# Оценка Достоверности Оптических Измерений

В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А. Кузнецов
Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*Аннотация* – **предложен новый принцип сравнения характеристик и калибровки оптических интерференционных измерительных систем с различными длинами волн лазерного излучения. Результаты измерений образцовой и аттестуемой измерительных систем представляются в виде решения системы сравнений, которая отображается на комплексной фазовой плоскости. Предлагаемый подход позволяет с высокой точностью получить оценку случайных и систематических ошибок измерений без использования специально подготовленных эталонов.**

*Ключевые слова* – **оптические измерения, лазер, эталон.**

## I. ВВЕДЕНИЕ

Оптические интерференционные измерительные системы широко используются при измерениях геометрических параметров рельефа нанообъектов [1,2]. Геометрические параметры связаны с измеряемой интерференционными системами оптической фазой отношением $\delta = \Lambda/2\pi\ \varphi$, где $\delta$ – оптическая разность хода. Новые характеристики и возможности изделий наноиндустрии и свойства материалов, создаваемых в результате применения нанотехнологий, предъявляют особые требования к применяемым средствам измерений. Эти средства измерений должны обладать новыми функциональными возможностями, расширенными диапазонами измерений и повышенной точностью. Отметим, что точность измерения геометрических параметров современными оптическими интерференционными измерительными системами приближается к точности методов атомносиловой и сканирующей зондовой микроскопии.. Поэтому проблема поверки и калибровки оптических интерференционных измерительных систем очень актуальна [3]. Сложность определения истинных погрешностей в таких системах обусловлена отсутствием достоверных средств поверки, точность которых должна превышать точность измерения поверяемых ими систем [4-8].

Для решения данной проблемы авторами предлагается новый подход к метрологии оптических измерительных интерференционных систем, который основан на использовании в качестве эталона фундаментальных констант, к которым относятся такие величины как соотношения длин волн лазерного излучения.

## II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Представим результаты измерения образцовой и аттестуемой измерительных систем с разными длинами волн лазерного излучения в виде решения системы сравнений

$$\delta_1 \equiv \Lambda \bmod \lambda_1,$$
$$\delta_2 \equiv \Lambda \bmod \lambda_2.$$

Учитывая, что интерференционные измерительные системы измеряют оптическую фазу в пределах $2\pi$, измеренные значения $\delta_1$ и $\delta_2$ .следует нормировать на величину длины волны $\delta_1 = \lambda_1/2\pi\ \varphi_1$ и $\delta_2 = \lambda_2/2\pi\ \varphi_2$, соответственно.

Для наглядности отобразим результаты решения в виде траектории точки на комплексной плоскости с координатами $\delta_1$ и $\delta_2$. При изменении измеряемой оптической фазы $\Lambda$ точка будет перемещаться по определенной траектории в пространстве $\delta_1, \delta_2$ (см. Рис.1).

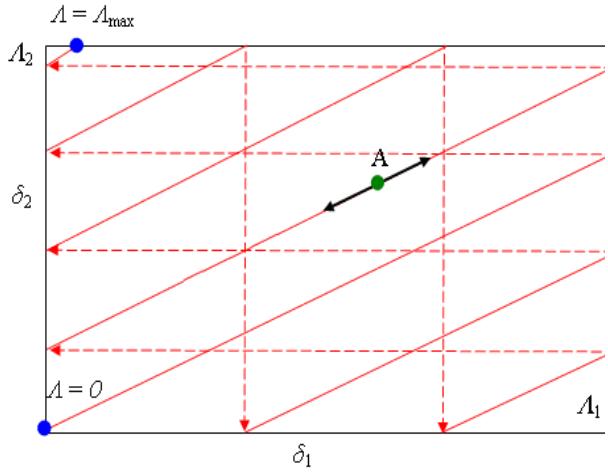



Рис. 1. Траектория интерференционных сигналов $\delta_1$ и $\delta_2$.

Очевидно, что если $\delta_1$ и $\delta_2$ содержат ошибки, то положение точки будет отклоняться от первоначальной траектории. Однако если ограничить возможный диапазон измерений, то можно скорректировать результирующие измерения, используя информацию о соотношении длин волн. Если мы априорно знаем, что измеряемый профиль не превышает некоторой определенной величины, то появляется возможность скорректировать результаты интерференционных измерений. Если длину волны задана с точностью до трех знаков, ограничим диапазон измерений расстояний до 63λ , то в этом случае мы можем скорректировать результаты измерений до λ/1000. При этом исходная погрешность измерений должна быть на уровне λ/100 - λ/250. Заметим, что в этом случае определяется не точное значение, а вероятностная оценка результата измерения. Поэтому истинная величина погрешности будет несколько больше, однако все же следует ожидать значительного улучшения результатов эксперимента.

## III. ЭКСПЕРИМЕТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проверки предложенного подхода были взяты две интерференционные лазерные системы, использующие при измерении метод пошагового фазового сдвига и имеющие длины волн $\lambda_1$=633 и $\lambda_2$=488 нанометра, соответственно.

Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерферограмм при изменении фазы опорной волны на известные значения. Фазовый сдвиг между интерферирующими пучками может быть реализован различными способами. На рис.2 показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике. Дискретный сдвиг опорного зеркала интерферометра изменяет фазу светового пучка на некоторую величину. Затем осуществляется ввод установившегося значения интерференционной картины в компьютер, как правило, в качестве устройства ввода используются цифровые камеры.

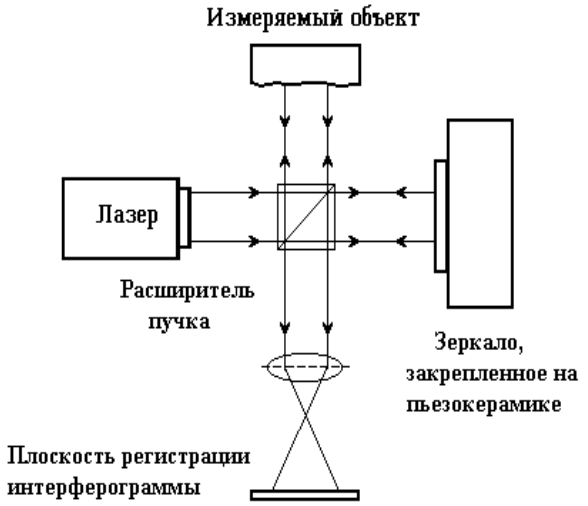



Рис. 2. Схема интерферометра Тваймана-Грина с перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике..

При различных величинах фазовых сдвигов интенсивность интерферограммы с фазовым сдвигом $\Delta$ можно представить в виде

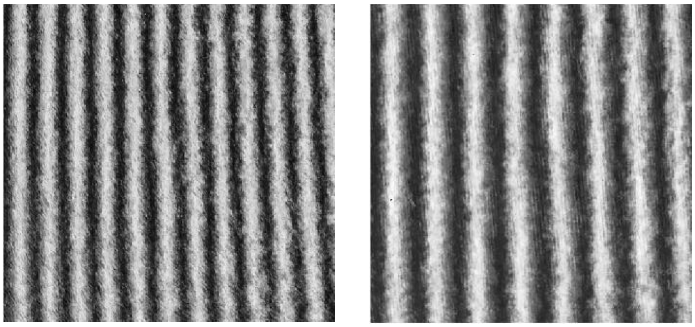
$$I(x,y) = I_0(x,y)\ 1 + V(x,y)\cos(\varphi(x,y) + \Delta_i)\ ,$$

где $i = 1, 2, \ldots, m$, $m$ - число фазовых сдвигов и $\Delta_1 = 0$.

Если фазовые сдвиги одинаковы в интервале от 0 до π, т.е. $\Delta_i = 2\pi\ \ i-1\ /m$, то фаза ϕ может быть определена как

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_{i=1}^{m} I_i \sin \Delta_i}{\sum_{i=1}^{m} I_i \cos \Delta_i}. \qquad (1)$$

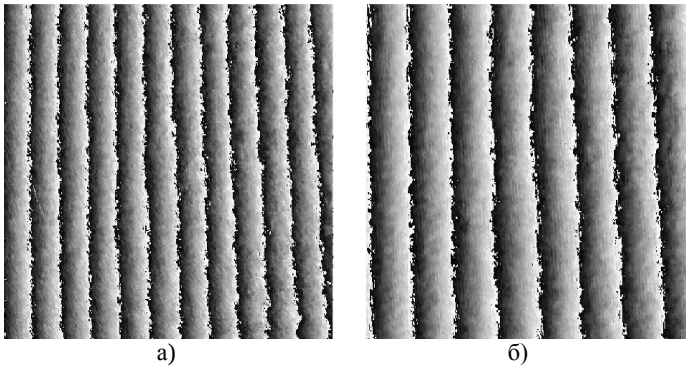
Изменение фазы получали путем сдвига опорного зеркала внешнего интерферометра. На рис.3 показаны типичные интерферограммы, полученные в измерительных системах с длинами волн лазерного излучения 488нм и 633нм, соответственно.



а) б)

Рис. 3. Интерферограммы, полученные с различными длинами волн а) 488нм и б) 633нм

На рисунке 4 показаны результаты расчета оптических разностей фаз $\delta_1$ и $\delta_2$ .по правилу (1)



а) б)

Рис. 4 Разности фаз $\varphi_1$ и $\varphi_2$ .при различных длинах волн а) 488нм и б) 633нм

На рисунке 5 показано распределение измеренных оптических фаз после нормировки подлине волны.

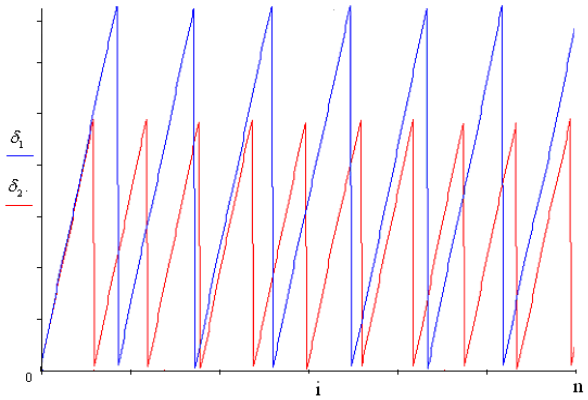



Рис. 5. Распределение нормированных интерференционных сигналов $\delta_1$ и $\delta_2$ в горизонтальном сечении

На рисунке 6 показано распределение измеренных нормированных фаз в комплексной области $\delta_1, \delta_2$ . Из анализа траектории интерференционных сигналов $\delta_1$ и $\delta_2$ следует, что обе системы имеют приблизительно равную точность измерений. Этот вывод получен на основании того, что отклонение траекторного сигнала от идеальной траектории не имеет преобладающего характера, то есть амплитуда отклонения примерно одинакова как по горизонтали ($\delta_1$) - для первой измерительной системы так и по вертикали ($\delta_2$) - для второй измерительной системы, соответственно.

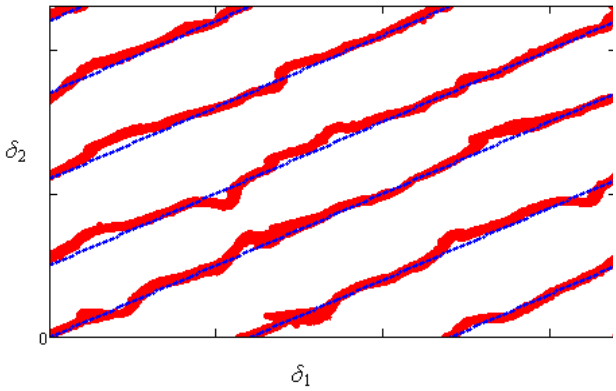



Рис. 6. Траектория интерференционных сигналов $\delta_1$ и $\delta_2$ .

## III. ВЫВОДЫ

Предлагаемый новый подход сравнения характеристик и калибровки оптических интерференционных измерительных систем с различными длинами волн лазерного излучения в качестве эталона использует фундаментальные константы – отношения длин волн лазера и не требует применения дополнительных эталонных мер, поэтому легко реализуется важнейший принцип метрологического обеспечения – самокалибровка измерительных систем в процессе измерения. Анализ траектории измеряемых сигналов также позволяет с высокой точностью получить оценку случайных и систематических ошибок, как эталонной, так и поверяемой измерительной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Bulygin F.V.// Optical and electronic measurements. Collection of articles/ Edited by V.S. Ivanova. – Moscow: Publishing office “University book”, 2005. – p. 420.

[2] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, “Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods,” Opt. Eng. 39, 10–22 (2000).

[3] В.И.Гужов, С.П. Ильиных . – Новосибирск. НГТУ, 2004, 252с.

[4] Тодуа П.А., Быков В.А., Волк Ч.П., Горнев Е.С., Желкобаев Ж., Зыкин Л.М., Ишанов А.Б., Календин В.В., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В.,, б) 633нм.Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В., Саунин С.А., Черняков В.Н. и др. Метрологическое обеспечение измерений длины в микрометровом и нанометровом диапазонах и их внедрение в микроэлектронику и нанотехнологию. Часть III. // Микросистемная техника. — 2004. — № 3. — С. 25-32

[5] P. Hariharan. The Geometric Phase, in Progress in Optics, Vol. XLVIII, E. Wolf, ed., Elsevier, Amsterdam (2005), 149-201.

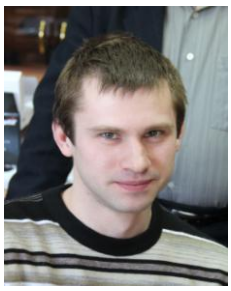
[6] M.N. Morris et al. “Dynamic Phase-Shifting Electronic Speckle Pattern Interferometer,” Proc. SPIE 5869, 58691B-1, (2005).

[7] J.E. Millerd and J.C. Wyant. “Simultaneous phase-shifting Fizeau interferometer,” U.S. Patent 7,057,738B2 (2006) B2 (2006).

[8] P. Hariharan. Basics of Interferometry, Academic Press, N.Y. (2007)

Владимир Гужов - декан факультета Автоматики и вычислительной техники Новосибирского Государственного Технического университета, профессор, доктор технических наук. Он является автором 120 научных работ, в том числе является обладателем 4 патентов. Область научных интересов: программные системы, высокоточные измерения.

Сергей Ильиных - доцент Новосибирского Государственного Технического университета, кандидат технических наук. Он является автором 90 научных трудов, в том числе 1 учебник НГТУ и 4 патента. Область научных интересов: разработка алгоритмов анализа изображений в оптических измерительных системах.



Дмитрий Хайдуков - аспир Новосибирского Государств ного Технического универси та.

Роман Кузнецов - аспир Новосибирского Государств ного Технического универси та.