

# Мультиспектральная фантомная визуализация с излучением суперконтинуума: верификация концепции

*Е. Н. Опарин, В. С. Шумигай, А. О. Исмагилов, А. В. Черных, Н. В. Петров, А. Н. Цыпкин*  
Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Предложена и реализована методика восстановления амплитудных изображений на основе фантомной визуализации со спектральным мультиплексированием при использовании одного ПВМС. В работе использовался выделенный диапазон спектрального суперконтинуума от 560 до 680 нм. Мультиплексирование осуществлялось при помощи двух дифракционных решеток, которые осуществляли спектральное разделение входного пучка. Независимая фазовая модуляция проводилась на 10 спектральных каналах, для которых были выделены отдельные участки матрицы ПВМС. После дифракции на исследуемом объекте излучение фокусировалось на датчик спектрометра, где одновременно регистрировались наборы интенсивностей спектральных каналов.

*Ключевые слова:* Фантомная визуализация, Спектральный суперконтинуум, Пространственный модулятор света, Передача информации, Дистанционное зондирование.

*Цитирование:* **Опарин, Е. Н.** Мультиспектральная фантомная визуализация с излучением суперконтинуума: верификация концепции / Е. Н. Опарин, В. С. Шумигай, А. О. Исмагилов, А. В. Черных, Н. В. Петров, А. Н. Цыпкин // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 414–416.

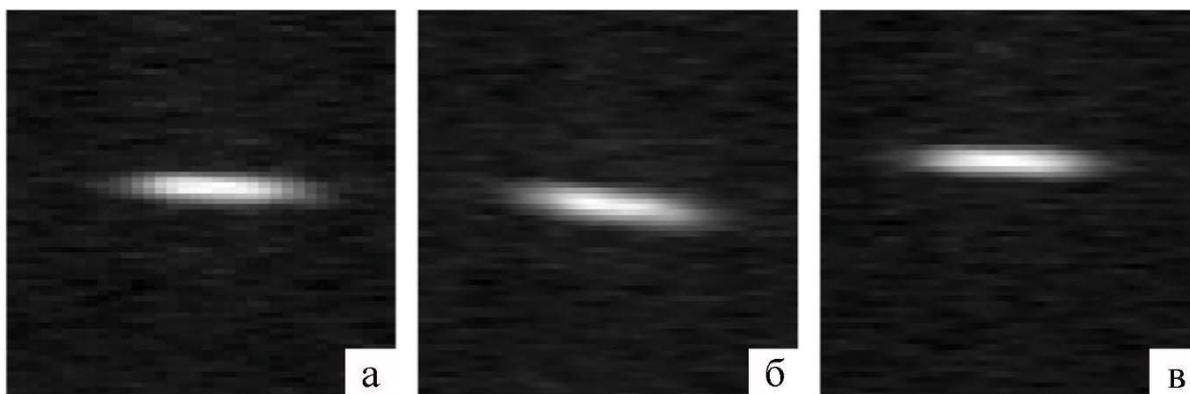
Одним из эффективных методов дистанционного отслеживания объектов в условиях зашумленности [1] является фантомная визуализация, которая основывается на вычислении корреляционной функции между парами сигнальных и холостых фотонов [2]. В классической интерпретации фантомной визуализации исследуемый объект освещается набором псевдослучайных структур, сигнальные фотоны, прошедшие через образец, регистрируются единичным детектором, а холостые, продублированные от входного излучения, – матричным детектором. Корреляция между этими двумя сигналами позволяет восстанавливать поперечное амплитудное изображение объекта. Однако, при использовании пространственно-временного модулятора света (ПВМС) можно контролировать структуру поля, освещающую объект, и отказаться от регистрации холостого сигнала, задействовав в вычислениях только его компьютерную модель распределения [3]. Помимо этого, применение ПВМС позволяет сделать технику фантомной визуализации динамически адаптируемой к пространственным параметрам поля и исследуемого образца [4].

Техника фантомной визуализации ограничена скоростью ее реализации и не подходит для восстановления динамически-меняющихся объектов, поскольку требуется регистрация порядка нескольких тысяч взаимно независимых сигналов. Ускорение реализации методики фантомной визуализации возможно за счет перехода от последовательного освещения спекл-структурами к параллельному, используя, например, излучение на различных длинах волн [5]. В работе [5] использовалось излучение на трех длинах волн, каждой из которых

пропускалось через отдельный ПВМС. В данной работе представлена методика фантомной визуализации со спектральным десяти-канальным мультиплексированием, когда в каждом канале содержатся взаимно независимые спекл-структуры поля, сформированные на одном ПВМС.

В качестве источника излучения использовался суперконтинуум в видимом диапазоне длин волн, полученный посредством лазерной филаментации фемтосекундного излучения в воде [6]. Мультиплексирование спектральных компонент осуществлялось за счет двух дифракционных решеток. Спектрально-разделенный коллимированный пучок в диапазоне 560-680 нм освещал матрицу ПВМС, причем так, что каждая выделенная компонента пучка дифрагировала на отдельной площадке матрицы. После отражения от матрицы ПВМС спектрально мультиплексированный пучок от этих же дифракционных решеток фокусировался ахроматической линзой, формируя изображение в плоскости исследуемого объекта «щель» с шириной 1,5 мм. Прошедшее излучение через щель фокусировалось на детекторе спектрометра, где одновременно регистрировалась интенсивность по десяти отдельным спектральным каналам.

В ходе проведения эксперимента было использовано 5000 псевдослучайных спекл-структур. После процедуры обработки данных было восстановлено изображение щели (рис. 1а). Для верификации концепции было проведено еще два измерения, на рис. 1б и рис. 1в показано восстановленное изображение щели в случаях поворота и сдвига щели соответственно.



**Рис. 1.** Восстановленные изображения щели первоначальное положение (а), повернутое (б) и смещенное по вертикали (в).

Таким образом, экспериментально была продемонстрирована возможность увеличения скорости регистрации данных в методе фантомной визуализации за счет спектрального мультиплексирования по десяти независимым каналам.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903). The study was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Passport No. 2019-0903).

## Список источников

- [1] **Clemente P.** Optical encryption based on computational ghost imaging / P. Clemente [et al.] // Optics Letters. – 2010. – Vol. 35. – № 14. – P. 2391.
- [2] **Padgett M. J.** An introduction to ghost imaging: quantum and classical / M. J. Padgett, R. W. Boyd // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2017. – Vol. 375. – № 2099. – P. 20160233.
- [3] **Shapiro J. H.** Computational ghost imaging / J. H. Shapiro // Physical Review A. – 2008. – Vol. 78. – № 6. – P. 061802.
- [4] **Adam I. A.** Computational ghost imaging with the sweeping algorithm / I. A. Adam [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1984. – № 1. – P. 012004.
- [5] **Zhang D.-J.** Wavelength-multiplexing ghost imaging / D.-J. Zhang [et al.] // Physical Review A. – 2015. – Vol. 92. – № 1. – P. 013823.
- [6] **Тсыпкин А. Н.** Generation of high-intensity spectral supercontinuum of more than two octaves in a water jet / A. N. Tsyarkin [et al.] // Applied Optics. – 2016. – Vol. 55. – № 29. – P. 8390.

## Multispectral ghost imaging with supercontinuum radiation source: proof of concept study

*E. N. Oparin, V. S. Shumigay, A. O. Ismagilov, A. V. Chernykh, N. V. Petrov, A. N. Tsyarkin*  
ITMO University, Saint Petersburg, Russia

The technique of amplitude image reconstruction based on wavelength-multiplexing ghost imaging with a single SLM has been proposed and implemented. A separated spectral supercontinuum range from 560 to 680 nm was used in this work. Multiplexing of the spectral components was carried out via two diffraction gratings, which performed spectral separation of the input beam. Independent phase modulation was performed on 10 spectral channels, for which separate areas of the SLM matrix were allocated. After diffraction on the studied object, the light was focused to the spectrometer sensor, where the sets of spectral channel intensities were simultaneously registered.

*Keywords:* Ghost imaging, Supercontinuum, Spatial light modulator, Data transmission, Remote sensing.