

## 6. Регистрация цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком

С. Г. Каленков<sup>1</sup>, П. С. Винников<sup>1</sup>, Г. С. Каленков<sup>2</sup>, А. Е. Штанько<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НТЦ «Оптоэлектроника» Московского политехнического университета, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

Рассмотрен метод и соответствующая оптическая схема регистрации и реконструкции цифровых объемных голограмм. Оптическая схема регистрации представляет собой сканирующий интерферометр, например, интерферометр Майкельсона или Маха — Цандера с 2D матрицей регистрации. Источник света-лазер. В работе показано, что набор цифровых голограмм, записанных со сканирующим опорным пучком, позволяет реконструировать комплексную амплитуду объектного поля. Показано, что предложенный метод регистрации цифровых голограмм может рассматриваться как цифровой аналог голографии Денисюка и как обобщение известного метода фазовых шагов. В частности, получено условие, связывающее число шагов (число голограмм) с величиной фазового шага. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие предложенный метод. Работа поддержана грантом РФФИ 18-07-01403.

*Ключевые слова:* Оптика, Гиперспектральная голография, Фазовые шаги.

*Цитирование:* Каленков, С. Г. Регистрация цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком / С. Г. Каленков, П. С. Винников, Г. С. Каленков, А. Е. Штанько // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 36–39.

### Введение

Сканирующий интерферометр с 2D матрицей регистрации и источником белого света был использован в наших работах [1] для регистрации гиперспектральных голограмм. Серия интерферограмм записывалась в процессе движения подвижного (сканирующего) зеркала, при этом плоский опорный световой пучок, отраженный от зеркала, приобретал для каждой спектральной компоненты света  $\sigma = 1/\lambda$  ( $\lambda$  — длина волны) фазовый набег  $\varphi(\delta) = 2\pi\sigma\delta$ , где  $\delta$  — смещение зеркала от положения нулевой разности хода. Поскольку зеркало перемещалось на расстояние  $\pm L$ , то фаза опорного пучка сканировалась в пределах  $\varphi(L) = \pm 2\pi\sigma L$ . Интерферограмма — зависимость интенсивности интерференционного поля  $G_{\text{int}}(\xi, \delta)$  от переменной  $\delta$ , имела вид:

$$G_{\text{int}}(\xi, \delta) = \int S(\sigma)[A(\sigma, \xi)r \exp(-2\pi i\sigma\delta) + A^*(\sigma, \xi)r \exp(2\pi i\sigma\delta)] d\sigma. \quad (1)$$

Здесь:  $r \exp(2\pi i\sigma\delta)$  — опорная волна, с амплитудой  $r$ ,  $A(\sigma, \xi)$  — комплексная амплитуда предметного поля поступающего на матрицу регистрации,  $\xi$  — координата в плоскости регистрации, и  $S(\sigma)$  — спектральная плотность мощности источника. Интегрирование ведется по интервалу  $\Omega$  где  $S(\sigma)$  отлична от нуля. Как показано в работе [2] преобразование Фурье на

спектральной частоте  $\sigma$  интерферограммы  $G_{\text{int}}(\xi, \delta)$  по переменной  $\delta$  дает комплексную амплитуду  $A(\sigma, \xi)$  на каждой спектральной частоте  $\sigma$ , т. е. гиперспектральную голограмму объектного поля. В настоящей работе рассматривается запись и реконструкция цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком в свете когерентного источника.

### **Запись и восстановление цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком в лазерном свете**

В лазерном свете функция  $S(\sigma)$  есть узкая ступенька, это почти  $\delta_D(\sigma - \sigma_0)$  функция Дирака, где  $\sigma_0$  — спектральная частота лазерного света, поэтому, в отличие от (1), когерентная интерферограмма имеет очевидный вид:

$$G_{\text{int}}(\xi, \delta) = \Delta\sigma S(\sigma_0) [A(\sigma_0, \xi)r \exp(-2\pi i\sigma_0\delta) + A^*(\sigma_0, \xi)r \exp(2\pi i\sigma_0\delta)], \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma$  — ширина спектральной линии лазерного света.

Умножим уравнение (2) на  $\exp(2\pi i\sigma\delta)$  и проинтегрируем обе части по переменной  $\delta$ , имеем:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta\sigma S(\sigma_0)} \int_{-L/2}^{L/2} G_{\text{int}}(\xi, \delta) \exp(2\pi i\sigma\delta) d\delta &= L A(\sigma_0, \xi) r + A^*(\sigma_0, \xi)r \int_{-L/2}^{L/2} \exp(4\pi i\sigma_0\delta) d\delta = \\ &= Lr [A(\sigma_0, \xi) + A^*(\sigma_0, \xi) \text{sinc}(\sigma_0 L)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Правая часть равенства (3) содержит два слагаемых: первое соответствует действительному изображению объекта  $A(\sigma_0, \xi)$ , второе — сопряжённое изображение  $A^*(\sigma_0, \xi)$ , умноженное на функцию  $\text{sinc}(\sigma_0, L)$ . При достаточно большом ходе зеркала, т. е. при условии

$$\sigma_0 L = \frac{L}{\lambda} \gg 1 \quad (4)$$

функция  $\text{sinc}(\sigma_0 L) = \text{sinc} \frac{L}{\lambda}$  вторым слагаемым в (3) можно пренебречь. При этом условии сопряженное слагаемое  $A^*(\sigma_0, \xi)$  исчезает и из (3) получаем известное выражение [3] для комплексной амплитуды объектного поля

$$A(\sigma_0, \xi) = \frac{1}{Lr\Delta\sigma S(\sigma_0)} \int_{L/2}^{L/2} G_{\text{int}}(\xi, \delta) \exp(2\pi i\sigma\delta) d\delta. \quad (5)$$

В действительности мы записываем только дискретный набор  $N$  голограмм, число которых определяется числом кадров матрицы регистрации за один скан зеркала. Таким образом, каждая интерферограмма  $G_n$  ( $n = 0, 1, 2 \dots N$ ) записывается со своим опорным пучком  $r_n = \exp(2\pi i\sigma n\delta)$ , где теперь  $\delta$  — длина одного шага.

Массив цифровых голограмм, записанных с набором опорных волн  $r_n$  формально можно представить как некоторый «виртуальный» объём, хранящийся в памяти компьютера. Такой виртуальный объём выполняет роль фотослоя в аналоговой голографии, в котором записана функция почернения, пропорциональная интенсивности интерференционного поля предметной и опорной волн, т. е. аналоговая голограмма. Умножим каждую из записанных голограмм  $G_n$  на множитель  $\exp(2\pi i\sigma n\delta)$ , т. е., по сути, на ту же опорную волну  $r_n = \exp(2\pi i\sigma n\delta)$  единичной амплитуды ( $r = 1$ ), которая участвовала при ее записи. Получим:

$$A_n = G_0 \exp(2\pi i \sigma n \delta) + rA + rA^* \exp(4\pi i \sigma n \delta). \quad (6)$$

Вычислим теперь суммарную амплитуду  $A = \sum_0^{N-1} A_n$  всех отраженных цифровых волн, имеем:

$$A = G_0 \sum_0^{N-1} \exp(2\pi i \sigma n \delta) + NrA + rA^* \sum_0^{N-1} \exp(4\pi i \sigma n \delta) = s_1 G_0 + NraA + s_2 rA^*. \quad (7)$$

Здесь  $s_1 = \sum_0^{N-1} \exp(2\pi i \sigma n \delta)$  и  $s_2 = \sum_0^{N-1} \exp(4\pi i \sigma n \delta)$ .

Второе слагаемое в сумме (7) — предметная волна  $A$ , усиленная в  $N$  раз. Легко показать, что два других слагаемых в выражении (7) малы, и при достаточно большом  $N$  ими можно пренебречь.

### Фазовые шаги

Если подобрать такие условия, при которых  $s_{1,2} = 0$ , то в восстановленном изображении  $A$  в формуле (7) исчезнет и фон и сопряженная волна. Наша задача обратить в 0 и  $s_1$  и  $s_2$  надлежащим выбором аргумента  $N\sigma\delta$ . Необходимо, чтобы оба числителя обращались в 0, а знаменатели были отличны от нуля. Так  $s_2 = 0$  при условии  $2N\sigma\delta = m = 1, 2, 3 \dots$  - целое число. Откуда шаг зеркала  $\delta = m \frac{\lambda}{2N}$ . При этом условии  $\sin(\pi N\sigma\delta) = \sin\left(\pi m \frac{\lambda}{2}\right)$ . Если  $m = 2k$  — четное число, то и  $s_1 = 0$ . Итак, необходимо, чтобы

$$\delta = k \frac{\lambda}{N}. \quad (8)$$

Условие (8) устанавливает связь между числом интерферограмм  $N$  и длиной шага  $\delta$ .

### Экспериментальная часть

Экспериментальная проверка изложенного выше метода записи цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком проведена по схеме, представленной на рисунке 1а. Источником излучения служил лазер с  $\lambda = 532$  нм. Объект — транспарант размером около 1 мм располагали в рабочем плече интерферометра Маха — Цендера. Зеркало опорного плеча с помощью магнитной подвижки перемещали с постоянной скоростью 1 мкм/с, что приводило к линейно меняющейся во времени разности хода волн  $\delta$ . Приемная матрица регистрировала результат интерференции опорной волны с полем объектной волны в зоне Френеля. Запись интерферограмм (до 200 штук) производилась последовательно в ходе движения зеркала. Время экспозиции каждой интерферограммы (50 мкс) было достаточно малым, так что смещение интерференционных полос за время экспозиции было несущественным.

Регистрировали 200 интерферограмм с шагом  $\lambda/9$ , что автоматически удовлетворяет условию (8)  $N = 9k$ . Вид интерферограммы в некотором пикселе  $\xi$  приведен на рисунке 1б. В соответствии с (5) путем преобразования Фурье по переменной  $\delta$  получена комплексная амплитуда поля  $A(\sigma_0, \xi)$  объекта в плоскости регистрации. Ввиду использования монохроматического излучения в спектре присутствует только одна спектральная компонента  $\sigma_0$ , соответствующая длине волны  $\lambda = 532$  нм. Спектр мощности интерферограммы  $|A(\sigma_0, \xi)|^2$  приведен на рисунке 1в. С помощью преобразования Френеля комплексно-сопряженного волнового

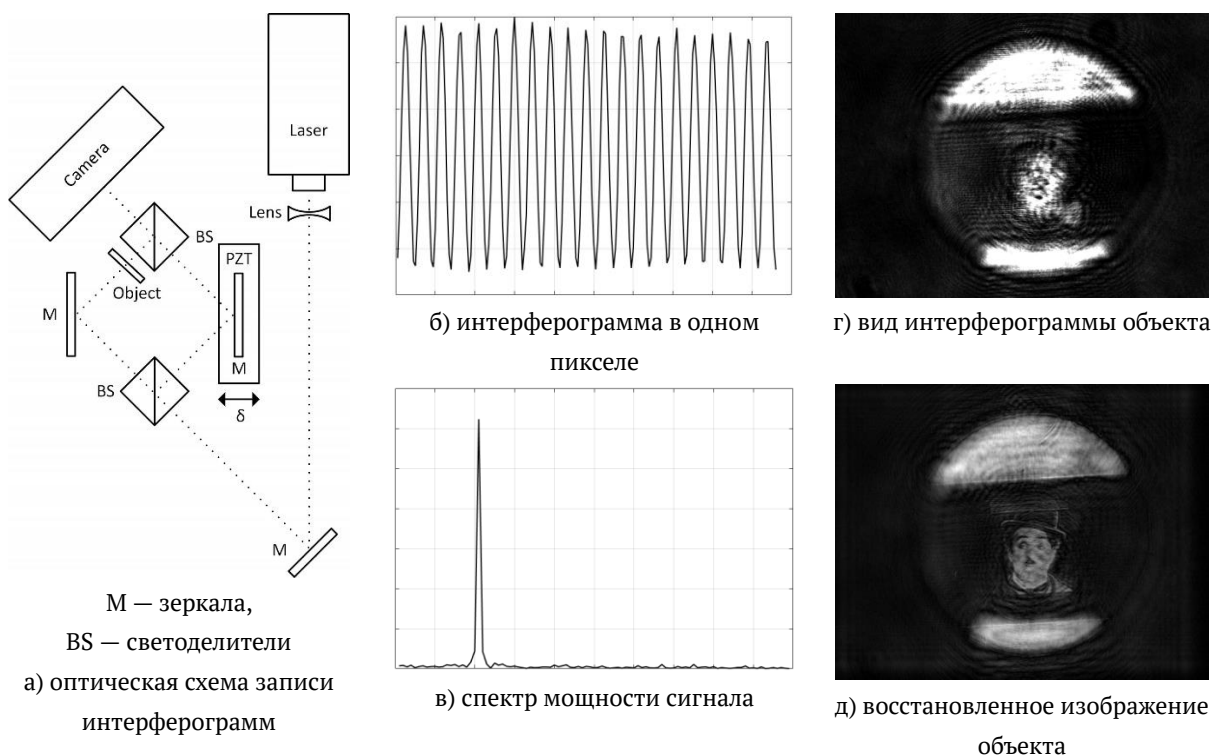


Рис. 1. Оптическая схема записи интерферограмм

поля объекта на этой спектральной частоте для оптимального расстояния фокусировки  $z$  получено комплексное поле объекта. Квадрат его модуля представляет изображение объекта  $|a(\sigma_0, \xi)|^2$ . На рисунке 1г показан вид одной из 200 интерферограмм, зарегистрированных матрицей, и восстановленное в соответствии с описанной процедурой (5) изображение объекта рисунке 1д.

### Заключение

Предложенный способ записи и реконструкции цифровых голограмм со сканирующим опорным пучком обобщает известный метод фазовых шагов и выгодно отличается от него тем, что не требует разделения прямого и сопряженного изображения. В предложенном методе комплексная объектного поля автоматически получается, в частности, в результате Фурье преобразования интерферограммы по величине перемещения зеркала сканирующего интерферометра, что упрощает процедуру записи голографического изображения.

### Список источников

- [1] **Каленков, Г. С.** Гиперспектральная голографическая Фурье-микроскопия / Г. С. Каленков, С. Г. Каленков, А. Е. Штанько // Квантовая электроника. — 2015. — Том 45. — № 4. — С. 333–338.
- [2] **Kalenyov, S. G.** Spectrally-spatial fourier-holography / S. G. Kalenyov, G. S. Kalenyov, and A. E. Shtanko // Opt. Express. — 2013. — Vol. 21. — P. 24985–24990.
- [3] **Kalenyov, S. G.** Hyperspectral holography: an alternative application of the Fourier transform spectrometer / S. G. Kalenyov, G. S. Kalenyov, and A. E. Shtanko // J. Opt. Soc. Am. — 2017. — Vol. 34. — № 5. — P. B49–B55.