



УДК 531.715.1

МЕТОДЫ АВТОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ РАССТОЯНИЯ ПРИ ТОКОВОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА



Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин,
Е. И. Астахов, И. Ю. Костюченко, А. В. Джафаров

Усанов Дмитрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, usanovda@info.sgu.ru

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dobbinsy@info.sgu.ru

Астахов Елисей Игоревич, кандидат физико-математических наук, программист, ООО «ЭПАМ Системз, Саратов, elisey.astakhov@gmail.com

Костюченко Ирина Сергеевна, аспирант кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kleon.ira@mail.ru

Джафаров Алексей Владимирович, магистрант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, jafaralex@mail.ru

В работе сравниваются два способа автодинной интерферометрии расстояния при двух видах частотной модуляции лазерного излучения. Описаны интерференционные методы с гармонической и пилообразной частотной модуляциями лазерного излучения. Исследованы достоинства метода пилообразной модуляции, связанные с использованием в качестве информационного параметра частоты спектральной составляющей автодинного сигнала, а также достоинства метода гармонической модуляции, обусловленные возможностью определения расстояния по результатам измерения амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала. Приведена схема измерительной системы на базе частотно-модулированного полупроводникового автодина на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой. Сравнительный анализ методов измерения расстояния до объекта при существующих возможностях частотной модуляции излучения полупроводникового лазера показал преимущества измерения расстояний до 35 см для метода гармонической токовой модуляции лазерного диода, а на расстояниях более 40 см – для метода пилообразной токовой модуляции.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, автодин, полупроводниковый лазер, частотная модуляция лазерного излучения, гармоническая модуляция, пилообразная модуляция.

DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201

Введение

Одним из применений оптической интерферометрии является измерение профиля поверхности на малых расстояниях [1]. Для измерения вибрации на больших расстояниях используется метод автоматизированной сканирующей лазерной доплеровской виброметрии (ЛДВ) [2].

Измерение расстояния с помощью полупроводникового лазера реализуется путем измерения времени задержки лазерного импульса [3–6], схемы триангуляции [7–9] и интерферометрии [10–11].

Хотя два первых способа по точности измерения конкурируют с третьим, у фазового метода больше перспектив миниатюризации устройств для его реализации [12]. В частности, применение полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает возможность создания измерительных систем малых размеров. Одним из вариантов таких устройств являются лазерные интерферометры с внешней оптической обратной связью [13]. С помощью таких устройств можно определить характеристики нановибраций [14–16] и микроперемещений [17–19], величину скорости [20–22] и ускорения [23–25].

На параметры автодинного сигнала влияет уровень внешней оптической обратной связи [26–29]. В автодинной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному с развязкой от источника излучения, возможен при низких уровнях обратной связи [13, 30, 31].

Лазерная автодинная интерферометрия абсолютных расстояний в настоящее время представлена методом частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW) [12, 32]. Несмотря на то что длина волны полупроводникового лазера очень слабо изменяется при использовании этого метода, интерес к нему обусловлен тем, что изменение длины волны лазера $\Delta\lambda$ всего на 0.003 нм позволяет изменять фазу отраженного от объекта излучения на 2π радиан на расстоянии более 10 см.



Наиболее распространенным является метод пилообразной токовой модуляции (triangular wave modulation signal) [33, 34].

Для повышения точности измерений за счет увеличения частотного сдвига в [35] предлагается использовать трехэлектродную лазерную структуру с распределенным брэгговским отражателем (DBR). В дальнейшем этот метод был улучшен за счет применения метода двойной модуляции сигнала: модуляции тока питания лазерного диода и фазовой модуляции лазерного луча внешним электрооптическим кристаллом [36]. В другом методе измерения абсолютных расстояний, основанном на девиации длины волны лазера, используется технология с распределенным брэгговским отражателем в волоконно-оптическом световоде [37, 38].

В последние годы опубликованы статьи, авторы которых используют гармоническую модуляцию тока питания лазера [39–41]. В [39] предлагается измерять расстояние по частоте биеений. В работах [40, 41] используется разложение интерференционного сигнала одновременно в ряды Фурье и Бесселя. Гармоническая модуляция была использована для определения нановибраций [42, 43] и наносмещений [44]. В работе [45] предложено за счет аппаратной фильтрации протектированного сигнала повысить точность измерений при гармонической частотной модуляции лазерного излучения.

Таким образом, представляет интерес проведение сравнительного анализа методов измерения расстояния с помощью полупроводникового

лазера при различных типах токовой частотной модуляции излучения, что и составляло цель настоящей работы.

Метод, основанный на использовании пилообразной модуляции излучения лазерного автодина

Излучение лазерного автодина направляется на измеряемый объект, а часть отраженного излучения попадает в резонатор полупроводникового лазера, где оно интерферирует с исходным излучением. В силу конечности скорости света отраженное излучение приходит в резонатор лазера с задержкой по времени. Изменение мощности излучения лазерного диода фиксируется с обратной стороны резонатора лазера с помощью встроенного лавинного фотодиода. При изменении тока накачки полупроводникового лазера по пилообразному закону изменяется фаза отраженного от объекта излучения. Благодаря этому при неподвижном объекте интерференция излучений приводит к тому, что выходной ток фотодиода периодически изменяется с частотой, определяемой модуляционной характеристикой лазерного диода и расстоянием до объекта. Сигнал с фотодетектора приобретает вид высокоамплитудной треугольной составляющей за счет пилообразной токовой модуляции лазерного диода с наложенной на нее низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счет изменения фазы отраженного от объекта лазерного излучения.

На рис. 1 приведен смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны лазера $\Delta\lambda = 0.046$ нм и заданном расстоянии, равном 10 см

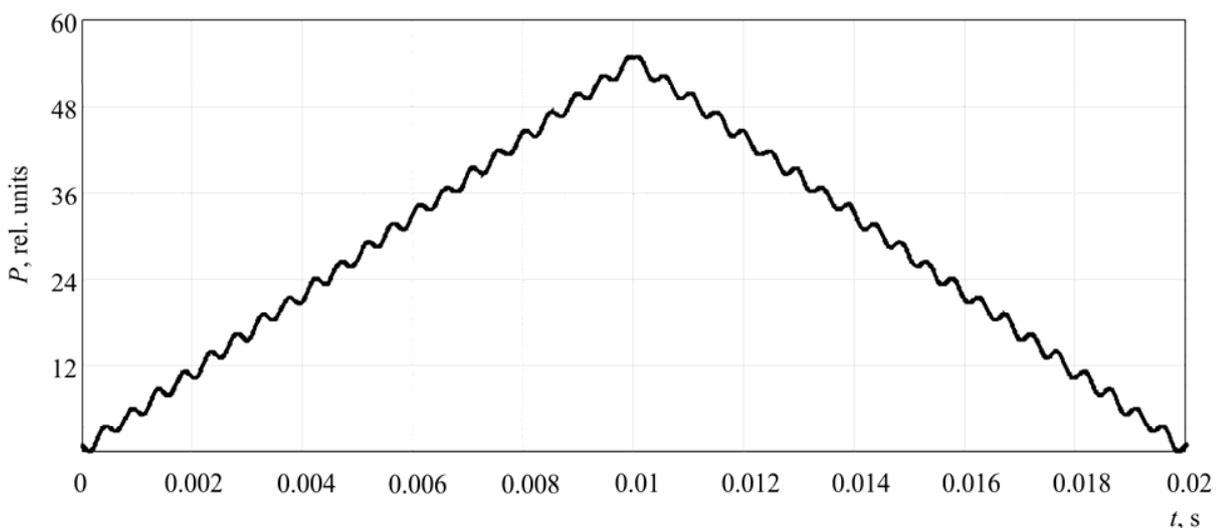


Рис. 1. Смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера $\Delta\lambda = 0.046$ нм и заданном расстоянии, равном 10 см

Fig. 1. Simulated self-mixing signal (the deviation of the wavelength is $\Delta\lambda = 0,046$ nm, the distance to the object is 10 sm)



излучения лазера $\Delta\lambda = 0.046$ нм, расстоянии до объекта равном 10 см и уровне обратной связи $C \ll 1$.

Расстояние до объекта в случае пилообразной модуляции определяется соотношением

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \cdot N, \quad (1)$$

где L – расстояние от излучателя до объекта; λ – длина волны излучения лазера, N – количество пиков автодинного сигнала на периоде Δt изменения длины волны $\Delta\lambda$.

Расстояние можно также определить с помощью так называемой «частоты биения» (f_{OL}) автодинного сигнала, используя соотношение [4, 5]:

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda/\Delta t} \cdot f_{OL}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведен спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.1. На низких частотах наблюдается спектр пилообразной модуляции (до 1000 Гц). На высоких частотах формируется спектр автодинного сигнала. В этой части спектра отчетливо выделяется частота автодинного сигнала с наибольшей амплитудой, соответствующая частоте f_{OL} .

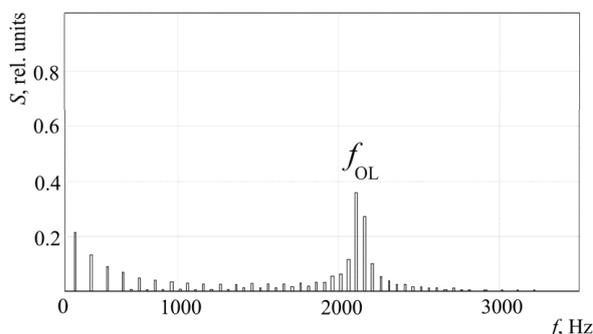


Рис. 2. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 1

Fig. 2. Spectrum of the self-mixing signal shown in Fig. 1

Как видно из рис. 2, при токовой частотной модуляции лазерного излучения частота интерференционных максимумов может быть измерена с точностью, определяемой частотным сдвигом до ближайшего спутника максимальной гармоники спектра автодинного сигнала f_{OL} .

Наличие спутников объясняется дробным количеством интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения длины волны лазера. Результаты компьютерного моделирования для различных расстояний,

а также погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала показана в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала при пилообразной модуляции излучения лазера
The error in determining the distance by the spectrum of the autodyne signal at a sawtooth wave modulation

| Заданное расстояние до объекта, м / Given the distance to the object, m | Погрешность (при регулировке $\Delta\lambda$) % / Error (when adjusting $\Delta\lambda$), % | Погрешность (при регулировке L), мкм / Error (when adjusting L), μm |
|---|---|--|
| 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 |

Точность измерений этим методом 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. Такая регулировка позволит добиться целого количества интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения длины волны лазера. Результаты компьютерного моделирования при регулировке расстояния до отражателя также показана в табл. 1.

Как видно из результатов, приведенных в табл. 1, 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 ~ 0.32–0.47% (960 мкм).

Метод, основанный на использовании гармонической модуляции излучения лазерного автодина

Гармоническая модуляция длины волны автодинного лазера приводит к значительному усложнению формы и спектра автодинного сигнала. Как и в предыдущем случае, форма сигнала приобретает вид высокоамплитудной гармонической огибающей на частоте токовой



модуляции лазерного диода с наложенной на нее низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счет изменения фазы при интерференции отраженной волны от объекта с волной, излучаемой лазером.

При воздействии отраженного излучения от объекта на лазерный диод излучаемая им мощность может быть определена в результате использования малосигнального анализа дифференциальных уравнений для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряда и записана в виде [12]

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega(j(t))\tau_0(t)), \quad (3)$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, независимая от расстояния до внешнего отражателя; P_2 – амплитудная составляющая мощности, зависящая от фазы волны, являющейся результатом интерференции отраженной волны от объекта с волной, излучаемой лазером; τ_0 – время обхода лазерным излучением расстояния до объекта; $\omega(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$ и уровня обратной связи.

При частотной модуляции излучения полупроводникового лазера частота и амплитудная составляющая мощности излучения лазера определяются соотношениями:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \Delta\omega \cdot \sin(2\pi\nu_1 t), \quad (4)$$

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t),$$

где ω_0 – собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода; $\Delta\omega$ – девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода; ν_1 – частота модуляции тока питания лазерного диода, I_1 – амплитуда токовой модуляции составляющей $P_1(j(t))$.

Таким образом, выражение для мощности излучения частотно-модулированного полупроводникового лазера (1) запишется в виде

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t) + P_2 \cos(\omega_0\tau_0 + \Delta\omega\tau_0 \sin(2\pi\nu_1 t)), \quad (5)$$

где стационарная фаза автодинного сигнала $\theta = \omega_0\tau_0$, амплитуда фазы токовой модуляции $\sigma = \Delta\omega\tau_0$, круговая частота модуляции тока питания лазерного диода $\Omega = 2\pi\nu_1$.

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической частотной

модуляции излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n :

$$P(t) = I_1 \sin(\Omega t) + P_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) + 2P_2 \cos(\theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cdot \cos(2n \cdot (\Omega t)) - 2P_2 \sin(\theta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \cdot \cos((2n-1)(\Omega t)), \quad (6)$$

и в ряд Фурье с коэффициентами разложения a_n и b_n :

$$P(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n} \cos(2n\Omega t) - b_{2n} \sin(2n\Omega t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n-1} \cos((2n-1)\Omega t) - b_{2n-1} \sin((2n-1)\Omega t)). \quad (7)$$

Из равенства соотношений (6) и (7) можно записать выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра S_n , соответствующих амплитудам спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя. Введем коэффициенты S_n , равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим разложения ряда Фурье в виде

$$S_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2}, \quad S_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^2 + b_{2n+1}^2}. \quad (8)$$

Выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра S_n и S_{2n+1} , за исключением случая $n = 1$ для нечетных гармоник, будут иметь вид

$$S_{2n} = 2 \cos(\theta) \cdot P_2 \cdot J_{2n}(\sigma), \quad (9)$$

$$S_{2n+1} = -2 \sin(\theta) \cdot P_2 \cdot J_{2n+1}(\sigma). \quad (10)$$

Моделирование автодинного сигнала с использованием данного метода проводилось при параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\omega = 10^{10}$ рад/с. 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 $C \ll 1$.

Для определения расстояния до объекта L , входящего в параметр σ , используем отношения для S_{2n} и S_{2n+2} и отношение S_{2n+1} и S_{2n+3} спектральных гармоник Фурье-спектра автодинного сигнала:

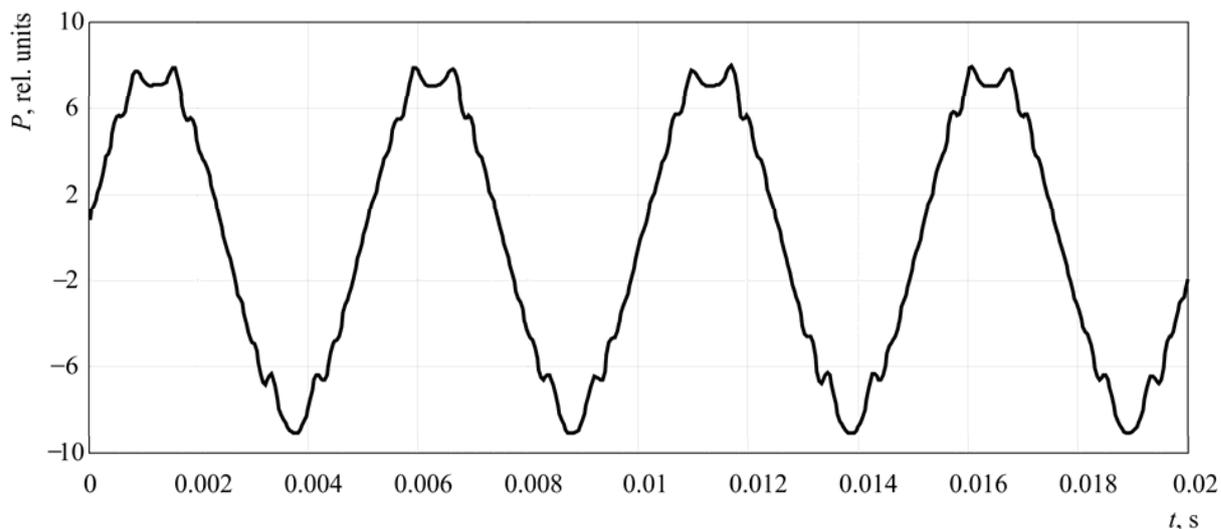


Рис. 3. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени
 Fig. 3. Temporal dependence of the power of the self-mixing signal

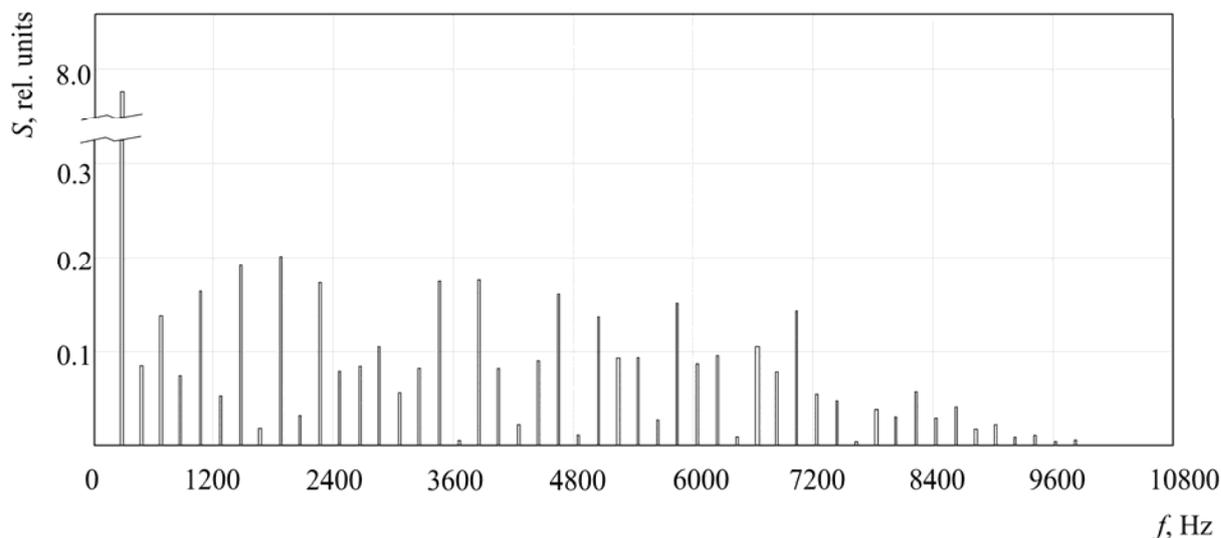


Рис. 4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 3
 Fig. 4. Spectrum of the self-mixing signal shown in Fig. 3

$$S_{2n} / S_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma)) / (J_{2n+2}(\sigma)), \quad (11)$$

$$S_{2n+1} / S_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma)) / (J_{2n+3}(\sigma)). \quad (12)$$

Решение полученных уравнений (11) и (12) относительно неизвестного параметра $\sigma = \Delta\omega\tau_0$ требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности девиации частоты излучения лазерного диода ω_A . Принимая во внимание, что $\tau_0 = 2 \cdot L / c$, получаем соотношение для определения расстояния до объекта:

$$L = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma}{\Delta\omega}. \quad (13)$$

Как видно из рис. 4, спектр автодинного сигнала при гармонической токовой модуляции имеет более сложный характер по сравнению со спектром автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции. Это обусловлено тем, что изменение фазы в методе гармонической токовой частотной модуляции лазерного излучения происходит неравномерно, с изменяющейся частотой, формируемой из-за изменения длины волны лазерного излучения с переменной скоростью. Частоты спектральных составляющих автодинного сигнала оказываются кратными частоте токовой модуляции. Для определения



расстояния до отражателя используются амплитуды спектральных составляющих автодинного сигнала.

На погрешность в определении расстояния до отражателя будет существенным образом влиять точность определения амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала, которая, в свою очередь, зависит от зашумленности автодинного сигнала.

Компьютерное моделирование точности определения расстояния до объекта проводилось при различных расстояниях с учетом влияния шумов измерительной системы на автодинный сигнал и амплитуды спектральных составляющих, входящих в соотношения (9) и (10). В расчетах задавалась 10%-ная величина шумовой составляющей, накладываемой на моделируемый автодинный сигнал, и 1%-ная точность измерений амплитуд спектральных составляющих. Результаты расчета минимальной погрешности для различных расстояний до отражателя представлены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала при гармонической модуляции излучения лазера
The error in determining the distance by the spectrum of the autodyne signal at a harmonic wave modulation

| Заданное расстояние до объекта, м / Given the distance to the object, m | Погрешность, % / Error, % | Погрешность, мкм / Error, μm |
|---|---------------------------|------------------------------|
| 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 |

Как видно из табл. 2, погрешность измерений с ростом расстояния увеличивается от ~ 0.12% (120 мкм) до ~ 0.22% (1320 мкм).

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

Как видно из рис. 5, с ростом расстояния погрешность измерения методом пилообразной токовой модуляции значительно уменьшается, а при гармонической модуляции погрешность измерений увеличивается.

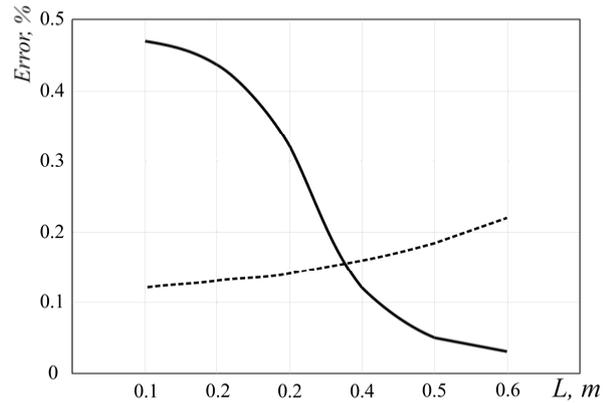


Рис. 5. Зависимости погрешностей определения расстояния для методов автодинного детектирования с пилообразной (—) и гармонической (----) токовой модуляцией

Fig. 5. Dependences of the distance determination errors for the methods with triangular (—) and harmonic (----) modulations

Экспериментальная часть

Измерения проводились на установке, блок-схема которой представлена на рис. 6. В состав установки входили частотно-модулированный полупроводниковый автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм 1. Излучение лазерного автодина фокусировалось на поверхность отражателя 4, закрепленного на трансляторе 5, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Модуляция длины волны излучения осуществлялась с помощью генератора сигналов, встроенного в лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS 3. Рабочий режим тока питания лазерного диода задавался блоком управления током питания 2.

Отраженное от внешнего отражателя излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником 6. Продетектированный с фотоприемника сигнал проходил через усилитель сигнала 7, фильтр переменного сигнала 8 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя 9 (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером 10. Параметр девиации частоты излучения лазерного диода ω_A измерялся с помощью спектрометра высокого разрешения SHR «Solar Laser Systems» (Белоруссия).

Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $V_1 = 100$ Гц посредством управления током питания лазера. Излучение лазер-

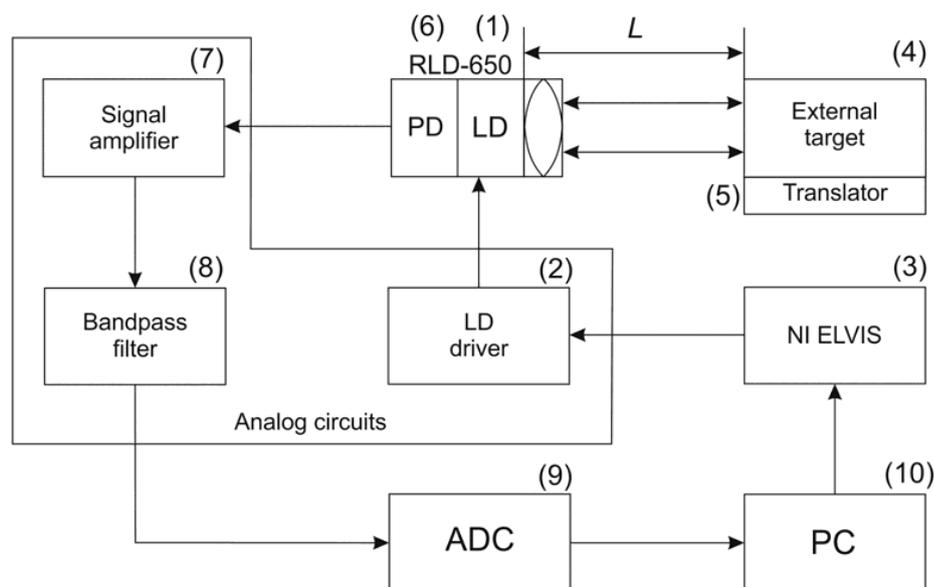


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазерной автодин, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – внешний отражатель, 5 – транслятор, 6 – фотоприемник, 7 – усилитель сигнала, 8 – полосовой фильтр, 9 – АЦП, 10 – компьютер

Fig. 6. Block diagram on the experimental setup: 1 – self-mixing laser, 2 – current supply control unit, 3 – the signal generator built into the virtual laboratory station NI ELVIS instruments, 4 – external target, 5 – translator, 6 – photo detector, 7 – signal amplifier, 8 – bandpass filter, 9 – analog-to-digital converter, 10 – computer

ного диода фокусировалось линзой с числовой апертурой $NA = 0.25$. Отражатель располагался в плоскости фокусировки лазерного пучка.

Проведенные ранее исследования показали, что роль шероховатости поверхности в переменной составляющей автодинного сигнала мала, поскольку изменения фазы при поперечных смещениях спекл-структуры на три порядка меньше изменения продольной составляющей фазы автодинного сигнала.

Как известно, максимальный коэффициент автодинного усиления лежит вблизи пороговых значений тока питания полупроводникового лазера. В связи с этим ток питания лазерного автодина задавался на уровне $1.2 I_{th}$ от значения порогового тока ($I_{th} = 25$ мА), при этом мощность излучения лазерного диода уменьшалась до 2 мВт при рабочей мощности 5 мВт.

Для уменьшения уровня обратной связи использовалась регулируемая расфокусировка пучка лазера, описанная в работе [46]. Используя наборы различных спектральных составляющих автодинного сигнала, определялся уровень обратной связи, который во время измерений не превышал значений $C < 0.15$. Для уменьшения величины шумовой составляющей лазерного

автодина использовалась фильтрация сигнала на частотах более 10 кГц (граничная частота $f_g = 10$ кГц).

Для увеличения точности измерений при модуляции тока по пилообразному закону была выбрана регулировка расстояния до отражателя, позволяющая добиться целого количества интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения тока лазерного диода.

Для увеличения точности измерений гармоническим методом использовалась процедура анализа автодинного сигнала, включающая регистрацию амплитуд спектральных составляющих и выбор пары таких составляющих, которые дают минимальную погрешность.

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

На рис. 8 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный в методе гармонической токовой модуляции при анало-

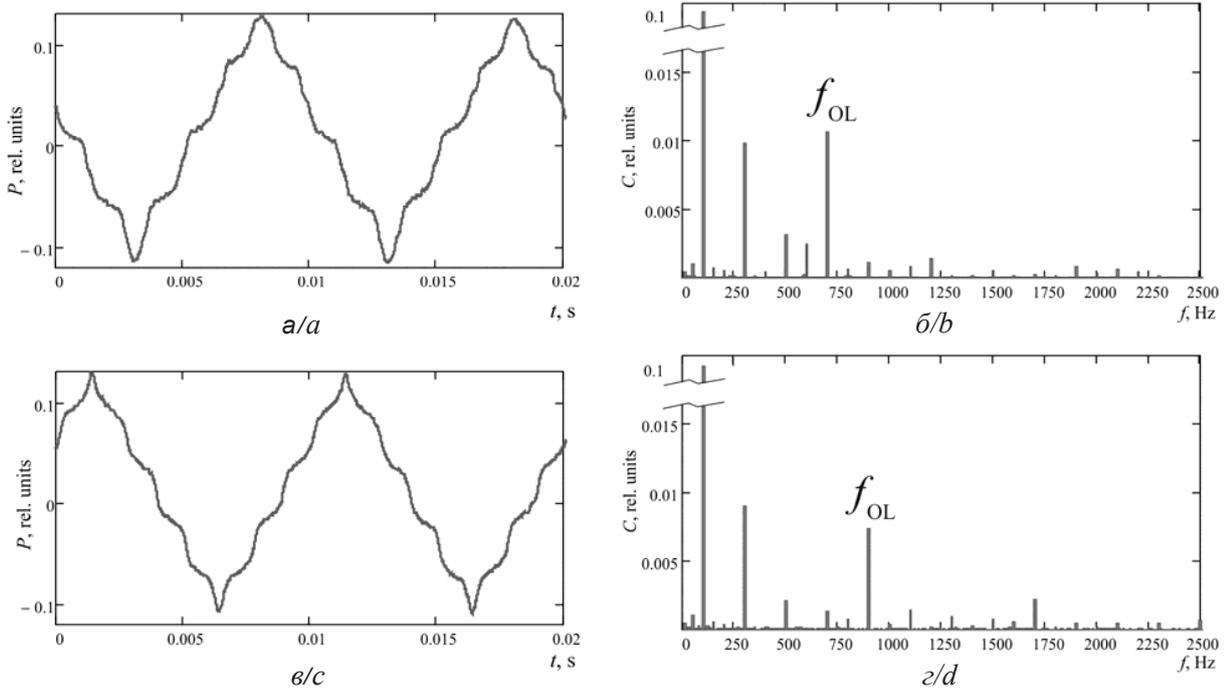


Рис. 7. Частотно-модулированные автодинные сигналы (а, в) и их спектры (б, г), полученные на экспериментальной установке методом пилообразной токовой модуляции на расстоянии 40 и 60 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода $\Delta\omega = 132 \cdot 10^8$ рад./с

Fig. 7. Frequency-modulated self-mixing signals (a, c) and their spectra (b, d) obtained in the method of triangular wave modulation at the distance of 40 and 60 cm, respectively, with the radiation frequency deviation equal to $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ rad/s

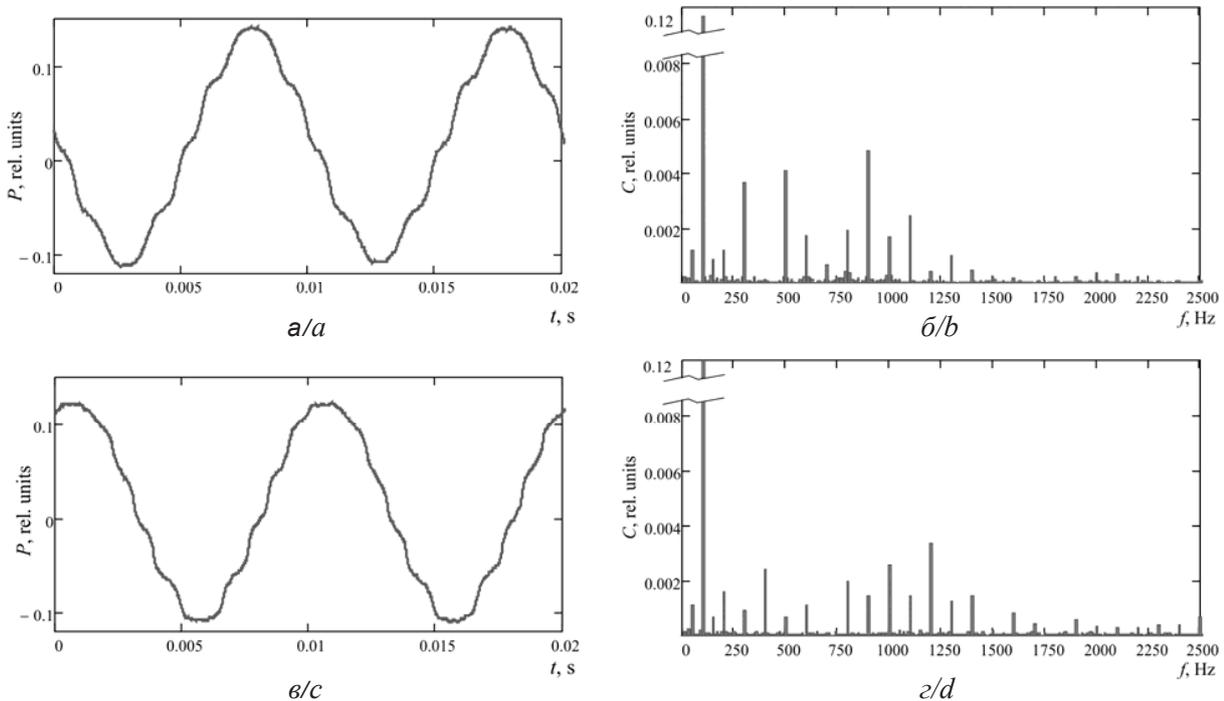


Рис. 8. Частотномодулированные автодинные сигналы (а, в) и их спектры (б, г), полученные на экспериментальной установке методом гармонической токовой модуляции на расстоянии 40 и 60 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода $\Delta\omega = 132 \cdot 10^8$ рад./с

Fig. 8. Frequency-modulated self-mixing signals (a, c) and their spectra (b, d) obtained in the method of harmonic wave modulation at the distance of 40 and 60 cm, respectively, with the frequency deviation equal to $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ rad/s



гичной девиации частоты излучения, равной $\Delta\omega = 132 \cdot 10^8$ рад./с на расстояниях 40 и 60 см.

Для определения разброса значений измеряемых расстояний проводились четырехкратные измерения на фиксированном расстоянии обоими представленными методами. На рис. 9 представлена зависимость разброса измеряемых значений от расстояния в диапазоне от 10 до 60 мм для обоих методов.

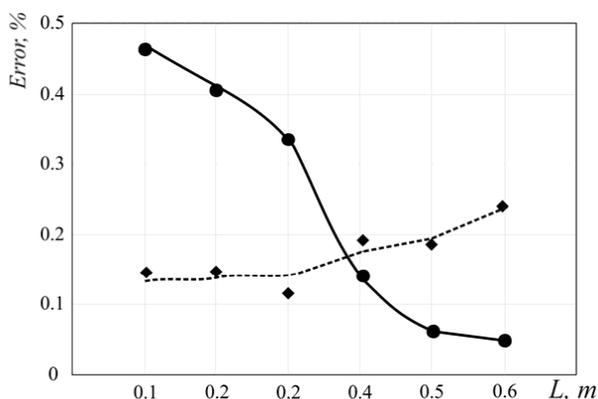


Рис. 9. Зависимости разброса измеряемых величин от расстояния в диапазоне от 10 до 60 мм для методов автодинного детектирования с пилообразной и гармонической токовой модуляцией

Fig. 9. Dependences of the dispersion of the measured values on the distance in the range from 10 mm to 60 mm for triangular and harmonic wave modulation

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.

Выводы

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

модуляции 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.

Полученные в данной работе оценки величин погрешностей могут быть уменьшены при использовании лазерных структур с распределенным брэгговским 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.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 8.7628.2017/БЧ).

Список литературы

1. Wang Y., Xie F., Ma S., Dong L. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry // Opt. Lasers Eng. 2017. Vol. 93, iss. 1. P. 164–170.
2. Sels S., Ribbens B., Bogaerts B., Peeters J. 3D model assisted fully automated scanning laser Doppler vibrometer measurements // Opt. Lasers Eng. 2017. Vol. 99, iss. 1. P. 22–30.
3. Bosch T., Lescure M. Optical distance measurement methods can technically be put into three categories : interferometry, time-of-flight and triangulation methods // Selected Papers on Laser Distance Measurement. SPIE Milestone Series. Bellingham : SPIE Optical Engineering Press. 1995. Vol. 115. P. 738.
4. Kilpelä A., Pennala R., Kostamovaara J. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements // Rev. Sci. Instrum. 2001. Vol. 72. P. 2197–2202.
5. Joohyung L., Young-Jin K., Keunwoo L., Sanghyun L., Seung-Woo K. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses // Nat. Photonics. 2010. Vol. 4. P. 716–720.



6. *Hintikka M., Kostamovaara J.* Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses // *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, № 3. P. 1047–1053.
7. *Ji Z., Leu M. C.* Design of optical triangulation devices // *Opt. Laser Technol.* 1989. Vol. 21, iss. 5. P. 339–341.
8. *Timothy A. C., Kenneth T. V. G., Lindsey N. E.* Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures // *Proceedings. Optical Testing and Metrology III: Recent Advances in Industrial Optical Inspection*. 1991. Vol. 1332. P. 474–486. DOI: 10.1117/12.51096
9. *Reza S. A., Khwaja T. S., Mazhar M. A., Niazi H. K., Nawab R.* Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control // *Appl. Opt.* 2017. Vol. 56, iss. 21. P. 5996–6006.
10. *Daendliker R., Hug K., Politch J., Zimmermann E.* High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry // *Optical Engineering*. 1995. Vol. 34, iss. 8. P. 2407–2412. DOI: 10.1117/12.205665
11. *Berkovic G., Shafir E.* Optical methods for distance and displacement measurements // *Adv. Opt. Photonics*. 2012. Vol. 4, iss. 4. P. 441–471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441
12. *Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M.* Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement // *Optical Engineering*. 2001. Vol. 40, iss. 1. P. 10–19.
13. *Deborah M., Kane K., Shore A.* Unlocking dynamical diversity : Optical feedback effects on semiconductor lasers. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2005. 339 p.
14. *Usanov D. A., Skripal A. V.* Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes // *Quantum Electronics*. 2011. Vol. 41, iss. 1. P. 86–94.
15. *Zhua W., Chenb Q., Wangb Y., Luob H., Wub H., Maa B.* Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror // *Opt. Lasers Eng.* 2018. Vol. 105. P. 150–158.
16. *Li D., Huang Z., Mo W., Ling Y., Zhang Z., Huang Z.* Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm // *Appl. Opt.* 2017. Vol. 56, iss. 31. P. 8584–8591. DOI: 10.1364/AO.56.008584
17. *Norgia M., Donati S.* A Displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2003. Vol. 52, iss. 6. P. 1765–1770.
18. *Xu J., Huang L., Yin S., Bingkun G., Chen P.* All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique // *Opt. Rev.* 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 40–45.
19. *Guo D., Shi L., Yu Y., Xia W., Wang M.* Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction // *Optics Express*. 2017. Vol. 25, iss. 25. P. 31394–31406. DOI: 10.1364/OE.25.031394
20. *Koelink M. H., Slot M., de Mul F. F. M., Greve J., Graaff R., Dassel A. C. M., Aarnoudse J. G.* Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser : theory // *Appl. Opt.* 1992. Vol. 31, iss. 18. P. 3401–3408. DOI: 10.1364/AO.31.003401
21. *Scalise L., Yu Y. G., Giuliani G., Plantier G., Bosch T.* Self-mixing laser diode velocimetry : Application to vibration and velocity measurement // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2004. Vol. 53, iss. 1. P. 223–232.
22. *Hao Lin, Junbao Chen, Wei Xia, Hui Hao, Dongmei Guo, Ming Wang.* Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating // *Optical Engineering* 2018. Vol. 57, iss. 5, № 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504
23. *Guo D., Jiang H., Shi L., Wang M.* Laser Self-Mixing Grating Interferometer for MEMS Accelerometer Testing // *IEEE Photonics J.* 2018. Vol. 10, iss. 1, № 6800609.
24. *Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю.* Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // *Письма в ЖТФ*. 2010. № 21. С. 78–84.
25. *Усанов Д. А., Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю.* Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера // *Нано- и микро-системная техника*. 2010. № 10. С. 51–54.
26. *Fleming M. W., Mooradian A.* Spectral characteristics of external cavity controlled semiconductor lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* 1981. Vol. QE-17. P. 44–59.
27. *Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B.* Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // *IEEE J. Quantum Electron.* 1986. Vol. 22, iss. 6. P. 762–773.
28. *Schunk N., Petermann K.* Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback // *IEEE J. Quantum Electron.* 1988. Vol. 24, iss. 7. P. 1242–1247.
29. *Сухарев А. Г., Ханартович А. П.* Режим гармонической модуляции излучения полупроводникового лазера с внешней обратной связью // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37, № 2. С. 149–153.
30. *Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T.* Laser diode self-mixing technique for sensing applications // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2002. Vol. 4, iss. 6. P. 283–294.
31. *Donati S.* Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements // *Laser Photonics Rev.* 2012. Vol. 6, iss. 3. P. 393–417. DOI: 10.1002/lpor.201100002
32. *Соболев В. С., Кащеева Г. А.* Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // *Автометрия*. 2008. Т. 44, № 6. С. 49–65.
33. *Gouaux F., Servagent N., Bosch T.* Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer // *Appl. Opt.* 1998. Vol. 37, iss. 28. P. 6684–6689. DOI: 10.1364/AO.37.006684
34. *Norgia M., Giuliani G., Donati S.* Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2007. Vol. 56, iss. 5. P. 1894–1900.
35. *Mourat G., Servagent N., Bosch T.* Distance measurement using the self-mixing effect in a three-electrode distributed Bragg reflector laser diode // *Optical Engineering*. 2000. Vol. 39, iss. 3. P. 738–743.
36. *Guo D., Wang M.* Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, iss. 9. P. 1486–1491.



37. Dehui Wang, Junfeng Zhou, Chenchen Wang, Jingang Wang, Hao Deng, Liang Lu. Measurement of the Absolute Distance inside an All Fiber DBR Laser by Self-Mixing Technique // International Conference on Optical and Photonics Engineering. 2016. Vol. 10250, № 1025022. DOI: 10.1117/12.2266819
38. Bi T., Wang C., Zhou J., Wang D., Chen Y., Yu B., Lu L. Research on the influence of laser-tuning characteristics on all-fiber distributed Bragg reflector self-mixing range finder // Optical Engineering. 2018. Vol. 57, iss. 5, № 051505. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051505
39. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // Appl. Opt. 2004. Vol. 43, iss. 21. P. 4189–4198.
40. Usanov D. A., Skripal A. V., Avdeev K. S. Determining distances to objects using a frequency-switched semiconductor laser autodyne // Tech. Phys. Lett. 2007. Vol. 33, iss. 11. P. 930–932.
41. Астахов Е. И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15, вып. 3. С. 12–18. DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-12-18
42. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I. Measurements of the nanovibration amplitude by a frequency-modulated laser autodyne // Tech. Phys. 2013. Vol. 58, iss. 12. P. 1856–1858.
43. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Астахов Е. И. Определение амплитуды нановибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 2. С. 184–188.
44. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Астахов Е. И., Добдин С. Ю. Регистрация наноперемещений зонда ближнеполевого СВЧ микроскопа с помощью полупроводникового лазерного автодина // Нано- и микро-системная техника. 2018. № 1. С. 3–10.
45. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I., Dobdin S. Y. Autodyne interferometry for range-finding under laser radiation wavelength modulation // Tech. Phys. Lett. 2016. Vol. 42. P. 919–922. DOI: 10.1134/S1063785016090121
46. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 2. С. 54–65.

Образец для цитирования:

Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С. Ю., Астахов Е. И., Костюченко И. Ю., Джафаров А. В. Методы автодинной интерферометрии расстояния при токовой частотной модуляции полупроводникового лазера // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 3. С. 189–201. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201

Methods of Autodyne Interferometry of the Distance by Injected Current Modulation of a Semiconductor Laser

D. A. Usanov, An. V. Skripal, S. Yu. Dobdin,
E. I. Astahov, I. S. Kostuchenko, A. V. Dzhaifarov

Dmitry A. Usanov, ORCID 0000-0002-1349-9264, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, usanovda@info.sgu.ru

Anatoly V. Skripal, ORCID 0000-0002-9080-0057, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Sergey Yu. Dobdin, ORCID 0000-0002-0801-4664, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, dobdivsy@info.sgu.ru

Elisey I. Astakhov, ORCID 0000-0002-8071-7436, LLC “EPAM Systems”, 37, Tankistov Str., Saratov, 410019, Russia, elisey.astakhov@gmail.com

Irina S. Kostyuchenko, ORCID 0000-0001-6141-3800, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, kleon.ira@mail.ru

Aleksey V. Dzhaifarov, ORCID 0000-0002-0588-3151, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, jafaralex@mail.ru

Background and Objectives: Two methods of distance interferometry for two types of wave modulation of laser radiation have been presented. The methods of triangular and harmonic wave modulation of a signal have been described. The advantages of the triangular wave modulation method in combination with the use of the frequency of the self-mixing signal spectrum, as well as the advantages of the harmonic wave modulation method in combination with the use of the amplitudes of the self-mixing signal spectrum have been shown. **Equipment:** The equipment includes a frequency-modulated semiconductor self-mixing laser diode RLD-650 on quantum-size structures with a diffraction-limited single spatial mode with the wavelength of 654 nm. **Results:** A comparative analysis of these methods of measuring the distance to the object has shown the advantages of the harmonic wave modulation of the laser diode at the distance of less than 35 cm, as well as the advantages of the triangular wave modulation method at distances of more than 40 cm. **Conclusion:** The results of computer simulation have shown that the accuracy of determining the distance at the harmonic wave modulation decreases with increasing the distance to the measured object. However, at small distances, its value is much smaller than at the triangular wave modulation of laser radiation.

Key words: distance interferometry, self-mixing laser diode, laser wavelength, harmonic modulation, triangular modulation.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science, state assignment no. 8.7628.2017/BCh.



References

1. Wang Y., Xie F., Ma S., Dong L. Review of surface profile measurement techniques based on optical interferometry. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 93, iss. 1, pp. 164–170.
2. Sels S., Ribbens B., Bogaerts B., Peeters J. 3D model assisted fully automated scanning laser Doppler vibrometer measurements. *Opt. Lasers Eng.*, 2017, vol. 99, iss. 1, pp. 22–30.
3. Bosch T., Lescure M. Optical distance measurement methods can technically be put into three categories: interferometry, time-of-flight and triangulation methods. *Selected Papers on Laser Distance Measurement. SPIE Milestone Series*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995, vol. 115, pp. 738.
4. Kilpelä A., Pennala R., Kostamovaara J. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, vol. 72, pp. 2197–2202.
5. Joohyung L., Young-Jin K., Keunwoo L., Sanghyun L., Seung-Woo K. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses. *Nat. Photonics*, 2010, vol. 4, pp. 716–720.
6. Hintikka M., Kostamovaara J. Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 3, pp. 1047–1053.
7. Ji Z., Leu M. C. Design of optical triangulation devices. *Opt. Laser Technol.*, 1989, vol. 21, iss. 5, pp. 339–341.
8. Timothy A. C., Kenneth T. V. G., Lindsey N. E. Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures. *Proceedings. Optical Testing and Metrology III: Recent Advances in Industrial Optical Inspection*, 1991, vol. 1332, pp. 474–486. DOI: 10.1117/12.51096
9. Reza S. A., Khwaja T. S., Mazhar M. A., Niazi H. K., Nawab R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, iss. 21, pp. 5996–6006.
10. Daendliker R., Hug K., Politch J., Zimmermann E. High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, iss. 8, pp. 2407–2412. DOI: 10.1117/12.205665
11. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements. *Adv. Opt. Photonics*, 2012, vol. 4, iss. 4, pp. 441–471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441
12. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement. *Optical Engineering*, 2001, vol. 40, iss. 1, pp. 10–19.
13. Deborah M., Kane K., Shore A. *Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2005. 339 p.
14. Usanov D. A., Skripal A. V. Measurement of micro- and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. *Quantum Electronics*, 2011, vol. 41, iss. 1, pp. 86–94.
15. Zhua W., Chenb Q., Wangb Y., Luob H., Wub H., Maa B. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror. *Opt. Lasers Eng.*, 2018, vol. 105, pp. 150–158.
16. Li D., Huang Z., Mo W., Ling Y., Zhang Z., Huang Z. Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm. *Appl. Opt.*, 2017, vol. 56, iss. 31, pp. 8584–8591. DOI: 10.1364/AO.56.008584
17. Norgia M., Donati S. A Displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2003, vol. 52, iss. 6, pp. 1765–1770.
18. Xu J., Huang L., Yin S., Bingkun G., Chen P. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique. *Opt. Rev.*, 2018, vol. 25, iss. 1, pp 40–45.
19. Guo D., Shi L., Yu Y., Xia W., Wang M. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple-diffraction. *Optics Express*, 2017, vol. 25, iss. 25, pp. 31394–31406. DOI: 10.1364/OE.25.031394
20. Koelink M. H., Slot M., M. de Mul F. F. M., Greve J., Graaff R., Dassel A. C. M., Aarnoudse J. G. Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory. *Appl. Opt.*, 1992, vol. 31, pp. 3401–3408. DOI: 10.1364/AO.31.003401
21. Scalise L., Yu Y. G., Giuliani G., Plantier G., Bosch T. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2004, vol. 53, iss. 1, pp. 223–232.
22. Hao Lin, Junbao Chen, Wei Xia, Hui Hao, Dongmei Guo, Ming Wang. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, iss. 5, 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504
23. Guo D., Jiang H., Shi L. Wang M. Laser Self-Mixing Grating Interferometer for MEMS Accelerometer Testing. *IEEE J. Photonics*, 2018, vol. 10, iss. 1, 6800609.
24. Usanov D. A., Skripal A. V., Dobdin S. Yu. Determining acceleration from micro- and nanodisplacements measured using autodyne signal of semiconductor laser on quantum-confined structures. *Tech. Phys. Lett.*, 2010, vol. 36, iss. 11, pp. 1009–1011 (in Russian).
25. Usanov D. A., Skripal A. V., Dobdin S. Yu. The acceleration determination at unevenly accelerated at micro- and nanodisplacements by the autodyne signal of semiconductor laser. *Journal of nano and microsystem technique*, 2010, no. 10, pp. 51–54 (in Russian).
26. Fleming M. W., Mooradian A. Spectral characteristics of external cavity controlled semiconductor lasers. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, vol. QE-17, pp. 44–59.
27. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser. *IEEE J. Quantum Electron*, 1986, vol. 22, iss. 6, pp. 762–773.
28. Schunk N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback. *IEEE J. Quantum Electron*, 1988, vol. 24, iss. 7, pp. 1242–1247.



29. Sukharev A. G., Napartovich A. P. Harmonic modulation of radiation of an external-feedback semiconductor laser. *Quantum Electronics*, 2007, vol. 37, no. 2, pp. 149–153 (in Russian)
30. Giuliani G, Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, vol. 4, iss. 6, pp. 283–294.
31. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, iss. 3, pp. 393–417. DOI: 10.1002/lpor.201100002
32. Sobolev V. S., Kashcheeva G. A. Self-mixing frequency-modulated laser interferometry. *Optoelectr. Instrum. Data Process.*, 2008, vol. 44, no. 6, pp. 49–65.
33. Gouaux F., Servagent N., Bosch T. Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer. *Appl. Opt.*, 1998, vol. 37, iss. 28, pp. 6684–6689. DOI: 10.1364/AO.37.006684
34. Norgia M., Giuliani G., Donati S. Absolute distance measurement with improved accuracy using laser diode self-mixing interferometry in a closed loop. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2007, vol. 56, iss. 5, pp. 1894–1900.
35. Mourat G., Servagent N., Bosch T. Distance measurement using the self-mixing effect in a three-electrode distributed Bragg reflector laser diode. *Optical Engineering*, 2000, vol. 39, iss. 3, pp. 738–743.
36. Guo D., Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement. *Appl. Opt.*, 2007, vol. 46, iss. 9, pp. 1486–1491.
37. Dehui Wang, Junfeng Zhou, Chenchen Wang, Jingang Wang, Hao Deng, Liang Lu. Measurement of the Absolute Distance inside an All Fiber DBR Laser by Self-Mixing Technique. *International Conference on Optical and Photonics Engineering*, 2016, vol. 10250, 1025022. DOI: 10.1117/12.2266819
38. Bi T., Wang C., Zhou J., Wang D., Chen Y., Yu B., Lu L. Research on the influence of laser-tuning characteristics on all-fiber distributed Bragg reflector self-mixing range finder. *Optical Engineering*, 2018, vol. 57, iss. 5, 051505. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051505
39. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference. *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, iss. 21, pp. 4189–4198.
40. Usanov D. A., Skripal A. V., Avdeev K. S. Determining distances to objects using a frequency-switched semiconductor laser autodyne. *Tech. Phys. Lett.*, 2007, vol. 33, iss. 11, pp. 930–932.
41. Astahov E. I., Usanov D. A., Skripal A. V., Dobdin S. Yu. Self-mixing Interferometry of Distance at Wavelength Modulation of Semiconductor Laser. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2015, vol. 15, iss. 3, pp. 12–18. DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-12-18
42. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I. Measurements of the nanovibration amplitude by a frequency-modulated laser autodyne. *Tech. Phys.*, 2013, vol. 58, iss. 12, pp. 1856–1858.
43. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I. Determination of nanovibration amplitudes using frequency-modulated semiconductor laser autodyne. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, no. 2, pp. 184–188 (in Russian)
44. Usanov D. A., Skripal A. V., Astakhov E. I., Dobdin S. Yu. Nanodisplacement registration of the near-field microwave microscope using a semiconductor laser autodyne. *Journal of nano- and microsystem technique*, 2018, no. 1, pp. 3–10 (in Russian).
45. Usanov D. A., Skripal A. V., Astahov E. I., Dobdin S. Yu. Autodyne interferometry for range-finding under laser radiation wavelength modulation. *Tech. Phys. Lett.*, 2016, vol. 42, pp. 919–922. DOI: 10.1134/S1063785016090121
46. Usanov D. A., Skripal A. V., Avdeev K. S. Spectrum of semiconductor laser autodyne at focusing radiation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2009, vol. 17, no. 2, pp. 54–65.

Cite this article as:

Usanov D. A., Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Astahov E. I., Kostuchenko I. S., Dzhafarov A. V. Methods of Autodyne Interferometry of the Distance by Injected Current Modulation of a Semiconductor Laser. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2018, vol. 18, iss. 3, pp. 189–201 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-3-189-201
