

Пределные возможности автодинной интерферометрии расстояния при пилообразной модуляции длины волны полупроводникового лазера

Д.А. Усанов¹, А.В. Скрипаль¹, С.Ю. Добдин¹, А.В. Джафаров¹, И.С. Соколенко¹

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Аннотация

В работе анализируется автодинный интерференционный метод измерения расстояния при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения. Определены условия, при которых расстояние, полученное из спектра смоделированного автодинного сигнала, совпадает с заданным при компьютерном моделировании. Теоретически обосновываются предельные возможности метода при увеличении девиации длины волны излучения лазера. Оценка предельных возможностей метода измерения расстояния по спектру автодинного сигнала составила 10 мкм на длине волны 650 нм при величине девиации лазерного излучения 5 нм. Обсуждаются трудности получения предельных значений точности измерения расстояния, связанные с нелинейной зависимостью длины волны излучения лазерного диода от его тока питания и необходимостью анализа автодинного сигнала на высоких частотах.

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

Цитирование: Усанов, Д.А. Пределные возможности автодинной интерферометрии расстояния при пилообразной модуляции длины волны полупроводникового лазера / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин, А.В. Джафаров, И.С. Соколенко // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 796-802. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-796-802.

Введение

Определение абсолютного расстояния с помощью полупроводникового лазера реализуется по задержке лазерного импульса [1–4], методами триангулометрии [5–7] и интерферометрии [8–9].

Наибольшие перспективы создания миниатюрного измерительного устройства демонстрирует фазовый метод, реализуемый на лазерных автодинах с модуляцией длины волны лазерного излучения [10, 11]. С помощью лазерных автодинов удалось определять характеристики нановибраций [12–14] и микроперемещений [15–17], величину скорости [18–20] и ускорения [21–23].

На параметры автодинного сигнала влияет уровень внешней оптической обратной связи [24–26]. В автодинной системе режим, при котором автодинный сигнал аналогичен интерференционному с развязкой от источника излучения, возможен при низких уровнях обратной связи [11, 27].

Измерения абсолютных расстояний по частоте модуляции фазы автодинного сигнала за счёт частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW) начинались с очень низких значений точности (несколько миллиметров) [30] и достигли в настоящее время величин нескольких сотен и даже десятков микрон [10, 28, 29].

Основной прогресс в повышении точности измерения абсолютных расстояний связан с расширением диапазона девиации длины волны лазера от сотых долей нанометра до нескольких нанометров [28, 29]. Такие величины девиации получаются благодаря изменению тока питания лазерного диода в широких пределах. Это приводит к нелинейной зависимости длины волны излучения лазерного диода от его тока

питания и необходимости учёта её при проведении измерений расстояния.

Целью работы явилось теоретическое обоснование предельной точности измерений абсолютного расстояния при пилообразной модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера.

1. Автодинная интерферометрия при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения

В отличие от интерференции волн по схеме Майкельсона в автодине происходит интерференция падающей и отражённой волн. В результате для лазерного излучения мы имеем новый резонатор, в котором возникает стоячая волна, а в зависимости от длины этого резонатора наблюдается усиление или ослабление собственного излучения лазерного диода. При модуляции длины волны лазерного излучения на внешнем фотоприёмнике будет наблюдаться модуляция интенсивности излучения лазерного диода.

Хорошо известное выражение для интерференции двух волн может быть записано в виде

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta), \quad (1)$$

где I_1 и I_2 – интенсивности падающей и отражённой волн, θ – разность фаз этих волн. При регистрации автодинного сигнала в случае, когда величина изменения фазы превышает величину π , автодинный сигнал может быть приведён к зависимости только от фазы сигнала вида:

$$P = \cos(\theta), \quad (2)$$

где $\theta = \omega(j(t))\tau$, τ – время обхода лазерным излучением расстояния до объекта, $\omega(j(t))$ – частота излуче-

ния лазерного диода, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$.

При модуляции тока питания лазера $j(t)$ во внешнем резонаторе автодина могут выполняться условия, когда на длине внешнего резонатора укладывается целое число полуволн. В этом случае экстремумы интенсивности интерферирующих волн будут наблюдаться при условии:

$$P = \cos(\omega t) = \pm 1, \tag{3}$$

где

$$\omega \tau = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau = \frac{\pi}{2} n, \text{ при } n = 0, 1, 2, 3... \tag{4}$$

При девиации длины волны на величину $\Delta\lambda$ максимум интенсивности интерферирующих волн будет наблюдаться при условии:

$$\frac{2\pi c}{\lambda + \Delta\lambda} \tau = \frac{\pi}{2} (n - 1). \tag{5}$$

При этом для расстояний $L = c\tau$, соответствующих условиям равенства (3) и (4), будут выполняться соотношения:

$$L = n\lambda / 4 \text{ и } L = (n - 1)(\lambda + \Delta\lambda) / 4. \tag{6}$$

Выполнение условий (6) позволяет получить выражение для расстояния до отражателя, при котором будет наблюдаться равенство фаз в наблюдаемом окне автодинного сигнала:

$$L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda} \cdot n. \tag{7}$$

Заданное соотношением (7) расстояние до объекта мы назовем равнофазным.

2. Компьютерное моделирование при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения

Поскольку при модуляции тока питания лазерного диода происходит изменение его мощности излучения, моделирование будем проводить при учёте вклада в автодинный сигнал амплитудных составляющих мощности P_1 и P_2 [30, 31]:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega(j(t))\tau_0(t)), \tag{8}$$

где $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, зависящая от тока питания лазерного диода, P_2 – составляющая мощности, зависящая от величины отражённой волны через коэффициент отражения рассеивающей поверхности и от фокусирующих свойств оптической системы лазерного автодина.

Моделирование автодинного сигнала проводилось при параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda = 0,1$ нм. При $n = 20$ соотношение (7) даёт величину $L_{20} = 0,021125$ м. Для параметров $P_1 = 10$, $P_2 = 1$, частоте модуляции тока питания лазера 100 Гц на рис. 1 приведён смоделированный автодинный сигнал, на рис. 2 – его спектр.

Расстояние до объекта в случае пилообразной модуляции определялось по частоте f_{OL} на периоде $\Delta t = 0,01$ изменения длины волны $\Delta\lambda$ соотношением [10, 27]:

$$L = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \Delta\lambda / \Delta t} \cdot f_{OL}. \tag{9}$$

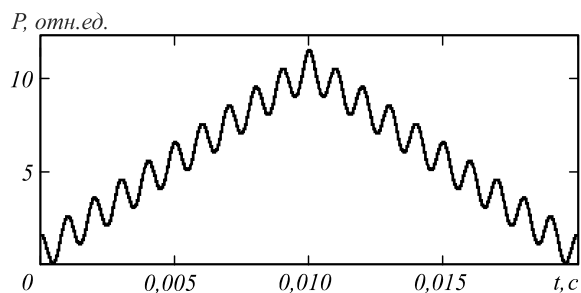


Рис. 1. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 0,1$ нм, $n = 20$, $L = 0,021125$ м

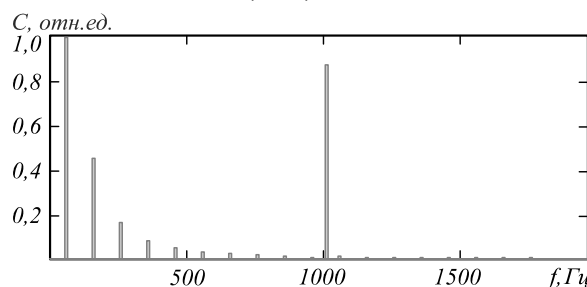


Рис. 2. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 1

Вычисленное из соотношения (9) по измеренному значению $f_{OL} = 1000$ Гц расстояние до объекта в точности совпадает с заданным при компьютерном моделировании. Аналогичный вид спектра автодинного сигнала наблюдается, если увеличить расстояние до объекта в соотношении (7) путём изменения величины n на $n = n + 1$. В этом случае $f_{OL} = 1050$ Гц, а $L_{21} = 0,02218125$ м. Разница со случаем n составляет 1,056 мм.

Рассмотрим случай не равнофазного расстояния, например, расстояние, на котором укладывается не целое число полуволн, т.е. $L_{20} + 500$ мкм. На рис. 3 приведён автодинный сигнал для этого случая.

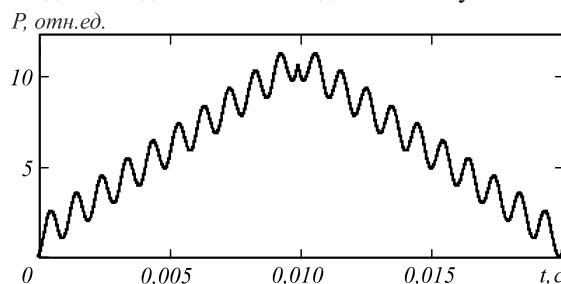


Рис. 3. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 0,1$ нм, $L = 0,0211625$ м

Как видно из рис. 4, в спектре сигнала появились спутники с большей амплитудой. Поскольку максимальной осталась гармоника с прежней частотой, то погрешность определения расстояния по этой гармонике составит величину смещения от равнофазного расстояния, а именно 500 мкм.

Поскольку равнофазные расстояния отличаются в нашем случае на величину 1056 мкм, то максимальная погрешность измерений составит 528 мкм. Это связано

с тем, что до середины равнофазного расстояния в спектре автодинного сигнала максимальной будет гармоника с частотой $f_{OL} = 1000$ Гц, а после середины равнофазного расстояния в спектре автодинного сигнала максимальной будет гармоника с частотой $f_{OL} = 1050$ Гц.

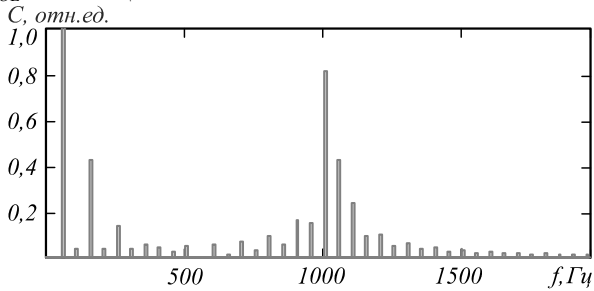


Рис. 4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 3

На рис. 5 приведён спектр автодинного сигнала для случая середины равнофазного расстояния $L = L_{20} + 528 \times 10^{-6}$ м.

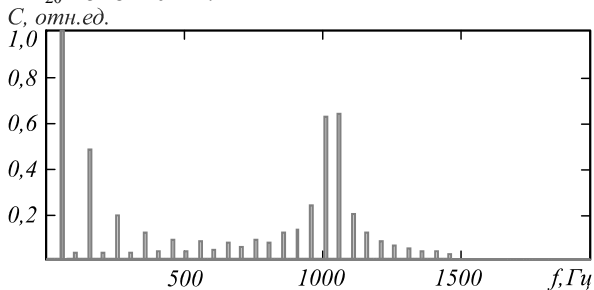


Рис. 5. Спектр автодинного сигнала при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 0,1 \times 10^{-9}$ нм, $L = L_{20} + 528 \times 10^{-6}$ м

Как видно из рис. 5, в спектре автодинного сигнала присутствуют две гармоники одинаковой амплитуды. Расчёт расстояния по этим гармоникам даст значение, отличающееся от заданного на половину равнофазного расстояния. Следовательно, метод имеет погрешность, равную половине равнофазного расстояния.

3. Влияние расстояния на точность измерений

Расчёты точности измерений в предыдущем параграфе приведены для расстояния ~ 2 см от края резонатора лазерного диода до отражателя. С ростом расстояния до отражателя будет увеличиваться количество максимумов интенсивности интерферирующих волн. В соответствии с соотношением (9) при неизменной величине девиации длины волны лазерного излучения с ростом расстояния будет увеличиваться частота интерференционных максимумов f_{OL} . Однако, как следует из соотношения (7), равнофазное расстояние L будет изменяться на одну и ту же величину и с ростом расстояния период изменения этого расстояния остаётся прежним, равным при $\Delta\lambda = 1$ величине

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda}.$$

Т.е. абсолютное значение погрешности не будет зависеть от расстояния. Однако с ростом расстояния будет уменьшаться относительная погрешность измерений.

4. Влияние диапазона девиации длины волны лазера на точность измерений

Авторы работ [28, 29] предлагают повышать точность измерений путём расширения диапазона девиации лазерного диода. При таком подходе будет увеличиваться количество интерференционных максимумов на развёртке автодинного сигнала.

Для увеличения точности измерений увеличим диапазон девиации до 1 нм. На этом же расстоянии до объекта $L = 0,021125$ м количество интерференционных максимумов достигнет $n = 200$. На рис. 6 приведён смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 1$ нм, $n = 200$, $L_{200} = 0,021125$ м.

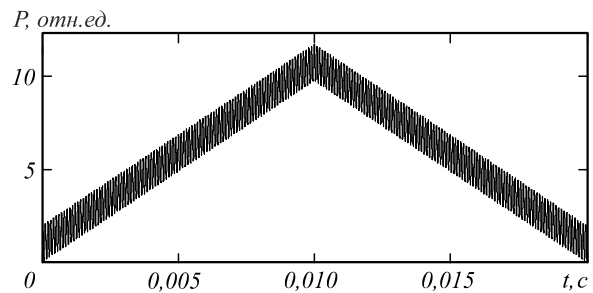


Рис. 6. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 1$ нм, $n = 200$, $L = 0,021125$ м

Вычисленное из соотношения (9) по измеренному значению $f_{OL} = 10000$ Гц расстояние до объекта всё также в точности совпадает с заданным при компьютерном моделировании. Аналогичный вид спектра автодинного сигнала наблюдается, если увеличить расстояние до объекта в соотношении (7) путём изменения его величины на единицу $n = n + 1$. В этом случае $f_{OL} = 10050$ Гц, а $L_{201} = 0,021230625$ м. Разница со случаем $n = 200$ составляет 0,1056 мм.

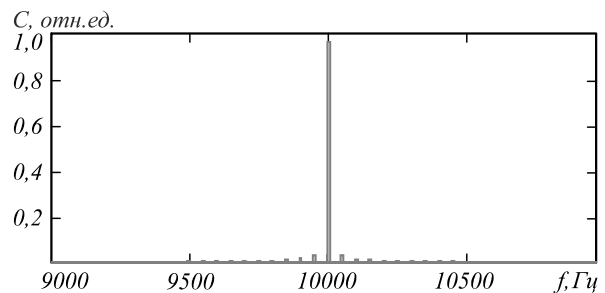


Рис. 7. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 6

Таким образом, при увеличении девиации длины волны излучения лазера до 1 нм точность измерений расстояния увеличивается до половины равнофазного расстояния, а именно составляет 52,8 мкм на расстоянии ~ 21 мм. Расчёты показывают, что при девиации 2 нм теоретическая точность метода составляет ~ 26 мкм. Для достижения 10 мкм точности потребуются увеличение девиации до 5 нм. Следует учесть, что при такой девиации частота интерференционных максимумов f_{OL} будет сильно зависеть от расстояния. В частности, при изменении расстояния от 2 см до 100 см частота f_{OL} (при девиации 2 нм) будет линейно

изменяться от 20 кГц до 1 мГц. Поэтому при больших расстояниях могут возникнуть трудности, связанные с необходимостью анализа автодинного сигнала при высоких значениях частоты f_{OL} и высоком разрешении. Кроме того, при изменении тока питания лазерного диода в широких пределах наблюдается нелинейная зависимость длины волны излучения лазерного диода от его тока питания, что также может вносить погрешность в определение абсолютного расстояния.

Компьютерное моделирование влияния шумовой составляющей, накладываемой с помощью *rnd* функции на автодинный сигнал, показало высокую точность измерения методом пилообразной модуляции.

При этом точность измерений расстояния зависит от точности измерения частоты автодинного сигнала. Для достижения 10 мкм точности при изменении расстояния от 2 см до 100 см необходимо обеспечить точность измерений частоты f_{OL} до 4-5 значащих цифр, что достигается применением высокоразрядных аналого-цифровых преобразователей.

Заключение

Значительный прогресс в повышении точности определения расстояния с помощью лазерного автодина обусловлен расширением диапазона девиации длины волны лазерного излучения. При этом расширение диапазона изменения тока питания лазера приводит к необходимости калибровки зависимости величины девиации длины волны лазерного излучения от величины этого тока.

Оценка предельных возможностей метода измерения расстояния по частоте спектральной гармоники автодинного сигнала составила ~10 мкм на длине волны 650 нм при величине девиации лазерного излучения 5 нм. Однако при этом значительно увеличивается частота интерференционных максимумов и на больших расстояниях могут возникнуть трудности, связанные с необходимостью анализа автодинного сигнала при высоких значениях частоты и высоком разрешении.

Ранее мы показали [30], что альтернативным может быть метод с гармонической токовой модуляцией, который обеспечивает на небольших расстояниях большую точность, чем метод с пилообразной токовой модуляцией. Однако влияние равнофазности в этом методе не исследовалось. Поскольку при измерениях амплитуд спектральных составляющих (гармоническая модуляция) с увеличением их числа точность не увеличивается, а при измерениях методом пилообразной модуляции частота интерференционных максимумов увеличивается, то точность измерений на больших расстояниях методом пилообразной модуляции должна быть выше.

Дальнейшее повышение точности определения расстояния без расширения диапазона девиации лазерного излучения может быть связано с использованием методов аппроксимации автодинного сигнала и измерением амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание №8.7628.2017) и Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

Литература

1. **Bosch, T.** Optical distance measurement methods can technically be put into three categories: interferometry, time-of-flight and triangulation methods / T. Bosch, M. Lescure // Selected Papers on Laser Distance Measurement. SPIE Milestone Series. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press. – 1995. – Vol. 115. – P. 738.
2. **Kilpelä, A.** Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements / A. Kilpelä, R. Pennala, J. Kostamovaara // Review of Scientific Instruments. – 2001. – Vol. 72, Issue 4. – P. 2197-2202. – DOI: 10.1063/1.1355268.
3. **Lee, J.** Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses / J. Lee, Y.-J. Kim, K. Lee, S. Lee, S.-W. Kim // Nature Photonics. – 2010. – Vol. 4. – P. 716-720.
4. **Hintikka, M.** Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses / M. Hintikka, J. Kostamovaara // IEEE Sensors Journal. – 2018. – Vol. 18, Issue 3. – P. 1047-1053.
5. **Ji, Z.** Design of optical triangulation devices / Z. Ji, M.C. Leu // Optics & Laser Technology. – 1989. – Vol. 21, Issue 5. – P. 339-341.
6. **Clarke, T.A.** Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures / T.A. Clarke, K.T.V. Grattan, N.E. Lindsey // Proceedings of SPIE. – 1991. – Vol. 1332. – P. 474-487. – DOI: 10.1117/12.51096.
7. **Syed, A.R.** Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control / S.A. Reza, T.S. Khwaja, M.A. Mazhar, H.K. Niazi, R. Nawab. // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Issue 21. – P. 5996-6006.
8. **Daendliker, R.** High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry / R. Daendliker, K. Hug, J. Politch, E. Zimmermann // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34, Issue 58. – P. 2407-2413. – DOI: 10.1117/12.205665.
9. **Berkovic, G.** Optical methods for distance and displacement measurements / G. Berkovic, E. Shafir // Advances in Optics and Photonics. – 2012. – Vol. 4, Issue 4. – P. 441-471. – DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
10. **Amann, M.C.** Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement / M.C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, M. Rioux // Optical Engineering. – 2001. – Vol. 40, Issue 1. – P. 10-19.
11. **Kliese, R.** Solving self-mixing equations for arbitrary feedback levels: a concise algorithm / R. Kliese, Th. Taimre, A.A.A. Bakar, Y.L. Lim, K. Bertling, M. Nikolić, J. Perchoux, T. Bosch, A.D. Rakić // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53, Issue 17. – P. 3723-3736. – DOI: 10.1364/AO.53.003723.
12. **Усанов, Д.А.** Измерение микро- и нано-вибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 1. – С. 86-94.
13. **Li, D.** Equivalent wavelength self-mixing interference vibration measurements based on envelope extraction Fourier transform algorithm / D. Li, Z. Huang, W. Mo, Y. Ling, Z. Zhang, Z. Huang // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Issue 31. – P. 8584-8591 – DOI: 10.1364/AO.56.008584.

14. **Zhu, W.** Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror / W. Zhu, Q. Chen, Y. Wang, H. Luo, H. Wu, B. Ma // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 150-158.
15. **Norgia, M.** A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry / M. Norgia, S. Donati // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2003. – Vol. 52, Issue 6. – P. 1765-1770.
16. **Xu, J.** All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique / J. Xu, L. Huang, S. Yin, B. Gao, P. Chen // *Optical Review*. – 2018. – Vol. 25, Issue 1. – P. 40-45.
17. **Guo, D.** Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple diffraction / D. Guo, L. Shi, Y. Yu, W. Xia, M. Wang // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25, Issue 25. – P. 31394-31406. – DOI: 10.1364/OE.25.031394.
18. **Koelink, M.H.** Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory / M.H. Koelink, M. Slot, F.F. de Mul // *Applied Optics*. – 1992. – Vol. 31, Issue 18. – P. 3401-3408.
19. **Scalise, L.** Self-mixing laser diode velocimetry: Application to vibration and velocity measurement / L. Scalise, Y.G. Yu, G. Giuliani, G. Plantier, T. Bosch // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2004. – Vol. 53, Issue 1. – P. 223-232.
20. **Lin, H.** Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating / H. Lin, J. Chen, W. Xia, H. Hao, D. Guo, M. Wang // *Optical Engineering*. – 2018. – Vol. 57, Issue 5. – DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504.
21. **Guo, D.** Laser self-mixing grating interferometer for MEMS accelerometers testing / D. Guo, H. Jiang, L. Shi, M. Wang // *IEEE Photonics Journal*. – 2018. – Vol. 10, Issue 1. – P. 1-9.
22. **Усанов, Д.А.** Определение ускорения при микро- и наносмещениях по автодинному сигналу полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // *Письма в ЖТФ*. – 2010. – № 21. – С. 78-84.
23. **Усанов, Д.А.** Определение ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // *Нано- и микросистемная техника*. – 2010. – № 10. – С. 51-54.
24. **Olesen, H.** Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser / H. Olesen, J.H. Osmundsen, B. Tromborg // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1986. – Vol. 22, Issue 6. – P. 762-773.
25. **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, Issue 7. – P. 1242-1247.
26. **Сухарев, А.Г.** Режим гармонической модуляции излучения полупроводникового лазера с внешней обратной связью / А.Г. Сухарев, А.П. Напартович // *Квантовая электроника*. – 2007. – Т. 37, № 2. – С. 149-153.
27. **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, Issue 6. – P. S283-S294.
28. **Norgia, M.** High resolution self-mixing laser rangefinder / M. Norgia, A. Magnani, A. Pesatori // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – Vol. 83, Issue 4. – 045113. – DOI: 10.1063/1.3703311.
29. **Kou, K.** Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry / K. Kou, X. Li, L. Li, H. Xiang // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53, Issue 27. – P. 6280-6286. – DOI: 10.1364/AO.53.006280.
30. **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.
31. **Астахов, Е.И.** Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера / Е.И. Астахов, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // *Известия Саратовского Университета. Серия Физика*. – 2015. – Т. 15, № 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.

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.

Джафаров Алексей Владимирович, 1994 года рождения, в 2017 году окончил бакалавриат по направлению «Электроника и микроэлектроника» Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского. Работа-

ет инженером 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: jafaralex@mail.ru.

Соколенко Игорь Сергеевич, 1997 года рождения, с 2015 года является студентом кафедры физика твёрдого тела Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по направлению «Электроника и нанозлектроника». Область научных интересов: лазерная физика, компьютерная оптика. E-mail: iSokolenko@ya.ru.

ГРНТИ: 29.31.15

Поступила в редакцию 11 марта 2019 г. Окончательный вариант – 24 апреля 2019 г.

Limiting capabilities of self-mixing interferometry upon sawtooth modulation of a semiconductor laser wavelength

D.A. Usanov¹, A.V. Skripal¹, S.Yu. Dobdin¹, A.V. Dzhafarov¹, I.S. Sokolenko¹
¹Saratov State University, 410012, Saratov, Russia, Astrakhanskaya 83

Abstract

This paper discusses a self-mixing interferometry method for measuring distances upon sawtooth modulation of the wavelength of laser radiation. Conditions under which the distance obtained from the spectrum of the modeled autodyne signal coincides with the distance specified in computer simulation are determined. The limiting capabilities of the method are theoretically substantiated for the increased range of deviations of the laser wavelength. The estimation of the limiting capabilities of the distance measurement method on the spectrum of the autodyne signal gives 10 microns at a wavelength of 650 nm at a 5-nm deviation of laser radiation wavelength. We also discuss difficulties of attaining the limiting accuracy of distance measurements associated with the nonlinear dependence of the wavelength emitted by a laser diode on its supply current and the need to analyze the self-mixing signal at high frequencies.

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

Citation: Usanov DA, Skripal AV, Dobdin SYu, Dzhafarov AV, Sokolenko IS. Limiting capabilities of self-mixing interferometry upon sawtooth modulation of a semiconductor laser wavelength. *Computer Optics* 2019; 43(5): 796-802. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-796-802.

Acknowledgements: The work was funded by the Ministry of education and science of the Russian Federation (state task №8.7628.2017) and the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00122).

References

- [1] Bosch T, Lescure M, eds. 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 1995; 115: 738.
- [2] Kilpelä A, Pennala R, Kostamovaara J. Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements. *Review of Scientific Instruments* 2001; 72: 2197-2202.
- [3] Lee J, Kim Y-J, Lee K, Lee S, Kim S-W. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses. *Nat Photon* 2010; 4(10): 716-720.
- [4] Hintikka M, Kostamovaara J. Experimental investigation into laser ranging with sub-ns laser pulses. *IEEE Sensors Journal* 2018; 18(3): 1047-1053.
- [5] Ji Z, Leu MC. Design of optical triangulation devices. *Opt Laser Technol* 1989; 21(5): 339-341.
- [6] Clarke TA, Grattan KTV, Lindsey NE. Laser-based triangulation techniques in optical inspection of industrial structures. *Proc SPIE* 1991; 1332: 474-487. DOI: 10.1117/12.51096
- [7] Reza SA, Khwaja TS, Mazhar MA, Niazi HK, Nawab R. Improved laser-based triangulation sensor with enhanced range and resolution through adaptive optics-based active beam control. *Appl Opt* 2017; 56(21): 5996-6006.
- [8] Daendliker R, Hug K, Politch J, Zimmermann E. High-accuracy distance measurements with multiple-wavelength interferometry. *Opt Eng* 1995; 34(8): 2407-2413. DOI: 10.1117/12.205665.
- [9] Berkovic G, Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements. *Adv Opt Photon* 2012; 4(4): 441-471. DOI: 10.1364/AOP.4.000441.
- [10] Amann MC, Bosch TM, Lescure M, Myllylae RA, Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement. *Opt Eng* 2001; 40(1): 10-19.
- [11] Kliese R, Taimre T, Bakar AAA, Lim YL, Bertling K, Nikolić M, Rakić AD. Solving self-mixing equations for arbitrary feedback levels: a concise algorithm. *Appl Opt* 2014; 53(17): 3723-3736. DOI: 10.1364/AO.53.003723.
- [12] Usanov DA, Skripal AV. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. *Quant Electron* 2011; 41(1), 86-94.
- [13] 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. *Applied Optics*; 2017; 56(31), P.8584-8591. <https://doi.org/10.1364/AO.56.008584>

- [14] Zhu W, Chen Q, Wang Y, Luo H, Wu H, Ma B. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror. *Opt Laser Eng* 2018; 105: 150-158.
- [15] Norgia M, Donati S. A displacement-measuring instrument utilizing self-mixing interferometry. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement* 2003; 52(6): 1765-1770.
- [16] Xu J, Huang L, Yin S, Gao B, Chen P. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique. *Opt Rev* 2018; 25(1): 40-45.
- [17] Guo D, Shi L, Yu Y, Xia W, Wang M. Micro-displacement reconstruction using a laser self-mixing grating interferometer with multiple diffraction. *Opt Express* 2017; 25(25): 31394-31406. DOI: 10.1364/OE.25.031394.
- [18] Koelink M.H., Slot M., F.F.de Mul. Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory. *Applied Optics*; 1992; Vol.31, P.3401-3408.
- [19] Scalise L, Yu YG, 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.
- [20] Lin H, Chen J, Xia W, Hao H, Guo D, Wang M. Enhanced self-mixing Doppler velocimetry by fiber Bragg grating. *Opt Eng* 2018; 57(5): 051504. DOI: 10.1117/1.OE.57.5.051504.
- [21] Guo D, Jiang H, Shi L, Wang M. Laser self-mixing grating interferometer for MEMS accelerometer testing. *IEEE Photonics Journal* 2018; 10(1): 1-9.
- [22] Usanov DA, Skripal AV, Dobdin SY. Determining acceleration from micro- and nanodisplacements measured using autodyne signal of semiconductor laser on quantum-confined structures. *Technical Physics Letters* 2010; 36(11): 1009-1011.
- [23] Usanov DA, Skripal AV, Dobdin SY. The definition of acceleration unevenly accelerated micro- and nanosleep object autodyne signal of a semiconductor laser [In Russian]. *Nano- and Microsystem Technology* 2010; 10: 51-54.
- [24] Olesen H, Osmundsen JH, Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser. *IEEE J Quantum Electron* 1986; 22(6): 762-773.
- [25] Schunk N, Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback. *IEEE J Quantum Electron* 1988; 24(7): 1242-1247.
- [26] Suharev AG, Napartovich AP. Harmonic modulation of radiation of an external-feedback semiconductor laser [In Russian]. *Quant Electron* 2007; 37(2): 149-153.
- [27] 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.
- [28] Norgia M, Magnani A, Pesatori A. High resolution self-mixing laser rangefinder. *Review of Scientific Instruments* 2012; 83(4): 045113. DOI: 10.1063/1.3703311.
- [29] Kou K, Li X, Li L, Xiang H. Injected current reshaping in distance measurement by laser self-mixing interferometry. *Appl Opt* 2014; 53(27): 6280-6286. DOI: 10.1364/AO.53.006280.
- [30] Usanov DA, Skripal AV, Astakhov EI, Kostuchenko IS, Dobdin SY. Autodyne interferometry of a distance using a semiconductor laser with current modulation in the wavelength of the radiation. *Computer Optics* 2018; 42(1): 54-59. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-54-59.
- [31] Astakhov EI, Usanov DA, Skripal AV, Dobdin SY. Self-mixing interferometry of distance at wavelength modulation of semiconductor laser. *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 had graduated from Saratov State University specialized on Radiophysics, works as head of the 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 had 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.

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

Aleksey V. Dzhabarov, was born in 1994, In 2017 he had graduated from Saratov State University baccalaureate on Electronic and Nano-electronic, works as engineer of Medical Physics department at Saratov State University. Research interests: laser physics, biotechnical systems, coherent optics, medical physics. E-mail: jafaralex@mail.ru.

Igor S. Sokolenko, was born in 1997. Starting in 2015, he is a student of the of Solid State Physics department of Saratov State University specialized on "Electronics and Nano-electronics". Research interests: laser physics, computer optics. E-mail: iSokolenko@ya.ru.

Received March 11, 2019. The final version – April 24, 2019.