



ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ. ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА

УДК 531.715.1

Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи

Ан. В. Скрипаль, С. Ю. Добдин, А. В. Джафаров,
К. А. Садчикова, В. Б. Феклистов

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой медицинской физики, 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, dobkinsy@info.sgu.ru

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

Садчикова Карина Арменаковна, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, karinam94@mail.ru

Феклистов Владимир Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, feklisovvb@mail.ru

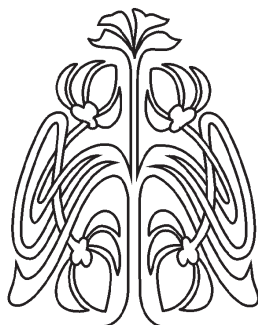
Приведена методика измерения абсолютного расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи. Исследовано влияние девиации длины волны излучения полупроводникового лазерного диода на точность определения расстояния. Показано влияние внешней оптической обратной связи на форму сигнала лазерного автодина. Оценка уровня обратной связи проведена на основе методики разложения автодинного сигнала в ряды Фурье и Бесселя. Показана нелинейная зависимость погрешности определения расстояния по спектру автодинного сигнала от уровня обратной связи при низких и высоких уровнях обратной связи. Предложена методика определения уровня обратной связи, использующая расчет расстояния по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала.

Ключевые слова: лазерная интерферометрия, автодин, полупроводниковый лазер, модуляция излучения лазера, измерение расстояния, спектральный анализ.

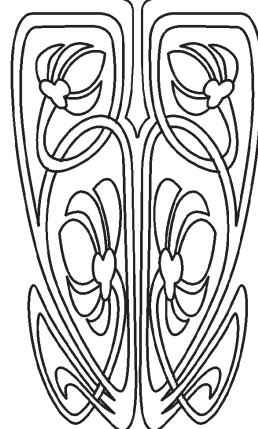
Поступила в редакцию: 15.11.2019 / Принята: 20.12.2019 / Опубликовано: 01.06.2020
Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91>

© Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А.,
Феклистов В. Б., 2020



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





Введение

Лазерная автодинная интерферометрия абсолютных расстояний в настоящее время хорошо представлена методом частотной модуляции тока питания лазерного диода (FMCW) [1–4]. В последние годы опубликованы работы, использующие гармоническую модуляцию тока питания лазера [5, 6].

Преимущество метода гармонической модуляции связано с отсутствием необходимости регулировки девиации длины волны излучения при изменении 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 [6].

Однако в автодинных системах при проведении интерференционных измерений важным параметром является уровень внешней оптической обратной связи [7–13]. В частности, для исключения перескоков мод и уменьшения сдвига частоты излучения лазерного диода, вызванного изменением концентрации носителей заряда в активной области, предложено уменьшать уровень обратной связи [14–17]. Уровень обратной связи будет также влиять и на вид автодинного сигнала, формируемого при модуляции длины волны лазерного излучения.

В ряде работ [18, 19] предполагается, что влиянием внешней оптической обратной связи на форму и спектр автодинного сигнала, полученного при отражении лазерного излучения от вибрирующего объекта, при уровне обратной связи $C < 0.1$ можно пренебречь, поскольку функция автодинного сигнала $P(t)$ в этом случае будет близка к форме функции интерференционного сигнала в системе с развязкой от источника излучения.

Однако оценка влияния внешней оптической обратной связи на форму и спектр автодинного сигнала, полученного при токовой модуляции длины волны излучения лазера, ранее не проводилась. В связи с этим целью работы явилось исследование влияния уровня обратной связи на

точность измерения абсолютного расстояния при гармонической частотной модуляции лазерного излучения.

1. Формирование автодинного сигнала

Для полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью уравнение для мощности излучения лазерного автодина следует из модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [19] и может быть сведено к виду

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega_c(j(t))\tau). \quad (1)$$

Здесь $P_1(j(t))$ – составляющая мощности, независимая от расстояния до внешнего отражателя, P_2 – амплитудная составляющая мощности, зависящая от фазового набега волны $\omega(j(t))\tau$ в системе с внешним отражателем, τ – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, $\omega_c(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$, изменяющегося во времени t , и уровня обратной связи C , определяемая фазовым уравнением [20, 21]:

$$\omega(j(t))\tau = \omega_c(j(t)) \cdot \tau + C \cdot \sin(\omega_c(j(t))\tau + \psi), \quad (2)$$

где

$$C = \tau \cdot z \cdot \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (3)$$

C – коэффициент, характеризующий уровень внешней оптической обратной связи, $\omega(j(t)) = 2\pi c / \lambda(j(t))$, $\lambda(j(t))$ – длина волны излучения лазера без обратной связи, c – скорость света, $\psi = \arctg(\alpha)$, α – коэффициент уширения линии генерации, z – коэффициент обратной связи, зависящий от коэффициентов отражения от внешнего зеркала, обращенной к нему грани лазера и времени обхода излучением лазерного резонатора.

Уровень обратной связи влияет на форму автодинного сигнала и частоту излучения лазерного диода. При малом уровне обратной связи, характеризуемым величиной $C \ll 1$, зависимость фазы излучения лазерного диода от набега фазы волны во внешнем резонаторе лазера с обратной связью становится линейной [18]. То есть при $C \ll 1$ изменением частоты излучения полупроводникового лазера во времени можно пренебречь. При этом нормированная составляющая автодинного сигнала совпадает с нормированной составляющей интерференционного сигнала с развязкой от источника излучения.



При уровне обратной связи $0.1 < C < 1$ зависимость фазы излучения лазерного диода от набега фазы волны во внешнем резонаторе лазера с обратной связью становится нелинейной. При уровне обратной связи из этого интервала значений изменением частоты излучения полупроводникового лазера пренебречь нельзя. Такая зависимость приводит к искажению формы автодинного сигнала и не совпадению его с формой интерференционного сигнала.

Влияние уровня обратной связи на форму автодинного сигнала и частоту излучения лазерного автодина иллюстрируется рис. 1. Как следует из результатов, приведенных на рисунке, наблюдается появление участков с несимметричным относительно экстремальных значений P наклоном, которые можно охарактеризовать отношением интервала изменения фазы, когда происходит убывание P к интервалу изменения фазы, или его нарастание.

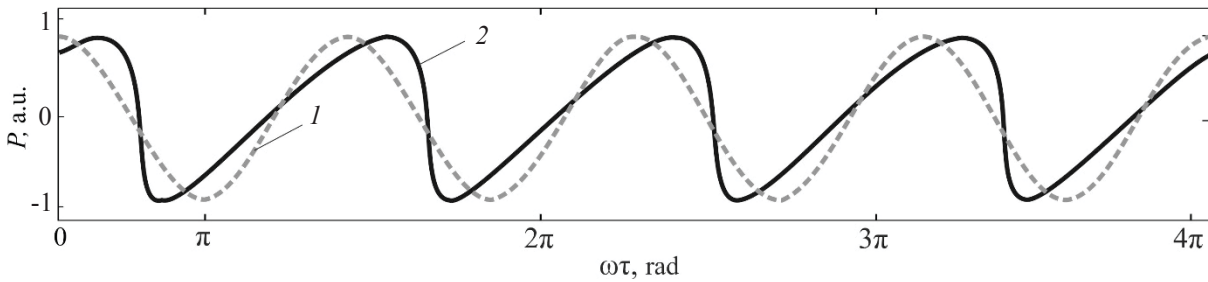


Рис. 1. Нормированные зависимости автодинного сигнала P от фазы излучения лазерного диода $\omega_c \tau$ при следующих параметрах: 1 – $C = 0.1$, 2 – $C = 0.9$

Fig. 1. Normalized dependences of the self-mixing signal P on the laser diode radiation phase at the following parameters: 1 – $C = 0.1$, 2 – $C = 0.9$

2. Частотная модуляция лазерного автодина

При модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера частота $\omega(j(t))$ и амплитудная составляющая мощности излучения лазера $P_1(j(t))$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} \omega(j(t)) &= \omega_0 + \omega_A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t), \\ P_1(j(t)) &= I_1 \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu_1 \cdot t), \end{aligned} \quad (4)$$

где ω_0 – частота излучения полупроводникового лазерного диода в начальный момент времени t ,

ω_A – девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода, ν_1 – частота модуляции тока питания лазерного диода, I_1 – амплитуда токовой модуляции составляющей $P_1(j(t))$.

Моделирование автодинного сигнала $P_1(j(t))$ проводилось при различных уровнях обратной связи и параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация длины волны излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda = 0.01$ нм. На рис. 2 представлена зависимость мощности излучения лазерного автодина от времени при расстоянии до объекта 10 см.

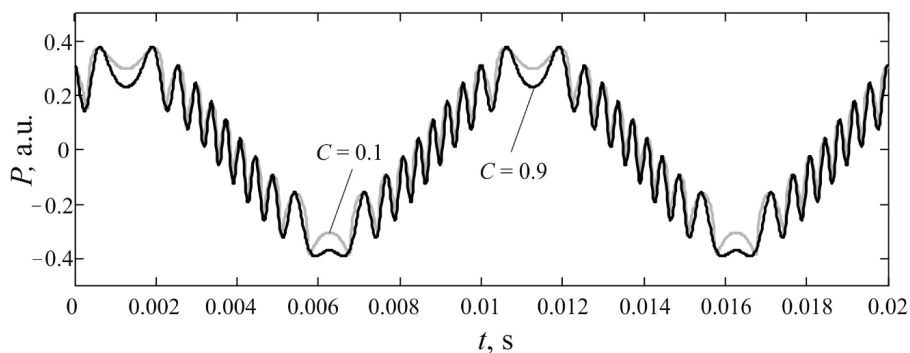


Рис. 2. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах: $\lambda = 650$ нм, $\Delta\lambda = 0.01$ нм, и следующих параметрах обратной связи: 1 – $C = 0.1$, 2 – $C = 0.9$

Fig. 2. Modeled self-mixing signal with parameters: $\lambda = 650$ nm, $\Delta\lambda = 0.01$ nm and the following feedback parameters: 1 – $C = 0.1$, 2 – $C = 0.9$



Как видно из рисунка, для высоких значений уровня обратной связи ($C = 0.9$) интерференционные максимумы на зависимости приобретают дополнительный наклон, свидетельствующий о двойном изменении частоты излучения лазерного диода, связанном как с токовой модуляцией длины волны лазерного диода, так и с автодинным откликом частоты излучения лазера при различных фазах отраженного от объекта излучения лазера.

3. Определение абсолютного расстояния

Решение обратной задачи по определению расстояния до отражателя может быть получено в предположении равенства частоты излучения

уединенного лазерного диода $\omega(j(t))$ частоте излучения лазерного автодина $\omega_c(j(t))$. В этом случае выражение для мощности излучения частотомодулированного полупроводникового лазера (1) запишется в виде:

$$P(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t) + P_2 \cos(\omega_0 \tau + \omega_A \tau \sin(\Omega t)). \quad (5)$$

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 :

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

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

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} для $n = 1, 2, 3, \dots$ 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 спектра автодинного сигнала проводилось при параметрах: $\lambda = 650$ нм, девиация длины волны излучения полупроводникового лазерного диода $\Delta\lambda = 0.01$ нм, расстояние до объекта 10 см. На рис. 3 представлен вычисленный спектр автодинного сигнала при уровне обратной связи $C = 0.1$.

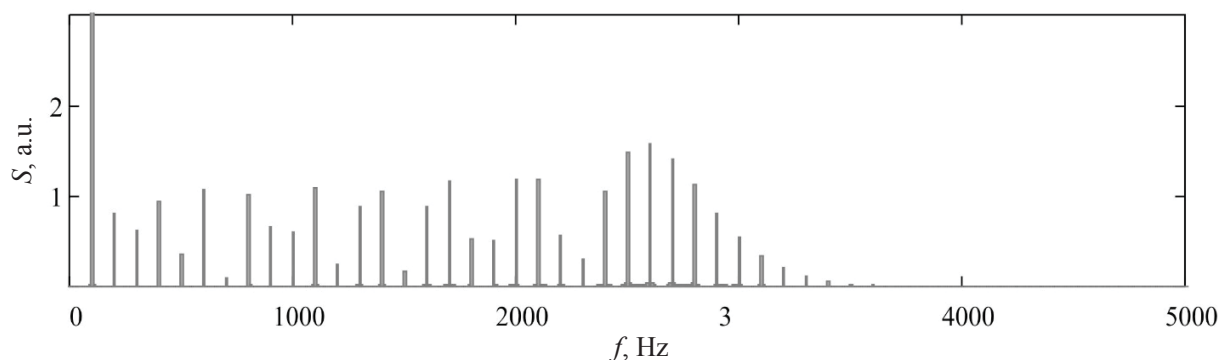


Рис. 3. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 1, при $C = 0.1$

Fig. 3. Spectrum of the self-mixing signal shown in Fig. 1 at $C = 0.1$



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

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

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

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

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

4. Влияние уровня обратной связи

Задача нахождения изменения мощности автодинного сигнала $P(t)$ при известном расстоянии до отражателя L можно назвать прямой задачей, а задача нахождения L с использованием рассчитанного и измеренного $P(t)$ называется обратной. Для решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по амплитудам спектральных составляющих S_{2n} , S_{2n+2} , S_{2n+1} и S_{2n+3} автодинного сигнала, используя уравнения (11) и (12), рассчитывается значение параметра σ . По измеренной величине девиации частоты излучения лазерного диода ω_A из соотношения (13) определяется расстояние до отражателя L .

Поскольку обратная связь изменяет форму и спектр автодинного сигнала, расчет расстояния с использованием соотношений (11) – (13) будет давать погрешность в определении исходного расстояния до отражателя. Для определения величины погрешности в определении расстояния до отражателя предлагается использовать расчет расстояния по различным наборам спектральных составляющих спектра автодинного сигнала.

С учетом обсуждавшейся ранее проблемы [22] необходимости учета знака функций Бесселя, входящих в уравнения (11) и (12), для расчета влияния уровня обратной связи выбирались наборы гармоник в области высоких частот вблизи гармоники с максимальной амплитудой.

Компьютерное моделирование автодинного сигнала влияния внешней оптической обратной связи на точность измерения расстояния до отра-

жателя проводилось при следующих параметрах: длина волны лазерного излучения $\lambda = 650$ нм, расстояние от лазера до отражающей поверхности зонда $L = 10$ см, частота модуляции тока лазерного излучения $\nu = 100$ Гц.

На рис. 4 (кривая 1) приведена зависимость величины среднеквадратического отклонения (RMS deviation), рассчитанного по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, от уровня обратной связи при девиации длины волны лазерного излучения $\Delta\lambda = 0.01$ нм.

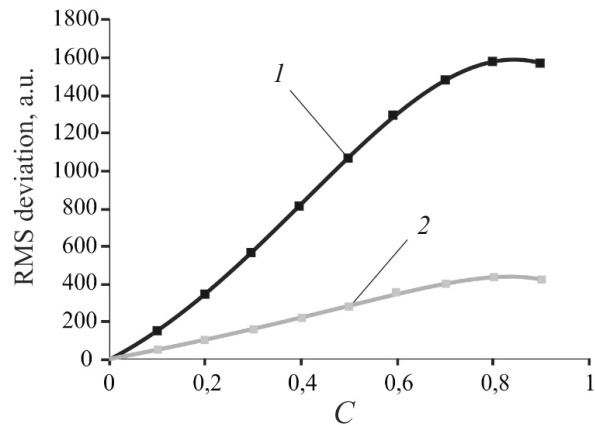


Рис. 4. Зависимость величины среднеквадратического отклонения от уровня обратной связи C : 1 – $\Delta\lambda = 0.01$ нм, 2 – $\Delta\lambda = 0.04$ нм

Fig. 4. Dependence of the RMS deviation on the feedback level C : 1 – $\Delta\lambda = 0.01$ nm, 2 – $\Delta\lambda = 0.04$ nm

Как видно из рис. 4, наблюдается нелинейная зависимость погрешности определения расстояния по спектру автодинного сигнала от уровня обратной связи при низких и высоких уровнях обратной связи. Для практики наибольший интерес представляет определение уровня обратной связи, при котором будет достигнута наибольшая точность измерений, реализуемая в автодинных измерителях.

5. Влияние девиации лазерного излучения

Для повышения уровня обратной связи было исследовано влияние девиации лазерного излучения при фиксированном расстоянии до отражателя. На рис. 5 приведен спектр автодинного сигнала при следующих параметрах: $\Delta\lambda = 0.04$ нм, $C = 0.1$.

Как видно из рис. 5, с ростом величины девиации происходит обогащение спектра автодинного сигнала гармониками высоких порядков. Результаты расчета зависимости величины среднеквадратического отклонения от

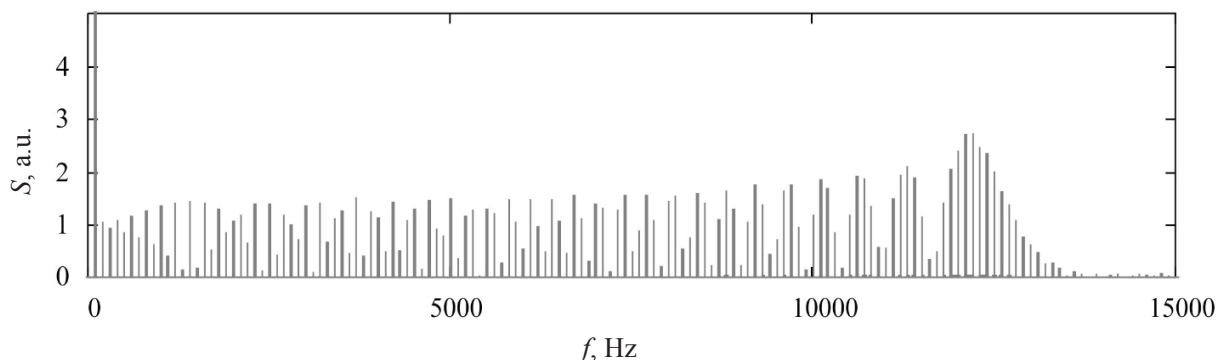


Рис. 5. Спектр автодинного сигнала при следующих параметрах: $\Delta\lambda = 0.04$ нм, $L = 10$ см, $C = 0.1$
 Fig. 5. Spectrum of the self-mixing signal at the following parameters: $\Delta\lambda = 0.04$ nm, $L = 10$ cm, $C = 0.1$

уровня обратной связи при величине девиации $\Delta\lambda = 0.04$ нм приведены на рис. 4 (кривая 2), из которого следует, что с ростом девиации лазерного излучения влияние уровня обратной связи уменьшается, а точность определения расстояния увеличивается. Обнаруженная закономерность косвенно подтверждается видом автодинного сигнала, приведенного на рис. 2 для разных уровней обратной связи. Наибольшее расхождение для разных уровней обратной связи кривые имеют в области медленного изменения частоты лазерного излучения, когда увеличение длины волны излучения сменяется на его уменьшение и наоборот.

Предложенная методика расчета расстояния по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала может быть использована для определения уровня обратной связи в автодинной системе. Необходимость такой оценки обусловлена трудностями в измерении параметров автодинной системы, входящих в выражение (3), для расчета уровня обратной связи C . Вычисляя среднеквадратическое отклонение по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, по приведенной на рис. 4 зависимости определяется уровень обратной связи автодинной системы.

Заключение

При измерении абсолютного расстояния с помощью лазерных автодинов с токовой модуляцией длины волны излучения на точность измерения может оказывать влияние уровень внешней оптической обратной связи. Расчет уровня обратной связи для каждого конкретного случая использования лазерного автодина затруднителен и зависит не только от параметров самого автодина, но и системы фокусировки лазерного излучения, шероховатости поверхности, угла наклона поверхности к падающему

лазерному лучу и др. Оценка уровня обратной связи может быть проведена на основе методики разложения автодинного сигнала в ряды Фурье и Бесселя и анализа спектра автодинного сигнала по наборам спектральных гармоник. Используя зависимость среднеквадратического отклонения, рассчитанного по различным наборам гармоник спектра автодинного сигнала, от девиации лазерного излучения, можно определить уровень обратной связи.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00122).

Список литературы

1. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging : a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 2001. Vol. 40, iss. 1. P. 10–19.
2. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements // Laser Photon. Rev. 2012. Vol. 6, № 3. P. 393–417.
3. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements // Adv. Opt. Photon. 2012. Vol. 4, № 4. P. 441–471.
4. 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.
5. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference // Appl. Opt. 2004. Vol. 43, iss. 21. P. 4189–4198.
6. 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. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 3. С. 189–201.



7. Сухарев А. Г., Нанартович А. П. Режим гармонической модуляции излучения полупроводникового лазера с внешней обратной связью // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, вып. 2. С. 149–153.
8. Карих Е. Д. Полупроводниковый лазер с комбинированной внешней оптической обратной связью // Вестн. БГУ. 2015. Т. 1, вып. 2. С. 35–39.
9. Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А., Чунахин А. П. Расчет параметров автодинов с жесткой характеристикой проводимости активного элемента // Уральск. радиотехн. журн. 2019. Т. 3, вып. 1. С. 7–29.
10. Ju R., Spencer P. S. Dynamic regimes in semiconductor lasers subject to incoherent optical feedback // J. of Light-wave Technology. 2005. Vol. 23, № 8. P. 2513–2523.
11. Ma J. S., Gu W. H. Simulation of chaotic synchronization system based on optical feedback and injection // Optoelectron. Lett. 2006. Vol. 2, № 3. P. 0192–0194.
12. Takeuchi Y., Shogenji R., Ohtsubo J. Chaotic dynamics in semiconductor lasers subjected to polarization-rotated optical feedback // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 93. P. 181105-1–181105-3.
13. Карих Е. Д. Определение параметров микровибраций слабоотражающих объектов по кепстру сигнала самосмещения в полупроводниковом лазере // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. Вып. 3. С. 57–64.
14. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. 22, № 6. P. 762–773.
15. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, вып. 2. С. 54–65.
16. 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, № 7. P. 1242–1247.
17. Scalise L., Yu Y., 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.
18. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application // J. Opt. A : Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4. P. S283–S294.
19. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. 16, № 3. P. 347.
20. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Кащавцев Е. О., Добдин С. Ю. Определение ускорения при микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи // ЖТФ. 2013. Т. 83, вып. 7. С. 156–158.
21. Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semiconductor laser in an external cavity // IEEE J. Quantum Electron. 1984. Vol. 20. P. 1023–1032.
22. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 136 с.

Образец для цитирования:

Скрипаль Ан. В., Добдин С. Ю., Джафаров А. В., Садчикова К. А., Феклистов В. Б. Измерение расстояния при гармонической модуляции длины волны лазерного автодина с учётом внешней оптической обратной связи // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2020. Т. 20, вып. 2. С. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91>

Distance Measurement with Harmonic Modulation of Self-Mixing Laser Wavelength at External Optical Feedback

An. V. Skripal, S. Yu. Dobdin, A. V. Dzharfarov, K. A. Sadchikova, V. B. Feklistov

Anatoly V. Skripal, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, skripalav@info.sgu.ru

Sergey Yu. Dobdin, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, dobdinsy@info.sgu.ru

Aleksey V. Dzharfarov, <https://orcid.org/0000-0002-0588-3151>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, jafaralex@mail.ru

Karina A. Sadchikova, <https://orcid.org/0000-0002-3153-1301>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, karinam94@mail.ru

Vladimir B. Feklistov, <https://orcid.org/0000-0001-8800-7706>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, feklistovvb@mail.ru

Background and Objectives: Self-mixing interferometry of absolute distances is currently well represented by the method of frequency modulation of the laser diode supply current (FMCW). In recent years a harmonic modulation of the power current of a self-mixing laser began to be used. The advantage of the harmonic modulation method is due to the absence of the need to adjust the deviation of the radiation wavelength when changing the distance to the reflector. In the laser systems, the level of external optical feedback is an important parameter during interference measurements. The feedback level also affects the type of the self-mixing signal generated by modulation of the wavelength of laser radiation. The aim of this work was to study the effect of the feedback level on the accuracy of absolute distance measurements at the harmonic frequency modulation of laser radiation. **Materials and Methods:** The article presents a method of measuring distances using a semiconductor laser with a harmonic modulation of the radiation wavelength. The technique allows taking into account the influence of the feedback level to improve the accuracy of the measurements. In particular, it is proposed to reduce the feedback



level in order to eliminate mode jumps and reduce the frequency shift of the laser diode radiation caused by a change in the concentration of charge carriers in the active region. **Results:** The results of the influence of the feedback level on the shape of the self-mixing signal and on the accuracy of distance measurements have been described. **Conclusion:** Evaluation of the feedback level can be carried out on the basis of the method of decomposition of the self-mixing signal in the Fourier and Bessel series and analysis of sets of spectral harmonics. The feedback level is determined using the values of the RMS deviation calculated from sets of spectral harmonics of the self-mixing signal. **Keywords:** laser interferometry, self-mixing laser, laser radiation modulation, distance measurement, spectral analysis.

Received: 15.11.2019 / Accepted: 20.12.2019 / Published: 01.06.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 19-79-00122).

References

1. 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.
2. Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. *Laser Photonics Rev.*, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 393–417.
3. Berkovic G., Shafir E. Optical methods for distance and displacement measurements. *Adv. Opt. Photonics*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 441–471.
4. 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.
5. Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference. *Appl. Opt.*, 2004, vol. 43, iss. 21, pp. 4189–4198.
6. 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
7. Sukharev A. G., Napartovich A. P. Harmonic modulation of radiation of an external-feedback semiconductor laser. *Quant. Electron.*, 2007, vol. 37, iss. 2, pp. 149–153.
8. Karikh E. D. Semiconductor laser with combined external optical feedback. *Vestnik BGU*, 2015, vol. 1, no. 2, pp. 35–39.
9. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Calculation of autodyne parameters with the rigid characteristic of the active element conductance. *Ural Radio Eng. J.*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 7–29. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.001
10. Ju R., Spencer P. S. Dynamic regimes in semiconductor lasers subject to incoherent optical feedback. *J. Lightwave Technol.*, 2005, vol. 23, no. 8, pp. 2513–2523.
11. Ma J. S., Gu W. H. Simulation of chaotic synchronization system based on optical feedback and injection. *Optoelectron. Lett.*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 0192–0194.
12. Takeuchi Y., Shogenji R., Ohtsubo J. Chaotic dynamics in semiconductor lasers subjected to polarization-rotated optical feedback. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 93, pp. 181105-1–181105-3.
13. Karikh E. D. Determination of the parameters of low-reflecting object microvibrations by cepstrum of self-mixing signal in semiconductor laser. *J. Belarus. State Univ. Phys.*, 2017, no. 3, pp. 57–64.
14. Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, vol. 22, no. 6, pp. 762–773.
15. Usanov D. A., Skripal An. 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.
16. Schunk N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, vol. 24, no. 7, pp. 1242–1247.
17. Scalise L., Yu Y., 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.
18. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, vol. 4, pp. S283–S294.
19. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, vol. 16, no. 3, pp. 347.
20. Usanov D. A., Skripal A. V., Kashchavtsev E. O., Dobdin S. Y. Acceleration measurements upon micro- and nanodisplacements of an object using the autodyne signal of a semiconductor laser with allowance for the external optical feedback. *Tech. Phys.*, 2013, vol. 58, no. 7, pp. 1083–1085.
21. Tromborg B., Osmundsen J. H., Olesen H. Stability analysis for a semi-conductor laser in an external cavity. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, vol. 20, pp. 1023–1032.
22. Usanov D. A., Skripal An. V. *Poluprovodnikovye lazernye avtodiny dlya izmereniya parametrov dvizheniya pri mikro- i nanosmeshcheniyah* [Semiconductor laser autodynes for measurement of motion parameters at micro- and nanoscale displacements]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 2014. 136 p. (in Russian).

Cite this article as:

Skripal An. V., Dobdin S. Yu., Dzhafarov A. V., Sadchikova K. A., Feklistov V. B. Distance Measurement with Harmonic Modulation of Self-Mixing Laser Wavelength at External Optical Feedback. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 2, pp. 84–91 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-2-84-91>