

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

**МЕТОДЫ АВТОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ РАССТОЯНИЯ С
ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ТОКОВОЙ
МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ
НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ
ПОДГОТОВЛЕННОЙ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
(ДИССЕРТАЦИИ)**

аспиранта 4 года обучения

направления подготовки 11.06.01 Электроника, радиотехника и системы
связи

Факультета нано- и биомедицинских технологий

Костюченко Ирины Сергеевны

Научный руководитель:

профессор, доктор физ.-мат.наук:

А.В. Скрипаль 18.06.19 Скрипаль А.В.
подпись, дата

Саратов, 2018

Актуальность темы

Современные измерительные системы на основе лазеров зачастую используют принципы обработки сигналов, выработанные в радиофизике и лазерной физике. Самыми актуальными в настоящее время являются автодинные системы.

Полупроводниковые лазеры, работающие в режиме автодинного детектирования, широко используются для измерения таких параметров, как расстояние, скорость, перемещение, ускорение и вибрации объектов. Разрешающая способность данных измерений ограничивается длиной волны лазерного излучения. Чтобы устранить эту проблему и повысить разрешающую способность этих характеристик используются методы лазерной интерферометрии. Сочетание автодинного режима работы лазера с лазерной интерферометрией позволяет повысить чувствительность методов интерферометрии к изменению измеряемых параметров.

Достигнуты успехи в направлении измерения абсолютных расстояний по спектру автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции лазерного излучения. Однако автодинная интерферометрия при пилообразной токовой модуляции имеет существенные ограничения в разрешающей способности при измерении малых расстояний, чего не наблюдается в методах при гармонической токовой модуляции.

Актуальной задачей является увеличение точности измерения расстояния, в особенности при малых дистанциях до объекта. В данной работе анализировалось два актуальных, в настоящий момент, метода измерения с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции, сравнивались характеристики и удобства их использования.

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ методов измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при этих различных типах токовой модуляции длины волны излучения.

В качестве задач, которые необходимо решить, в диссертационной работе сформулированы следующие:

1. Компьютерное моделирование интерференционных методов с гармонической и пилообразной модуляцией длины волны лазерного излучения.

2. Анализ факторов, влияющих на точность методов токовой модуляции длины волны излучения, с помощью компьютерного моделирования.

3. Исследование точности измерений методов с гармонической и пилообразной модуляцией длины волны лазерного излучения по спектрам сигнала лазерного автодина.

4. Сравнительный анализ методов измерения расстояния до объекта при существующих возможностях модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера.

5. Экспериментальное подтверждение расчётных данных, полученных при компьютерном моделировании методов с пилообразной и гармонической модуляцией длины волны излучения.

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

1. Проведено исследование достоинств метода пилообразной модуляции и достоинств метода гармонической модуляции. Определены условия, при которых первый или второй метод будет иметь наивысшую точность.

2. Показано, что в методе треугольной модуляции расчет расстояния до объекта проводится по значению частоты спектральной составляющей с максимальной амплитудой. В то время как расчет расстояния в методе гармонической модуляции длины волны лазерного излучения проводится по значениям амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала.

3. В работе обоснованы перспективы использования метода измерения расстояния до отражателя при гармонической токовой модуляции длины волны лазерного автодина.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается строгостью используемых математических моделей, соответствием результатов численного и натурального экспериментов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением стандартной измерительной аппаратуры, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также их соответствием результатам, полученным при компьютерном моделировании автодинного сигнала и при экспериментах.

Апробация работы.

Работа выполнена на кафедре физики твердого тела и кафедре медицинской физики Саратовского государственного университета в 2014-2018 годы. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

- Программа «УМНИК» (г. Саратов, 2014, 2015);
- Молодежный форум «iВолга» (г. Самара, 2015);
- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (г. Саратов, 2016, 2017, 2018);
- XI Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2016);
- IV Всероссийский научный семинар памяти профессора Ю.П. Волкова «Современные проблемы биофизики, генетики, электроники и приборостроения» (г. Саратов, 2016);
- На семинарах кафедры медицинской физики, кафедры физики твердого тела.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Точность измерений при пилообразной модуляции лазерного автодина может быть увеличена за счет подстройки величины девиации длины волны излучения лазерного диода или путем регулировки расстояния

до отражателя, используемых в настоящее время в прецизионных сканирующих микроскопах и профилометрах.

2. Показано, что в методе треугольной модуляции расчет расстояния до объекта для повышения точности измерений необходимо проводится по значению частоты спектральной составляющей с максимальной амплитудой. В то время в методе гармонической модуляции длины волны лазерного излучения необходимо проводить по значениям амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала.

3. В работе обоснованы перспективы использования метода измерения расстояния до отражателя при гармонической токовой модуляции длины волны лазерного автодина.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при выполнении НИР в рамках государственного задания ВУЗам на выполнение НИР «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами», 2014-2018 годы).

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, использованы в учебном процессе для подготовки студентов факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры «Физика», «Электроника и наноэлектроника».

Личное участие автора в этой работе выразилось в теоретической разработке и практической реализации сравнительного анализа методов измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при модуляциях длины волны лазерного излучения, теоретической разработке и практической реализации метода регулировки точности метода с пилообразной модуляцией.

Структура и объем работы.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе описан критический анализ методов измерений, основанных на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах, приведены результаты анализа исследований эффекта автодинного детектирования, рассмотрены лазерные автодинные методы, предназначенные для нахождения характеристик расстояния, перемещений, вибраций и т.п. Успехи лазерной интерферометрии, достигнутые в последнее время, сдерживаются необходимостью калибровки автодинного сигнала и его спектра путем наложения механических возбуждений на объект исследования. Так же изложено, что, актуальным является определение амплитуды нановибраций без вышеупомянутого наложения вибраций на исследуемый объект.

Во втором разделе сформировано описание метода измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера с пилообразной токовой модуляцией длины волны излучения. Были промоделированы автодинные сигналы при данном методе, построены спектры этих сигналов. На рис. 1. приведен смоделированный автодинный сигнал при инжекционном токе 50мкА и при изменении длины волны излучения лазера $\Delta\lambda=0,046$ нм, расстояние до объекта равно 40 см и уровень обратной связи $C \ll 1$.

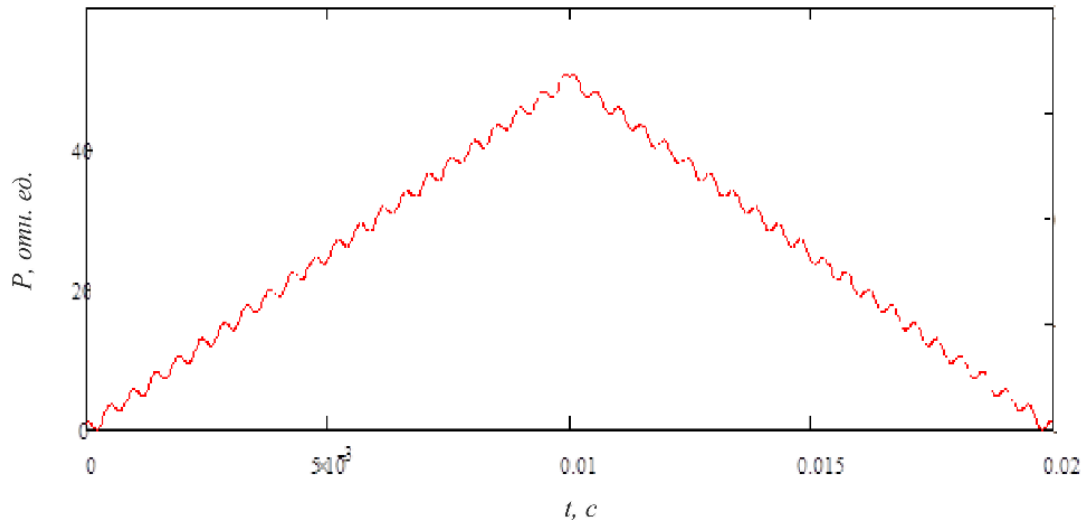


Рис.1. Смоделированный автодинный сигнал при инжекционном токе 50мкА и при изменении длины волны излучения лазера $\Delta\lambda=0,046$ нм, при заданном расстоянии 40 см.

На рис 2 приведен спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.1. В спектре отчетливо выделяется частота автодинного сигнала с наибольшей амплитудой, соответствующая частоте f_{up} .

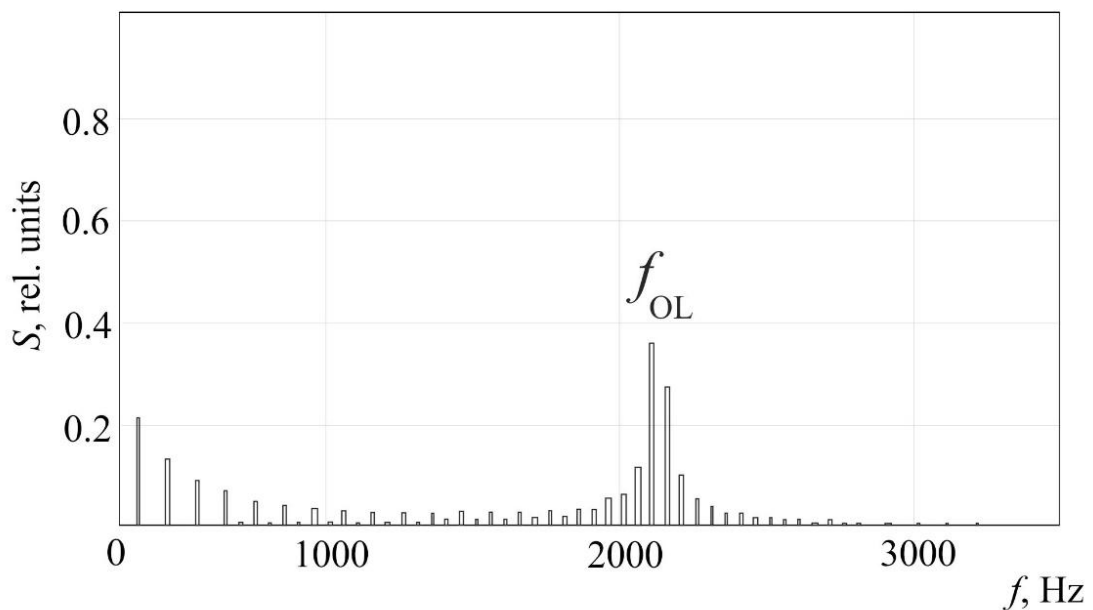


Рис.2 Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.1.

Получены расчетные данные смоделированного сигнала при расстояниях от 10 до 60 см. Результаты компьютерного моделирования для различных расстояний, а также погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала показана в таблице 1.

Таблица 1.

Заданное расстояние до объекта, м	Рассчитанное расстояние до объекта, м	Погрешность, %
0,1	0,093	7,1
0,2	0,190	5,1
0,3	0,294	1,8
0,4	0,406	1,5
0,5	0,494	1,1
0,6	0,605	0,9

Проанализировано влияние девиации длины волны и регулировки расстояния на мкм для уменьшения погрешности метода с пилообразной модуляцией. Благодаря регулировке вышеупомянутых факторов улучшена погрешность ~в 10 раз. Результаты компьютерного моделирования при регулировках расстояния до отражателя и девиации длины волны показаны в таблице 2. Стоит отметить, что тенденция к увеличению точности при увеличении расстояния сохраняется после описанных регулировок.

Таблица 2.

Заданное расстояние до объекта, м	Погрешность (при регулировке $\Delta\lambda$) %	Погрешность (при регулировке L), мкм
0,1	0.47	220
0,2	0.44	880
0,3	0.32	960
0,4	0.12	480
0,5	0.05	250
0,6	0.03	180

Показано, что в данном методе расстояние до исследуемого объекта рассчитывается по значению частоты спектральной составляющей с максимальной амплитудой.

Как видно из результатов, приведенных в таблице 2, данный метод с точностью до 0.03% (180 мкм) позволяет определять расстояние при значениях заданного расстояния более 50 см. При меньших расстояниях до объекта погрешность определения расстояния при пилообразной токовой модуляции возрастает до $\sim 0.32\text{--}0.47\%$ (960 мкм).

Стоит отметить, что данной точности при компьютерном моделировании удалось получить при помощи регулировки девиации длины волны излучения и расстояния до отражателя.

В третьем разделе описан метод измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера с гармонической токовой модуляцией. На рис. 3 представлена зависимость мощности излучения лазерного автодина от времени при расстоянии до объекта 40 см, а на рис.4 его спектр при уровне обратной связи $C \ll 1$.

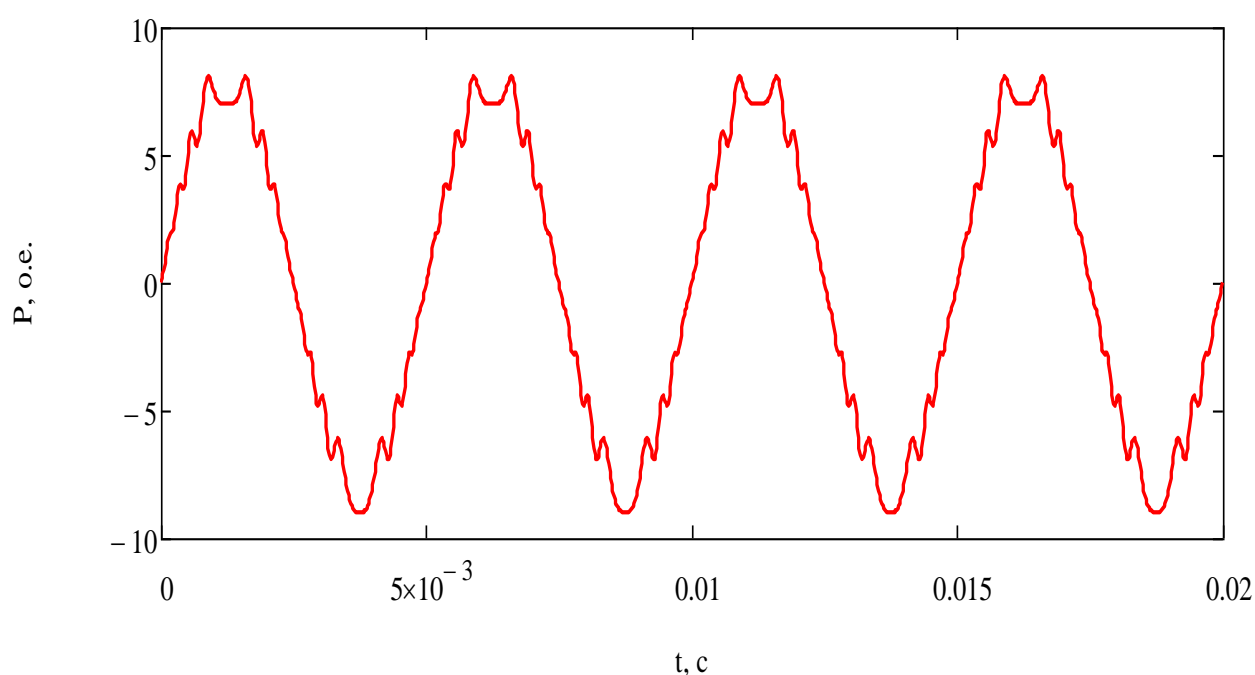


Рис. 3. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени.

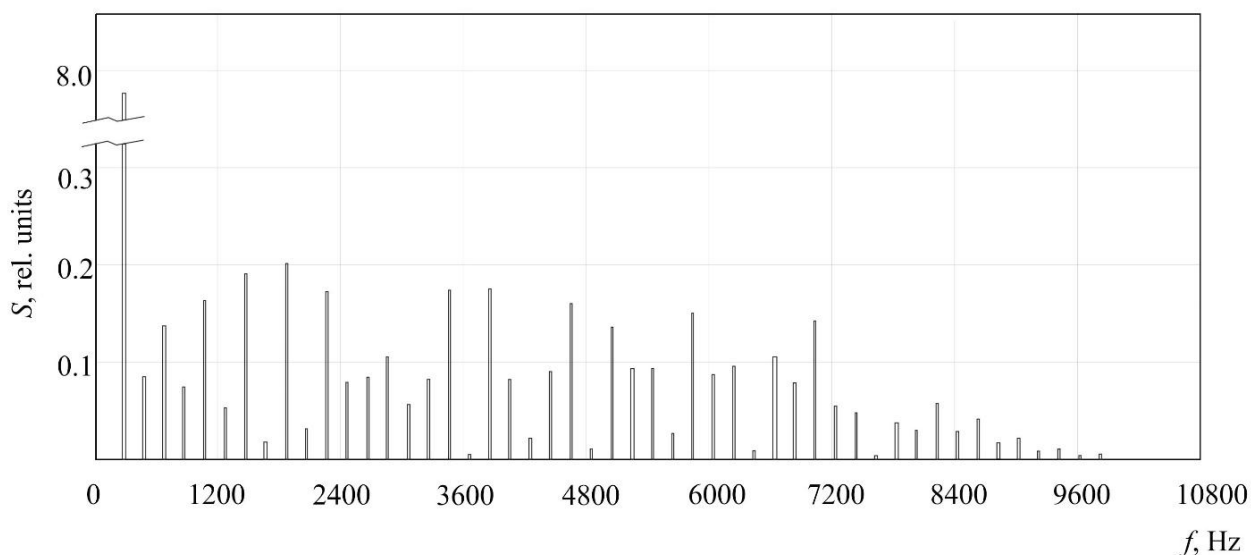


Рис.4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 6

Показано, что в методе гармонической модуляции расстояние до исследуемого объекта рассчитывается по значениям амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала, описан метод нахождения данных амплитуд с помощью разложения лазерного автодинного сигнала в ряд Фурье и в ряд по функциям Бесселя.

Результаты расчета минимальной погрешности для различных расстояний до отражателя представлены в таблице 3.

Таблица 3

Заданное расстояние до объекта, м	Погрешность, %	Погрешность, мкм
0,1	0.12	120
0,2	0.13	260
0,3	0.14	420
0,4	0.16	640
0,5	0.18	900
0,6	0.22	1320

С помощью метода гармонической модуляции можно добиться высокой точности измерений, не прибегая к регулировке девиации длины

волны излучения или расстояния до отражателя. Это достигается за счет усложнения процедуры анализа автодинного сигнала. Для такого анализа, как было показано в этой главе, требуется регистрация амплитуд спектральных составляющих и выбор пары таких составляющих, которые дают минимальную погрешность.

Как видно из таблицы 3, данный метод с точностью до 0.12% (120 мкм) позволяет определять расстояние при значениях заданного расстояния менее 50 см. Погрешность измерений с ростом расстояния увеличивается до ~ 0.22% (1320 мкм).

В четвертом разделе проводился сравнительный анализ расчетных результатов, полученных при компьютерном моделировании методов измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при пилообразной и гармонической модуляциях длины волны лазерного излучения.

Результаты расчета погрешности определения расстояния для двух методов токовой модуляции лазерного диода при различных заданных расстояниях показана на рис.5.

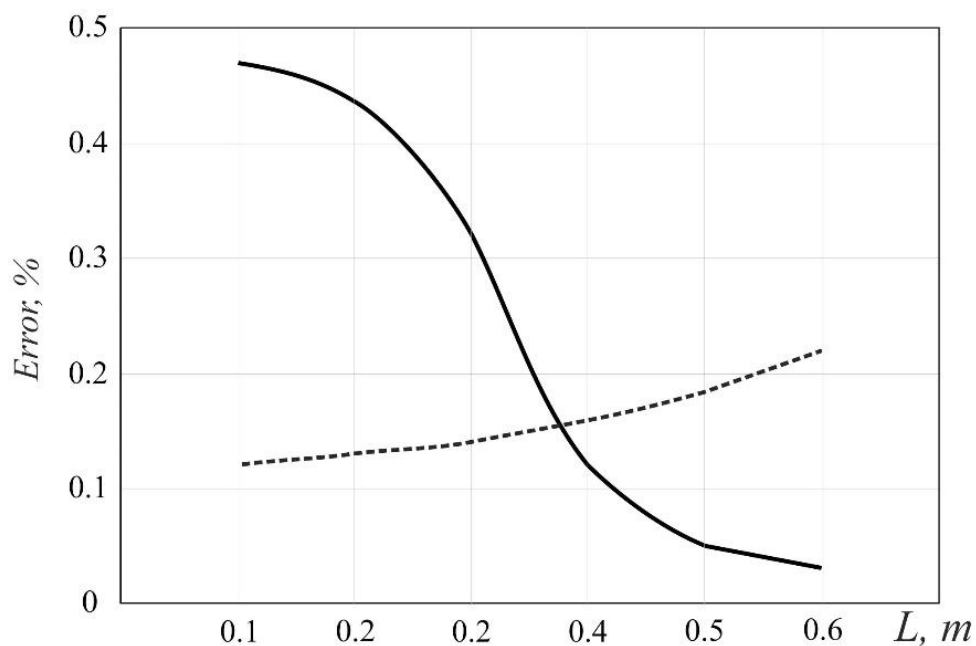


Рис.5. Зависимости погрешностей определения расстояния для методов автодинного детектирования с пилообразной (—) и гармонической токовой модуляцией (----).

Как видно из рис.5, с ростом расстояния погрешность измерения методом пилообразной токовой модуляции значительно уменьшается, а при гармонической модуляции погрешность измерений увеличивается, на расстоянии 40 см точность обоих методов практически идентична, а при большей удаленности объекта, погрешность метода с пилообразной модуляцией становится меньше, чем у метода с гармонической модуляцией.

Причем на расстоянии 30 см точность метода пилообразной модуляции длины волны излучения резко ухудшается, в то время как характер зависимости точности от измеряемого расстояния в методе гармонической модуляции более линейная.

Анализируя можно сделать вывод, что для измерения малых расстояний более пригоден метод с гармонической токовой модуляцией, а метод с пилообразной токовой модуляцией имеет меньшую погрешность при измерении расстояний более 40 см.

В пятом разделе проводился анализ вышеописанных методов с помощью экспериментов. Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рисунке 6.

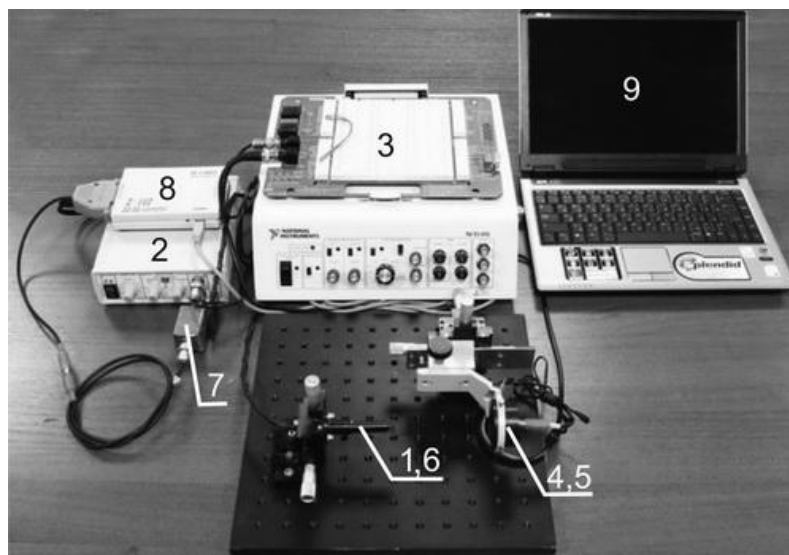


Рис. 6. Вид экспериментальной установки:

- 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер.

На рисунке 7 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный в методе пилообразной токовой модуляции длины волны лазерного излучения на расстоянии 40 и 60 см при величине девиации частоты излучения, равной $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад/с, что соответствует величине 0.00046% длины волны излучения лазерного диода.

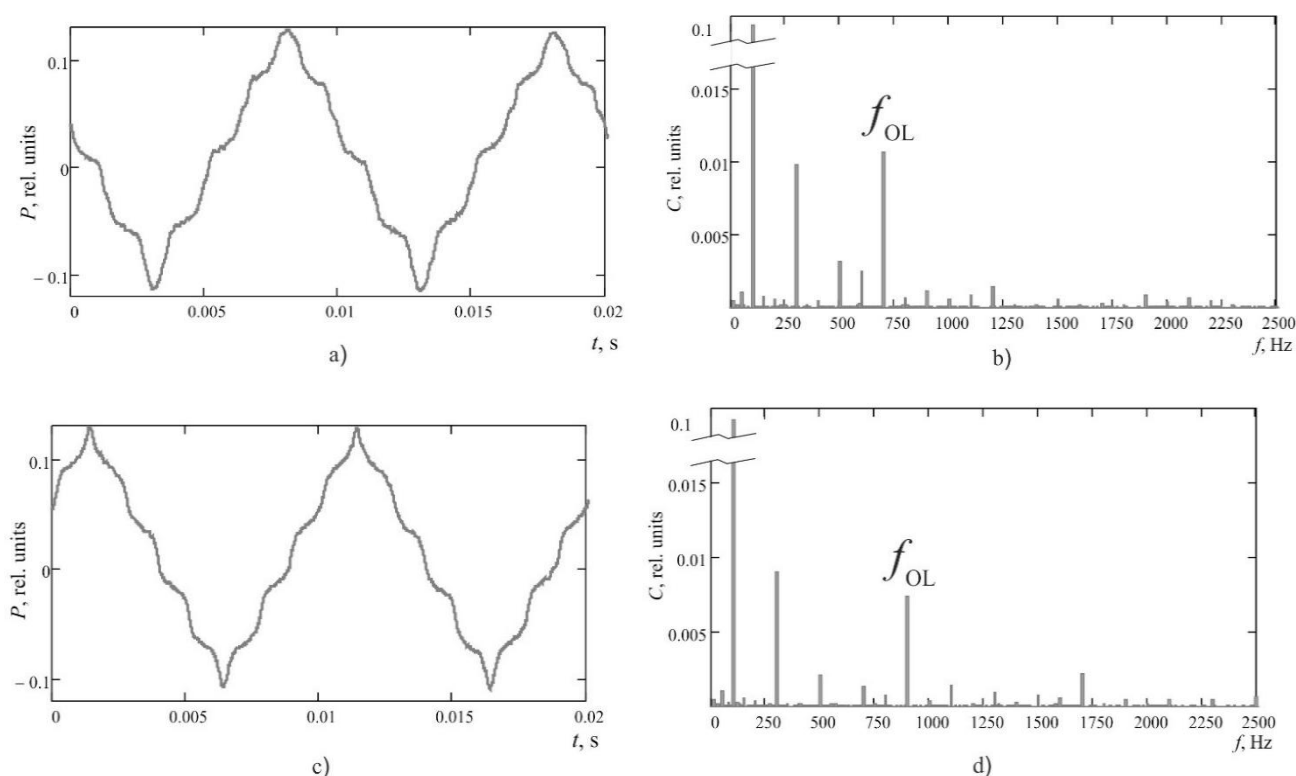


Рис. 7. Частотномодулированные автодинные сигналы (а, с) и их спектры (b, d), полученный на экспериментальной установке на расстоянии 40 и 60 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад/с

На рисунке 8 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный в методе гармонической токовой модуляции при аналогичной девиации частоты излучения, равной $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад/с на расстояниях 40 и 60 см.

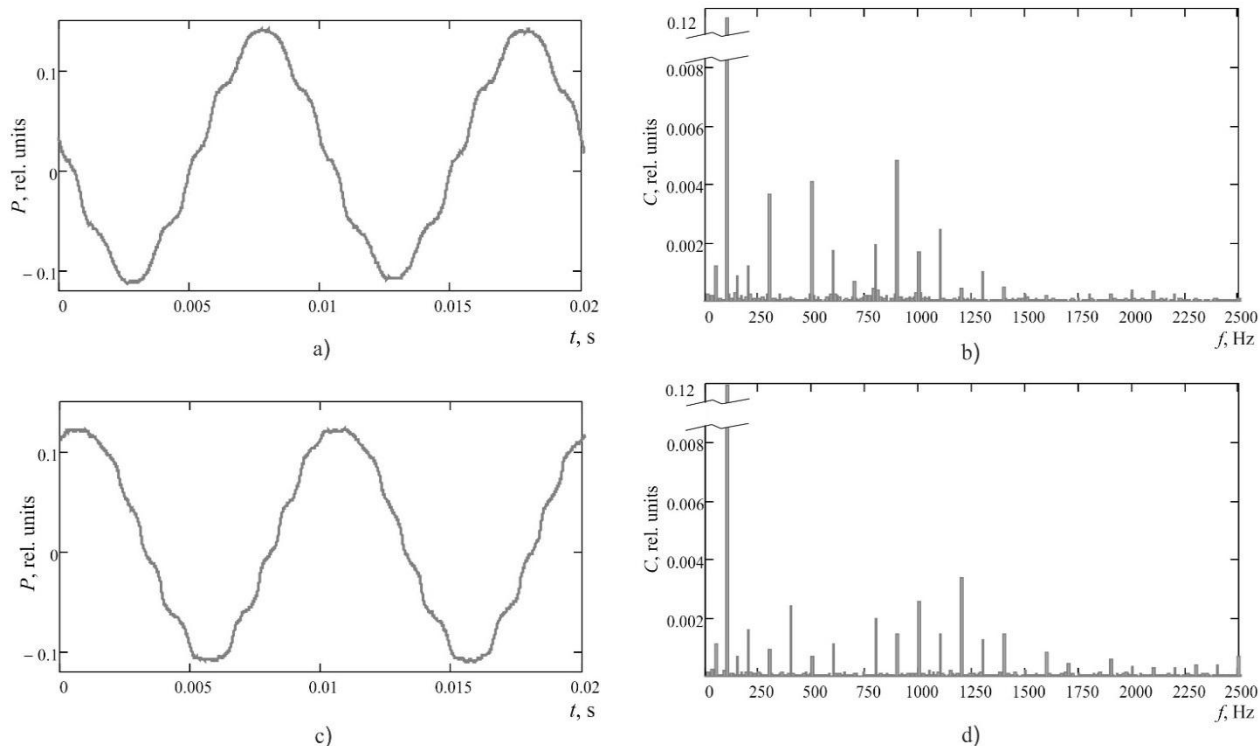


Рис. 8. Частотномодулированные автодинные сигналы (а, с) и их спектры (b, d), полученные на экспериментальной установке на расстоянии 40 и 60 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад./с

На рис.9 представлена зависимость разброса измеряемых значений от расстояния в диапазоне от 10 мм до 60 мм для обоих методов.

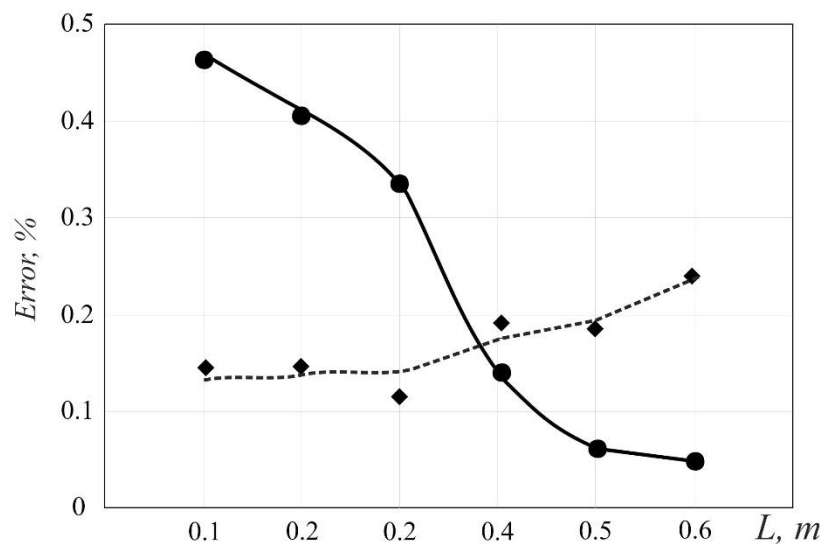


Рис.9. Зависимости разброса измеряемых величин расстояния от 10 до 60 мм для методов автодинного детектирования с пилообразной и гармонической токовой модуляцией

Как видно из сравнения зависимостей, приведенных на рис.5 и рис. 9, результаты измерений и компьютерное моделирование дают близкие значения погрешности. С ростом расстояния погрешность измерения методом пилообразной токовой модуляции значительно уменьшается, а при гармонической модуляции погрешность измерений увеличивается, что связано с уменьшением точности измерений амплитуд спектральных составляющих, имеющих более высокие частоты.

Таким образом, теоретически и экспериментально показано, что при измерениях расстояний до 35 см более высокую точность обеспечивает метод с гармонической токовой модуляцией, а при измерениях расстояний больших 40 см более высокую точность дает метод с пилообразной токовой модуляцией.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы:

1. В работе были исследованы возможности метода токовой модуляции длины волны лазерного излучения для определения расстояния до объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя.

2. Показано, что в методе треугольной модуляции расчет расстояния до объекта проводится по значению частоты спектральной составляющей с максимальной амплитудой. В то время как расчет расстояния в методе гармонической модуляции длины волны лазерного излучения проводится по значениям амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала.

3. Показаны преимущества на расстояниях менее 40 см для метода гармонической токовой модуляции лазерного диода, а на расстояниях более 40 см – для метода пилообразной токовой модуляции с помощью сравнительного анализа методов измерения расстояния до объекта при существующих возможностях модуляции длины волны излучения лазера.

4. В работе обоснованы перспективы использования метода измерения расстояния до отражателя при гармонической токовой

модуляции длины волны лазерного автодина. Преимущество метода гармонической модуляции связано с отсутствием необходимости регулировки девиации длины волны излучения или расстояния до отражателя. Однако это достигается за счет усложнения процедуры анализа автодинного сигнала, включающей регистрацию амплитуд спектральных составляющих и выбор пары таких составляющих, которые дают минимальную погрешность. Кроме того, достоинством метода гармонической модуляции является большая точность измерений при небольших расстояниях, когда недостаточная величина девиации длины волны лазерного излучения не позволяет обеспечить большое количество интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения тока лазерного диода.

5. Установлено, что полученные в данной работе оценки величин погрешностей могут быть уменьшены при использовании лазерных структур с распределенным брегговским отражателем, которые могут увеличить величину девиации длины волны лазерного излучения. Однако общие тенденции, связанные с тем, что при уменьшении расстояния ошибка измерений методом гармонической модуляции будет меньше, остаются.

1. Автодинная интерферометрия расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, И.С. Костюченко, С.Ю. Добдин// Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 54-59 - DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-54-59

2. Автодинная интерферометрия расстояния при токовой модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, С.Ю. Добдин, И.С. Костюченко // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2018. Принята к печати.

3. Методы измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И., Костюченко И.С. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами Материалы Всероссийской научной школы-семинара. Под редакцией Д.А. Усанова. 2016. С. 28-31.

4. Определение расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения / Костюченко И.С., Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В. // В сборнике: Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика доклады XI Всероссийской конференции молодых ученых. 2016. С. 98- 99.

5. Низкочастотный спектр автодинного сигнала при токовой модуляции длины волны лазерного излучения / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Костюченко И.С., Добдин С.Ю., Астахов Е.И. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара. Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. 2017. С. 11-15.

6. Автодинная интерферометрия расстояния при двух видах модуляции волны излучения / Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Костюченко И.С., Добдин С.Ю. // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара. Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. 2018. С.42-44

