

АВТОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.А. Усанов¹, А.В. Скрипаль¹, Е.И. Астахов¹, И.С. Костюченко¹, С.Ю. Добдин¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Аннотация

Показано расширение возможностей метода токовой модуляции длины волны лазерного излучения за счёт использования гармонической модуляции. 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. Сравнительный анализ методов измерения расстояния до объекта при существующих возможностях модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера показал преимущества измерения расстояний до 30 см методом гармонической токовой модуляции лазерного диода, а на расстояниях более 50 см – методом пилообразной токовой модуляции.

Ключевые слова: автодин, автодинное детектирование, полупроводниковый лазер, интерференция, измерение расстояния, гармоническая модуляция.

Цитирование: Усанов, Д.А. 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.

Введение

В работах [1, 2] приведено обоснование возможности успешного использования лазерных методов, основанных на токовой модуляции лазерного излучения, для определения расстояния до объекта. Применение полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает возможности создания малогабаритных измерительных систем. Одним из вариантов таких измерителей являются полупроводниковые лазерные автодинные интерферометры с оптической обратной связью [3, 4]. С помощью таких устройств можно решать задачи определения характеристик нановибраций и микросмещений, расстояния до объекта, скорости и ускорения, в том числе с использованием токовой модуляции излучения полупроводникового лазера [5–8].

Одним из параметров, влияющих на вид автодинного сигнала, является уровень внешней оптической обратной связи. В автодинной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному с развязкой от источника излучения, возможен при низких уровнях обратной связи [9–11].

В [2, 5, 6] описано применение пилообразной токовой модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера. Изменение длины волны лазера $\Delta\lambda$ всего на 0,003 нм позволяет изменить фазу отражённого от объекта излучения на 2 радиан на расстоянии более 10 см.

В [12] было предложено использовать метод измерения расстояния, основанный на использовании модуляции длины волны лазерного излучения по гармоническому закону. Целью настоящей работы явился сравнительный анализ методов измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при этих различных типах токовой модуляции длины волны излучения.

1. Метод, основанный на использовании пилообразной модуляции излучения лазерного автодина

Излучение лазерного автодина направляется на измеряемый объект, а часть отражённого излучения попадает в резонатор полупроводникового лазера, где оно интерферирует с исходным излучением. В силу конечности скорости света отражённое 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 отражённого от объекта излучения, что приводит к изменению его мощности. 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 счёт пилообразной токовой модуляции лазерного диода с наложенной на неё низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счёт изменения фазы отражённого от объекта лазерного излучения.

На рис. 1 приведён смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера $\Delta\lambda = 0,003$ нм, расстоянии до объекта, равном 40 см, и уровне обратной связи $C \ll 1$.

Расстояние до объекта в случае пилообразной модуляции определяется соотношением:

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

где L – расстояние от излучателя до объекта; N – количество пиков автодинного сигнала на участке подъёма или спада; λ – длина волны излучения лазера; $\Delta\lambda$ – изменение длины волны на одном периоде.

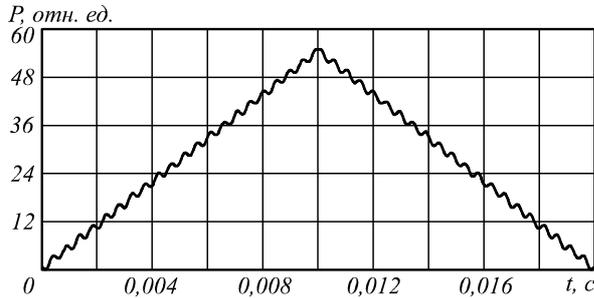


Рис. 1. Смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера $\Delta\lambda = 0,003$ нм и заданном расстоянии 40 см

Расстояние можно также определить с помощью так называемой частоты биения автодинного сигнала, используя соотношение [4, 5]:

$$L = \frac{\lambda^2}{4(d\lambda/dr)} (f_{up} + f_{down}), \quad (2)$$

где f_{up} – частота подъема, а f_{down} – частота спада полученного сигнала. При использовании симметричной пилообразной токовой модуляции (рис. 1), при которой время нарастания и убывания амплитуды тока выбирают одинаковыми, автодинный сигнал приобретает симметричный вид на участках подъёма и спада, и соотношение (2) при $f_{up} = f_{down}$ принимает вид:

$$L = \frac{\lambda^2}{4(d\lambda/dr)} 2f_{up}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведён спектр автодинного сигнала, изображённого на рис. 1. На низких частотах наблюдается спектр линейного нарастания или убывания пилообразной составляющей автодинного сигнала. На высоких частотах (более 200 Гц) наблюдается спектр гармонической модуляционной составляющей автодинного сигнала. В этой части спектра отчетливо выделяется частота автодинного сигнала с наибольшей амплитудой, соответствующая частоте f_{up} .

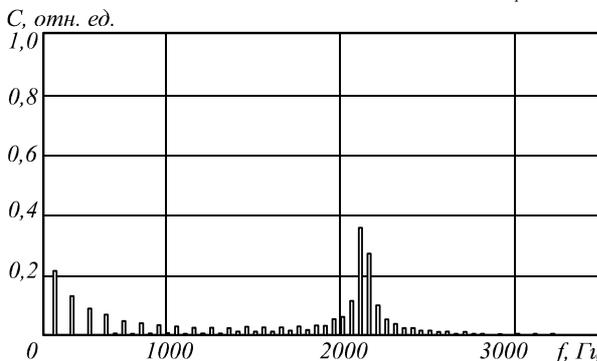


Рис. 2. Спектр автодинного сигнала, изображённого на рис. 1

Как видно из рис. 2, при токовой модуляции длины волны лазерного излучения частота интерференционных максимумов может быть измерена с точностью, определяемой расстоянием до ближайшего спутника

максимальной гармоники спектра автодинного сигнала f_{up} . Наличие спутников объясняется нецелым количеством интерференционных максимумов, укладывающихся на линейном участке изменения тока лазерного диода. Таким образом, одна и та же частота с максимальной амплитудой в спектре автодинного сигнала будет соответствовать некоторому диапазону расстояний, который и определяет погрешность метода.

Результаты компьютерного моделирования для различных заданных расстояний, а также погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала в процентах показана в табл. 1.

Табл. 1. Погрешность определения расстояния при пилообразной модуляции излучения лазерного автодина

Заданное расстояние до объекта, м	Расчитанное 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

Как видно из результатов, приведённых в табл. 1, данный метод с точностью до 1,1 процента позволяет определять расстояние при значениях заданного расстояния более 50 см. При меньших расстояниях до объекта погрешность определения расстояния при пилообразной токовой модуляции возрастает до 7%.

2. Метод, основанный на использовании гармонической модуляции излучения лазерного автодина

При гармонической модуляции тока накачки полупроводникового лазерного автодина, как и в предыдущем случае, сигнал с фотодетектора приобретает вид высокоамплитудной гармонической составляющей за счёт токовой модуляции лазерного диода с наложенной на неё низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счёт изменения фазы отражённого от объекта лазерного излучения. При воздействии отражённого 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]:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega(j(t))\tau_0(t)), \quad (4)$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, не зависящая от расстояния до внешнего отражателя, P_2 – амплитудная составляющая мощности, зависящая от фазового набега волны $\omega(j(t))\tau_0(t)$ в системе с внешним отражателем, τ_0 – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, $\omega(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$ и уровня обратной связи.

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

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(2\pi\nu_1 t),$$

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

где ω_0 – собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода; ω_A – 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 частотномодулированного полупроводникового лазера (4) запишется в виде:

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t) + P_2 \cos(\omega_0 \tau_0 + \omega_A \tau_0 \sin(2\pi\nu_1 t)),$$

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

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n :

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

и в ряд Фурье с коэффициентами разложения a_n и b_n :

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

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.

Вводя коэффициенты C_n , равные по модулю чётным и нечётным спектральным составляющим разложения ряда Фурье и определяемые как

$$S_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2}, S_{2n+1} = \sqrt{a_{2n+1}^2 + b_{2n+1}^2}$$

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

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

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

Моделирование автодинного сигнала с использованием данного метода проводилось при параметрах:

$\lambda = 650$ нм, амплитуда отклонения частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\omega_A = 10^{10}$ 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 $C \ll 1$.

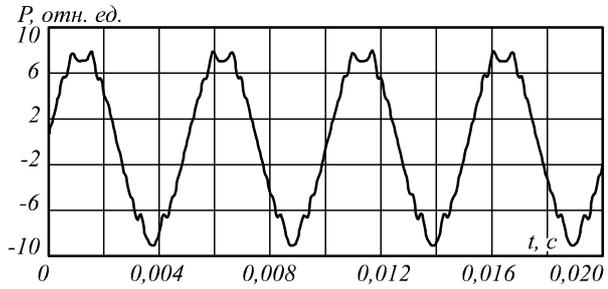


Рис. 3. Зависимость мощности излучения лазерного диода от времени

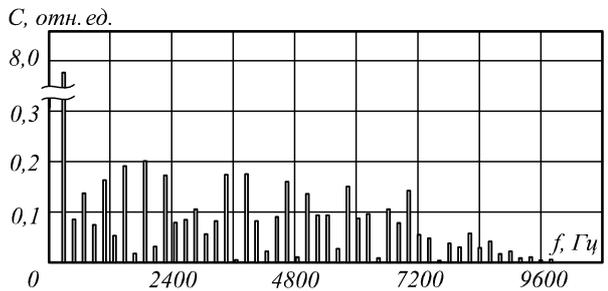


Рис. 4. Спектр автодинного сигнала, изображённого на рис. 3

Для определения расстояния до объекта L , входящего в параметр σ , используем отношение для $2n$ и $2n+2$ и отношение для $2n+1$ и $2n+3$ спектральных гармоник:

$$\frac{S_{2n}}{S_{2n+2}} = \frac{J_{2n}(\sigma)}{J_{2n+2}(\sigma)},$$

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

Решение полученных уравнений (11) и (12) относительно неизвестного параметра $\sigma = \omega_A \tau_0$ 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:

$$L = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma}{\omega_A}.$$

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 модуляции длины волны лазерного излучения происходит неравномерно, с изменяющейся частотой, формируемой из-за изменения длины волны лазерного излучения с переменной скоростью. Частоты спектральных составляющих авто-

динного сигнала оказываются кратными частоте токовой модуляции. Поэтому для определения расстояния до отражателя используются амплитуды спектральных составляющих автодинного сигнала.

На измерение величины расстояния до отражателя будет существенным образом влиять точность определения амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала, которая, в свою очередь, зависит от зашумлённости автодинного сигнала.

Компьютерное моделирование погрешности определения расстояния до объекта в методе с гармонической модуляцией длины волны лазерного излучения проводилось при различных расстояниях с учётом влияния шумов измерительной системы на амплитуды спектральных составляющих, входящих в соотношения (11) и (12). В расчётах задавалась 10% величина шумовой составляющей, накладываемой на моделируемый автодинный сигнал, на разных расстояниях от излучателя до отражателя. Результаты расчёта средней погрешности для различных расстояний представлены в табл. 2.

Табл. 2. Погрешность определения расстояния при гармонической модуляции излучения лазерного автодина

Заданное расстояние до объекта, м	Расчитанное расстояние до объекта, м	Погрешность, %
0,1	0,1035	3,55
0,2	0,1957	2,17
0,3	0,2949	1,70
0,4	0,4054	1,35
0,5	0,5066	1,32
0,6	0,6079	1,33

На рис. 5 приведена зависимость средней погрешности определения расстояния до объекта при различных значениях для двух методов токовой модуляции длины волны излучения лазерного диода.

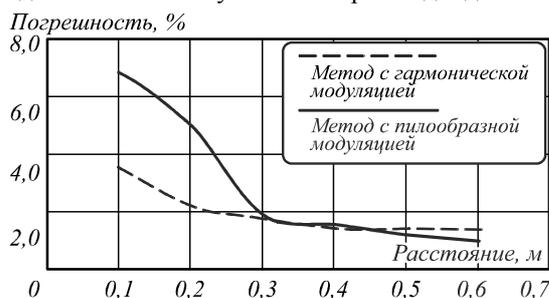


Рис. 5. Зависимость средней погрешности от измеряемого расстояния для двух методов токовой модуляции длины волны излучения лазерного диода

Заключение

Результаты компьютерного моделирования показали, что погрешность определения расстояния в методе с гармонической модуляцией уменьшается с увеличением расстояния до измеряемого объекта, однако при небольших расстояниях её величина значительно меньше, чем в методе определения расстояния при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения.

На рис. 5 наглядно показано, что погрешность при малых расстояниях в методе с пилообразной модуляцией тока более чем в два раза больше, чем в методе с гармонической токовой модуляцией. На расстояниях от 30 см до 50 см точность обоих методов практически идентична. С увеличением расстояния погрешность метода с пилообразной модуляцией становится меньше, чем у метода с гармонической модуляцией. Последнее объясняется тем, что при измерениях амплитуд спектральных составляющих с увеличением их числа точность не увеличивается, а при измерениях частоты количество периодов повышает точность измерений.

Таким образом, при измерениях расстояний до 30 см более высокую точность обеспечивает метод с гармонической токовой модуляцией, а при измерениях расстояний, больших 50 см, более высокую точность даёт метод с пилообразной токовой модуляцией.

Благодарности

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

Литература

1. **Amann M.C.** Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement / M.C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllylae, M. Rioux // *Optical Engineering*. – 2001. – Vol. 40, № 1. – P. 10–19. – DOI: 10.1117/1.1330700.
2. **Соболев В.С.** Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией / В.С. Соболев, Г.А. Кашеева // *Автометрия*. – 2008. – Т. 44, № 6. – С. 49–65.
3. **Усанов Д.А.** Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // *Квантовая электроника*. – 2011. – Т. 41, № 1. – С. 86–94.
4. **Giuliani G.** Laser diode self-mixing technique for sensing applications / G. Giuliani, M. Norgia, S. Donati, T. Bosch // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. – 2002. – Vol. 4, No 6. – P. S283-S294.
5. **Norgia M.** Absolute Distance Measurement with Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop / M. Norgia, G. Giuliani, S. Donati // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. – 2007. – Vol. 56, Issue 5. – P. 1894-1900. – DOI: 10.1109/TIM.2007.904551.
6. **Guo D.** Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement / D. Guo, M. Wang // *Applied Optics*. – 2007. – Vol. 46, Issue 9. – P. 1486-1491. - DOI: 10.1364/AO.46.001486.
7. **Усанов Д.А.** Определение амплитуды нановибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов // *Квантовая электроника*. – 2014. – Т. 44, № 2. – С. 184-188.
8. **Scalise L.** Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement / L. Scalise, Y. Yu, G. Giuliani, G. Plantier, T. Bosch // *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. – 2004. – Vol. 53, Issue 1. – P. 223-232. – DOI: 10.1109/TIM.2003.822194.
9. **Kane, D.M.** Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers / D.M. Kane, K.A. Shore. – Chich-

- ester. John Wiley and Sons, Ltd., 2005. – 356 p. – ISBN: 978-0-470-85619-2.
10. **Olesen H.** Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser / H. Olesen, J. Osmundsen, B. Tromborg // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1986. – Vol. QE-22, Issue 6. – P. 762-773. – DOI: 10.1109/JQE.1986.1073061.
11. **Schunk N.** Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback / N. Schunk, K. Petermann // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1988. – Vol. 24, No 7. – P. 1242-1247. – DOI: 10.1109/3.960.
12. **Усанов Д.А.** Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, С.Ю. Добдин // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. – 2015. – Т. 15, Вып. 3. – С. 12-18. – DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-12-18.

Сведения об авторах

Усанов Дмитрий Александрович, 1943 года рождения, в 1965 году окончил Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика», работает заведующим кафедрой физики твердого тела в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов: ближнеполевая СВЧ-микроскопия, фотонные структуры, СВЧ и лазерные автодины, микро- и наноструктуры, медицинская физика. E-mail: usanovda@imfo.sgu.ru.

Скрипаль Анатолий Владимирович, 1960 года рождения, в 1982 году окончил Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Полупроводники и диэлектрики», работает заведующим кафедрой медицинской физики в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов: лазерная физика, биотехнические системы, когерентная оптика, медицинская физика. E-mail: skripalav@imfo.sgu.ru.

Астахов Елисей Игоревич, 1989 года рождения, в 2012 году окончил магистратуру по направлению «Электроника и микроэлектроника» и в 2016 году окончил аспирантуру Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Твердотельная электроника», работает ассистентом кафедры медицинской физики в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов: лазерная физика, радиофизика, когерентная оптика, медицинская физика. E-mail: elisey.astakhov@gmail.com.

Костюченко Ирина Сергеевна, 1992 года рождения, в 2009 году окончила Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Нанотехнологии в электронике». С 2009 по настоящее время обучается в аспирантуре по специальности «Радиоэлектроника, электротехника и системы связи». Область научных интересов: лазерные автодины, лазерная физика, когерентная оптика. E-mail: kleon.ira@mail.ru.

Добдин Сергей Юрьевич, 1986 года рождения, в 2008 году окончил Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского по специальности «Медицинская физика», работает доцентом кафедры физики твердого тела в Саратовском национальном исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского. Область научных интересов: лазерная физика, биомеханика, когерентная оптика, медицинская физика. E-mail: sergant1986@yandex.ru.

ГРПТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 25 июня 2017 г. Окончательный вариант – 2 октября 2017 г.

SELF-MIXING INTERFEROMETRY FOR DISTANCE MEASUREMENT USING A SEMICONDUCTOR LASER WITH CURRENT-MODULATED WAVELENGTH

D.A. Usanov¹, A.V. Skripal¹, E.I. Astakhov¹, I.S. Kostuchenko¹, S.Yu. Dobdin¹
¹Saratov State University, Saratov, Russia

Abstract

The capabilities of the method of current-modulated laser wavelength are shown to be extended by using harmonic modulation. Advantages of the sawtooth modulation method associated with using the frequency measurements of the interference signal as an information parameter have been researched. Advantages of the harmonic-type modulation based on the use of measurement results for spectral component amplitudes of the interference signal for distance determination have also been investigated. A comparative analysis of methods for absolute distance measurements at the existing capabilities of semiconductor laser wavelength modulation has demonstrated the benefits of the harmonic modulation of laser diode current for distances under 30 cm, showing the sawtooth current modulation to work better for distances greater than 50 cm.

Keywords: semiconductor laser, self-mixing interferometry, distance measurement, wavelength modulation.

Citation: Usanov DA, Skripal AV, Astakhov EI, Kostuchenko IS, Dobdin SYu. Self-mixing interferometry for distance measurement using a semiconductor laser with current-modulated wavelength. *Computer Optics* 2018; 42(1): 54-59. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-54-59.

Acknowledgements: The work was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state task # 8.7628.2017).

Reference

- [1] Amann MC, Bosch T, Lescure M, Myllylae R, Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement. *Opt Eng* 2001; 40(1): 10-19. DOI: 10.1117/1.1330700.
- [2] Sobolev VS, Kascheeva GA. Self-Mixing Frequency-Modulated Laser Interferometry. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing* 2008; 44(6): 519-529. DOI: 10.3103/S8756699008060058.
- [3] Usanov DA, Skripal AV. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. *Quantum Electronics* 2011; 41(1): 86-94. DOI: 10.1070/QE2011v041n01ABEH014386.
- [4] Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing applications. *J Opt A: Pure Appl Opt* 2002; 4(6): S283-S294.
- [5] Norgia M, Giuliani G, Donati S. Absolute Distance Measurement With Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement* 2007; 56(5): 1894-1900. DOI: 10.1109/TIM.2007.904551.
- [6] Guo D, Wang M. Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement. *Appl Opt* 2007; 46(9): 1486-1491. DOI: 10.1364/AO.46.001486.
- [7] Usanov D.A., Skripal A.V., Astakhov E.I. Determination of nanovibration amplitudes using frequency-modulated semiconductor laser autodyne. *Quantum Electronics* 2014; 44(2): 184-188. DOI: 10.1070/QE2014v044n02ABEH015176.
- [8] Scalise L, Yu Y, Giuliani G, Plantier G, Bosch T. Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement* 2004; 53(1): 223-232. DOI: 10.1109/TIM.2003.822194.
- [9] Kane DM, Shore KA. *Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers*. Chichester: John Wiley and Sons, Ltd.; 2005. ISBN: 978-0-470-85619-2.
- [10] Olesen H, Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser. *IEEE J Quantum Electron* 1986; QE-22(6): 762-773. DOI: 10.1109/JQE.1986.1073061.
- [11] Schunk N, Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback. *IEEE J Quantum Electron* 1988; 24(7): 1242-1247. DOI: 10.1109/3.960.
- [12] Usanov DA, Skripal AV, Astakhov EI, Dobdin SU. Self-mixing interferometry of distance at wavelength modulation of semiconductor [In Russian]. *Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Physics* 2015; 15(3): 12-18. DOI: 10.18500/1817-3020-2015-15-3-12-18.

Author's information

Dmitry A. Usanov, was born in 1943. In 1965 he graduated from Saratov State University specialized on Radio-physics, works as head of Solid State Physics department at Saratov State University. Research interests: near-field microwave microscopy, photonic structures, microwave and laser autodynes devices, micro- and nanostructures, medical physics. E-mail: usanovda@info.sgu.ru.

Anatoly V. Skripal, was born in 1960. In 1982 he graduated from Saratov State University specialized on Semiconductors and Dielectrics, works as head of the Medical Physics department at Saratov State University. Research interests: laser physics, biotechnical systems, coherent optics, medical physics. E-mail: skripalav@info.sgu.ru.

Elisey I. Astakhov, was born in 1989. In 2012 he had graduated from Saratov State University specialized on Electronics and Microelectronics, works as an assistant in the Medical Physics department at the Saratov State University. Research interests: laser physics, coherent optics, medical physics. E-mail: elisey.astakhov@gmail.com.

Irina S. Kostuchenko, was born in 1992. From 2009 to the present, she is a post-graduate student in the field of radio electronics, electrical engineering and communication systems. Research interests: laser autodyne, laser physics, optics. E-mail: kleon.ira@mail.ru.

Sergey Yu. Dobdin, was born in 1986. In 2008 he graduated from Saratov State University specialized on Medical Physics, works as an associate professor of Solid State Physics department at Saratov State University. Research interests: laser physics, biotechnical systems, coherent optics, medical physics. E-mail: sergant1986@ya.ru.

Received June 25, 2017. The final version – October 2, 2017.