

На правах рукописи

Ткаченко Анна Николаевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ  
УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение)

**А в т о р е ф е р а т**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент  
Боронахин Александр Михайлович

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор  
Авдеев Борис Яковлевич  
кандидат технических наук  
Литвиненко Юлия Александровна

Ведущая организация – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева.

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” имен В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, Д105.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 г.

Учёный секретарь совета,  
к.т.н., доцент

Боронахин А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Крупнейшие геофизические катастрофы, связанные с многочисленными жертвами и разрушениями, происходят в результате сейсмической активности литосферы, которая чаще всего проявляется в виде землетрясений. Землетрясения, в общем случае, представляют собой переход потенциальной энергии, накопленной в упругодеформированных горных породах земных недр, в энергию колебаний этих пород. Порождаемые упругие колебания, так называемые сейсмические волны, распространяются на значительные расстояния от эпицентра и служат важным источником информации:

- позволяют выявлять предвестники землетрясений (сейсмичность, движение земной коры, наклоны земной поверхности, деформации),
- определять основные характеристики произошедших событий (магнитуду, энергию, расстояния до эпицентра и др.),
- проводить сейсмическое районирование (выделение областей, в которых можно ожидать землетрясение определенной магнитуды).

Общепринятым является трехкомпонентный метод регистрации сейсмических волн, который базируется на привлечении информации от сейсмометров и позволяет записывать колебания в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вертикальном (*Z*-компонента) и двух горизонтальных, ориентированных на север (*N*-компонента) и восток (*E*-компонента). Сейсмометр представляет собой прибор, чувствительный к поступательным движениям поверхности. В зависимости от решаемой задачи (регистрация слабых удаленных явлений или наоборот сейсмических событий в ближней от эпицентра зоне расстояний) он фиксирует либо линейные ускорения движения грунта, либо линейные скорости или линейные перемещения. Но распространяющиеся сейсмические волны вызывают не только поступательные, но и угловые движения поверхности. Существование угловых эффектов, возникающих при сейсмической активности, подтверждает большое количество эмпирических сведений: наблюдение при землетрясениях разворотов/поворотов конструкций, в частности, отдельных частей зданий друг относительно друга, деформации стен и перекрытий, вызванные эффектом кручения зданий, мостов, сдвиги памятников.

В сейсмологии долгое время угловую составляющую движения не учитывали, считая ее пренебрежимо малой. В первую очередь это было обусловлено недостаточной разрешающей способностью приборов для измерения угловой компоненты сейсмической волны. В последние же годы стало уделяться достаточно много внимания угловым сейсмическим колебаниям; рассматриваются вопросы разработки новых методов регистрации и привлечения различных современных инструментов для сбора сейсмических данных. Возрос интерес к измерению параметров распространения сейсмических волн в ближней зоне и в условиях сильных колебаний почвы, а также их учета при проектировании зданий в районах повышенной сейсмической активности. В перспективе, наличие достоверной информации о сейсмических угловых колебаниях позволит:

- получать дополнительную информацию о нахождении очага землетрясения и свойствах волнового фронта;
- корректировать показания сейсмометров, которые чувствительны к угловым движениям;

- проводить анализ состояния высотных зданий и учет угловых эффектов при их проектировании.

На сегодняшний день актуальным и перспективным направлением является привлечение оптических датчиков угловой скорости для создания средств измерения угловых сейсмических колебаний, которые позволят решить ряд важных задач сейсмологии, сейсмометрии, строительства и безопасности жизнедеятельности.

**Цель работы** – разработка и исследование средств измерения параметров углового движения, вызванного сейсмической активностью, на базе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ).

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих **задач**:

- проведение анализа существующих в сейсмологии методов и средств измерения угловых колебаний с целью выработки требований к инструментарию (ВОГ) в условиях сейсмического воздействия;
- разработка математической модели показаний ВОГ и методов исследования точностных характеристик ВОГ в условиях сейсмического воздействия;
- разработка алгоритма совместной обработки показаний датчиков линейного движения (сейсмометра) и углового движения (ВОГ);
- экспериментальная апробация предложенных методов и средств измерения угловых параметров сейсмических колебаний.

**Методы исследования** включают в себя методы математического анализа и линейной аппроксимации, методы статистической обработки и оптимальной фильтрации экспериментальных данных, методы математического и имитационного моделирования. Полученные результаты базируются на комплексном применении основных положений общей теории инерциальной навигации и теории интегрированных навигационных систем, теории оптимальной обработки информации.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Контроль изменяющейся магнитной обстановки в процессе калибровки триады ВОГ позволяет повысить точность измерения малых угловых скоростей.
2. Калибровка ВОГ с привлечением информации о текущем угловом положении испытательного стенда в режиме гармонических колебаний дает возможность уменьшить динамические погрешности в оценке масштабного коэффициента.
3. Комплексование триады ВОГ и сейсмометра позволяет создать мобильную измерительную систему для повышения точности решения задач сейсмологии в ближней зоне расстояний до эпицентра землетрясения.

**Научная новизна** результатов работы:

1. Разработан метод калибровки триады ВОГ при контроле меняющейся магнитной обстановки, позволяющий повысить точность измерения малых угловых скоростей.
2. Для уменьшения динамических погрешностей в оценке масштабного коэффициента ВОГ предложен метод калибровки гироскопа в режиме гармонических колебаний с привлечением информации о текущем угловом положении испытательного стенда.
3. Разработан алгоритм работы мобильной измерительной системы на базе триады ВОГ и сейсмометра, позволяющий корректировать сигналы сейсмометра и повышающий

точность измерения параметров сейсмических колебаний в ближней зоне расстояний до эпицентра землетрясения.

**Достоверность научных и практических результатов** подтверждается использованием современных научных методов, сходимостью теоретических результатов с данными эксперимента, апробацией результатов в практических условиях, критическим обсуждением результатов работы на научно-технических конференциях.

**Практическая значимость научных результатов:**

Создание мобильной измерительной системы на базе триады ВОГ и сейсмометра позволит:

- получать информацию об угловых и линейных составляющих сейсмического движения;
- осуществлять коррекцию показаний сейсмометра, подверженного влиянию гравитационного поля Земли при изменении угла наклона основания;
- повысить достоверность информации о сейсмических колебаниях за счет измерения угловой составляющей движения грунта и получения данных о наклоне основания при землетрясениях.

Разработанные в процессе исследований модели и алгоритмы служат основой создания средства измерения угловых параметров, которое помимо решения задач сейсмологии может быть также полезно и в других областях, в частности для навигации, при проектировании и строительстве зданий (диагностика высотных зданий на предмет деформаций, вызванных ветровыми или сейсмическими воздействиями).

По результатам совместных исследований, проводимых при сотрудничестве с Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева и Мюнхенским техническим университетом, выработаны рекомендации по развитию метрологической базы, необходимой для обеспечения процесса калибровки систем измерения угловой скорости.

**Реализация научных результатов работы.** Результаты исследований использовались при выполнении научно-исследовательских работ: 2008-2010 гг. № У-2008-1/8 и № У-2009-1/8 «Создание мобильной сейсмической установки для регистрации и исследования поступательных и вращательных движений, возбуждаемых землетрясениями» в рамках программ «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере; 2008-2009 гг. по направлению «Мобильная интегрированная система на базе трехосного сейсмометра и триады волоконно-оптических гироскопов» (Фонд поддержки и студентов и аспирантов приборостроителей им. А.С. Анфиногенова); 2006-2008 гг. НИР «Разработка концепции и теоретических основ новых информационных технологий повышения качества и безопасности жизнедеятельности человека»; 2007-2009 гг. № 6558/ЛИНС-48 «Разработка автоматизированных средств исследования метрологических характеристик инерциальных навигационных систем».

Результаты, полученные в работе, могут быть также использованы в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) при проведении научно-исследовательских работ и в учебном процессе.

**Апробация работы.** Материалы исследований докладывались и обсуждались на Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2008, 2009 гг.), профессорско-преподавательских конференциях СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2008, 2009, 2010 гг.), на 3й Всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» «СУДОМЕТРИКА-2010», 2nd International workshop on Rotational Seismology and Engineering Applications (Прага, 2010 г.).

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 8 статьях и докладах, среди которых 2 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 1 статья в другом издании, 5 – в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 53 наименования. Основная часть работы изложена на 127 страницах машинописного текста, включает 9 рисунка, 9 таблиц и 2 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы, определяется цель и формулируются задачи исследования.

**В первой главе** диссертации рассмотрены типы распространяющихся сейсмических волн, выполнен обзор существующих методов и средств регистрации сейсмических колебаний.

При землетрясении возникают колебания, которые распространяются из очага и представляют собой упругие волны, характер и скорость которых зависят от свойств и плотности пород. По характеру движения грунта при распространении сейсмических волн их подразделяют на объемные (продольные -  $P$  и поперечные -  $S$ ) и поверхностные (волны Релея -  $LR$  и волны Лява -  $LQ$ ). По времени пробега от источника до станции – на *локальные*, которые распространяются в приповерхностном слое на расстояния порядка 200 км, *региональные*, распространяющиеся в пределах земной коры в диапазоне расстояний 200-2000 км и *телесеismicкие*, проникающие глубоко в мантию и регистрируемые в диапазоне 2000 – 10 000 км. Соответственно, зоны расстояний, в которых эти волны прослеживаются, принято называть локальной, региональной и телесеismicкой [1]. Частоты колебаний в сейсмических волнах лежат в диапазоне от 0,001 Гц до десятков Гц и зависят от большого числа факторов, главными из которых являются магнитуда землетрясения, расстояние от источника и свойства среды. Так, например, для поверхностных волн на телесеismicких расстояниях от источника будут характерны частоты от 0,001 до 0,01 Гц, в ближней зоне расстояний (< 200 км) – частоты могут быть более 10 Гц.

Основным средством проведения сейсмических измерений являются специальные приборы – сейсмометры, которые позволяют записывать линейные движения грунта в трех взаимно перпендикулярных направлениях. Однако распространяющиеся сейсмические волны вызывают как линейные движения грунта, так и угловые. Как показал анализ патентной документации и научно-технической литературы, для измерения угловых сейсмических колебаний на сегодняшний день применяются два метода:

1. Косвенный - использование сейсмических сетей, которые позволяют определять угловые параметры сейсмических колебаний путем аппроксимации и математической обработки данных сейсмограмм от массива сейсмодатчиков;
2. Прямой – использование датчиков угловой скорости: это могут быть как маятниковые системы, инклинометры, приборы, работа которых основана на электрохимическом принципе действия, так и оптические датчики угловой скорости – лазерные и волоконно-оптические гироскопы.

Реализация косвенного метода измерений сопровождается большим количеством трудностей. Для получения достоверных сигналов в определенном диапазоне частот данные сейсмометров должны быть скорректированы с учетом передаточной функции каждого датчика. Для повышения точности определения угловых параметров требуется увеличение количества используемых в сети датчиков, так как даже небольшой уровень собственного шума прибора может существенно исказить форму рассчитываемого сигнала.

При использовании электрохимических датчиков вращения, маятниковых систем в сейсмологических исследованиях необходимо осуществлять их тщательную калибровку для точного расчета передаточной функции, учитывать чувствительность к линейному ускорению, нелинейность выходных характеристик, длительные переходные процессы после сильных воздействий.

Преимуществом лазерных и волоконно-оптических гироскопов перед другими используемыми в сейсмологии датчиками угловой скорости является их нечувствительность к линейным ускорениям. На сегодняшний день применяются различные типы больших лазерных гироскопов, которые позволяют проводить высокоточные измерения угловой скорости вращения в широком диапазоне частот. Однако они представляют собой дорогостоящие стационарные устройства. Из-за конструктивных особенностей их применение ограничивается регистрацией землетрясений на телесеismicких расстояниях. В отличие от лазерных гироскопов, волоконно-оптические гироскопы обладают значительно меньшими массогабаритными характеристиками и более низкой стоимостью, что позволяет создавать на их основе мобильные средства для оперативных измерений.

Проведенный обзор существующих методов и средств измерения угловых параметров сейсмических колебаний показал, что перспективным для сейсмических исследований является применение оптических датчиков угловой скорости. При этом, учитывая зависимость изменения характеристик сейсмических волн от расстояния, целесообразно проводить разделение областей использования оптических датчиков угловой скорости:

- на телесеismicких и региональных расстояниях, где действуют сейсмические колебания с угловыми скоростями  $6 \cdot 10^{-9} \div 6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ/\text{с}$  и частотами  $0,001 \div 0,5 \text{ Гц}$ , использовать большие лазерные гироскопы – стационарные конструкции с увеличенным периметром, высокой разрешающей способностью и низким уровнем шума;
- в ближней зоне расстояний от эпицентра землетрясения, где сейсмические возмущения могут иметь угловые скорости от  $1 \text{ } ^\circ/\text{с}$  до  $15 \text{ } ^\circ/\text{с}$  и частоты от  $1 \text{ Гц}$  до  $20 \text{ Гц}$  и выше, применять волоконно-оптические гироскопы – приборы, массогабаритные и эксплуатационные характеристики которых позволяют создавать на их основе мобильные измерительные средства.

В районах повышенной сейсмической активности регистрация сильных колебаний грунта играет важную роль, поэтому на сегодняшний день рассматриваются вопросы создания мобильных систем на базе стандартного сейсмометра и волоконно-оптических гироскопов, обеспечивающих измерения сигналов по трем ортогональным осям. Наличие информации о трех компонентах углового движения позволит не только получать дополнительную информацию о землетрясениях в ближней зоне расстояний, но и производить коррекцию показаний сейсмометров.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований точностных характеристик триады волоконно-оптических гироскопов. С целью исследования возможности использования ВОГ в решении задач сейсмологии была создана триада гироскопов с квазиортогональными измерительными осями. Исходя из требований, описанных в главе 1, к области применения ВОГ (регистрация сильных возмущений) выбраны одноосные миниатюрные волоконно-оптические гироскопы среднего класса точности (модель ВГ951 производства предприятия «Физоптика»). Данная триада совместно с трехосным сейсмометром послужат в дальнейшем основой для разработки мобильного средства измерения сейсмических колебаний.

По указаниям производителя ВОГ для реализации предельной точности датчика необходимо производить его калибровку. Основываясь на результатах проведенного обзора существующих математических моделей, используемых для описания выходного сигнала одноосного ВОГ, а также на рекомендациях разработчиков данной модели гироскопа и международных стандартов, была предложена математическая модель выходных сигналов триады волоконно-оптических гироскопов:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{x_{\Gamma}} \\ U_{y_{\Gamma}} \\ U_{z_{\Gamma}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_{x_{\Gamma}} & 0 & 0 \\ 0 & K_{y_{\Gamma}} & 0 \\ 0 & 0 & K_{z_{\Gamma}} \end{bmatrix} \cdot [D_{\Gamma}] \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{xx}^H \omega_x & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy}^H \omega_y & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}^H \omega_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \right. \\ &+ \left. \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} \Delta U_x^s \\ \Delta U_y^s \\ \Delta U_z^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta U_x^r \\ \Delta U_y^r \\ \Delta U_z^r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $[D_{\Gamma}]$  – матрица перехода от приборной системы координат ( $oxz$ ) к измерительным осям гироскопов ( $ox_{\Gamma}y_{\Gamma}z_{\Gamma}$ ), которая определяется как:

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

$\alpha, \beta, \gamma$  – углы, характеризующие неортогональности измерительных осей гироскопов;

$K_{i_{\Gamma}}$  – масштабные коэффициенты гироскопов ( $i = x, y, z$ );

$U_{i_{\Gamma}}$  – выходные сигналы гироскопов;

$\omega_i$  – измеряемые компоненты вектора угловой скорости вращения;



$\Delta U_i^s$  – систематические смещения нулевых сигналов гироскопов (включая составляющие, обусловленные чувствительностью ВОГ к температурным возмущениям и влиянию магнитных полей, как Земли, так и внешних источников);

$\Delta U_i^r$  – случайные составляющие смещений нулевых сигналов гироскопов;

$K_{ii}^H$  – нелинейности выходных характеристик гироскопов;

$\Omega_i$  – проекции угловой скорости вращения Земли на оси приборной системы координат.

Для оценки параметров триады гироскопов таких как, масштабные коэффициенты, нелинейности выходных характеристик, систематические и случайные составляющие смещения нулевых сигналов и углы неортогональности измерительных осей датчиков, был разработан алгоритм калибровки триады ВОГ на двухосном поворотном стенде (рис. 1) при задании последовательности вращений с постоянными угловыми скоростями. Стенд обеспечивает вращение и угловое позиционирование вокруг двух взаимно ортогональных осей: оси наклона и оси поворота.

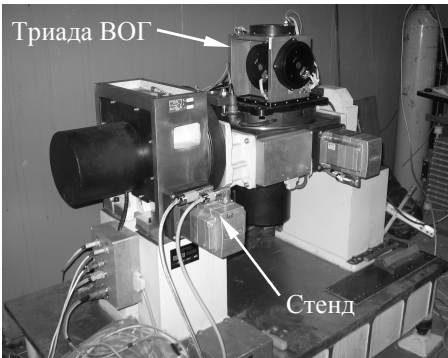


Рисунок 1 – Расположение триады на стенде

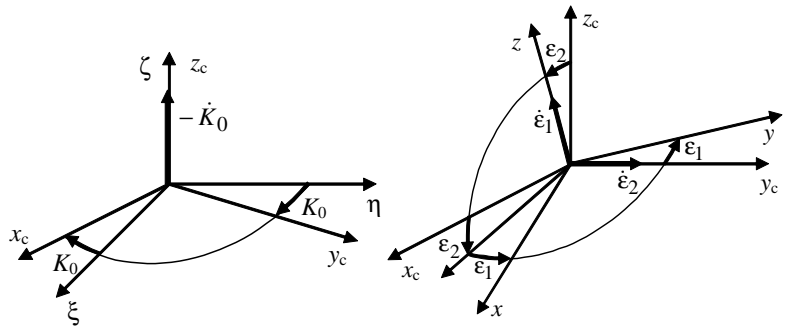


Рисунок 2 – Взаимное расположение систем координат

Для описания алгоритма вводятся следующие системы координат:  $o\xi\eta\zeta$  – географическая система координат (ГСК);  $o_xcyczc$  – система координат, связанная с основанием стенда. Положение  $o_xcyczc$  относительно ГСК характеризуется углом курса  $K_0$  (рис. 2). Положение приборной системы координат  $oxyz$  относительно  $o_xcyczc$  задается разворотом на углы  $\varepsilon_2$  (вокруг оси наклона) и  $\varepsilon_1$  (вокруг оси поворота) (см. рис. 2). Алгоритм определения параметров гироскопов заключается в следующем: на планшайбу стенда устанавливается триада ВОГ. В зависимости от калибруемой оси, выполняются начальные развороты на углы  $\varepsilon_{10}$  и  $\varepsilon_{20}$ . Далее производится серия вращений с угловыми скоростями  $\omega_i = \pm i \cdot |\omega_{\min}|$ , где  $\omega_{\min}$  – минимальное значение задаваемой угловой скорости,  $i = 1, 2, \dots, i_{\max}$ . После каждой итерации выполняется разворот триады в исходное положение. По результатам измерений находятся средние значения выходных сигналов датчиков для каждой задаваемой скорости вращения, строятся выходные характеристики и вычисляются значения параметров гироскопов. Требуемая точность оценки параметров обеспечивается выбором длительности времени каждой итерации ( $\Delta t$ ), которая зависит от паспортных характеристик ВОГ, определяется конструктивными особенностями стенда, частотой выдачи информации ( $\Delta f = 2f_p$ , где  $f_p$  – рабочая полоса частот), разрядностью АЦП, используемого для ввода данных в компьютер, и базируется на следующих положениях:

1. Среднеквадратическое отклонение (СКО) погрешности гироскопа одного измерения определяется паспортным значением шума выходного сигнала в рабочей полосе ( $\Delta\omega^r$ ) и частотой  $\Delta f$ :  $\sigma_{U\Gamma} = \Delta\omega^r \sqrt{\Delta f}$ .

2. Для каждой скорости вращения производится расчет средних значений выходных сигналов гироскопов, СКО погрешностей ( $\sigma_{\overline{U\Gamma}}$ ) которых зависит от величины выборки ( $N$ ):

$$\sigma_{\overline{U\Gamma}} = \sigma_{U\Gamma} / \sqrt{N}.$$

3. Исходя из максимального значения задаваемой стендом угловой скорости ( $\omega_{\max}$ ) и требования к точности оценки нелинейности масштабного коэффициента ( $\delta K^H$ ), определяется параметр  $N$  из следующего условия:  $\frac{\sigma_{\overline{U\Gamma}}}{2K_{\Gamma}|\omega_{\max}|} = \frac{\sigma_{U\Gamma}}{2K_{\Gamma}|\omega_{\max}|\sqrt{N}} < \frac{\delta K^H}{K_{\Gamma}}$ , где  $K_{\Gamma}$  – масштабный коэффициент гироскопа.

4. Точность оценки  $K_{\Gamma}$  определяется из требования к точности оценки систематической погрешности масштабного коэффициента ( $\Delta K_{\Gamma}$ ):  $\frac{\sigma_{U\Gamma}}{2K_{\Gamma}|\omega_{\min}|\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{i_{\max}-1} \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left(\frac{1}{i^2}\right)} < \frac{\Delta K_{\Gamma}}{K_{\Gamma}}$ .

5. При частоте съема  $\Delta f$  время для каждого вращения рассчитывается как:  $\Delta t = N / \Delta f$ .

При анализе полученных результатов было установлено, что внутри оборота выходные сигналы гироскопов изменяются. При этом только для одного из направлений вращения полученные вариации угловой скорости совпадают с расчетным изменением проекции угловой скорости Земли на ось чувствительности ВОГ (рис. 3). Также была выявлена связь между зависимостью изменения погрешности определения угловой скорости по показаниям гироскопов (рис. 4) и характером изменения тока, потребляемого электродвигателем стенда. Сделано предположение, что создающиеся при работе стенда магнитные поля оказывают воздействие на триаду, в результате внутри оборота происходит изменение характеристик датчиков. Вследствие чего необходимо проведение дополнительных исследований для оценки чувствительности ВОГ к влиянию магнитных полей.

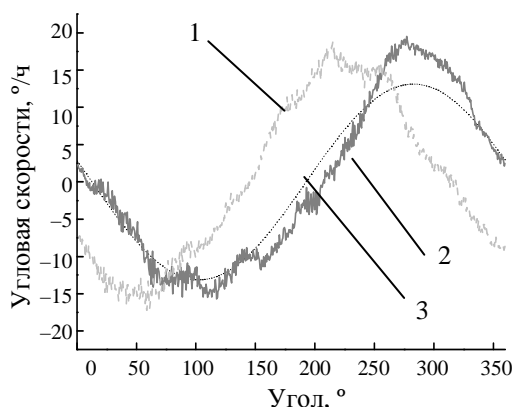


Рисунок 3 – Зависимость изменения угловой скорости от  $\varepsilon_2$  для x-гироскопа: 1 – вращение по часовой стрелке, 2 – вращение против часовой стрелки, 3 – проекция угловой скорости вращения Земли

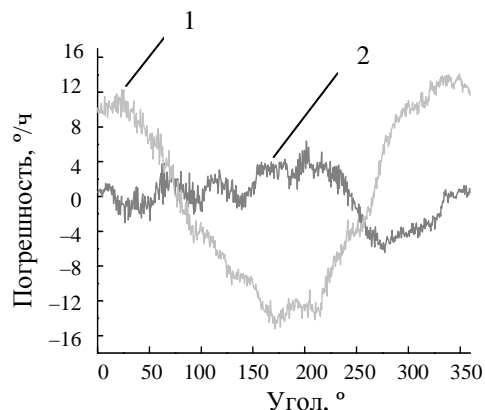


Рисунок 4 – Зависимость погрешности определения угловой скорости от  $\varepsilon_2$  для x-гироскопа: 1 – вращение по часовой стрелке, 2 – вращение против часовой стрелки

Выполнены совместные испытания триады ВОГ и трехосного магнитометра фирмы HONEYWELL на поворотном столе. Суть эксперимента заключалась в следующем: триада располагалась на платформе стола таким образом, чтобы проекции угловой скорости вращения Земли на оси триады имели следующий вид:

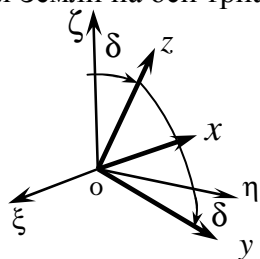


Рисунок 5 – Расположение приборной системы координат относительно ГСК

$$\begin{cases} \Omega_x = 0 \\ \Omega_y = \Omega \cdot (\cos \delta \cos \varphi - \sin \delta \sin \varphi) \\ \Omega_z = \Omega \cdot (\sin \delta \cos \varphi + \cos \delta \sin \varphi) \end{cases}$$

Исходя из широты места  $\varphi = 59^\circ 56''$ , угол между  $z$ - осью триады

(рис. 5) и линией географического меридиана составил  $\delta = 30^\circ$ .

Тогда при подстановке  $\varphi = 59^\circ 56''$  и  $\delta = 30^\circ$ :

$\Omega_x \approx 0, \Omega_y \approx 0$  и  $\Omega_z \approx \Omega = 15^\circ/\text{ч}$  и вариации нулевых сигналов  $x$ - и  $y$ -гироскопов при различных угловых положениях вокруг оси  $z$  будут вызваны изменением проекций вектора магнитного поля на оси триады.

Для оценки дополнительного смещения, возникающего под действием магнитного поля, введена следующая модель [2]:

$$\Delta\omega_i^S = \Delta\omega_{0i} + \Delta\omega_i^R = \Delta\omega_{0i} + \Delta A_i \cos \varepsilon + \Delta B_i \sin \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\Delta\omega_i^S$  – систематическое смещение нулевого сигнала,  $\Delta\omega_{0i}$  – постоянная составляющая смещения,  $\Delta\omega_i^R$  – смещение нулевого сигнала гироскопа, обусловленное влиянием магнитного поля (Земли и внешних источников) и представленное первой гармоникой разложения в ряд Фурье,  $\Delta A_i, \Delta B_i$  ( $i = x, y, z$ ) – коэффициенты разложения;  $\varepsilon$  – угол поворота триады. Путем аппроксимации экспериментальных данных согласно выражению (2) получены коэффициенты взаимосвязи показаний триады ВОГ и магнитометра. Величина чувствительности ВОГ к влиянию постоянного магнитного поля составила порядка  $1,5 \cdot 10^4 - 2,5 \cdot 10^4$   $^\circ/\text{ч}/\text{Тл}$ .

Обобщая результаты проведенных экспериментальных исследований триады волоконно-оптических гироскопов, были выработаны следующие рекомендации:

- для точного описания выходных характеристик ВОГ при проведении калибровки необходимо контролировать внешние магнитные поля, то есть требуется привлечение средства измерения характеристик магнитного поля (магнитометра);
- включить в состав мобильного измерительного средства помимо сейсмометра и триады ВОГ, также плату трехосного магнитометра для контроля магнитной обстановки при эксплуатации приборов, а также для возможности использования магнитометра как компасного устройства – для начальной выставки триады на месте установки (определение курса объекта по магнитному полю Земли).

В случае сейсмических воздействий необходимо обеспечение высокой точности определения малых вариаций угловой скорости, поэтому значимыми параметрами ВОГ становятся случайные составляющие смещения нулевого сигнала. Одним из часто используемых методов оценки случайных составляющих смещения является метод вариаций Аллана – метод представления СКО случайного смещения нуля гироскопа ( $\sigma(\tau)$ ) в зависимости от време-

ни усреднения ( $\tau$ ). В общем случае зависимость изменения вариации Аллана аппроксимируется следующим полиномом [3]:

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

где  $E$  – коэффициент случайного углового ухода (Angle Random Walk);

$B$  – коэффициент нестабильности смещения нуля (Bias Instability);

$R$  – коэффициент линейного изменения угловой скорости (Rate Ramp);

$Q$  – коэффициент шума квантования (Quant Noise);

$K$  – коэффициент случайного ухода угловой скорости (Rate Random Walk).

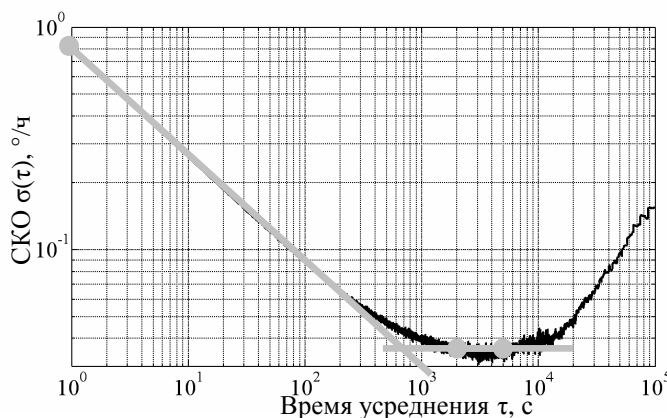


Рисунок 6 – Зависимость СКО от времени усреднения

Для определения вариаций Аллана проводилась запись показаний гироскопов в течение 8 суток с частотой съема данных 1 Гц. На рис. 6 показана зависимость  $\sigma(\tau)$  для одного из гироскопов. В выходном сигнале данной модели ВОГ можно выделить два основных случайных процесса, оценка уровней которых дает следующие составляющие: случайный угловой уход –  $0,015 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$  и нестабильность сдвига нуля –  $0,03 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ . Численное значение случайного углового ухода установлено путем построения прямой линии наклоном  $-0,5$  и определения значения СКО в точке  $\tau = 1$  (см. рис. 6 – линия серого цвета). Случайный угловой уход характеризует скорость нарастания интегрированного сигнала (угла) со временем. То есть для данной модели ВОГ погрешность в оценке угла составит за 1 минуту работы  $0,002^\circ$ , за 30 минут –  $0,01^\circ$ . Величина нестабильности сдвига нуля получена как минимальное значение  $\sigma(\tau)$  на участке кривой Аллана с нулевым наклоном за период времени, равный 400 с (см. рис. 6). Данная составляющая проявляется на значительных временах усреднения  $\tau$ , поэтому ее влияние становится важным при измерениях углового положения на длительных интервалах времени.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность практической реализации мобильного средства на основе ВОГ среднего класса точности для измерения кратковременных колебаний, то есть для проведения измерений на локальных расстояниях, где действуют сильные периодические возмущения продолжительностью несколько минут.

**В третьей главе** анализируются результаты измерений ВОГ в режиме моделирования сейсмического движения, представляющего собой угловые колебательные процессы с различными амплитудами и частотами.

Проведены испытания триады ВОГ на малом двухосном стенде, отличительными особенностями которого являются возможность задания гармонических колебаний, а также синхронизации сигналов датчиков углов (ДУ) стенда и ВОГ. Рассматривались угловые колебательные воздействия с различными амплитудами и частотами (от  $40^\circ$  до  $0,5^\circ$  и от  $0,02 \text{ Гц}$  до  $2 \text{ Гц}$  соответственно) в диапазоне угловых скоростей вращения платформы от  $-5 \text{ } ^\circ/\text{с}$  до  $5 \text{ } ^\circ/\text{с}$ .

При обработке экспериментальных показаний были применены полученные во второй главе параметры ВОГ (масштабный коэффициент, сдвиг нуля и нелинейность выходной ха-

рактеристики). На рис. 7 представлены изменения показаний датчика угла стенда ( $\alpha_{ДУ}$ ) и

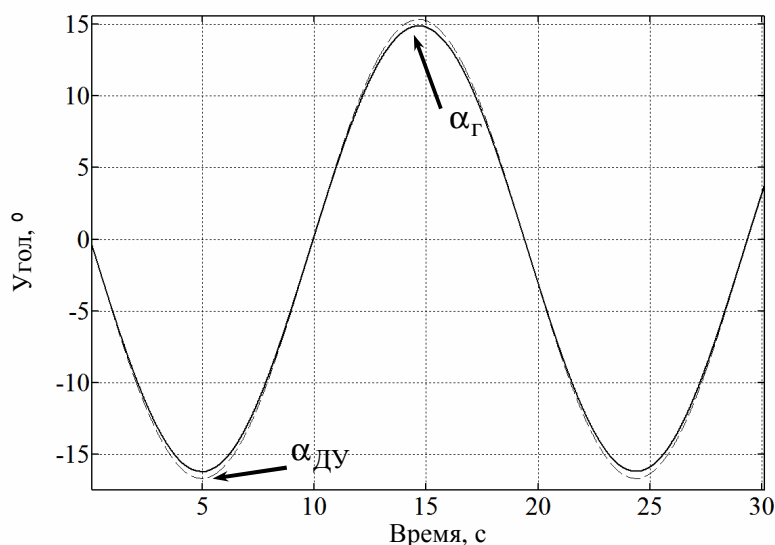


Рисунок 7 – Изменения угла, полученного по данным ДУ и ВОГ

угла, полученного по сигналу ВОГ ( $\alpha_{Г}$ ), для колебательного движения с амплитудой  $16^\circ$  и частотой  $0,05$  Гц. Как видно, они отличаются, относительная погрешность составила 3 % (с уменьшением величины угла и увеличением частоты колебаний относительная погрешность возрастает). Расхождение сигналов обусловлено погрешностью оценки параметров гироскопа (главным образом масштабного

коэффициента), то есть определением характеристик ВОГ при задании последовательности вращений с постоянными угловыми скоростями. Хотя в случаях измерения изменяющихся во времени величин естественной является динамическая процедура оценки требуемых параметров.

Для уточнения величины масштабного коэффициента (минимизации погрешности оценки масштабного коэффициента) предложен способ калибровки ВОГ в режиме гармонического изменения угла с привлечением информации о текущем угловом положении от ДУ стенда. По аналогии с инерциальными навигационными системами, в составе которых применяются ВОГ, комплексирование данных от ДУ и гироскопа осуществляется по алгоритму, базирующемуся на фильтре Калмана. Фильтрация Калмана дает возможность находить оценки изменяющегося во времени сигнала: по имеющейся на данный момент измерительной информации вырабатывать оценку вектора состояния системы (совокупности параметров, характеризующих систему) и последовательно уточнять ее по мере поступления новых данных.

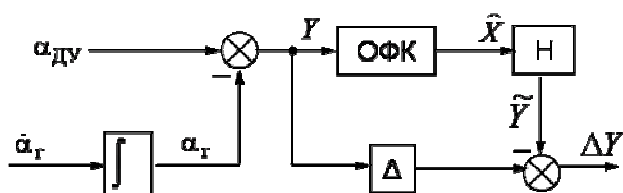


Рисунок 8 – Структурная схема совместной обработки сигналов ДУ стенда и ВОГ (ОФК – оптимальный фильтр Калмана)

Структурная схема совместной обработки сигналов ДУ стенда и ВОГ представлена на рис. 8. Вектор измерений формировался как разность:  $Y = \alpha_{Г} - \alpha_{ДУ}$ . Вектор состояния включал три компоненты: погрешности масштабного коэффициента, сдвига нуля и нелинейности выходной характеристики. Использование оптимальной обработки сигналов

ДУ и ВОГ (фильтра Калмана) позволило оценить погрешности гироскопов и корректировать их значения. Результаты исследований подтвердили эффективность проведения динамической калибровки с привлечением информации о текущем угловом положении. Предложенная процедура позволяет повысить точность оценки масштабного коэффициента не менее чем в 3 раза.

Апробация триады ВОГ проводилась на специализированном стенде, предоставленном Всероссийским научно-исследовательским институтом метрологии им. Д.И. Менделеева. Стенд предназначен для калибровки, метрологической аттестации, поверки и исследования различных средств измерений и позволяет воспроизводить параметры линейных и угловых вибрационных процессов: линейного перемещения, скорости и ускорения в горизонтальной плоскости, а также углового перемещения в вертикальной плоскости. В режиме угловых перемещений закон движения платформы стенда описывается следующей формулой:  $L = L_0 \sin(2\pi ft)$ , где  $L_0, f$  - амплитуда (мм) и частота (Гц) соответственно. В состав стенда входит высокоточный интерферометр, который фиксирует линейные перемещения платформы ( $L_{inter}$ ), при этом угол отклонения платформы ( $\theta$ ) определяется как:  $\theta = \frac{L_{inter}}{R}$ , где  $R = 10$  м – радиус окружности. Установка обеспечивает задание угловых колебаний в диапазонах частот от 0,001 до 1 Гц и амплитуд линейных перемещений от  $10^{-6}$  до  $10^{-2}$  м, что соответствует диапазону угловых скоростей от  $4 \cdot 10^{-8}$  до  $0,4^\circ/\text{с}$ . При этом погрешность воспроизведения угла  $\theta$  составляет не более  $2''$ .

Интерес представляло определение порога чувствительности ВОГ при регистрации угловых движений с малыми амплитудами и частотами. Для этой цели производилась совместная запись выходных сигналов волоконно-оптических гироскопов и интерферометра: 1) при задании колебательных движений с различными частотами от 0,01 до 0,5 Гц и постоянной амплитудой  $2'$  (диапазон изменения угловой скорости вращения от  $0,002^\circ/\text{с}$  до  $0,1^\circ/\text{с}$ ); 2) и с постоянной частотой 0,1 Гц и амплитудами  $1'$  и  $0,3'$  (максимальные значения угловой скорости вращения –  $0,01^\circ/\text{с}$  и  $0,004^\circ/\text{с}$  соответственно).

При проведении эксперимента блок ВОГ был установлен таким образом, что ось x-гироскопа совпадала с направлением вектора угловой скорости вращения платформы. Для получения угла отклонения платформы от первоначального положения показания

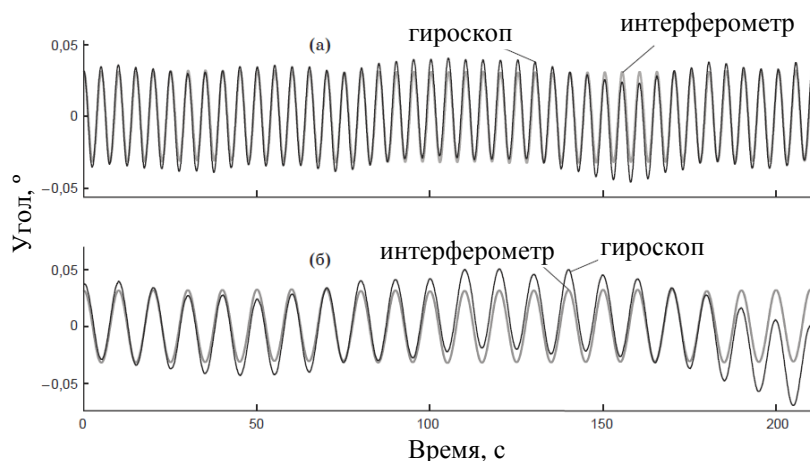


Рисунок 9 – Зависимость изменения угла от времени: (а) – частота задаваемого сигнала 0,2 Гц, амплитуда –  $2'$ ; (б) – частота – 0,1 Гц, амплитуда –  $2'$

x-гироскопа интегрировались и сравнивались с углом, рассчитанным по сигналу интерферометра. На рис. 9 приведены графики изменения угла  $\theta$ , получаемого по данным интерферометра и ВОГ, при частоте колебаний 0,1 Гц и 0,2 Гц. Наблюдаемые отклонения обусловлены влиянием шумовых составляющих, присутствующих в выходном сигнале ВОГ.

Стоит отметить, что свойства датчика в динамических режимах описываются совокупностью динамических характеристик. В практике измерений получила большое распространение амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) представляющая собой зависящее от частоты отношение амплитуды выходного сигнала датчика к амплитуде входного сигнала. С учетом величин ам-

плитуд и частот сейсмических возмущений в ближней зоне расстояний для определения характеристик ВОГ, в частности построения АЧХ, необходима соответствующая метрологическая база. Поэтому на сегодняшний день существует потребность в создании метрологического оборудования, способного обеспечить процесс калибровки систем измерения угловой скорости в режиме колебаний с амплитудами от 0,5 %/с до 50 %/с и частотами от 0,1 до 100 Гц.

Результаты проведенных испытаний при моделировании угловых колебательных процессов подтвердили возможность применения ВОГ среднего класса точности для регистрации угловых скоростей вращения от 1°/с, то есть в ближней зоне расстояний от эпицентра землетрясения, и позволили перейти к решению важной задачи – коррекции выходных сигналов сейсмометра.

**В четвертой главе** предложен алгоритм работы мобильного измерительного средства на базе триады гироскопов и трехосного сейсмометра. Приведены результаты совместных исследований приборов при сотрудничестве с Мюнхенским техническим университетом.

Испытания проводились на сейсмологическом стенде для калибровки сейсмометров. Задавались как поступательные, так и угловые движения. На первом этапе анализировались выходные сигналы триады ВОГ и датчика вращения R-1 (фирма EENTEC, США). Прибор R-1 – это электрохимический трехкомпонентный измеритель крутильных колебаний, который на сегодняшний день активно предлагается для сейсмических измерений. На втором этапе осуществлялась совместная запись показаний триады ВОГ и сейсмометра *Le3D-Lite* (фирма Lennartz Electronics, Германия).

Анализ результатов первой серии экспериментов подтвердил нечувствительность ВОГ к линейным перемещениям в отличие от прибора R-1, а также показал наличие в R-1 перекрестных связей.

Одной из основных задач являлась выработка информации об угловой ориентации средств измерения при моделировании угловых колебаний. На рис. 10 показаны угловые перемещения платформы, полученные по сигналам ВОГ и R-1. Максимальное значение угла наклона платформы ( $\alpha$ ) определяется выражением:  $\alpha = \frac{b}{l}$ , где

$b$  – амплитуда линейного перемещения, задаваемого стендом,  $l$  – длина платформы. Анализ результатов установил, что угол, рассчитанный по данным ВОГ, соответствует задаваемому стендом, в то время как определение величины этого же угла по данным R-1 является некорректным.

При изучении данных второй серии экспериментов подтверждена зависимость выходных сигналов сейсмометра от изменения угла наклона основания. Для повышения достоверности сейсмических измерений предлагается создание мобильного измерительного средства, включающего трехосный сейсмометр, триаду волоконно-оптических гироскопов, трехосный

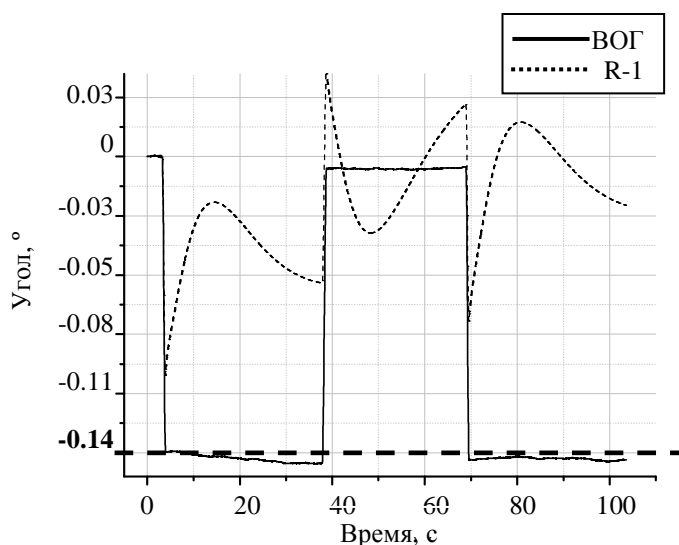


Рисунок 10 – Зависимость от времени угла, полученного по данным ВОГ и R-1

магниторезистивный датчик и плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП) (рис. 11). Данное средство позволяет измерять линейные и угловые параметры сейсмических колебаний и осуществлять коррекцию показаний сейсмометра. Коррекция заключается в следующем: по имеющейся информации о начальной и конечной угловых ориентациях средств измерений и характере изменения угла во время сейсмической активности, вырабатываемого по ВОГ, проводить совместную обработку показаний приборов при использовании алгоритма фильтрации, например, метода наименьших квадратов. Отличительным моментом является то, что сейсмические исследования не требуют проведения измерений в режиме реального времени и позволяют определять угловые положения сейсмометра до и после сейсмической активности, последнее дает точное знание временного интервала действия сейсмического возмущения и позволяет выделять необходимый отрезок измерений в массиве данных волоконно-оптических гироскопов.

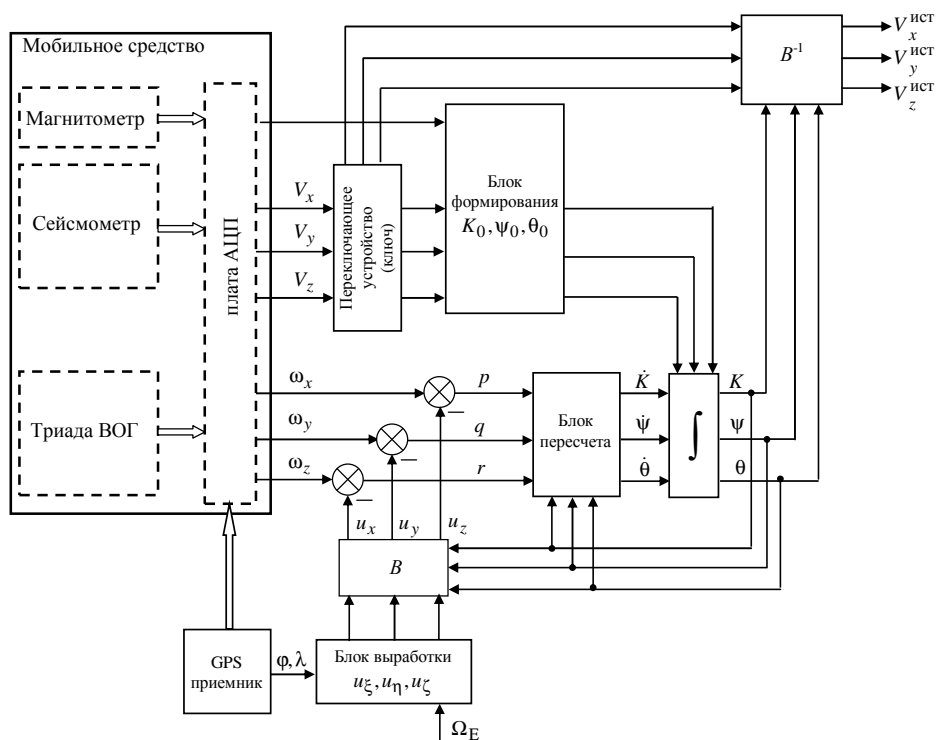


Рисунок 11 – Блок-схема работы мобильного средства

Блок-схема, реализующая работу мобильного средства, представлена на рис. 11. Для синхронизации сигналов используется информация от GPS-приемника. Начальное положение приборов определяется углами  $K_0, \psi_0, \theta_0$ , характеризующими ориентацию системы координат, связанной с мобильным средством ( $x, y, z$ ), относительно географической топоцентрической системы координат ( $\xi, \eta, \zeta$ ). Выработка текущей информации об углах ориентации ( $K, \psi, \theta$ ) измерительного средства определяется по показаниям триады ВОГ с учетом знания проекций переносной угловой скорости географического трехгранника ( $u_x, u_y, u_z$ ). Переключающее устройство (ключ) позволяет идентифицировать произошедшее сейсмическое событие (отличить его на фоне невозмущенного сигнала) и представляет собой скользящее окно, которое осуществляет сравнение текущего СКО выходного сигнала сейсмометра с некоторым заданным, характеризующим невозмущенный сигнал. Как только происходит отличие, это трактуется как сейсмическое возмущение и срабатывает переключение. Сигналы от трехосного сейсмоприемника передаются на блок, туда же поступает информа-



ция об угловом положении от триады ВОГ. Через обратную матрицу перехода  $B^{-1}$  осуществляется коррекция показаний сейсмометра.

На рис. 12 представлены результаты работы алгоритма при обработке реализаций второй серии эксперимента. График демонстрирует зависимости линейных перемещений, получаемых по показаниям сейсмометра *Le3D-Lite* до и после коррекции. Без учета угловой компоненты относительная погрешность определения перемещения по данным сейсмометра ( $\delta_1$ ) составила 27 %, после коррекции, то есть при выработке информации об угловом движении, величина погрешности уменьшилась до 10 % ( $\delta_2$ ), что подтверждает эффективность предложенного алгоритма.

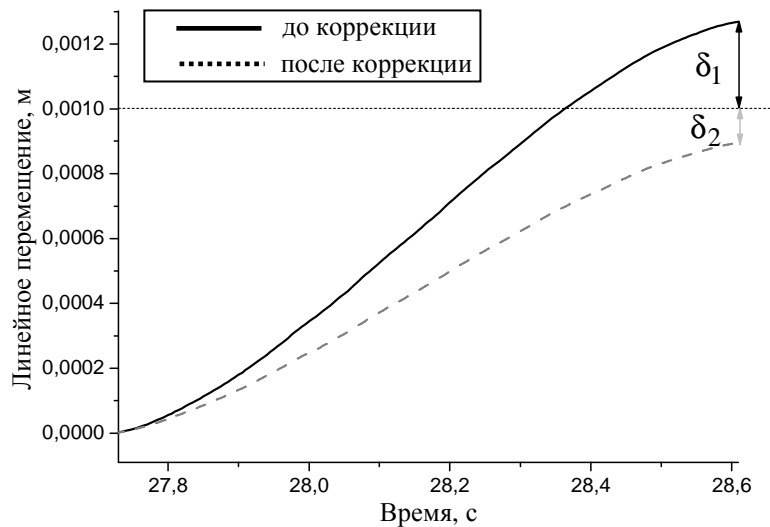


Рисунок 12 – Линейные перемещения, рассчитанные по данным сейсмометра до и после коррекции

### Заключение

В работе получены следующие основные результаты:

1. разработан метод калибровки триады ВОГ при контроле меняющейся магнитной обстановки, позволяющий повысить точность измерения малых угловых скоростей;
2. предложен метод калибровки ВОГ в режиме гармонического изменения угла с привлечением информации о текущем угловом положении испытательного стенда, позволяющий уменьшить динамические погрешности в оценке масштабного коэффициента гироскопа не менее чем в 3 раза;
3. при моделировании угловых колебательных процессов подтверждена возможность применения триады ВОГ для регистрации угловых скоростей вращения от  $1^\circ/\text{с}$ , то есть для проведения измерений в ближней зоне расстояний от эпицентра землетрясения;
4. выработаны рекомендации по созданию метрологического оборудования, способного обеспечить процесс калибровки систем измерения угловой скорости в режиме угловых колебаний с амплитудами от  $0,5^\circ/\text{с}$  до  $50^\circ/\text{с}$  и частотами от 0,1 до 100 Гц.
5. при проведении экспериментальных исследований показаны преимущества, которыми обладает ВОГ по сравнению с электрохимическим датчиком вращения;
6. разработан алгоритм работы мобильной измерительной системы на базе триады ВОГ и сейсмометра, повышающий в 3 раза точность определения линейных параметров сейсмических колебаний в ближней зоне расстояний до эпицентра землетрясения.

Таким образом, научные и практические результаты диссертационной работы подтвердили перспективность и возможность создания мобильного измерительного средства на основе ВОГ. Использование такого средства позволит получать дополнительную информацию о сейсмическом возмущении за счет измерения угловой компоненты движения и данные о наклоне основания при землетрясениях.

### Цитируемая литература

1. Саваренский Е. Ф. Сейсмические волны / Е. Ф. Саваренский – М.: Недра, 1972. – 290 с.
2. Анучин О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов/ О.Н. Анучин, Г. И. Емельянцеv. – Спб., 1999. – 357 с.
3. IEEE Standart Specification Format Guide and Test Procedure for Single-axis Interferometric Fiber Optic Gyros: Working Draft P952/D25, - June 1997. – 83 p.

### Список основных публикаций по теме диссертационной работы

#### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Волоконно-оптические датчики вращения для сейсмических измерений / А.Н. Ткаченко [и др.] // Оптический журнал, 2010. – Вып. 7. – С. 54-59.
2. Ткаченко, А.Н. Результаты калибровочных испытаний триады волоконно-оптических гироскопов/ А.Н. Ткаченко, А.М. Боронахин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – Вып. 7. – С. 89-98.

#### Другие статьи и материалы конференций:

3. Ткаченко, А.Н. Использование волоконно-оптических гироскопов в сейсмологии/ А.Н. Ткаченко, Л.Н. Олейник // Материалы X конференции молодых ученых “Навигация и управление движением”. — Спб: Гироскопия и навигация, 2009. – С. 81-86.
4. Алгоритм испытаний триады гироскопов на двухосном испытательном стенде/ А.Н. Ткаченко [и др.] // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. – Вып. 8. – С. 26-34.
5. Ткаченко, А.Н. Результаты экспериментальных исследований триады волоконно-оптических гироскопов в задачах сейсмологии / А.Н. Ткаченко, Л.Н. Олейник, Д.П. Топал // Материалы XI конференции молодых ученых “Навигация и управление движением”. — Спб: Гироскопия и навигация, 2010. – С. 103-110.
6. Ткаченко, А.Н. Создание мобильной сейсмической установки для регистрации и исследования поступательных и вращательных движений, возбуждаемых землетрясениями/ А.Н. Ткаченко, Л.Н. Подгорная // Сборник докладов и инновационных предложений участников молодежной школы-семинара «Основы инновационного предпринимательства». — Спб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2010. – С. 40-42.
7. Fiber Optic Gyroscope as a tool for detection of seismic rotations / А. Tkachenko [et al.] / 2nd International workshop on Rotational Seismology and Engineering Applications: Abstract, 2010. – P. 14-15.
8. Ткаченко, А.Н. Создание мобильной сейсмической установки для регистрации и исследования поступательных и вращательных движений, возбуждаемых землетрясениями/А.Н. Ткаченко, Л.Н. Подгорная//«У.М.Н.И.К.» в Санкт-Петербурге: разработки победителей конкурса программы Фонда содействия малых предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К.». — Спб.: Изд-во Политех. ун-та, 2010. – С. 74-76.