



Центральный аэрогидродинамический институт  
имени профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ)

---

В.П. Кулеш

# ГЕТЕРОДИННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ



МОСКВА НАУКА 2022

УДК 621.38  
ББК 32.86-5  
К90

Рецензенты:

кандидат технических наук *Ю.В. Маношкин*  
доктор технических наук *В.Е. Мошаров*

**Кулеш В.П.**

Гетеродинная лазерная интерферометрия / В.П. Кулеш ; Центральный аэрогидродинамический ин-т имени профессора Н.Е. Жуковского. – М. : Наука, 2022. 319 с. – ISBN 978-5-02-040892-0 (в пер.).

Представлено обоснование гетеродинной лазерной интерферометрии как самостоятельного научного направления оптико-физических методов исследований и измерений. Работа включает в себя теоретические основы оптического гетеродинирования, оценки принципиальных возможностей и ограничений гетеродинной интерферометрии, анализ принципов первичного преобразования измеряемой физической величины и принципов построения гетеродинных лазерных измерительных систем. Изложение сопровождается примерами практической реализации разработанных положений для решения конкретных задач в экспериментальной аэродинамике и смежных областях.

Монография может стать практическим руководством для специалистов по оптическим и лазерным измерениям, экспериментальным исследованиям в области механики, динамики жидкости и газов, аэродинамики и прочности летательных аппаратов, а также учебным пособием для аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-040892-0

© Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, 2022  
© Кулеш В.П., 2022  
© ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2022

УДК 621.38  
ББК 32.86-5  
К90

Рецензенты:

кандидат технических наук *Ю.В. Маношкин*  
доктор технических наук *В.Е. Мошаров*

**Кулеш В.П.**

Гетеродинная лазерная интерферометрия / В.П. Кулеш ; Центральный аэрогидродинамический ин-т имени профессора Н.Е. Жуковского. – М. : Наука, 2022. 319 с. – ISBN 978-5-02-040892-0 (в пер.).

Представлено обоснование гетеродинной лазерной интерферометрии как самостоятельного научного направления оптико-физических методов исследований и измерений. Работа включает в себя теоретические основы оптического гетеродинирования, оценки принципиальных возможностей и ограничений гетеродинной интерферометрии, анализ принципов первичного преобразования измеряемой физической величины и принципов построения гетеродинных лазерных измерительных систем. Изложение сопровождается примерами практической реализации разработанных положений для решения конкретных задач в экспериментальной аэродинамике и смежных областях.

Монография может стать практическим руководством для специалистов по оптическим и лазерным измерениям, экспериментальным исследованиям в области механики, динамики жидкости и газов, аэродинамики и прочности летательных аппаратов, а также учебным пособием для аспирантов и студентов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-040892-0

© Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, 2022  
© Кулеш В.П., 2022  
© ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2022

## Оглавление

Введение .....	3
Принятые обозначения и сокращения .....	8
<b>Глава 1</b>	
<b>Общие физические основы гетеродинной интерферометрии</b> .....	9
1.1. Основные понятия .....	9
1.1.1. Оптический сигнал .....	9
1.1.2. Элементы Фурье-оптики .....	11
1.1.3. Элементы матричной оптики .....	14
1.2. Определение принципа оптического гетеродинирования .....	16
1.3. Двухлучевая фотогетеродинная интерферометрия.....	17
1.3.1. Физическая модель.....	17
1.3.2. Оптический и электрический сигналы промежуточной частоты ..	20
1.3.3. Дробовый шум.....	23
1.3.4. Нелинейность фазовой зависимости.....	28
1.3.5. Уменьшение влияния НФЗ .....	30
1.4. Многолучевая фотогетеродинная интерферометрия.....	32
1.4.1. Физическая модель .....	32
1.4.2. Оптический сигнал промежуточной частоты в направлении прошедшего света.....	35
1.4.3. Оптический сигнал промежуточной частоты в направлении отраженного света .....	38
1.4.4. НФЗ при многолучевой гетеродинной интерферометрии .....	40
1.4.5. Двухлучевой режим работы .....	42
Выводы.....	43
<b>Глава 2</b>	
<b>Основные процессы гетеродинной лазерной интерферометрии</b> .....	44
2.1. Методы смещения частоты света.....	44
2.1.1. Методы внутреннего расщепления частоты излучения.....	45
2.1.2. Методы частотной модуляции, основанные на эффекте Доплера.	47
2.1.3. Расщепление частоты света во вращающихся анизотропных элементах.....	50
2.2. Электрооптическая частотная модуляция.....	51
2.2.1. Двойной поперечный электрооптический эффект Поккельса .....	51
2.2.2. Спектральный состав оптического сигнала на выходе ЭОЧМ .....	53
2.2.3. Основные режимы работы ЭОЧМ .....	54
2.2.4. Состав фотоэлектрического сигнала промежуточной частоты .....	58
2.2.5. НФЗ гетеродинного интерферометра с ЭОЧМ.....	61
2.3. Акустооптическая частотная модуляция .....	62
2.3.1. Частотная модуляция света на бегущей акустической волне .....	62
2.3.2. Задающий генератор для АОЧМ .....	67
2.3.3. Экспериментальные исследования нелинейности фазовой зависимости .....	69

2.4. Детектирование оптического сигнала промежуточной частоты.....	71
2.4.1. Фазочувствительное детектирование .....	71
2.4.2. Балансное детектирование .....	72
2.4.3. Пространственное согласование фотодетектора.....	73
2.4.4. Растровый метод согласования фотодетектора.....	75
2.5. Методы измерения фазы электрического сигнала .....	79
2.5.1. Основные принципы цифровой фазометрии.....	79
2.5.2. Методы квантования фазы.....	81
2.5.3. Корреляционный метод.....	83
2.5.4. Метод с преобразованием фазового сдвига во временной интервал .....	85
2.5.5. Фазометр с реверсивным счетом числа целых периодов.....	86
Выводы.....	90

### Глава 3

<b>Основные принципы первичного преобразования в гетеродинной интерферометрии.....</b>	<b>92</b>
3.1. Основы первичного преобразования .....	92
3.1.1. Основной принцип .....	92
3.1.2. Классификация оптических схем .....	93
3.1.3. Гомодинный и гетеродинный методы преобразования .....	95
3.1.4. Методы гетеродинного фотоприема полей оптического сигнала ..	96
3.2. Дифференциальная гетеродинная интерферометрия параметров движения.....	98
3.2.1. Физическая модель.....	98
3.2.2. Структура интерференционного поля в измерительном объеме... ..	100
3.2.3. Дифференциальный метод с растровым фотодетектированием ...	106
3.2.4. Дифференциальный метод с дифракционным фотодетектированием.....	108
3.3. Дифференциальная гомодинная интерферометрия с регистрацией изображения .....	110
3.3.1. Основы гомодинного метода с регистрацией изображения.....	111
3.3.2. Определение полей статических деформаций .....	113
3.3.3. Определение статических деформаций вращающихся объектов... ..	115
3.3.4. Дифференциальный метод изучения форм колебаний.....	117
3.3.5. Визуализация форм колебаний крупногабаритных объектов.....	123
3.3.6. Исследование геометрических характеристик поверхностных волн жидкости .....	125
Выводы.....	128

### Глава 4

<b>Метод лазерного доплеровского измерения скорости .....</b>	<b>129</b>
4.1. Теоретический анализ структуры измерительного объема.....	129
4.1.1. Физическая модель .....	129
4.1.2. Нормальная нерегулярность интерференционного поля .....	132
4.1.3. Влияние несовершенств оптической системы .....	136
4.2. Экспериментальное исследование структуры измерительного объема....	139
4.2.1. Методы измерения распределения пространственной частоты ....	139

4.2.2. Метод регуляризации интерференционного поля.....	141
4.3. Выбор оптимального размера измерительного объема .....	143
4.4. Влияние флуктуаций направления скорости на результат измерения...	148
4.5. Применение метода ЛДИС в дозвуковой аэродинамической трубе.....	152
Выводы.....	160
<b>Глава 5</b>	
<b>Гетеродинный интерференционный метод измерения давления газа.....</b>	<b>161</b>
5.1. Физические основы интерференционного метода измерения давления..	162
5.1.1. Определение функциональной зависимости.....	162
5.1.2. Оценка нелинейности функциональной зависимости .....	165
5.1.3. Рабочая характеристика ИИД для воздуха.....	168
5.1.4. Влияние влажности воздуха .....	169
5.2. Динамические характеристики ИИД.....	172
5.2.1. Переходная функция .....	172
5.2.2. Явление «газовой линзы» .....	178
5.3. Принципы построения гетеродинных ИИД.....	184
5.3.1. Общая схема.....	184
5.3.2. Одноканальный ИИД .....	186
5.3.3. Двухканальный ИИД.....	187
5.3.4. Многоканальный ИИД .....	189
5.3.5. Кодовый принцип.....	191
5.3.6. Уменьшение НФЗ гетеродинного ИИД .....	194
5.4. Принципы измерения и контроля уровня поверхности океана .....	196
5.4.1. Измерение глубины погружения .....	196
5.4.2. Контроль колебаний уровня.....	198
5.4.3. Аппаратная компенсация температурной зависимости.....	199
Выводы.....	204
<b>Глава 6</b>	
<b>Изучение полей физических величин.....</b>	<b>205</b>
6.1. Анализ изображений с квазипериодической структурой .....	206
6.1.1. Изображения с квазипериодической структурой.....	206
6.1.2. Физическая модель .....	206
6.1.3. Принципы построения гетеродинного анализатора интерферограмм.....	211
6.1.4. Примеры использования анализатора интерферограмм.....	214
6.1.5. Метод расшифровки голограмм прозрачных объектов .....	216
6.2. Интерферометрическая система «Скиф» с узким опорным пучком .....	217
6.2.1. Принципы работы .....	217
6.2.2. Конструкция интерферометра «Скиф» .....	222
6.2.3. Алгоритмы функционирования интерферометра «Скиф».....	226
6.3. Интерферометрическая система «Трискан» .....	229
6.3.1. Принципы работы .....	229
6.3.2. Принципы построения оптической системы .....	230
6.3.3. Особенности конструкции и функционирования .....	234
Выводы.....	238

## Глава 7

<b>Принципы построения лазерных измерителей параметров движения</b> .....	239
7.1. Измерение линейных перемещений и вибраций .....	239
7.1.1. Гомодинный метод .....	239
7.1.2. Гетеродинный метод .....	243
7.2. Определение угловых перемещений .....	246
7.3. Исследование характеристик упругости материалов .....	248
7.4. Исследование несовершенств упругости чувствительных элементов .....	253
7.4.1. Принципы построения измерительной системы .....	254
7.4.2. Результаты исследований .....	258
7.5. Динамометр с лазерным гетеродинным преобразователем .....	261
7.6. Определение параметров движений тела в пространстве .....	262
7.7. Исследование динамических процессов .....	264
7.8. Метод измерения коэффициента линейного теплового расширения .....	267
Выводы .....	270

## Глава 8

<b>Гетеродинный лазерный гравиметр</b> .....	271
8.1. Принцип действия .....	271
8.2. Оценка принципиальной возможности .....	272
8.3. Конструкция полнодиапазонного гравиметра .....	274
8.3.1. Упругий элемент .....	276
8.3.2. Лазерный измеритель перемещений .....	276
8.3.3. Фазометр с реверсивным счетом числа целых периодов .....	277
8.3.4. Термостат .....	278
8.3.5. Система циклического нагружения .....	280
8.3.6. Программа работы гравиметра .....	283
8.4. Исследования работы полнодиапазонного гравиметра .....	285
8.4.1. Полнодиапазонный гравиметр в режиме мониторинга .....	288
8.5. Узкодиапазонный лазерный гравиметр .....	290
8.5.1. Структура узкодиапазонного гравиметра .....	293
8.5.2. Работа гравиметра .....	294
8.5.3. Программное обеспечение гравиметра .....	296
8.5.4. Результаты контрольных испытаний .....	300
8.5.5. Геофизическая станция грависейсмометрического мониторинга .....	303
Выводы .....	306
<b>Заключение</b> .....	307
<b>Литература</b> .....	309