рассеивающих тепло устройств, так что в результате суточные изменения температуры вокруг лазерного резонатора не превышают 5 мК, причем эти изменения происходят либо вследствие адиабатического расширения или сжатия за счет вариаций атмосферного давления, либо вследствие годового теплового цикла, обусловленного сменой времен года. Изменения масштабного коэффициента, вызванные вариациями атмосферного давления и температуры, активно контролируются посредством стабилизирующего давления сосуда, входящего в состав кольцевого лазера.

На рис.2 проведено сравнение разрешений датчика при изменении температуры для типичной серии измерений с помощью кольцевого лазера G без стабилизации (в 2006 г.) и со стабилизацией (в 2010 г.) давления. Видно, что флуктуации атмосферного давления (2006 г.) вызывают флуктуации измеряемой скорости вращения Земли, которые обусловле-

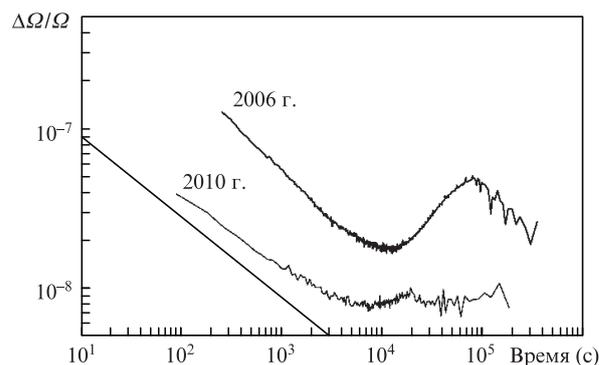


Рис.2. Теоретический предел чувствительности, обусловленный дробовым шумом кольцевого лазера G, и экспериментально полученное разрешение датчика в двух его разных конфигурациях (2006 и 2010 гг.).

ны небольшими изменениями масштабного коэффициента кольцевого лазера. Поскольку результирующие изменения фазы обратного рассеяния также влияют на затягивание частоты двух оптических пучков в резонаторе, полный эффект хорошо выражен в полосе частот флуктуаций атмосферного давления (от нескольких часов до примерно трех дней во временном представлении на рис.2). Данные, полученные в 2010 г. (с сосудом, стабилизирующим давление), не содержат этих индуцированных давлением эффектов. Прямая линия на рис.2 показывает теоретический предел, обусловленный дробовым шумом, для резонатора кольцевого лазера G. Существенное различие между данными измерений в 2006 и 2010 гг. появляется вследствие улучшения добротности резонатора Q за прошедшие четыре года, что в большей степени было обусловлено установкой в июле 2009 г. новых зеркал кольцевого лазера со значительно лучшей суперполировкой.

Кольцевые лазеры, жестко связанные с Землей, способны измерять вклады различных геофизических сигналов, таких как микросейсмическая активность, вызванная флуктуациями давления на дне моря под действием океанских волн, наклоны из-за приливов/отливов земной тверди, обусловленные гравитационным притяжением Луны, которое деформирует земную кору [6], а также каждодневное движение полюсов [7]. После удаления двух последних сигналов из временной серии измерений, выполненных нашим кольцевым лазером, получаем по-

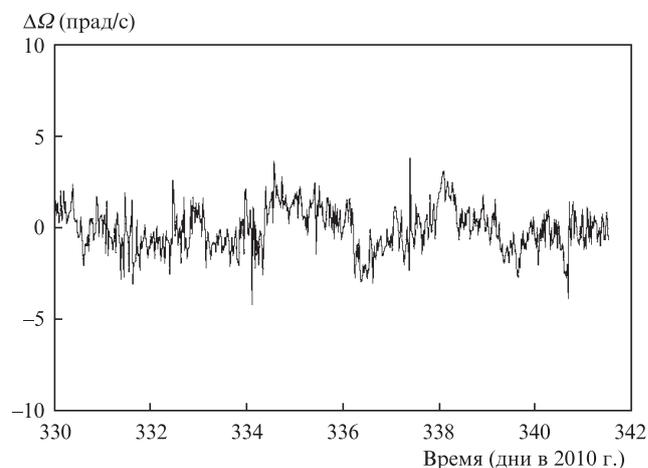


Рис.3. Пример временной серии измерений скорости вращения Земли кольцевым лазером G в конфигурации 2010 г.

следовательность, представленную на рис.3. Большая часть высокочастотного шума, содержащегося в этой последовательности, может быть приписана микросейсмической фоновой активности. Обычно полагается, что малые вариации на низких частотах, заметные на рис.3, обусловлены медленными изменениями обратного рассеяния, но до настоящего времени это точно не установлено. Такие низкочастотные сигналы являются причиной поведения типа flicker floor при работе стабилизированного по давлению кольцевого лазера (рис.2).

Тот факт, что уровни шума, созданного разными погодными условиями, ограничивают разрешение наших приборов, хорошо демонстрирует разброс данных, измеренных кольцевым лазером G. На рис.4 показан пример разброса данных, соответствующих тем же дням измерений, что и на рис.3. Имеются два типа возмущений: относительно короткие и интенсивные выбросы шума и более медленно изменяющиеся возмущения. Достаточно резкие и короткие выбросы обусловлены активностью тяжелых транспортных средств, с помощью которых выполнялись строительные работы в геодезической обсерватории г. Ветцель. Более медленно изменяющиеся шумы вызваны изменением погоды, которое в течение длительных периодов приводит к типичным изменениям шума микросейсмического фона.

Столь низкий уровень шума и экстремальное разрешение больших кольцевых лазеров позволяют использовать их для обнаружения сигналов вращения, вызванных удаленными землетрясениями. Амплитуды этих сейсмических вращений крайне малы (менее  $10^{-12}$  рад/с, или  $5.7 \times 10^{-11}$  град/с), и их невозможно измерить непосредственно обычными методами. Большие кольцевые лазеры обеспечивают точную регистрацию таких вращательных флуктуаций в реальном времени, что дает возможность измерения ряда новых сейсмологических параметров. Для измерения и мониторинга этих параметров специальная измерительная система GEOsensor была разработана и введена в эксплуатацию в 2005 г. [8]. GEOsensor является автономным измерительным комплексом для сейсмических и геофизических исследований, который состоит из нескольких основных узлов. Эти узлы включают в себя одноосный кольцевой лазерный гироскоп с большим периметром, обычный трехосный широкополосный сейсмометр, измеритель наклонов для мониторинга изменений ориентации датчика на основе кольцевого лазера и GPS-станцию, обеспечивающую информацию о времени

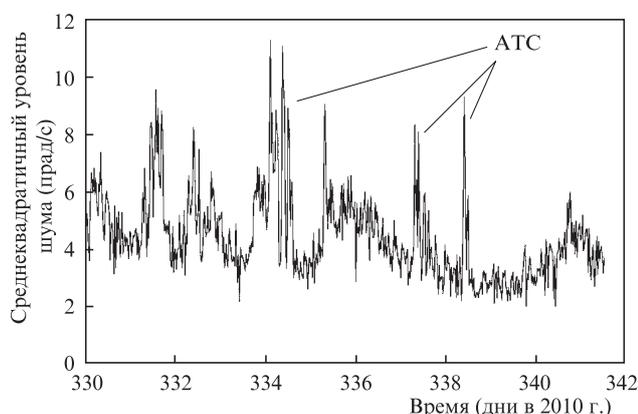


Рис.4. Фоновый шум от Земли, измеренный кольцевым лазером. АТС – резкие выбросы, обусловленные активностью тяжелых транспортных средств.



Рис.5. Конструкция узла с кольцевым лазером в GEOsensor. Для стабильности гетеролитическая структура жестко крепится на бетонной плите толщиной 30 см.

и эталонных частотах для системы сбора и обработки данных. На рис.5 показана структура узла с кольцевым лазером в GEOsensor.

Узел кольцевого лазера с квадратным резонатором в GEOsensor состоит из четырех труб из нержавеющей стали длиной 1.6 м, которые жестко прикреплены к угловым коробкам, содержащим держатели зеркал. Как и в кольцевом лазере G, четыре суперзеркала с высокими коэффициентами отражения формируют замкнутый путь в форме квадрата, который проходят лазерные пучки. Кольцевой лазер имеет модульную конструкцию, например он может быть масштабирован за счет использования более длинных труб в предположении, что другие компоненты лазера остались неизменными. Эта полезная концепция позволяет в любой момент времени подстроить характеристики кольцевого лазера, такие как его размер и точность измерений, к условиям и требованиям конкретного места, где используется прибор [9].

Хотя кольцевые лазеры могут с успехом обнаруживать далеко удаленные и среднеудаленные сейсмические события, для измерения близких сейсмических событий принято выбирать другие типы оптических интерферометров. Близкие сейсмические события характеризуются очень сильными сейсмическими волнами, появляющимися в непосредственной окрестности эпицентра землетрясения. В этом случае амплитуды как линейного, так и вращательного движения много больше тех, которые наблюдаются в случае телесеизмических (удаленных от места регистрации) событий. Для этих близких событий линейная скорость может варьироваться 0.1 до 1 м/с, в то время как изменения скорости вращения могут находиться в диапазоне 0.0005–15 град/с [10, 11]. Из-за очень сложной структуры сейсмических сигналов в ближней зоне для правильной оценки характеристик сейсмической волны нужны все три компоненты линейного и вращательного движения. Поэтому применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) для детектирования сильных вращательных волн представляется весьма перспективным, в частности из-за низкой себестоимости и малого размера этих датчиков. Использование этих гироскопов позволяет построить трехосную измерительную систему, которая способна регистрировать три компоненты вращательного движения одновременно с тремя компонентами линейного движения, измеряемыми стандартным сейсмоме-

тром. Систему, основанную на ВОГах, можно легко переместить и установить без специализированной инфраструктуры, что делает возможным ее использование для мобильных сейсмических измерений.

В отличие от частоты биений кольцевого лазера, выходным сигналом волоконно-оптического интерферометра является сдвиг фаз  $\Delta\varphi$  двух встречных световых пучков, который прямо пропорционален скорости вращения  $\Omega$ :

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega, \quad (2)$$

где  $R$  – средний радиус катушки;  $L$  – полная длина волокна;  $\lambda$  – длина волны источника света;  $c$  – скорость света. Преимущество волоконной технологии состоит в том, что можно увеличить масштабный коэффициент интерферометра за счет увеличения числа катушек с волокном, которые формируют резонатор для распространяющегося света (вследствие увеличения длины волокна). Вообще говоря, в современных волоконно-оптических датчиках вращения используются две схемы обработки выходного сигнала: по разомкнутому и по замкнутому циклу. Схема с разомкнутым циклом обеспечивает высокую линейность выходного сигнала при почти нулевой скорости вращения, в то время как в сенсорах с замкнутым циклом достигается более высокая стабильность сигнала в широком диапазоне изменения сигнала на входе. Последняя схема довольно сложна из-за наличия цепи обратной связи, обнуляющей фазу, но может обеспечивать точность, сравнимую с точностью традиционных кольцевых лазеров [12]. С другой стороны, ВОГи с разомкнутым циклом хорошо подходят для сейсмологии из-за их высокой точности при низких скоростях вращения, более простого дизайна и наличия аналогового выхода сигнала.

Разрешение ВОГов с разомкнутым циклом ограничено случайным блужданием, которое представляет собой сочетание различных шумов в датчике. Основными источниками шума являются дробовой шум, нестабильность мощности лазера и шум детектора. Эти шумы могут быть минимизированы за счет применения лучшего источника света, а также использования схем подавления шумов и обеспечения стабилизации детектора. Обычная граница точности измерения дрейфовой скорости для современных ВОГов с разомкнутым циклом лежит в пределах 0.1–1 град/ч (шум выходного сигнала 0.0015 – 0.15 град/ч<sup>1/2</sup>) [13]. Это достаточно для того, чтобы покрыть верхнюю часть диапазона амплитуд сейсмического вращения, обусловленных близкими событиями.

Для проверки возможности измерения сейсмических вращений с помощью ВОГа, нашей исследовательской группой был проведен ряд экспериментов. Первый прототип большого волоконного интерферометра (G-FORS) был построен в геодезической обсерватории г. Ветцель в Германии в 2006 г. Он состоит из волокна длиной 2.2 км, обернутого вокруг опорной плиты радиусом 2.1 м кольцевого лазера G. Идеей этой простой конструкции было увеличить масштабный коэффициент волоконного интерферометра и воспользоваться преимуществом очень стабильных внешних условий внутри лаборатории, которые приводят к стабильной работе самого ВОГа. Ввод в эксплуатацию прибора показал, что большой ВОГ имеет приемлемую точность по сравнению с кольцевым лазером G (рис.6). Уровень шума G-FORS составил примерно 30 рад/с.

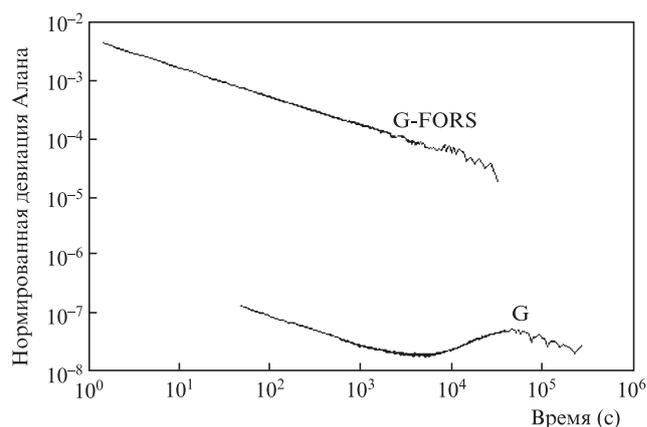


Рис.6. Сравнение разрешений размещенных вместе пассивного (G-FORS) и активного (G) больших интерферометров Саньяка.

Более поздние испытания промышленных стандартных ВОГов с умеренной точностью также продемонстрировали возможность измерения с хорошей точностью вращательных сигналов, эквивалентных производимым близкими землетрясениями.

#### 4. Перспективы на будущее

Современные большие кольцевые лазеры позволяют детектировать различные геофизические и сейсмологические эффекты. Важно отметить, что эти приборы в настоящее время являются единственными устройствами, которые могут непосредственно измерять геофизические и сейсмологические эффекты в одной точке поверхности. Дальнейшее совершенствование этих датчиков неминуемо расширит время их стабильной работы, что может быть достигнуто путем стабилизации условий эксплуатации кольцевых лазеров и снижения эффектов обратного рассеяния. Последнее можно реализовать с помощью специальных методов обработки данных и регистрации дополнительных параметров работы кольцевого лазера. Совместная работа VLBI и больших кольцевых лазеров позволит получать практически в режиме реального времени точные оценки продолжительности дня и ориентационных характеристик Земли.

Сейсмические вращения могут быть продетектированы большими кольцевыми лазерами (особенно в случае телесеизмических событий), а также измерительными системами на основе ВОГов, предназначенных для мобильной записи близкого сильного движения. Современная сейсмическая сеть может быть расширена за счет использования базовых станций, оснащенных большими кольцевыми лазерами, а также модулями на основе ВОГов, для полевых кампаний.

#### 5. Выводы

Проект кольцевого лазера, объединивший усилия Университета Кентербери (Новая Зеландия), Технического университета Мюнхена (Германия) и Федерального ведомства картографии и геодезии (Германия), более чем за два десятилетия привел к успешному созданию серии из восьми кольцевых лазеров разного размера и качества. На сегодняшний день кольцевой лазер G (Германия) стал самым стабильным и лучше всего работающим гироскопом на Земле. Хотя его точность примерно на четыре по-

рядка уступает точности гироскопа Gravity Probe B (после постобработки  $\sim 8 \times 10^{-16}$  град/с [14]), работающего в условиях микрогравитации околоземной орбиты, он, безусловно, превосходит другие гироскопы, такие как датчики вращения на основе эффекта Джозефсона в интерферометрах со сверхтекучим  $^4\text{He}$ , имеющие разрешение  $\sim 8 \times 10^{-9}$  рад $\cdot$ с $^{-1}$ ·Гц $^{-1/2}$  [15]. Густавсон с соавторами сообщили о получении краткосрочной чувствительности (время интегрирования 1 с)  $\sim 6 \times 10^{-10}$  рад/с для своего интерферометра на холодных атомах [16]. Однако, несмотря на существенный прогресс, достигнутый за последние годы в методах детектирования вращения, ни одна из альтернативных концепций измерения не позволила провести измерения медленно меняющихся геофизических эффектов, действительно возникающих при прочном закреплении устройства на Земле. Хотя устройства, основанные на гелий-неоновых кольцевых лазерах, в конечном счете технически ограничены добротностью  $Q$  резонатора и, следовательно, качеством суперполировки зеркал, предельные возможности интерферометрии Саньяка как нового метода прецизионного измерения скорости вращения Земли в конце концов представляются тесно связанными с вопросом о том, насколько хорошо прибор может быть закреплен на Земле, чтобы обеспечить измерение глобальной величины локальным датчиком.

Настоящая работа была поддержана Федеральным ведомством картографии и геодезии (Bundesamt fuer Kartographie und Geodaesie) (Германия) и Немецким научно-исследовательским сообществом (Deutsche Forschungsgemeinschaft) в рамках контракта FOP-584, а также фондом Марседена (Marsden fund) Королевского общества Новой Зеландии (исследовательский контракт UOC106). А.Великосельцев признателен за поддержку

Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

1. Haas R. *IVS 2006 General Meeting Proc.* (Concepcion, Chile, 2006, pp 316–319).
2. Rothacher M., Beutler G., Weber R., Hefty J. *J. Geophys. Res.*, **106** (B7), 13711 (2001).
3. Schreiber K.U., Klügel T., Velikoseltsev A., Schlüter W., Stedman G.E., Wells J.-P.R. *Pure Appl. Geophys.*, **166**, 1485 (2009).
4. Sagnac G. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*, **157**, 708 (1913).
5. Stedman G.E. *Rep. Prog. Phys.* **60**, 615 (1997).
6. Schreiber K.U., Stedman G.E., Klügel T. *J. Geophys. Res.*, **108** (B2), 2132 (2003); doi:10.1029/2001JB000569.
7. Schreiber K.U., Velikoseltsev A., Rothacher M., Klügel T., Stedman G.E., Wiltshire D.L. *J. Geophys. Res.*, **109** (B6), B06405 (2004); doi:10.1029/2003JB002803.
8. Schreiber K.U., Igel H., Cochard A., Velikoseltsev A., Flaws A., Schuberth B., Drewitz W., Müller F., in *Observation of the Earth System from Space* (Heidelberg: Springer-Verlag, 2006).
9. Schreiber K.U., Hautmann J.N., Velikoseltsev A., Wassermann J., Igel H., Otero J., Vernon F., Wells J.-P.R. *Bull. Seismol. Soc. Am., Special Issue on Rotational Seismology*, **99** (2B), 1190 (2009); doi: 10.1785/0120080171.
10. Spudich P., Fletcher J.B. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **98** (4), 1898 (2008).
11. Graizer V. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **96**, 2090 (2006).
12. Divakaruni S., Sanders S. *Abstracts 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Cancun, Mexico, Optical Society of America, 2006, paper MC2).
13. Merlo S., Norgia M., Donati S., in *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology* (New York: John Wiley & Sons, 2002).
14. <http://einstein.stanford.edu>.
15. Joshi A. (adityaj@berkeley.edu); private communications.
16. Gustavson T.L., Landragin A., Kasevich M.A. *Classical Quantum Gravity*, **17**, 2385 (2000).