Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

На правах рукописи

Скляров Филипп Владимирович

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ПЛЕЧ ПРИ МОДУЛЯЦИИ ТОКА ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Направление подготовки 03.06.01 Физика и астрономия

Код и наименование Направленность 01.04.03 Радиофизика

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Скляров Ф.В. Научный руководитель: доцент, д.ф.-м.н., Л.Б. Лиокумович

Санкт Петербург – 2020

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе прикладной физики и космических технологий Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШПФиКТ:

– Величко Елена Николаевна доцент, к.т.н.

Научный руководитель:

– Лиокумович Леонид Борисович доцент, д.ф.-м.н.

Рецензент:

– Машошин Андрей Иванович АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», начальник НИЦ, д.т.н.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: http://elib.spbstu.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В течение последних десятков лет происходило развитие волоконнооптических технологий, волоконно-оптические датчики находят применение в различных отраслях промышленности. Хорошо известными и востребованными при реализации многоэлементных антенных решеток, для акустических и сейсмических применений, являются волоконно-оптические интерферометрические датчики (ВОИД). Датчики этого типа имеют очень высокую чувствительность, большой динамический диапазон. Разработано большое ВОИД. число концепций мультиплексирования позволяющие реализовывать различные виды. К основным недостаткам акустических ВОИД виброчувствительность следует отнести: повышенную сенсорной части, необходимость акустической и вибрационной изоляции компенсационного интерферометра, в результате чего увеличивается объем аппаратуры обработки сигналов.

Известен класс ВОИД, с чувствительными элементами, называемыми в англоязычной литературе push-pull. Эти датчики имеют преимущества, которые могут быть востребованы для применений, требующих исключения компенсационного интерферометра, сокращения аппаратуры обработки сигналов ВОИД, улучшения характеристик виброзащищенности И увеличение чувствительности ВОИД, снижения температурного дрейфа ВОИД. Основные сложности построения push-pull ВОИД связаны с реализацией чувствительного элемента, модуляцией лазерного источника и искажениями интерференционного сигнала и его обработкой, а также рассогласованием длин оптического волокна между ВОИД, что требует индивидуальной обработки сигнала для каждого канала измерительной системы.

Целью настоящей работы является исследование системы мультиплексирования волоконно-оптических интерферометрических датчиков с

дифференциальной чувствительностью плеч при модуляции тока лазерного источника для акустических измерений.

Научная новизна

1. Разработан метод определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов push-pull типа для волоконно-оптических интерферометрических датчиков звукового давления и вибрации;

2. Разработана методика исследований искажений интерференционного сигнала при модуляции тока лазерного источника для создания ВОИД с дифференциальной чувствительностью плеч.

Теоретическая и практическая значимость

1. Метод определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов для push-pull типа ВОИД позволяет создавать эффективные конструкции преобразователей для волоконно-оптических интерферометрических измерителей.

2. Методика определения исследований интерференционного сигнала при модуляции тока лазерного источника может быть использована для определения параметров лазерных источников различных типов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech), Неделя науки СПбПУ 2019, XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» 2020.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 статьях в журналах, входящих в список ВАК (из них семь, индексируемые базой цитирования Scopus). Полный список публикаций по теме диссертации приведен в конце диссертации и составляет 17 наименований. По результатам диссертационного исследования получено 3 патента.

Представление научного доклада: основные положения

1. Метод определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов push-pull типа для волоконно-оптических интерферометрических датчиков звукового давления и вибрации;

2. Методика исследований искажений интерференционного сигнала при модуляции тока лазерного источника для создания ВОИД с дифференциальной чувствительностью плеч.

Содержание работы

Глава 1. Объекты, (предмет) и методы исследования 3
1.1. Пластинчатый преобразователь 6
1.2. Преобразователь – биморф 10
1.3. Метод определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов в дифференциальном ВОИД18
Глава 2. Результаты и их обсуждение21
2.1. Экспериментальное определение разности фаз ЧЭ 21
2.2. Исследование лазерного источника
Заключение
Список литературы
Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)
Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК 30
Публикации в других изданиях
Патенты и изобретения

Глава 1. Объекты, (предмет) и методы исследования

Одними из основных характеристик акустических и вибрационных преобразователей являются: габаритные размеры, рабочий диапазон частот, чувствительность, вибрационная акустическая чувствительность, неравномерность АЧХ, частота резонанса, характеристики направленности, рабочее и предельное гидростатическое давление (для преобразователей, работающих под водой). Вышеуказанные параметры являются взаимно ограничивающими, так ЧЭ с воздушным зазором (air-backed) с большой акустической чувствительностью выдерживает относительно небольшое гидростатическое давление, в свою очередь ЧЭ, выдерживающие большее гидростатическое давление. имеют меньшую акустическую Таким образом, характеристики ЧЭ, чувствительность. определяются конструкцией и технологией изготовления преобразователя, выбором материалов и комплектующих изделий.

На Рис. 1.1 показана часто приводимая в литературе [8, 9] схема ВОИД на основе ЧЭ push-pull типа, оптическая схема представляет собой интерферометр Майкельсона.



Рис. 1.1. Оптическая схема акустического ВОИД с подавлением вибрационной составляющей на основе ЧЭ пластинчатого типа

Чувствительные катушки OB (A1, A2, B1, B2) на Рис. 1.1 представляют собой спирали оптического волокна, приклеенные к четырем поверхностям преобразователя, в соответствии с Рис. 1.2.



Рис. 1.2. Схема деформации ЧЭ при воздействии звукового давления (слева), при воздействии вибрации (справа)

В статьях [8, 9] приводятся результаты теоретического расчета преобразователя в динамическом режиме; расчет прочности; численное моделирование; выбор элементов конструкции; используемые материалы с приведением их физико-механических параметров; определение резонансной частоты преобразователя; описаны особенности изготовления преобразователя; описаны методики измерений, включая калибровку аппаратуры, а также приводятся результаты измерений акустических и вибрационных параметров датчика (Рис. 1.3).



Рис. 1.3. Частотные характеристики чувствительности к звуковому давлению (слева) и к вибрационному воздействию (справа)

Можно видеть из Рис. 1.3, что частотная характеристика акустической чувствительности является равномерной в рабочей полосе частот, а частотная характеристика чувствительности к вибрации имеет резонанс, как теоретический, так и экспериментально измеренный. Сплошной линией на Рис. 1.3 отмечена норма (аналог в РФ в соответствии с ОСТ 92-4527-84) для обеих характеристик. Отношение акустической чувствительности к вибрационной, определяет параметр виброзащищенности (g/Па). Основным результатом, разработанного ВОИД, приведенного в статях [8, 9] является обеспечение требуемой виброзащищенности, приведенного в Табл. 1.1.

Табл. 1.1 Сравнение датчиков звукового давления, разработанных NPS, NRL

Performance measurement	NRL	<u>NPS</u>	NPS Advantage
			(dB)
Normalized acoustic sensitivity (dB re: 1µPa-1)	-321	-297	+24
Normalized acceleration sensitivity (dB re: 1µPa-1)	-144	-163	+19
Acoustic-to-acceleration FOM (dB re: g/µPa)	-177	-134	+43

видеть из Табл. 1.1, что параметр виброзащищенности Можно (acoustic-to-acceleration) для датчика, разработанного в Naval Postgraduate School (NPS) превышает на 43 дБ этот параметр, для датчика разработанного в Naval Research Laboratory (NRL). Следует отметить, что в статьях [8, 9] демонстрируется принцип создания ВОИД на основе ЧЭ push-pull типа, при обеспечивают этом указанные количественные параметры не работоспособности датчика при воздействии гидростатического давления. Важно отметить, что в статьях [8, 9] основное внимание уделяется характеристикам, механическим, прочностным а также приводятся интегральные акустические и вибрационные параметры. При этом не упоминается наличие искажений интерференционного сигнала, за счет модуляции лазера, в части фазовой демодуляции отмечается формирование несущей частоты, обработку использование PGC, гомодинным или синтетическим гетеродинным методом, также, в связи с тем, что статьи

ориентированы на механические аспекты построения ЧЭ, не приводятся количественные характеристики нелинейных искажений детектированного сигнала.

1.1. Пластинчатый преобразователь

преобразователи разработки Пластинчатые применяются для малогабаритных датчиков удельной низкочастотных ввиду высокой чувствительности, простоты конструкции и надежности. На Рис. 1.4 приведены различные варианты закреплений пластины, намотку оптического волокна целесообразно осуществлять в местах, где эффективная рабочая поверхность (поверхность максимальных смещений) будет наибольшей. Распределения смещений при этом не должны иметь перемены знака фазы по поверхности.



Рис. 1.4. Вид деформации круглой пластины при различных вариантах закрепления

Общая деформация рабочей поверхности определяется в соответствии с выражением:

$$U_{\Sigma} = 2\pi \int_{0}^{R} U(r) \cdot r \cdot dr \tag{1.1}$$

Можно видеть из выражения (1.1) – чем ближе к краю конструкции (для варианта 1) будет намотано оптическое волокно (OB), тем эффективнее и больше общая деформация датчика. Намотка оптического волокна, для изготовления ЧЭ ВОИД, возможна в виде плоской спирали, при этом

внутренний диаметр намотки ограничен изгибными вносимыми потерями используемого OB, а внешний диаметр намотки ограничен габаритными размерами ЧЭ.

Конструкция, представленная на Рис. 1.4, может быть использована как для разработки ЧЭ датчика давления или вибрации, так и для опорного датчика, нечувствительного к акустике и вибрации. В последнем случае OB наматывается с обеих торцевых сторон пластины, сигналы с которых в И последующем вычитаются. чем тоньше пластина, тем более равнозначные будут сигналы с разных торцов, тем менее чувствительно будет опорный ЧЭ. С другой стороны материал пластины должен быть жестче и ее габаритные размеры должны меньше, чтобы первая частота резонанса была значительно выше максимальной частоты рабочего диапазона. Рассмотрим реализацию ЧЭ ВОИД на основе пластинчатого преобразователя с закреплением пластины вдоль оси, что эквивалентно закреплению пластины с помощью болта к неподвижной горизонтальной основе, в соответствии с Рис. 1.4.



Рис. 1.5. Деформация ЧЭ при воздействии звукового давления (слева) и вибрации (справа)

Численное моделирование было выполнено с использованием программного продукта ANSYS. Модель: круглая стальная пластина диаметром 90 мм, закрепление с помощью болта к неподвижной горизонтальной основе. На Рис. 1.6–Рис. 1.9 представлены растровое

распределение деформаций в радиальном направлении под воздействием гармонического всестороннего давления или вибрации, цвет распределения определяет знак и интенсивность деформации в направлении выбранной оси.



Рис. 1.6. Распределение деформаций ЧЭ, закрепление за ось в центре, Звуковое давление всестороннее 1 Па, 100 Гц.



Рис. 1.7. Распределение деформаций ЧЭ, закрепление за ось в центре, Звуковое давление всестороннее 1 Па, 500 Гц.



Рис. 1.8. Распределение деформаций ЧЭ, закрепление за ось в центре, Вибрация 1 g, 100 Гц.



Рис. 1.9. Распределение деформаций ЧЭ, закрепление за ось в центре, Вибрация 1 g, 500 Гц.

Можно видеть из Рис. 1.6, Рис. 1.7, что в случае с всесторонним давлением происходит растяжение пластины (один знак деформации) в радиальном направлении, уровень деформаций составляет 10е-11 мм. Уровень деформации при воздействии всестороннего давления не существенный и равный по интенсивности и знаку у обеих поверхностей пластин. Известно соотношение [7], по которому 1 мкм деформации ОВ плеча интерферометра равен фазовому изменению в 4,9 радиан. Порядок чувствительности с одного активного элемента (волоконно-оптической плоской спирали 20 метров стандартного OB SMF-28) должен быть не более ~0,01 рад/Па. Следовательно, как датчик акустики данная конструкция не применима.

Как можно видеть из Рис. 1.8, Рис. 1.9, при вибрации обе торцевые поверхности пластины испытывают разноименные деформации: растяжение/сжатие верхней поверхности пластины и сжатие/растяжение нижней. Уровень деформаций при вибрации составляет 10е-8 мм.

Последовательное объединение активных элементов верхней и нижней поверхностей пластины приведет к вычитанию сигналов между активными элементами и разработке конструкции опорного ЧЭ, не чувствительного к акустике и вибрации.



Рис. 1.10. Оптическая схема разбалансированного нечувствительного датчика.

В случае последующего объединения *со знаком минус* сигналы с активных элементов обеих пластин будут складываться. Полученная конструкция в этом случае будет удовлетворять требованиям датчика вибрации.



Рис. 1.11. Оптическая схема дифференциального датчика вибрации.

1.2. Преобразователь – биморф

Простейший биморфный элемент представляет собой две пластины, свободно опирающиеся по периметру. При механическом воздействии на поверхности пластин, например, давлением акустического поля, возникают колебания изгиба. Поперечные колебания изгиба позволяют получить малогабаритную колебательную систему и преобразователь в целом. Если в одной из пластин создать напряжения сжатия, укорачивающие ее длину, а одновременно в другой – напряжения растяжения, растягивающие ее, то возникнут изгибающие моменты относительно срединной плоскости пластин.

На практике в пластинчатых преобразователях стремятся создать условия биморфных близкие закрепления элементов, К свободному опиранию краев, так как в этом случае можно достичь наибольшей эффективности преобразователя. С этой целью преобразователи выполняют симметричными (Рис. 1.12) из двух, объединенных в одной конструкции, биморфных элементов 1, которые располагаются соосно и параллельно друг другу на несущей их опоре 2 с небольшим воздушным промежутком 3 между ними, выполняющим роль экрана. Осесимметричные колебания биморфных элементов при их движении в противоположных направлениях происходят относительно плоскости симметрии; форма колебаний показана штрихами.



Рис. 1.12. Схематичное изображение преобразователя – биморфа

Акустическое давление действует на наружные поверхности обоих биморфных элементов и вызванные им механические напряжения преобразуются в информационный сигнал на выходе, пропорциональный значению давления на входе [13].

В статьях, посвященных разработке акустических push-pull ВОИД [8, 9], часто рассматривается оптическая схема, приведенная на Рис. 1.13.



Рис. 1.13. Оптическая схема акустического push-pull ВОИД с подавлением вибрации

ВОИД представляет собой интерферометр Майкельсона, в каждом из плеч которого объединяются две внешние и две внутренние спирали ОВ. Принцип деформации ЧЭ приведен на Рис. 1.14.



Рис. 1.14. Деформация ЧЭ при воздействии звукового давления и вибрации

Численное моделирование было выполнено с использованием программного продукта ANSYS. Модель: две круглые стальные пластины диаметром 90 мм, скрепленные кольцом по внешнему радиусу, между пластинами – воздух. На внешние и внутренние торцевые поверхности пластин размещаются активные элементы – спирали OB.



Рис. 1.15. Распределение деформаций ЧЭ-биморфа, Звуковое давление всестороннее 1 Па, 100 Гц.



Рис. 1.16. Распределение деформаций ЧЭ-биморфа, Звуковое давление всестороннее 1 Па, 500 Гц.

Можно видеть из Рис. 1.15, Рис. 1.16, что в случае воздействия всестороннего давления (что соответствует работе датчика-биморфа на низких частотах, когда длина волны значительно больше датчика) внешние поверхности датчика-биморфа совершают одноименные деформации (с одним знаком), внутренние также одноименные, но с другим. Деформации симметричны относительно плоскости середины высоты. При всестороннем давлении на датчик-биморф, содержащий две пластины с воздушным пространством между ними, объединение сигналов с активных элементов двух внешних или двух внутренних поверхностей приводит к их сложению. Объединение сигналов V активных элементов на поверхностях С

разноименными деформациями приводит к вычитанию сигналов (например, объединение активных элементов внешней и внутренней поверхностей).

Примем условно, что активный элемент каждой поверхности имеет амплитуду сигнала, равную единице, тогда результат последовательного объединения спиралей (сварки OB) с учетом знака деформации будет следующий:

Табл. 1.2. Знак деформации ЧЭ-биморфа при звуковом давлении

Комбинация спиралей ОВ	Знак деформации		Δφ, deg
внешняя 1 + внешняя 2	1+1	2	0
внешняя 2 + внутренняя 1	1-1	0	180
внешняя 1+ внутренняя 1	1-1	0	180
внешняя 2+ внутренняя 2	1-1	0	180
внешняя 1+ внутренняя 2	1-1	0	180
внутренняя 1+ внутренняя 2	-1-1	-2	0



Рис. 1.17. Распределение деформаций ЧЭ-биморфа, вибрация 1 g, 100 Гц, крепление за внешнюю цилиндрическую часть кольца между пластинами.



Рис. 1.18. Распределение деформаций ЧЭ-биморфа, вибрация 1 g, 500 Гц, крепление за внешнюю цилиндрическую часть кольца между пластинами.

Как можно видеть из Рис. 1.18, при воздействии ускорения деформации ассиметричны относительно середины высоты преобразователя – биморфа. Соответственно, на двух внешних поверхностях (двух внутренних) имеются разноименные деформации, объединение сигналов спиралей ОВ (с помощью сварки) будет приводить к вычитанию сигналов с активных элементов, расположенных на них. При этом деформации поверхностей одной пластины по-прежнему будут иметь разноименные деформации, следовательно, вычитаться при объединении (сварке OB). Стоит отметить, что по амплитуде внешние поверхности между собой (или внутренние) равны, но внешние и внутренние между собой не равны по амплитуде. Разность амплитуд определяется толщиной пластины и шириной опорного кольца. Для различных вариантов объединения сигналов с активных элементов датчика биморфа при воздействии продольного ускорения будут следующие результаты:

Комбинация	Знак деформации		$\Delta \varphi$, deg
Внешняя 1 + Внешняя 2	1-1	0	180
Внешняя 2 + Внутренняя 1	-1-1	-2	0
Внешняя 1+ Внутренняя 1	1-1	0	180
Внешняя 2+ Внутренняя 2	-1+1	0	180
Внешняя 1+ Внутренняя 2	1+1	2	0
Внутренняя 1+ Внутренняя 2	-1+1	0	180

Табл. 1.3. Знак деформации ЧЭ-биморфа при вибрации

Таким образом, на основе преобразователя-биморфа, можно реализовать датчики различных физических величин. Ниже представлена схема соединения спиралей оптического волокна для рассматриваемого чувствительного элемента биморф, для реализации датчика звукового давления с подавлением вибрации.



Рис. 1.19. ЧЭ датчика звукового давления с подавлением вибрационной составляющей, схема соединения спиралей оптического волокна.
 Слева – воздействие звукового давления, справа – воздействие вибрации.

Можно видеть, что последовательно объединяя внешние и внутренние спирали OB, например, с помощью сварки OB, можно реализовать датчик звукового давления с подавлением вибрационной составляющей. При соответствующем размещении спиралей OB в ВОИД представленном на , вышеуказанный ЧЭ будет иметь удвоенную чувствительность.

При альтернативном включении спиралей OB, можно реализовать датчик вибрации с подавлением акустической составляющей.



Рис. 1.20. ЧЭ датчика вибрации с подавлением акустической составляющей, схема соединения спиралей оптического волокна.

Слева – воздействие звукового давления, справа – воздействие вибрации.

Оптическая схема ЧЭ датчика вибрации с подавлением акустической составляющей представлена на Рис. 1.21.



Рис. 1.21. Оптическая схема ЧЭ датчика вибрации с подавлением акустической составляющей

Следует отметить, что реализация соответствующих датчиков звукового давления и вибрации возможна также при использовании двух спиралей оптического волокна, для дифференциального включения при этом не будет выигрыша с точки зрения удвоения чувствительности. На Рис. 1.22, Рис. 1.23 представлены оптические схемы ЧЭ датчика звукового давления и вибрации для дифференциального и разбалансированного включений.



Рис. 1.22. Оптическая схема ЧЭ датчика звукового давления с подавлением вибрационной составляющей. Дифференциальная схема (слева), разбалансированная схема (справа)



Рис. 1.23. Оптическая схема ЧЭ датчика вибрации с подавлением акустической составляющей. Дифференциальная схема (слева), разбалансированная схема (справа)

Можно видеть, что вышеперечисленные схемы Рис. 1.13, Рис. 1.21– Рис. 1.23, предполагают использование спиралей ОВ двух дисков преобразователя биморфа. При этом реализация двух разных ЧЭ (датчика звукового давления и датчика вибрации) в составе одного преобразователя биморфа, неосуществима. Таким образом, реализация ЧЭ на основе дифференциальной схемы с удвоенной чувствительностью, целесообразна как для построения датчика звукового давления, так и для построения датчика вибрации.

1.3. Метод определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов в дифференциальном ВОИД

В работах, посвященных разработке push-pull ВОИД их основным интегральным параметром является акустическая или вибрационная чувствительность [8], в настоящей главе был предложен новый метод, основанный на одновременном и параллельном тестировании всех четырех спиралей ОВ в ВОИД.

Сигналы от разных спиралей ОВ могут иметь фазовый сдвиг, который не соответствует ожидаемым или расчетным значениям, из-за сложной динамики и нетривиальной инерционности процесса формирования деформаций волокон в спиралях с учетом особенностей технологического

изготовления датчика и неидентичности деформации спиралей (например, из-за разной толщины клея, используемого для соединения спиралей ОВ с дисками и другими технологическими гибкими факторами). Также вышеуказанный фазовый сдвиг между спиралями может быть частотнозависимым. Включение четырех спиралей по схеме, приведенной на Рис. 1.13, обеспечить должно правильную регистрацию целевого акустического помощью сигнала С волоконно-оптического интерферометрического датчика. При изготовлении датчика может быть полезно измерить все 4 спирали OB, чтобы гарантировать идентичность спиралей OB, включенных ВОИД. Было сигналов В проведено экспериментальное исследование, в то время как каждая из спиралей ОВ была протестирована в качестве независимого датчика давления и вибрации при воздействии соответствующих воздействий.

Для определения разности фаз целевых сигналов ЧЭ ВОИД был разработан стенд, представляющий собой оптическую схему временного мультиплексирования (TDM) на основе интерферометров Майкельсона с разветвителей И зеркал Фарадея, спирали использованием 4 OB подключались при этом независимо, и с точки зрения системы регистрации собой 4 независимые канала. сигналов представляли Демодуляция интерференционных сигналов проводилась на основе цифровых алгоритмов [8, 9].

Расчёт разности фаз между каналами проводился в режиме реального времени, следующим образом: над временными выборками сигналов A и B, регистрируемых в каналах 1 и 2 соответственно, производится быстрое преобразование Фурье, определяются спектры сигналов – S_A и S_B . Далее задаётся частота f_0 , на которой выполняется расчёт искомой фазовой задержки. Номер спектрального отсчёта i_0 в S_A и S_B , соответствующий данной частоте, определяется по формуле:

$$i_0 = floor\left(\frac{f_0}{f_d}M\right) \tag{1.2}$$

где f_d – частота дискретизации сигналов A и B; M – длина исследуемых временных выборок. Для оценки фазы сигналов в их спектрах S_A и S_B выбирается спектральный отсчёт, соответствующий частоте f_0 , и оценивается его аргумент, после чего определяется разность фаз $\Delta \phi$ по формуле:

$$\Delta \varphi = atan2 \left(\frac{Im(S_B(i_0))}{Re(S_B(i_0))} \right) - atan2 \left(\frac{Im(S_A(i_0))}{Re(S_A(i_0))} \right)$$
(1.3)

Разность фаз исследуемых сигналов должна находиться в интервале от $-\pi$ до π , однако выражение (1.3) может выдавать значения в большем диапазоне углов. По этой причине следует привести значение $\Delta \phi$ к данному диапазону. Это осуществляется с помощью выражения:

$$\Delta \varphi_f = atan^2 \left(\frac{\sin \Delta \varphi}{\cos \Delta \varphi} \right) \tag{1.4}$$

Для корректного отслеживания динамики изменения фазовой задержки выполняется операция раскрутки фазы, в соответствии с выражением (1.5), поскольку реальная фазовая задержка, изменяющаяся со временем, может выходить за границы диапазона от – π до π .

$$\psi(n) = \psi(n-1) + W[\varphi(n) - \varphi(n-1)]$$
(1.5)

где *W*(*x*) – функция «сворачивания» или приведения фазового аргумента к интервалу шириной 2*π*

$$\begin{cases} W(x) = x, & \text{при} -\pi \le x \le \pi; \\ W(x) = x + 2\pi, & \text{при} \ x < -\pi; \\ W(x) = x - 2\pi, & \text{при} \ x > \pi. \end{cases}$$
(1.6)

Полученные в результате значения усредняются на требуемом временном интервале.

Глава 2. Результаты и их обсуждение

2.1. Экспериментальное определение разности фаз ЧЭ

Экспериментальное определение разности фаз целевых сигналов ЧЭ выполнялось в 3 этапа:

1) На первом этапе преобразователь-биморф, содержащий 4 спирали OB, подключался в 4-х канальную схему временного мультиплексирования, определялась разность фаз целевых сигналов ЧЭ для всех 4 спиралей OB при воздействии звукового давления (измерение в акустической камере) и при воздействии вибрации (измерение на вибростенде) для различных частот. Ниже представлена оптическая схема подключения и результаты измерений.



Рис. 2.1. Оптическая схема измерения разности фаз в четырех независимых спиралях.

	Δφ, deg					
Fsig, Гц	внеш ₂ —	внут2 —	внут ₁ —	внут ₂ —	внут ₁ —	внут ₁ —
	внеш1	внеш1	внеш1	внеш2	внеш2	внут2
50	2.8	171.0	174.0	168.2	171.2	3.0
80	0.0	189.8	187.4	189.8	187.4	-2.4
90	-2.9	185.0	185.4	187.9	188.3	0.4
100	-10.0	171.0	177.0	181.0	187.0	6.0
110	11.2	195.6	181.8	184.4	170.6	-13.8
125	-3.4	176.0	164.0	179.4	167.4	-12.0
Теоретич.	0	180.0	180.0	180.0	180.0	0

Табл. 2.1. Результаты измерений в акустической камере

	$\Delta \varphi, deg$					
Feig Tu	внеш ₂ —	внут ₂ —	внут ₁ —	внут ₂ —	внут ₁ —	внут ₁ —
1 ыд, 1 ц	внеш1	внеш1	внеш1	внеш2	внеш2	внут2
50	276.4	78.3	239.2	161.9	-37.2	160.9
80	191.5	20.5	191.8	189.0	0.3	171.3
90	192.8	12.1	187.5	179.3	-5.3	175.4
100	196.8	5.5	185.5	168.7	-11.3	180.0
110	188.2	3.8	181.8	175.6	-6.4	178.0
125	178.8	5.4	176.7	186.6	-2.1	171.3
300	177.2	-2.8	176.4	180.0	-0.8	179.2
500	183.8	7.7	175.8	183.9	-8.0	168.1
1000	180.9	1.0	175.0	180.1	-5.9	174.0
2000	176.5	-0.6	171.9	182.9	-4.6	172.5
Теоретич.	180.0	0	180.0	180.0	0	180.0

Табл. 2.2. Результаты измерения на вибростенде

Можно видеть из Табл. 2.1,

Табл. 2.2, что результаты измерений близки к теоретическим значениям и соответствуют Табл. 1.2, Табл. 1.3 соответственно. Диапазон частот для измерений в акустической камере обусловлен габаритными размерами камеры, для создания в ней равномерного поля звукового давления (в соответствии с Приложением 2 РД5Р.8361-86).

2) На втором этапе спирали ОВ преобразователя-биморфа были объединены попарно: *внешняя-1 и внешняя-2, внутренняя-1 и внутренняя-2*, в соответствии со схемой Рис. 2.2, имитируя тем самым 2 независимых канала дифференциального ВОИД звукового давления с подавлением вибрации, Рис. 1.13, Рис. 1.19. Результаты измерений представлены в Табл. 2.3.



Рис. 2.2. Оптическая схема измерения разности фаз сигналов ЧЭ в двух независимых каналах дифференциального ВОИД звукового давления

Можно видеть из Рис. 2.2, что оптическая схема представляет собой схему временного мультиплексирования для 2 независимых каналов, при этом длина ОВ в компенсационном интерферометре была увеличена в 2 раза, по сравнению со схемой, представленной на Рис. 2.1.

Fsig, Гц	<i>∆</i> φ, ° (внут ₁ + внут ₂) – (внеш ₁ + внеш ₂)
50	178.0
80	183.0
90	183.0
100	184.0
110	176.0
125	178.0
Теоретическое	180.0

Табл. 2.3. Результаты измерений в акустической камере

Можно видеть из Табл. 2.3, что результаты измерений близки к теоретическим значениям Табл. 1.2, Табл. 1.3, разность фаз сигналов ЧЭ, находящихся в двух плечах дифференциального ВОИД звукового давления Рис. 1.13, близка к 180 градусам, таким образом при объединении вышеуказанных ЧЭ по схеме, приведенной на Рис. 1.19 будет реализован ВОИД звукового давления с подавлением вибрационной составляющей.

3) На третьем этапе спирали ОВ преобразователя-биморфа были объединены попарно: *внешняя-1 и внутреняя-2, внешняя-2 и внутренняя-1*, в соответствии со схемой Рис. 2.3, имитируя тем самым 2 независимых канала дифференциального ВОИД вибрации Рис. 1.20, Рис. 1.21. Результаты измерений представлены в Табл. 2.4.



Рис. 2.3. Оптическая схема измерения разности фаз сигналов ЧЭ в двух независимых каналах дифференциального ВОИД вибрации

Fsig, Гц	$\Delta \varphi, \circ$
	(внут ₁ +внеш ₂) – (внеш ₁ +внут ₂)
50	180.1
80	181.0
90	176.6
100	181.3
110	178.3
125	179.9
300	175.7
500	179.5
1000	168.7
2000	171.2
Теоретическое	180.0

Табл. 2.4. Результаты измерения на вибростенде

Можно видеть из Табл. 2.4, что результаты измерений близки к теоретическим значениям Табл. 1.2, Табл. 1.3, разность фаз сигналов ЧЭ, находящихся в двух плечах дифференциального ВОИД вибрации Рис. 1.21, близка к 180 градусам, таким образом при объединении вышеуказанных ЧЭ

по схеме, приведенной на Рис. 1.20 будет реализован ВОИД вибрации с подавлением акустической составляющей.

Полученные результаты для рассматриваемого варианта конструкции push-pull датчика (с четырьмя волоконно-оптическими спиралями) и метода параллельного тестирования работы волоконно-оптических спиралей подтверждают правильность расчетов и позволяют создавать эффективные конструкции чувствительных элементов для волоконно-оптических интерферометрических датчиков.

2.2. Исследование лазерного источника

При вспомогательной модуляции тока, подаваемого на лазерный диод, предполагается обнаружить два эффекта: модуляцию частоты излучения и модуляцию интенсивности излучения. В линейном приближении данные эффекты можно охарактеризовать с помощью коэффициентов: $K_v = dv/di$ [Гц/А] – отношение изменения частоты лазера к изменению тока; $K_p = dP/di$ [Вт/А] – отношение изменения мощности излучения к изменению тока.

Пусть i_0 – значение тока, соответствующее центру диапазона изменения тока при модуляции; v_0 – частота лазера, соответствующая рабочему току i_0 ; P_0 – мощность излучения, соответствующая рабочему току i_0 . Тогда регистрируемый интерференционный сигнал можно записать в виде

$$u(t) = U_0(t) + U_m(t) \cos\left[\varphi + 2\pi \frac{\Delta Ln}{c} (\upsilon_0 + \Delta \upsilon(t))\right]$$
(2.1)

где U_0 и U_m – постоянная составляющая и амплитуда интерференционного сигнала; t – время; ΔL – геометрическая разность длин плеч интерферометра; n – показатель преломления; c – скорость света в вакууме; $\Delta v(t)$ – изменение частоты лазера со временем; $\Delta i(t)$ – изменение тока со временем; ϕ – целевой сигнал; θ_0 – постоянный фазовый сдвиг, вызванный частотой v_0 .

Сигнал в соответствии с выражением (2.1) имеет два типа модуляции (фазовую и амплитудную), при этом обе модуляции порождены одним воздействием. Сигнал (2.1) можно представить в другом виде, заменив $\Delta i(t)$ на сигнал вспомогательной фазовой модуляции $\psi(t)$:

$$\psi(t) = 2\pi \frac{\Delta L \cdot n}{c} K_{\nu} \cdot \Delta i(t)$$
(2.2)

$$K_{P_{\nu}} = \frac{c \cdot K_{P}}{2\pi \cdot P_{0} \cdot \Delta \cdot L \cdot n \cdot K_{\nu}}$$
(2.3)

$$u(t) = (1 + K_{P_{\nu}}\psi(t)) \cdot \{U_0 + U_m \cdot \cos[\varphi + \theta_0 + \psi(t)]\}$$
(2.4)

Пусть модулирующий сигнал $\psi(t)$ является симметричным относительно середины периода модуляции. Примером такого сигнала могут служить треугольник и синус. В таком случае, согласно (2.4), можно ожидать, что регистрируемый интерференционный сигнал также будет симметричен относительно середины периода модуляции.

На Рис. 2.4 представлен пример зарегистрированного интерференционного сигнала, полученного при модуляции тока лазера; оранжевая кривая – огибающая сигнала, вызванная наличием модуляции оптической мощности излучения лазера.



Рис. 2.4. Участок зарегистрированного интерференционного сигнала и его огибающая. ЛД Thorlabs SFL1550P, драйвер лазера Thorlabs ITC5022, мощность излучения на ФПУ 700 мкВт, разбаланс интерферометра 20 см.

Можно видеть из Рис. 2.4, что интерференционный сигнал не симметричен, пики интерференционного сигнала справа расположены ниже пиков слева. Максимуму сигнала вспомогательной фазовой модуляции $\psi(t)$ должен соответствовать минимум интерференционного сигнала вблизи отсчёта с номером 80000. При этом максимум огибающей находится левее этой точки. Таким образом, изменение оптической мощности излучения лазера происходит раньше, чем изменение его частоты. Расчетное значение задержки фазовой модуляции относительно амплитудной для данного интерференционного сигнала составляет 4.7135 мкс.

Регистрируемый сигнал с ФПУ может иметь дополнительное постоянное смещение, не связанное режимом работы лазера. Таким образом, выражение (2.4) для интерференционного сигнала следует уточнить следующим образом:

$$u(t) = (1 + K_{Pv}\psi(t+\tau)) \cdot \{U_0 + U_m \cdot \cos[\varphi + \theta_0 + \psi(t)]\} + U_{PD}.$$

$$(2.5)$$

где т – временная задержка фазовой модуляции относительно амплитудной.

Заключение

В ходе настоящего исследования получены следующие основные оптические результаты: рассмотрены схемы волоконно-оптических интерферометрических датчиков и принципы их построения, рассмотрены создания чувствительного элемента с дифференциальной принципы чувствительностью плеч, методы мультиплексирования волоконнооптических интерферометрических датчиков. Рассмотрены пластинчатые типы преобразователей для реализации разбалансированных push-pull ВОИД. Представлены численного моделирования: результаты растровое распределение деформаций преобразователя под воздействием звукового давления И вибрации. Выполнено экспериментальное исследование определения разности фаз целевых сигналов чувствительных элементов (ЧЭ) push-pull акустических и вибрационных ВОИД. Выполнены измерения по определению акустической и вибрационной чувствительности push-pull ВОИД традиционной схемой временного В сравнении С мультиплексирования ВОИД для аналогичного типа преобразователя.

Список литературы

- Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists / E. Udd, B. William, Jr. Spillman. – 2nd Edition. – John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 506 p
- 2. Spillman W. B., Udd E. Field guide to fiber optic sensors. SPIE, 2014.
- 3. Zheng J. Optical frequency-modulated continuous-wave (FMCW) interferometry. Springer Science & Business Media, 2005. T. 107.
- 4. Shizhuo Y. Fiber Optic Sensors / Y. Shizhuo, P. B. Ruffin, T. S. Francis. 2nd Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. 494 p.
- 5. Rao J., Jackson D. A. Optical Fiber Sensor Technology, Fundamentals //Kluwer Academic Publishers, Boston. – 2000. – C. 175.
- 6. Окоси Т. И др. Волоконно-оптические датчики (под редакцией Т. Окоси) //Л.: Энергоатомиздат, 1990, 256 с. 1990.
- Лиокумович Л. Б. Волоконно-оптические интерферометрические измерения. Часть 2. Волоконный интерферометрический чувствительный элемент. – СПб.: Издво Политехн. ун-та, 2007. – 68 с
- 8. Garrett S. L. et al. General purpose fiber optic hydrophone made of castable epoxy //Fiber Optic and Laser Sensors VIII. International Society for Optics and Photonics, 1991. T. 1367. C. 13-29.
- 9. Brown D. A., Hofler T., Garrett S. L. High-sensitivity, fiber-optic, flexural disk hydrophone with reduced acceleration response //Fiber & Integrated Optics. 1989. T. 8. №. 3. C. 169-191.
- 10. Liokumovich L. B. et al. Method for Measuring Laser Frequency Noise //Journal of Applied Spectroscopy. – 2020. – T. 86. – №. 6. – C. 1106-1112.
- 11. Костромитин А. О., Кудряшов А. В., Лиокумович Л. Б. Измерение и анализ модуляции и шумов частоты излучения одночастотных полупроводниковых лазерных диодов //Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. №. 4. С. 622-627.
- 12. А. Г., Смирнов А.С. О расчете Голубев верхней границы интерференционных чувствительности волоконно-оптических гидрофонов приемной гидроакустической антенны //Научно-Санкт-Петербургского ведомости государственного технические политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – №. 6 (162).
- 13. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. 2-е издание, переработанное и дополненное //Л.: Судостроение. 1990.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной

работы (диссертации)

1. Liokumovich L., Medvedev A., Muravyov K., Skliarov P., Ushakov N. Signal detection algorithms for interferometric sensors with harmonic phase modulation: distortion analysis and suppression //Applied Optics. $-2017. - T. 56. - N_{\odot}. 28. - C. 7960-7968.$

2. Liokumovich L., Muravyov K., Skliarov P., Ushakov N. Signal detection algorithms for interferometric sensors with harmonic phase modulation: Miscalibration of modulation parameters //Applied optics. – 2018. – T. 57. – N_{2} . 25. – C. 7127-7134.

3. Kostromitin A., Liokumovich L., Muravyov K., Skliarov P. Methods for measuring the auxiliary modulation step in interferometric fiber optic sensor //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1326. – N_{2} . 1. – C. 012016.

4. Skliarov P. V., Kostromitin A. O., Muravyov K. V. Distortion Analysis of Interferometric Signal with Auxiliary Emission Modulation in Semiconductor Laser //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – C. 332-335.

5. Kostromitin A. O., Skliarov P. V., Liokumovich L. B., Ushakov N. A. Laser Frequency Noise Measurement by Forming an Interference Signal with Subcarrier Frequency //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – C. 336-338.

6. Skliarov P. V., Davidenko A. A., Ogryzko Y. A., Liokumovich L. B. Phase Difference Measurement of the Target Signals of Sensing Elements in the Push-Pull Fiber Optic Interferometric Acoustic and Vibration Sensors //2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech). – IEEE, 2019. – C. 328-331.

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК

7. Попов Е. Н., Баранцев К. А., Ушаков Н. А., Литвинов А. Н., Лиокумович Л. Б., Шевченко А. Н., Скляров Ф.В., Медведев А. В. Характер сигнала оптической схемы квантового датчика вращения на основе ядерного магнитного резонанса //Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 93-106.

Публикации в других изданиях

8. Скляров Ф. В., Батанов А. К., Батанов К. А., Бережной А. П., Бродский Б. М., Деветьяров Д. Р., Ерёменко С. А. Разработка и исследование волоконно-оптических датчиков давления // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014). – 2014. – С. 754-763.

9. Бережной А. П., Скляров Ф. В. Определение параметров тракта предварительной обработки сигналов волоконно-оптических интерферометрических гидроакустических антенн // Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014). – 2014. – С. 764-770.

10. Полозов В. В., Лиокумович Л. Б., Скляров Ф. В., Костромитин А. О. Модернизация программы системы опроса мультиплексированных интерферометрических волоконно-оптических чувствительных элементов для контроля амплитуды сигнала поднесущей частоты. В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2019. С. 126-129.

11. Полозов В.В., Лиокумович Л.Б., Скляров Ф.В., Костромитин А.О., Муравьев К.В. Обработка сигнала волоконно-оптических интерферометрических систем с мультиплексированными чувствительными элементами на основе алгоритмов демодуляции с произвольной амплитудой вспомогательной модуляции. В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2019. С. 68-70.

12. Скляров Ф. В., Костромитин А. О., Муравьев К. В., Лиокумович Л. Б. Измерение амплитуды вспомогательной модуляции интерференционного сигнала при модуляции тока лазера. В сборнике: Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 2019. С. 70-73.

13. Костромитин А. О., Скляров Ф. В., Мельканович В.С. Адаптивная компенсация вибропомехи в волоконно-оптическом гидрофоне // Материалы XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, 2020.

14. Костромитин А. О., Лиокумович Л. Б., Полозов В. В., Скляров Ф. В. Измерение длины оптического волокна интерферометрическим методом // Материалы XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, 2020.

Патенты и изобретения

15. Деветьяров Д.Р., Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б., Скляров Ф.В. Прием и демодуляция интерферометрического сигнала с использованием вспомогательной фазовой модуляции. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664097 от 12.11.2018.

16. Деветьяров Д.Р., Скляров Ф.В., Костромитин А.О., Лиокумович Л.Б. Оценка чувствительности волоконно-оптического акустического преобразователя интерферометрического датчика. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019613969 от 26.03.2019.

17. Полозов В.В., Муравьев К.В., Скляров Ф.В. Демодуляция интерференционного сигнала с использованием компенсации паразитной амплитудной модуляции. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020611269 от 29.01.2020

Аспирант _____Скляров Ф.В.