

07

## Распознавание образа интерференционной спирали в волоконно-оптическом датчике на основе оптических вихрей

© Т.А. Фадеева, А.В. Воляр, А.Н. Алексеев

Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,  
Симферополь, Украина

Поступило в Редакцию 22 декабря 2003 г.

Рассмотрено три метода обработки интерференционной спирали, которая образуется в волоконно-оптическом датчике, использующем оптический вихрь. Найдено, что метод, основанный на принципе распознавания образа спирали, обладает наибольшей устойчивостью к шумам изображения. Он позволяет определять угол поворота спирали даже при ухудшении видности интерференционной картины до 0.2. Переход от измерения интенсивности к определению геометрических параметров изображения позволяет существенно расширить диапазон линейности интерферометрических датчиков, использующих свойства оптического вихря.

В большинстве известных интерференционных волоконно-оптических датчиков (ВОД) имеет место нелинейная зависимость между разностью фаз и величиной интенсивности интерференционной полосы [1]. Вместе с тем линейный участок характерной кривой ВОД можно существенно расширить [2], если в его схеме использовать свойства оптических вихрей [3]. Такая ситуация возникает, например, в волоконно-оптическом разветвителе с селективным пропусканием оптического вихря и фундаментальной  $HE_{11}$  моды вдоль разных каналов [4]. При сложении таких пучков на выходе разветвителя формируется спиральная интерференционная картина. Изменение разности фаз вызывает поворот спирали, причем угол поворота и разность фаз линейно связаны между собой. Это свойство оптического вихря позволяет увеличить линейность измерений на весь диапазон углов поворота. Ключевой проблемой в процессе измерений является распознавание образа спирали.

Целью данной работы явилась разработка методики определения параметров интерференционной спирали в волоконно-оптических датчиках физических величин на основе оптических вихрей.

Распределение интенсивности при интерференции имеет стандартный вид [5]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Phi_1 - \Phi_2), \quad (1)$$

где  $I_1, I_2$  — интенсивности гауссова пучка и оптического вихря,

$$\Phi_1 = kz + \arctan\left(\frac{z}{z_{0g}}\right) + \frac{kr^2}{R_g(z)} + \phi_{0g},$$

$$\Phi_2 = kz + (l + 1) \arctan\left(\frac{z}{z_{0v}}\right) + \frac{kr^2}{R_v(z)} + \phi_{0v} - l\varphi$$

— фазы этих пучков,  $r, \varphi$  — полярные координаты экрана,  $z$  — расстояние до экрана,  $R(z) = z\left(1 + \frac{z_0^2}{z^2}\right)$  — радиус кривизны,  $z_0 = \frac{k\rho^2}{2}$  — длина Рэлея,  $\rho$  — радиус перетяжки,  $\phi_0$  — начальная фаза пучка, индексы  $g$  и  $v$  характеризуют гауссов пучок и оптический вихрь соответственно. При соосном распространении данных пучков на экране формируется спиралевидная интерференционная картина. Очевидно, что светлой полосе спирали соответствует разность фаз  $\Phi_1 - \Phi_2 = 2m\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ ), в то время как для темной кривой разность фаз  $\Phi_1 - \Phi_2 = (2m + 1)\pi$ . Запишем разность фаз в плоскости экрана  $z = \text{const}$  в виде

$$\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 = -ar^2 + b' + l\varphi, \quad (2)$$

где  $a = k\left(\frac{1}{R_v(z)} - \frac{1}{R_g(z)}\right)$ ,  $b' = \arctan(z/z_{0g}) - (l + 1) \arctan(z/z_{0v}) + \phi_0$ . Тогда уравнение спирали приобретает вид

$$\varphi = ar^2 + b_0, \quad (3)$$

где  $b_0 = \Delta\Phi - b'$  и топологический заряд вихря  $l = 1$ .

За угловой поворот спирали отвечает параметр  $b_0$ , непосредственно связанный с разностью фаз  $\Delta\Phi$ . Однако в интерференционной картине невозможно измерить  $b_0$  независимо от других параметров, а именно: от координат центра интерференционной картины и от параметра закрутки спирали  $a$ . Прежде чем провести анализ методов измерения параметра  $b_0$ , рассмотрим один из способов определения центра интерференционной картины.

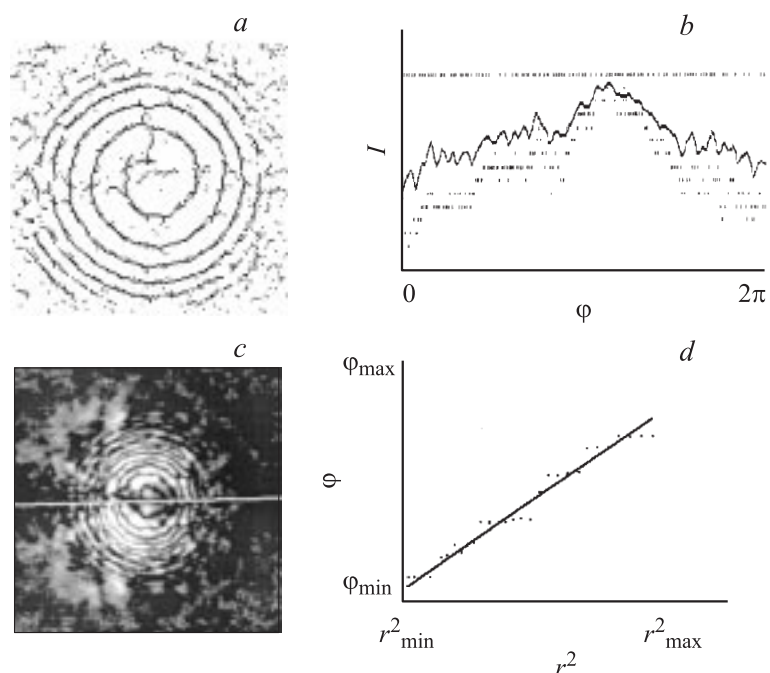
Можно показать, что центр масс однородной спиральной линии (3) смещен относительно начала координат. Однако если взять две спирали, которые соответствуют двум противофазным состояниям сингулярного пучка, то центр масс такой удвоенной спиральной линии совпадает с центром интерференционной картины. Этот простой принцип лег в основу способа измерения начала координат изображения спирали.

В интерференционной картине определялись положения максимумов и минимумов интенсивности при сканировании вдоль координат  $x$  и  $y$ . Таким образом, отношение суммы одноименных координат к числу измерений позволяет найти положение центра как

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad Y_c = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}. \quad (4)$$

Вместе с тем данный метод трудно использовать в конкретном эксперименте. Дело в том, что в экспериментальной картине множество дополнительных шумовых максимумов и минимумов, не лежащих на спирали (рис. 1, *a*). Для того чтобы исключить влияние этих шумов, использовалась фильтрация элементов изображения с последующим сглаживанием изображения. Компьютерная фильтрация предполагает, что в изображении вырезались все точки, лежащие вне определенного среднего интервала интенсивностей ( $\bar{I}_{\max}$ ,  $\bar{I}_{\min}$ ). Если интенсивность  $I$  конкретной точки оказывалась ниже минимального значения интервала  $I < \bar{I}_{\min}$ , то она полагалась равной нулю  $I = 0$ . Если же выполнялось неравенство  $I > \bar{I}_{\max}$ , то интенсивность приравнивалась к максимальному среднему значению  $I = \bar{I}_{\max}$ . После этого изображение сглаживалось (значение интенсивности усреднялось по соседним точкам). Далее к нему применялась вышеуказанная процедура вычисления центра спирали (4).

Мы разработали два способа измерения параметра спирали  $b_0$ , для которых нет необходимости определять параметр закрутки  $a$ . Первый из них заключается в нахождении минимума (или максимума) интенсивности вдоль окружности, лежащей внутри кольца детектирования. Центр окружности совпадает с центром спирали (рис. 1, *b*). Пределы изменения радиусов кольца ( $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$ ) мы выбирали таким образом, чтобы средняя интенсивность в его точках была не ниже, чем треть от средней максимальной интенсивности изображения. В процессе измерений радиус окружности остается постоянным. Однако такой метод



**Рис. 1.** *a* — распределение минимумов интенсивности на изображении интерференционной спирали, *b* — кривая зависимости распределения интенсивности  $I$  на окружности детектирования от азимутального угла  $\varphi$ , *c* — картина муаровых полос, *d* — зависимость азимутального угла положения минимума интенсивности на окружности детектирования от квадрата радиусом  $r$ .

дает большую погрешность измерений из-за флуктуаций интенсивности и ошибки в определении центра изображения.

Второй метод основан на формировании картины муаровых полос за счет сложения исходного и зеркально отраженного изображения спирали относительно оси  $y$  (рис. 1, *c*). Теоретическое значение угла поворота этого минимума можно найти из следующих соображений. При зеркальном отображении начальной картины изменяется только угол  $\varphi$  на противоположный  $-\varphi$  в выражении (2), что соответствует изменению знака топологического заряда оптического вихря, а также изменению направления закрутки спирали. Результат вычитания изоб-

ражений этих спиралей можно аналитически представить как

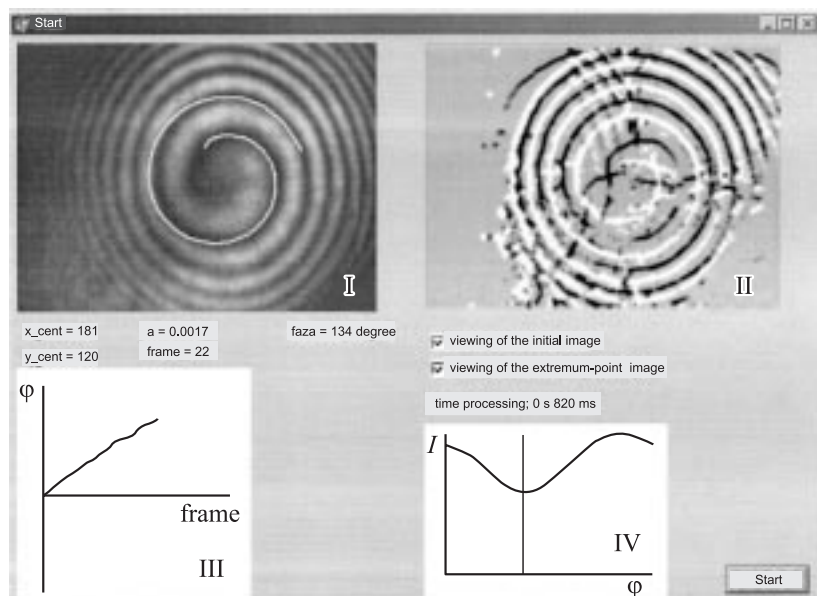
$$I = 4\sqrt{I_1 I_2} \sin\left\{\frac{ar^2 + b_0}{2}\right\} \sin\left\{\varphi - \frac{b_0}{2}\right\}. \quad (5)$$

Из последней формулы видно, что угол поворота краевой дислокации (линии нулей интенсивности) равен  $\varphi = b_0/2$ . Далее, для определения угла поворота оси краевой дислокации строилась кривая зависимости интегральной интенсивности от азимутальной координаты (суммирование производилось вдоль линии  $\varphi = \text{const}$ ,  $r$  изменялось от  $-r_{\text{max}}$  до  $r_{\text{max}}$ ). После сглаживания кривой ее минимум совпадал с положением краевой дислокации.

Рассмотренный метод очень чувствителен к погрешности измерения центра изображения. Даже слабое смещение центров вычитаемых изображений существенно искажает вид краевой дислокации.

Третий метод (распознавание образа спирали) определения угла поворота спирали основан на измерении минимума (максимума) интегральной интенсивности (3) от параметра  $b_0$ . Он позволяет существенно снизить уровень шумов изображения [6]. Для нахождения параметра  $a$ , как и в первом методе, сначала задавалось кольцо детектирования, но радиус окружности  $r$  мог изменяться в пределах от  $r_{\text{min}}$  до  $r_{\text{max}}$ . Изменение радиуса  $r$  сопровождалось измерением координаты  $\varphi$  минимума интенсивности. В конечном итоге строился график зависимости  $\varphi$  от  $r^2$ . Полученная кривая аппроксимировалась прямой линией  $\varphi(r^2)$ , по которой определялся параметр  $a$  (рис. 1, *d*). Фактически, этот метод позволяет распознать образ спирали и тем самым провести необходимые геометрические измерения полученного изображения.

Экспериментально измерялась зависимость угла поворота спирали от температуры. Измерения производились в схеме с  $Y$ -образным волоконным разветвителем [4], в предметном плече которого распространялась основная  $HE_{11}$  мода, а в опорном пучке — оптический вихрь. Если изменение температуры мало — порядка десятков градусов, то зависимость изменения фазы  $HE_{11}$  моды от температуры можно аппроксимировать прямой линией [7]. Интерференционная картина регистрировалась с помощью ССD камеры, с последующей компьютерной обработкой изображения. Нагревание дистиллированной воды в термостате с предметным волокном вызывало поворот интерференционной спирали. Данные обрабатывались специальной программой, написанной на языке программирования Delphi, в которой использовался третий

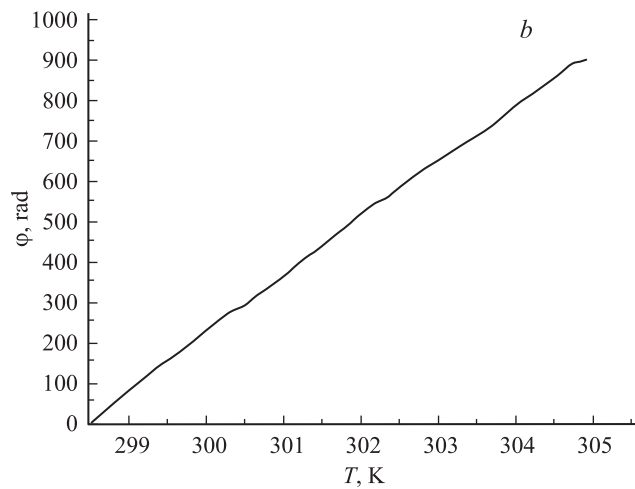
*a*

**Рис. 2.** *a* — обработка изображения интерференционной спирали: I — распознавание образа спирали (внизу приведены ее параметры); II — распределение минимумов (черные точки) и максимумов (белые точки) интерференционной картины; III — кривая зависимости угла поворота спирали от номера обрабатываемого кадра (пропорционального температуре); IV — кривая зависимости интегральной интенсивности от начального параметра  $b_0$  (обозначено через  $\varphi$  в программе). *b* — экспериментальная зависимость угла поворота спирали от температуры.

метод определения угла поворота спирали (рис. 2, *a*). Изменение температуры при переходе от кадра к кадру составило  $\Delta T \sim 4 \cdot 10^{-4}$  К.

Регистрировалась зависимость изменения угла положения спирали от температуры в пределах 298.5–305 К. Полученный график представлен на рис. 2, *b*. Средняя ошибка измерений составила 0.012 rad, в то время как чувствительность датчика с разветвителем, изготовленным из волокна марки SMS 28 производства KORNING INK, составила 198 rad/(m · K).

Таким образом, использование в одном из плеч интерференционного волоконно-оптического датчика оптического вихря позволяет свести



**Рис. 2** (продолжение).

процесс измерения физических величин к регистрации геометрических размеров образа интерференционной спирали, тем самым существенно расширив диапазон линейности интерферометрического устройства.

Авторы благодарны М.С. Соскину за полезную дискуссию по данной проблеме.

Часть данной работы была выполнена в рамках проекта Р-051 УНТЦ (Научно-технологический центр, Украина).

## Список литературы

- [1] Бусурин В.И., Семенов А.С., Удалов Н.П. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 5. С. 901–944.
- [2] Fadeyeva T.A., Volyar A.V., Reshetnikoff S.A., Alexeyev A.N. // Proc. of SPIE. V. 4403. P. 306–310.
- [3] Soskin M.S., Vasnetsov N.V. // Progress in Optics. 2001. V. 42. P. 219–276.
- [4] Фадеева Т.А., Воляр А.В. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 14. С. 50–56.
- [5] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 719 с.
- [6] Fadeyeva T., Kurabitzev D., Volyar A., Soskin M. // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4607. P. 83–89.
- [7] Jones J.D.C., Jackson D.A. // Analytical proceedings. 1985. V. 22. P. 207–210.