

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2010 г. А. М. Боронахин*, канд. техн. наук; А. А. Великосельцев*, канд. техн. наук;
А. А. Янковский**; Д. Б. Пухов**; А. Н. Ткаченко*

* Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург

** Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева,
Санкт-Петербург

E-mail: tkachenko_nv@mail.ru

Оптические интерферометрические датчики вращения используются в многочисленных системах навигации, управления и диагностики. Область их применения постоянно расширяется. На сегодняшний день одним из актуальных направлений является привлечение оптических датчиков вращения для измерения угловых движений, вызванных распространением сейсмических волн. В работе приводятся описание разработанного измерителя угловой скорости на базе триады волоконно-оптических гироскопов, а также результаты экспериментальных исследований данной оптической системы на испытательном стенде по заданию малых угловых перемещений.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, датчик угловой скорости, сейсмологическое оборудование, угловые измерения.

Коды OCIS: 060.2370, 060.2800

Поступила в редакцию 17.02.2010

Введение

Традиционно основным средством проведения сейсмических измерений является сейсмометр, который регистрирует линейные перемещения. Однако во время землетрясения поверхность Земли совершает не только линейные движения в горизонтальной и вертикальной плоскостях, но также участвует и во вращательном движении, что объясняется спецификой распространения сейсмических волн. Таким образом, для полного описания движения поверхности необходима модель с шестью степенями свободы: три линейные и три угловые компоненты.

В прошедшие десятилетия вращательной составляющей пренебрегали главным образом потому, что не существовало подходящих датчиков угловой скорости. Но изучение данной части движения является важным и актуальным для сейсмических исследований по нескольким причинам. Известно, что при возникновении вращений относительная погрешность определения линейных перемещений по показаниям сейсмометра может достигать порядка 30% [1]. Следовательно, регистрация вращений позволит правильно восстанавливать сейсмические

сигналы и обеспечит дополнительную информацию о нахождении очага землетрясения и свойствах волнового фронта [2].

Разработка новых средств и методов для сейсмических наблюдений всегда была направлена на расширение возможностей (в первую очередь, увеличение частотного и динамического диапазонов каналов регистрации) и удобство применения сейсмологической аппаратуры. В последние годы рассматриваются вопросы применения различных современных приборов в системах сбора данных [3, 4]. Перспективным направлением является:

- привлечение оптических датчиков угловых скоростей (ДУС), принцип действия которых основан на эффекте Саньяка, в частности, использование волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) для регистрации сейсмических сигналов,

- построение инерциальных измерительных систем, имеющих в своем составе стандартный трехосный сейсмометр и блок ВОГ [5].

В настоящей работе приводятся описание разработанного измерителя угловой скорости на базе триады ВОГ, результаты предварительных экспериментальных исследований точностных параметров датчиков, а также анализ воз-

возможности использования волоконно-оптической системы для регистрации малых угловых перемещений.

Измерительная система на волоконно-оптических датчиках вращения

Кафедрой лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета была создана измерительная система (ИС), в состав которой входят три волоконно-оптических гироскопа модели ВГ951 производства фирмы “Физоптика” и плата 20-разрядного аналого-цифрового преобразователя [6]. Датчики установлены на специальной раме, выполненной из немагнитного материала. Для обеспечения герметичности и защиты измерительных приборов от вибраций и ударов вся конструкция помещена в корпус, который имеет электрические разъемы для питания датчиков и передачи с них выходной информации. Оцифрованные сигналы системы поступают на персональный компьютер.

Калибровочные испытания триады волоконно-оптических гироскопов

Перед непосредственным использованием ИС проводились калибровочные испытания входящих в ее состав датчиков, целью которых являлось уточнение паспортных значений параметров волоконно-оптических гироскопов:

- масштабных коэффициентов (K_i , где $i = x_r, y_r, z_r$ – измерительные оси гироскопов),
- систематических смещений нулевых сигналов ($\Delta\omega_i^s$),
- составляющих случайных дрейфов ($\Delta\omega_i^r$),

– нелинейностей выходных характеристик гироскопов (K_{ii}),

а также углов неортогональностей (α, β, γ).

Для описания взаимосвязи между приведенными выше параметрами используется математическая модель выходных данных гироскопов. Вводятся следующие системы координат: $O\xi\eta\zeta$ – географическая система координат, $oxyz$ – приборная система координат, связанная с ИС, $ox_{\Gamma}y_{\Gamma}z_{\Gamma}$ – система координат, образованная измерительными осями гироскопов. При расположении ИС, когда направление осей приборной системы координат совпадает с направлением осей географической системы координат (ось y приборной системы координат направлена по касательной к меридиану на север, ось z – вдоль вертикали места вверх, а ось x – направлена на восток), модель показаний триады ВОГ имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} U_{x_{\Gamma}} \\ U_{y_{\Gamma}} \\ U_{z_{\Gamma}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{x_{\Gamma}} & 0 & 0 \\ 0 & K_{y_{\Gamma}} & 0 \\ 0 & 0 & K_{z_{\Gamma}} \end{bmatrix} [D_{\Gamma}] \times \\ \times \left\{ \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx}\omega_x & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy}\omega_y & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}\omega_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Omega \cos \varphi \\ \Omega \sin \varphi \end{bmatrix} \right\} + \\ + \begin{bmatrix} \Delta\omega_x^s \\ \Delta\omega_y^s \\ \Delta\omega_z^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\omega_x^r \\ \Delta\omega_y^r \\ \Delta\omega_z^r \end{bmatrix},$$

где U_i – выходные сигналы волоконно-оптических гироскопов, ω_i – измеряемая угловая скорость вращения, D_{Γ} – матрица перехода от приборной системы координат (xyz) к измерительным осям гироскопов, которая определяется как

$$D_{\Gamma} = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\alpha - \sin\gamma\sin\alpha\sin\beta & \cos\gamma\sin\alpha + \sin\gamma\cos\alpha\sin\beta & -\sin\gamma\cos\beta \\ -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta & \sin\beta \\ \sin\gamma\cos\alpha + \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta & \sin\gamma\sin\alpha - \cos\gamma\cos\alpha\sin\beta & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix}.$$

В предложенной математической модели учитывается чувствительность волоконно-оптических датчиков вращения к угловой скорости вращения Земли, для этого вводится следующая компонента: $[0 \ \Omega\cos\varphi \ \Omega\sin\varphi]^T$, где Ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта места.

Калибровка ИС проводилась на двухосном поворотном стенде, который обеспечивает вращение и угловое позиционирование вокруг двух взаимно ортогональных осей. Расположение триады ВОГ на стенде показано на рис. 1.

Параметры гироскопов, полученные в ходе испытаний, сведены в таблице.

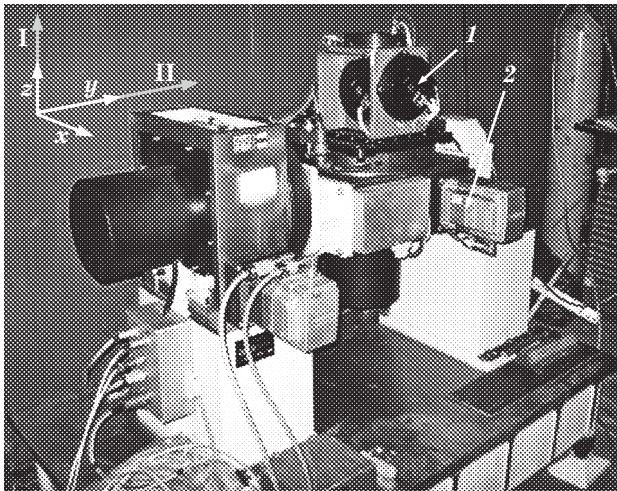


Рис. 1. Расположение триады ВОГ на двухосном поворотном стенде. I, II – вертикальная и горизонтальная оси стенда; x, y, z – приборная система координат. 1 – триада ВОГ, 2 – стенд.

Наиболее сложной частью определения параметров волоконно-оптических датчиков вращения является определение их шумовых характеристик. Выделяют следующие основные шумовые составляющие [7]:

- случайный дрейф угла (“белый” шум),
- случайный дрейф скорости,
- нестабильность сдвига нуля (фликкер-шум),
- шум квантования,
- изменение (тренд) угловой скорости.

Одним из методов оценки случайных дрейфов ВОГ является метод вариаций Аллана – метод представления среднеквадратичного отклонения (СКО) случайного дрейфа гироскопа $\sigma(\tau)$ в зависимости от времени усреднения τ [7]. Зависи-

мость изменения СКО Аллана строится в логарифмическом масштабе от времени усреднения и аппроксимируется следующим полиномом:

$$\sigma^2(\tau) = (R\tau)^2/2 + (K^2\tau)/3 + 2B^2\ln(2)/\pi + E^2/\tau + 3Q^2/\tau^2,$$

где E – коэффициент случайного дрейфа угла, B – коэффициент нестабильности сдвига нуля внутри запуска, R – коэффициент линейно нарастающего изменения сигнала угловой скорости (тренд угловой скорости), Q – коэффициент шума квантования, K – коэффициент случайного дрейфа угловой скорости.

Для определения вариаций Аллана проводилась запись показаний гироскопов в течение 8 суток с частотой съема данных 1 Гц. На рис. 2 показана зависимость $\sigma(\tau)$ для одного из датчиков. В выходном сигнале данной модели ВОГ можно выделить два основных случайных процесса – “белый” шум и фликкер-шум, оценка уровней которых дает следующие составляющие случайного дрейфа гироскопа: случайный дрейф угла – $0,015 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, нестабильность сдвига нуля – $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ/\text{с}$.

Случайный дрейф угла характеризует точность датчика, которая ограничивается уровнем “белого” шума в выходном сигнале угловой скорости гироскопа. Для данной модели гироскопа полученная величина соответствует паспортному значению.

Причиной нестабильности сдвига нуля является так называемый фликкер-шум, источником которого служит электроника. Значение нестабильности сдвига нуля получено как минимальное значение $\sigma(\tau)$ на участке кривой Аллана

Характеристики волоконно-оптических гироскопов

ед.	x_{Γ}	y_{Γ}	z_{Γ}
$\Delta\omega_i^s$	-261,4	-351,9	-337,4
K_i , ед./град./с	-4991,9	5039,7	4980,8
K_{ii} , %	1,25	1,27	2,29
α , угл. мин	—	-13,4	14,3
β , угл. мин	-17,9	—	5,38
γ , угл. мин	25,7	-5,2	—

Примечание. K_i – масштабные коэффициенты, K_{ii} – нелинейности выходных характеристик, $\Delta\omega_i^s$ – систематические смещения нулевых сигналов, α, β, γ – неортогональности измерительных осей, $i = x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, z_{\Gamma}$ – измерительные оси гироскопов.

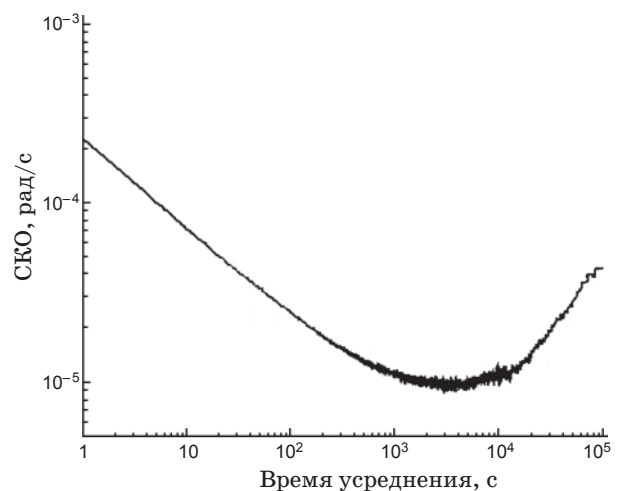


Рис. 2. Вариация Аллана для гироскопа ВГ951.

с нулевым наклоном за период времени, равный 400 с. Полученное значение для испытуемого гироскопа является допустимым.

Исследование показаний ИС при задании малых угловых перемещений

Одной из первых попыток привлечения оптических датчиков вращения для сейсмических наблюдений является использование больших лазерных гироскопов (БЛГ) [3, 4]. Их точностные характеристики позволяют проводить измерения угловой скорости в широком диапазоне частот.* Однако из-за конструктивных особенностей БЛГ являются дорогостоящими нетранспортабельными устройствами, применение которых в большинстве случаев возможно только для регистрации телсейсмических событий (на расстояниях свыше 2000 км). Волоконно-оптические гироскопы, в отличие от БЛГ, имеют размеры сопоставимые со стандартными сейсмометрами и могут быть использованы для оперативных измерений вблизи очага землетрясения.

Гироскопы модели ВГ951 позволяют регистрировать угловые скорости вращения до нескольких десятков град/с. Минимальное значение измеряемой величины может ограничиваться как шумами датчика, так и дрейфом нуля. Интерес представляет определение порога чувствительности данных ВОГ при регистрации угловых движений с малыми амплитудами и частотами.

Для этих целей проводилась серия экспериментов на специализированном стенде, который позволяет задавать движение платформы по дуге окружности радиусом $R = 10$ м. При этом закон движения платформы можно описать следующей формулой:

$$L = L_0 \sin(2\pi ft),$$

где L_0 , f – амплитуда (мм) и частота (Гц) формируемого движения. Максимальное значение амплитуды может достигать 10 мм, частота изменяется в диапазоне от 0,001 до 0,5 Гц.

В состав стенда входит высокоточный интерферометр, который фиксирует линейные движения платформы (L_{inter}), при этом угол отклонения платформы (φ) определяется как

$$\varphi = L_{\text{inter}}/R.$$

Стенд обеспечивает воспроизведение угла φ с погрешностью не более 2".

Совместная запись выходных сигналов блока волоконно-оптических гироскопов и интерферометра проводилась при задании колебательных движений с различными частотами от 0,01 до 0,5 Гц и постоянной амплитудой 5,6 мм (диапазон изменения угловой скорости вращения от 0,002 °/с до 0,2 °/с) и с постоянной частотой 0,1 Гц и амплитудами 3 мм и 1 мм (максимальные значения угловой скорости вращения – 0,01 °/с и 0,004 °/с соответственно).

При проведении эксперимента блок ВОГ был установлен таким образом, что ось x -гироскопа совпадала с направлением вектора угловой скорости вращения платформы, а оси y - и z -гироскопов находились в плоскости, ортогональной оси вращения платформы (рис. 3). На рис. 4 представлены показания триады гироскопов при задании углового движения платформы с амплитудой 5,6 мм и частотой 0,1 Гц (максимальная угловая скорость вращения платформы ω_{max} составила 0,02 °/с).

Для получения угла отклонения платформы от первоначального положения показания x -гироскопа интегрировались и сравнивались

* Относительная длина сейсмических волн изменяется, в зависимости от их скорости распространения, от нескольких метров до более чем 10 000 км. Диапазон амплитуд, которые должны быть зарегистрированы, – от нанометра до дециметров. Частотный спектр сейсмических колебаний лежит в диапазоне от 3×10^{-4} Гц до сотен герц. Вблизи очага землетрясения (ближнее поле) наблюдаются колебания с различными периодами – от долей секунды до нескольких секунд, на больших расстояниях от центра (сотни километров) короткопериодные колебания выражены слабее: от нескольких секунд до нескольких сотен секунд. При этом амплитуды колебаний могут быть значительными вблизи очага, но на расстояниях свыше 1500 км очень малыми – от 1 см до нескольких микрометров.

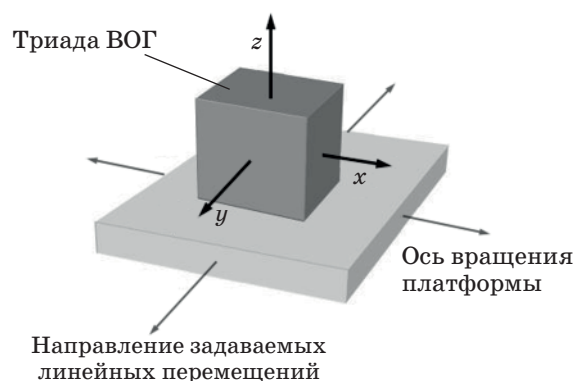


Рис. 3. Расположение блока гироскопов на стенде для задания малых угловых движений.

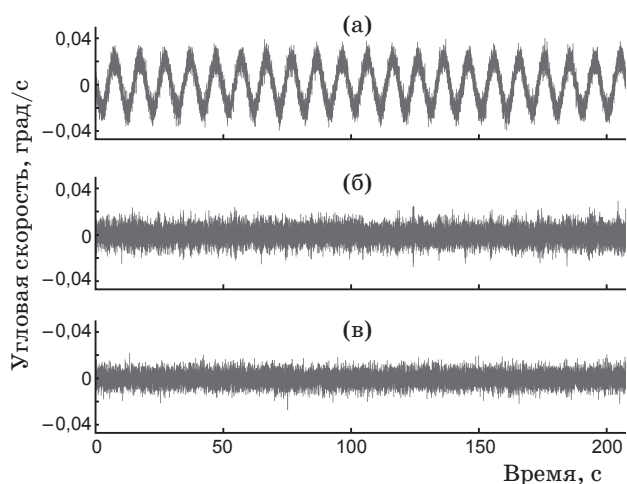


Рис. 4. Выходные сигналы волоконно-оптических гироскопов при задании углового движения с амплитудой 5,6 мм и частотой 0,1 Гц. а – *x*-гироскоп, б – *y*-гироскоп, в – *z*-гироскоп.

с углом, рассчитанным по сигналу интерферометра. На рис. 5 приведены графики изменения угла φ , получаемого по данным интерферометра и ВОГ, при частоте колебаний 0,1 Гц и 0,2 Гц. Девииции, наблюдаемые в сигнале гироскопа, обусловлены влиянием случайного дрейфа датчика и могут достигать значений порядка $0,02^\circ$.

Анализ данных экспериментов подтвердил наличие корреляций между сигналами ВОГ и

эталонной системы (интерферометра), а также показал, что с уменьшением частоты задаваемого углового движения ошибка определения угла по сигналу ВОГ увеличивается, при этом на частотах до 0,1 Гц среднее значение относительной погрешности составляет 30%.

Заключение

В работе представлены результаты разработки системы на базе триады волоконно-оптических гироскопов, предназначенной для регистрации вращательных движений, возникающих при землетрясениях, с целью получения дополнительной информации о сейсмических сигналах, а также измерения углов отклонения осей чувствительности сейсмометра в процессе движения основания.

Важной задачей исследований показаний ВОГ являлось определение порога чувствительности используемых датчиков при задании малых угловых перемещений. В результате экспериментальных испытаний было установлено, что точность определения параметров углового положения по показаниям ВОГ ограничивается уровнем случайного дрейфа гироскопов. Но даже при такой чувствительности применение данной модели ВОГ для коррекции показаний сейсмометра позволит повысить точность сейсмических измерений примерно в 4 раза, что подтверждается результатами предварительных

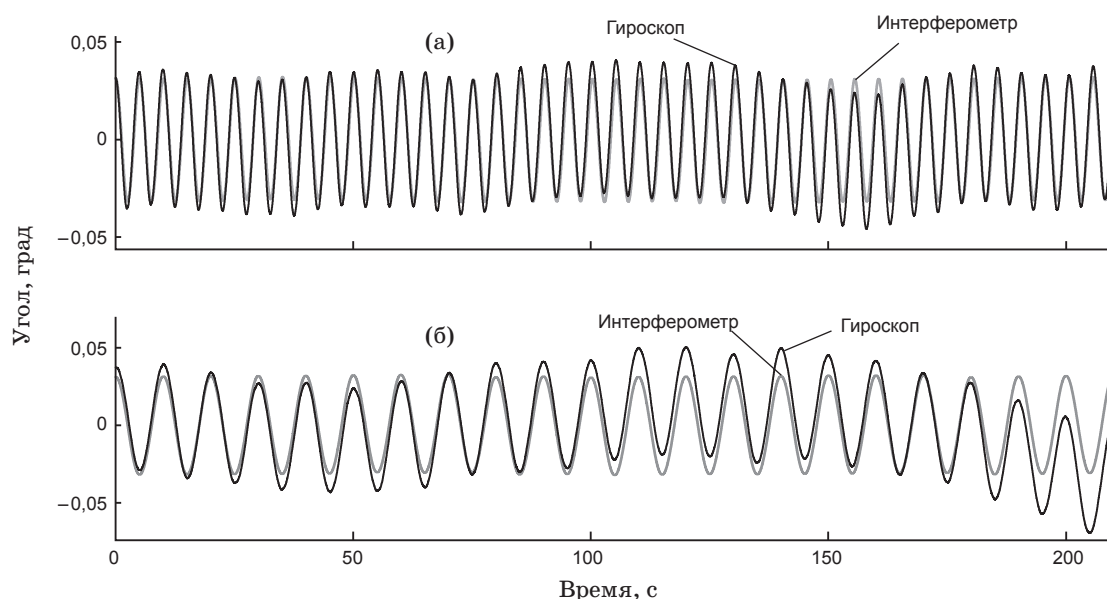


Рис. 5. Угол отклонения платформы от первоначального положения. а – частота задаваемого сигнала 0,2 Гц, амплитуда – 5,6 мм, б – частота – 0,1 Гц, амплитуда – 5,6 мм.

совместных исследований разработанной ИС и сейсмоприемника *Le3D-Lite* на специализированном стенде геофизической станции Мюнхенского технического университета [1].

Данная работа получила поддержку в рамках реализации ФЦП “Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олейник Л.Н., Ткаченко А.Н., Топал Д.П. Результаты экспериментальных исследований триады волоконно-оптических гироскопов в задачах сейсмологии пути/ Тез. докл. XI конф. молодых ученых “Навигация и управление движением” // Гироскопия и навигация. 2009. № 2 (65). 82 с.
2. Pillet R., Virieux J. The effects of seismic rotations on inertial sensors / *Geophysical Journal International*. December. 2007. P. 1314–1323.
3. Pancha A., Webb T.H., Stedman G.E., McLeod D.P., Schreiber U. Ring laser detection of rotations from teleseismic waves / *Geophys. Res. Lett.* 2000. P. 3553–3556.
4. McLeod D.P., Stedman G.E., Webb T.H., Schreiber U. Comparisson of standard and ring laser rotational seismograms // *Bulletin of the seismological society of America* / Ed. by Andrew J.M. M.P.: U.S. Geological Survey, 1998. P. 1495–1503.
5. Олейник Л.Н., Ткаченко А.Н. Использование волоконно-оптических гироскопов в сейсмологии // Материалы X конференции молодых ученых “Навигация и управление движением”. СПб., 2009. С. 81–86.
6. Листвин В., Логозинский В. Миниатюрные волоконно-оптические датчики вращения // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2006. В. 8. С. 4–8.
7. IEEE Std 952-1997. Standart Specification format guide and test procedure for single-axis interferometric fiber optic gyros // *IEEE Standart Deparment*, September, 1997. 77 p.