

# Устранение фазовой неоднозначности методом выделения зон монотонности при разработке 3D сканеров

Гужов В.И., Плешкевич А.А.  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В статье рассматривается построение 3D сканеров на основе проецирования синусоидальных картин. Основное внимание уделяется методу устранения фазовой неоднозначности на основе выделения зон монотонности.

**Ключевые слова** 3D сканеры, пошаговый фазовый сдвиг, устранение фазовой неоднозначности

## ВВЕДЕНИЕ

3D-сканеры, работающие по технологии структурированного освещения, представляют собой проекцию известной картины непосредственно на объект, деформация этого рисунка и представляет собой модель профиля сканируемого предмета [1–3] (Рис. 1).

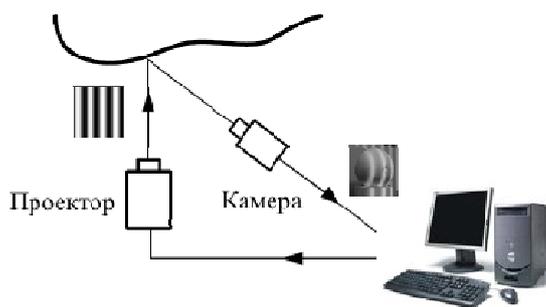


Рис. 1. Схема установки для регистрации профиля объектов методом структурированного освещения

Наибольший интерес представляют системы измерения профиля, основанные на выделении фазовой информации. В таких системах на объект проецируется система полос, имеющая синусоидальное распределение.

Методы выделения фазовой информации, разработанные для интерференционных и голографических систем [4], подходят и для 3D сканеров с освещением объекта картиной синусоидальных полос. Интерференционные картины, возникающие при когерентном освещении, предназначены для измерения рельефа в диапазоне от долей нанометров до десятков микрометров. При использовании синусоидального освещения, максимальная величина, измеряемого рельефа больше (от долей мм до нескольких метров).

Картину полос можно описать с помощью следующего выражения

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

где  $I_0(x, y)$  – средняя интенсивности,  $V(x, y)$  – средняя видность или контраст,  $\Delta\varphi$  – разность фаз, возникающая в результате отклонения профиля объекта от плоскости.

Профиль зависит от фазовой разности и известных геометрических параметров установки [5]. Основная задача расшифровки – определение разности фаз по картинам зарегистрированным камерой полос проецируемых на объект. Универсальный алгоритм определения разности фаз по серии проекции синусоидальных картин с известным изменением начальной фазы описан в [4, 6].

Целью данной работы является устранение  $2\pi$ -неоднозначность на основе определения зон монотонности.

## 1. УСТРАНЕНИЕ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ МЕТОДОМ РАЗВЕРТЫВАНИЯ

Одним из факторов, сдерживающих широкое распространение фазовых методов для построения 3D сканеров, является ограниченный диапазон измерений. По спроецированным картинам синусоидальных полос фазовые значения могут однозначно восстанавливаться только в пределах периода от 0 до  $2\pi$ . Причина этого – периодический характер синусоидальной картины, проецируемой на объект. В результате возникает фазовая неоднозначность или  $2\pi$ -неоднозначность. Полная фаза определяется развертыванием фазы, т.е. последовательным добавлением или вычитанием  $2\pi$  к соседним точкам, если перепад между ними превышает некоторый порог (Рис. 1). Такая процедура основана на допущении, что резкие (более периода) скачки отсутствуют.

Для прослеживания границы перехода необходимо, чтобы число периодов было на порядок меньше, чем точек в массиве детектора. Это возможно только при анализе плавных фазовых фронтов. Гипотеза о существовании фазового перехода в некоторой точке фазового поля принимается в зависимости от результатов анализа ее окрестности. Такая процедура называется фазовым развертыванием.

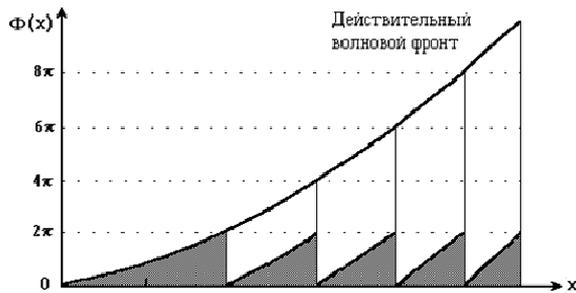


Рис. 2. Восстановление полной фазы (серым цветом обозначен измеренный волновой фронт)

Первые работы по фазовому развертыванию строились на сравнении соседних значений в столбцах и строках массива. При этом использовалась информация о предыдущих восстановленных точках для определения волнового фронта в следующих точках. Поскольку процедура развертывания на каждом шаге зависит от предыдущих вычислений, единичная ошибка приводила к лавинообразному нарастанию погрешности.

Лучшие результаты дает модификация метода с использованием анализа по областям [7]. Каждая точка связывается с определенной областью, в которой не должно быть фазовых скачков. Такие области ограничены линиями фазовых разрывов. Каждой области ставится в соответствие целое число, которое показывает, что в этой области ко всем точкам нужно добавить или вычесть  $2\pi n$ .

Рассмотрим этот алгоритм на примере определения профиля шара с выемкой.

После определения разности фаз измеренные значения имеют резкие фазовые переходы. (Рис. 3).

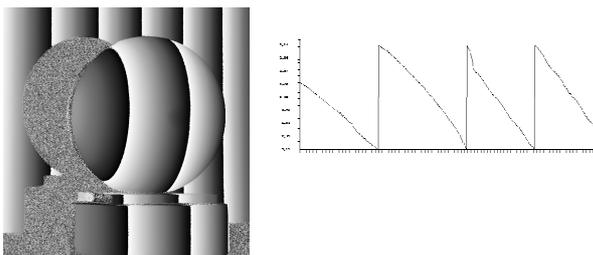


Рис. 3 Исходное поле фаз (слева) и график по сечению шара (справа)

Алгоритм устранения фазовой неоднозначности можно разбить на несколько этапов.

**Первый этап** – выделение границ зон фазовой монотонности. Границы областей монотонности распределения фаз выделяются по перепадам близким к  $2\pi$ . В пределах этих зон фазовые значения распределяются от 0 до  $2\pi$ . Выделенные границы очень редко имеют хорошее качество. В большинстве случаев они имеют разрывы, которые необходимо устранять

вручную. Иногда границы областей могут быть достаточно сложными, чтобы можно было их проанализировать оператору. Результаты выделения зон разрывов и определения областей с одинаковой зоной монотонности фазы показаны на Рис. 4.

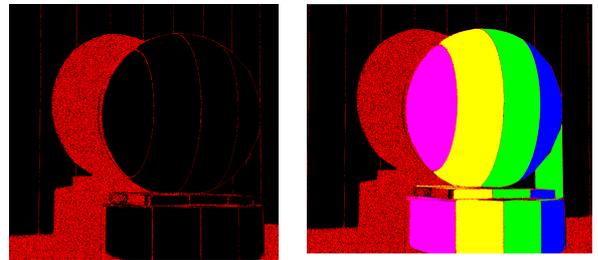


Рис. 4 Границы областей (слева) и выделенные зоны монотонности фазы (справа)

**Второй этап** – заполнение областей. На это м этапе оператор для каждой области задает число  $n$ , которое указывает, сколько периодов надо добавить или вычесть из всех точек области. Это число задается исходя из априорного знания о форме поверхности. Для удобства оператора каждому значению ставится в соответствие определенный цвет (Рис. 4 справа)

**Третий этап** – восстановление полной фазы. Этот этап выполняется автоматически. Для точек из выделенных областей исходного фазового распределения добавляются значения  $2\pi n$  (Рис. 5).

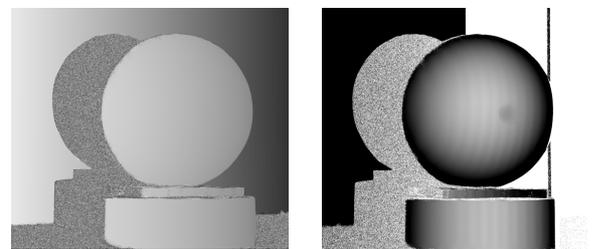


Рис. 5. Восстановление полной фазы анализом областей (слева результирующее поле фаз после устранения фазовой неоднозначности, справа – после устранения наклона)

Предложенный алгоритм позволяет анализировать достаточно сложные распределения, однако требует наличие у оператора априорной информации о профиле.

## II. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПРИ ПРОЕКЦИРОВАНИИ СЕРИИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КАРТИН

В качестве объекта выберем скульптуру с диффузной поверхностью (Рис. 6).

Проецируем с помощью проектора, (Рис. 1) на объект серию полос с фазовыми сдвигами  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$  и  $270^{\circ}$  (Рис. 7).



Рис. 6. Исходный объект



Рис. 7. Объект, покрытый синусоидальными полосами

Фазовая разность может определяться по серии картин (Рис. 7) с помощью следующего выражения [8]

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)}, \quad (2)$$

где  $I_i(x, y)$  - интенсивность  $i$ -го изображения в точке  $(x, y)$ . Результирующая разность фаз показана на Рис. 8.

На Рис. 9 показаны выделенные зоны монотонности фазы и результаты измерения разности фаз с учетом этих зон. Для выделения этих зон разработана программная система для определения однородных фазовых областей, похожая на интерактивный графический редактор.

На Рис. 10 приведены результаты измерения профиля с наложением текстуры объекта.

Таким образом, может быть реализован 3D сканер на основе проекции на объект серии синусоидальных картин. Можно показать, что погрешность измерения составит от сотой до тысячной размера проецируемых полос.

При размере полосы 10 мм погрешность измерения 10-100 мкм. Величина этой погрешности зависит от качества проецируемых полос (от соответствия их профиля синусоидальному).

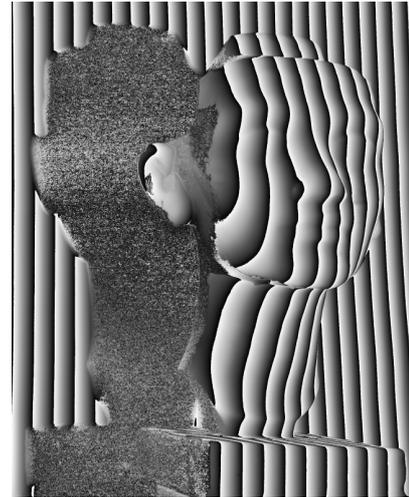


Рис. 8. Разность фаз, определенная по алгоритму (2)

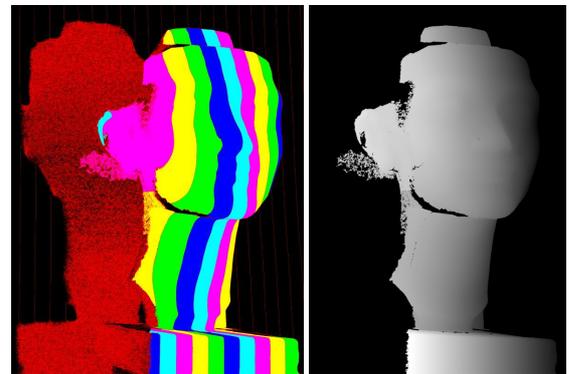


Рис. 9. Зоны монотонности фазы, выделенные оператором (слева), и результаты устранения фазовой неоднозначности (справа)

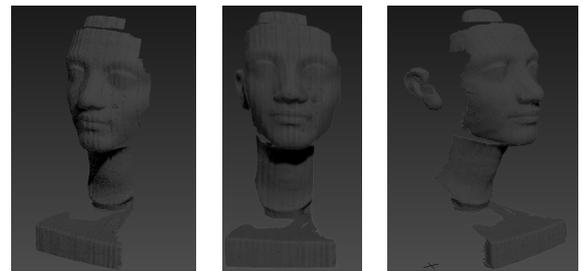


Рис. 10. Измеренный профиль

### III. ВЫВОДЫ

В статье представлен простой 3D сканер для измерения профиля полос, основанный на проецировании серии синусоидальных полос. Основная проблема при получении профиля – устранение фазовой неоднозначности.

Для устранения фазовой неоднозначности разработана интерактивная система для определения зон монотонности.

Основными недостатками предложенного алгоритма являются:

- необходимость ручной коррекции зон монотонности;

- число анализируемых областей невелико, что ограничивает возможный диапазон измерений.

Однако описанная система достаточно проста и может быть реализована без существенных финансовых затрат на приобретение 3D сканеров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка методов сверхразрешения в цифровой голографической интерферометрии» (Грант № 16-08-00565).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Song Zhang. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement. Abstract of the Dissertation. Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Stony Brook University. 2005. P. 127.
- [2] В.И. Гужов Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 82 с.
- [3] J. Salvi, J.I. Pages, J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. Pattern Recognition 37 (2004). P. 827–848.
- [4] В.И. Гужов, С.П. Ильиных. Компьютерная интерферометрия: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. 252 с.
- [5] В.И. Гужов, С.П. Ильиных, А.И. Уберт. Проекционный метод измерения рельефа. Научный вестник НГТУ. 2012. №1(46). С. 23–28.
- [6] В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, А.Р. Вагизов. Универсальный алгоритм расшифровки. Научный вестник НГТУ. 2010. №4(41). С. 51–58.
- [7] В.И. Гужов, А.В. Тимшин. Устранение фазовой неопределенности при расшифровке голографических интерферограмм. Интерференционно-оптические методы механики твердого тела и механики горных пород. Тезисы докладов Всесоюзного семинара. Новосибирск: ИГД СО АН СССР. 1985. С.141.
- [8] J.C. Wyant, K. Creath. Recent advances in interferometric optical testing. Laser Focus. 1985. p.118–132.

## Eliminating of Phase Ambiguity by Separation of Zones Monotonicity in the Development of 3D Scanners

V.I. GUZHOV, A.A. PLESHKEVICH

*Abstract:* The paper discusses the construction of 3D scanners on the basis of projection of sinusoidal patterns. The focus is on the method of elimination of phase ambiguities on the basis of allocation zones of monotony.

*Key words:* 3D scanners, incremental phase shift, eliminating of phase ambiguities

## REFERENCES

- [1] Song Zhang. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement. Abstract of the Dissertation. Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Stony Brook University. 2005. P. 127.
- [2] V.I. Guzhov. Methods for measuring the profile of 3D-objects. Contact, triangulation systems and methods for structured lighting: Proc. Benefit. Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2015. 82 p.
- [3] J. Salvi, J.I. Pages, J. Batlle. Pattern codification strategies in structured light systems. Pattern Recognition 37 (2004). P. 827–848.
- [4] V.I. Guzhov, S.P. Ilyinikh. Computer interferometry: Proc. allowance. - Novosibirsk: Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2004. 252.
- [5] V.I. Guzhov. S.P. Ilyinikh, A.Hubert. Projection method for measuring topography. Scientific Bulletin of the NSTU. 2012. №1 (46). P. 23–28.
- [6] V.I. Guzhov, S.P. Ilyin, D.S. Khaidukov, A.R. Vagizov. Universal decryption algorithm. Scientific Bulletin of the NSTU. 2010. №4 (41). P. 51–58.
- [7] V.I. Guzhov, A.V. Timshina. Eliminating the phase of uncertainty in decoding holographic interferograms. Interference-optical methods of solid mechanics and rock mechanics. Abstracts seminar. Union Novosibirsk: IGD SO AN SSSR, 1985. p.141.
- [8] J.C.Wyant, K. Creath. Recent advances in interferometric optical testing. Laser Focus. 1985. p.118–132.



**Владимир Иванович Гужов** – профессор кафедры ССОД Новосибирского Государственного Технического университета, доктор технических наук. Он является автором более 190 научных работ. Область научных интересов:

высокоточные интерференционные измерения, боезибочные вычисления, теория чисел.  
E-mail: [vig@nstu.edu.ru](mailto:vig@nstu.edu.ru)



**Александр Плешкевич** – магистрант 2 курса каф. ВТ НГТУ.