

На правах рукописи

Митюрёв Алексей Константинович



**Методы и средства обеспечения единства измерений  
поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне**

05.11.15 – метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



**005059577**

16 МАЯ 2013

Москва 2013

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном предприятии  
«Всероссийский научно – исследовательский институт оптико-физических  
измерений» (ФГУП «ВНИИОФИ»)

Научный руководитель: доктор технических наук,  
Тихомиров Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: Левин Геннадий Генрихович,  
доктор технических наук,  
профессор, ФГУП «ВНИИОФИ»,  
начальник НИО «Голографии и оптической  
томографии»

Хромой Борис Петрович,  
доктор технических наук,  
профессор, ФГОБУ ВПО МТУСИ,  
заведующий кафедрой «Метрологии,  
стандартизации и измерений в технике связи»

Ведущая организация: ФГКУ «Главный Научный Метрологический  
Центр» Министерства Обороны Российской  
Федерации

Защита состоится « 22 » 05 2013 г. в \_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д308.006.01 при Всероссийском научно-  
исследовательском институте оптико-физических измерений, расположенном по  
адресу: 119361, г. Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИОФИ»

Автореферат разослан « 18 » 04 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук



Вишняков Г.Н.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АЦП – аналогово-цифровой преобразователь;
- ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи;
- ВОСП – волоконно-оптические системы передачи;
- ВСИ – высокоточное средство измерений;
- ГПСЭ – Государственный первичный специальный эталон;
- ГПС – Государственная поверочная схема;
- ГСЭ – Государственный специальный эталон;
- ГСП – главные состояния поляризации;
- ДГЗ – дифференциальная групповая задержка;
- ММ – математическая модель;
- НСП – неисключённая систематическая погрешность;
- ОВ – оптическое волокно;
- ПМД – поляризационная модовая дисперсия;
- ППС – процесс преобразования сигнала;
- РСИ – рабочее средство измерений;
- РЭ – рабочий эталон;
- РФ – Российская Федерация;
- СЛД – суперлюминесцентный диод;
- СКО – среднее квадратическое отклонение;
- ФКВ – фотонно-кристаллическое волокно;
- ФПУ – фотоприемное устройство;
- ХД – хроматическая дисперсия;
- ЭМ – эталонная мера.

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ, АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ

## Актуальность проблемы

В настоящее время большинство телекоммуникационных компаний стремится увеличить пропускную способность волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) в связи с постоянно растущими объёмами передаваемой информации. Одним из основных факторов, влияющих на скорость передачи информации в высокоскоростных ВОСП, являются дисперсионные характеристики оптического волокна (ОВ), в частности – поляризационная модовая дисперсия (ПМД). Под ПМД понимается усреднённая в рабочем спектральном диапазоне дифференциальная групповая временная задержка между ортогонально поляризованными модами излучения в оптическом волокне, возникающими вследствие нарушения концентричности сердцевины оптического волокна, внутренних и внешних механических напряжений, неоднородности материала и т.д. Единицей измерения временной задержки является пикосекунда [пс]. Возникновение данной задержки приводит к уширению оптического импульса, передаваемого по оптическому волокну, что, в свою очередь, приводит к увеличению числа битовых ошибок и снижению скорости передачи информации. Уширение происходит в двух режимах – слабой и сильной связи мод. Слабая связь мод подразумевает постоянство анизотропных свойств передающей среды и обуславливает деление распространяющегося в ней оптического импульса на две поляризованные моды. Сильная связь мод возникает в среде с хаотично меняющимися двулучепреломляющими свойствами, в результате чего импульс делится на множество поляризованных мод. ПМД является одним из ключевых параметров ВОСП и его оценка необходима как при прокладке, так и при эксплуатации волоконно-оптических линий связи. Следует отметить, что особенно актуальной задачей измерений ПМД становится в случае модернизации существующих линий связи с целью увеличения скорости передачи информации.

К настоящему времени соответствующие международные организации (IEC, ITA, ITU) разработали ряд рекомендаций и стандартов по методам измерений данной величины, а в ряде ведущих метрологических институтов мира (NIST –

США, NPL – Великобритания, KRIS – Южная Корея) были созданы эталонные установки для измерений ПМД.

Для измерений ПМД в оптическом волокне в России применяется целый ряд типов средств измерений, и с внедрением систем со спектральным уплотнением их номенклатура и количество быстро увеличивается. Однако поверочная схема для данных средств измерений отсутствует. Имеющаяся во ФГУП «ВНИИОФИ» эталонная база для измерений угла вращения плоскости поляризации излучения и эллипсометрических углов не применима для создания системы метрологического обеспечения измерений ПМД, так как работает в другом спектральном диапазоне, не приспособлена для работы с оптическим волокном и не позволяет проводить измерения разности фаз ортогонально поляризованных мод, превышающей 2л.

Таким образом, задача обеспечения единства и требуемой точности измерений ПМД в стране не решена. Для её решения необходима разработка Государственной поверочной схемы, а также методов и средств измерений, позволяющих обеспечить поверку, калибровку и испытания средств измерений данных классов. Поэтому создание эталонной базы и соответствующей документации с целью метрологического обеспечения измерений ПМД на территории РФ, а также гармонизация нормативно-методических документов с международными нормами и стандартами в области измерений ПМД, являются современными и актуальными задачами. Настоящая работа по созданию методов и средств обеспечения единства измерений ПМД для высокоскоростных ВОСП проводилась в рамках программ «Эталон России» и ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008-2011 гг.».

### **Цели и основные задачи диссертации**

Целью настоящей работы являются разработка и исследования методов и средств обеспечения единства измерений ПМД. Цель работы определила основные задачи, решаемые в диссертации:

Анализ международных стандартов и методов построения эталонной аппаратуры в области измерений ПМД, выбор и обоснование методов построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне.

- Разработка математической модели процесса преобразования сигнала п измерениях ПМД на основе выбранных методов. Исследования разработанны модели с целью оптимизации составляющих погрешности при измерениях ПД выбранными методами.
- Разработка и метрологические исследования измерительной аппаратуры на основе оптимизированных схем измерений ПМД. Разработка Государственной поверочной схемы для средств измерений ПМД.
- Создание Государственного первичного специального эталона единиц поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне, а также разработка исследования методов и средств передачи единицы ПМД к рабочим средствам измерений ПМД.
- Внедрение разработанной эталонной аппаратуры и методических основ для обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне. Разработка и создание методов и средств измерений поляризационной модовой дисперсии наноструктурных фотонно-кристаллических волокон.

#### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Разработана математическая модель процесса преобразования сигнала в системах измерений ПМД на основе поляриметрического и интерферометрического методов и проведён анализ составляющих погрешности измерений ПМД.
2. Предложена и реализована схема измерений ПМД на основе интерферометрического метода с использованием воздушного интерферометра контроллера состояния поляризации излучения, которая позволяет применить данный метод в решении задачи построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне.
3. Предложена и реализована схема калибровки эталонной поляриметрической измерительной аппаратуры с использованием оптического кристалла и эталонных средств измерений длины волны и средней мощности лазерного излучения из состава Государственного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения в ВОСП (ГЭТ 170-2011), позволяющая с высокой точностью

определять значение составляющей погрешности, вносимой поляриметром при измерениях ПМД.

4. Разработана конструкция оптического элемента на основе нормально ориентированных фазовых пластин, позволяющая реализовать меру единицы ПМД для режима сильной связи мод.

5. Разработаны методы и средства воспроизведения единицы ПМД, позволившие создать Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010, а также разработаны методики поверки и калибровки средств измерений ПМД в оптическом волокне.

6. Разработан метрологический комплекс для обеспечения единства измерений ПМД в наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах.

### **Практическая ценность и использование результатов работы**

1. На основе разработанной эталонной аппаратуры для измерений ПМД построен и утверждён Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010, воспроизводящий и передающий единицу ПМД в оптическом волокне, а также разработана и утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне ГОСТ 8.607-2012, что позволило решить проблему единства измерений ПМД в стране.

2. Разработанная эталонная аппаратура для измерений ПМД в ранге рабочих эталонов была использована при проведении испытаний рабочих средств измерений для их включения в Государственный реестр средств измерений, а также для поверки и калибровки высокоточных средств измерений ПМД ведущих зарубежных фирм.

3. Разработанными средствами для передачи единицы ПМД в оптическом волокне оснащены: ФГУП «ВНИИОФИ», метрологический центр Российской Федерации ФБУ «Новосибирский» ЦСМ и предприятие по производству волоконно-оптического кабеля ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания», что подтверждено соответствующими актами.

4. Результаты разработки эталонной аппаратуры для измерений ПМД в оптическом волокне позволили создать метрологический комплекс для обеспечения единства измерений ПМД в наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах.

5. Разработанная математическая модель процесса преобразования сигнала при измерениях ПМД и результаты её исследований используются при создании рабочего эталона единицы ПМД в интересах Метрологической службы Министерства Обороны РФ.

#### **Вклад автора:**

При непосредственном участии автора на основе оптимизированных схем измерений ПМД интерферометрическим и поляриметрическим методами создан Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010 и Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне ГОСТ 8.607-2012, а также комплекс средств передачи единицы ПМД в оптическом волокне к рабочим средствам измерений ПМД. Автором разработаны узлы интерферометра и контроллера состояния поляризации излучения, а также программное обеспечение эталонной измерительной аппаратуры ГЭТ 185-2010. Кроме того, автором разработан комплект методических материалов, включающий в себя методики поверки и калибровки рабочих эталонов единицы ПМД, эталонных мер единицы ПМД, рабочих средств измерений ПМД в оптическом волокне, а также рабочих средств измерений ПМД в наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах.

#### **Апробация работы**

Основные материалы, представленные в диссертации, были доложены, обсуждены и одобрены на научно-технических конференциях: «The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments 2009», «IX всероссийской научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации», «Всероссийской конференции по волоконной оптике 2009» и XV, XVI, XVII всероссийских научно-технических конференциях «Фотометрия и её метрологическое обеспечение».

#### **Публикации:**

По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 тезиса докладов на научно-технических конференциях, 9 статей в журналах «Измерительная техника», «Метрология», «Вестник метролога», «Фотон-Экспресс»,



«Laser Physics Letters», сборнике трудов «The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments» и 1 патент на изобретение.

### **Структура и объём работы:**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений.

Общий объём составляет 140 страниц печатного текста, в том числе 62 рисунка, 16 таблиц, а также 5 страниц списка литературы и 4 страницы приложений.

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

1. Предложенная схема измерений поляризационной модовой дисперсии на основе воздушного двухканального интерферометра Майкельсона и автоматизированного контроллера состояния поляризации излучения позволяет проводить измерения автокорреляционным методом в диапазоне  $0,2 \div 150$  пс с неисключённой систематической погрешностью, равной  $0,005$  пс, и среднеквадратическим отклонением результата измерений, равным  $0,006 + 0,0025 \times A$ , где  $A$  – значение измеряемой величины, в пс.

2. Предложенная схема измерений дифференциальной групповой задержки на базе метода фиксированного анализатора с использованием алгоритма восстановления фазы пространственной несущей, применяемого при обработке интерферограмм, позволяет определить дифференциальную групповую задержку, вносимую калибровочным поляризационным элементом номиналом  $300$  фс, с суммарной погрешностью, равной  $1,5$  фс.

3. Разработанная конструкция меры на основе нормально ориентированных фазовых пластин позволяет воспроизводить автокорреляционным методом единицу поляризационной модовой дисперсии в режиме сильной связи со среднеквадратическим отклонением результата воспроизведения, не превышающим  $0,004$  пс для значения ПМД  $0,23$  пс.

4. Совмещение двух независимых методов измерений поляризационной модовой дисперсии в сочетании с разработанными мерами указанной единицы для режимов слабой и сильной связи мод позволило создать Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне. Разработанные первичный эталон, Государственная поверочная схема для средств измерений

поляризационной модовой дисперсии и методики поверки и калибровки рабочих эталонов и рабочих средств измерений, а также методы и средства для передачи единицы к рабочим средствам измерений позволили решить задачу обеспечения единства и требуемой точности измерений поляризационной модовой дисперсии в стране, в том числе и для наноструктурных фотонно-кристаллических волокон.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **ВВЕДЕНИИ** сформулированы актуальность проблемы и цель работы. Приведены основные определения и ограничения для ВОСП, связанные с явлением ПМД, представлены метрологические характеристики основных современных рабочих средств измерений ПМД, эксплуатируемых на территории РФ. Определены основные научно-технические задачи, решаемые в диссертации.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** приведено описание физического явления ПМД, проведён анализ метрологических характеристик средств измерений ПМД, сформулированы требования к метрологическим характеристикам разрабатываемой эталонной аппаратуры. Представлены результаты анализа эталонной базы для средств измерений ПМД ведущих зарубежных метрологических институтов, приведены основные международные стандарты в области измерений ПМД, а также сделан обзор современных методов измерений ПМД в оптическом волокне. Проведены исследования, выбор и обоснование методов построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД в ВОСП.

Анализ соответствующей литературы и зарубежной эталонной базы для средств измерений ПМД показал, что для осуществления калибровки и поверки средств измерений ПМД могут быть использованы эталонные меры на основе оптических материалов, обладающих свойством линейного двулучепреломления. При этом для воспроизведения единицы ПМД и её передачи к мерам ПМД следует использовать высокоточные средства измерений ПМД. Калибровку и поверку рабочих средств измерений (РСИ) ПМД следует проводить в двух режимах измерений: слабой и сильной связи поляризованных мод.

Проведённый анализ возможности воспроизведения единицы ПМД с помощью меры на основе оптической линии задержки показал, что основными препятствиями к применению данного метода являются недостаточная точность абсолютных

перемещений сканирующего устройства меры в широком диапазоне (от 0,05 до 100 мм) при установке требуемой временной задержки, невозможность воспроизведения единицы ПМД в режиме сильной связи мод, а также непригодность при калибровке рабочих средств, основанных на частотных методах измерений ПМД.

Анализ существующих методов измерений ПМД показал, что наиболее приемлемыми для построения эталонной измерительной аппаратуры являются два метода: интерферометрический и поляриметрический. Поляриметрический метод измерений ПМД даёт возможность получения наиболее полной информации о ПМД исследуемого объекта, хотя может уступать по точности интерферометрическому при измерениях ПМД больших значений (более 40 пс). Интерферометрический метод не позволяет определить ПМД 2-ого порядка (зависимость ПМД от длины волны излучения) и уступает поляриметрическому методу в точности при измерениях ПМД малых значений (менее 1 пс).

Для воспроизведения единицы ПМД первичным эталоном кроме измерительной аппаратуры необходимы образцы оптических элементов, обладающие анизотропными свойствами – меры ПМД. Было показано, что в качестве таких мер ПМД могут выступать оптические кристаллы, оптическое волокно с сохранением состояния поляризации (PM-волокно), одномодовое оптическое волокно.

Исследования показали, что в качестве рабочих эталонов единицы ПМД можно применять меры, аналогичные используемым при воспроизведении единицы. В данном случае от используемых материалов требуется достаточная долговременная стабильность анизотропных свойств. Исходя из этого, а также опираясь на опыт ведущих зарубежных метрологических институтов, был сделан вывод, что для передачи единицы ПМД рабочим средствам измерений ПМД пригодны эталонные меры ПМД на основе оптических кристаллов и волокна с сохранением состояния поляризации, предварительно откалиброванные с помощью эталонной аппаратуры для измерений ПМД.

Анализ метрологических характеристик РСИ ПМД позволил сформулировать требования к метрологическим характеристикам эталонной аппаратуры для измерений ПМД. Было показано, что измерения необходимо проводить в диапазоне от 0,05 до 120 пс с суммарной погрешностью не хуже  $0,01+0,01 \times \Delta\tau$ , где  $\Delta\tau$  –

воспроизводимое значение ПМД, в пс. Исходя из анализа методов измерений ПМД, данный диапазон является слишком широким для реализации эталонной аппаратуры с заданной точностью воспроизведения единицы ПМД на базе одного метода. Поэтому было установлено, что для построения эталонной аппаратуры целесообразно использовать два метода: поляриметрический метод для воспроизведения малых значений единицы ПМД – от 0,05 до 5 пс, и интерферометрический для больших значений – от 5 до 120 пс.

**Вывод:** Таким образом, проведённый анализ показал, что за основу эталонной базы для хранения, воспроизведения и передачи единицы ПМД в оптическом волокне целесообразно принять комплекс для измерений ПМД, в состав которого входят набор мер ПМД и эталонная аппаратура для измерений ПМД на базе двух методов – поляриметрического и интерферометрического. Указанные методы включены в список рекомендованных международными стандартами в области измерений ПМД. В качестве средств передачи единицы ПМД к РСИ ПМД следует применять элементы на основе оптических кристаллов и оптического волокна с сохранением состояния поляризации.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** приведены результаты разработки и теоретического исследования математических моделей процесса преобразования сигнала (ППС) при измерениях ПМД для интерферометрического и поляриметрического методов. Проведён анализ источников погрешностей при измерениях ПМД и предложены пути оптимизации схем измерений с целью уменьшения влияния данных источников.

Проведённый анализ методов построения эталонной аппаратуры показал, что основным структурным звеном эталона единицы ПМД является высокоточное измерительное устройство. Для количественного определения влияния источников погрешности при измерениях ПМД выбранными методами на основе классических схем были построены математические модели (ММ) ППС, которые описывают средства измерений ПМД как связанные системы сигналов и элементов. ММ служат для описания функционально-преобразующей связности, задаваемой операторами  $P$ , имеющими вид соответствующих уравнений, между сигналами в системе. Общее выражение для ММ выглядит следующим образом:

$$MM_{oc} = \{S, \Sigma, B, Q, G, P_b(s | Q, G)\}, \text{ где} \quad (1)$$

S – множество входных сигналов;  $\Sigma$  – множество выходных сигналов; B – множество преобразующих элементов; G – множество внутренних параметров; Q – множество внешних параметров;  $P_b(s | Q, G)$  – оператор, задающий поведенческую связность сигналов s, поступающих на вход элементов b, с выходными сигналами  $\sigma$  с учётом внешних и внутренних параметров системы.

Реализация подобной модели позволила численно определить каждый элемент устройства как источник погрешности при измерениях ПМД.

Классическая схема измерительного устройства на основе интерферометрического метода представлена на рисунке 1.

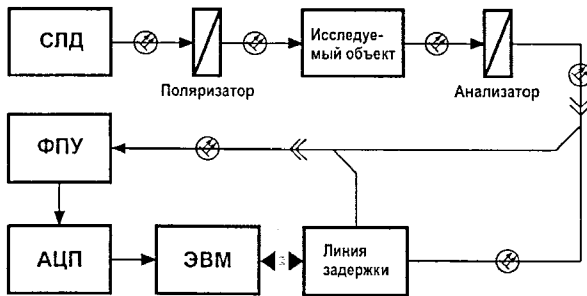


Рисунок 1 – Классическая структурная схема измерительного устройства на основе интерферометрического метода

Принцип действия интерферометрической схемы измерений ПМД основан на регистрации интерференционного сигнала широкополосного источника излучения на основе суперлюминесцентного диода (СЛД) при изменении длины одного из плеч интерферометра. По наличию боковых автокорреляционных пиков можно судить об изменении фазового соотношения ортогональных составляющих волны, прошедшей среду с ПМД. Значение ПМД определяют как временную задержку между боковым и центральным пиками и связывают с перемещением каретки линии задержки следующим соотношением:

$$\langle \Delta \tau \rangle = \frac{2 \times \Delta l}{c}, \text{ где} \quad (2)$$

$\langle \Delta \tau \rangle$  – усредненное в данном спектральном диапазоне значение дифференциальной групповой задержки (ДГЗ), пс;  $\Delta l$  – расстояние, пройденное кареткой узла линии

задержки блока интерферометра от точки с нулевой оптической разностью хода до точки поляризационного максимума,  $m$ ;  $c$  – скорость света, м/с.

Был проведён анализ влияния внешних и внутренних параметров устройства на погрешность измерений ПМД и выделены источники погрешностей при измерениях ПМД. С помощью разработанной ММ ППС устройства источники погрешностей при измерениях ПМД были определены количественно. Основной вклад в погрешность измерений ПМД по интерферометрической схеме вносят волоконно-оптические элементы коммутации, волоконные ответвители, угловое положение ГСП исследуемого объекта, угловой датчик перемещений каретки в линии задержки.

Для уменьшения значений составляющих погрешности измерений ПМД было предложено использовать воздушный интерферометр вместо волоконного, проводить усреднение по нескольким входным положениям состояния поляризации излучения и применить оптические методы контроля перемещений каретки линии задержки интерферометра.

Для реализации приведённых выше соображений была предложена оптимизированная схема (см. рис. 2) измерений ПМД на основе интерферометрического метода с использованием двухканального воздушного интерферометра Майкельсона и автоматизированного контроллера состояния поляризации излучения на выходе источника. Второй канал интерферометра является опорным и использует излучение одночастотного лазера, по интерференционной картине которого определяется перемещение подвижной части сканирующего устройства и производится вычисление временной задержки между автокорреляционными пиками измерительного канала. Калибровка длины волны опорного лазера осуществляется с помощью аппаратуры Государственного специального эталона единиц длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны оптического излучения в ВОСП (ГЭТ 170-2011). Контроллер состояния поляризации представляет собой поляризатор с возможностью управляемого вращения вокруг своей оптической оси.

С учётом внесённых изменений формула (2) для расчёта ПМД принимает вид:

$$\langle \Delta \tau \rangle = f(m, \lambda, c) = \frac{m(x_1 \dots x_7) \times \lambda_{оп}}{c}, \text{ где} \quad (3)$$

$\lambda_{оп}$  – длина волны опорного лазера, м;  $m$  – количество интерференционных полос;  $c$  – скорость света, м/с.

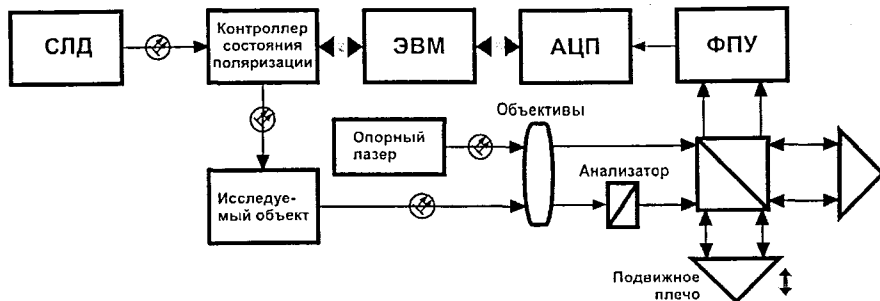


Рисунок 2 – Оптимизированная структурная схема измерительного устройства на основе интерферометрического метода

Результаты теоретического анализа источников погрешности при измерениях ПМД с помощью интерферометрической схемы до и после оптимизации приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Источники погрешности интерферометрической схемы измерений ПМД

Источники погрешности	Обозначение	Характер	Вклад в погрешность, [пс]	
			Классич. схема	Оптим. схема
Шумы фотоприёмника	$x_1$	Случайный	0,005	0,005
Угловое положение главных состояний поляризации исследуемого объекта	$x_2$		$0,01 \times \Delta\tau$	–
Анизотропия волоконно-оптических элементов коммутации	$x_3$	Систематический	0,003	0,003
Анизотропия оптических элементов волоконного интерферометра	$x_4$		0,02	–
Измерения перемещения каретки линии задержки	$x_5$		0,02	–
Анизотропия оптических элементов воздушного интерферометра	$x_6$		–	0,003
Алгоритм построения огибающей корреляционных пиков	$x_7$		0,002	0,002
Длина волны опорного лазера	$\lambda_{оп}$		–	0,001
СКО			0,011 (для $\Delta\tau = 1$ пс)	0,005
НСП			0,03	0,005
Прослеживаемость измерений			отсутствует	ГЭТ 170-2011

Таким образом, предложенный вариант оптимизированной схемы интерферометрического метода измерений ПМД позволяет существенно уменьшить значения СКО и НСП измерений. Исходя из анализа характеристик РСИ ПМД, проведённого в первой главе, полученные теоретические значения СКО и НСП позволяют использовать предложенную оптимизированную схему в решении задачи построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД. Также стоит отметить прослеживаемость измерений ПМД к ГЭТ 170-2011 в части измерений длины волны.

Далее рассмотрим классическую схему измерений ПМД на основе поляриметрического метода (см. рис. 3). Принцип действия приведённой схемы основан на определении матрицы Джонса, связывающей параметры состояния поляризации излучения на входе и выходе исследуемого объекта. Состояние поляризации излучения описывают с помощью параметров вектора Стокса, измерение которых для выходного излучения проводят на поляриметре. Для входного излучения данные параметры являются фиксированными и описывают три линейно поляризованных волны с углом наклона плоскости поляризации  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . При изменении длины волны излучения фазовые соотношения ортогонально-поляризованных составляющих световой волны в исследуемом объекте меняются, и, как следствие, меняется матрица Джонса. Данное изменение связано с дифференциальной групповой задержкой (ДГЗ) следующим соотношением:

$$\Delta\tau = \left| \frac{\operatorname{Arg}\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)}{\Delta\omega} \right|, \text{ где} \quad (4)$$

$\rho_1$  и  $\rho_2$  – комплексные собственные значения матрицы вида  $T(\omega + \Delta\omega) \cdot T^{-1}(\omega)$ , в которой:  $T(\omega + \Delta\omega)$  – матрица Джонса исследуемого объекта для круговой частоты излучения  $\omega + \Delta\omega$ ;  $T^{-1}(\omega)$  – обратная матрица Джонса исследуемого объекта для круговой частоты излучения  $\omega$ ;  $\Delta\omega$  – приращение круговой частоты излучения перестраиваемого лазера, рад/с.

Результат измерений ДГЗ определяется алгоритмом нахождения собственных значений матрицы Джонса исследуемого объекта, построенного с помощью аппарата линейной матричной алгебры. Алгоритм вычисления ДГЗ на основе указанного



математического аппарата был реализован в виде программы, с помощью которой был проведён анализ внешних и внутренних параметров системы как источников составляющих погрешности при измерениях ДГЗ.

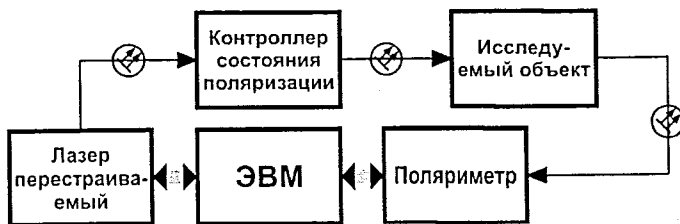


Рисунок 3 – Классическая структурная схема измерительной установки на основе поляриметрического метода

Основной вклад в погрешность измерений ДГЗ на базе поляриметрической схемы вносят следующие источники: волоконно-оптические элементы коммутации, шумы фотоприёмника поляриметра и погрешность определения длины волны лазера. Кроме того, необходимо было калибровать поляриметр с целью определения связанной с его использованием систематической составляющей погрешности при измерениях ДГЗ.

С учётом вышеизложенного для уменьшения влияния указанных источников составляющих погрешности при измерениях ДГЗ было предложено: внести в схему эталонное средство измерений длины волны; проводить многократные измерения параметров вектора Стокса для каждого входного углового положения плоскости поляризации излучения с последующим усреднением для снижения СКО результата измерений ДГЗ; осуществить калибровку поляриметра в открытом пучке с использованием кварцевого поляризационного элемента с экспериментально определённым значением вносимой фазовой задержки. Использование открытой оптики позволяет уменьшить влияние анизотропии волоконно-оптических соединительных кабелей.

Схема калибровки поляриметра приведена на рис. 4. Значение фазовой задержки кварцевого элемента, относительно которой производится калибровка поляриметра, было определено экспериментальным путём. Для этого была собрана схема, приведённая на рис. 5. В процессе измерений по схеме рис. 5 определяется зависимость мощности оптического сигнала на выходе анализатора от длины волны.

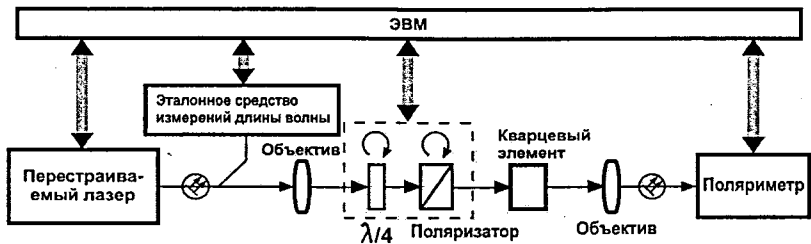


Рисунок 4 – Схема калибровки поляриметра

В качестве эталонного средства измерений длины волны перестраиваемого источника в схему была включена соответствующая аппаратура из состава ГЭТ 170-2011. Нахождение поляризатора и анализатора внутри оптической системы поляризационного элемента позволяет исключить влияние соединительных оптических кабелей на погрешность измерений ДГЗ.

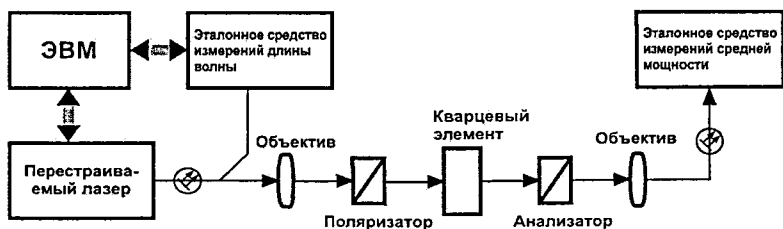


Рисунок 5 – Схема экспериментального определения ДГЗ кварцевого поляризационного элемента

Экстремумы полученной зависимости соответствуют разности фаз распространения обыкновенного и необыкновенного лучей, равной  $2\pi$ . Зная значения длин волн в этих точках, легко вычислить ДГЗ по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{N \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{c \cdot (\lambda_2 - \lambda_1)}, \text{ где} \quad (5)$$

$N$  – количество минимумов полученной функции;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн первого и последнего минимумов, м;  $c$  – скорость света, м/с.

При использовании в предложенной схеме аппаратуры из состава ГЭТ 170-2011 в части измерений длины волны излучения и обработке полученных результатов измерений с помощью алгоритма восстановления фазы пространственной несущей, применяемого в интерферометрии, расчётное значение суммарного СКО измерений ДГЗ поляризационного элемента не превышает 1 фс.

После экспериментального определения значения ДГЗ кварцевого элемента необходимо провести калибровку поляриметра по схеме рис. 4. В процессе измерений определяется угол вращения вектора Стокса при изменении длины волны излучения в том же спектральном диапазоне ( $\lambda_1, \lambda_2$ ). Вычисления ДГЗ кварцевого элемента проводятся в соответствии с выражением (4). Результаты теоретического анализа источников составляющих погрешности при измерениях ПМД поляриметрическим методом с учётом предложенных мер по оптимизации процесса измерений приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Источники погрешности поляриметрической схемы измерений ПМД до и после оптимизации

Источники погрешности	Обозначение	Характер	Вклад в погрешность, [пс]	
			Классич. схема	Оптим. схема
Погрешность измерений параметров вектора Стокса поляриметром	x1	Случайный  Систематический	0,002×Δτ (спецификация)	0,001×Δτ (необходима калибровка)
Анизотропия волоконно-оптических элементов коммутации	x2		0,003	0,003
Погрешность угла поворота плоскости поляризации контроллером состояния поляризации	x3		0,0001×Δτ	0,0001×Δτ
Погрешность измерений параметров вектора Стокса поляриметром	x4		0,002×Δτ (спецификация)	0,002×Δτ (необходима калибровка)
Погрешность значения ДГЗ калибровочного элемента	x5		–	0,001
Погрешность определения длины волны перестр. лазера	λ		0,005×Δτ <sup>2</sup>	0,0006×Δτ <sup>2</sup>
СКО (для Δτ=1 пс)			0,002	0,001
НСП (для Δτ=1 пс)			0,007	0,004
Прослеживаемость измерений			отсутствует	ГЭТ 170-2011

Полученные значения составляющих погрешности удовлетворяют требованиям, предъявленным в главе 1 к характеристикам измерительных устройств, используемых для построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД. Кроме того, как и при рассмотрении интерферометрического метода, здесь также стоит отметить прослеживаемость измерений ПМД к ГЭТ 170-2011 в части измерений длины волны.

**Вывод:** анализ процесса преобразования сигнала и разработанные математические модели классических схем измерений ПМД позволили определить и

оценить составляющие погрешности при измерениях ПМД указанными методами и провести их оптимизацию. На основе проведённых теоретических исследований были предложены оптимизированные схемы измерений ПМД. Разработанные схемы позволяют достигнуть достаточных для построения эталонной аппаратуры теоретических значений составляющих погрешности при измерениях ПМД.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приводятся результаты разработки и исследований эталонной аппаратуры для измерений ПМД на основе схем, предложенных в предыдущей главе. Показаны результаты разработки средств воспроизведения и передачи единицы ПМД к рабочим средствам измерений (РСИ) ПМД.

Согласно предложенной оптимизированной интерферометрической схеме была разработана и исследована эталонная аппаратура для измерений ПМД. Для её реализации были спроектированы следующие узлы: источник широкополосного оптического излучения; контроллер состояния поляризации излучения источника; воздушный двухканальный интерферометр Майкельсона.

Разработанный источник излучения представляет собой два модуля суперлюминесцентного диода с волоконными выходами на плате управления. Разработанный контроллер состояния поляризации представляет собой поляризатор с возможностью управляемого вращения вокруг оптической оси. Это устройство позволяет проводить усреднённые по множеству входных состояний поляризации излучения измерения ПМД, тем самым уменьшая значение СКО результатов измерений. Разработанный воздушный интерферометр представляет собой набор оптических элементов, установленных на массивную металлическую плиту согласно разработанной оптической схеме, представленной на рис. 6. Сканирование в подвижном плече осуществляется непрерывно с помощью шатуна, закреплённого на колесе, связанном ременной передачей с электродвигателем.

Собранное на базе разработанных узлов эталонное СИ ПМД было исследовано на предмет соответствия ожидаемых значений погрешности измерений ПМД полученным экспериментально. Была выявлена зависимость СКО результатов измерений ПМД интерферометрическим методом от значения измеряемой ПМД. Источником полученной зависимости является влияние на результат измерений ПМД ориентации главных состояний поляризации оптических элементов

конструкции установок и исследуемого объекта, которое не удалось полностью нейтрализовать усреднением по множеству входных состояний поляризации.

В результате исследований были определены его основные метрологические характеристики, представленные в табл. 3.

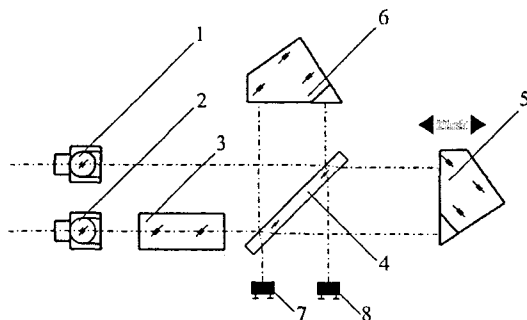


Рисунок 6 – Оптическая схема измерительной аппаратуры на основе интерферометрического метода:

1 – объектив опорного канала; 2 – объектив измерительного канала; 3 – поляризатор; 4 – светоделительная пластина; 5 – подвижная трипель-призма; 6 – неподвижная трипель-призма; 7 – фотоприёмник опорного канала; 8 – фотоприёмник измерительного канала.

Таблица 3 – Основные метрологические характеристики эталонной аппаратуры для измерений ПМД на основе интерферометрического метода

Наименование характеристики	Значение, полученное теоретически	Значение, полученное в ходе исследований
Рабочие длины волн, [нм]	1310±10, 1550±10	1312, 1545
Ширина спектра по уровню -3 дБ, [нм]	40 ÷ 65	55
Диапазон измеряемых значений ПМД, [пс]	0,5 ÷ 120	0,2 ÷ 150
СКО результатов измерений, [пс]	0,005	0,006+0,0025×Δτ
НСП результатов измерений, [нс]	0,005	0,005

Согласно предложенной поляриметрической схеме измерений ПМД была разработана и исследована эталонная аппаратура для измерений ПМД на базе поляриметра IPM5300 фирмы Thorlabs, Германия. Также в его состав вошли перестраиваемый лазер TLB6500 со спектральным диапазоном перестройки 1500 ÷ 1575 нм и контроллер состояния поляризации, аналогичный применённому в аппаратуре на основе интерферометрического метода.

Согласно предложенной во второй главе схеме измерений (см. рисунок 6) была экспериментально определена ДГЗ калибровочного поляризационного элемента на

основе кристалла кварца. Значение ДГЗ в диапазоне длин волн  $1502,8 \div 1560,1$  составило 273 фс с суммарной погрешностью 1,5 фс. После этого согласно схеме рисунка 6 ДГЗ данного калибровочного элемента было измерено с помощью поляриметра. Среднее значение ДГЗ калибровочного элемента составило 275 фс, что на 2 фс отличается от значения, полученного в ходе приведённого эксперимента. Значения СКО измерений не превысили 0,001 пс.

Таким образом, в результате проведённых экспериментальных исследований были найдены основные составляющие погрешности измерений ПМД поляриметрическим методом, что позволило определить значения основных метрологических характеристик эталонной аппаратуры для измерений ПМД поляриметрическим методом, представленные в табл. 4.

Таблица 4 – Основные метрологические характеристики эталонной аппаратуры для измерений ПМД поляриметрическим методом

Наименование характеристики	Значение, полученное теоретически	Значение, полученное в ходе исследований
Диапазон рабочих длины волн, [нм]	1500 ÷ 1575	1500 ÷ 1575
Диапазон измеряемых значений ПМД, [пс]	0,05 ÷ 120	0,05 ÷ 120
СКО результата измерений, [пс] (для значения ПМД 1 пс)	0,001	0,002
НСП результата измерений, [пс] (для значения ПМД 1 пс)	0,004	0,008

По результатам проведённых исследований был сделан вывод о том, что разработанная эталонная аппаратура для измерений ПМД на основе поляриметрического метода пригодна для применения в решении задачи обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне.

Для исследований разработанной эталонной измерительной аппаратуры были использованы поляризационные элементы на основе кристаллов кварца и исландского шпата в качестве среды со слабой связью мод. Для контроля измерений больших значений ПМД в режиме слабой связи мод применялись образцы волокна с сохранением состояния поляризации длиной 50 и 100 метров. Структура подобного волокна позволяет обеспечивать распространение плоскополяризованного излучения с коэффициентом фазовой задержки от 1 пс/м и выше.

На основе указанных элементов были разработаны меры ПМД для режима слабой связи мод. Исследования показали, что поляризационные элементы на основе оптических кристаллов и коротких отрезков волокна с сохранением состояния

поляризации можно использовать для построения эталонных мер единицы ПМД для режима слабой связи мод, предназначенных для передачи единицы к рабочим средствам измерений ПМД.

В качестве среды с сильной связью мод был использован образец одномодового волокна SMF128 длиной 25 км, а также 120 метров одномодового волокна, намотанного на раздвижную конструкцию, позволяющую изменять значение ПМД подобной меры путём натяжения различной силы в диапазоне от 0,1 до 1 пс.

Исследования мер с сильной связью мод позволили определить, что наиболее подходящими для решения задачи воспроизведения единицы ПМД в данном режиме являются определённым образом ориентированные друг относительно друга фазовые пластины. Была разработана мера, состоящая из двух элементов на основе кристаллов кварца и двух поляризаторов, позволяющая сформировать в проходящем через неё излучении набор поляризованных мод, характерный для режима сильной связи. Наличие в схеме поляризатора позволило реализовать стабильное разделение поляризованных мод и достичь значения СКО результатов измерений ПМД, не превышающего 0,004 пс для значения ПМД меры 0,23 пс.

**Вывод:** Таким образом, полученные в результате экспериментальных исследований разработанной эталонной аппаратуры для измерений ПМД значения составляющих погрешности при измерениях ПМД подтвердили сопоставимость теоретических значений метрологических характеристик аппаратуры с экспериментальными. Полученные результаты позволяют реализовать эталонную аппаратуру для воспроизведения и передачи единицы ПМД. Разработанные на основе оптических кристаллов и волокна с сохранением состояния поляризации меры ПМД позволяют воспроизводить единицу ПМД методом прямых измерений с помощью эталонной аппаратуры для измерений ПМД в режимах слабой и сильной связи мод. Разработанная на основе оптических кристаллов эталонная мера позволяет передавать единицу ПМД к РСИ ПМД в режиме слабой связи мод. Разработанная схема калибровки поляриметра позволила экспериментально определить составляющую неисключённой систематической погрешности, связанную с использованием поляриметра при измерениях параметров вектора Стокса, с суммарной погрешностью 1,5 фс.

В ЧЕТВЁРТОЙ ГЛАВЕ приводятся результаты внедрения разработанной эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне, а также в фотонно-кристаллических волокнах. Приведены результаты сравнительных метрологических исследований эталонной аппаратуры для воспроизведения единицы ПМД с высокоточными зарубежными средствами измерений ПМД.

Приведённые в третьей главе результаты разработок и исследований позволили реализовать предложения, сделанные в первой главе, по схеме построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений ПМД в оптическом волокне. Первичный эталон единицы ПМД было предложено реализовать в виде эталонной измерительной аппаратуры на основе разработанных измерительных устройств в комплекте с набором мер ПМД, которая предназначена для хранения и воспроизведения единицы ПМД, а также передачи единицы ПМД к РСИ ПМД. В результате были создан Государственный первичный специальный эталон (ГПСЭ) единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010 и разработан комплект методических материалов. Метрологические характеристики эталона приведены в таблице 6. В ГПСЭ единицы ПМД вошла эталонная аппаратура для воспроизведения, хранения и передачи единицы ПМД в оптическом волокне на базе выбранных методов измерений ПМД, а также комплект мер ПМД и ЭВМ. В комплект мер ПМД вошли набор оптических кристаллов и устройство их сопряжения с оптическим волокном для воспроизведения единицы в режиме слабой связи мод, а также мера ПМД для режима сильной связи мод на основе схемы, предложенной в третьей главе.

Таблица 6 – Полученные в результате исследований метрологические характеристики ГЭТ 185-2010

Наименование характеристики	Значение	
	Интерферометрический	Поляриметрический
Рабочие длины волн	1310, 1550 нм.	1550 нм
Диапазон значений	$5 \div 120$ пс	$0,05 \div 5$ пс
СКО результата воспроизведения	$0,006+0,0025 \times \Delta t$ пс	$0,001+0,001 \times \Delta t$ пс
Неисключённая систематическая погрешность	0,005 пс	0,004 для $\Delta t=0,3$ пс

Была утверждена предложенная Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне (ГОСТ 8.607-2012). Схема имеет классическую трёхзвенную структуру, при этом от первичного эталона единица



передается к высокоточному средству измерений методом сличений с помощью меры сравнения, а к рабочим эталонам (эталонным мерам) методом прямых измерений. От первичного эталона к рабочим эталонам на основе измерительной аппаратуры единица передаётся методом сличений с помощью меры сравнения. От рабочего эталона (эталонной меры ПМД) к рабочему средству измерений ПМД единица передаётся методом прямых измерений. От рабочего эталона (измерительной аппаратуры) к РСИ ПМД единица передаётся методом сличений с помощью меры сравнения. Эталонные меры единицы ПМД в оптическом волокне в ранге рабочих эталонов применяют для поверки РСИ в режиме слабой связи мод. Для поверки РСИ в режиме сильной связи мод применяют рабочие эталоны на основе измерительной аппаратуры с комплектом мер ПМД.

В таблице 5 приведён бюджет неопределённости при воспроизведении единицы ПМД согласно предложенной схеме.

Таблица 5 – Бюджет неопределённости при воспроизведении единицы ПМД

Источник неопределённости	Значение, [пс]	Источник неопределённости	Значение, [пс]
Поляриметрический метод		Интерферометрический метод	
Стандартная неопределённость, оцененная по типу А			
ПМД, $\langle \Delta\tau \rangle$ , [пс]	$0,001 + 0,001 \times \langle \Delta\tau \rangle$	ПМД, $\langle \Delta\tau \rangle$ , [пс]	$0,006 + 0,0025 \times \langle \Delta\tau \rangle$
Стандартная неопределённость, оцененная по типу В			
Анизотропия волоконных кабелей	0,0017	Анизотропия волоконных кабелей	0,0017
Неопределённость ДГЗ калибровочного эл.-га	0,0006	Неопределённость длины волны опорного лазера	0,0006
Неопределённость измерений параметров вектора Стокса	$0,004 \times \langle \Delta\tau \rangle$	Анизотропия оптических элементов интерферометра	0,0018
Определение длины волны перестраиваемого лазера	$0,0004 \times \langle \Delta\tau \rangle^2$	Алгоритм построения огибающей интерф.-мы	0,0011
Колебания температуры воздуха $\pm 2^\circ\text{C}$	0,0002	Колебания температуры воздуха $\pm 2^\circ\text{C}$	0,0002
<b>Суммарная стандартная неопределённость</b>			
Для значения $\langle \Delta\tau \rangle = 0,05$ пс			
0,0021   –			
Для значения $\langle \Delta\tau \rangle = 0,3$ пс			
0,0024   0,007			
Для значения $\langle \Delta\tau \rangle = 5$ пс			
0,019   0,019			
Для значения $\langle \Delta\tau \rangle = 120$ пс			
5,1   0,3			

На рис. 7 приведены полученные зависимости суммарной стандартной неопределённости воспроизведения единицы ПМД с помощью измерительной аппаратуры ГЭТ 185-2010 и с помощью высокоточных рабочих средств измерений от величины измеряемой ПМД. Графики наглядно демонстрируют целесообразность и сопоставимость применения двух независимых методов воспроизведения единицы ПМД для требуемого широкого диапазона.

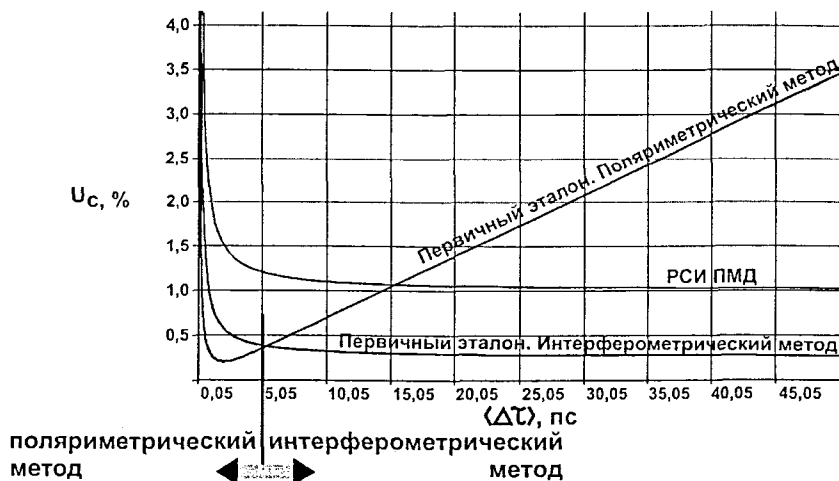


Рисунок 7 – Графики зависимости суммарной стандартной неопределённости при воспроизведении единицы ПМД от значения ПМД  $U_c(\Delta\tau)$

Для определения сходимости результатов измерений разработанного эталона с результатами измерений эталонной аппаратуры метрологических институтов других стран были проведены сравнительные исследования разработанной эталонной аппаратуры эталона с высокоточными РСИ ПМД зарубежных производителей, привязанным к национальным эталонам США (NIST) и Великобритании (NPL). В исследованиях принимали участие высокоточные средства измерений ПМД таких фирм, как EXFO (Канада), JDSU (Германия) и NetTest North America Inc (США).

Измерения проводились с помощью меры единицы ПМД в режиме слабой связи мод для номинального значения ПМД 0,3 пс. На рис. 8 приведены результаты измерений в виде отклонения среднего значения измеряемой величины ПМД для различных средств измерения ПМД от среднего значения ПМД, полученного на

аппаратуре эталона. Максимальное значение отклонения не превышает значения погрешности измерений ПМД используемой в сличениях аппаратуры.



Рисунок 8 – Результаты межлабораторных сличений

А – референсная точка (аппаратура ГПСЭ); В – отклонение среднего значения ПМД меры, измеренное с помощью аппаратуры EXFO; С – отклонение среднего значения ПМД меры, измеренное с помощью аппаратуры JDSU; D – отклонение среднего значения ПМД меры, измеренное с помощью аппаратуры NetTest.

Также, были проведены метрологические исследования эталонных мер единицы ПМД в оптическом волокне на базе оптических кристаллов. В табл. 7 приведены метрологические характеристики таких эталонных мер для NPL и NIST.

Таблица 7 – Метрологические характеристики эталонных мер единицы ПМД ведущих зарубежных метрологических институтов

Организация, страна	Обозначение	Значение ПМД, [пс] (номинал)	Расширенная неопределённость, [пс]
NIST, США	SRM 2538	0,3	0,004
NPL, Великобритания	PMD artifact low mode coupled standard	0,3	0,007
ФГУП «ВНИИОФИ», РФ	Эталонная мера единицы ПМД со слабой связью мод	0,3	0,008

Можно сделать вывод о сопоставимости значений неопределённости воспроизведения единицы ПМД с помощью указанных эталонных мер ФГУП «ВНИИОФИ» и метрологических институтов США и Великобритании.

Одновременно с разработкой системы метрологического обеспечения измерений ПМД в оптическом волокне, опираясь на результаты проведённых в рамках данной задачи исследований и разработок, были созданы метрологический

комплекс и аттестованные методики его поверки и измерений для обеспечения единства измерений оптических характеристик наноструктурных фотонно-кристаллических волокон (ФКВ) в ранге РСИ (комплекс включён в Государственный реестр средств измерений) для ВОСП в части параметра ПМД. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью оценки качества устройств на основе ФКВ, находящихся широкое применение в производстве оптических стандартов частоты, генерации фемтосекундных импульсов и т. д., методы и средства для проведения которой практически отсутствуют. Основными параметрами, подлежащими контролю при производстве таких устройств, являются хроматическая дисперсия, поляризационная модовая дисперсия и спектральное ослабление.

Разработанное средство измерений ПМД в ФКВ построено на базе поляриметрического метода. Для обеспечения требуемой погрешности измерений ПМД ( $0,01+1\%$  ДГЗ) в разработанной аппаратуре были применены поляриметры с открытой оптической системой, с погрешностью измерений угла поворота вектора Стокса не более  $0,2^\circ$ . Особенностью разработанной измерительной системы является введение в состав комплекса специальных прецизионных юстировочных приспособлений для ввода и вывода излучения из образцов ФКВ, так как применение данного типа волокон в большинстве случаев не предполагает оконцовку стандартными волоконно-оптическими разъёмами. Основные метрологические характеристики комплекса в части измерений ПМД в ФКВ приведены в табл. 8.

Апробация комплекса проводилась на зарубежных и отечественных образцах ФКВ совместно с Международным учебно-научным лазерным центром МГУ имени М.В. Ломоносова (МЛЦ МГУ) в рамках реализации ФЦП «Развитие инфраструктуры наноиндустрии в Российской Федерации на 2008-2011 гг.».

Таблица 8 – Основные метрологические характеристики метрологического комплекса для обеспечения единства измерений ПМД в ФКВ

Наименование характеристики	Значение характеристики
Рабочие длины волн, нм	$1300\pm 15, 1550\pm 15$
Диапазон измерений поляризационной модовой дисперсии, пс	от 0,05 до 0,1
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при измерении поляризационной модовой дисперсии А, пс	$\pm (0,01 + 0,01 A)$

После проведённых испытаний указанный метрологический комплекс был включён в Государственный реестр средств измерений. Основным результатом данной работы явилось создание аппаратной и методической базы для метрологического обеспечения перспективного направления измерений ключевых характеристик ФКВ и элементов на их основе.

**Вывод:** На основе разработанной аппаратуры для измерений ПМД, средств воспроизведения и передачи единицы ПМД, а также методов передачи единицы ПМД к РСИ ПМД были созданы Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010 и эталонные меры единицы ПМД в оптическом волокне в ранге рабочих эталонов. Разработана Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне ГОСТ 8.607-2012. Кроме того, на базе проведённых теоретических и экспериментальных исследований был реализован метрологический комплекс для решения задачи единства измерений ПМД в специфической среде – наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Проведены теоретические и экспериментальные исследования применимости основных известных методов измерений ПМД для построения эталонной аппаратуры для обеспечения единства измерений указанной величины.
2. Разработана математическая модель процесса преобразования сигнала в эталонной аппаратуре для измерений ПМД, позволяющая исследовать процесс измерений ПМД и оптимизировать составляющие погрешности при измерениях.
3. Предложенная оптимизированная интерферометрическая схема измерений поляризационной модовой дисперсии позволяет проводить измерения автокорреляционным методом в диапазоне  $0,2 \div 150$  пс с неисключённой систематической погрешностью, равной  $0,005$  пс и среднеквадратическим отклонением результата измерений, равным  $0,006 + 0,0025 \times A$ , где  $A$  – значение измеряемой величины, в пс.

4. Предложенная схема калибровки измерительной аппаратуры на основе поляриметрического метода позволяет оценить составляющую НСП измерений ПМД, связанную с использованием волоконного поляриметра, с суммарной погрешностью, равной 1,5 пс.

5. Разработана конструкция оптического элемента на основе нормально ориентированных фазовых пластин, позволившая реализовать меру единицы ПМД для режима сильной связи мод.

6. Разработаны и утверждены Государственный первичный специальный эталон единицы ПМД в оптическом волокне ГЭТ 185-2010 и Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне ГОСТ 8.607-2012, а также разработаны методики поверки и калибровки средств измерений.

7. Проведены исследования сопоставимости результатов воспроизведения единицы ПМД с помощью различных методов, показавшие достоверность воспроизведения единицы ПМД с помощью разработанной аппаратуры.

8. Разработанными эталонными средствами для передачи единицы ПМД в оптическом волокне оснащён метрологический центр Российской Федерации ФБУ «Новосибирский ЦСМ, предприятие по производству волоконно-оптического кабеля ЗАО «Самарская оптическая кабельная компания» и ФГУП «ВНИИОФИ». Данные средства используются для испытаний, поверки и калибровки рабочих средств измерений ПМД в оптическом волокне.

9. Результаты разработки эталонной аппаратуры для измерений ПМД в оптическом волокне позволили создать метрологический комплекс для обеспечения единства измерений ПМД в наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах.

Основным итогом выполнения диссертационной работы явилось решение важной научно-технической задачи обеспечения единства и требуемой точности измерений поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне и наноструктурных фотонно-кристаллических волокнах на территории РФ, а также задачи гармонизации разработанной нормативно-технической документации с международными стандартами в данной области измерений, что имеет существенное значение для проектирования, эксплуатации и модернизации высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи информации.

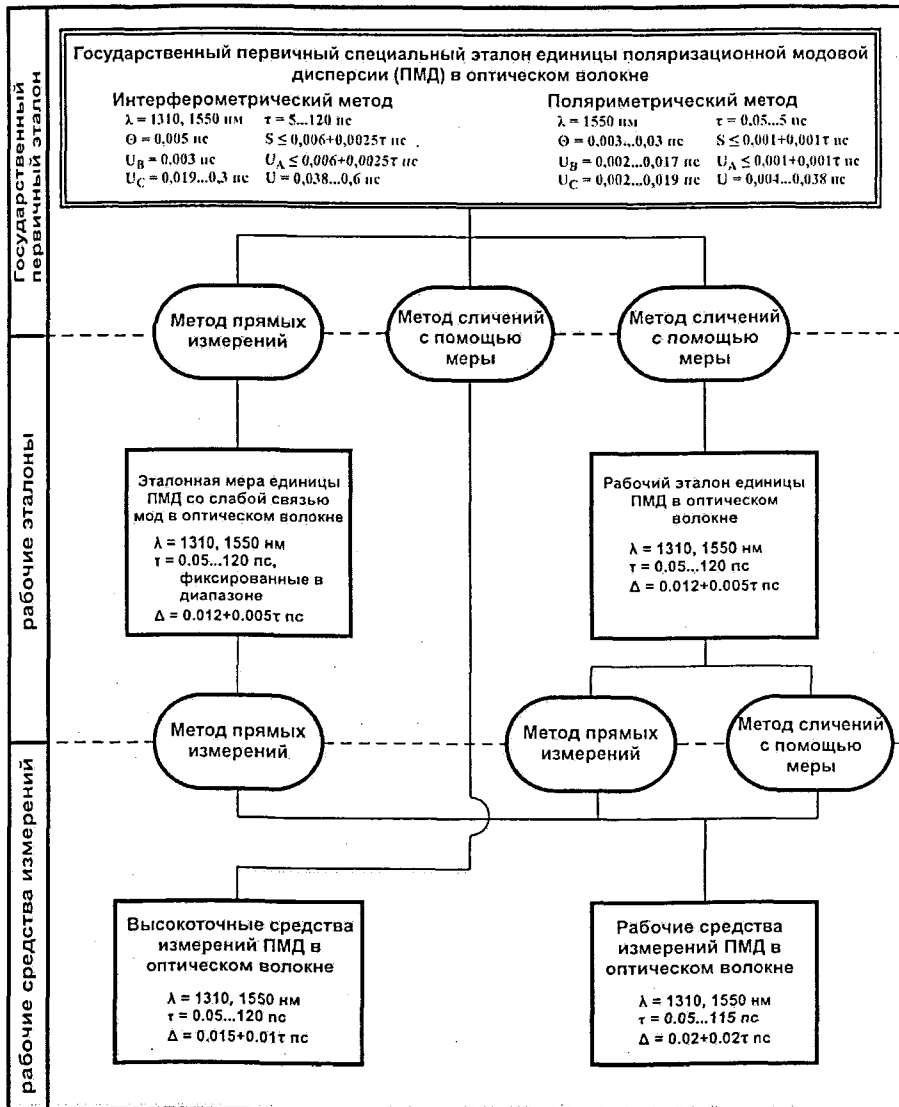
## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Пнев А.Б. Меры для калибровки средств измерения поляризационной модовой дисперсии // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: Тезисы докладов XVI всероссийской научно-технической конференции. М.: ВНИИОФИ, 2005 – с. 87.
2. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Лукьянов А.М., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В. Обеспечение единства измерений спектральных и дисперсионных характеристик в ВОСПИ со спектральным уплотнением // Измерительная техника. - 2006. - №5. - с.30-34.
3. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В. Разработка эталонной аппаратуры для калибровки, поверки и испытаний средств измерений поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение. Тезисы докладов XV111 всероссийской научно-технической конференции. М.: ВНИИОФИ, 2008 – с. 134.
4. Grigoriev Vasilij V., Kravtsov Vladimir Ye., Mityurev Alexey K., Pnev Alexey B., Tikhomirov Sergey V. Reference apparatuses for metrological support of instruments measuring polarization mode dispersion in optic fiber // The 9th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. - 2009. - Vol. 3. - pp. 295-297.
5. Григорьев В.В., Лазарев В.А., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В., Оптико-электронная измерительная система мониторинга деформации на основе наноразмерных волоконно-оптических периодических структур // Тезисы доклада Всероссийской конференции по волоконной оптике, г. Пермь, 2009.
6. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В. Эталонная аппаратура для средств измерений поляризационной модовой дисперсии в волоконно-оптических системах передачи информации // Измерительная техника. - 2010. - № 5. - с.60-64.
7. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В. Методы и средства метрологического обеспечения измерений хроматической и

- поляризационной модовой дисперсии в ВОЛС // Вестник метролога. 2011. - №2. - с. 22-26.
8. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Тихомиров С.В. Методы измерений поляризационной модовой дисперсии в волоконно-оптических системах передачи информации // Фотон-Экспресс. 2011. - №5. - с. 16-18.
  9. Григорьев В. В., Лазарев В. А., Митюрёв А. К., Неверова Н. А., Пнев А. Б. Быстродействующий измеритель длины волны лазерного излучения для волоконно-оптических систем передачи информации // Патент 2425338 РФ, МПК G01J 9/02, G01B 9/02.– Оpubл. 27.07.2011, Бюл. №21.
  10. I.V. Fedotov, A.A. Lanin, A.A. Voronin, V.V. Grigor'ev, A.K. Mityurev, N.P. Khatyrev, V.E. Kravtsov, D.A. Sidorov-Biryukov, S.V. Tikhomirov, A.B. Fedotov, A.M. Zheltikov Ultrafast nonlinear-optical metrology of specialty fibers: parallel multimode fiber dispersion tracing by cross-correlation frequency-resolved optical gating // Laser Physics Letters. 2011. - pp. 1–5.
  11. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Пнев А.Б., Тихомиров С.В. Государственный первичный специальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне // Измерительная техника. 2012. - № 2. – с. 3-6.
  12. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Тихомиров С.В. Пути уменьшения погрешности измерения длин оптических кабелей в бортовых системах передачи информации // Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации: Тезисы доклада Девятой всероссийской научно-технической конференции, 2012 – с. 36-37.
  13. Григорьев В.В., Кравцов В.Е., Митюрёв А.К., Тихомиров С.В. Ограничивающие факторы увеличения точности измерения длины оптического кабеля рефлектометром во временной области // Метрология времени и пространства: 6-й Международный симпозиум, секция 1 «Службы и эталоны времени и частоты», 2012 – с. 181-184.



Государственная поверочная схема для средств измерений ПМД в оптическом волокне ГОСТ 8.607-2012



$\lambda$  – рабочая длина волны;

$\Delta$  – предел основной абсолютной допускаемой погрешности измерений ПМД;

$\tau$  – среднее значение ПМД, полученное в ходе измерений;

$\Theta$  – граница неисключённой систематической погрешности воспроизведения единицы ПМД;

$S$  – среднее квадратическое отклонение результатов измерений при воспроизведении единицы ПМД;

$U_A$  – неопределённость типа A;  $U_B$  – неопределённость типа B;

$U_C$  – стандартная неопределённость;  $U$  – расширенная неопределённость