

На правах рукописи  
УДК 621.373.8, 621.376.33

ШЕЛЕСТОВ Дмитрий Александрович

**Аппаратно-алгоритмическое обеспечение частотного  
детектирования в оптических стандартах частоты на  
основе метода двухмодовой насыщенной дисперсии**

Специальность 05.11.07 –  
«Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Москва - 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Карасик Валерий Ефимович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тихомиров Сергей Владимирович**,  
доктор технических наук,  
начальник лаборатории метрологии малоинтенсивного лазерного излучения и волоконно-оптических систем Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений  
**Никитенко Александр Николаевич**,  
кандидат технических наук,  
младший научный сотрудник научно-исследовательского центра световодной фотоники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»)

Защита состоится «\_\_\_\_» 2019 г в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1.

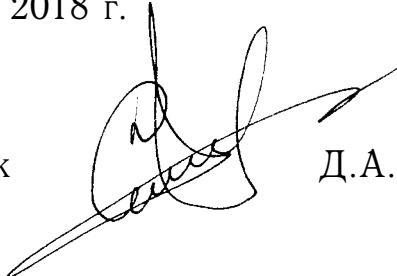
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» декабря 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Д.А. Семеренко



## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы.

Применение стабилизированного по частоте оптического излучения для измерения интервалов времени стало возможным после появления сравнительно простых средств калибровки оптических стандартов частоты (ОСЧ) по частоте цезиевого эталона, определяющего секунду. Относительная погрешность современных ОСЧ находится в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-17}$  до  $1 \cdot 10^{-13}$ , причем погрешность, вносимая при переходе в радиодиапазон, составляет  $1 \cdot 10^{-19}$  (деление частоты происходит с помощью фемтосекундного лазера). В ОСЧ, как правило, излучение лазера проходит через кювету, содержащую реперный газ. По изменению фазовой задержки или величине поглощения лазерного излучения определяют отклонение частоты лазера относительно реперной линии. Ключевым фактором для повышения точности, стабильности и воспроизводимости оптической частоты является правильный выбор реперного газа и конкретной реперной спектральной линии, а также метода её регистрации.

С 70-х годов XX века важное место среди прочих занимает группа методов нелинейной лазерной спектроскопии, в частности - метод двухмодовой насыщенной дисперсии. ОСЧ, работающий по этому методу, включает в себя лазер и внутристабилизаторную ячейку с реперным газом, выполненные в виде единого ситаллового моноблока. Особенности конструкции резонатора приводят к генерации двух продольных мод с фиксированным частотным смещением, так что при совпадении одной моды с реперной линией, другая мода оказывается вне линии. Модуляция оптической частоты, происходящая за счет изменения длины резонатора, позволяет произвести опрос реперной спектральной линии. Большинство внешних воздействий на резонатор действуют на обе моды одинаково и компенсируются в процессе получения сигнала разностной частоты - частоты межмодовых биений. Сигнал частоты биений (от 1 до 100 МГц) преобразуется на частотном, а затем синхронном, детекторах в сигнал ошибки, используемый в контуре стабилизации частоты для подстройки длины резонатора.

Одним из путей снижения погрешности частоты выходного сигнала ОСЧ является использование априорной информации о параметрах модуляции частоты в процессе частотного детектирования. Необходимость регистрации частоты биений в условиях модуляции оптической частоты не позволяет использовать стандартные методы, так называемого, преобразования времяз-код и требует разработки оригинального аппаратно-алгоритмического технического решения, учитывающего особенности поведения оптической частоты.

Методы нелинейной лазерной спектроскопии, включающие в себя цифровое частотное детектирование, активно используются в Физиче-

ском институте РАН им. Н.П. Лебедева, ФГУП «ВНИИФТРИ», ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Институте лазерной физики СО РАН, немецком (PTB) и американском (NIST) национальных метрологических институтах, в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Среди отечественных разработок наиболее низкую относительную погрешность частоты выходного сигнала ОСЧ (менее  $1 \cdot 10^{-14}$  при интервале усреднения 1 с) в сочетании с небольшими габаритами демонстрируют две системы - йодный ОСЧ на алюмоиттриевом гранате и метановый ОСЧ на гелий-неоновом лазере.

Метановый ОСЧ демонстрирует дрейфы частоты, возникающие из-за температурой нестабильности оптического моноблока и его содержимого - активной среды и реперного газа. Это приводит к ограничению времени непрерывной работы частотного детектора и снижению стабильности оптической частоты при времени усреднения более 2 с и более. Указанный эффект требует обязательного рассмотрения с точки зрения обеспечения длительного и непрерывного частотного детектирования.

В этой связи тема исследования, посвященная снижению относительной нестабильности частоты выходного сигнала ОСЧ на основе метода двухмодовой насыщенной дисперсии, в том числе за счет снижения погрешности измерения частоты при помощи частотного детектирования, является актуальной.

### **Цель работы и задачи исследований**

Цель диссертационной работы заключалась в исследовании погрешности измерения частоты при помощи частотного детектирования с использованием априорных данных о параметрах модуляции и ее влиянии на стабильность частоты выходного сигнала оптического стандарта частоты на основе метода двухмодовой насыщенной дисперсии и разработке аппаратуры, реализующей технические решения, полученные в процессе исследования.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- проведен анализ факторов, влияющих на величину погрешности частоты выходного сигнала ОСЧ и показано, что модернизированная реализация частотного детектирования позволяет снизить величину погрешности до уровня, эквивалентного относительной погрешности частоты ОСЧ  $1 \cdot 10^{-15}$  при интервале усреднения 1 с;
- исследованы особенности длительной непрерывной работы метанового ОСЧ и показано, что термостабилизация его моноблока позволяет повысить время непрерывной работы частотного детектирования с дней до недель и снизить относительную нестабильность частоты выходного сигнала при интервале усреднения более 10 с;
- разработаны экспериментальные образцы модернизированного частотного детектора и системы термостабилизации, и проведены экс-

периментальные исследования, подтверждающие теоретические расчеты.

**Объектом исследования** является оптический стандарт частоты на основе метода двухмодовой насыщенной дисперсии.

**Предметом исследования** процесс частотного детектирования в оптических стандартах частоты на основе метода двухмодовой насыщенной дисперсии.

### **Методы исследований**

При решении теоретических и прикладных задач были использованы: методы теории вероятности и математической статистики, методы математического моделирования, методы теории автоматического регулирования, методы анализа процессов теплопередачи, методики измерения стабильности эталонных оптических частот.

**Научная новизна результатов** заключается в том, что:

- показано, что цифрового частотное детектирование с использованием априорных данных о параметрах модуляции частоты обеспечивает погрешность автоподстройки частоты эквивалентную относительной нестабильности частоты ОСЧ величиной  $1 \cdot 10^{-15}$  при интервале усреднения 1 с;
- установлено, что время непрерывной работы частотного детектирования в метановом стандарте частоты ограничено 1-2 днями из-за дрейфа температуры ситаллового моноблока;
- обнаружено, что преобладающий долговременный дрейф частоты метанового ОСЧ имеет нетемпературное происхождение.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- применение в метановом ОСЧ цифрового частотного детектирования с использованием априорных данных о параметрах модуляции частоты обеспечит погрешность автоподстройки частоты эквивалентную относительной нестабильности частоты ОСЧ  $1 \cdot 10^{-15}$  при интервале усреднения 1 с;
- термостабилизация моноблока метанового стандарта частоты с погрешностью температуры ниже  $\pm 0,01^\circ\text{C}$  позволяет увеличить время непрерывной работы частотного детектирования до недель и снизить относительную нестабильность частоты ОСЧ при интервалах усреднения более 10 с.

### **Практическая ценность:**

- разработанная аппаратура для частотного детектирования может быть использована в новых образцах ОСЧ, основанных на методах спектроскопии насыщения, для снижения их относительной нестабильности частоты при интервале усреднения 1 с;
- применение разработанной системы термостабилизации обеспечивает возможность выявления и изучения нетемпературных эффектов, возникающих в стандарте частоты при длительной эксплуатации;

- возможность перестройки температуры со скоростью  $0,02 \frac{\text{°C}}{\text{сек}}$  позволяет осуществить исследование влияния температуры на различные элементы метанового ОСЧ и измерить температурный коэффициент частоты, необходимый для оценки характеристик стандарта в нелабораторных условиях.

## **Реализация и внедрение результатов исследований**

Результаты диссертации внедрены в Лаборатории стандартов частоты Троицкого обособленного подразделения Физического института им. П.Н. Лебедева РАН при создании нового образца метанового ОСЧ, а также при создании систем прецизионной термостабилизации лазеров в НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Материалы диссертации использованы в курсе лекций для иностранных специалистов кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана.

## **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях: IV Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (г. Санкт-Петербург, Институт прикладной астрономии РАН, 2011г); международной конференции «Frontiers in optics» (г. Сан-Хосе, Калифорния, США, 2015г); V Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике (г. Москва, НЯУ МИФИ, 2016г); международной конференции «Laser Optics» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2016г); VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва, АО «Российские космические системы», 2016г); XXVIII международной конференции «Лазеры в науке, технике, медицине»; международной конференции «Laser Optics» (г. Санкт-Петербург, Россия, 2018г).

## **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях, из них 5 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

## **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения и изложена на 180 страницах машинописного текста, включая 83 рисунка, 17 таблиц и список литературы, содержащий 93 наименования.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность. Также сформулированы защищаемые положения и приведена структура диссертации.

**В первой главе** проведен обзор основных научно-технических задач, которые могут быть решены при помощи оптических стандартов частоты: измерение временных интервалов в наземной и бортовой аппаратуре глобальных навигационных систем; синхронизация телекоммуникационных систем и зашифрованная передача данных; фундаментальные метрологические научные задачи; синхронизация узлов интерферометров со сверхдлинной базой; геодезия и навигация в глубоком космосе; создание рабочих стандартов частоты и прочее.

Рассмотрен класс транспортабельных оптических стандартов частоты, имеющих конечной целью размещение эталонных источников в космосе. Проблемы, возникающие при переходе от лабораторных условий к более жестким, приводят к значительной трудоемкости такого перехода. В результате за время разработки транспортабельной версии более ранней технологии, в лабораторном исполнении успевает появиться конкурирующий стандарт частоты, имеющий более низкую погрешность. В Таблице 1 приведен ряд транспортабельных стандартов частоты на разных стадиях разработки и, соответственно, обладающих разным уровнем стабильности частоты (количественно выражена девиацией Аллана для относительной погрешности выходной частоты).

Таблица 1.  
Транспортабельные оптические стандарты частоты

Оптический стандарт частоты	Nd:YAG/I <sub>2</sub> (ZARM)	<sup>87</sup> Sr (РТВ)	He-Ne/CH <sub>4</sub> (ФИАН)	Nd:YAG/I <sub>2</sub> (ИЛФ)
Кратковременная девиация Аллана	$3 \cdot 10^{-14} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$	$1,3 \cdot 10^{-15} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$	$7 \cdot 10^{-15} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$	$5 \cdot 10^{-15} \frac{1}{\sqrt{\tau}}$
Долговременная девиация Аллана	—	$7,4 \cdot 10^{-17}$ ( $\tau = 250$ с)	$5,0 \cdot 10^{-15}$ ( $\tau = 5$ с)	$2,0 \cdot 10^{-16}$ ( $\tau = 500$ с)
Лабораторное использование	ДА	ДА	ДА	ДА
Наземное перемещение	ДА	ДА	НЕТ	НЕТ
Запуск на спутнике	ДА	НЕТ	НЕТ	НЕТ

Наиболее близким к космическому базированию является немецкий Nd:YAG/I<sub>2</sub>, обладая при этом стабильностью сопоставимой с традиционными стандартами частоты радио диапазона. Немецкий стандарт на атомной ловушке выполнен в виде прицепа со всеми необходимыми системами обеспечения и допускает наземное перемещение. Российские стандарты частоты на методах спектроскопии насыщения, разработан-

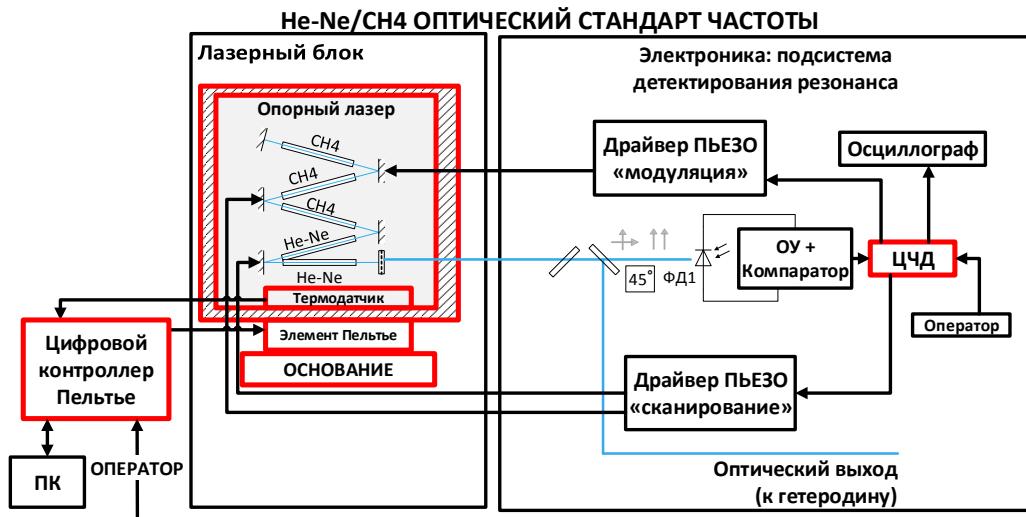


Рисунок 1. Структурная схема модернизированного метанового ОСЧ (ЦЧД – цифровой частотный детектор, ОУ – операционный усилитель, ФД - фотодиод, ПК - персональный компьютер)

ные в ФИАН (г.Троицк) и ИЛФ (г.Новосибирск), обладают более высокой стабильностью частоты, но эксплуатация вне лаборатории пока не обеспечена.

ОСЧ на основе He-Ne лазера и метановой ячейки (МОСЧ) выполнен в виде единого ситаллового моноблока. Низкий термический коэффициент материала в сочетании с двухмодовой схемой снижает, но не устраняет полностью воздействие внешней температуры на стабильность частоты. Полученные результаты (таблица 1) и компактность конструкции говорят о перспективности использования метанового стандарта при условии устранения имеющихся недостатков. К недостаткам можно отнести следующие факторы - высокая погрешность автоподстройки частоты гелий-неонового лазера при осуществлении частотного детектирования, определяющая работу при интервале усреднения 1 с, а также ухудшение стабильности частоты при интервалах усреднения более 10 с и невозможность длительной непрерывной работы из-за колебаний температуры окружающей среды.

Для устранения указанных недостатков в работе предложено использовать частотное детектирование с использованием априорных данных о параметрах модуляции, реализуемое цифровым способом. Для увеличения времени непрерывной работы частотного детектора и повышения долговременной стабильности частоты стандарта предложено использовать прецизионную систему термостабилизации моноблока. Схема модернизированного метанового стандарта частоты приведена на рисунке 1.

**Вторая глава** посвящена, во-первых, расчету и исследованию частотного детектора с использованием априорных данных о параметрах модуляции и, во-вторых, созданию системы термостабилизации моноблока.

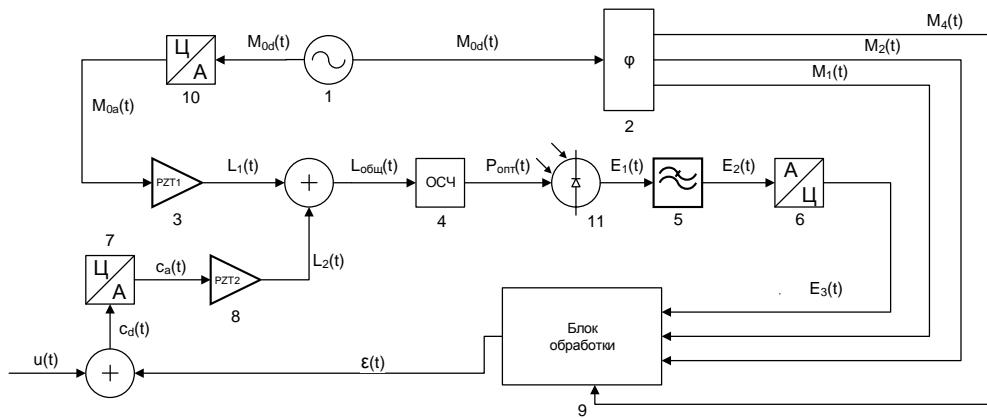


Рисунок 2. Функциональная схема системы автоматического регулирования частоты биений метанового ОСЧ с цифровым ЧД

Погрешность детектирования частоты биений – результата оптического гетеродинирования двух мод метанового ОСЧ – при аналоговом частотном детектировании определяется внешними амплитудными помехами и собственными шумами компонентов. Поэтому суть модернизации автоподстройки частоты состоит в частотном детектировании сигнала частоты биений на более ранней стадии, а также в переходе на цифровой счет частоты, использующий априорные данные о параметрах модуляции. Преимуществами цифрового счета являются возможность эффективного накопления сигнала, параллельных вычислений, а также воспроизводимость и гибкость системы.

Существующий метановый ОСЧ использует аналоговый частотный детектор для захвата РСЛ. Компьютерное моделирование аналоговой реализации ЧД посредством симулятора электронных схем общего назначения показало, что схема близка к своему теоретическому пределу, с дискриминационным коэффициентом на уровне 0,4 мкВ/Гц, что ниже значений, показанных в литературе для цифрового счёта частоты (от 1 до 1000 мкВ/Гц).

Рассмотрение функциональной схемы системы автоматического регулирования, осуществляющей захват линии (Рисунок.2) показало, что аналого-цифровое преобразование частоты доступно после детектирования на фотодиоде (поз.11) и фильтрации (поз.5). Анализ оптической части системы показал, что внесение качественных изменений в её работу при использовании цифрового ЧД не требуется.

Время-цифровое преобразование (ВЦП) входного сигнала цифрового ЧД вида (1) состоит из двух частей - измерение длительностей временных промежутков и детектирование событий, означающих начало и конец счета. Измерение длительности осуществляется известными алго-

ритмами ВЦП, однако необходимое детектирование событий в них отсутствует, что требует оригинального подхода при разработке алгоритма.

$$y(t) = \frac{1}{2} \cdot (sgn(\sin(\Omega_1^0 + A_{FM} \cdot (\cos(\Omega_{FM} \cdot t)))) + 1) \quad (1)$$

Предложены три алгоритма, реализующие процесс синхронного и частотного детектирования - последовательный, комбинированный и асинхронный. Суть последовательного алгоритма заключается в выполнении двух операций - частотное детектирование и синхронное детектирование (аналогично аналоговому подходу). Погрешность алгоритма высокая и соответствует девиации Аллана  $\sigma_a(1) = 3,4 \cdot 10^{-11}$ . Комбинированный алгоритм осуществляет накопление сигнала за половину периода модуляции и без прямого измерения частоты осуществляет синхронное детектирование. Достижимая девиация Аллана при этом составляет уже  $\sigma_a(1) = 1,4 \cdot 10^{-13}$ . Реализация алгоритмов происходит посредством программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Предварительная проверка работы разработанной структуры ПЛИС с помощью специальных средств моделирования показала работоспособность, чувствительность комбинированного алгоритма и вспомогательного ЧД, а также реакцию на процесс вращения фазы при синхронном детектировании.

Комбинированный алгоритм в одноканальном виде не позволяет достичь необходимой для нового метанового ОСЧ девиации Аллана, поэтому рассмотрены возможности использования параллельных вычислений для снижения погрешности работы алгоритма.

Предложены несколько способов реализации параллельных вычислений – параллельные каналы (п-каналы), каскадированные каналы (к-каналы) и асинхронный алгоритм. П-каналы счета - это смещенные по фазе тактовые сигналы, использование которых эквивалентно кратному увеличению основной тактовой частоты. Максимальное число параллельных каналов  $N_{ch}^{max}$  определяется из условия минимального фазового сдвига ФАПЧ  $d\varphi_{pll}^{min}$ :

$$d\varphi_{pll}^{min} = \frac{T_{VCO}}{8} = \frac{1}{8\nu_{VCO}} = \frac{N}{8M \cdot \nu_{ref\_pll}},$$

где  $M$  - внутр. множитель ФАПЧ,  $N$  - внутр. делитель ФАПЧ,

$\nu_{ref\_pll}$  - опорная частота ФАПЧ,  $\nu_{VCO}$  - вых. частота ГУН ФАПЧ

$$N_{ch}^{max} = \frac{T_{плис}^{clk}}{d\varphi_{pll}^{min}} = \frac{8M \cdot \nu_{ref\_pll}}{N \cdot \nu_{плис}^{clk}},$$

где  $\nu_{плис}^{clk}(T_{плис}^{clk})$  - основная тактовая частота (период).

Для выбранной микросхемы число каналов составило  $N = 16$ . В случае коррелированного шума при накоплении, учет п-каналов в расчетной

девиации Аллана описывается выражением:

$$\sigma_{y+} = \frac{\sigma_y^{T_{FM}}}{N_{par} \cdot N}, \quad (2)$$

где  $N$  - число измерений за 1 с,  $T_{FM}$  - период модуляции,

$N_{par}$  - число параллельных каналов счёта,

$\sigma_y^{T_{FM}}$  - девиация Аллана для комбинированного алгоритма.

Суть работы  $k$ -каналов в особенности накопления данных. Следующий этап счета начинается, не дожинаясь окончания предыдущего цикла. Входные данные при этом оказываются частично коррелированы, однако шумовая составляющая входных данных, остается некоррелированной. В результате за один период модуляции вместо одиночного измерения получаем число измерений равное  $N_{cs}$  - числу  $k$ -каналов, приводя к ускоренному накоплению данных и более эффективной работе статистической обработки. Достижимая девиация Аллана в этом случае описывается выражением:

$$\sigma_{y+} = \frac{\sigma_y^{T_{FM}}}{N \cdot \sqrt{N_{cs}}}, \quad (3)$$

где  $N$  - число измерений за 1 с,  $T_{FM}$  - период модуляции,

$N_{cs}$  - число каскадированных каналов счёта,

$\sigma_y^{T_{FM}}$  - девиация Аллана для комбинированного алгоритма.

Ограничением числа  $k$ -каналов является объём используемой микросхемы, а также частота работы выходного ЦАП. Для используемой версии ПЛИС максимальное число  $k$ -каналов составило  $N = 60$ .

Асинхронный алгоритм может использоваться как способ снижения величины шума при использовании комбинированного алгоритма как основного. Анализ показал, что достижимое снижение погрешности составило  $k = 17,7$ , а влияние на достижимую девиацию Аллана описывается выражением:

$$\sigma_{y+} = \frac{\sigma_y^{T_{FM}}}{k \cdot \sqrt{N}}, \quad (4)$$

где  $N$  - число измерений за 1 с,  $T_{FM}$  - период модуляции,

$k$  - коэффициент асинхронного алгоритма,

$\sigma_y^{T_{FM}}$  - девиация Аллана для комбинированного алгоритма за  $T_{FM}$ .

Итоговая структура параллельных вычислений представляет собой комбинацию рассмотренных выше алгоритмов. При реализации асинхронный алгоритм и  $p$ -каналы используют одни и те же вычислительные

ресурсы, поэтому совместное их использование невозможно. Возможны две схемы параллельного счета. Предельно достижимая девиация Аллана при асинхронном алгоритме совместно с к-каналами описывается комбинацией выражений (3) и (4):

$$\sigma_{y+} = \frac{\sigma_y^{T_{FM}}}{k \cdot N \cdot \sqrt{N_{cs}}} \quad (5)$$

Подстановка значений дает величину девиации  $\sigma_y(1) = 1,8 \cdot 10^{-15}$ , что достаточно для новой версии метанового ОСЧ. Достижимая девиация Аллана при совместном использовании каскадированных и параллельных каналов, в свою очередь, описывается комбинацией выражений (2) и (3):

$$\sigma_{y+} = \frac{\sigma_y^{T_{FM}}}{N_{par} \cdot N \cdot \sqrt{N_{cs}}} \quad (6)$$

Подстановка значений дает близкую по величине девиации значение  $\sigma_a(1) = 2,0 \cdot 10^{-15}$ , что также достаточно для новой версии метанового ОСЧ. Однако на практике алгоритм с каскадированными каналами стабильней асинхронного алгоритма, основу которого составляет детектирование совпадений фронтов. Итоговая структурная схема цифрового ЧД, реализующего комбинированный алгоритм совместно с параллельными вычислениями приведена на рисунке 3.

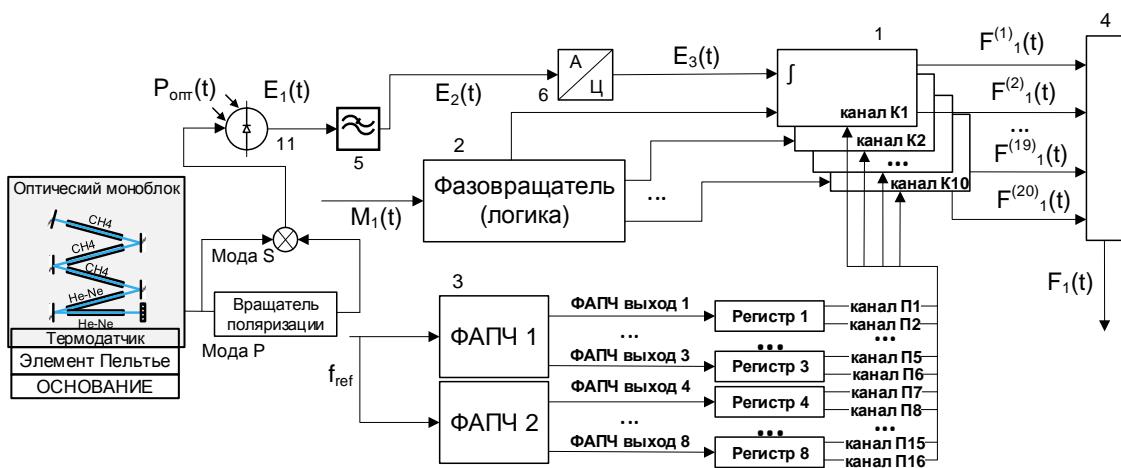


Рисунок 3. Общая структурная схема параллельного счёта - версия 1 (1 - ЦЧД с к-каналами, 2 - фазовращатель на базе логических элементов ПЛИС, 3 - ФАПЧ ПЛИС, 4 - объединитель К-каналов)

Применение частотного детектирования на высших четных гармониках позволяют оценивать величину асимметрии спектральной линии, появление которой свидетельствует о возможном снижении стабильности

ОСЧ. При оценке величины асимметрии в расчет берутся только эффекты, обладающие обратной симметрией по отношению к основному резонансу. Резонанс складывается из несмещенного резонанса, описываемого асимметричной функцией  $D(x)$  амплитудой  $A_D$  и суммы паразитных факторов, описываемых симметричными функциями  $L(x) = \sum_i k_i L_i(x)$  с интегральной амплитудой  $A_L$ . При модуляции наличие симметричных добавок приведет к появлению четных гармоник относительно основной частоты модуляции. Регистрация возникающих гармоник осуществляется цифровым частотным детектированием с использованием интересующей частоты в качестве опорной. Ожидаемый вклад симметричных добавок и сигнал высших гармоник  $a'_2, a'_4$  был проанализирован аналитически в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} L(t) &\sim a'_2 \cos(2\omega_{FMT}t) + a'_4 \cos(4\omega_{FMT}t) + \dots = \\ &= a'_2 \sin(2\omega_{FMT}t + \frac{\pi}{2}) + a'_4 \sin(4\omega_{FMT}t + \frac{\pi}{2}) + \dots \end{aligned}$$

где  $a'_2 = -[\frac{a_2}{2} + \frac{a_4}{2}], a'_4 = \frac{a_4}{8}$ .

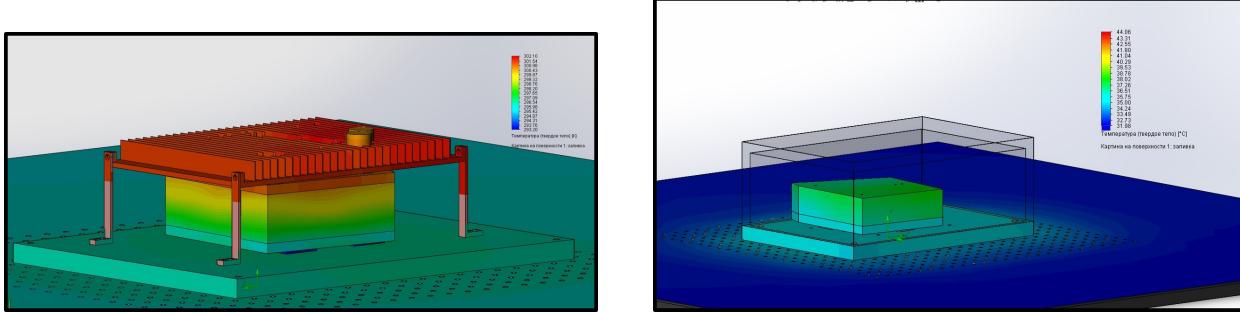
При этом  $a_2, a_4$  – коэффициенты разложения функции  $L(x)$  в ряд Маклорена.

Расчет показал, что величина сигнала гармоник меньше величины погрешности рассматриваемого цифрового ЧД, и измерение асимметрии не может быть осуществлено.

Вторая часть главы 2 посвящена исследованию длительной работы метанового ОСЧ и созданию условий для обеспечения непрерывного частотного детектирования. Температурный уход в различных элементах резонатора приводит к тому, что при эксплуатации более суток возникают срывы, т.к. превышается диапазон регулирования длины резонатора. Влияние температуры также ухудшает стабильность частоты для интервалов времени более 1 с. Поэтому для обеспечения длительной работы частотного детектирования необходима термостабилизация моноблока.

Моноблок метанового ОСЧ излучает  $\sim 5$  Вт тепловой энергии в результате работы гелий-неонового лазера. При расчете теплоотводения также учитывалась необходимость перестраивать температуру как при включении (для ускорения выхода ОСЧ на режим), так и в процессе работы (для измерения влияний температуры на сигналы стандарта). В результате были выбраны 3 элемента Пельтье, равномерно расположенных вдоль нижней стороны моноблока.

Были проанализированы несколько подходов к построению схемы теплоотводения (Рисунки 4, *а* и 4, *б*). Более равномерное температурное распределение достижимо при одностороннем теплоотводении в сочетании с кожухом. Термостабилизация в этом случае включает в себя терmostатирование и активное охлаждение, реализованные термоизоли-



(a) Двухсторонний теплоотвод

(б) Односторонний теплоотвод

Рисунок 4. Трехмерные модели схем отведения тепла

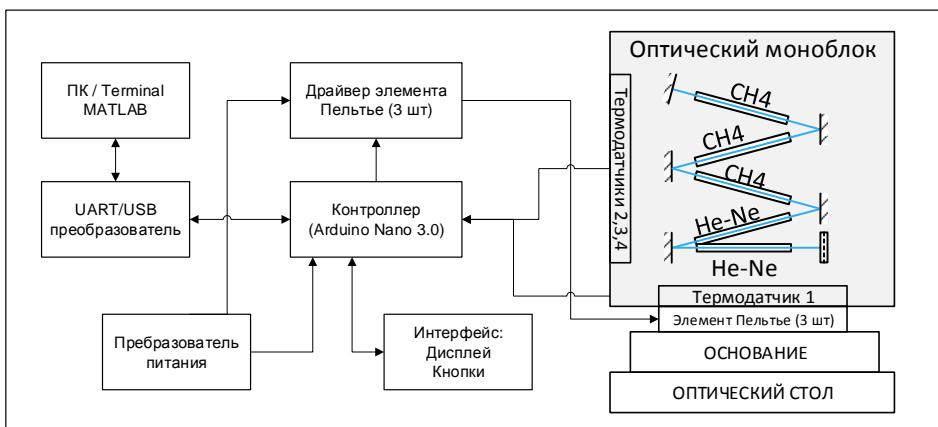
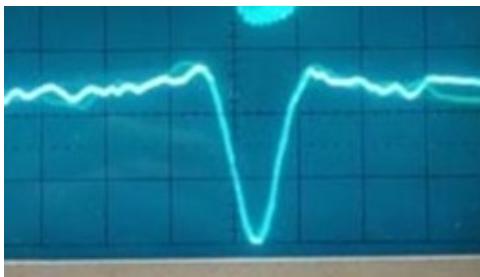


Рисунок 5. Функциональная схема управления системой термостабилизации

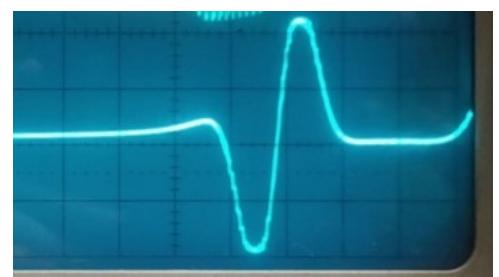
рующим кожухом с встроенными элементами Пельтье и прецизионной системой измерения температуры. Большое внимание было уделено разработке датчиков температуры с погрешностью менее  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ , а также их правильному расположению для минимизации задержек распространения тепла от активного элемента до датчика. Оптимальным оказалось расположение датчика непосредственно под моноблоком, но не в центре его поверхности, а непосредственно над одним из элементов Пельтье.

Для управления процессом термостабилизации была разработана система (Рисунок 5), обеспечивающая сбор данных с основного и вспомогательного термодатчиков, формирование сигналов на драйверы элементов Пельтье, перестройку рабочей точки по температуре, индикацию и передачу данных в цифровом виде для последующей обработки и анализа.

**Третья глава** посвящена практической реализации и экспериментальному исследованию предложенных алгоритмов и решений. Описана разработка макета цифрового ЧД на базе ПЛИС, реализующего измерение межмодовых биений метанового ОСЧ с различным числом п-каналов на частоте модуляции и ее гармониках. Также подробно исследована длительная работа моноблока метанового ОСЧ с системой термостаби-



(a) 1-я гармоника



(б) 2-я гармоника

Рисунок 6. Сигналы цифрового ЧД в составе метанового ОСЧ в режиме сканирования

лизации. Для оценки качества цифрового ЧД применялась девиация Аллана при  $\tau = 1\text{с}$ , системы термостабилизации –  $\tau = 10\text{с}$ .

Исследование работы макета цифрового ЧД проводилось в 3 этапа – с генератором сигналов, с имитатором метанового ОСЧ и работа непосредственно в составе метанового ОСЧ. Для тестирования макета ЧД была разработана интерфейсная плата, позволяющая подключать его к внешним устройствам, в том числе к ОСЧ. При помощи стенда на основе генератора сигналов для одноканального цифрового ЧД на основной частоте были показаны правильная работа фазовращения, линейность АЧХ в диапазоне от 20 Гц до 10 кГц, а также полное количественное совпадение амплитуды сигнала с предварительными расчетами.

Перед подключением к метановому ОСЧ макет ЧД был протестирован на специальном электронном имитаторе, который уступает стандарту по величине погрешности частоты биений, но воспроизводит его функционал в части подстройки частоты. На стенде с имитатором было показано, что ЧД демонстрирует правильную форму сигналов как на основной частоте модуляции, так и на гармониках. Был показан прямопропорциональный рост величины сигнала ЧД с ростом числа п-каналов. На этом же стенде было показано, что увеличение ОСШ при увеличении времени накопления сигнала происходит лучше чем  $\sim \sqrt{N}$  (закон для аналогового ЧД), но хуже ожидаемого  $\sim N$ , что объясняется нереверсивным типом счета, реализованном в макете ЧД.

В результате включения макета цифрового ЧД в состав действующего метанового ОСЧ были успешно зафиксированы сигналы гармоник в режиме сканирования (Рисунки 6, а и 6, б) и осуществлен захват метанового резонанса, что подтверждает полную работоспособность макета. Измерение девиации Аллана частоты биений в режиме захвата составило 25 Гц при интервале усреднения 0,1 с (Рисунок.7) и соответствующее ему ОСШ системы  $SNR = 66$ .

В общее ОСШ входит и ЧД, и выходные каскады интерфейсной платы, поэтому полученное значение было пересчитано на ОСШ цифрового ЧД. На практике цифровой ЧД работает в паре в другими контура-

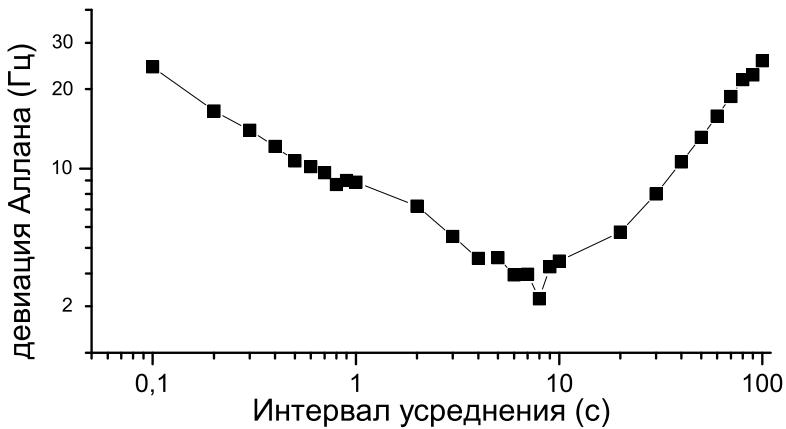


Рисунок 7. Девиация Аллана метанового ОСЧ с одноканальным цифровым ЧД

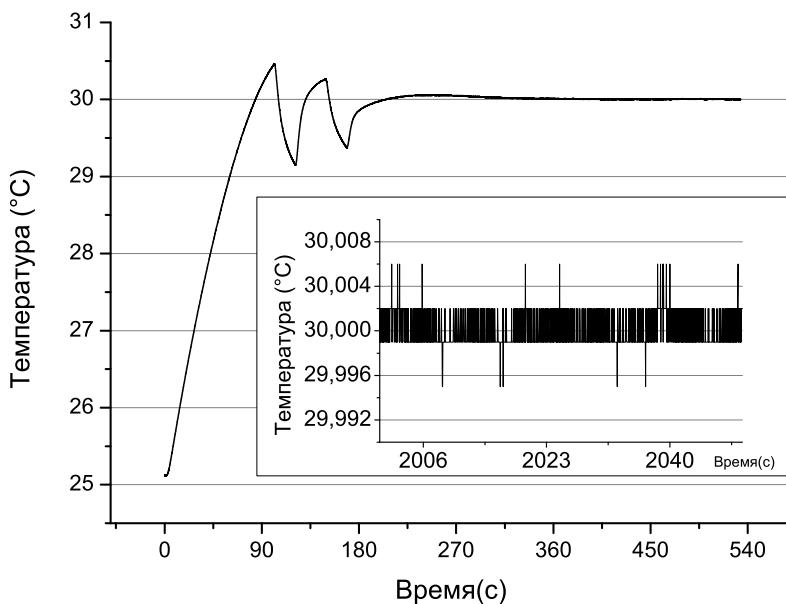


Рисунок 8. Зависимость температуры моноблока от времени

ми регулирования, поэтому использовать цифровое усреднение в полосе менее 100 Гц нельзя. Достигнутая относительная девиация Аллана выходной частоты ОСЧ для макета цифрового ЧД составила  $1,4 \cdot 10^{-13}$  на интервале усреднения 0,01 с. Применение реверсивного счета, устраняющего недостаточную корреляцию шума, при усреднении и объединении п-каналов обеспечит  $2,8 \cdot 10^{-14}$  и  $1,7 \cdot 10^{-15}$  на интервале усреднения 0,01 с для одного и 16-ти каналов.

Вторая часть посвящена экспериментальному исследованию макета системы терmostабилизации метанового ОСЧ. Была показана стабильность поддержания температуры в точке между основанием и моноблоком на уровне  $\pm 0,006^{\circ}\text{C}$  в течение 1,5 часов, при том что время установки постоянной температуры составило менее 7 мин, что подтвер-

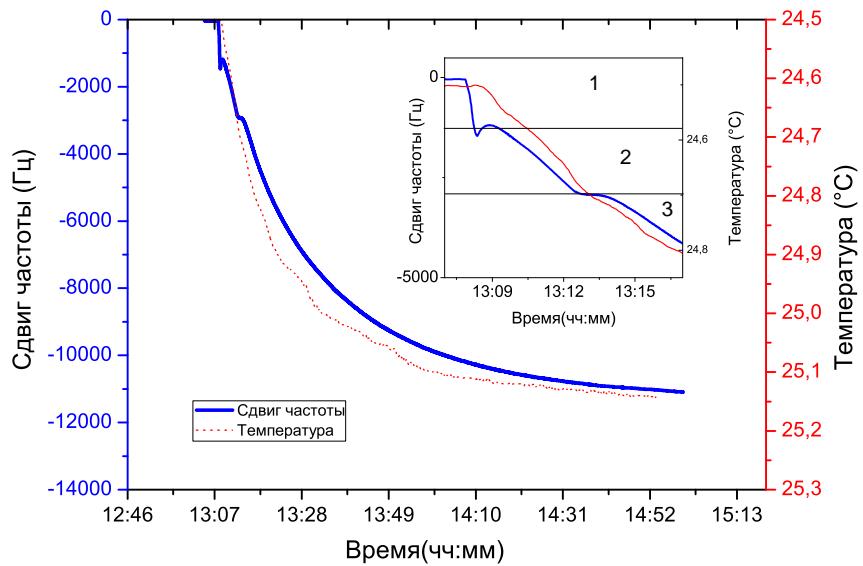


Рисунок 9. Зависимость частоты межмодовых биений от температуры моноблока

ждает достижение необходимых стабильности и скорости перестройки температуры (Рисунок 8). Измерения с температурными воздействиями подтвердили прямую связь между температурой моноблока и частотой межмодовых биений (Рисунок 9), количественно оцениваемую с помощью температурного коэффициента частоты, величина которого составила  $16,150 \frac{\text{Гц}}{\text{°C}}$ . Сдвиг локального максимума функции девиации Аллана с 1 с до 10 с подтверждает достигнутое увеличение долговременной стабильности частоты. Также время непрерывной работы метанового ОСЧ в режиме захвата было увеличено до недель, что позволило выявить сдвиг выходной частоты ОСЧ на 1,5 кГц за 14 дней, имеющий нетемпературную природу. Обнаружение указанного эффекта стало возможным благодаря использованию разработанной системы термостабилизации.

### 3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования аппаратно-алгоритмического обеспечения для частотного детектора в оптических стандартах частоты позволяют сделать следующие выводы:

- частотное детектирование с использованием априорной информации о форме модуляции в метановом ОСЧ позволяет достичь относительной погрешности частоты ОСЧ  $1 \cdot 10^{-15}$  при интервале усреднения 1 с;
- для достижения теоретического ОСШ цифровое частотное детектирование должно быть организовано на основе реверсивного счета, что позволяет в полной мере использовать потенциал цифрового накопления сигнала и параллельных каналов счета;

- разработанная система температурной стабилизации моноблока опорного HeNe/CH<sub>4</sub> лазера со стабильностью поддерживаемой температуры на уровне  $\pm 0,006^{\circ}\text{C}$  обеспечила увеличение времени непрерывной работы частотного детектирования с дней до недель и позволила сдвинуть точку локального минимума функции девиации Аллана с 2 с до 10 с, повысив тем самым долговременную стабильность метанового ОСЧ;
- система термостабилизации позволила измерить температурный коэффициент частоты ОСЧ, а также обнаружить эффект дрейфа частоты, имеющий нетемпературное происхождение.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Даничев А.С., Шелестов Д.А., Пнев А.Б. Полупроводниковый стандарт частоты на линии Р(16) изотопа ацетилена со стабилизацией по температуре фазомодуляционным методом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. №2. С.201-214 (1,1 п.л./0,9 п.л.)
2. Шелестов Д.А., Тюриков Д.А., Пнев А.Б., Губин М.А. Цифровой частотный детектор для метанового мобильного стандарта частоты // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. том 3. выпуск 3. С. 29–34. (0,10 п.л./0,06 п.л.)
3. D. Shelestov, S. Tomilov «Stabilization of wavelength of diode laser radiation. Dynamic characteristics of Peltier Elements», Photonics, Sept.2016, pp.62-74. (1,4 п.л./1,1 п.л.)
4. V. Lazarev, A. Krylov, D. Dvoretskiy, S. Sazonkin, A. Pnev, S. Leonov, D. Shelestov, M. Tarabrin, V. Karasik, A. Kireev, M. Gubin «Stable Similariton Generation in an All-Fiber Hybrid Mode-Locked Ring Laser for Frequency Metrology», IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. № 7. С. 1028-1033. (0,7 п.л./0,1 п.л.)
5. Губин М.А., Киреев А.Н., Коростелин Ю.В., Пнев А.Б., Подмарков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П., Шелестов Д.А., Шелковников А.С. Задающие генераторы и хранители частоты на оптических линиях метана // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. № 23. С. 116-124. (0,30 п.л./0,04 п.л.)
6. Губин М.А., Киреев А.Н., Пнев А.Б., Тюриков Д.А., Шелестов Д.А., Шелковников А.С. Методы долговременной стабильности частоты лазеров с газовыми ячейками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № S2. С. 199-213. (0,7 п.л./0,3 п.л.)