

На правах рукописи

Елкин Евгений Александрович

**Разработка и исследование оптико-электронной системы хранения
направления в плоской системе координат**

**Специальность 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре информационно-измерительных систем Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Майоров Андрей Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Хорошев Михаил Васильевич

кандидат технических наук

Мейтин Валерий Аркадьевич

Ведущая организация: ОАО НПП «Геофизика-Космос»

Защита состоится « » декабря 2009 г. в часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д.4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д.4).

Автореферат разослан « » ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ю.М. Климков

1. Общая характеристика работы

Актуальность исследований обусловлена потребностью в создании принципиально новой системы хранения направления, основанной на виртуальном измерении углового положения контролируемого основания.

Из рассмотренных свойств гироскопов различного типа, как устройств, решающих задачу хранения направления, следует, что у каждого есть недостатки, ему присущие. Между тем, у всех типов гироскопов общий недостаток – это интегрируемость ошибки измерения курса со временем, что делает невозможной работу гироскопического устройства в течение длительного периода времени.

Общим при традиционном методе хранения курса гироскопическим устройствами, используемым сегодня, является создание направления на подвижном основании физическими элементами этих устройств, а также сохранение их положения в независимой от подвижного основания системе координат (инерциальной или связанной с землей).

Необходимость периодического выставления гироскопа по заданному направлению влияет как на точность измерений, так и на удобство его эксплуатации.

Высокие точности измерений могут обеспечить механические, кольцевые лазерные и возможно, лучшие образцы волоконно-оптических гироскопов. С точки зрения стоимости в этом случае лучше всего волоконно-оптические гироскопы, однако их цена на Западе, судя по проведенным исследованиям рынка, составит от 10 тыс. долларов и выше. Стоимость кольцевого лазерного гироскопа при той же точности раза в два выше.

Постоянно возрастающие требования к точностным и эксплуатационным характеристикам гироскопических приборов стимулируют интерес не только к дальнейшим усовершенствованиям рассмотренных в работе гироскопов, но и к поискам принципиально новых

идей, позволяющих решить проблему создания чувствительных датчиков для индикации и измерения угловых движений объекта в пространстве.

Резюмируя все вышесказанное, напрашивается вывод: в настоящее время для системы определения ориентации подвижного объекта использование оптических инерциальных измерителей в чистом виде нецелесообразно. Среди гироскопов наиболее перспективными, видимо, являются механические гироскопы как обладающими наивысшей точностью при минимальных габаритах. Использование волоконно-оптических гироскопов также накладывает дополнительные требования. Для повышения точности с использованием математического аппарата фильтрации необходимо проведение дополнительных исследований.

Анализ литературы показывает, что в классических системах определения ориентации инерциальные датчики дополнены датчиками положения, выполняя измерения каждые в своем спектре изменения угловых скоростей. При этом относительные погрешности измерений, выполненные гироскопами в низкочастотной области спектра, увеличиваются и могут быть одного порядка с измеряемыми величинами. В этом случае необходимо периодически корректировать измеряемые данные, используя независимые измерения.

Таким образом, интересна разработка нового подхода к хранению направления, идеей которого станет отказ от так называемого физического метода хранения направления. При этом оно может виртуально сохраняться через результаты угловых измерений, производящихся с момента запуска устройства.

Идея метода должна быть универсальна, и конкретика ее применения в той или иной области может варьироваться лишь от массогабаритных параметров навигационного устройства.

При этом стоимость должна быть конкурентоспособной по отношению к существующим сегодня приборам.

Целью диссертационной работы является разработка метода хранения направления в плоской системе координат, основанного на отказе от традиционного физического хранения. При этом оно может храниться в виде результатов угловых расчетов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- 1) Выполнен аналитический обзор литературных и патентных источников известных методов навигации, хранения и определения положения, проведен их анализ, выявлены частные и общие недостатки;
- 2) Разработана и исследована модель оптико-электронной системы хранения направления, основанной на виртуальном измерении изменений положения контролируемого основания;
- 3) Разработаны методики расчета, получены аналитические зависимости, учитывающие связь массогабаритных параметров устройства с точностью измерений, возможных погрешностей;
- 4) Проведен анализ и расчет параметров работы исследуемой системы применительно к контролю характеристик железнодорожного пути, точность результатов которого превышает используемые сегодня методы.

Методы исследования

Все разработанные методы и алгоритмы были протестированы на персональных компьютерах.

В качестве математического аппарата для расчетов использовались:

1. Ковариационная модель для нахождения оптических передаточных функций;
2. Преобразование Фурье.
3. Для проведения численных и аналитических расчетов были использованы программные пакеты MATHCAD, MAPLE.

Для трехмерного моделирования была использована среда 3D MAX.

Основные положения, выносимые на защиту

- 1) Методика хранения направления в плоской системе координат. Хранение направления реализуется виртуально через результаты периодических угловых измерений.
- 2) Алгоритм построения математической модели системы.
- 3) Анализ и расчет возможных ошибок системы хранения направления. Возможные пути их компенсации.
- 4) Практическая реализация предложенного метода для контроля параметров железнодорожных путей.

Научная новизна результатов диссертационного исследования:

- 1) Обоснована необходимость создания и применения нового подхода в области хранения направления;
- 2) Найден новый алгоритм, позволяющий осуществлять хранения направления, основываясь на результатах угловых измерений;
- 3) Построена математическая модель системы, позволяющая рассмотреть специфику ее работы, детально рассмотрены возможные погрешности измерений, определена потенциальная точность измерений;
- 4) Подана заявка на изобретение устройства, работа которого построена на одной из реализаций исследуемой оптико-электронной системы.

Научная ценность работы состоит в разработке и исследовании принципиально новой оптико-электронной системы, в основе работы которой лежит идея отказа от традиционного физического хранения.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики, алгоритмов расчета оптико-электронной системы, позволяющей производить контроль параметров железнодорожного полотна. При этом стоимость и точность метода вполне конкурентоспособна по сравнению с современными аналогами.

Личный вклад автора

Все полученные в ходе исследования математические и аналитические расчеты и зависимости принадлежат автору. Им разработаны модель работы метода, исследованы все возможные причины возникновения погрешностей, проведена оценка точности метода при различных условиях эксплуатации.

Апробация работы

Основные результаты исследования на 3-х международных конференциях и научно-технической конференции студентов и молодых ученых МИИГАиК.

Публикации

По материалам работы опубликованы 2 статьи в рецензируемых изданиях, включенных в список ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 120 страниц машинописного текста.

1. Содержание работы

Во **введении** приводится краткий исторический очерк методов определения и хранения направления с древнейших времен до наших дней.

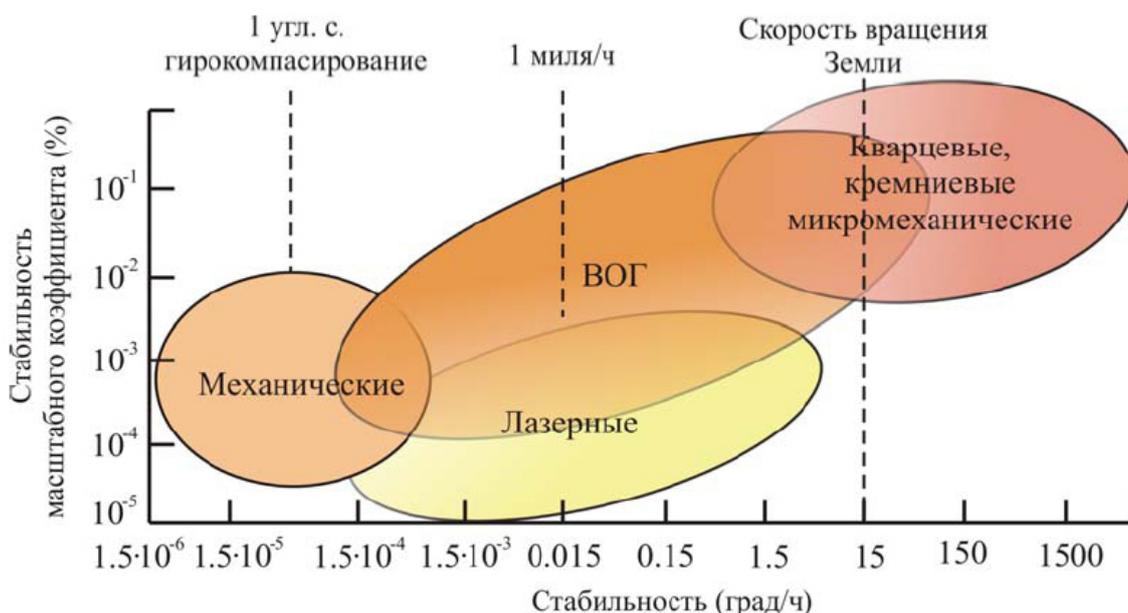
В **первой главе** проводится обзор современных устройств хранения направления – гироскопов.

В ходе проведенного исследования были выявлены недостатки, присущие каждому типу гироскопических устройств, а также общие особенности работы, вносящие погрешности в измерения.

Анализ показал, что в классических системах определения ориентации инерциальные датчики дополнены датчиками положения, выполняя измерения каждые в своем спектре изменения угловых скоростей. При этом относительные погрешности измерений, выполненные гироскопами в низкочастотной области спектра, увеличиваются и могут быть одного порядка с измеряемыми величинами. В этом случае необходимо

периодически корректировать измеряемые данные, используя независимые измерения.

У всех исследованных типов гироскопов обнаружен общий недостаток – интегрируемость ошибки измерения курса со временем, что делает невозможной работу гироскопического устройства в течение длительного периода времени, при этом создавая необходимость периодического выставления гироскопа по заданному направлению, что влияет как на точность измерений, так и на удобство его эксплуатации.



Точности гироскопов представлены на рис. 1

Таким образом, интересна разработка нового подхода к хранению направления, идеей которого станет отказ от так называемого физического метода хранения направления. При этом оно может виртуально сохраняться через результаты угловых измерений, производящихся с момента запуска устройства.

Идея метода должна быть универсальна, и конкретика ее применения в той или иной области может варьироваться лишь от массогабаритных параметров навигационного устройства.

При этом стоимость должна быть конкурентоспособной по отношению к существующим сегодня приборам.

Предлагается схема работы метода, в основе которой лежит взаимодействие двух каналов: опорного и измерительного. При этом в качестве плоскости измерения предлагается выбрать плоскость вращения инерционной массы – маховика. Он закреплен на контролируемом основании в подшипниках. Таким образом, его работа никак не будет связана с вращением самого основания.

Целью совместной работы опорного и измерительного каналов является определение угловых поворотов основания, на котором они расположены.

Схемы обоих каналов представлены на рис. 2 и 3.

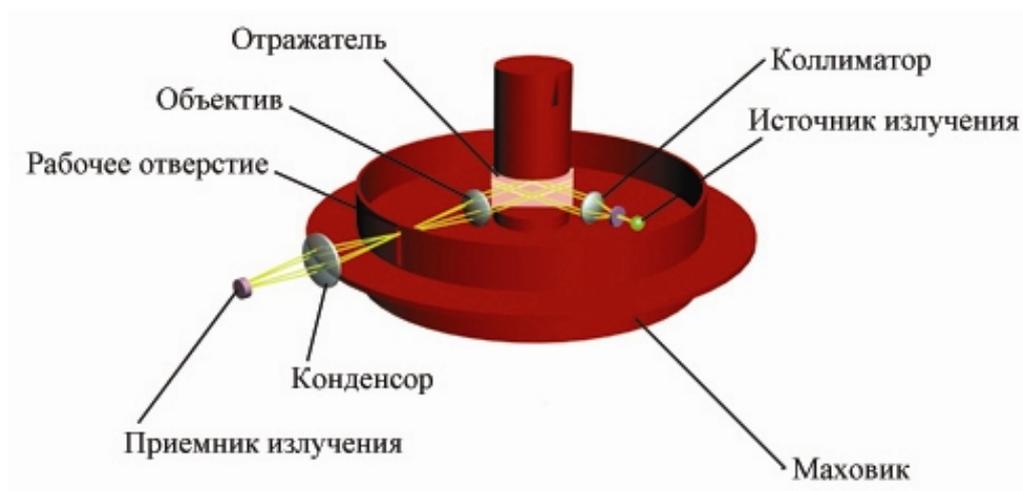


Рис.2

Опорный канал

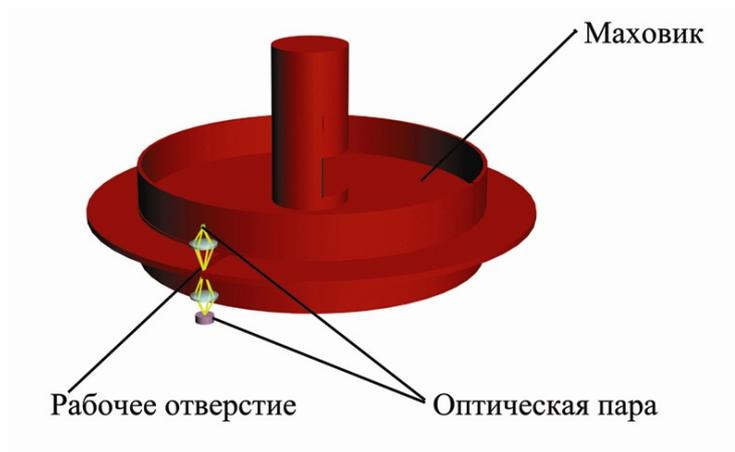


Рис. 3

Измерительный канал

Системы обоих каналов расположены на основании, положение которого контролируется. Это позволяет избежать рассогласований в работе внутри каждого из каналов.

Дается подробное описание работы опорного и измерительного каналов. При этом уделяется особое внимание работе опорного, в котором происходит компенсация поворотов основания оптическими методами, что делает возможным связать с ним хранимое направление.

Ход лучей до поворота основания показан на рис. 4 толстыми линиями. Излучение от источника 1 попадает на коллимирующую линзу 2, после чего, отразившись, - в объектив приемной системы 3. Рабочее отверстие 4 располагается в задней фокальной плоскости объектива, что позволяет получить промежуточное изображение, которое через конденсор 5 попадает на фотоприемное устройство 6.

При повороте основания на некоторый угол α вместе с ним повернется, и вся система опорного канала, что показано на рис. 4. Тогда согласно законам оптики отраженный луч повернется в противоположную сторону на угол 2α . Однако промежуточное изображение после прохождения излучения объектива 3 все равно будет сформировано в плоскости рабочего отверстия 4. После чего оно попадет на фотоприемное устройство 6.

Таким образом, период появления электронных импульсов на фотоприемнике 6 не будет зависеть от вращения основания (рис. 5). Хранимое направление можно связать с этими импульсами.

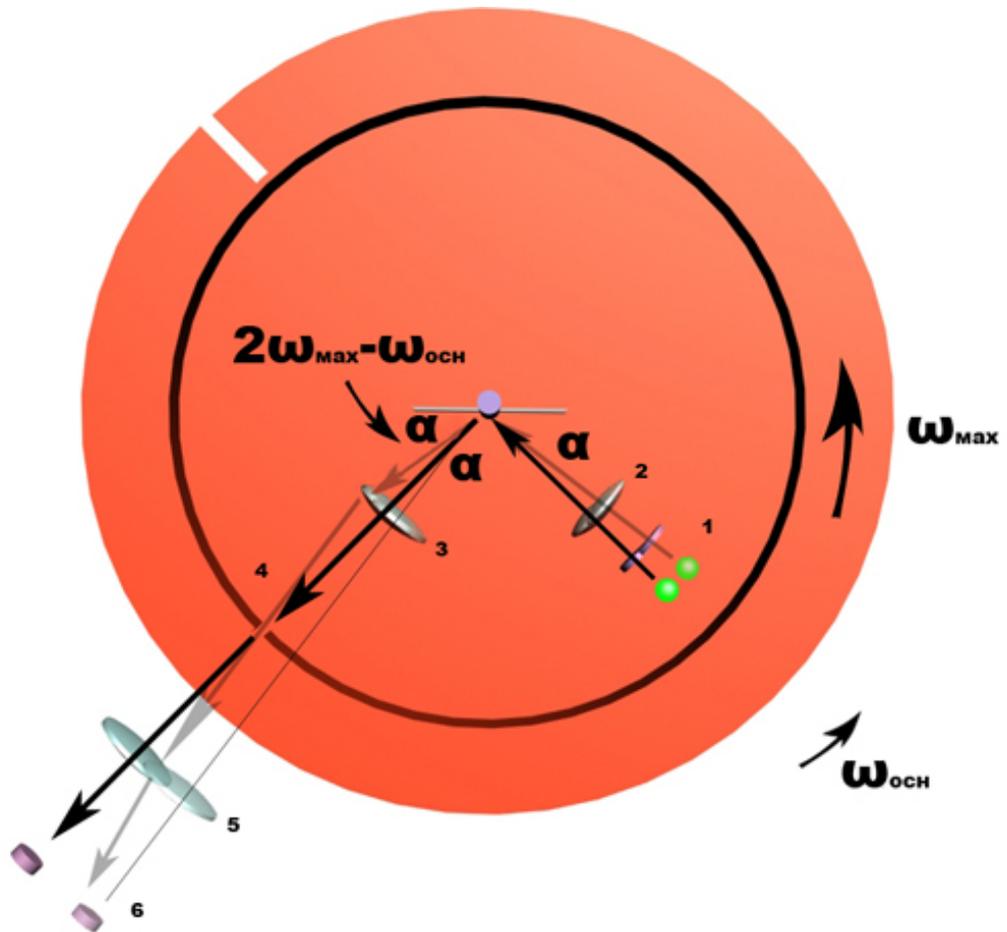


Рис. 4

Ход лучей в опорном канале *до и после* поворота основания (вид сверху)



Рис. 5

Сигнал опорного канала не зависит от поворотов основания

Сигнал на фотоприемнике измерительного канала (рис. 6) возникает с учетом задержки (опережения) с случае поворота основания в направлении совпадающем или противоположном вращению маховика.

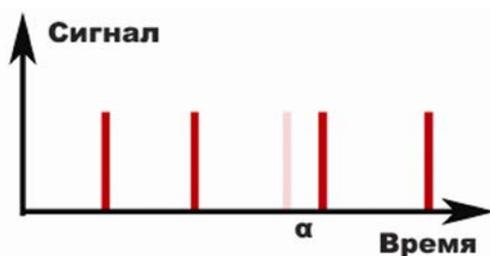


Рис. 6

Сигнал измерительного канала с учетом вращения основания

Таким образом, сопоставление сигналов опорного и измерительного каналов позволяет получить сигнал рассогласования, который в свою очередь несет информацию об изменении углового положения основания α .

Во **второй главе** приводится построение математической модели, позволяющей описать работу исследуемого метода хранения направления.

Логика работы устройства, реализующего исследуемый метод, а также преобразования оптических сигналов в системах каналов, описаны через систему передаточных функций компонентов.

Для опорного канала найдены передаточные функции следующих компонентов: коллиматора, отражателя, объектива приемной системы, рабочего отверстия, конденсора, фотоприемника.

Для измерительного канала: объектив приемной системы и конденсор, входящие в оптическую пару, рабочее отверстие, фотоприемник.

Полученные значения, сопоставленные со скоростью вращения маховика, позволяют получить форму импульсов на фотоприемнике.

В результате расчетов, полученные передаточные характеристики имеют виды:

$$H_{\text{опорный_канал}}(f_x, f_y) = \frac{2}{\pi} \left\{ \left[\arccos\left(\frac{\chi}{2\chi_0}\right) - \frac{\chi}{2\chi_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi}{2\chi_0}\right)^2} \right] * \exp\left[-\frac{\pi^2 D^2 \chi^2}{2}\right] \right\}^3 \frac{2 \operatorname{arctg}\left[\frac{D}{2f}\right]}{180} R_{\text{опр}}$$

$\Lambda\left(\frac{f_x}{4\chi_{x0}}\right)\Lambda\left(\frac{f_y}{4\chi_{y0}}\right)$ - для опорного канала;

$$H_{\text{измерительный_канал}}(f_x, f_y) = \frac{2}{\pi} \left\{ \left[\arccos\left(\frac{\chi}{2\chi_0}\right) - \frac{\chi}{2\chi_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\chi}{2\chi_0}\right)^2} \right] * \exp\left[-\frac{\pi^2 D^2 \chi^2}{2}\right] \right\}^2 * \Lambda\left(\frac{f_x}{4\chi_{x0}}\right)\Lambda\left(\frac{f_y}{4\chi_{y0}}\right) - \quad \text{для}$$

измерительного канала.

Тогда формы электрических сигналов опорного и измерительного каналов будут выражаться зависимостями:

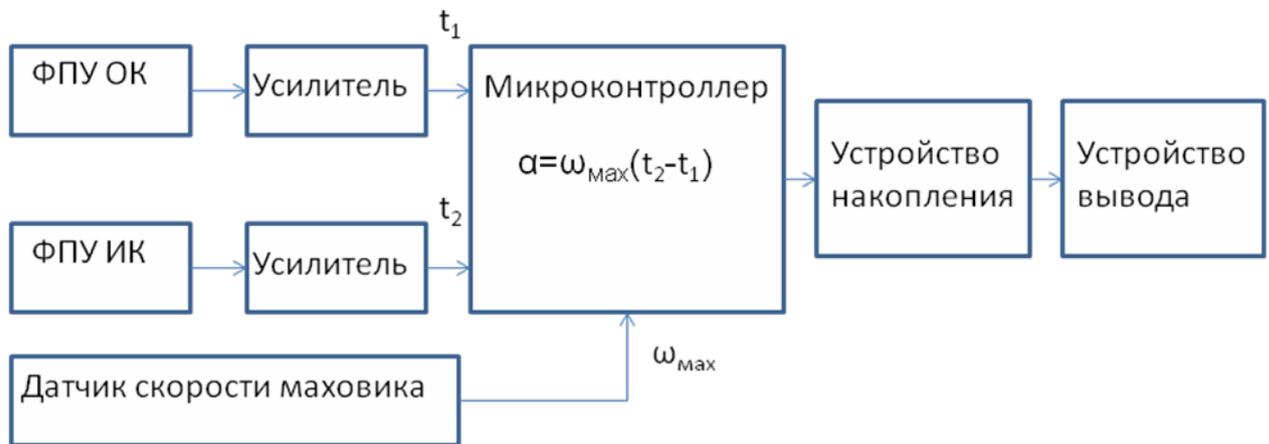
$$U_{\text{опорный_канал}} = S_{\text{пи_опорный_канал}} * H_{\text{опорный_канал}} * E_{\text{ист_опорный_канал}}$$

$$U_{\text{измерительный_канал}} = S_{\text{пи_измерительный_канал}} * H_{\text{измерительный_канал}} * E_{\text{ист_измерительный_канал}}$$

Угол поворота основания может быть найден по формуле, учитывающей время появления данных сигналов относительно друг друга и угловую скорость вращения маховика:

$$\alpha = \omega_{\text{max}} \Delta t$$

Вариант реализации электронного тракта для исследуемой системы имеет вид:



На схеме: ФПУ ОК и ФПУ ИК – фотоприемные устройства опорного и измерительного каналов, t_1 и t_2 – время появления импульсов.

В **третьей главе** проводятся расчеты погрешностей измерений метода.

К случайным погрешностям отнесена угловая погрешность измерительного канала. Ее причина заключается в том, что не известен момент начала вращения основания во время одного периода вращения маховика. Погрешность рассчитана исходя из наиболее неблагоприятных возможных условий. Рассчитанное значение представлено как угловая ошибка измерения и как временная ошибка появления импульса на фотоприемнике. Построенные предельные зависимости $\Delta_T \max$ и $\Delta_\alpha \max$ соответствуют частоте вращения маховика 10 Гц, то есть 600 об/мин.

Результаты представлены на рис. 7.

По оси абсцисс отложена частота поворотов основания в секундах.

По оси ординат – временная (с, секунды) и угловая (", секунды) ошибки появления сигнала.

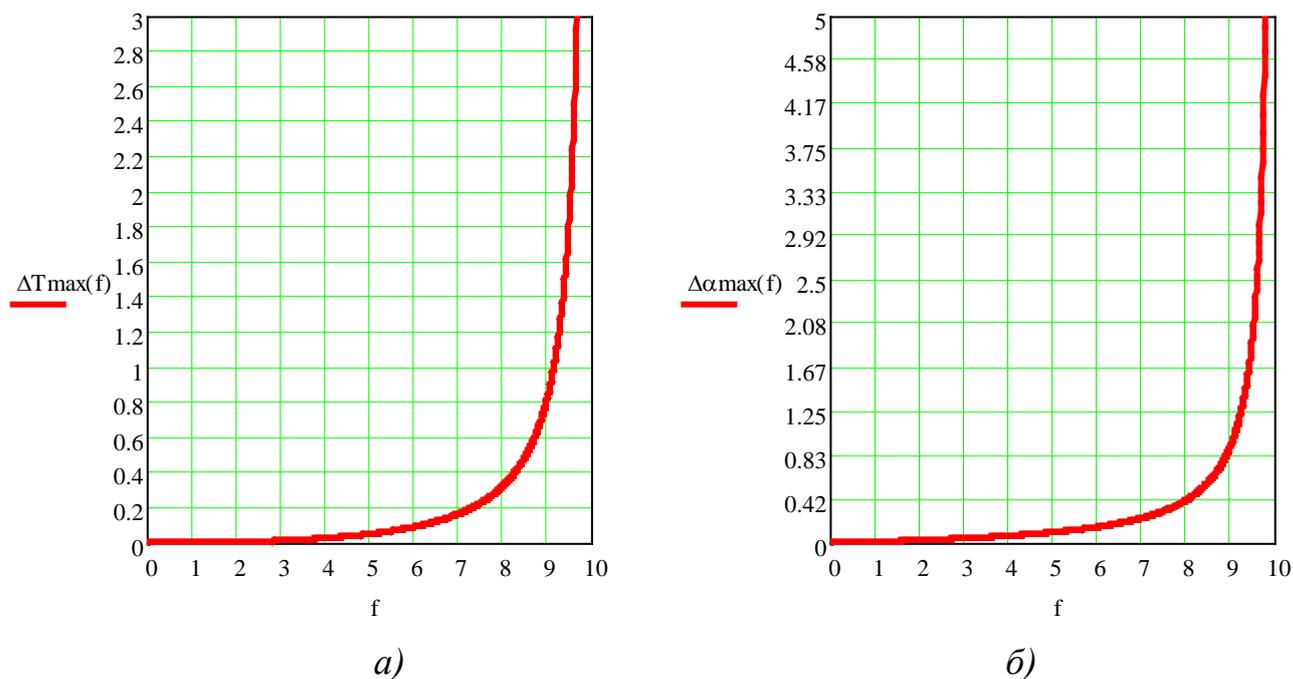


Рис. 7

Предельные временная $\Delta_T \max$ (а) и угловая $\Delta_\alpha \max$ (б) ошибки измерительного канала

К инструментальным отнесена погрешность смещения промежуточного изображения в плоскости рабочего отверстия опорного канала в результате искривления фокальной плоскости при повороте основания.

Ситуация представлена на рис. 8. Позициями 1 и 2 обозначен объектив приемной системы опорного канала до и после поворота основания на угол α соответственно. Положение промежуточных изображений 3 и 4 в плоскости рабочего отверстия будут отличаться на угол θ .

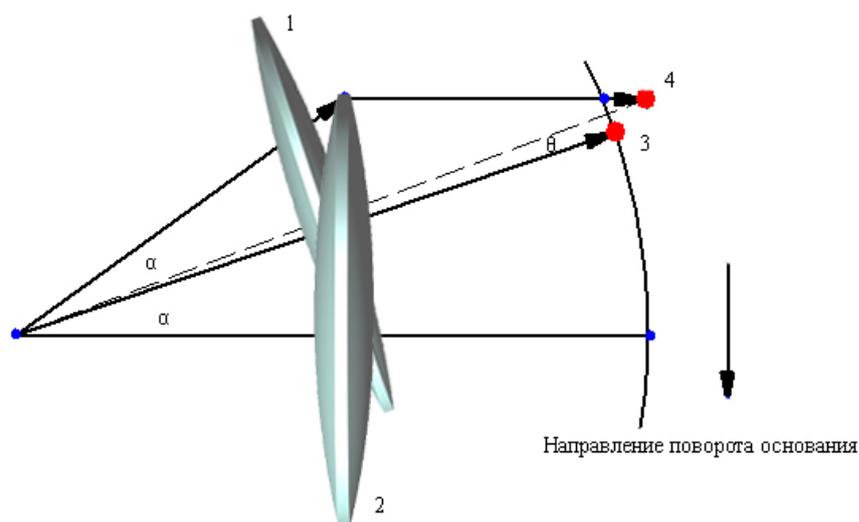


Рис.8

Ошибка формирования изображения при повороте основания

Рассчитанная зависимость угловой ошибки θ (в секундах) от угла поворота основания α (в градусах) представлена на рис. 9.

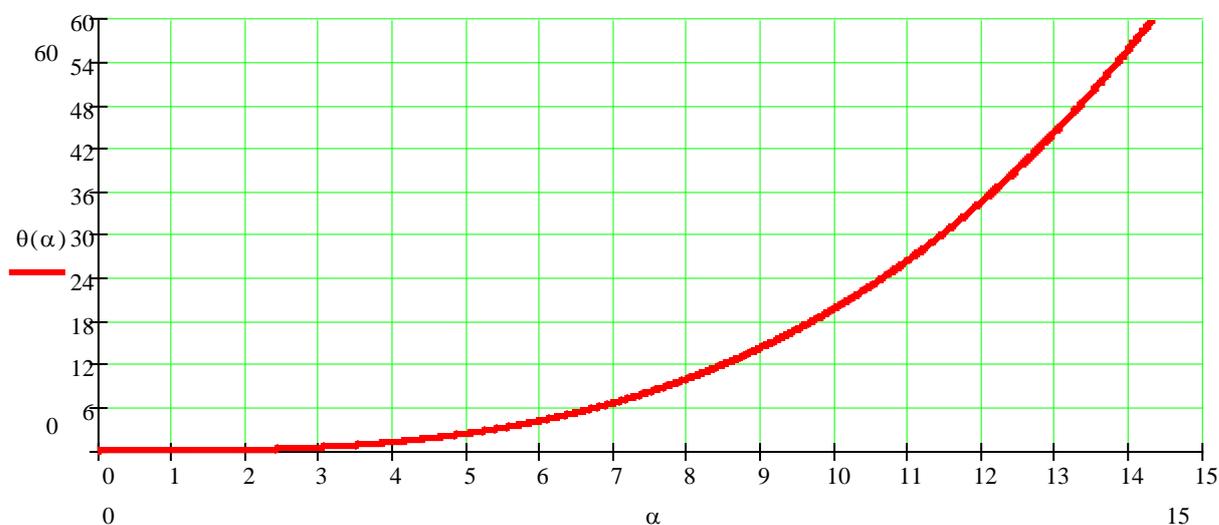


Рис. 9

Угловая ошибка измерений при повороте основания в диапазоне углов $0^\circ \dots 15^\circ$

Особый интерес представляет участок в интервале углов поворотов основания $0^\circ \dots 3.75^\circ$ с ошибкой измерений, не превышающей 1", что может оказаться полезным при проектировании устройства, ориентированного на работу с данной точностью.

Угловая ошибка измерений при повороте основания в диапазоне углов $0^\circ \dots 3.75^\circ$ представлена на рис. 10.

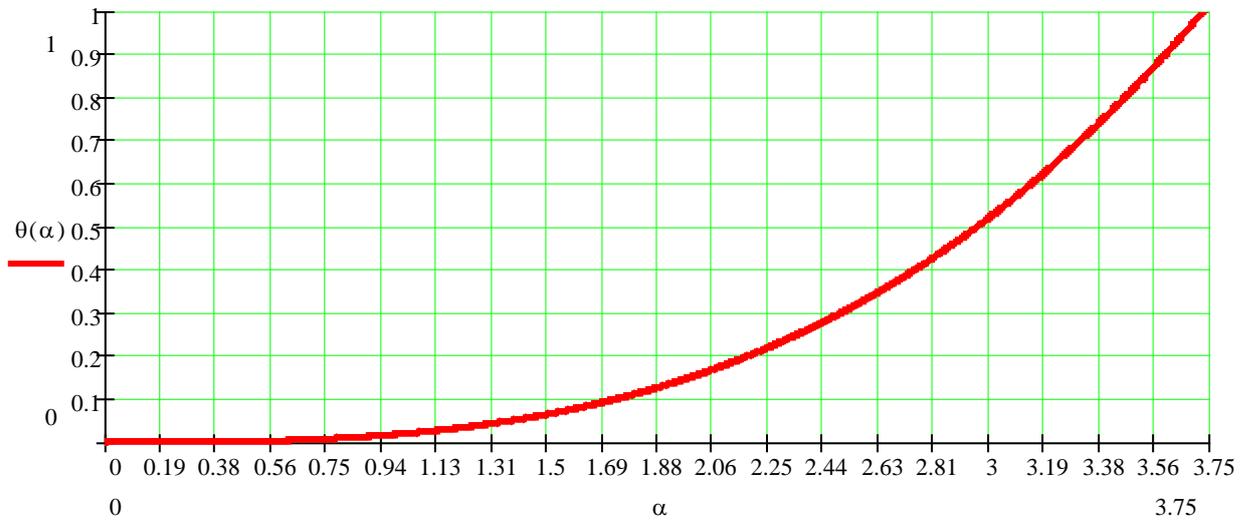


Рис. 10

Угловая ошибка измерений при повороте основания в диапазоне углов $0^\circ \dots 3.75^\circ$

Рассчитано угловое поле прибора, реализующего исследуемую систему хранения направления. Его значение связано с диапазоном возможных измерений поворотов контролируемого основания. При этом показано, что его увеличение ведет к увеличению габаритов устройства.

Зависимость углового поля системы β от относительного отверстия

$$a = \frac{D}{f}:$$

$$\beta = \left| \frac{\arctg\left(\frac{D}{2f}\right)}{2} \right|$$

График этой зависимости представлен на рис. 11.



Рис. 11

Зависимость углового поля системы от относительного отверстия

Проведен подробный анализ влияния наклона основания в вертикальной плоскости на скорость вращения маховика. В результате вычислений было получено соотношение, позволяющее определить минимальную скорость вращения, необходимую для осуществления измерений с учетом возможных значений угла наклона.

Проведен анализ массогабаритных параметров маховика, а также влияния возникающих гироскопических сил (рис. 12 а,б) на скорость его вращения.

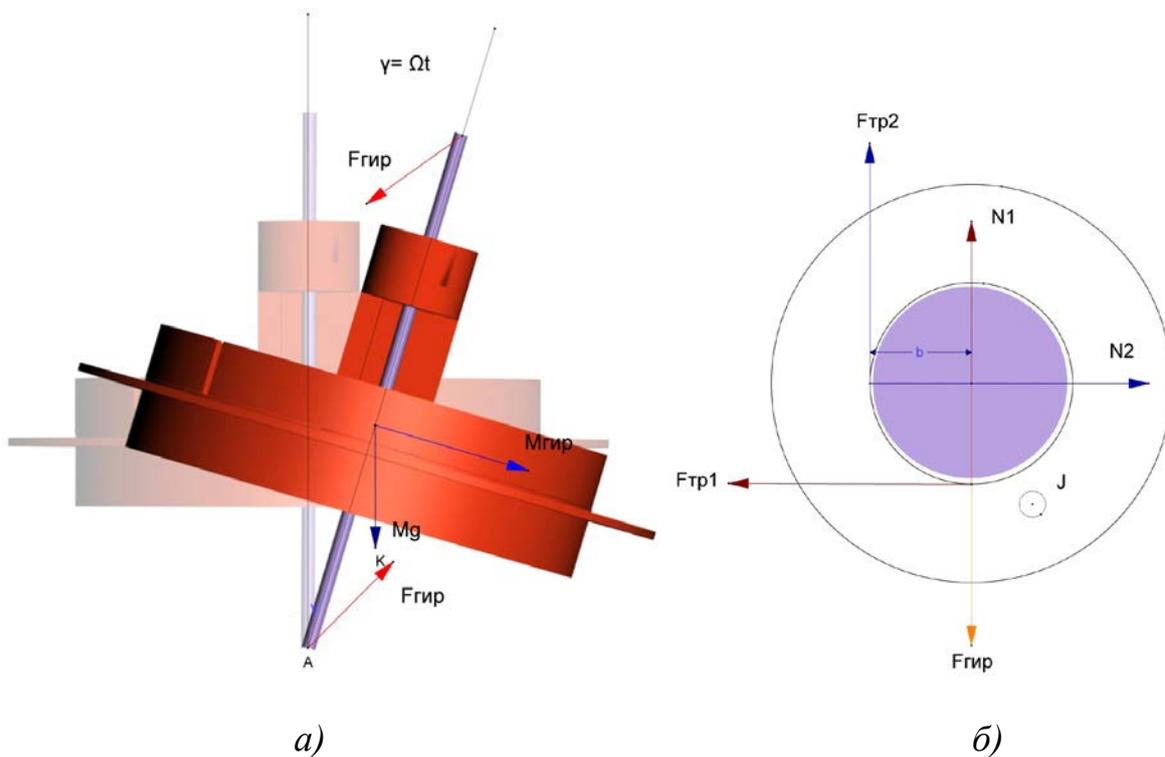


Рис. 12

Силы, возникающие при наклоне оси маховика в вертикальной плоскости (а),
силы, действующие на ось маховика в подшипнике (б)

Проведенный расчет справедлив для диапазона изменения угла γ в пределах $0^\circ \dots 90^\circ$.

Угловая скорость вращения маховика ω_{max} в зависимости от угла наклона γ и времени t , в течение которого ось меняла свое положение, имеет вид:

$$\omega_{max}(t, \gamma) = \omega_0 - Ct \sin(\gamma)$$

При условии $\gamma = 90^\circ$ получаем:

$$\omega_{max}(t, \gamma) = \omega_0 - Ct$$

Учитывая требование вращения маховика вплоть до достижения угла $\gamma = 90^\circ$, имеем:

$$\omega_0 = Ct,$$

В выражениях коэффициент C зависит от момента инерции маховика (массы и габаритов), размеров подшипников и трения в них:

$$C = \frac{1}{\left(\frac{1}{8}m_1d_2 + \frac{1}{8}m_2D^2 + \frac{1}{2}m_3\left(\frac{D^2}{2} + Dh + h^2\right) + \frac{1}{2}m_4(2D^2 + 2DH + H^2) + \frac{1}{16}m_5d^2\right)} * \frac{Mg\mu b}{\left[\frac{\pi b}{2z}(\mu + 1) - 1\right]}$$

Из соотношения видно, что значение начальной угловой скорости ω_0 маховика следует задавать исходя из предполагаемого времени t , требующегося для наклона оси маховика на заданный угол γ , а также его массогабаритных параметров.

В **четвертой главе** проводится экспериментальное исследование метода хранения направления применительно к контролю параметров железнодорожных путей.

Точное знание геометрии пути является критическим фактором обеспечения безопасности движения поездов на железных дорогах. В кривых участках нагрузка на путь значительно сильнее, чем в прямых. Объясняется это тем, что при движении состава по кривой на рельсы передаются дополнительные силы: неуравновешенная часть центробежной силы и силы рамного давления от вписывания жесткой базы подвижного состава в колею.

Задача метода – измерение углов отклонения от плоскости горизонта в продольном и поперечном направлениях (тангаж и крен, соответственно), а также отклонения от заданного направления движения.

Исходя из требований к точности проведения работ, имеем:

Длина хорды, м	Радиус изгиба полотна, м	Разность стрел изгиба, мм
20	400	12

Указанная ситуация представлена на рис. 13 (масштаб не соблюдается):

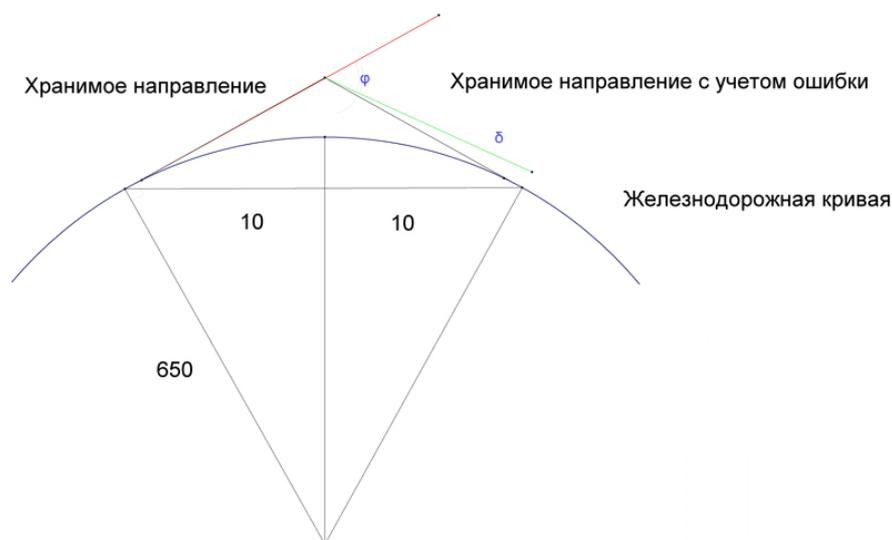


Рис. 13

Железнодорожная кривая

Согласно принципу работы метода, необходимо просканировать участок железнодорожной кривой. При этом изменение направления хранимого направления указано на рисунке.

Из геометрических расчетов следует, что значение угла φ составляет 1.76° .

Рассчитанная ошибка измерения δ будет равна $0.07''$ или $2 \cdot 10^{-5}^\circ$.

Положение реальной точки кривой относительно расчетной будет отличаться на $8.7 \cdot 10^{-3}$ мм, что значительно точнее требуемых 12 мм.

Предложенный метод хранения направления может стать альтернативой существующим методам определения геометрических параметров рельсовой колеи, работающих по принципу непрерывного определения углового положения вагона-путеизмерителя.

Основные результаты работы

1. Проведен анализ современных средств хранения направления, определены их принципиальные и неустраняемые источники погрешностей. Доказана актуальность создания нового метода, лишенного этих недостатков.
2. Разработана модель оптико-электронной системы хранения направления, в основе работы которой лежит принципиально новый подход виртуального хранения направления.
3. Проведен подробный анализ работы системы, разработана ее математическая модель, определены и рассчитаны значения возможных погрешностей измерений.
4. Получены расчетные формулы, позволяющие проектировать устройство, ориентируясь на конкретную область применений.
5. Результаты экспериментального исследования компьютерного макета системы подтвердили правильность теоретических расчетов.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Колодеж Ю.В., Елкин Е.А. Метод хранения направления. // «Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка» - 2009, № 2, с. 97-101.
2. Колодеж Ю.В., Майоров А.А., Елкин Е.А. Принцип работы углоизмерительного устройства. // «Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка» - 2009, № 5, с. 95-98.
3. Майоров А.А., Колодеж Ю.В., Елкин Е.А. Методика хранения направления в плоской системе координат. // «Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр – XXI век», Москва, МИИГАиК, 2009, с. 255.
4. Елкин Е.А., Майоров А.А. Метод хранения направления в плоской системе координат. // «Тезисы докладов VI Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2009», Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2009, с. 314.