

УДК 535.4;681.787

Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович,

д.т.н., академик НАН КР,

гл. научный сотрудник Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР

Жумалиев Кубанычбек Мырзабекович,

т.и.д., КРнын УИАнын академиги,

башкы илимий кызматкер,

КРнын УИАнын Академик Ж.Жээнбаев атындагы физика институту

Zhumaliev K.M.,

*doctor of technical sciences, academician of the NAS KR
chief researcher Institute of physics named after J. Jeenbaev NAS KR*

Исмаилов Джапар Авазович,

*к.т.н., зав. лабораторией Космической, информационной технологии
и Цифровая Земля,*

Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР

Исмаилов Джапар Авазович,

т.и.к., Космос, маалымат технологиялары

жана санариптик жер лабораториясынын башчысы

КР УИАнын академик Ж.Жээнбаев атындагы физика институту

Ismailov D.A.,

*candidate of technical sciences, head of the laboratory of space,
information technology and digital earth*

Institute of physics named after J. Jeenbaev NAS KR

Кулиш Татьяна Эдуардовна,

научный сотрудник, Институт физики им. академика Ж.Жеенбаева НАН КР

Кулиш Татьяна Эдуардовна,

илимий кызматкер,

КРнын УИАнын академик Ж.Жээнбаев атындагы физика институту

Kulish T.E.,

researcher, Institute of physics named after J. Jeenbaev NAS KR

МЕТОД ДВУХ И НЕСКОЛЬКИХ ДЛИН ВОЛН

Аннотация. В данной статье рассмотрена методика измерения рельефа поверхности методом интерферометрии с помощью двух и нескольких длин волн. В отличие от класси-

ческой голографической интерферометрии, которая использует фотопластинки, в цифровой голографии обе голограммы могут быть восстановлены отдельно с использованием необходимых длин волн.

Ключевые слова: Голограмма, цифровая голография, интерферометрия, длина волны, интерферометр Маха Цендера.

ЭКИ ЖАНА КӨП ТОЛКУНДУУ МЕТОД

Аннотация. Бул макалада эки жана бир нече толкун узундуктары аркылуу, интерферометрия методу менен, жер бетинин топографиясын өлчөө ыкмасы талкууланат. Фотографиялык пластинкаларды колдонгон классикалык голографиялык интерферометриядан айырмаланып, санариптик голографияда эки голограмма тең керектүү толкун узундуктарын колдонуу менен өзүнчө реконструкцияланышы мүмкүн.

Негизги сөздөр: Голограмма, санариптик голография, интерферометрия, толкун узундугу, Мах Зендер интерферометри.

TWO AND MULTI WAVELENGTH METHOD

Abstract. This article discusses a technique for measuring the surface topography by interferometry using two or more wavelengths. Unlike classical holographic interferometry, which uses photographic plates, in digital holography both holograms can be reconstructed separately using the required wavelengths.

Keywords: Hologram, digital holography, interferometry, wavelength, Mach Zehnder interferometer.

В данной статье рассмотрена методика измерения рельефа поверхности, когда методом двух и нескольких длин волн записывают две голограммы с разными волновыми длинами λ_1 и λ_2 .

Общепринятая голографическая интерферограмма [1-3] создается наложением волн, рассеянных двумя разными путями. Интерферограмма несет в себе информацию о смене фазы между волнами в качестве темных и светлых полос. Несмотря на это, фаза интерференции не может быть выведена из единичной интерферограммы. Фаза интерференции обычно выводится из трех и более интерферограмм со сдвигом по фазе при помощи алгоритма сдвига фазы. Это требует дополнительных исследований.

Цифровая голография [4] позволяет использовать совершенно другой способ расчета. Каждое состояние объекта записывается в отдельную голограмму и вместо наложения этих голограмм друг на друга, как это принято в классической голографии, цифровые голограммы преобразуются отдельно друг от друга.

Фаза интерференции неопределенна по отношению к добавочным числам, кратным 2π , следовательно, она равна модулю 2π . Информация о добавочной константе тоже теряется в процессе голографической интерферометрии.

Это свойство не эксклюзивно только для цифровой голографической интерферометрии, оно присутствует во всех интерферометрических методиках, которые используют длину волны, как единицу измерения длины. Чтобы превратить фазу интерференции по модулю 2π в непрерывную фазу, можно применить стандартный алгоритм развертки фазы для общепринятой интерферометрии. В этом случае был применен обычный алгоритм развертки. Вектор чувствительности, использованный для записи голограммы, почти постоянен и перпендикулярен по отношению к поверхности.

Для измерения фигуры методом двух и нескольких длин волн записывают две голограммы с разными волновыми длинами λ_1 и λ_2 . В классической голографической интерферометрии обе голограммы записывают на одной фотопластинке. Обе голограммы восстанавливают с одинаковой длиной волны, поэтому получают два изображения объекта. Изображение, записанное и восстановленное при λ_1 , является точной копией поверхности оригинального объекта. Изображение, которое было записано при λ_1 , а восстановлено при λ_2 , будет смещено в сторону наблюдателя. Эти два восстановленных изображения пересекаются.

Концепт двухволнового контурирования был представлен в цифровой голографии довольно давно. Две голограммы записываются с длинами волн λ_1 и λ_2 и сохраняются электронно. То есть, при помощи установки, показанной на рисунке 1. В отличие от классической голографической интерферометрии, которая использует фотопластинки, в цифровой голографии обе голограммы могут быть восстановлены отдельно с использованием необходимых длин волн. В результате чего мы получим комплексные амплитуды $\Gamma_{\lambda_1}(\xi, \eta)$ и $\Gamma_{\lambda_2}(\xi, \eta)$, при помощи которых можно рассчитать фазы:

$$\varphi_{\lambda_1}(\xi, \eta) = \arctg \frac{\text{Im}\Gamma_{\lambda_1}(\xi, \eta)}{\text{Re}\Gamma_{\lambda_1}(\xi, \eta)} \quad (1)$$

$$\varphi_{\lambda_2}(\xi, \eta) = \arctg \frac{\text{Im}\Gamma_{\lambda_2}(\xi, \eta)}{\text{Re}\Gamma_{\lambda_2}(\xi, \eta)} \quad (2)$$

Для анализа погрешности рассчитывают разность фаз:

$$\Delta\varphi = \begin{cases} \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2}, & \text{при } \varphi_{\lambda_1} \geq \varphi_{\lambda_2} \\ \varphi_{\lambda_1} - \varphi_{\lambda_2} + 2\pi, & \text{при } \varphi_{\lambda_1} < \varphi_{\lambda_2} \end{cases} \quad (3)$$

Получившаяся система фаз эквивалентна распределению фаз голограммы, записанной с синтетической длиной волны Λ .

Подобно разности фаз, рассчитывается разность длин волн:

$$\Delta H = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2|\lambda_1 - \lambda_2|} = \frac{\Lambda}{2} \quad (4)$$

Типичный пример двухволнового контурирования показан на рисунке 2. В цифровой голографической интерферометрии контурирование обеих голограмм, восстановленных с точной длиной волны, может производиться одновременно.

Модифицированный подход к контурированию, который также называется методом нескольких волн, может использовать две или более длин волн для компенсации неопределенности по модулю на фазе 2π .

Преимуществом такого метода является возможность его использования на объектах с неопределенностями по фазе.

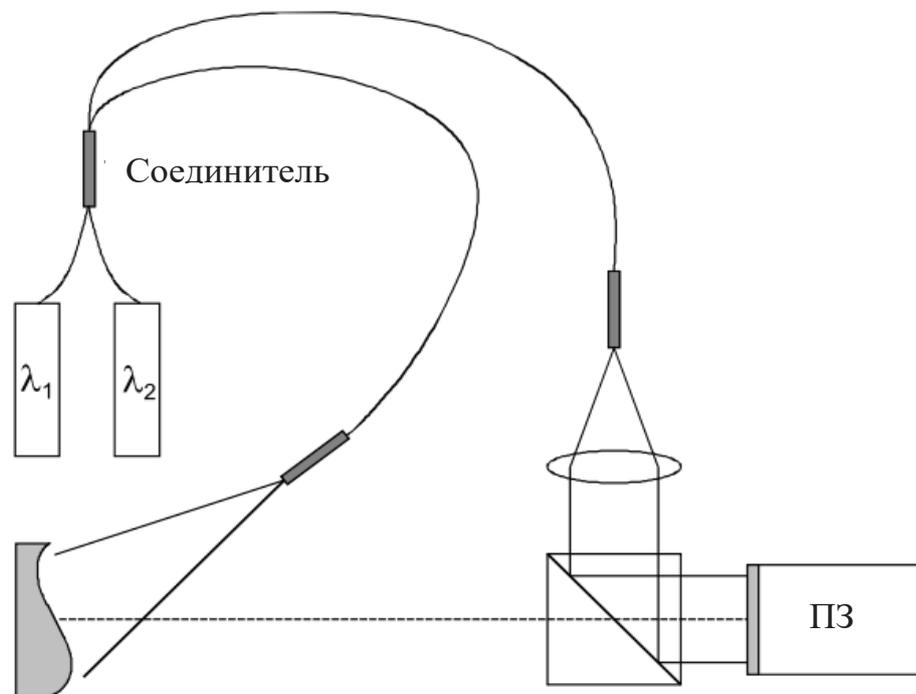


Рис. 1. Цифровая двухволновая голографическая интерферометрия

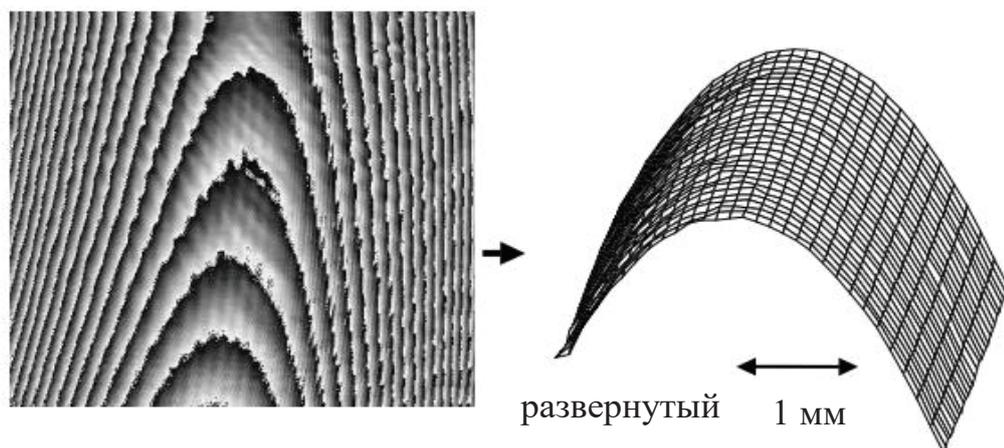


Рис.2. Запись структуры объекта через цилиндрическую линзу методом двухволнового контурирования. Видимая часть: 3×2 мм

Иерархическая фазовая развертка

Как было сказано ранее, процесс фазовой развертки всегда одинаковый как для КГИ (классическая голографическая интерферометрия), так и для ЦГИ (цифровая голографическая интерферометрия), и в целом для всех методов, которые генерируют изображения по модулю 2π . Для многоволнового контурирования в ЦГИ лучше использовать специальную процедуру развертки под названием «иерархическая фазовая развертка».

Практическое применение интерферометрического контурирования приводит к следующим проблемам:

- Проблема с подсчетом граней: Фазы интерференции периодичны. Для двухволнового метода длина периода равна половине синтетической длины волны. Если края, углы, выпуклости или любые другие искривления есть на поверхности, то невозможно подсчитать абсолютный интерференционный порядок и фазу. Для того, чтобы получить точный анализ, нужно обязательно использовать синтетическую длину волны, в два раза больше максимальной высоты объекта, что приводит ко второй проблеме:

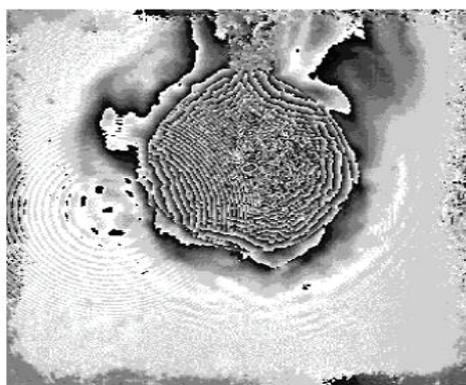
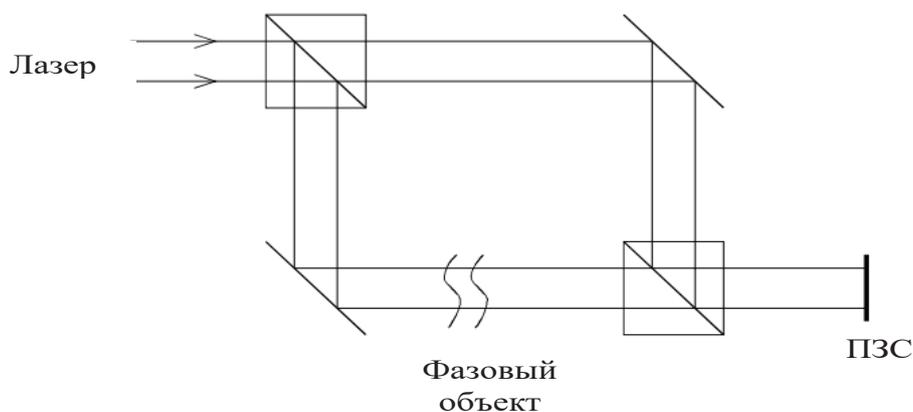
- Шумовая проблема: фоновый шум при измерениях фазы увеличивается вместе с увеличением длины волны. Большая длина синтетической волны, нужная для получения точных фазовых величин, часто приводит к сильному фоновому шуму.

Вычисление изменения показателя отклонения (преломления)

ЦГИ (цифровой голографической интерферометрии) также используется в нахождении изменения показателя отклонения на установках, вроде той, что показана на рисунке 3 [5]. Расширенный лазерный луч разделяется на эталонный и объектный. Объектный луч пересекает прозрачную фазу объекта и освещает ПЗС. Эталонный луч же падает прямо на ПЗС. Оба луча интерферируют, записывая голограмму. Такая установка очень похожа на классический интерферометр Маха Цендера. Различие заключается в том, что тут объект интерференции – голограмма, которая может быть восстановлена цифровым путем, следовательно, все свойства цифровой голографии могут быть использованы.

Записываются две голограммы, как и в анализе деформаций: Первый контакт происходит перед, а второй после изменения показателя отклонения.

Цифровые голограммы восстанавливаются цифровым путем. На рисунке 4 показано типичное изображение интерференции по модулю 2π . Голограммы записываются на установке показанной на рисунке 3.

Рис. 3. ЦГИ установка для объектов с прозрачной фазой**Рис. 4.** Свернутая фаза жидкой системы

Выводы

Исходя из представленного в этой главе научного материала, можно сделать следующий вывод: цифровая голография и цифровая голографическая интерферометрия хоть и имеют много общего с их классическими аналогами, также имеют с ними существенные различия. Эти различия видны во всем, начиная с процесса записи голограмм и заканчивая структурами записывающих установок. Пусть, цифровая голография и голографическая интерферометрия являются новее их классических предшественников, сказать однозначно, какие из них лучше сложно. Многие погрешности, имевшиеся в классической голографии и голографической интерферометрии, были устранены в цифровых вариантах, но им на смену пришли совершенно новые, также требующие серьезных доработок и комплексных улучшений.

К примеру, погрешности, образующиеся при нахождении фазы интерференции, приводящие к различным искривлениям восстановленных голографических изображений. Но даже несмотря на все имеющиеся погрешности цифровая голография и голографическая интерферометрия ушли довольно далеко в плане качества изображений, записывающего оборудования и оптимальности процесса обработки исходной информации, ее регистрации, хранения и передачи. Стоит также отметить недостатки методов обнаружения деформаций, которые заключаются в искривлениях интерференционной картины, потери информации при ее сжатии, высокой стоимости установок и недоработках, связанных с преобразованиями методом свертки.

Литература

1. *Исмаилов Д.А., Кулиш Т.Э.* Запись серии двухэкспозиционных голографических интерферограмм на плоских регистрирующих средах // Журнал «Наука и образование сегодня», Олимп (Иваново), № 7 (30), 2018 год, стр. 5-8.
2. *Кулиш Т.Э.* Анализ методов голографической интерферометрии // Научный журнал ФИЗИКА. 2021, № 1. С. 9-18.
3. *Кулиш Т.Э., Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М.* Состояние и проблемы разработки методик голографической интерферометрии на основе объемных регистрирующих сред // Научный журнал ФИЗИКА. 2019, № 2. С. 7-14.
4. *Кулиш Т.Э., Исмаилов Д.А.* Цифровая реконструкция голограмм // Научный журнал ФИЗИКА. 2021, № 1. С. 19-28.
5. *Ostrovsky Y.I., Butosov M.M., Ostrovskaja G.V.* (1980) *Interferometry by Holography*. Springer, New York.