УДК 534.854

М. В. АРМАНОВА[1], *С. А. ДАРЗНЕК*[2], *Ж. ЖЕЛКОБАЕВ*[2]

([1]Российский университет Дружбы народов (РУДН), Москва, Россия,
[2]Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума (ОАО «НИЦПВ»), Москва, Россия)

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО ГЕТЕРОДИНИРОВАНИЯ СИГНАЛА ФОТОПРИЕМНИКА

Аннотация. Для расчета смещения подвижного зеркала $s(t)$ в лазерном интерферометрическом измерителе перемещений [1, 2] использована методика численного гетеродинирования сигнала фотоприемника. Оцифрованный сигнал фотоприемника умножался на систему базовых гармоник $\cos \Omega t$ и $\sin \Omega t$ несущей частоты Ω, а затем из произведения методом численной фильтрации удалялась высокочастотная компонента. Полученные низкочастотные составляющие использовались для восстановления искомой зависимости смещения зеркала $S(t)$. Для численной фильтрации использовался фильтр Баттерворта в частотном домене.

Показано, что описанная методика позволяет рассчитывать смещение зеркала с шагом по времени, значительно меньшим, чем в методе временных интервалов [2]. Приведены результаты обработки экспериментальных данных по измерению временной зависимости колебаний зеркала интерферометра с амплитудой порядка десятков нанометров на частотах в диапазоне килогерц.

Лазер, интерферометр, гетеродин

Laser, interferometer, heterodyne

1. Методика эксперимента

Принципиальная схема лазерного гетеродинного интерферометра представлена на рисунке 1. В интерферометрах такого типа луч света от He-Ne лазера 1 сначала проходит через блок из двух

оптико-акустических дефлекторов 2 и 3. Дифрагируя на ультразвуковой волне дефлектора, свет отклоняется от оптической оси системы и приобретает дополнительный сдвиг частоты, равный частоте ультразвуковой волны. В результате луч лазера расщепляется на два пучка, распространяющихся под углом друг к другу. Разность частот между ними равна разности частот акустических волн в дефлекторах F и составляет 10 – 100 кГц.

Один из этих лучей — опорный — после отражения от поворотного зеркала 4 поступает на фотоприемник 9, а второй — сигнальный — сначала направляется на подвижное зеркало интерферометра 7. Подвижное зеркало закрепляется на торце пьезоэлектрического элемента, который играет роль вибратора. При подаче переменного напряжения на пьезоэлемент его длина периодически изменяется, и зеркало интерферометра совершает колебания, форма которых близка к синусоидальной.

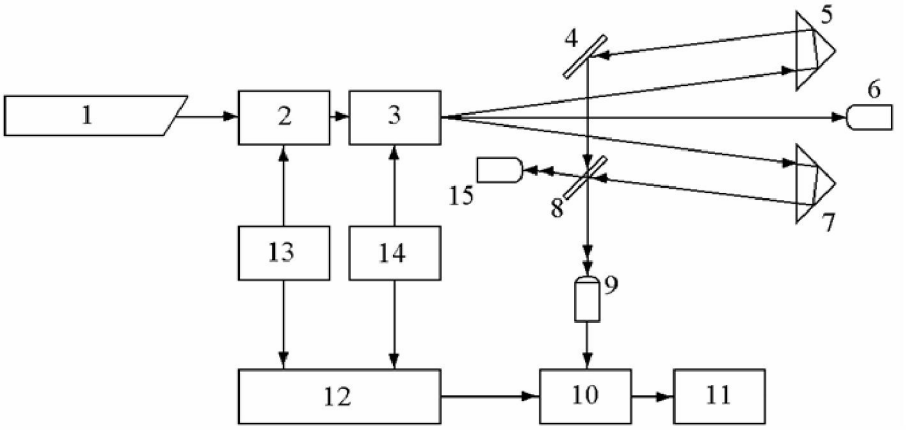

Рис. 1. Блок-схема лазерного гетеродинного интерферометра. 1 − He-Ne лазер ЛГН-304; 2, 3 − акустооптические модуляторы; 4 − зеркало; 5 −поворотная призма; 6, 15 − поглотители нерабочих пучков; 7 − отражатель с исследуемым объектом; 8 − смесительный элемент; 9 – фотоприемное устройство; 10 − устройство сбора данных с фотоприемника; 11 − компьютер; 12 − электрический смеситель;13, 14 − генераторы напряжения высокой частоты

В результате интерференции опорного и сигнального лучей на фотоприемнике возникает частотно модулированный сигнал

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Phi(t), \qquad (1)$$

где I_1 и I_2 — интенсивности лучей, $\Phi(t) = \Omega t + \varphi(t)$, $\Omega = 2\pi F$— разностная акустическая частота, а $\varphi(t)$ — разность фаз опорного и сигнального лучей, связанная со смещением подвижного зеркала $s(t)$ формулой

$$\varphi(t) = \frac{4\pi}{\lambda_a} s(t), \qquad (2)$$

где λ_a— длина волны света в воздухе.

В качестве устройства сбора данных в наших экспериментах использовался быстродействующий запоминающий осциллограф Tektronix TDS2014B , который с заданным шагом по времени оцифровывал сигнал фотоприемника и записывал его в виде файла. Полученный файл загружался в специально разработанную программу, которая рассчитывала искомую временную зависимость смещения зеркала $s(t)$ по известному сигналу фотоприемника $I(t)$ в соответствии с описанной ниже методикой

2. Методика численного расчета смещения подвижного зеркала

В работах [1,2] для расчета искомой временной зависимости смещения подвижного зеркала $s(t)$ по сигналу фотоприемника $I(t)$ использовалась методика определения локального периода функции $I(t)$. Для этого было необходимо с высокой точностью вычислять положение нулей переменной составляющей $I(t)$, однако в силу принципиальных особенностей алгоритма смещение зеркала в этой методике может быть определено лишь с гораздо большим шагом по времени $\Delta t = \frac{1}{F} \sim 10$ мкс.

В настоящей работе предложена и реализована другая методика расчета, позволяющая определять смещение зеркала с тем же шагом по времени, с которым происходит оцифровка сигнала фотоприемника.

Суть этой методики заключается в следующем. Умножим переменную составляющую сигнала фотоприемника $\cos\Phi(t)$ на систему базовых гармоник разностной акустической частоты $\sin\Omega t$ и $\cos\Omega t$

$$P_1(t) = \cos\Phi(t)\cdot\sin\Omega t = \frac{1}{2}\left[\sin\left(2\Omega t + \varphi(t)\right) - \sin\left(\varphi(t)\right)\right], \quad (3.1)$$

$$P_2(t) = \cos\Phi(t)\cdot\cos\Omega t = \frac{1}{2}\left[\cos\left(2\Omega t + \varphi(t)\right) + \cos\left(\varphi(t)\right)\right] \quad (3.2)$$

Отфильтровав в (3) низкочастотным численным фильтром гармоники высокой частоты 2Ω, получим функцию

$$P(t) = \frac{P_1(t)}{P_2(t)} = -\mathrm{tg}\left(\varphi(t)\right). \quad (4)$$

По значению тангенса можно восстановить разность фаз $\varphi(t)$ сначала в диапазоне $-\pi/2, \pi/2$, а затем, сшивая функцию в точках разрыва, получить непрерывную зависимость фазы от времени.

Фильтрация функций (3) выполнялась следующим образом. Сначала вычислялся спектр функции с использованием алгоритма Блустейна [3] быстрого преобразования Фурье, а затем полученный спектр умножался на частотную характеристику низкочастотного фильтра. Для восстановления отфильтрованного сигнала выполнялось обратное преобразование Фурье.

Заметим, что описанная выше численная методика в точности моделирует алгоритм выделения аудиосигнала в классическом гетеродинном радиоприемнике.

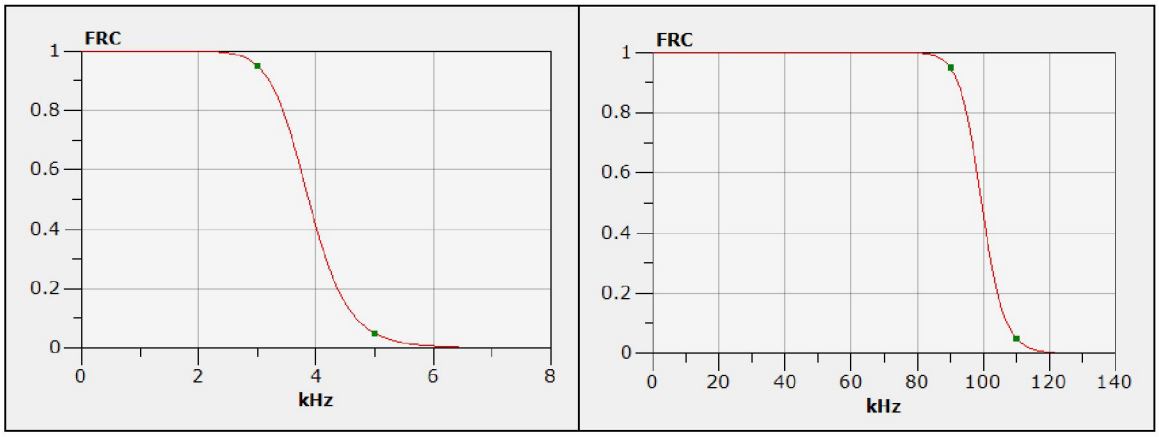

Рис. 2. Частотные характеристики (FRC) фильтра Баттерворта (скриншот программы обработки данных). Левый график соответствует «жесткому» фильтру с параметрами f_c = 3,9 кГц и n = 5,8, а правый — «мягкому» фильтру с f_c = 99,5 кГц и n = 14,7. Квадраты на кривых соответствуют уровням частотной характеристики 0,05 и 0,95

В качестве низкочастотного фильтра мы использовали фильтр Баттерворта[4] с частотной характеристикой

$$H(f) = \frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^n}, \quad (5)$$

где f — частота, f_c — частота среза, а n —порядок фильтра, определяющий ширину переходной полосы. Частотная характеристика фильтра Баттерворта (5) приведена на рисунке 2.

Фильтр Баттерворта был выбран в качестве низкочастотного фильтра из тех соображений, что он имеет плоские горизонтальные участки в низко- и высокочастотных областях характеристики (5) и легко регулируемую ширину переходной области.

Отметим, что использование низкочастотного фильтра для удаления гармоник частоты 2Ω в (3) одновременно убирает и нежелательные шумы из сигнала фотоприемника, что позволяет без дополнительной фильтрации удобно выделять низкочастотную кинематическую составляющую разности фаз $\varphi(t)$ и искомого смещения зеркала $s(t)$ в (2).

3. Результаты

Ниже приведены результаты измерения по описанной в параграфе 2 методике временной зависимости смещения подвижного зеркала интерферометра с амплитудой порядка десятков нанометров в частотном диапазоне ~1 кГц.

На рисунке 3 изображена типичная зависимость сигнала фотоприемника от времени, измеренная скоростным осциллографом, а на рисунке 4 — временная зависимость смещения подвижного зеркала. Расчеты выполнены для двух параметров фильтра Баттерворта, приведенных на рисунке 2. Из сравнения результатов расчета видно, что при подходящем подборе параметров фильтра удается не только подавить гармонику двойной несущей частоты, но и эффективно убрать шумы измерительной системы, наложенные на полезный сигнал.

Кроме того, необходимо отметить, что при использовании методики численного гетеродинирования (как, впрочем, и для других систем с фазовой модуляцией сигнала) амплитудная нестабильность сигнала фотоприёмника практически не влияет на результаты расчета смещения подвижного зеркала.

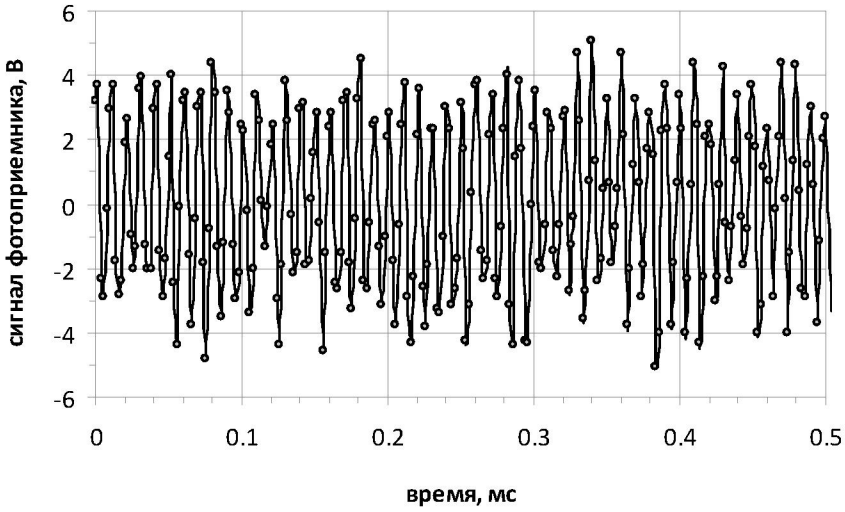

Рис. 3. Начальный участок сигнала фотодиода. Шаг оцифровки 2 мкс, разностная акустическая частота F = 100 кГц.

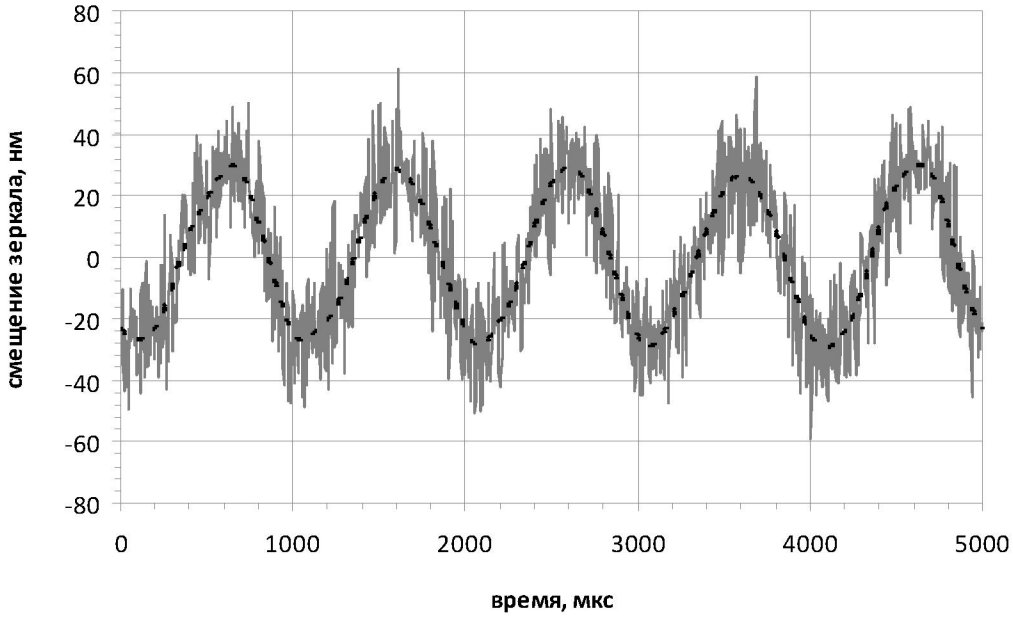

Рис.4. Рассчитанная зависимость смещения подвижного зеркала от времени для различных параметров фильтра Баттерворта. Серая тонкая кривая соответствует «мягкому» фильтру с частотой среза f_c = 99,5 кГц, а жирная пунктирная — «жесткому» с f_c = 3,9 кГц.

4. Заключение

1. Предложенная и реализованная в работе схема расчета смещения подвижного зеркала по сигналу интерферометра позволяет рассчитывать смещение с тем же шагом по времени, с которым производится оцифровка сигнала фотоприемника.

2 Схема численного гетеродинирования практически нечувствительна к амплитудным шумам фотоприемника.

3. Возможность гибкого подбора параметров численного фильтра позволяет одновременно с гетеродинированием фильтровать временную зависимость смещения подвижного зеркала интерферометра и эффективно выделять его кинематическую составляющую.

ЛИТЕРАТУРА

1 Арманова М.В., Дарзнек С.А., Желкобаев Ж., Тодуа П.А. Измерение скорости и ускорения с помощью лазерного интерферометрического фазометра. // Сборник докладов 20-й Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Т.2, С. 326–335, 2010. Издательство Политехнического университета, Санкт-Петербург.

2 Арманова М.В., Дарзнек С.А., Желкобаев Ж. Е., Тодуа П.А. Лазерный гетеродинный интерферометр с прямым расчетом смещения подвижного зеркала по сигналу фотоприемника. // Сборник докладов 22-й международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», Том 2, С.225–231, 2012. Издательство Политехнического Университета, Санкт-Петербург.

3 Leo I. Bluestein, A linear filtering approach to the computation of the discrete Fourier transform. //Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record 10, 218-219, 1968.

4 Giovanni Bianchi and Roberto Sorrentino. Electronic filter simulation & design. //p. 17–20, McGraw-Hill Professional. 2007.

REFERENCES

1 Armanova M.V., Darznek S.A., Zhelkobaev Zh., Todua P.A. Sbornik dokladov 20 Mezhdunarodnoi konferentsii «Lasery. Izmereniya. Informatsiya», V.2, pp. 326–335, 2010, SPb. (in Russ.)

2 Armanova M.V., Darznek S.A., Zhelkobaev Zh., Todua P.A. Sbornik dokladov 22 Mezhdunarodnoi konferentsii «Lasery. Izmereniya. Informatsiya», V 2, pp.225–231, 2012, SPb. (in Russ.).

3 Leo I. Bluestein, A linear filtering approach to the computation of the discrete Fourier transform. Northeast Electronics Research and Engineering Meeting Record 10, 218-219, 1968.

4 Giovanni Bianchi and Roberto Sorrentino. Electronic filter simulation & design. pp. 17–20, McGraw-Hill Professional. 2007.

Summary

To calculate the displacement of the movable mirror in the laser interferometric displacement meters the technique of numerical heterodyne for a signal of the photodiode was used. The digitized signal of the photodiode was multiplied by a system of basic harmonics $\sin \Omega t$ and $\cos \Omega t$ of the carrier frequency Ω and then the high-frequency component was removed by numerical filtering. The resulting low-frequency components were used to restore the time dependence of the interferometer mirror displacement. For the numerical filtering Butterworth filter in the frequency domain was used.

It has been shown that the described scheme allows to calculate displacement of the mirror with a time step significantly lower than in the method of timeslots. The results of experimental data processing for the interferometer mirror oscillation with amplitude of the order of tens of nanometers at frequencies in the kilohertz range are adduced.