

На правах рукописи



Мишин Валерий Юрьевич

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ЛАЗЕРНОМ
ГИРОСКОПЕ С ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: Чиркин Михаил Викторович,
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: Измайлов Евгений Аркадьевич,
доктор технических наук, заместитель
Главного конструктора ОАО
«Московский институт
электромеханики и автоматики»

Акилин Владимир Иванович,
кандидат технических наук, доцент,
профессор ФГБОУ ВПО «МАТИ -
Российский государственный
технологический университет
им. К.Э. Циолковского»

Ведущая организация: Филиал ФГУП «НПЦ автоматики и
приборостроения им. академика
Н.А. Пилюгина» – «ПО Корпус»
(г. Саратов)

Защита диссертации состоится «22» октября 2013 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, ученый совет РГРТУ.

Автореферат разослан « 20 » сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р физ.-мат. наук, профессор



Чиркин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Лазерные гироскопы как прецизионные датчики угловых перемещений и угловых скоростей являются одними из наиболее распространенных средств автономной инерциальной навигации. Требования к ним весьма высоки: чтобы обеспечить автономное определение местоположения с точностью не хуже 1,8 км (1σ) за час полета, необходимо, чтобы суммарная погрешность измерения угловой скорости не превышала 0,02 °/ч.

Включение в состав лазерного гироскопа цифрового управляющего процессора (US Patent 6,208,414) позволило достичь ряда преимуществ:

- обеспечить эффективное управление запуском прибора;
- осуществить тестирование элементов гироскопа и формирование сигнала о его работоспособности;
- упростить системы автоматического управления кольцевым лазером и формирования частотной подставки;
- реализовать алгоритмы компенсации тепловых дрейфов.

Однако существующие в настоящее время методы и устройства, применяемые при обработке информационных сигналов, имеют ряд существенных недостатков:

1) высокий уровень флуктуаций в выходном сигнале лазерного гироскопа, связанный с необходимостью ошумления частотной подставки и шумом квантования;

2) дополнительную погрешность, которая появляется в результате вычитания из выходных данных результатов регистрации колебаний кольцевого лазера относительно корпуса гироскопа с помощью дополнительного датчика угловой скорости;

3) избыточное количество вспомогательных устройств, предназначенных для контроля и коррекции работы лазерного гироскопа, - существует потребность в сокращении функциональных узлов и упрощении конструкции.

Предпосылка для целенаправленного поиска новых решений заключается в том, что информация, необходимая для работы систем автоматического управления периметром кольцевого резонатора и вибрационной подставкой содержится в первичных сигналах. В случае создания надежных алгоритмов ее выделения отпадет необходимость во вспомогательных датчиках.

Кроме перечисленных задач, заслуживает внимания перспектива создания новой методики регистрации одной из ключевых метрологических характеристик лазерного гироскопа - порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере, основанной на извлечении информации лишь из первичных сигналов лазерного гироскопа и исключающей необходимость использования прецизионных испытательных стендов.

Цель работы: поиск методов обработки информации в лазерном гироскопе без использования иных источников данных, кроме квадратурных сигналов, отражающих перемещения интерференционной картины, сформированной выведенными из кольцевого резонатора лазерными пучками.

Достижение поставленной цели требует решения **следующих задач**:

- моделирование влияния возмущений квадратурных сигналов, типичных для лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой, на искажения восстановленного временного ряда значений разности фаз встречных волн (фазы Саньяка);
- определение характеристик информационного тракта в условиях возмущений квадратурных сигналов;
- поиск типа и параметров цифрового фильтра для подавления колебаний на частоте вибрационной подставки в выходном сигнале;
- количественное описание погрешности регистрации угловых перемещений, обусловленной фильтрацией подставки, и определение их связи с параметрами фильтра и характеристиками механического вращения;
- упрощение конструкции лазерного гироскопа за счет исключения избыточных функциональных узлов;
- разработка методики измерения порога синхронизации встречных волн, основанной на выделении необходимой информации из квадратурных сигналов и нечувствительной к неравномерности вращения.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Способ регистрации перемещений интерференционной картины в реальном времени, основанный на дискретизации и цифровой обработке квадратурных сигналов, развит применительно к лазерным гироскопам с вибрационной частотной подставкой.
2. Количественно описано влияние возмущений квадратурных сигналов на адекватность регистрации изменений разности фаз встречных волн, генерируемых кольцевым гелий-неоновым лазером.
3. Теоретически и экспериментально обоснован способ определения величины паразитной емкостной связи между информационными каналами лазерного гироскопа путем выделения колебаний разности фаз квадратурных сигналов на частоте подставки.
4. Продемонстрирована возможность настройки кольцевого резонатора на центральную частоту лазерного перехода по изменению амплитуд квадратурных сигналов.
5. Обнаружена связь особенностей спектра производной от фазы Саньяка – выходного сигнала лазерного гироскопа с методической погрешностью измерения порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Дискретизация квадратурных сигналов, содержащих возмущения, типичные для лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой, позволяет в реальном времени достичь чувствительности к изменениям разности фаз встречных волн 0,03 радиана – одного порядка с точностью регистрации интерференционной картины в лабораторных условиях.
2. Узкополосная фильтрация выходного сигнала лазерного гироскопа вызывает погрешность измерений углового перемещения, пропорциональную

произведению квадратного корня из углового ускорения на ширину полосы подавления.

3. Регистрация порога синхронизации при обработке квадратурных сигналов осуществима, если скорость углового движения лазерного гироскопа превышает $2 \text{ }^\circ/\text{с}$ и обеспечивает разнесение спектров компонент выходного сигнала, отражающих механическое вращение и связь встречных волн.

Научно-практическое значение результатов диссертации:

1. Реализованный подход позволяет обновлять выходные данные с частотой не менее 5 кГц и подавлять шум квантования в выходном сигнале лазерного гироскопа.
2. Практическое применение найденных алгоритмов в сервисной электронике открывает путь для упрощения конструкции лазерного гироскопа за счет отказа от системы регистрации мощности лазерного излучения и датчика колебаний моноблока относительно корпуса прибора.
3. Обнаруженная связь погрешности измерений угловых перемещений с угловым ускорением и полосой подавления фильтра позволяет удалить колебания на частоте подставки из выходного сигнала и использовать лазерный гироскоп в системах инерциальной навигации высокой точности для регистрации угловых перемещений объекта, быстро маневрирующего с угловыми ускорениями до $1000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$.
4. Разработана методика измерения порога синхронизации при однонаправленном механическом вращении кольцевого лазера, которая позволяет отказаться от использования прецизионного поворотного устройства, нечувствительна к неравномерности вращения и исключает человеческий фактор при измерениях и обработке результатов.
5. Методика измерения порога синхронизации в режиме частотной подставки не требует специального стенда и реализуема на стадии эксплуатации лазерного гироскопа.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием результатов моделирования данным, полученным экспериментально, и применением методов измерений, основанных на разных принципах регистрации и обработки информации.

Реализация и внедрение результатов осуществлены в ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики» путем создания новых алгоритмов цифровой обработки квадратурных сигналов лазерных гироскопов.

Апробация работы. Результаты исследований представлены на 9 научно-технических конференциях: XVII, XVIII и XIX международных конференциях по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург, 2010, 2011, 2012 гг.; XXVII и XXVIII Всероссийских конференциях памяти Н.Н. Острякова, г. Санкт-Петербург, 2010, 2012 гг.; XV и XVI международных научных конференциях «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2011, 2012 гг.; XXXVII и XXXVIII международных научных конференциях «Гагаринские чтения», Москва, МАТИ, 2011, 2012 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 15 работ, в том числе три статьи - в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 160 листах машинописного текста и содержит 87 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 78 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность работы и выбор направления исследований, приведены цель и основные задачи диссертации, сформулирована научная новизна и научные положения, вынесенные на защиту.

Первая глава представляет собой аналитический обзор литературы, в котором рассмотрено формирование информационного сигнала в лазерном гироскопе с вибрационной частотной подставкой. В качестве базового прибора использован кольцевой гелий-неоновый лазер КЛ-1, разработанный в ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики», активная среда лазера возбуждается симметричным двухплечевым разрядом постоянного тока (рис. 1). Кольцевой лазер изготовлен на основе моноблока 1 из ситалла СО-115М, внутри которого высверлены каналы, наполненные смесью изотопов с соотношением ${}^3\text{He} : {}^{20}\text{Ne} : {}^{22}\text{Ne} = 32:1:1$ до давления 750 Па; длина волны излучения $\lambda = 632,8$ нм. Оптический резонатор с периметром 28 см образован двумя плоскими и двумя сферическими зеркалами, расположенными в вершинах квадрата. Сферические зеркала 7 размещены на пьезоэлектрических преобразователях 13, что позволяет изменять их положения.

Разность фаз $\psi(t)$ встречных волн, генерируемых кольцевым лазером (фаза Саньяка), связана с угловой скоростью его вращения $\Omega(t)$ относительно оси, перпендикулярной к плоскости резонатора, известным уравнением:

$$K^{-1} \frac{d\psi}{dt} = \Omega(t) - \omega_L \sin(\psi + \gamma), \quad (1)$$

где $\Omega(t) = \Omega_0 + \omega_d \sin(2\pi ft)$, ω_d – амплитуда колебаний угловой скорости вращения кольцевого лазера относительно корпуса лазерного гироскопа (амплитуда частотной подставки), f – частота подставки, Ω_0 – угловая скорость вращения корпуса лазерного гироскопа, K – масштабный коэффициент, ω_L – порог синхронизации. Второе слагаемое в правой части (1) отражает слабую связь встречных волн вследствие их обратного рассеяния элементами оптического резонатора. Частотная подставка необходима для подавления эффекта синхронизации встречных волн при малых значениях угловой скорости Ω_0 .

Изменения фазы Саньяка отражают перемещения интерференционной картины, образованной встречными лазерными пучками, выведенными из кольцевого лазера (рис. 1).

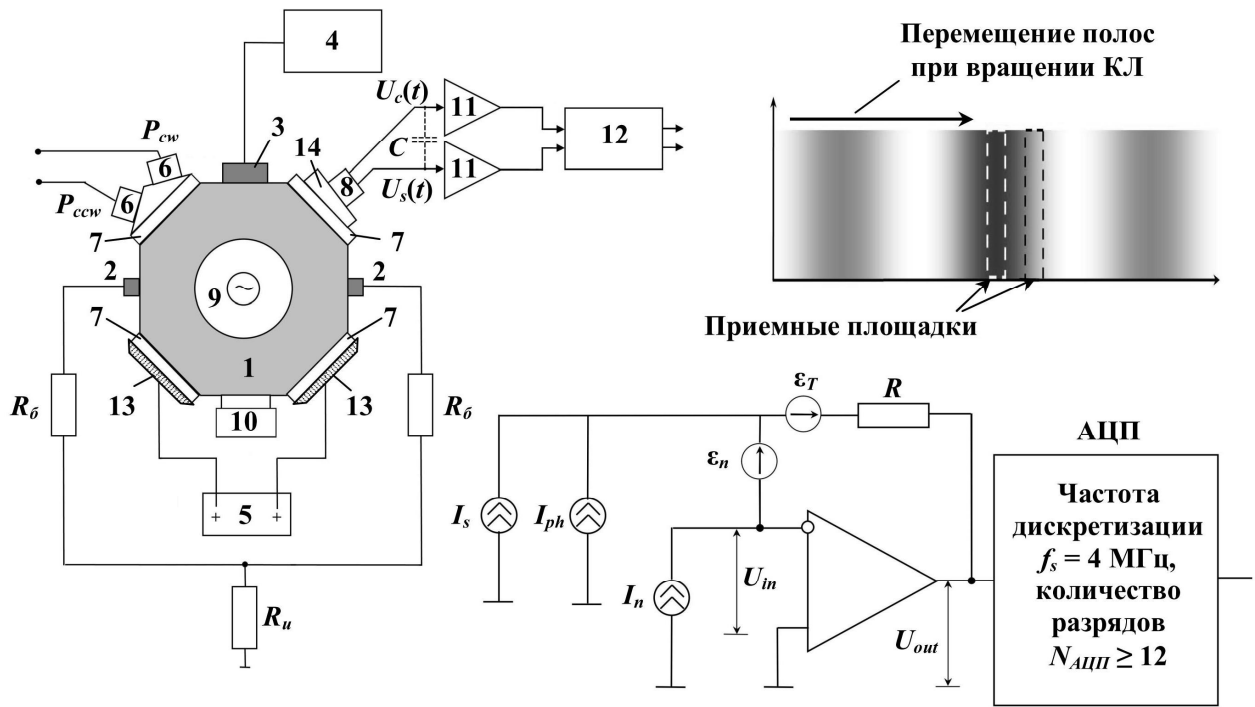


Рис. 1. Формирование квадратурных сигналов в кольцевом лазере: 1 – ситалловый моноблок, 2 – аноды, 3 – холодный катод, 4 – высоковольтный источник, 5 – блок управления пьезоэлектрическими преобразователями, 6 – фотодиоды для регистрации мощностей встречных волн, 7 – зеркала, 8 – секционированный фотодиод для регистрации перемещений интерференционной картины, 9 – виброподвес с источником переменного напряжения, 10 – датчик угловой скорости, 11 – усилители первичных сигналов, 12 – АЦП, 13 – пьезоэлектрические преобразователи, 14 – смесительная призма. Источники напряжения и тока: I_s – невозмущенный сигнал, I_{ph} – дробовой шум и флуктуации темного тока фотодиода, ε_T – тепловой шум, ε_n , I_n – шум усилителя

Для их регистрации использован фотодиод 8, центры приемных секций которого разнесены на расстояние, равное четверти интерференционной полосы. Сигналы на выходах фотодиода имеют вид:

$$U_c(t) = U_{c,0} + U_{c,m} \cos(\psi(t)), \quad U_s(t) = U_{s,0} + U_{s,m} \sin(\psi(t) + \eta), \quad (2)$$

где η – дополнительный фазовый сдвиг вследствие неидеальности оптической системы, $U_{c,0}$, $U_{s,0}$ – постоянные смещения, $U_{c,m}$, $U_{s,m}$ – амплитуды квадратурных сигналов.

Сервисная электроника лазерного гироскопа осуществляет выделение информации об изменениях фазы Саньяка, а также автоматически управляет частотной подставкой и периметром кольцевого лазера, что требует дополнительных датчиков – фотодиодов 6 для измерения мощностей встречных волн и датчика угловой скорости 10 для регистрации колебаний кольцевого лазера относительно корпуса гироскопа.

Применяемый в настоящее время способ преобразования первичных сигналов в информацию об угловых перемещениях кольцевого лазера позволяет фиксировать изменения фазы Саньяка лишь на π/n радиан ($n = 1 \div 4$), чему со-

ответствует номинальная чувствительность к угловым перемещениям порядка $1''$, что недостаточно для эффективной фильтрации подставки с амплитудой около $100''$.

В качестве альтернативы рассмотрен способ прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины (US Patent 7,224,463), используемый в лазерной интерферометрии и включающий следующие стадии:

- дискретизацию первичных квадратурных сигналов;
- аппроксимацию эллипсом множества точек, соответствующего оцифрованному участку реализации на плоскости переменных $U_c(t)$ и $U_s(t)$;
- восстановление временного ряда для разности фаз встречных волн.

Альтернативный подход удобен для алгоритмической реализации и не требует использования иных источников информации, кроме секционированного фотоприемника 8. Потенциальные возможности прецизионного метода позволяют:

- регистрировать изменения разности фаз встречных волн, генерируемых кольцевым лазером, величиной в сотые доли радиана, что соответствует чувствительности к угловым перемещениям порядка $0,01''$;
- увеличить частоту обновления выходной информации об угловых перемещениях до 10 кГц;
- автоматически адаптировать лазерный гироскоп к изменяющимся условиям его функционирования.

В обзоре проанализированы способы выделения информации об изменениях фазы Саньяка и удаления частотной подставки из выходного сигнала:

- метод синхронных измерений, при котором каждое изменение фазы Саньяка определяется строго за период подставки;
- фильтрация подставки из выходного сигнала;
- вычитание из выходных данных сигнала, характеризующего подставку (для регистрации последнего необходим дополнительный датчик угловой скорости 10 , регистрирующий движение кольцевого лазера относительно корпуса лазерного гироскопа).

Анализ публикаций показал, что для реализации в лазерной гироскопии методики прецизионной регистрации перемещений интерференционной картины в реальном времени необходимо:

- определить влияние на точность измерений возмущений первичных сигналов с учетом специфики их формирования в кольцевом лазере;
- обеспечить приемлемую инерционность реакции системы обработки данных на изменения угловой скорости в условиях фильтрации компоненты, созданной вибрационной частотной подставкой.

Во **второй главе** приведены результаты исследований влияния возмущений первичных сигналов (2) на результат восстановления фазы Саньяка. В качестве причин, искажающих квадратурные сигналы, проанализированы следующие факторы, воздействующие на информационный тракт лазерного гироскопа:

- модуляция мощностей встречных волн, генерируемых вращающимся кольцевым лазером, возникающая из-за обратного рассеяния оптического излучения элементами кольцевого резонатора;
- паразитная емкостная связь между информационными каналами;
- инерционность приемного тракта;
- аддитивные помехи, в том числе шумы различного происхождения.

Выполнено моделирование влияния каждого из перечисленных факторов на временной ряд значений фазы Саньяка, восстановленный в результате цифровой обработки первичных сигналов. В качестве истинных значений фазы ψ приняты результаты численного интегрирования дифференциального уравнения (1) (шаг изменения времени $\Delta t = 0,25$ мкс). После этого в квадратурные сигналы $\cos\psi$ и $\sin\psi$ были внесены искажения, имитирующие возмущающее воздействие, а затем в соответствии с алгоритмом обработки квадратурных сигналов (US Patent 7,224,463) восстановлен временной ряд Ψ .

Отклонения восстановленного временного ряда от заданных значений фазы ψ отражает невязка:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta\Psi - \Delta\psi}{K\Delta t}. \quad (3)$$

Количественно невязка (3) охарактеризована четырьмя параметрами:

- среднее значение модуля невязки $\langle |\Delta\Omega| \rangle$;
- среднеквадратичное отклонение σ_Ψ восстановленных значений фазы Саньяка Ψ от ее истинных значений ψ (ошибка в определении углового положения $\sigma_\varphi = K^{-1}\sigma_\Psi$);
- относительное отклонение δ_s амплитуды колебаний с частотой подставки f в восстановленном сигнале от заданной амплитуды колебаний угловой скорости ω_d ;
- $\Delta\Omega_s$ - результат синхронного детектирования невязки (3) на интервале времени T :

$$\Delta\Omega_s = \frac{2}{T} \int_0^T \Delta\Omega(t) \sin \Psi dt, \quad (4)$$

где в качестве опорного принят «синусный» сигнал лазерного гироскопа. Последний параметр характеризует искажения компоненты выходного сигнала, отражающей связь встречных волн в кольцевом лазере. Масштаб искажений характеризуется отношением $\Delta\Omega_s$ к порогу синхронизации ω_L (номинальная величина порога $0,03$ °/с).

Паразитная модуляция квадратурных сигналов вследствие обратного рассеяния лазерного излучения в оптическом резонаторе промоделирована на основе аналитического решения дифференциальных уравнений для интенсивностей встречных волн, генерируемых кольцевым лазером. Глубина модуляции пропорциональна отношению коэффициента связи встречных волн r к превышению α ненасыщенного усиления активной среды над суммарными потерями в резонаторе. Результаты определения параметров первичных сигналов (2) показали, что этот эффект сопровождается колебаниями смещений $U_{s,0}$, $U_{c,0}$, амплитуд $U_{s,m}$, $U_{c,m}$ и дополнительного фазового сдвига η на частоте подставки f и

ее высших гармониках. В типичных для КЛ-1 условиях $r \leq 10^{-6}$, $\alpha \approx 10^{-3}$ амплитуда колебаний фазового сдвига η не превышает сотых долей градуса.

Паразитная емкость C между информационными каналами изменяет падения напряжений U_c , U_s на сопротивлениях R усилителей первичных сигналов (см. рис. 1). Если постоянная времени RC не превышает 0,1 мкс, для выходных сигналов справедливо квазистационарное решение:

$$U_c = RI_0 [\cos \psi + RCK\omega_d \sin(2\pi ft)(\cos \psi - \sin \psi)], \quad (5)$$

$$U_s = RI_0 [\sin \psi + RCK\omega_d \sin(2\pi ft)(\sin \psi - \cos \psi)], \quad (6)$$

где I_0 – амплитуда колебаний фототоков I_c , I_s .

Фазовый сдвиг η сигналов (5), (6), преобразованных к форме (2), совершает гармонические колебания на частоте подставки с амплитудой $2RCK\omega_d$.

Фотодиод 8 и усилитель 11, используемые для регистрации первичных сигналов, обладают инерционностью, характеризующейся постоянной времени τ , что также приводит к погрешностям при регистрации быстрых перемещений интерференционной картины. При гармонических колебаниях кольцевого лазера амплитуды первичных сигналов $U_{s,m}$ и $U_{c,m}$ промодулированы на второй гармонике частоты подставки, их фазы отстают от фазы Саньяка.

Для исследования влияния аддитивной помехи в первичные сигналы включены гармонические составляющие с амплитудой 1 % от амплитуд первичных сигналов. В случае низкочастотной (по сравнению с подставкой) помехи реакция на возмущение сводится к синфазным колебаниям смещений $U_{s,0} / \langle U_{s,m} \rangle$, $U_{c,0} / \langle U_{c,m} \rangle$ восстановленных сигналов.

Аддитивная шумовая составляющая в первичных сигналах обусловлена совместным воздействием следующих причин:

- дробовым шумом и флуктуациями темнового тока фотодиода;
- тепловым шумом напряжения на сопротивлении R ;
- шумом квантования;
- шумами усилителя первичных сигналов;
- флуктуациями мощности лазерного излучения.

С учетом известных выражений для источников теплового, дробового шума, а также шума квантования выражение для оценки отношения сигнал/шум SNR в первичном сигнале имеет вид:

$$SNR = -10 \lg \left[f_s \left(\frac{2e}{I_0} + \frac{S_{темн.ш}}{I_0^2} + \frac{4kT}{I_0^2 R} + \frac{S_{изб.ус}}{I_0^2 R^2} + \frac{S_{i,изб}}{I_0^2} \right) + \frac{1}{3 \cdot 2^{2N_{АЦП}}} \right], \quad (7)$$

где f_s – частота дискретизации, спектральные плотности $S_{темн.ш}$, $S_{изб.ус}$ и $S_{i,изб}$ – характеризуют шумы темнового тока и избыточные шумы усилителя, $N_{АЦП}$ – количество разрядов АЦП, I_0 – среднее значение тока, текущего через приемную площадку фотодиода, T – абсолютная температура.

В процессе моделирования к первичным сигналам добавлялись некоррелированные «белые» шумы. Оценка влияния аддитивного шума в первичных сигналах на результат их обработки выполнена для отношений сигнал/шум от 40 до 65 дБ в частотном диапазоне 0 - 2 МГц. Рис. 2 отражает влияние отноше-

ния сигнал/шум в первичных сигналах на среднеквадратичный разброс зарегистрированных угловых положений корпуса лазерного гироскопа σ_φ и среднего значения модуля невязки $\langle |\Delta\Omega| \rangle$, возникшие в результате восстановления значений фазы Саньяка. Горизонтальными пунктирными линиями выделены номинальная чувствительность к угловому перемещению лазерного гироскопа при использовании применяемой в настоящее время системы обработки данных и порог чувствительности к угловой скорости вращения, требуемый для функционирования БИНС высокой точности. Полученные результаты иллюстрируют устойчивость к аддитивному шуму результатов применения реализованного алгоритма.

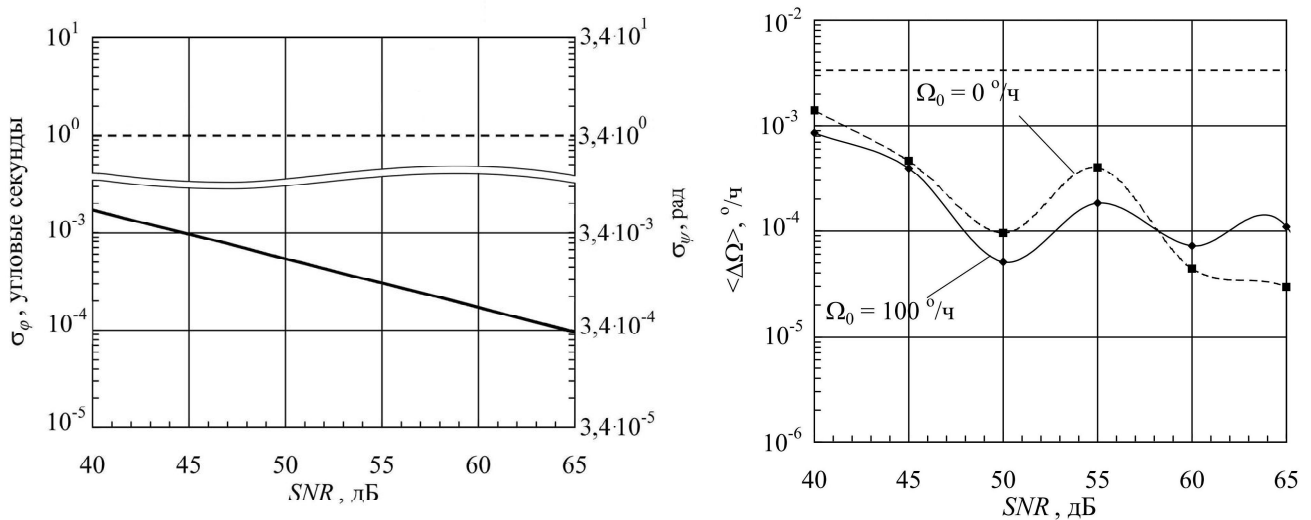


Рис. 2. Влияние отношения «сигнал/шум» в первичных сигналах на среднеквадратичный разброс угловых положений σ_φ и среднее значение модуля невязки $\langle |\Delta\Omega| \rangle$

В табл. 1 сведены источники возмущений, влияющие на восстановление фазы Саньяка, и характеристики невязки. Полученные данные показывают, что результаты обработки, характеризующие угловые перемещения лазерного гироскопа, в наибольшей степени чувствительны к емкостной связи между информационными каналами и шуму в первичных сигналах. Паразитная модуляция встречных волн искажает, главным образом, составляющую вторичного сигнала, отражающую обратное рассеяние лазерного излучения внутри кольцевого резонатора, а инерционность приемного тракта приводит к погрешностям при определении амплитуды подставки. Искажения значений фазы Саньяка Ψ из-за инерционности приемного тракта наиболее существенны лишь для колебаний на частоте подставки, для полезной составляющей сигнала результирующая среднеквадратичная ошибка не превышает 30 мрад. Результаты моделирования позволяют сформулировать количественные требования к информационному тракту.

Приведены результаты цифровой обработки экспериментально зарегистрированных первичных сигналов кольцевого лазера, совершающего гармониче-

ские колебания относительно корпуса гироскопа с частотой 400 Гц и различными амплитудами угловой скорости ω_d .

Таблица 1

Возмущающий фактор	$\langle \Delta\Omega \rangle$, °/ч	σ_ψ , мрад	δ_s , °/ч	$\Delta\Omega_s$, °/с
Паразитная модуляция мощностей встречных волн, $\alpha = 1 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,30	0,19	$8,2 \cdot 10^{-3}$
Паразитная модуляция мощностей встречных волн, $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-9}$	0,09	0,04	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Емкостная связь, $RC = 20$ нс	$1,1 \cdot 10^{-3}$	14	14,3	$5,2 \cdot 10^{-3}$
Инерционность приемного тракта, $\tau = 0,12$ мкс	$1 \cdot 10^{-4}$	82	86,4	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Аддитивная помеха на частоте 50 Гц	$3,2 \cdot 10^{-8}$	0,13	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$4,9 \cdot 10^{-9}$
Аддитивный шум в полосе 0 – 2 МГц (отношение сигнал/шум 40 дБ)	$1,4 \cdot 10^{-3}$	5,7	0,011	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Аддитивный шум в полосе 0 – 2 МГц (отношение сигнал/шум 60 дБ)	$2 \cdot 10^{-5}$	0,57	$5 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$

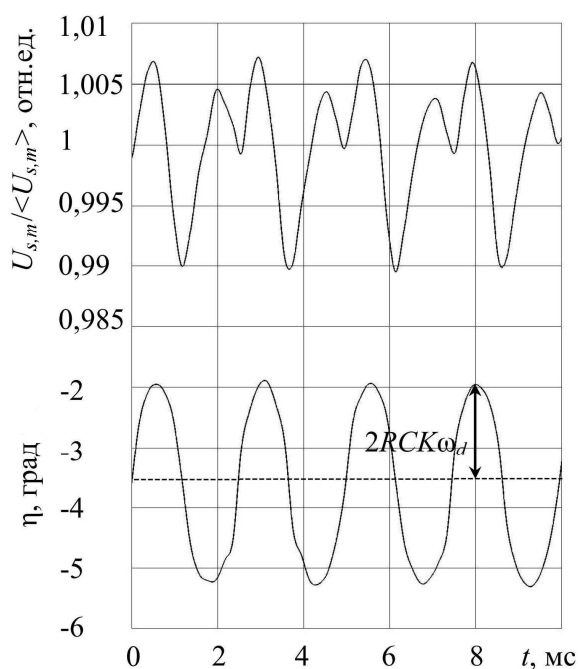


Рис. 3. Восстановленные амплитуда колебаний первичного сигнала и дополнительная разность фаз. Оценка параметра паразитной емкостной связи: $RC = 19$ нс

На рис. 3 показаны колебания амплитуды одного из первичных сигналов и фазового сдвига η . Колебания фазового сдвига близки к гармоническим, а их размах дает возможность определить величину параметра RC емкостной связи, что иллюстрирует дополнительное преимущество развитого подхода.

Третья глава содержит результаты исследований цифровой фильтрации вибрационной частотной подставки из выходного сигнала лазерного гироскопа с учетом следующих особенностей его применения в системах инерциальной навигации:

- значительные угловые ускорения (до $1000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$) и угловые скорости (до $400 \text{ }^\circ/\text{с}$) при быстром маневрировании;

- необходимость обеспечить повышенную частоту обновления навигационной информации (5 - 10 кГц).

Высокая чувствительность к изменениям фазы Саньяка дает возможность в качестве альтернативы прямому вычитанию использовать цифровой режекторный фильтр.

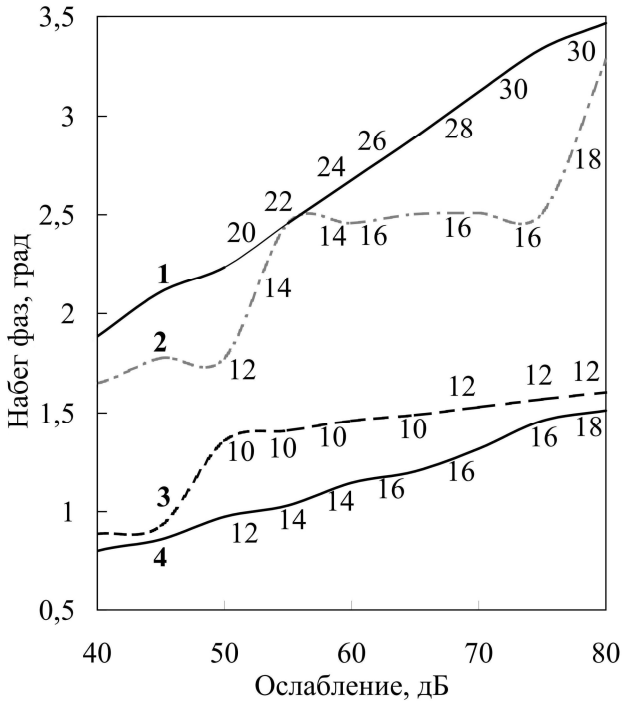


Рис. 4. Фазовые задержки на частоте 100 Гц режекторных фильтров с полосой подавления 397,5 – 402,5 Гц: 1 – фильтр Баттерворта, 2 – фильтр Чебышева I рода, 3 – эллиптический фильтр, 4 – фильтр Чебышева II рода. Около кривых указаны порядки фильтров

В результате исследований выбраны тип и параметры фильтра, обеспечивающего сочетание требуемого быстродействия с допустимой задержкой выходного сигнала (рис. 4). На рис. 5 показаны искажения тестового сигнала на выходе эллиптического фильтра и зависимости от углового ускорения погрешности, возникающей при равноускоренном повороте на угол 10° .

Рис. 6 содержит результаты моделирования процесса выделения информационного сигнала при цифровой обработке и режекторной фильтрации первичных данных лазерного гироскопа, использованного в качестве датчика угла крена для участка полета продолжительностью 400 секунд. Для удаления подставки использован эллиптический фильтр десятого порядка с ослаблением 60 дБ в полосе частот 5 Гц. При быстрых маневрах угловые ускорения достигают $1000 \text{ }^\circ/\text{с}^2$, чему соответствуют кратковременные всплески погрешности до 10 – 12 угловых секунд.

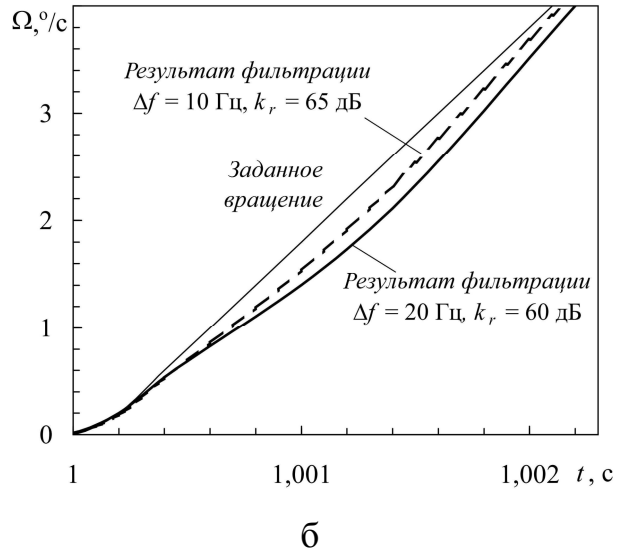
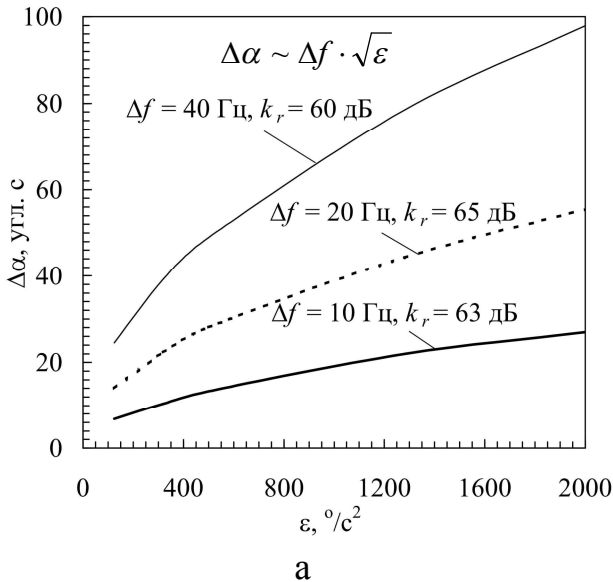


Рис. 5. Зависимости от углового ускорения систематической погрешности при повороте на угол 10° (а) и выходной сигнал в условиях равноускоренного вращения (б). Около кривых указаны полосы подавления Δf и коэффициенты подавления k_r эллиптических фильтров

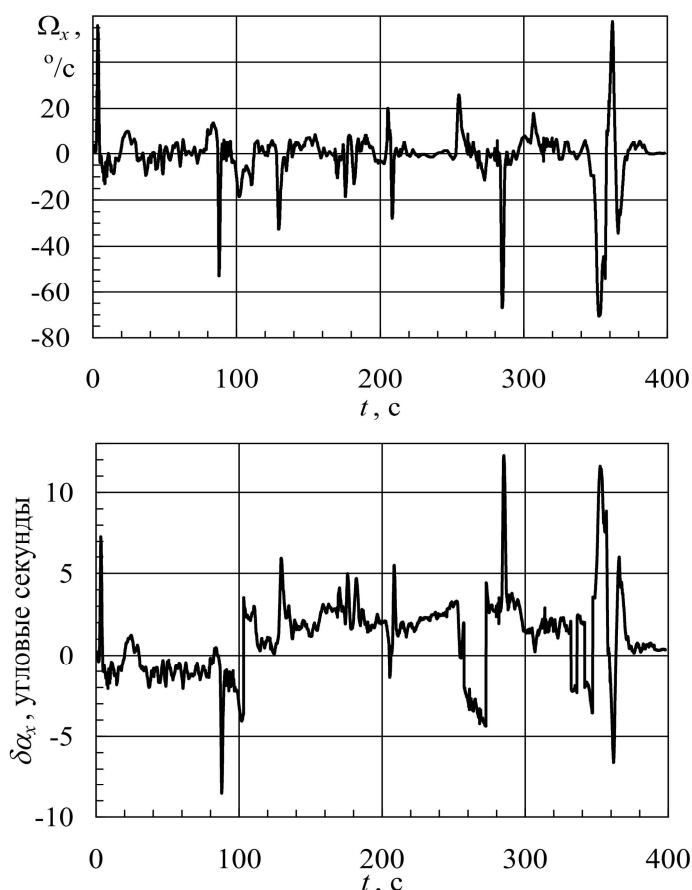


Рис. 6. Значения угловой скорости, зарегистрированные лазерным гироскопом, используемым в качестве датчика угла крена, и погрешности восстановления угла крена после фильтрации частотной подставки

чае однонаправленного вращения. Составляющие в низкочастотном диапазоне (менее 700 Гц) отражают неравномерность механического вращения, а в области частот правее разрыва - связь встречных волн, которая описывается вторым слагаемым в правой части (1). Продемонстрирована и практически реализована возможность разделить с помощью синхронного детектирования реальные колебания угловой скорости вращения, вызванные несовершенством испытательного оборудования, и искажения скорости изменения фазы Саньяка вследствие слабой связи и определить величину порога синхронизации:

$$\omega_{L,изм} = \sqrt{\omega_c^2 + \omega_s^2}, \quad \begin{pmatrix} \omega_c \\ \omega_s \end{pmatrix} = \frac{-2}{T} \int_0^T \left[K^{-1} \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} - \Omega_0 \right] \begin{pmatrix} \cos \Psi \\ \sin \Psi \end{pmatrix} dt. \quad (8)$$

Результаты измерений порога синхронизации с помощью известной модуляционной методики (способ 1) и синхронного детектирования (способ 2) сведены в таблицу на рис. 8. В случае настройки резонатора на максимальное значение порога способ 2 дает результат, завышенный в 1,5 раза.

Как правило, погрешность колеблется около нулевого среднего и не содержит накапливающейся составляющей.

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей амплитуд первичных сигналов от возмущений периметра кольцевого резонатора с частотой 2 Гц. Продемонстрирована возможность настройки кольцевого резонатора на центральную частоту лазерного перехода, на основе регистрации колебаний амплитуды одного из первичных сигналов.

В четвертой главе разработан способ регистрации порога синхронизации встречных волн - ключевой характеристики, определяющей возможность использования кольцевого лазера в системах инерциальной навигации. На рис. 7 показан частотный спектр восстановленного временного ряда для скорости изменения фазы Саньяка $\Delta\Psi/\Delta t$ в случае

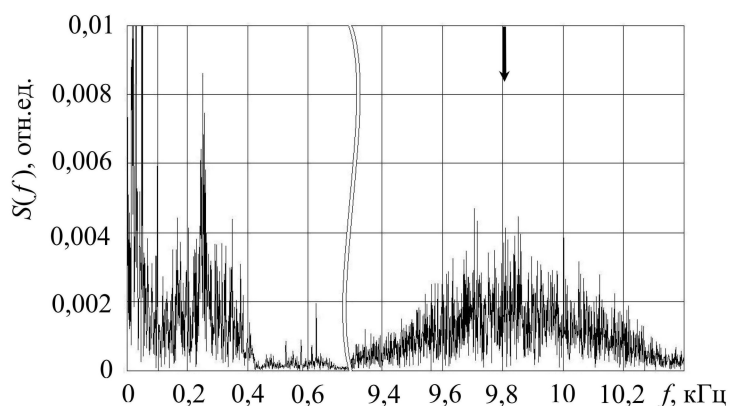


Рис. 7. Частотный спектр производной от фазы Саньяка $\Delta\Psi/\Delta t$. Амплитуда переменной составляющей угловой скорости $0,72$ $^{\circ}/\text{с}$, $\Omega_0 = 5,095$ $^{\circ}/\text{с}$

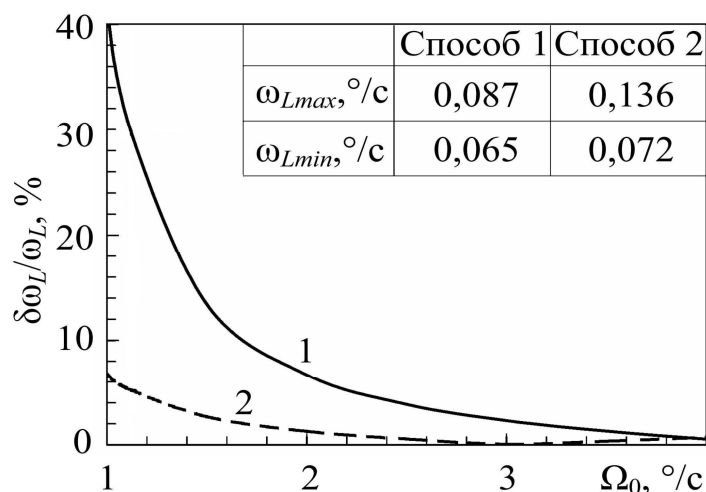


Рис. 8. Влияние угловой скорости на методическую погрешность измерения порога синхронизации. Амплитуда переменной составляющей угловой скорости, $^{\circ}/\text{с}$: 1 – $0,71$, 2 – $0,36$

На рис. 9 показаны графики зависимостей от времени для $K^{-1}d\psi/dt$, $p(t)$, их разности $\delta\psi(t)$, а также $\sin\psi(t)$; на рис. 10 приведены их частотные спектры, которые подтверждают, что разностный сигнал $\delta\psi$ содержит информацию о взаимодействии встречных волн. Чтобы измерить порог синхронизации, требуется лишь гармоническая подставка, двухканальный 12-разрядный АЦП для синхронной дискретизации первичных квадратурных сигналов и компьютер, осуществляющий их запись и обработку.

Рис. 11 отражает зависимость восстановленного значения порога синхронизации от амплитуды колебаний угловой скорости ω_d при различных отношениях сигнал/шум. Если в первичных сигналах отношение сигнал/шум оказывается меньше 55 дБ, систематическая погрешность измерения порога быстро возрастает при увеличении амплитуды подставки, что делает результаты измерений недостоверными.

Зависимости, приведенные на рис. 8, показывают, что при превышении постоянной составляющей угловой скорости Ω_0 величины 2 $^{\circ}/\text{с}$ разработанная методика реализуема. В табл. 2 представлены источники возмущений первичных сигналов и соответствующие им погрешности определения порога синхронизации.

Исследована возможность измерить порог синхронизации в условиях вращательных гармонических колебаний кольцевого лазера, соответствующих вибрационной частотной подставке. Синхронное детектирование модифицированного сигнала

$$\delta\psi(t) = K^{-1} \frac{d\Psi}{dt} - p(t) \quad (9)$$

осуществлено лишь в пределах тех интервалов $[t_n, t_n + \tau]$ ($\tau = 0,2$ мс), для которых аппроксимация величины $K^{-1}\Delta\Psi/\Delta t$ полиномом четвертой степени $p(t)$ содержит локальный экстремум. Аналогично (8) квадратные сигналы $\cos\Psi(t)$ и $\sin\Psi(t)$ являются опорными.

Возмущающий фактор	$(\delta\omega_L/\omega_L)$, %	
	$\Omega_0 = 3$ °/с	$\Omega_0 = 4$ °/с
Паразитная модуляция мощностей встречных волн, $\alpha = 1 \cdot 10^{-3}$	1,27	1,38
Паразитная модуляция мощностей встречных волн, $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$	0,81	0,55
Емкостная связь каналов, $RC = 20$ нс	0,66	0,25
Аддитивная помеха на частоте 50 Гц	0,59	0,18
Аддитивный шум в полосе 0-100 кГц (отношение сигнал/шум 40 дБ)	0,41	0,11
Аддитивный шум в полосе 0-100 кГц (отношение сигнал/шум 60 дБ)	0,57	0,24
Возмущения отсутствуют	0,61	0,19

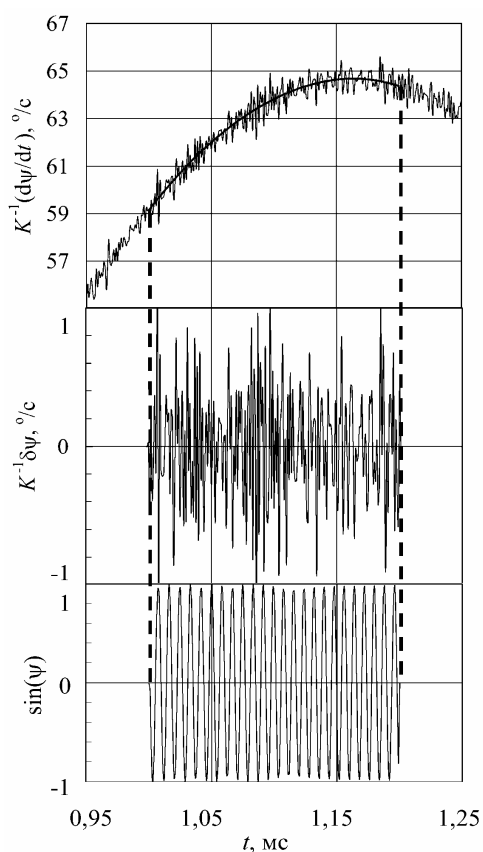


Рис. 9. Скорость изменения фазы Саньяка в случае гармонической вибрационной подставки, разностный сигнал $\delta\psi$ и временной ряд для $\sin\psi$. Штриховыми линиями выделены пределы интегрирования $[t_n, t_n + \tau]$

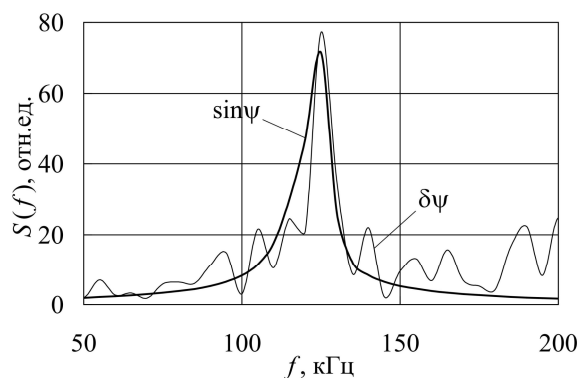


Рис. 10. Спектры колебаний $\delta\psi(t)$ и $\sin\psi(t)$

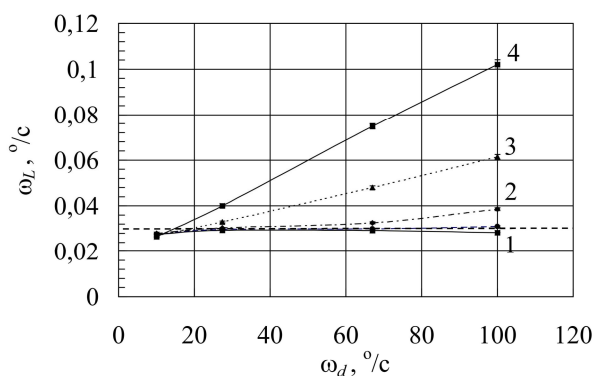


Рис. 11. Влияние амплитуды вибрационной подставки на восстановленную величину порога синхронизации: результаты моделирования при разных уровнях ошумления первичных сигналов. Отношение сигнал/шум, дБ: 1 - 60, 2 - 54, 3 - 48, 4 - 43

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита методика выделения информации о вращении кольцевого лазера, который позволяет осуществить прецизионную регистрацию перемещений интерференционной картины, сформированной выведенными из резонатора лазерными пучками.
2. Проанализированы источники возмущений квадратурных сигналов лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой и определено их влияние на восстановленный временной ряд значений фазы Саньяка. Разработаны методики количественного описания искажений выходного сигнала и характеристик информационного тракта.
3. Экспериментально продемонстрирована возможность управления периметром кольцевого резонатора при колебаниях зеркала с инфранизкой частотой, преобразованных в модуляцию амплитуд квадратурных сигналов.
4. Определены требования к узкополосному режекторному фильтру и реализовано подавление колебаний на частоте подставки в выходном сигнале лазерного гироскопа.
5. Найдены режимы однонаправленного вращения кольцевого лазера, при которых диапазон частот в спектре производной от фазы Саньяка, отражающий взаимодействие встречных волн, не перекрывается со спектром механического вращения, и разработан способ измерений порога синхронизации.
6. Способ измерений порога синхронизации модифицирован применительно к условиям гармонических вращательных колебаний кольцевого лазера, соответствующих вибрационной подставке. Определены вклады возмущений квадратурных сигналов в погрешность измерения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Алексеев С.Ю., Борисов М.В., Захаров М.А., Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Определение порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазере при обработке первичных квадратурных сигналов // Радиотехника. – 2012. – № 3. – С. 165-170.
2. Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Проблема цифровой обработки первичных квадратурных сигналов в лазерных гироскопах // Приборы. – 2013. - № 1 (151). – С. 33 – 38.
3. Алексеев С.Ю., Борисов М.В., Захаров М.А., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Морозов Д.А., Чиркин М.В. Методика измерения порога синхронизации при изготовлении и эксплуатации прецизионных кольцевых лазеров // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 2. – С. 75 – 83

Статьи, опубликованные в других изданиях, и материалы конференций:

4. Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Morozov D.A., Zakharov M.A. Ring laser digital signal processing in evaluating laser gyro characteristics // Proceedings of 17th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 31 May – 02 June, 2010. – P. 60-62.

5. Чиркин М.В., Молчанов А.В., Морозов Д.А., Алексеев С.Ю., Мишин В.Ю. Реконструкция угловых перемещений по первичным сигналам лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой // Рефераты докладов XXVII Всероссийской конференции памяти Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 12-14 октября, 2010. – С. 12-13.
6. Chirkin M.V., Mishin V.Yu., Molchanov A.V., Morozov D.A. Extracting angular motion from laser gyro quadrature signals // Proceedings of 18th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 30 May – 01 June, 2011. – P. 48-50.
7. Алексеев С.Ю., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Морозов Д.А., Чиркин М.В. Цифровая обработка сигналов кольцевого лазерного гироскопа // Сборник научных трудов XV Международной научной конференции «Решетневские чтения», Красноярск 10-12 ноября, 2011. - Ч.1. - С. 154-155.
8. Alekseev S.Yu., Chirkin M.V., Mishin V.Y., Morozov D.A., Borisov M.V., Molchanov A.V., Zakharov M.A. Technological aspects of precision ring laser production: synchronization threshold measurements in manufacture and operation // Proceedings of 19th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia, 28 – 30 May, 2012. – P. 54 – 56.
9. Мелехин В.Н., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Чиркин М.В. Цифровая фильтрация вибрационной частотной подставки из информационного сигнала лазерного гироскопа // Рефераты докладов XXVIII Всероссийской конференции памяти Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 9-11 октября, 2012. – С. 12.
10. Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Серебряков А.Е., Чиркин М.В. Цифровая фильтрация вибрационной частотной подставки в выходном сигнале лазерного гироскопа // Сборник научных трудов XVI Международной научной конференции «Решетневские чтения», Красноярск 7-9 ноября, 2012. - Ч.1. - С. 158-159.
11. Мишин В.Ю. Возмущения квадратурных сигналов и погрешность лазерного гироскопа с вибрационной частотной подставкой // XXXVII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. – Москва, 5 – 8 апреля 2011 г. М.: МАТИ, 2011. - Т. 3. – С. 104-105.
12. Мишин В.Ю. Метрологические испытания лазерного гироскопа на основе цифровой обработки квадратурных сигналов // XXXVIII Гагаринские чтения. Научные труды Международной молодежной научной конференции. – Москва, 10 – 14 апреля 2012. М.: МАТИ, 2012. - Т. 3. – С. 65-67
13. Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Чиркин М.В. Идентификация источников случайной погрешности лазерного гироскопа // Электроника: межвуз. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2010. – С. 65-70.
14. Мишин В.Ю., Морозов Д.А., Чиркин М.В. Особенности цифровой обработки квадратурных сигналов кольцевого лазерного гироскопа // Электроника: межвузов. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2011. – С. 68-72.
15. Алексеев С.Ю., Захаров М.А., Мишин В.Ю., Молчанов А.В., Морозов Д.А., Чиркин М.В. Измерение порога синхронизации встречных волн в кольцевом лазерном гироскопе // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвузов. сб. науч. тр. Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 11-17.

Мишин Валерий Юрьевич

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ЛАЗЕРНОМ
ГИРОСКОПЕ С ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЫ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.09.2013. Формат бумаги 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.