

УДК 681.723.3

**С. М. Довгалец, к. т. н, доц.; В. В. Томкив, студ.; А. В. Гончарук, асп.;  
Е. А. Мочульская, студ.**

## **ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ**

*Проанализирована возможность использования градиентных волокон для создания трехмерных микроскопов для удаленного контроля. Предложена структура микроскопа, схема коррекции фазовых искажений, которые возникают в волокне. Проведено метрологическое исследование возможностей прибора, а именно: зависимость размера исследуемой поверхности от параметров системы.*

**Ключевые слова:** микроскоп, волоконно-оптический, градиентное волокно.

### **Введение**

При построении и эксплуатации технических систем наряду с традиционным измерительным оборудованием используются средства визуального контроля. Такой контроль может производиться при помощи видеокамер, эндоскопов и микроскопов. Для изучения микротрещин, микродеформаций, гладкости поверхности используют микроскопы.

Необходимой характеристикой микроскопа иногда может стать возможность отдельного исследуемого объекта. Другим необходимым свойством может стать возможность получения трехмерных изображений объекта исследования, для того чтобы делать выводы о его состоянии.

### **Существующие достижения в данной области**

Возможность удаленного контроля предоставляют металлографические микроскопы и видеокамеры. Последние достаточно распространены как средства контроля состояния оптоволокон. Наличие щупов у этих микроскопов позволяет применять их для исследования труднодоступных объектов [1]. Невозможность получения трехмерного изображения является существенным недостатком таких микроскопов. Существуют также другие микроскопы, которые позволяют снять 3D-изображения объектов. Они работают по принципу лазерного конфокального сканирования микрообъектов. Этот процесс может длиться несколько часов [2]. Намного быстрее работают приборы, построенные по принципу SDCM (конфокальная микроскопия вращающегося диска). В микроскопах такого типа используется вращающийся диск с тысячами отверстий [3]. Более объемное и четкое изображение получают при помощи сканирующей двухфотонной или многофотонной микроскопии. Недостаток микроскопов этого типа – невозможность их применения для удаленного контроля.

Существующие сегодня микроскопы дают возможность либо получать трехмерные изображения, либо проводить удаленные исследования, но сочетания этих двух свойств не встречается.

### **Цель работы**

Цель этой работы – разработать микроскоп, который позволит получать трехмерные изображения объектов исследования в труднодоступных местах.

### **Теоретическая часть**

Проведя анализ технологий, которые можно использовать при построении приборов для удаленного контроля, а также методов получения трехмерных изображений, для построения прибора было решено использовать волоконную оптику в сочетании с методами цифровой голографии. Такой подход позволил бы создать прибор с высокими метрологическими характеристиками и возможностью работы в труднодоступных местах.

Предлагается схема прибора с использованием одиночного многомодового волокна как средства передачи изображения от объекта к регистратору (рис. 1).

Лучи, излученные лазером, возбуждают в волноводе моды, которые распространяются вдоль оси волновода. На противоположном конце волокна лучи отражаются от исследуемого объекта, что приводит к формированию фазового портрета соответственной поверхности. Отразившись, лучи распространяются в обратном направлении в том же волноводе. Все лучи, которые попали в волновод, хранят информацию о каждой точке рельефа поверхности. Пройдя этап коррекции фазовых искривлений, оптическая информация о поверхности фиксируется цифровой видеокамерой, благодаря явлению интерференции, которое имеет место между отраженным и опорным лучами.

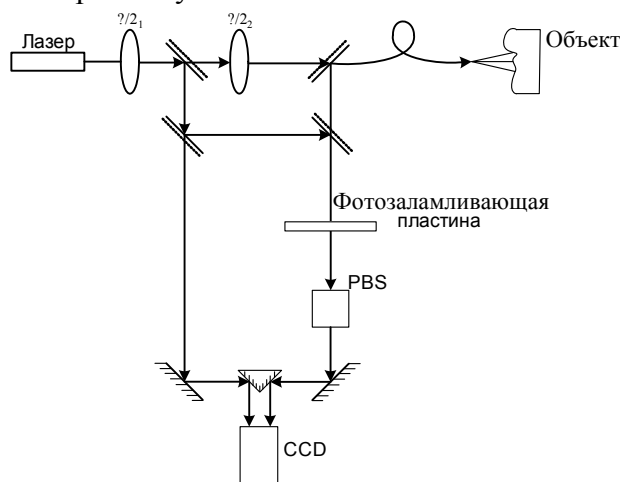


Рис. 1. Схема прибора, который позволяет получать трехмерные изображения

При распространении в волноводе лучи возбуждают моды с индексами  $i$  и  $j$  и фазовой скоростью  $\omega$ , каждой из которых соответствует постоянная распространения  $h_{ij}$ . За счет того, что у каждой моды своя постоянная распространения, происходит процесс набег фаз для каждой из них, что в свою очередь вносит некоторые искривления в фазовый фронт. Оптимальным из многомодовых волокон для использования в этом случае является волокно с градиентным показателем преломления, так как у него среднее квадратическое отклонение набег фаз для каждой моды меньше, чем у других многомодовых волокон [4]. Поэтому для описываемого прибора будет использоваться волокно с градиентным коэффициентом преломления.

Для коррекции фазовых искривлений, которые имеют место при распространении лучей в оптоволокне, используется схема коррекции фазовых искривлений, детально описанная Г. Джеффри [5]. Принцип этого метода базируется на свойствах фотопреломляющих пластин из полимерных материалов при подаче на них разнополяризованных опорных и деформированных волн.

После компенсации всех деформаций фазовый фронт подается на объектив видеокамеры, куда также направляется опорная волна. Таким образом, происходит процесс записи цифровой голограммы. На объективе видеокамеры процесс можно описать так [6]:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |O(x, y) + R(x, y)|^2 = (O(x, y) + R(x, y))(O(x, y) + R(x, y))^* = \\ &= R(x, y)R^*(x, y) + O(x, y)O^*(x, y) + O(x, y)R^*(x, y) + R(x, y)O^*(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $O(x, y) = o(x, y) \exp(i\varphi_O(x, y))$  – комплексная амплитуда волны, отраженной от объекта, с действительной амплитудой  $o$  и фазой  $\varphi_O$ , а  $R(x, y) = r(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y))$  – комплексная амплитуда опорной волны с действительной амплитудой  $r$  и фазой  $\varphi_R$  [6].

Интенсивность в каждой точке камеры рассчитывается как:

$$h(x, y) = h_0 + \beta \tau I(x, y), \quad (2)$$

где  $\beta$  – константа,  $\tau$  – время выдержки, а  $h_0$  – интенсивность неосвещенной камеры, которой можно пренебречь.

При помощи математических методов полученная голограмма восстанавливается, и из нее получают рельеф исследуемого объекта. Рассмотрим этот процесс более детально.

Дифракцию волны описывает такой интеграл:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \frac{\exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} \rho)}{\rho} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy, \quad (3)$$

где  $\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + d^2}$  – расстояние между точками в плоскости голограммы в плоскости реконструкции, а  $h(x, y)$  – голографическая функция. Опорная волна  $R(x, y)$  описывается просто действительной амплитудой  $R = r + i0 = r$ .

Дифракционная картина рассчитывается на расстоянии  $d$  за объективом камеры, это значит, что восстанавливается комплексная амплитуда в плоскости действительного изображения.

Выражение (3) является основой для цифрового восстановления голограмм. Из-за того что восстановленная волновая матрица  $\Gamma(\xi, \eta)$  является комплексной функцией, могут быть определены интенсивность и фаза.

Для  $x$  и  $y$ , так же, как и для  $\xi$  и  $\eta$  значений, которые малы в сравнении с  $d$  – расстоянием между плоскостью восстановления голограммы и плоскостью записи, выражение для  $\rho$  заменим первым членом разложения в ряд Тейлора:

$$\rho = d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(\xi - x)^2 - (\eta - y)^2]}{d^3} + \dots \approx d + \frac{(\xi - x)^2}{2d} + \frac{(\eta - y)^2}{2d}. \quad (4)$$

Заменив множитель в выражении (3) на  $d$ , получим такую формулу:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp(-i \frac{\pi}{\lambda d} ((\xi - x)^2 + (\eta - y)^2)) dx dy. \quad (5)$$

Если вынести множитель в степени экспоненты за интеграл, выражение будет выглядеть как:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda} d) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (\xi^2 + \eta^2)] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)] \\ & \times \exp[i \frac{2\pi}{\lambda d} (x\xi + y\eta)] dx dy. \end{aligned} \quad (6)$$

Это уравнение в случае действительного изображения делает возможным восстановление волнового фронта в плоскости з голограммой. Фаза, а значит и информация о рельефе, получается таким образом.:

$$\varphi(\xi, \eta) = \arctan \frac{\text{Im}[\Gamma(\xi, \eta)]}{\text{Re}[\Gamma(\xi, \eta)]}. \quad (7)$$

Для проведения расчетов на ЭВМ вводится дискретное преобразование. Введем такие переменные:

$$v = \frac{\xi}{\lambda d}; \quad \mu = \frac{\eta}{\lambda d}. \quad (8)$$

Тогда (6) примет вид:

$$\begin{aligned} \Gamma(\xi, \eta) = & \frac{i}{\lambda d} \exp[-i \pi \lambda d (v^2 + \mu^2)] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) R(x, y) \exp[-i \frac{\pi}{\lambda d} (x^2 + y^2)] \\ & \times \exp[i 2\pi (xv + y\mu)] dx dy. \end{aligned} \quad (9)$$

Значение  $\exp(-i2\pi/\lambda d)$  опускается, потому что оно влияет только на общую фазу. Это значение не меняет интенсивности и фазы интерференции цифровой голограммы.

Сравнивая (9) и преобразование Фурье, видим, что это – обратное преобразование Фурье для  $h(x, y)R(x, y)\exp[-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)]$ , умноженное на сферический фазовый фактор:

$$\Gamma(u, \mu) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\lambda d(u^2 + \mu^2)] \zeta^{-1} \left\langle h(x, y)R(x, y)\exp[-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)] \right\rangle. \quad (10)$$

Функция  $\Gamma$  рассчитывается, если  $h(x, y)$  сохранена в матрице  $N \times N$ , с шагом  $\Delta x$  и  $\Delta y$  вдоль координат.  $\Delta x$  и  $\Delta y$  – расстояние между соседними пикселями на камере в горизонтальном и вертикальном направлениях. Используя дискретные значения, интеграл (9) запишем в виде сумм:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\pi\lambda d(m^2\Delta u^2 + n^2\Delta \mu^2)] \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l)R(k, l) \exp[-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)] \times \exp[i2\pi(k\Delta x m\Delta u + l\Delta y n\Delta \mu)]. \quad (11)$$

Согласно теории преобразования Фурье существует такая зависимость между  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta u$ ,  $\Delta \mu$ :

$$\Delta u = \frac{1}{N\Delta x} \quad \Delta \mu = \frac{1}{N\Delta y}, \quad (12)$$

тогда

$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad \Delta \eta = \frac{\lambda d}{N\Delta y}. \quad (13)$$

Учитывая (12) и (13), (11) запишем как:

$$\Gamma(m, n) = \frac{i}{\lambda d} \exp[-i\pi\lambda d(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2})] \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l)R(k, l) \exp[-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)] \times \exp[i2\pi(\frac{km}{N} + \frac{ln}{N})]. \quad (14)$$

Формула (14) – дискретное преобразование для восстановления цифровой голограммы и дальнейшего получения рельефа поверхности.

Далее рассмотрим зависимость диаметра поверхности, которая может исследоваться, от параметров используемого волновода. Количество мод, которые могут распространяться в градиентном волокне, определяется по формуле  $M=V^2/4$ , где  $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ . Для того чтобы корректно воспринимать рельеф, разница фаз в двух соседних точках принятого изображения не должна превышать  $\lambda/2$ . Поэтому  $\Delta x$  – расстояние между двумя точками, которое должен фиксировать прибор, – определяется в зависимости от исследуемого объекта. Диаметр поверхности, которая наблюдается, рассчитывается по формуле:

$$d = 2 \sqrt{\frac{\pi a^2 (n_1^2 - n_2^2) \Delta x^2}{\lambda^2 (1 + 2\Delta x + \Delta x^2)}}. \quad (15)$$

Учитывая, что нормированная частота зависит от других параметров, имеем:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (16)$$

преобразуем формулу (15), введя в нее значение нормированной частоты (16). Расчетная

формула для диаметра исследуемой поверхности градиентным волокном определяется таким образом:

$$d = 2\Delta x V \sqrt{\frac{1}{\pi(4 + 8\Delta x + 4\Delta x^2)}}. \quad (17)$$

Для сравнения запишем формулу для расчета диаметра измеряемой поверхности, которая может передаваться в волокне со ступенчатым показателем преломления. Учитывая, что для этого типа волокна количество мод, которые распространяются в нем, равно  $M=V^2/2$  [7], запишем формулу для расчета диаметра исследуемой поверхности как:

$$d = 2\Delta x V \sqrt{\frac{1}{\pi(2 + 4\Delta x + 2\Delta x^2)}}. \quad (18)$$

Проведем расчеты с использованием формул (17) та (18), чтобы получить числовые данные относительно возможностей по передаче изображения двумя типами волокон: градиентным и волокном со ступенчатым показателем преломления. На рисунке 2 изображены графики зависимости диаметра исследуемой поверхности от точности измерений  $\Delta x$  и нормированной частоты  $V$  используемого волновода. Из графиков видно, что волокно со ступенчатым показателем преломления дает несколько лучшие результаты для передачи изображений, диаметр исследуемой поверхности больший у волокна со ступенчатым показателем преломления, чем у градиентного с такими же показателями. Но эта разница незначительна, и преимущество отдается градиентному волокну за счет его лучших характеристик в области уменьшения набега фаз между разными модами [5].

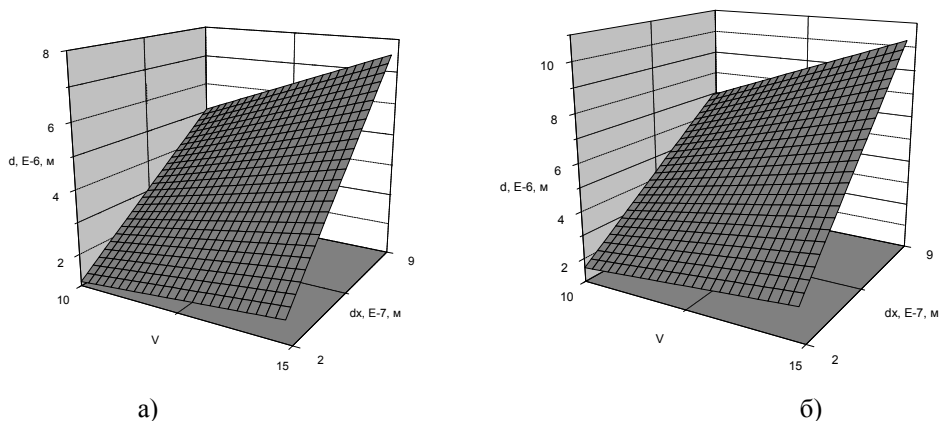


Рис. 2. Зависимость исследуемого диаметра от нормированной частоты для: а) градиентных волокон; б) волокон со ступенчатым коэффициентом преломления

### Выводы

Таким образом, в результате исследования мы пришли к выводу, что при использовании описанной модели можно создать прибор, который позволит получать трехмерные изображения для диагностики труднодоступных мест. Наличие в приборе оптоволоконного волновода позволит применять его в разных отраслях. Даже на фоне сильного радиоактивного излучения на изображение, которое передается, помехи не будут наводиться. Так как изображение будет обрабатываться при помощи ЭВМ, существует возможность записи и последующего повторного просмотра вида объекта исследования. Диаметр оптического волокна очень малых размеров, и это позволяет ему попадать для исследований в места с тонкими щелями. Задав необходимое расстояние между соседними точками исследуемого объекта, можно произвольно менять параметры прибора, чтобы он удовлетворял необходимые требования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенов А. С. Визуальный контроль качества оптических трактов СКС, <http://abn.ru> – 20.08.2004.
2. Minsky M. Memoir on inventing the confocal scanning microscope // Scanning. – 1988. – Vol.10. – P.128 – 138.
3. Nakano A. Spinning-disk confocal microscopy – a cutting-edge tool for imaging of membrane traffic // Cell. Struct. Funct. – 2002. – Vol. 27, №5. – P.349 – 355.
4. Довгалець С. М., Томків В.В., Ігнатенко О. Г. Використання багатомодових оптичних хвильоводів для передавання тривимірних зображень // ІНТЕРНЕТ – ОСВІТА – НАУКА – 2006, п'ята міжнародна конференція ІОН-2006, збірник матеріалів конференції, том 2. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.–420с.
5. Jeffrey G. Winiarz and Ghebremichael F. Dynamic correction of a distorted image using a photorefractive polymeric composite // OSA – 2004. – Vol. 12, No. 11.
6. Ulf Schnars, Werner P O Juptner, Digital recording and numerical reconstruction of holograms // Measurement science and technology. – 2002. – No. 13.
7. Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи: учебное пособие для вузов – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с.

**Довгалець Сергей Михайлович** – декан факультета автоматики и компьютерных систем управления;

**Томків Виталий Владимирович** – студент;

**Гончарук Александр Васильевич** – аспирант;

**Мочульская Елена Александровна** – студентка.

Кафедра автоматики и информационно-измерительной техники, Винницкий национальный технический университет