

# Энкодер вращательного движения на основе оптической вихревой интерферометрии

С.И. Якубов  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
yakubov-selim@mail.ru

Н.В. Шостка  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
nataliya\_shostka@mail.ru

Д.А. Полетаев  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
dmltry@mail.ru

Б.В. Соколенко  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
simplexx.87@gmail.com

А.В. Присяжнюк  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
prisyajniuk.a@gmail.com

В.И. Войтицкий  
Крымский федеральный  
университет им. В.И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
voytitsky@gmail.com

**Аннотация**—В статье обоснована возможность модернизации энкодера на основе когерентной оптической вихревой интерферометрии для определения малых угловых поворотов. Измерение величины угла поворота осуществляется за счет компьютерной обработки интерферограмм с характерным круговым движением нуля интенсивности.

**Ключевые слова**— энкодер, интерферометр, оптический вихрь, вращение.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Применение световых пучков с сингулярным волновым фронтом (оптических вихрей) в сфере метрологии известно более двух десятилетий [1]. Однако, в последнее время вихревые пучки привлекают внимание исследователей широкими возможностями в повышении точности измерений и удобством при компьютерной обработке интерферограмм [2]. В частности, в ряде работ представлен метод, использующий для описания поверхностных особенностей и внутренней структуры оптически прозрачных объектов, картину интерферирующих сингулярных пучков [3]. Для этого оптический вихрь применен в качестве зондирующего элемента, позволяющего получить существенный выигрыш в точности измерений. В связи с этим, исследования интерференции сингулярных пучков сохраняют свою актуальность

Ввиду существенного прогресса в области определения линейных сдвигов и точного позиционирования опто-механических узлов методом интерферометрии [4], аналогичный инструментарий для задач детектирования малых поворотов оси вращения (энкодеров) в системах обратной связи остается малоисследован. В данных тезисах нами представлен результат разработки интерферометрического подхода с применением вихревых пучков для детектирования малых поворотов.

## 2. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПОВОРОТА НА ОСНОВЕ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ

Оптическая схема детектора малых поворотов представлена на рис. 1 представляет собой равноплечий интерферометр Маха-Цендера. В одном из плеч, далее будем называть его предметным, помещена спиральная фазовая пластинка, в результате дифракции на которой в дальней зоне на оси пучка формируется оптический вихрь

с единичным топологическим зарядом. Гауссов пучок в опорном плече интерферометра распространяется в свободном пространстве, после прохождения светоделительной призмы, интерферирует с предметным пучком. Отметим, что режим наложения пучков отличается от встречающихся в литературе. Благодаря строгой осевой суперпозиции, ввиду приблизительно равных радиусов пучков, картина их суперпозиции представляет собой поле с минимумом, смещенным относительно оси вихревого пучка.

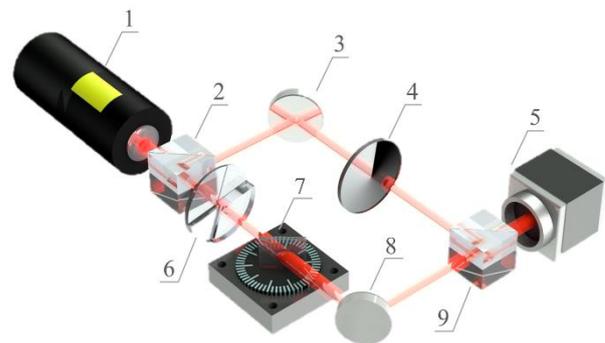


Рис.1. Схема экспериментальной установки (модель): 1 – He-Ne лазер, 2, 9 – светоделительная призма (50:50), 3, 8 – зеркала, 5 – фотоприемная матрица, 6 – спиральная фазовая пластинка, 4 – нейтральный фильтр переменной плотности для выравнивания интенсивности интерферирующих пучков, 7 – кинематическая поворотная платформа с плоскопараллельной пластиной (ВК-7)

Проследим за откликом интерференционной картины на изменения в оптической разности хода между пучками. Запишем распределение поля суперпозиции вихревого и гауссового пучков [5]:

$$E(r, \varphi, z) = \frac{1}{\sigma} \left[ \left( \frac{\sqrt{2}r}{\sigma\omega_0} \right)^n \exp(in\varphi - ik(z + \delta)) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \right] + \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2} - ikz\right) \quad (1)$$

где  $\sigma = 1 + iz/z_0$ ,  $z_0 = k\omega_0^2/2$  – длина Рэлея, радиус перетяжки в плоскости  $z = 0$ ,  $\omega = \omega_0 \sqrt{1 + z^2/z_0^2}$  – радиус гауссовой образующей в плоскости наблюдения,  $\delta$  – добавка к геометрическому пути,  $n$  – целочисленный топологический заряд оптического вихря. Численный

расчет распределения интенсивности поля суперпозиции пучков по формуле (1) показан на рис. 2.

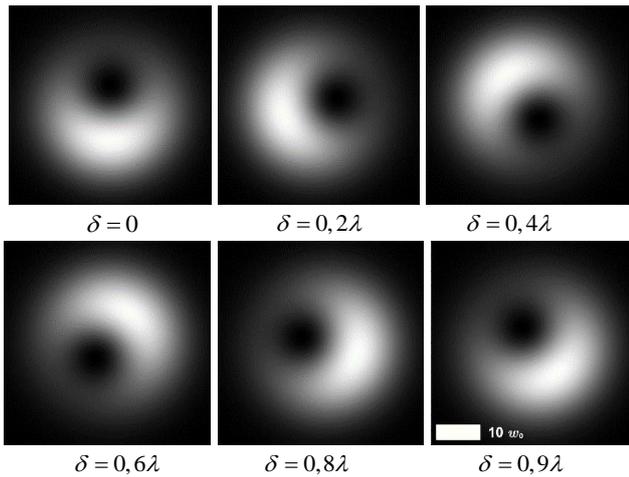


Рис. 2. Изменение распределения интенсивности  $E(r, \varphi, z)^2$  (нормированное) в зависимости от величины добавки  $\delta$  при  $n = 1$ ,  $\omega_0 = 180$  мкм,  $z = 1$  м

Как видно из рис. 2, увеличение величины геометрического пути и, как следствие, разности хода между интерферирующими пучками, обуславливает хорошо различимый поворот нуля интенсивности вокруг геометрического центра пучка. Данная особенность положена в основу метода извлечения информации о разности хода путем регистрации и компьютерной обработки распределения интенсивности или отдельного его фрагмента.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

При вращении оси кинематической поворотной платформы с установленной на неё плоскопараллельной стеклянной пластинкой (рис. 1), интерферометр позволяет определить относительное изменение между длинами оптических путей в предметном и опорном плече. При повороте оси на угол  $\theta$ , вихревой лазерный пучок в предметном плече будет получать добавку за счет увеличения оптического пути в среде пластинки, определяемой выражением согласно Снеллиуса:

$$\delta = n_c d / \sqrt{1 - (n_e/n_c)^2 \sin^2 \theta}. \quad (2)$$

Здесь  $n_e$ ,  $n_c$  – показатели преломления воздуха и стекла, соответственно,  $d$  – толщина пластинки. Изменение длины пути  $\delta$  регистрируется программным счетчиком оборотов нуля интенсивности на интерференционной картине. Полученное значение пересчитывается в длину оптического пути для используемого лазерного источника, в нашем случае He-Ne. В результате значение  $\delta$  сопоставляется угловым положением кинематической поворотной платформы. Заметим, что зависимость  $\delta(\theta)$  имеет нелинейный характер (рис. 3), что обуславливает ограничения на рабочие углы энкодера. Схема, показанная на рис. 1, подходит только для проверки угловых перемещений в диапазоне  $\pm 21^\circ$ , поскольку при больших углах поворота плоскопараллельной пластины возникнет смещение интерферирующих пучков вдоль

горизонтальной оси и, соответственно, потеря симметрии результирующего поля. Разрешающая способность по углу поворота для полученной оптической схемы энкодера составила  $0,75 \pm 5\%$  угловых секунд в пределах линейной области функции  $\delta(\theta)$ . Указанное разрешение и точность могут быть улучшены за счет увеличения толщины пластины, изготовленной из полимерных материалов с меньшим показателем преломления и уменьшения длины волны лазерного источника.

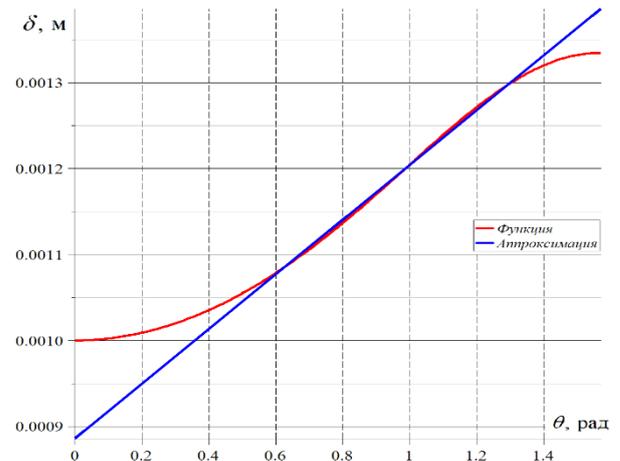


Рис. 3. Зависимость  $\delta(\theta)$  (красная линия) и ее линейная аппроксимация (синяя линия) для плоскопараллельной пластины из стекла марки ВК-7 ( $n = 1,5158$ ) толщиной  $d = 1$  мм

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрена возможность модернизации энкодера на основе оптической вихревой интерферометрии для определения малых угловых поворотов. Измерение величины изменения угла осуществляется за счет компьютерной обработки интерферограмм с характерным круговым движением нуля интенсивности. Полученное разрешение составило  $0,75 \pm 5\%$  угловых секунд для He-Ne лазера.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 20-72-00065.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Masajada, J. The interferometric system using optical vortices as phase markers / J. Masajada, A. Popiołek-Masajada, D.M. Wieliczka // Opt. Comm. – 2002. – Vol. 207(1-6). – P. 85-93.
- [2] Popiołek-Masajada, A. Subpixel localization of optical vortices using artificial neural networks / A. Popiołek-Masajada, E. Frączek, E. Burnecka // Metrol. Meas. Syst. – 2021. – Vol. 28(3). – P. 497-508.
- [3] Frączek, E. Characterization of the Vortex Beam by Fermat's Spiral / E. Frączek, A. Popiołek-Masajada, S. Szczepaniak // Photonics. – 2020. – Vol. 7(4). – P. 1-11.
- [4] Wiseman, K.B. Three-dimensional interferometric stage encoder using a single access port / K.B. Wiseman, T. Kissinger, R.P. Tatam // Opt. Lasers. Eng. – 2021. – Vol. 137. – P. 1-10.
- [5] Heckenberg, N.R. Laser beams with phase singularities / N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, H. Rubinsztein-Dunlop, M.J. Wegener // Opt. Quantum. Electron. – 1992. – Vol. 24. – P. 951-962.