

Кольцевые лазерные гироскопы в подземных лабораториях Гран-Сассо*

Н.Беверини, А.Бастии, Ф.Боси, Г.Карелли, Д.Чампини, А.Ди Вирджилио, И.Ферранте, Ф.Фусо, У.Джакомелли, Э.Макчиони, А.Симонелли, Ф.Стефани, Г.Террени, К.Алтуччи, А.Порцио, Р.Велотта

GINGER (Gyroscopes IN GEneral Relativity – гироскопы в общей теории относительности) – это предлагаемый эксперимент по измерению в наземной лаборатории, при помощи системы кольцевых лазерных гироскопов большого размера, эффектов, предсказываемых общей теорией относительности: гравиелектрического эффекта (известного также как эффект Лензе–Тирринга) и гравимагнитного эффекта (или эффекта Де Ситтера). В качестве места проведения эксперимента выбрана Национальная лаборатория Гран-Сассо (Италия) – подземная лаборатория на глубине более тысячи метров, хорошо защищенная от поверхностных возмущений. GINGERINO – это прототип указанного эксперимента на основе квадратного кольцевого лазера со стороной 3.6 м, предназначенный для исследования уровня шума в выбранном месте основного эксперимента. Эксперимент GINGERINO уже выполнил эту задачу, продемонстрировав преимущество подземного размещения. Не достигнув чувствительности, достаточной для фундаментальных физических измерений, он, тем не менее, предоставил важные данные для геофизики и сейсмологии. Высокая чувствительность в полосе частот, составляющей доли герца, и расположение прибора в сейсмически активной области сделали его пригодным для сейсмологических исследований. Прибор зафиксировал последовательность землетрясений в Центральной Италии осенью 2016 г. и многие другие события как в ближней, так и в дальней зоне. Анализ непрерывной работы в течение 90 дней показал, что его коэффициент использования выше 95%, а предел квантового дробового шума порядка 10^{-10} рад·с⁻¹·Гц^{-1/2}.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, эффект Саньяка, эффект Лензе–Тирринга, продолжительность суток, движение полюсов, ротационная сейсмология.

1. Введение

В 1913 г. Ж.Саньяк показал [1], что свет, проходящий по замкнутой траектории в противоположных направлениях, позволяет измерять скорость вращения кольцевой световедущей структуры по отношению к инерциальной системе отсчета. Несколько лет спустя А.Майкельсон [2] смог измерить скорость вращения Земли с помощью очень большого интерферометра размером порядка ста метров.

Эффект Саньяка легко объяснялся классической моделью. Пусть многоугольный кольцевой интерферометр площадью A (в котором два пучка света направляются зеркалами навстречу друг другу), вращается с угловой частотой Ω в инерциальной системе отсчета. Из-за вращения резонатора пучок, распространяющийся в направлении вращения, будет тратить больше времени на прохождение замкнутого оптического пути, а встречный пучок меньше. Это приводит к разности фаз $\Delta\phi = 8\pi\Omega A \cos\theta / \lambda c$,

где λ – длина волны излучения; c – скорость света; θ – угол между осью вращения и осью оптического пути. Саньяк считал, что этот результат опровергает теорию относительности, но это не так! Строгий подход в рамках общей теории относительности [3] подтвердил результат Саньяка.

Изобретение лазера обеспечило подходящий источник когерентного излучения для такого рода применений. Кроме того, можно изменить схему работы устройства, вставив лазерную активную среду внутрь кольцевого оптического резонатора. В этом случае разность оптических длин пути при обходе контура светом в двух противоположных направлениях преобразуется в разность частот лазерного излучения, которую можно измерить путем совмещения двух пучков на фотодетекторе. Частота биений, называемая частотой Саньяка, линейно связана с угловой частотой вращения Ω выражением $f_{\text{Sagnac}} = 8\pi\Omega A \cos\theta / \lambda p$, где p – длина кольцевого оптического пути [3].

Первая работа, посвященная кольцевым лазерным гироскопам на основе эффекта Саньяка, была опубликована еще в 1963 г. [4]. Это стало началом интенсивных технологических разработок. Поскольку оптический гироскоп не имеет движущихся механических частей или больших пробных масс, он принципиально не чувствителен к поступательному движению или к гравитационному полю, что было идеальным решением для инерциальной навигации.

Промышленные кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ) обычно представляют собой He–Ne-лазеры, работающие в режиме одной продольной моды на длине волны 632.8 нм и предназначенные для аэронавигационных при-

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

N.Beverini, A.Basti, G.Carelli, D.Ciampini, I.Ferrante, F.Fuso, U.Giacomelli, E.Maccioni, F.Stefani. Università di Pisa and INFN – Sezione di Pisa, 56127 Pisa, Italy; e-mail: nicolo.beverini@unipi.it
F.Bosi, A.Di Virgilio, A.Simonelli, G.Terreni. INFN – Sezione di Pisa, 56127 Pisa, Italy
A.Porzio. CNR-SPIN, INFN – Sezione di Napoli, 80126 Napoli, Italy
C.Altucci, R.Velotta. Università di Napoli «Federico II» and INFN – Sezione di Napoli, 80126 Napoli, Italy

Поступила в редакцию 24 октября 2018 г., после доработки – 20 ноября 2018 г.

ложений. Лазерные гироскопы, используемые для инерциальной навигации, обычно имеют площадь менее 0.02 м^2 , соответствующую периметру не более 30 см. Наилучшая чувствительность составляет около $5 \times 10^{-7} \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ с долговременным дрейфом до 0.0001 град/ч ($\sim 0.5 \text{ нрад/с}$). Набор из трех взаимно ортогональных колец обеспечивает полную трехмерную вращательную информацию. Это хорошо подходит для навигации, но недостаточно для других приложений в геодезии, сейсмологии и науках о Земле в целом.

Проблемой лазерного гироскопа является захват мод между встречными пучками, обусловленный обратным рассеянием на всех внутрирезонаторных оптических поверхностях, связывающих оба пучка. Как следует из уравнения связанных осцилляторов, это приводит к тому, что при низких значениях Ω обе частоты колебаний в конечном итоге привязываются друг к другу. Соответствующая мертвая зона обычно намного превышает потенциальную чувствительность устройства. Проблема была до некоторой степени решена посредством механического возмущения, вызывающего вибрацию гироскопа.

С конца двадцатого века, благодаря прогрессу в производстве зеркал, появилась возможность строить большие кольцевые лазеры из дискретных оптических элементов. Поскольку чувствительность увеличивается линейно с размером резонатора, а обратное рассеяние обратно пропорционально его четвертой степени [3], то при использовании зеркал с отражательной способностью $\sim 99.999\%$ в оптическом лазерном резонаторе с площадью кольца более 0.5 м^2 скорости вращения Земли уже достаточно, чтобы разделить частоты двух встречных пучков. Современный рекорд точности достигнут с помощью Gross Ring (G) в Ветцеле (Германия) – квадратного кольцевого лазера со стороной 4 м, построенного на монолитном блоке из стеклокерамики Zerodur, так что стабильность геометрии кольца обеспечивается чисто пассивным образом. Его точность превышает несколько долей пикорадиана в секунду [5].

Чтобы улучшить чувствительность, необходимо увеличить размер кольца. Однако конструкцию резонатора G невозможно масштабировать на большие размеры. Более того, один гироскоп будет измерять только одну компоненту вектора угловой скорости вращения. Для получения полной информации необходимы по крайней мере три кольца с различной угловой ориентацией.

2. Проект GINGER: проверка общей теории относительности и геодезические приложения

Предложение о создании системы КЛГ с достаточно большой чувствительностью для наблюдения в наземной лаборатории эффектов, предсказываемых общей теорией относительности, было высказано в 2012 г. [6] и обновлено в 2017 г. [7]. Оно получило сокращенное наименование GINGER (гироскопы в общей теории относительности). Проект предусматривает размещение установки в Национальной лаборатории Гран-Сассо (Италия) – подземной лаборатории на глубине более тысячи метров, хорошо защищенной от поверхностных возмущений.

Эффекты общей теории относительности связаны с деформацией локальной метрики, обусловленной гравита-

ционным полем Земли (эффект Лензе–Тирринга, или геоэлектрический эффект) и с угловым моментом Земли (эффект де Ситтера, или геомагнитный эффект). Их наблюдение требует инструментальной точности более 10^{-14} рад/с . Уровень точности лучше, чем несколько единиц на 10^{-14} рад/с , также позволяет измерять основные геодезические параметры, связанные с вращением Земли – продолжительность суток (ПС) и смещение полюсов – и получать информацию о корреляции между вращающейся системой отсчета, связанной с Землей, и инерциальной космической системой отсчета. Эта информация могла бы объединять данные о ПС, полученные от Международной службы вращения Земли (IERS), с результатами комплексной обработки результатов наблюдения удаленных на миллиарды световых лет квазаров при помощи интерферометров с очень большой базой (ИОББ). Стоит отметить, что ИОББ дают очень точную длительность сидерического дня, но не обеспечивают информацию о текущей скорости вращения Земли в течение суток, которую можно получить с помощью КЛГ. Данные КЛГ могут затем успешно объединяться с данными ИОББ. Отметим, что нынешний уровень чувствительности гироскопа G не так уж далек от требуемого. Действительно, в работе [8] было продемонстрировано, что даже в нынешнем состоянии использование данных G в ряде случаев снижает погрешность подгонки.

Для получения полной информации о скорости вращения Земли (длина суток) и ориентации оси вращения (движение полюсов и приливные волны) требуется три КЛГ с пересекающимися осями. Разница между угловой скоростью вращения Земли, измеренной ИОББ в инерциальной космической системе и КЛГ во вращающейся вместе с Землей системе отсчета, даст возможность оценить релятивистские вклады [9]. Согласно проекту [7], первый кольцевой лазер будет ориентирован параллельно оси вращения Земли, так что частота Саньяка будет максимальной. В этом случае ошибка в ориентации в первом порядке не влияет на точность измерения скорости вращения, что позволяет достичь относительной точности около 10^{-10} при ошибке ориентации $\sim 10 \text{ мрад}$. Два других кольца будут ориентированы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, чтобы упростить метрологию измерения относительного угла между КЛГ. Эти два КЛГ будут определять ориентацию оси Земли по отношению к небесной инерциальной системе координат, выдавая компоненты движения полюсов и вклада земных приливов в направлениях север–юг и запад–восток. Подчеркнем, что для геодезии информация о суточной эволюции положения полюсов имеет в данном случае первостепенное значение, поскольку она не может быть получена с помощью ИОББ.

3. GINGERINO: сейсмологические приложения

Первым шагом в указанном направлении было создание в Национальной лаборатории Гран-Сассо установки GINGERINO – испытательного кольца со стороной 3.6 м для проверки выбранного места будущего эксперимента с точки зрения сейсмического шума. Подробное описание установки и совмещенной с ней сейсмологической станции приведено в [10]. Исходно задуманный как вспомогательный, данный прибор, благодаря своей чувствительно-

сти и расположению вблизи сейсмически активной зоны, уже зарекомендовал себя как мощный инструмент для сейсмологии.

В сейсмологии сдвиг и деформация земной коры обычно измеряются инерционным сейсмометром и тензодатчиками. Однако, полное описание движений земной коры требует также получения информации и о вращении. В частности, совмещенные данные трансляционных и вращательных наблюдений в разных точках поверхности позволяют оценить локальное подземное распределение скоростей, представляющее интерес для геофизических исследований. Вращательные сигналы, индуцированные сейсмическими волнами, имеют довольно малую амплитуду. Сильная сейсмическая волна с линейным ускорением 1 мм/с^2 создает амплитуду скорости вращения около 10^{-7} рад/с , а микросейсмический вращательный фоновый шум (около 0.1 Гц), как ожидается, будет меньше 10^{-10} рад/с . Большие КЛГ продемонстрировали непревзойденный уровень чувствительности. Наиболее впечатляющие данные были собраны на установке G, но и GINGERINO продемонстрировал очень интересные результаты. Из-за термической стабильности окружающей среды (GINGERINO находится в самой отдаленной части пещеры) он демонстрирует отличную долговременную стабильность, даже без активной стабилизации. На его раме смонтирован высокочувствительный двухосный измеритель наклона и широкополосный сейсмометр. Прибор продемонстрировал замечательную надежность, непрерывно анализируя данные в течение почти 100 дней в 2017 г. в автономном режиме без посещения персоналом с коэффициентом использования более 90% и относительной стабильностью в течение суток лучше 10^{-6} [11]. Продолжаются усовершенствования аппарата, так, недавно был установлен новый набор зеркал с лучшими рабочими характеристиками и была усовершенствована процедура анализа с привлечением результатов нашей предыдущей работы по технологии фильтра Кальмана [12] с использованием аналитического подхода. На рис.1 новые результаты анализа [13] сравниваются со старыми. Помимо уменьшения амплитуды шума, стоит отметить сдвиг по частоте Саньяка вверх в соответствии с ожидаемым значением, что демонстрирует эффективность процедуры коррекции затягивания частоты из-за обратного рассеяния лазерного излучения на зеркалах резонатора [3].

Достигнутые рабочие характеристики хорошо подходят для сейсмологических наблюдений. Осенью 2016 г.

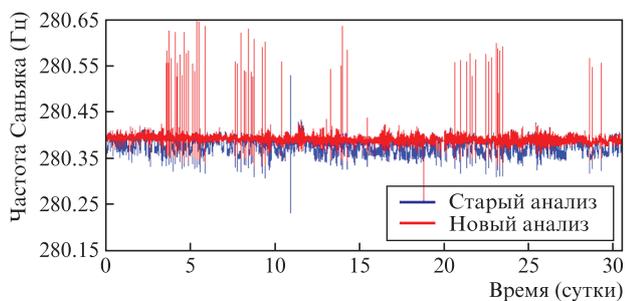


Рис.1. Сравнение старого и нового анализа данных в течение 30 дней. Запись начинается 16 мая 2018 г. в 0:00:00 по UTC. Измеренная частота Саньяка по сравнению со значением, ожидаемым для КЛГ, горизонтально расположенного на широте Лаборатории Гран-Сассо ($42^\circ 25'$), соответствует наклону GINGERINO в северном направлении ($\sim 1.5 \text{ мрад}$). Цветные варианты рис.1–3 помещены на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

GINGERINO обнаружил сейсмическую последовательность в Центральной Италии, подробно описанную в [14], обеспечив полезную информацию о локальных профилях скорости сейсмических волн и определение обратного азимута волн. Это был первый опыт измерения вращательных сейсмических движений и анализа землетрясений в ближней зоне с помощью КЛГ.

Наблюдения на телесеismicкой дистанции для GINGERINO являются обычными. При нынешнем состоянии чувствительности мы можем обнаружить любое землетрясение с магнитудой не ниже 7, происходящее на глубинах не более 20 км. Самым сильным зарегистрированным событием в истории прибора является землетрясение с моментной магнитудой MW 8.1, которое произошло в Техуантепеке (Мексика) 8 сентября 2017 г.

В практике вращательной сейсмологии принято считать, что для описания распространения генерируемых сейсмических волн при больших и отдаленных событиях справедливо приближение плоской волны. В этом приближении с помощью нашей установки, измеряющей скорость вращения вокруг вертикальной оси, мы можем напрямую сравнивать приходы волн Лява, зафиксированные датчиком вращения и широкополосным сейсмометром, чтобы определить направление волнового поля и фазовую скорость волны Лява на месте наблюдения. Более длинные поверхностные волны (период $T > 50 \text{ с}$) возбуждаются крупными событиями на малой глубине, которые не столь часты; по этой причине каждое такое событие важно для сейсмологических исследований.

Как уже отмечалось в [15], при анализе таких крупных событий на аналогичной установке (кольцо G в Ветцеле), можно наблюдать цуги волн Лява, которые распространяются по поверхности Земли вдоль большого круга, соединяющего эпицентр со станцией. В нашем случае мы используем вейвлет-когерентность, чтобы выделить (рис.2) область высокой когерентности в диапазоне ожидаемых периодов (120–280 с), что соответствует ожидаемым приходам цугов волн Лява G1, G2 и G3 (то есть прямой волны, а также волны, приходящей по дуге большо-

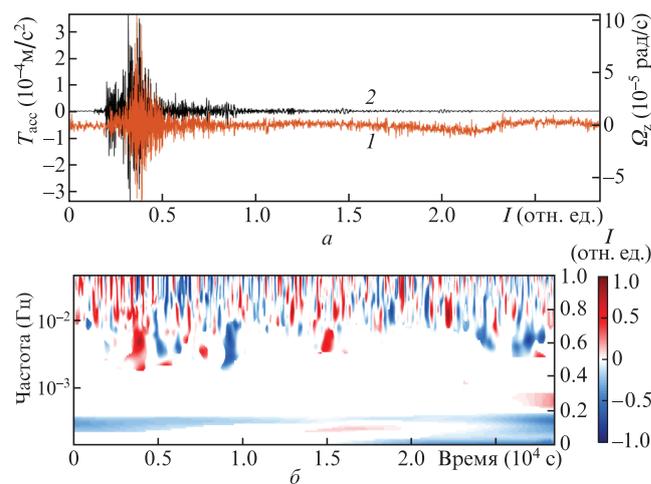


Рис.2. Цуги волн Лява, наблюдавшиеся после землетрясения MW 8.1 Тегуантепека с помощью GINGERINO и с помощью совмещенно с ним широкополосного сейсмометра: наложение временных зависимостей вертикальной компоненты угловой скорости Ω_z (1) и поперечного ускорения T_{acc} (2) при заданном теоретическом значении обратного азимута $\text{ThBAZ} = 305.0^\circ$ (a), вейвлет-когерентность указанных сигналов, демонстрирующая цуги волн Лява G1, G2 и G3 (б).

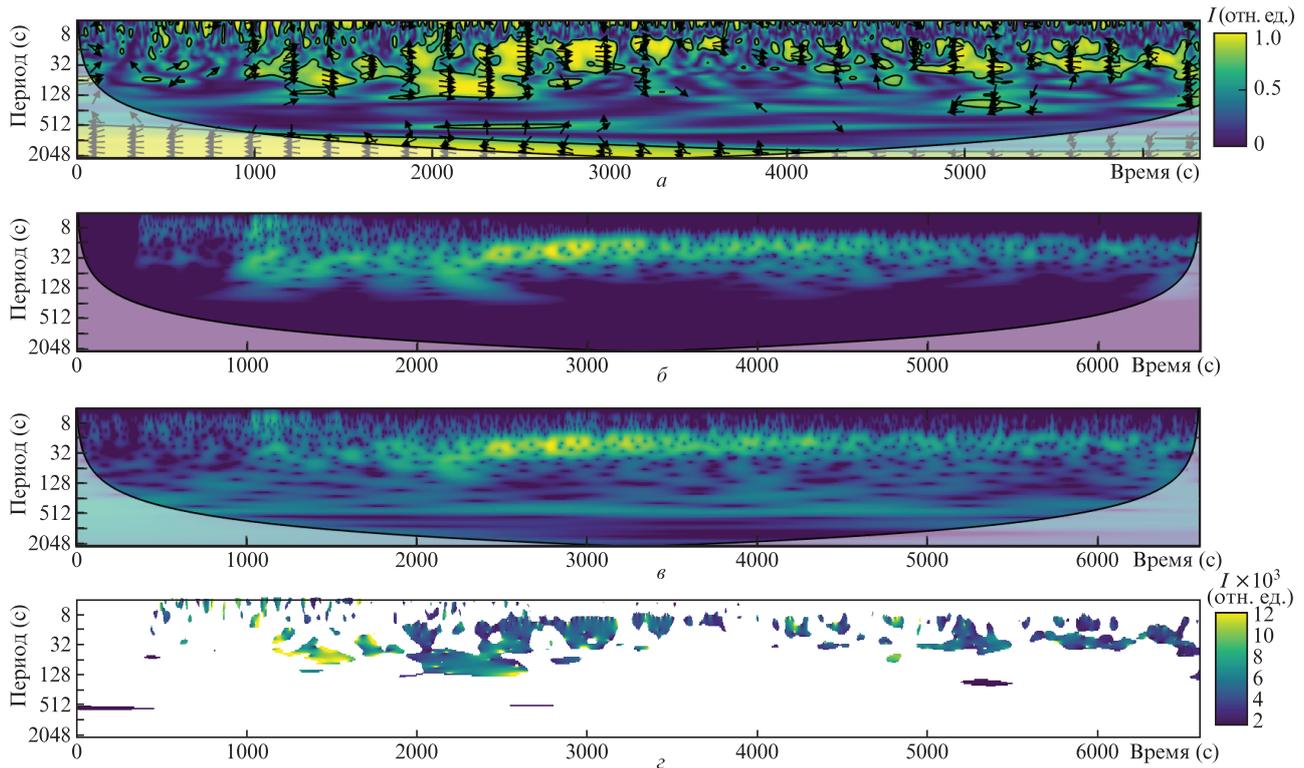


Рис.3. Временной анализ сигналов, показанных на рис.2: (а) относительная фаза двух сигналов; (б) вейвлет-спектр мощности поперечного ускорения; (в) вейвлет-спектр мощности угловой скорости; (г) карта фазовой скорости.

го круга в обратном направлении, и прямой волны после полного обхода вокруг земного шара). Заметим, что в сейсмологии такие наблюдения сообщаются впервые после работы [15].

Принимая предположение о распространении поверхностных волн по дуге большого круга, мы ориентируем горизонтальный след сейсмометра в системе координат с радиальной и поперечной осями так, что измеряется поперечная компонента ускорения. Для данного исследования, как и в [16], мы используем вейвлет-разложение двух сигналов. В таком подходе отношения амплитуд когерентных частей двух сигналов дают оценку фазовой скорости, зависящей от частоты и времени, приведенную на рис.3. Сверху вниз на рис.3 последовательно показаны в зависимости от времени карта фазового соотношения, которую мы используем в качестве фазовой маски для выбора области, где оценка фазовой скорости является значимой, два спектра мощности вейвлетов и, наконец, карта фазовой скорости, где скорость отображается цветом, согласно таблице цветов. Измеренные значения скорости согласуются с ожидаемыми на основании глобальных моделей Земли, например PREM [17].

Итак, лаборатория в Гран-Сассо была утверждена в качестве места расположения лазерной установки для проверки предсказаний общей теории относительности и геодезических приложений. Прибор продемонстрировал впечатляющую надежность, автономно работая в течение многих месяцев в непрерывном режиме. Установка новых зеркал лучшего качества и новая система аналитической обработки данных улучшили долговременную стабильность и точность устройства. Более того, наблюдение за сейсмическими событиями, связанными с локаль-

ными землетрясениями и сильными телесейсмами, позволило получить важную сейсмологическую информацию.

1. Sagnac G. C. R. Acad. Sci. (Paris), **157**, 708 (1913).
2. Michelson A.A., Gale H.G. *Astrophys. J.*, **61**, 140 (1925).
3. Stedman G.E. *Rep. Prog. Phys.*, **60**, 615 (1997).
4. Macek W.N., Davis D.T.M. Jr. *Appl. Phys. Lett.*, **2**, 67 (1963).
5. Schreiber K.U., Wells J.-P. *Rev. Sci. Instrum.*, **84**, 041101 (2013).
6. Bosi F., Cella G., Di Virgilio A., Ortolan A., Porzio A., Solimeno S., Cerdonio M., Zendri J.P., Allegrini M., Belfi J., Beverini N., Bouhadef B., Carelli G., Ferrante I., Maccioni E., Passaquieti R., Stefani F., Ruggiero M.L., Tartaglia A., Schreiber K.U., Gebauer A., Wells J.-P.R. *Phys. Rev. D*, **84**, 122002 (2011).
7. Di Virgilio A.D.V., Belfi J., Ni W.-T., Beverini N., Carelli G., Maccioni E., Porzio A. *Eur. Phys. J. Plus*, **132**, 157 (2017).
8. Nilsson T., Böhm J., Schuh H., Schreiber U., Gebauer A., Klügel T. *J. Geodyn.*, **62**, 69 (2012).
9. Tartaglia A., Di Virgilio A.D.V., Belfi J., Beverini N., Ruggiero M.L. *Eur. J. Phys. Plus*, **132**, 73 (2017).
10. Belfi J., Beverini N., Bosi F., Carelli G., Cuccato D., De Luca G., Di Virgilio A., Gebauer A., Maccioni E., Ortolan A., Porzio A., Saccorotti G., Simonelli A., Terreni G. *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, 034502 (2017).
11. Belfi J., Beverini N., Carelli G., Di Virgilio A., Giacomelli U., Maccioni E., Simonelli A., Stefani F., Terreni G. *Appl. Opt.*, **57**, 5844 (2018).
12. Beghi A., Belfi J., Beverini N., Bouhadef B., Cuccato D., Di Virgilio A., Ortolan A. *Appl. Opt.*, **51**, 7518 (2012).
13. Simonelli A., Igel H., Wassermann J., Belfi J., Maccioni E., Di Virgilio A., Beverini N., De Luca G., Saccorotti G. *Geophys. J. Intern.*, **214**, 705 (2018).
14. De Virgilio A.D.V. et al. *A New Approach to the Analysis of Large Frame Ring Laser Data* (в печати).
15. Nader M.F., Igel H., Ferreira A.M.G., Al-Attar D., Wassermann J., Schreiber K.U. *Geophys. J. Intern.*, **201**, 1482 (2015).
16. Simonelli A. *PhD Diss.* (LMU München, 2018).
17. Dziewonski A.M., Anderson D.L. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **25**, 297 (1981).