

15  
**Определение ускорения при микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера с учетом влияния внешней оптической обратной связи**

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.О. Кащавцев, С.Ю. Добдин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия  
 e-mail: usanovda@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 9 октября 2012 г.)

Проведено исследование влияния внешней оптической обратной связи в полупроводниковом лазерном автодине на возможность определения ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наносмещениях объекта. Показано, что коэффициент корреляции результатов измерения ускорения с аппроксимирующей их линейной зависимостью при учете уровня обратной связи равен 0.99, тогда как без учета — 0.82.

Методы лазерной интерферометрии могут быть успешно применены для измерения параметров движения [1–4]. В работе [4] показана возможность использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для определения ускоренного движения объекта, совершающего микро- и наноперемещения, в предположении, что влиянием уровня внешней оптической обратной связи на результаты измерений можно пренебречь. В то же время, как было показано ранее [5,6], уровень внешней оптической обратной связи в автодинной системе влияет на форму и низкочастотный спектр автодинного сигнала.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния внешней оптической обратной связи на результат измерения ускорения по автодинному сигналу полупроводникового лазера при неравномерно ускоренных микро- и наноперемещениях объекта.

Переменную нормированную составляющую автодинного сигнала при учете уровня внешней оптической обратной связи можно записать в виде [7,8]

$$P(t, C) = \cos(\omega(t, C)\tau(t)), \quad (1)$$

где

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

$\tau(t)$  — время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, изменяющееся при изменении расстояния до отражателя со временем  $t$ ,  $\omega(t, C)$  — частота излучения полупроводникового лазера,  $C$  — коэффициент, характеризующий уровень внешней оптической обратной связи,  $z$  — коэффициент обратной связи,  $\alpha$  — коэффициент уширения линии генерации.

Функция  $\omega(t, C)$  находится из фазового уравнения [7,8]

$$\omega_0 \tau = \omega t + C \sin(\omega t + \psi), \quad (3)$$

где  $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$ ,  $\lambda_0$  — длина волны излучения лазера без обратной связи,  $c$  — скорость света,  $\psi = \arctg(\alpha)$ .

В случае движения объекта с неравномерно изменяющимся ускорением время обхода лазерным излучением

внешнего резонатора изменяется по закону

$$\tau(t) = \frac{2}{c} \int_0^t (V_0 + \int_0^t a(t) dt) dt, \quad (4)$$

где  $V_0$  — начальная скорость движущегося объекта,  $t$  — интервал времени наблюдаемого автодинного сигнала на различных участках движения,  $a(t)$  — ускорение внешнего отражателя, изменяющееся во времени. Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала имеет вид

$$P(t, C) = \cos\left(\omega(t, C) \frac{2}{c} \int_0^t (V_0 + \int_0^t a(t) dt) dt\right). \quad (5)$$

Для нахождения изменяющегося во времени ускорения интервал наблюдения автодинного сигнала (5) можно разбить на  $n$  временных окон, в пределах каждого из которых значение ускорения  $a_n$  можно считать постоянным. В этом случае для каждого  $n$ -го окна время обхода лазерным излучением внешнего резонатора можно считать изменяющимся по закону

$$\tau(t) = \frac{2}{c} \left( V_0 n t + \frac{a_n t^2}{2} \right), \quad (6)$$

а переменная нормированная составляющая автодинного сигнала будет иметь вид

$$P(t, C) = \cos\left(\omega(t, C) \frac{2}{c} \left( V_0 n t + \frac{a_n t^2}{2} \right)\right). \quad (7)$$

При решении обратной задачи относительно параметров  $a$  и  $V_0$  при учете уровня внешней оптической обратной связи  $C$  используется функционал, получаемый при суммировании квадратов отклонений экспериментальных  $P_{\text{экс}}$  и теоретических  $P_{\text{теор}}$  величин автодинного сигнала (7) для различных временных интервалов

$$S(a, V_0) = \sum_i (P_{\text{экс}}(t_i) - P_{\text{теор}}(t_i, a, V_0, C))^2. \quad (8)$$

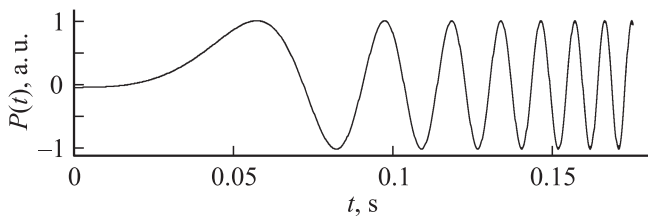


Рис. 1. Автодинный сигнал при неравномерно ускоренном движении внешнего отражателя.

Искомое ускорение определяется из условия минимума функционала  $S(a, V_0)$ :

$$\left| \frac{\partial S(a, V_0)}{\partial a} \right| = 0, \quad \left| \frac{\partial S(a, V_0)}{\partial V_0} \right| = 0. \quad (9)$$

На практике часто реализуется случай изменения ускорения по линейному закону  $a(t) = kt$ , при этом соотношение (1) принимает вид

$$P(t, C) = \cos \left( \omega(t, C) \frac{2}{c} \left( V_0 t + \frac{kt^3}{6} \right) \right). \quad (10)$$

Вид функции автодинного сигнала  $P(t)$  для этого случая при значениях  $k = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^3$  показан на рис. 1. При этом предполагалось, что  $C \ll 1$  и при  $t = 0$ ,  $V_0$  равно нулю.

Объектом исследований было выбрано коммутационное электромагнитное реле типа 904.3747. Для придания якорю электромагнитного реле неравномерного ускорения на реле подавался несимметричный одиночный импульс. Форма импульса задавалась с помощью встроенного в платформу NIELVIS генератора импульсов, обеспечивающего нарастание и спад импульса по параболическому закону. Подобная форма импульса, подаваемого на реле, позволила реализовать движение объекта с ускорением, изменяющимся по линейному закону.

В экспериментальной установке в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазерный автодин [4], запитываемый от источника тока. При проведении измерений на движущийся якорь реле направлялось лазерное излучение. Излучение, отраженное от поверхности якоря, регистрировалось встроенным фотодетектором. С фотодетектора сигнал через АЦП поступал на компьютер, где и сохранялся для последующей обработки.

Вид измеренных автодинных сигналов при неравномерно ускоренном движении объекта для различных уровней внешней оптической связи приведен на рис. 2.

Для определения уровней обратной связи в автодинной системе при регистрации автодинных сигналов, приведенных на рис. 2, был использован метод, предложенный в [6]. Для автодинного сигнала, представленного на рис. 2, *a*, уровень внешней оптической обратной связи составил величину, намного меньшую 1, т.е.  $C = 0.03$ , для автодинного сигнала на рис. 2, *b* уровень обратной связи составил 0.33.

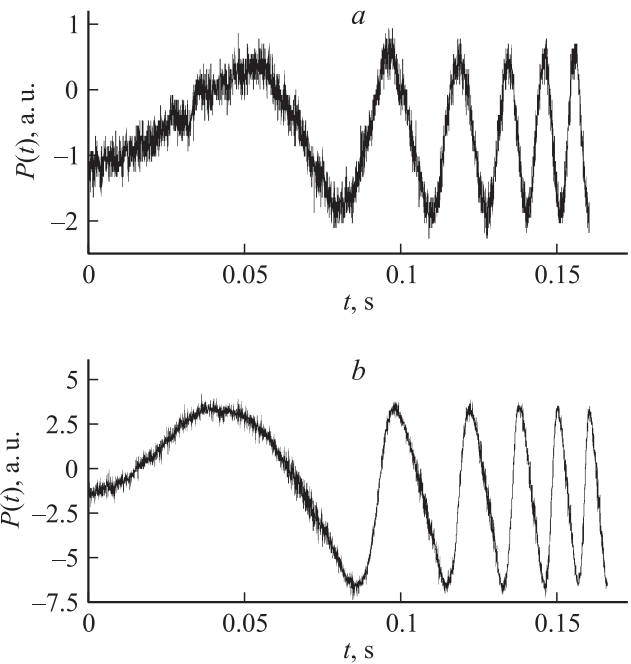


Рис. 2. Измеренный автодинный сигнал при неравномерно ускоренном движении внешнего отражателя при различных уровнях внешней оптической обратной связи  $C$ : *a* — 0.03, *b* — 0.33.

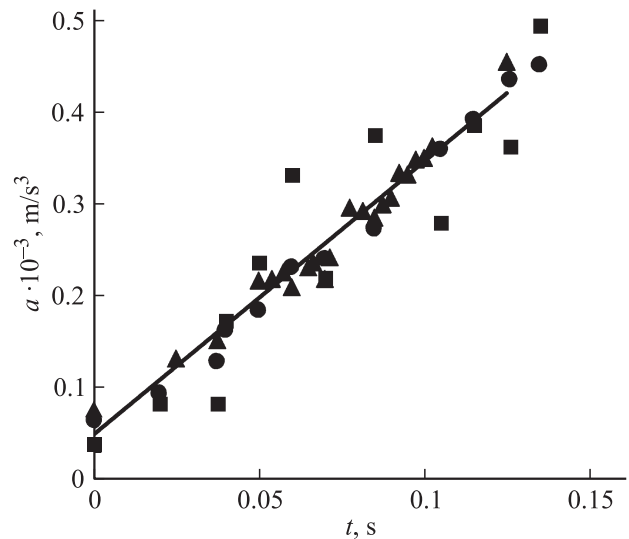


Рис. 3. Изменение ускорения объекта исследований: ▲ — результаты определения ускорения по автодинному сигналу, приведенному на рис. 2, *a*, при уровне обратной связи  $C = 0.03$ ; ● — результаты определения ускорения по автодинному сигналу, приведенному на рис. 2, *b*, с учетом уровня обратной связи в (8), при  $C = 0.33$ ; ■ — результаты определения ускорения по автодинному сигналу, приведенному на рис. 2, *b*, без учета уровня обратной связи в (8); — — линейная зависимость, аппроксимирующая результаты определения ускорения по автодинному сигналу, приведенному на рис. 2, *a*, при уровне обратной связи  $C = 0.03$ .

Для „очистки“ измеренного сигнала от высокочастотных составляющих проводилось сглаживание экспериментальной кривой с использованием встроенной функции математического пакета MathCad—ksmooth [9]. Полученные в результате сглаживания кривые использовались для сравнения с теоретической зависимостью в соотношении (8). Для этого весь интервал наблюдения был разделен на несколько временных окон. Необходимо было на каждом временном интервале определить значение параметра  $a$  и убедиться в том, что объект исследований совершал неравномерно ускоренное движение. На рис. 3 показано изменение ускорения со временем, определенное в результате решения обратной задачи описанным способом.

Коэффициент корреляции результатов определения ускорения по автодинному сигналу при уровне обратной связи  $C = 0.03$ , приведенному на рис. 2,  $a$ , и аппроксимирующей их линейной зависимости составил 0.98. Коэффициент корреляции результатов определения ускорения по автодинному сигналу при уровне обратной связи  $C = 0.33$ , приведенному на рис. 2,  $b$ , без учета уровня обратной связи в (8) и аппроксимирующей их линейной зависимости составил 0.82. Коэффициент корреляции результатов определения ускорения по автодинному сигналу при уровне обратной связи  $C = 0.33$ , приведенному на рис. 2,  $b$ , с учетом уровня обратной связи в (8) и аппроксимирующей их линейной зависимости составил 0.99. Из сравнения полученных зависимостей следует, что коэффициент корреляции результатов измерения ускорения с аппроксимирующей их линейной зависимостью заметно больше при учете уровня обратной связи.

Таким образом, учет уровня внешней оптической обратной связи в автодинном сигнале позволяет повысить точность определения изменяющегося во времени ускорения при неравномерно ускоренных микро- и наноперемещениях объекта.

## Список литературы

- [1] *Соболев В.С., Кащеева Г.А.* // Автометрия. 2008. Т. 44. № 6. С. 49–65.
- [2] *Коронкевич В.П., Ханов В.А.* Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, 1985. 182 с.
- [3] *Jentik H.W., de Mul F.F., Suichies H.E., Aarnoudse J.G., Greve J.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. P. 379–385.
- [4] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 10. С. 51–54.
- [5] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С.* // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 2. С. 54–65.
- [6] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О., Калинин М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 12. С. 81–86.
- [7] *Yu Y., Giuliani G., Donati S.* // IEEE Photonics Technology Letters. 2004. Vol. 16. N 4. P. 990–992.
- [8] *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2003. 312 с.
- [9] *Гурский Д., Турбина Е.* Вычисления в Mathcad 12. Питер, 2006. 544 с.