

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ РАССТОЯНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

К.А. ЛУКИН, Ю.П. МАЧЕХИН, А.А. МОГИЛА, Д.Н. ТАТЬЯНКО, В.М. БАБИЧ, А.С. ЛИТВИНЕНКО

Представлены результаты разработки лазерного устройства, обеспечивающего абсолютные измерения расстояний с интерферометрической точностью. В основе принципа работы этого устройства лежит метод спектральной интерферометрии, реализованный в оптическом диапазоне с помощью шумовых сигналов. В работе показано, что использование одномодового излучения полупроводниковых лазеров с естественной шириной линии до 200 МГц позволяет осуществлять прецизионные измерения расстояний, начиная от 75 сантиметров и до сотен метров.

Ключевые слова: лазерный измеритель расстояния, спектральная интерферометрия, длина когерентности, гетеродин.

ВВЕДЕНИЕ

Известные лазерные устройства, обеспечивающие относительные и абсолютные измерения расстояний, представляют собой либо интерферометры перемещения, либо импульсные и фазовые дальнометры. Эти устройства нашли широкое применение при решении разнообразных практических задач. Так, например, лазерные измерительные интерферометры перемещений являются неотъемлемой частью обрабатывающих станков в машино- и приборостроении. Лазерные импульсные и фазовые дальнометры позволяют осуществлять измерения расстояний при топографических и кадастровых изысканиях на поверхности земли. Однако у этих методов существуют свои недостатки. Одним из основных является необходимость выполнения интерферометрических измерений в динамическом режиме, когда отражающее зеркало перемещается вдоль измеряемого расстояния.

В последнее время активно развивается шумовая радиолокация [1-2], и в частности, шумовые радары, основанные на методе спектральной интерферометрии или методе модифицированной двойной спектральной обработки [1-4]. Экспериментальные и теоретические исследования особенностей шумовых радаров микроволнового и миллиметрового диапазонов, принцип действия которых основан на методе спектральной интерферометрии, показали перспективность реализации этого метода и в оптическом диапазоне. По-сути, результаты исследований этих шумовых радаров и созданные методы спектральной обработки послужили основой разработки оптического шумового радара со спектральной обработкой отраженных сигналов, который позволил бы осуществлять прецизионные измерения расстояний с погрешностью сравнимой с погрешностью оптических интерферометров.

Целью настоящей работы были исследования условий реализации шумового лазерного измерителя расстояний (ШЛИР) для обеспечения прецизионных абсолютных измерений расстояний в диапазоне от долей миллиметров до десятков метров.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ШЛИР

Метод спектральной интерферометрии (или метод двойной спектральной обработки) [1-4] основан на линейной интерференции гармонических составляющих спектра зондирующего и отраженного сигналов, если выполняется условие

$$\Delta f > c/2L_0$$

полного отсутствия интерференции амплитуд сигналов из-за большой задержки $\tau_0 = 2L_0/c$ отраженного сигнала относительно зондирующего. Здесь Δf — ширина спектра зондирующего сигнала, c — скорость света в вакууме, L_0 — дальность до отражателя, τ_0 — время распространения сигнала до отражателя и обратно. Метод может быть реализован с помощью классического интерферометра Майкельсона (рис. 1).

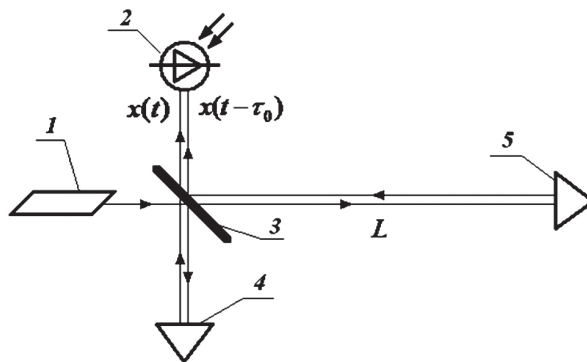


Рис. 1. Схема интерферометра Майкельсона: 1 — He-Ne лазер с шумовой модуляцией; 2 — фотоприемник; 3 — светоделительная пластина; 4 — отражатель опорного канала интерферометра; 5 — отражатель измерительного канала интерферометра

Амплитуда сигнала на входе фотоприемника

$$x_{\Sigma}(t, \tau_0) = x(t) + x(t - \tau_0) \quad (1)$$

образуется в результате суммирования отраженного $x(t - \tau_0)$ и зондирующего $x(t)$ сигналов и не зависит от времени задержки, где t — текущее время. Поэтому она не несет информации о расстоянии до отражателя. Анализ [1, 4] спектра мощности $F_{\Sigma}(f)$ суммарного сигнала $x_{\Sigma}(t, \tau_0)$ позволяет получить информацию о дальности L_0 отражате-

ля. Для одиночного отражателя спектр мощности на входе фотоприемника можно записать в следующем виде

$$F_{\Sigma}(f, \tau_0) = 2F(f)\{1 + \cos(2\pi f\tau_0 + \theta)\}, \quad (2)$$

где θ — разность фаз между опорным и отраженным сигналами.

Основная особенность спектра (2) этого сигнала состоит в периодическом чередовании максимумов и минимумов на оси частот, которые являются следствием интерференции гармонических спектральных составляющих суммируемых сигналов. Период этого чередования обратно пропорционален времени запаздывания τ_0 отраженного сигнала относительно зондирующего, что дает возможность однозначно оценивать расстояние до отражателя. Для этого измеряется разность Δf_m частот f_1 и f_2 , соответствующая положению двух соседних максимумов спектра мощности (2) и расстояние находится из соотношения

$$L_0 = \frac{c}{2\Delta f_m} = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}. \quad (3)$$

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ШЛИР

Принцип работы разработанного дальномера основан на использовании оптического сигнала, ширина спектральной линии которого обеспечивает минимальную дальность $L_{\min}$ измерений. При использовании лазерного излучения это требование означает, что ширина спектра Δf зондирующего сигнала по уровню -3 дБ должна удовлетворять следующему условию [4]

$$\Delta f > |f_1 - f_2| = c/2L_{\min}. \quad (4)$$

Максимальная дальность измерений $L_{\max}$ определяется разрешающей способностью δf анализатора спектра [4]

$$L_{\max} \leq c/2\delta f = cT_s/2, \quad (5)$$

где T_s — длительность зондирующего сигнала.

Существует несколько методов получения шумовых оптических сигналов с требуемой шириной Δf спектра. В работе рассмотрена возможность частотной модуляции излучения одночастотного, одномодового He-Ne лазера шумовым сигналом радиочастотного диапазона с помощью акустооптического модулятора.

Другой метод заключается в использовании одномодового излучения инжекционных полупроводниковых лазеров, изготовленных по обычной технологии, которая обеспечивает ширину лоренцевского спектра зондирующего сигнала в пределах 200 МГц. Эта величина зависит от рабочего тока полупроводникового лазера, поэтому путем подбора режима работы полупроводникового лазера можно обеспечить либо ее увеличение, либо небольшое уменьшение.

Для регистрации спектра оптического сигнала модулированного по частоте, с шириной спектра в несколько сотен мегагерц, необходимо использовать гетеродинный приемник. С его помощью спектр частотно модулированного сигнала преобразуется из оптического диапазона в радиодиапазон. Поэтому, используя лазер с шумовой частотной модуляцией для получения суммарного информационного сигнала в радиодиапазоне, необходимо использовать другой лазер, частота которого отличается от средней частоты оптического зондирующего сигнала не менее, чем на половину ширины спектра шумового зондирующего сигнала.

Общая структурная схема ШЛИР, представленная на рис. 2, включает в себя два лазера 1 и 8, генерирующих в одном диапазоне оптических частот. Один из них 1 является лазером—гетеродином с частотой сигнала f_G , излучение которого одномодовое и одночастотное, с узкой естественной шириной линии излучения. В общем случае ширина линии излучения лазера гетеродина, как и стабильность частоты его излучения, определяют точность выполняемых частотно-временных измерений. Лазер—гетеродин имеет одно отличие от измерительного лазера — он не имеет шумовой частотной модуляции, а оптическая частота и ее стабильность совпадают с этими же параметрами измерительного лазера. Лазерный гетеродин должен обладать следующими характеристиками, необходимыми для работы ШЛИР. Во-первых, чтобы избежать неоднозначности в измерениях, спектр излучения лазера должен быть одночастотным и одномодовым (рабочая мода ТЕМ₀₀). Во-вторых, относительная нестабильность оптической частоты зависит от требуемой точности измерений и не должна быть меньше 10^{-9} .

Второй лазер 8 является измерительным. Его выходной сигнал модулирован по частоте с помощью шумового радиочастотного сигнала в полосе нескольких сотен мегагерц. Средняя частота его спектра f_N . Для суммирования (1) опорного $x(t)$ и отраженного $x(t - \tau_0)$ шумовых сигналов, генерируемых с помощью измерительного лазера и переноса их спектров в диапазон промежуточных частот в структуру ШЛИР, введены два преобразователя частоты, выполненных на основе лавинных фотодиодов.

Первый преобразователь ШЛИР предназначен для получения опорного шумового сигнала в диапазоне радиочастот

$$f_{\text{пч1}}(t) = f_G(t) - f_N(t). \quad (6)$$

Второй — предназначен для преобразования в радиочастотный диапазон измерительного сигнала. На его вход поступает оптический сигнал, отраженный от исследуемого предмета и излучение гетеродинного лазера

$$f_{\text{пч2}}(t) = f_G(t) - f_N(t - \tau_0). \quad (7)$$

Ширина спектра шумового оптического сигнала должна находиться в интервале от 50 до 200 МГц, в зависимости от условий применения лазерного измерителя.

Основная проблема при создании ШЛИР заключалась в подборе необходимых лазерных источников. При всех преимуществах частотно модулированного оптического зондирующего сигнала процесс его получения очень дорогостоящий. Поэтому он был исключен из исследований. С учетом простоты и реализации всех требуемых параметров, целесообразно использовать полупроводниковые лазеры, работающие в диапазоне частот лазера гетеродина. В качестве оптического гетеродина выбран одночастотный одномодовый He-Ne лазер с длиной волны 632,8 нм. Ширина линии излучения этого лазера не более 20 кГц, а пассивная относительная нестабильность частоты на интервале времени измерения от 0,1 до 10 секунд не хуже 10^{-9} . Эти параметры сигнала лазерного гетеродина обеспечивают преобразование спектра шумового оптического сигнала в радиодиапазон без дополнительных искажений. Используемый He-Ne лазер-гетеродин не имеет активной стабилизации частоты, поэтому в условиях стабильных параметров внешней среды, значение частоты этого лазера может медленно изменяться (6-7) в пределах зоны свободной дисперсии и время измерений не должно превышать 1–2 с.

Совокупность требуемых параметров к измерительному лазеру может быть реализована в полупроводниковом лазере. Преимущества полупроводниковых лазеров перед газовыми и твердотельными заключаются в следующем:

- получение необходимой ширины линии излучения осуществляется подбором величины тока питания лазера, при котором лоренцевское уширение линии излучения будет достигать требуемого значения;

- подстройка частоты оптического излучения до заданного значения осуществляется с помощью токовой и температурной перестройки режима работы лазера.

В этой связи, в ШЛИР в качестве источника лазерного шумового сигнала использовался полупроводниковый лазер 8 (рис. 2), который работает при нормальных условиях на центральной длине волны 635 нм. Для обеспечения работы этого лазера в диапазоне излучения лазера-гетеродина (He-Ne лазер с центральной длиной волны излучения 632,8 нм) разработана система контроля и перестройки температурного режима работы полупроводникового лазера. Эта система позволяет устанавливать и удерживать необходимый уровень температуры, при котором частота (длина волны) излучения измерительного полупроводникового лазера отличается от частоты излучения He-Ne лазера гетеродина на величину, которая равна промежуточной частоте.

Для реализации ШЛИР на основе He-Ne лазера-гетеродина и измерительного полупроводникового лазера разработан макет оптического блока, представленный на рис. 2.

Оптический блок предназначен для: генерации и передачи в открытое пространство излучения полупроводникового лазера; приема отраженного от объекта излучения; переноса шумового сигнала из оптического диапазона в радиодиапазон путем гетеродинирования оптических сигналов. Для измерения параметров сигнала шумовой модуляции важно, чтобы частота лазера гетеродина оставалась постоянной в течение периода измерений.

Приёмно-передающая часть оптического блока сконструирована на базе телескопа-рефрактора системы Ньютона. Такой выбор объясняется тем, что зеркало даёт изображение лучшего качества, чем линзовый объектив; изготовление

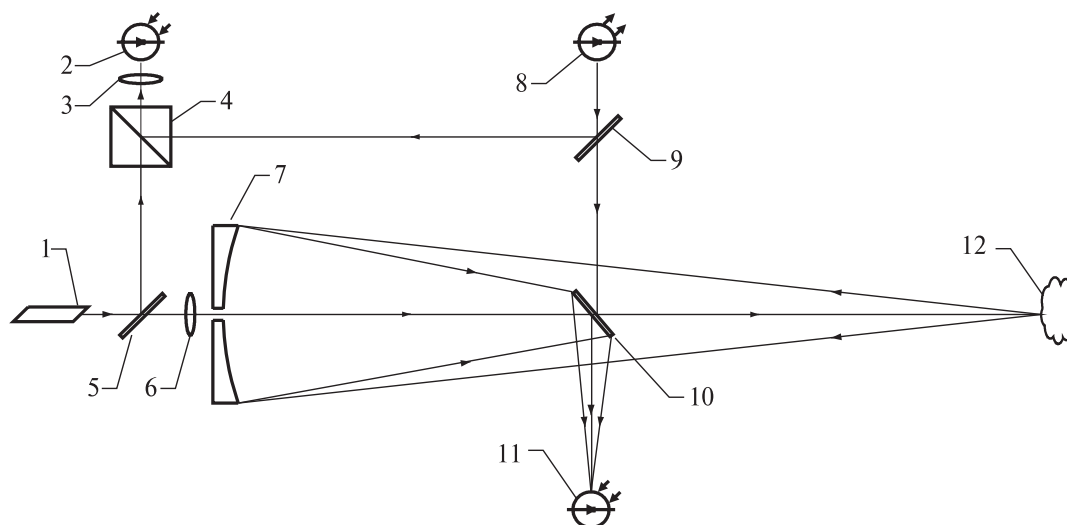


Рис. 2. Схема оптического блока ШЛИР:

- 1 — He-Ne лазер-гетеродин; 2 — фотоприемник опорного канала; 3 — коллимирующая линза; 4 — делительная призма; 5 — делительная пластина; 6 — коллимирующая линза; 7 — главное зеркало; 8 — полупроводниковый лазер; 9 — делительная пластина; 10 — двухстороннее диагональное зеркало; 11 — фотоприемник измерительного канала; 12 — объект

телескопа-рефрактора проще и дешевле, а, кроме того, такая схема позволяет наиболее удачно совместить объектный (отраженный от объекта) и опорный лучи, сведя к минимуму количество оптических элементов, что приводит к снижению потерь и упрощению юстировки всей системы. Особенностью этого блока является то, что главное зеркало 7 на рис. 2 имеет отверстие для ввода луча лазера-гетеродина 1 на фотоприёмник 11.

Излучение He-Ne лазера-гетеродина 1 (рисунок 2) попадает на делительную пластину 5. При этом отраженный от делительной пластины 5 луч направляется на интегрирующую призму 4 и далее через фокусирующую линзу 3 на фотоприемный модуль 2 опорного канала. Прошедшее через делительную пластину 5 излучение лазера-гетеродина 1 направляется через корректирующую линзу 6 и через отверстие в главном зеркале 7 на внутреннюю поверхность двухстороннего диагонального зеркала 10 оптического приемно-передающего блока и далее на фотоприемный модуль 11 измерительного канала. Особенностью диагонального зеркала 10 является то, что оно имеет две отражающие поверхности (внешнюю и внутреннюю) расположенные параллельно.

Излучение полупроводникового лазера 8 попадает на делительную пластину 9. При этом отраженный от делительной пластины 9 луч направляется на интегрирующую призму 4, складывается с лучом лазера-гетеродина 1 и направляется на фотоприемный модуль 2 опорного канала. Прошедшее через пластину 9 излучение лазера 8 попадает на двухстороннее диагональное зеркало 10. Отразившись от внешней поверхности зеркала 10, лазерный луч направляется на объект (отражатель) 12, после чего, отраженный от объекта луч распространяется в обратном направлении в приёмно-передающий блок. Расходящееся

излучение, отраженное от объекта 12, попадает на вогнутое главное зеркало 7, направляется на внутреннюю поверхность диагонального зеркала 10 и далее фокусируется на фотоприёмник 11, где складывается с лучом гетеродинного лазера 1.

Частотный интервал, в котором могут наблюдаться биения между лазерами (сигнал промежуточной частоты), определяет полосу частот разработанного фотоприемного устройства. В результате работы оптического блока на выходе фотоприемного модуля 2 формируется опорный сигнал биений в радиодиапазоне, а на выходе фотоприемного модуля 11 формируется измеряемый сигнал биений также в диапазоне радиочастот.

На основании проведенного исследования и анализа существующих технических решений была разработана схема фотоприемного блока, который обеспечивает регистрацию сигнала биений между оптическими частотами He-Ne лазера и полупроводникового лазера.

Схема базируется на использовании двух фотоприемных модулей, каждый из которых содержит лавинный фотодиод, трансимпедансный усилитель, быстродействующий дифференциальный усилитель, высоковольтный источник напряжения смещения лавинного фотодиода и источник питания фотоприемного модуля. Блок-схема фотоприемных модулей измерительного и опорного каналов представлены на рис. 3 (обведены пунктирной линией).

Разработанная схема с использованием двух фотоприемных модулей позволяет реализовать двухканальный фотоприемный блок, в котором один канал служит для приема отраженного от объекта сигнала, а второй канал принимает, в качестве опорного, выходное излучение устройства. Два канала фотоприемного блока имеют аналогичные электронные принципиальные схемы.

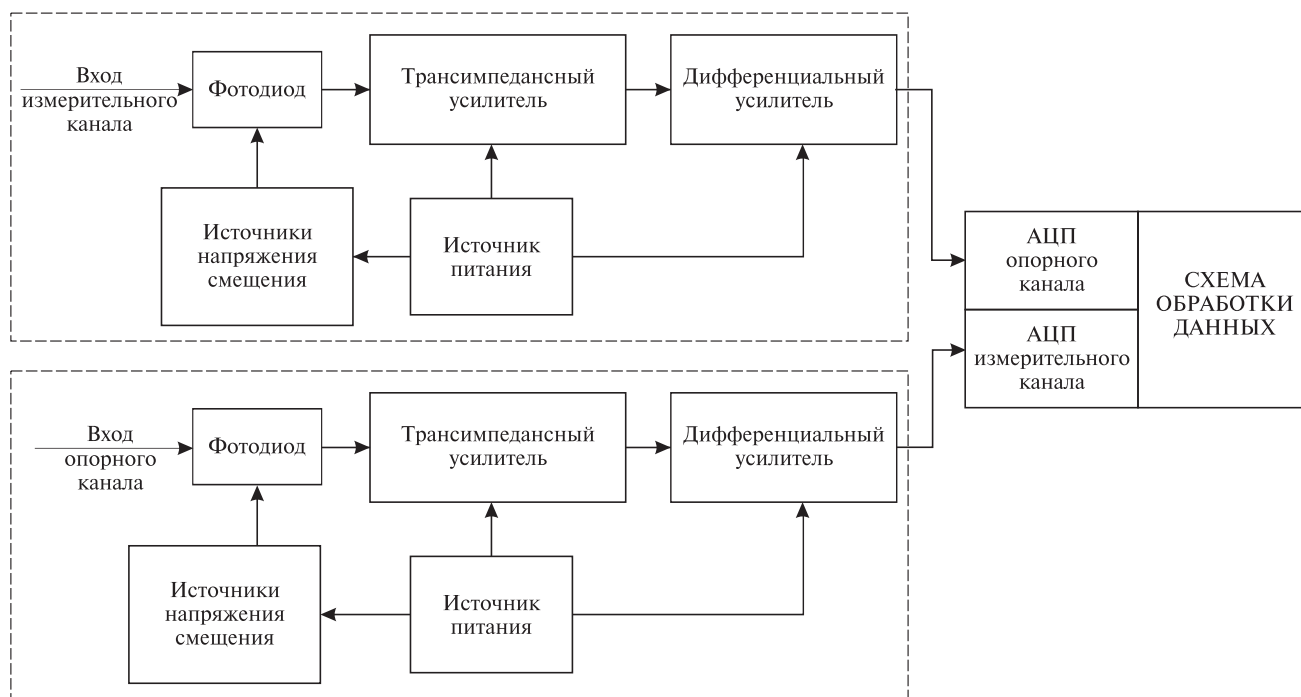


Рис. 3. Блок-схема приемной части ШЛИР

Сигналы на выходе фотоприемных блоков поступают на два канала высокоскоростного АЦП и далее на схему обработки данных (рис. 3).

Сравнение отраженного и опорного сигналов на выходе этих двух каналов дает возможность выявить составляющую помех, вносимую в отраженный сигнал объектом, а также составляющую помех, вносимую в отраженный сигнал в процессе его прохождения до объекта и обратно.

Преобразование оптического сигнала в радиодиапазон осуществляется при помощи фотодетектирования фотодиодом оптических сигналов полупроводникового лазера-передатчика и He-Ne лазера-гетеродина. Гетеродинная схема преобразования особенно полезна для детектирования слабых оптических сигналов, когерентных с сигналом лазера-гетеродина.

При рабочей частоте лазера-гетеродина $4,74 \times 10^{12}$ Гц и квантовой эффективности фотодиода 65 % минимальная детектируемая мощность P_{min} составляет $0,12 \times 10^{-9}$ Вт. Учитывая технические требования к фотоприемному блоку в части рабочего отношения сигнал/шум, равного $S/N=10$ (20 дБ), нижней границей мощности входного сигнала можно считать уровень в 10^{-9} Вт. Поскольку динамический диапазон фотоприемного блока должен перекрывать пять порядков изменения мощности входного сигнала, то верхним пределом мощности входного сигнала выбран уровень 10^{-4} Вт.

Если два оптических пучка не параллельны, не освещают один и тот же участок приемной площадки фотоприемника или падают под углом, тогда величина отношения сигнал/шум и минимальной детектируемой мощности отличаются от указанных выше. Это обязывает производить тщательную юстировку между пучками лазера-гетеродина и отраженного сигнала для сохранения постоянства фазы по всей поверхности приемной площадки фотодиода. Кроме того, максимально достижимое отношение сигнал/шум ограничено также искажениями фронта отраженной волны при распространении ее в атмосфере. Поэтому расчетные значения нижней границы мощности входного сигнала должны быть увеличены с учетом неидеальных условий измерений. Для расчета коэффициента передачи сигнала от входа до выхода всего устройства принят уровень мощности входного сигнала в 10^{-7} Вт.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ШЛИР

Работоспособность системы была исследована с использованием монохромных сигналов от двух HeNe лазеров в качестве измерительного и гетеродинного источников. С помощью фотоприемников ШЛИР и высокоскоростной платы АЦП зафиксированы и затем программно обработаны временные ряды опорного и измерительного сигналов. Получены сигналы биения от этих лазеров в опорном (фотоприемник 2, рис. 2) и в измерительном (фотоприемник 11, рис. 2) ка-

налах. Спектральные характеристики сигналов представлены на рис. 4 и 5.

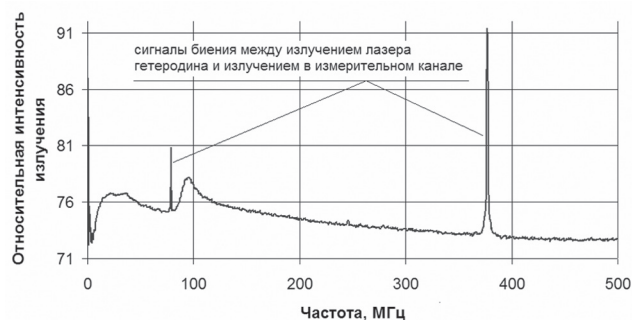


Рис. 4. Спектр сигнала измерительного канала

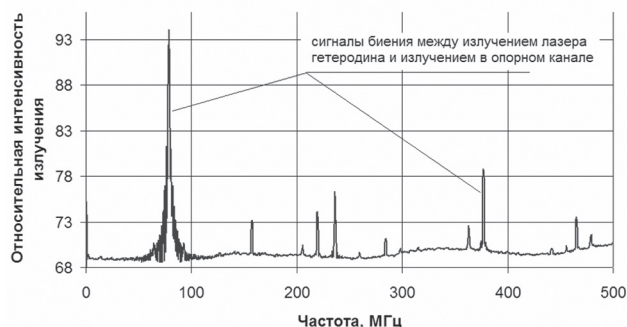


Рис. 5. Спектр сигнала опорного канала

Сигнал биения между излучением измерительного лазера и лазера гетеродина присутствует на частотах ~ 80 МГц и ~ 380 МГц в обоих каналах, что свидетельствует о правильной работе исследуемого макета ШЛИР.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе разработан и исследован шумовой лазерный измеритель дальности. Разработка проведена на базе шумовой радарной технологии. Модуль оптического передатчика проектировался в соответствии с теорией одно- и многомодовых лазерных источников, приемника — на основе теории оптических фокусирующих устройств слабо коллимированных лазерных пучков. Обработка оптических сигналов выполнена на основе спектральной интерферометрии. Обосновано использование в качестве источника шумовых сигналов одномодовых инжекционных полупроводниковых лазеров без дополнительной внешней модуляции. Для приема оптических отражений обоснована двухканальная супергетеродинная схема.

Лабораторные исследования подтвердили перспективность применения шумового лазерного дальномера и спектральной интерферометрии для прецизионного измерения абсолютных расстояний с погрешностью, которая сравнима с погрешностью оптических интерферометров в диапазоне дальностей от долей миллиметра до десятков метров.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта УНТЦ № 3377.

Литература.

- [1] К.А.Лукин. Шумовая радарная технология // Радиофизика и электроника. — Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. — 1999. — 4, № 3. — С. 105-111.
- [2] K.A. Lukin. Millimeter Wave Noise Radar Applications, Theory and Experiment / Proc. of the MSMW2001 Symposium, June 4-9, 2001, Kharkiv, Ukraine, 2001, VI, P. 68-73.
- [3] K.A.Lukin, V.V.Kulyk and A.A.Mogyla. Spectral Interferometry method and autodyne (self-mixing) effect for Noise Radar Application / Proc. Int. Workshop on the Noise Radar Technology, Sept., 18-20, 2002, Yalta, Crimea, Ukraine, pp.179-186.
- [4] А.А.Могила, К.А.Лукин, В.В.Кулик. Статистическая погрешность измерения расстояния методом спектральной интерферометрии. // Радиофизика и электроника, том 5, №1, 2000. — С. 163-170.

Поступила в редколлегию 21.04.2010

Лукин Константин Александрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом НДЭС ИРЭ НАН Украины, IEEE Fellow, ICTP Senior Associate, руководитель исследовательской группы «Шумовая радарная технология» Научно-Исследовательского Агентства НАТО. Область научных интересов: динамический хаос и генерация хаотических колебаний, цифровая обработка случайных сигналов, шумовая радарная технология и наземные РСА для дистанционного зондирования.



Мачехин Юрий Павлович, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заслуженный метролог Украины, академик академии наук прикладной радиоэлектроники, заведующий кафедрой ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



Могила Анатолий Андреевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИРЭ им. А.Я.Усикова НАН Украины. Область научных интересов: статистическая радиофизика, радиолокация, радиотехнические системы, модели сигналов и методы их обработки.



Татьянко Дмитрий Николаевич, ведущий инженер Института радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. Область научных исследований: спектральная интерферометрия для прецизионных измерений расстояний, прецизионные измерения энергетических и спектральных характеристик когерентного и шумового оптического излучения.



Бабич Валентин Михайлович, ведущий инженер ННЦ «Института метрологии». Область научных интересов: лазерная измерительная техника и оптоэлектронные приборы.



Литвиненко Анатолий Савельевич, канд. техн. наук, доцент кафедры светотехники и источников света Харьковской национальной академии городского хозяйства. Область интересов: голография, метрология, светотехника.

УДК 681.785.57

Лазерний вимірювач відстані на основі методу спектральної інтерферометрії / К.О. Лукін, Ю.П. Мачехін, А.А. Могила, Д.М. Татьянако, В.М. Бабіч, А.С. Литвиненко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2010. Том 9. № 2. — С. 240-245.

Наведено результати розробки лазерного пристрою, який забезпечує вимірювання абсолютної відстані з інтерферометричною точністю. В основі принципу його роботи лежить метод спектральної інтерферометрії, який реалізовано за допомогою шумових оптичних сигналів. У роботі показано, що використання одномодового випромінювання напівпровідникових лазерів з природною шириною лінії до 200 МГц дозволяє здійснювати прецизійне вимірювання відстані, починаючи з 75 см і до сотні метрів.

Ключові слова: лазерний вимірювач відстані, спектральна інтерферометрія, довжина когерентності, гетеродин.

Лл. 05. Бібліогр.: 04 найм.

UDC 681.785.57

Laser distance meter on the basis of spectral interferometry method / K.A. Lukin, Yu.P. Machekhin, A.A. Mogila, D.N. Tatyanko, V.M. Babich, A.S. Litvinenko // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. — 2010. Vol. 9. № 2. — P. 240-245.

Results of developing a laser-based device which provides absolute measurements of distances with interferometry accuracy are presented. The device exploits spectral interferometry method which is realized in optical frequency range with the help of noise signals. The paper shows that using a single mode operation of a semiconductor laser with a natural spectrum width up to 200 MHz enables to carry out precise measurements of distances within the range of 75 cm up to hundreds of meters.

Key words: laser distance meter, spectral interferometry, coherence length, heterodyne.

Fig. 05. Ref.: 04 items.