

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Беловолов М.И., Платанов С.В., Романовский А.С., Черников А.С., Чухров С.Ю.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, кафедра "Компьютерные системы и сети"

В последнее время возрос интерес к применению распределенных волоконно-оптических измерительных систем. Такие системы с успехом могут быть использованы для измерения параметров технологического процесса (температуры, давления) в процессе производства изделий из композитных материалов, для измерения параметров электрических, магнитных и акустических полей, измерения механических напряжений внутри строительных конструкций и т.п.

В качестве основополагающих принципов построения распределенной волоконно-оптической измерительной системы (РВОИС) в работе использованы томографические принципы сбора и обработки измерительной информации в сочетании с волоконно-оптическими интерферометрами, используемыми в качестве датчиков измеряемого физического поля. Очевидно, что сложность алгоритмов обработки сигналов в таких системах и большой объем вычислений, необходимый для получения искомым результатов, не оставляет сомнений в целесообразности использования цифровых методов обработки.

Принцип действия волоконно-оптических интерферометрических датчиков основан на измерении сдвига фазы оптической несущей достаточно монохроматической световой волны в одномодовых световодах под влиянием внешних физических полей. Если электрическое поле световой волны на выходе волоконного световода представить в виде

$$E(r, \varphi, L, t) = AE(r, \varphi) \cos(\omega t - \beta L),$$

где  $r, \varphi$  - полярные координаты в поперечном сечении световода;  $L$  - длина световода;  $\beta$  - постоянная распространения направления волны, то информационным параметром в фазовых датчиках выступает входящий в аргумент косинуса член  $\beta L$ . При этом предполагается, что фазовый набег линейно зависит от продольной координаты  $l$ , направленной вдоль оптической оси волокна, меняясь во времени пропорционально внешнему воздействию. Это означает, что чувствительный элемент датчика находится в однородном физическом поле. В реальных условиях волоконный световод интерферометра всегда находится в неоднородных полях, поэтому фазовый набег световой волны  $\Phi$  после прохождения волновода длиной  $L$  определяется интегральным выражением

$$\Phi = \int_0^L \beta dl,$$

где от неоднородного в пространстве внешнего воздействия могут зависеть и  $\beta$  и  $L$ . При прохождении волоконного световода во внешнем возмущающем поле  $F(l)$  фазовый набег изменяется как

$$\Phi = \Phi_0 + \delta\Phi = \int_0^{L_0 + \delta L} (\beta_0 + \delta\beta) dl,$$

где  $\Phi_0$  - фазовый набег в отсутствие внешнего поля  $F$ ;  $\delta\beta(F), \delta L(F)$  и  $\delta\Phi(F)$  - изменения постоянной распространения, длины световода и фазового набега под действием поля  $F(l)$ .

Пренебрегая слагаемым второго порядка малости, можно записать

$$\Phi_0 + \delta\Phi = \beta_0 L_0 + \int_0^{L_0} \delta\beta dl + \beta_0 \delta L$$

Здесь первое слагаемое определяет фазовый набег в отсутствие неоднородного поля  $F$ , а второе и третье - соответственно фазовые приращения за счет изменений

$$\delta L = \alpha \int_0^{L_0} F(l) dl, \quad \delta\beta = \gamma F(l) \beta_0,$$

где  $\alpha$  и  $\gamma$  - постоянные коэффициенты, зависящие от типа световода. Данные выражения предполагают линейную зависимость изменений параметров световода от величины воздействия. В большинстве реальных приложений такое допущение оказывается верным в силу малости величин  $\delta\beta_0/\beta_0$  и  $\delta L/L_0$ . Тогда

$$\delta\Phi = (\alpha + \beta)\beta_0 \int_0^{L_0} F(l)dl \quad (1)$$

Нетрудно заметить, что при прямолинейном расположении волоконного световода совокупность интегралов (1) по всем возможным прямым в какой-либо плоскости  $(x, y)$  определяет интегральное преобразование Радона двумерной функции  $F(x, y)$ , широко используемое в компьютерной томографии. Отсюда следует вывод о том, что исходное поле  $F$  можно восстановить, используя различные методы реконструкции изображений [1,2].

Фазовый сдвиг световой волны в волоконном световоде  $\delta\Phi$  можно измерять с помощью различных оптических схем: интерферометров Фабри-Перо, Маха - Цандера, Саньяка, Майкельсона и др. Однако во всех этих случаях принцип интегрального "считывания" воздействия будет сохраняться, изменяться будет коэффициент пропорциональности при преобразовании светового потока в фототок.

Выражение, определяющее интегральную зависимость величины, регистрируемой датчиком, от внешнего воздействия, может быть получено также для датчиков других видов модуляции (амплитудные, поляризационные и др.). Фазовые преобразователи, как наиболее чувствительные, наиболее привлекательны и перспективны для РВОИС.

Структурная схема распределенной волоконно-оптической измерительной системы, измерительное поле которой составляет матрица одномодовых взаимно-ортогональных интерферометров Фабри-Перо, приведена на рисунке 1.

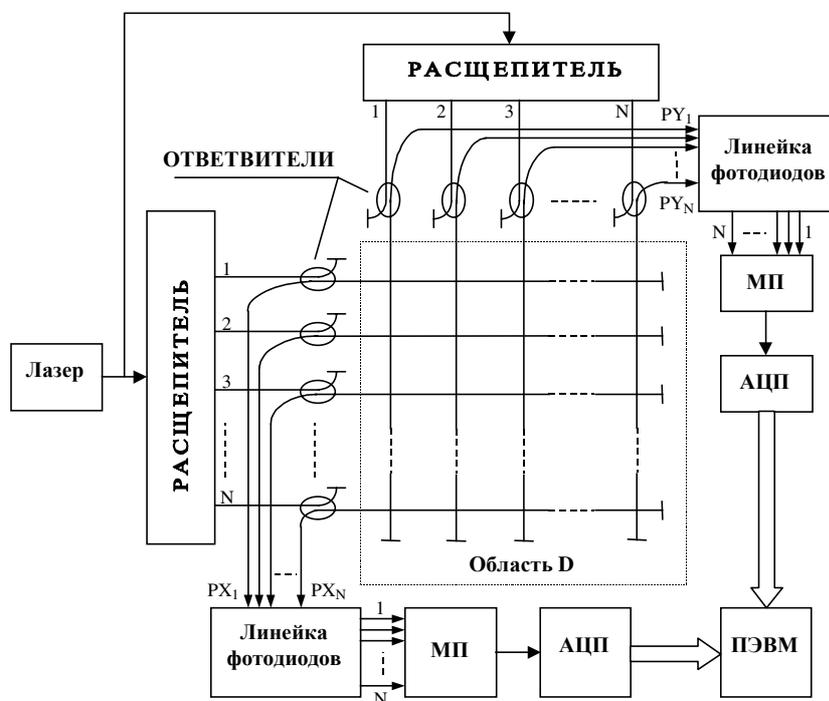


Рис. 1. Структурная схема распределенной волоконно-оптической измерительной системы.

Выходы интерферометров после преобразования в электрический сигнал с помощью линейки фотоприемников, мультиплексирования (МП) и преобразования в цифровой код (АЦП) поступают в качестве отдельных точек проекции двумерного распределения измеряемого поля в ПЭВМ для последующей обработки.

При прохождении луча лазера по волоконному световоду (волоконному интерферометру), расположенному в измеряемом физическом поле (область D), осуществляется интегральное преобразование, которое в случае прямолинейной траектории волокна является преобразованием Радона.

Информация об измеряемой величине (или совокупности измеряемых величин) содержится в изменении фазы световой волны. Так, при воздействии температурного поля  $T(x, y)$  на область D на выходе каждого из волоконных интерферометров по строкам ( $i=1..N$ ) и по столбцам ( $j=1..N$ ) появляются сигналы, которые могут быть интерпретированы как отдельные точки проекции распределения температурного поля в области D на оси  $x$  и  $y$  соответственно ( $PX$  и  $PY$  проекции). Используя известные томографические методы восстановления изображения по проекциям и при достаточном числе таких проекций можно реконструировать распределение температурного поля  $T(x, y)$ .

В работе анализируются методы реконструкции и восстановления двумерного распределения измеряемого физического поля по проекциям, получаемым на выходе волоконно-оптических интерферометров. На основе метода обратного проецирования с фильтрацией предлагается алгоритм реконструкции наиболее приемлемый с точки зрения реализации в системах реального времени. Так применительно к предложенной схеме, использующей две ортогональные проекции измеряемого поля  $PX_i$  и  $PY_j$  (где  $i = 1 \div N$ ,  $j = 1 \div N$ ), итерационный алгоритм реконструкции температурного поля  $T(x, y)$  в области  $D$  по полученным проекциям запишется следующим образом.

На первой итерации происходит "растягивание" проекции  $PX_i$  по оси  $y$ . В результате этой операции получаем начальные значения матрицы  $x1_{i,j}$

$$x1_{i,j} = \frac{PX_i}{N}$$

Будем считать полученную матрицу результатом первой итерации алгоритма реконструкции. На второй итерации происходит коррекция элементов матрицы  $x1_{i,j}$  с учетом новых значений проекции по оси  $y$ , которая вычисляется как

$$PY1_j = \sum_{i=1}^N x1_{i,j}$$

Скорректированные значения матрицы температурного поля после второй итерации запишутся в виде

$$x2_{i,j} = x1_{i,j} - \frac{PY1_j - PY_j}{N}$$

Описанная процедура продолжается с новыми значениями проекций, а результаты реконструкции усредняются.

Измерение физических параметров (температуры, давления, напряженности и др.) с помощью волоконно-оптических интерферометров (ВОИ) основывается на измерении набега фазы по электрическому сигналу на выходе фотоприемников. Для формирования синусоидального отклика одновременно от каждого высокочувствительного интерферометра в созданной системе использовался один одночастотный полупроводниковый РОС-лазер (рабочая длина волны 1,55 мкм) в режиме сканирования частоты генерации при питании его импульсами линейно изменяющегося тока накачки. Это позволяло в отсутствие физического воздействия надежно фиксировать начальное значение набега фазы  $\Phi_0$  и осуществлять слежение и измерение фазового сдвига  $\delta\Phi$  по выбранному алгоритму в широком диапазоне физических воздействий. В качестве чувствительных интерферометров Фабри-Перо использовались отрезки одномодовых световодов длиной 20 см, покрытых алюминием. Таким образом, размеры чувствительной зоны составили 20 x 20 см. Измерения температурных полей показали, что температурная чувствительность ВОИ составляет порядка  $40 \text{ рад/м}^{\circ}\text{C}$ . При изменении температуры в плече интерферометра на 1 градус на выходе фотоприемника фиксируется смещение синусоид на 7 периодов и результаты соответствующих измерений набега фаз поступают в систему обработки. На рис. 2 в качестве примера приведена двухмерная картина температурного поля галогенной лампы, измеренная с помощью созданной измерительной системы и реконструированная по описанному в данной работе алгоритму.

В работе был разработан цифровой метод устранения неоднозначности и слежения за фазой сигнала при измерении фазового сдвига на выходе фотоприемников. Временная и частотная реализация данного метода подтвердили его высокую эффективность и помехоустойчивость. Для выделения информации об измеряемом параметре (например, температуре) на фоне мешающих воздействий (давление, вибрации) предлагается вводить в систему интерферометры на волокнах, обладающих разной чувствительностью к воздействию различных параметров. Предлагается алгоритм компенсации мешающих воздействий, основанный на априорной информации, полученной в результате предварительной калибровки системы и анализе ее реакции на воздействие полей различной физической природы.

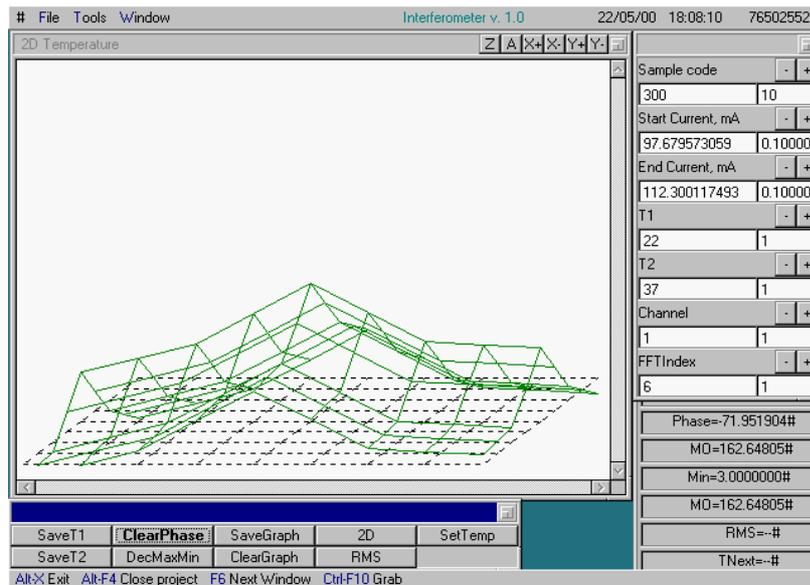


Рис. 2. Распределение температурного поля галогенной лампы.

Приведены результаты экспериментальных исследований образца распределенной волоконно-оптической системы размерности 8\*8. Экспериментально подтверждена работоспособность и эффективность принципа построения распределенной волоконно-оптической измерительной системы, подтверждена работоспособность и эффективность предложенных методов и алгоритмов обработки сигналов, измерена температурная чувствительность конкретного образца системы, составляющая  $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$  в диапазоне температур от криогенных до  $200 - 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

#### Литература

1. С.П.Гиневский, О.И.Котов, В.М.Николаев, В.Ю.Петрунькин. Применение методов реконструктивной вычислительной томографии в волоконно-оптических датчиках. Квантовая электроника, 22, № 10, 1995.
2. Левин Г.Г., Вишняков Г.Н. Оптическая томография. -М.: Радио и связь, 1989, -224с.



DIGITAL SIGNAL PROCESSING IN DISTRIBUTED FIBER-OPTICAL MEASURING SYSTEMS

Belovolov M.I., Platanov S.V., Romanovsky A.S., Chernicov A.S., Chukhrov S.Ju.

Bauman Moscow State Technical University  
2-nd Baumanskay street 5, Moscow, 107005, Russia

Interest to application of distributed fiber-optical measuring systems recently has increased. Such systems with success can be used for measurement of parameters of technological process (temperature, pressure) during production of articles from composite materials, for measurement of electrical and magnetic fields parameters, measurement of mechanical efforts inside building constructions etc.

As establishing principles of construction of the distributed fiber-optical measuring system (DFOMS) we used principles of a computer-aided tomography in a combination to fiber-optical interferometers used as sensors of a measured physical field. Obviously, that the complexity of signals processing algorithms in such systems and large volume of evaluations necessary for deriving of required results does not leave doubts in expediency of usage of digital methods of signal processing.

The principle of operation of fiber - optical interferometric sensors based on measurement of a phase shift of a light wave under influence of the external physical factors. The electrical field of a light wave at output of an optical fiber can be presented as

$$E(r, \varphi, L, t) = AE(r, \varphi) \cos(\omega t - \beta L),$$

where  $r, \varphi$  - polar coordinates in cross section of the optical waveguide;  $L$  - length of the optical waveguide;  $\beta$  - the propagation constant of the lightguiding mode. Here a term  $\beta L$  appears as information parameter in phase sensors included in argument of cosine.

It is shown, that change of a phase progression of a light wave under field action  $F(l)$  can be written as

$$\delta\Phi = (\alpha + \beta)\beta_0 \int_0^{L_0} F(l) dl, \tag{1}$$

where  $\alpha$  - fixed parameter depending on a type of the optical fiber.

It is uneasy to note, that at rectilinear arrangement of an optical fiber the set of integrals (1) on all possible straight lines in any plane  $(x, y)$  determines integral Radon transform of a two-arguments function  $F(x, y)$ , widely used in a computed tomography. An output from here follows that the initial field  $F$  can be restored, using different methods of image reconstruction [1,2].

The phase shift of a light wave in an optical fiber  $\delta\Phi$  can be measured with the help of the different optical circuits: Fabry-Perot interferometers, Mach-Zehnder interferometers, Michelson interferometers etc. However in all these cases the principle of integral «reading» of effect will be saved, the constant of proportionality will vary at transformation of a light intensity to a photocurrent.

The experimental set-up of a distributed fiber-optic measuring system were created. The measuring field of DFOMS makes the matrix of single-mode mutual - orthogonal fiber Fabry-Perot interferometers.

The signals from interferometers after transformation it into an electrical signal with the help of a photodetectors array, multiplexing and conversion to a digital code act as isolated points of projections of two-dimension distribution of a measured field at PC for processing. At transmission of the laser ray on an optical fiber (fiber interferometer), located in a measured physical field, the integral transformation is carried out which is a Radon transformation in case of a rectilinear trajectory of a fiber in the measurement system.

The information about of measurand (or set of measurands) is contained in a phase change of a light wave.

So, under the influence of a temperature field  $T(x, y)$  on fibre-optical interferometers (FOI) area at the output of each of fiber interferometers on lines and on columns there are signals, which can be interpreted as isolated points of a projection of a temperature field distribution in FOI area on an axis  $x$  and  $y$  correspondently. By using of well known tomography methods of image reconstruction on projections and under sufficient number of such projections it is possible to renovate of a temperature field distribution  $T(x, y)$  with the designed accuracy.

The methods of renovation and restoring of 2D-distribution of a measured physical field on projections obtained from fiber-optic interferometers are analysed. On the basis of a method of a return projection with a filtration the algorithm of renovation is offered most acceptable from the point of view of implementation in real-time systems.

The measurement of physical properties (temperature, pressure, strength etc.) with the help of fiber-optic interferometers is based on measurement of a phase changing in an electrical signal from photodetectors. The extremely high sensitivity of FOI allows to detect very small changes of measured parameter. The temperature sensitivity of FOI is of  $40 \text{ rad} * m^{-1} * ^\circ C^{-1}$ . This is equivalent to saying that for 1m of fiber length and  $1^\circ C$  change in temperature the phase sweeps through approximately 7 fringes (periods). Therefore for tracking

change of measured parameter in large range it is necessary permanently to track of a signal phase on an each of a photodetector and to measure a phase variations stipulated by these changes. The digital method of elimination of ambiguity and tracking a phase of a signal at measurement of phase shift on an exit of a photodetector was designed. Temporary and frequency implementation of the given method had confirmed its high performance and noise immunity.

In real conditions of measurements on a measuring field of fiber - optical interferometers effects apart from measured parameter (for example, temperature) non-instrument parameters (for example, pressure). One of the special requirements to a system is the selection of the information about measured parameter on a background of hindering effects from non-measurement parameters. For the solution of this problem it is offered to enter additional measuring FOI, optical fibres of which have different sensitivity to effect of different parameters. The algorithm of compensation of hindering effects is offered. This algorithm is based on the prior information obtained as a result of preliminary calibration of a system and the analysis of its response on effect of fields of a different physical nature.

The results of experimental researches of a sample of the distributed fiber-optical measuring system of 8\*8 dimension, manufactured on the basis of fiber-optical Fabry-Perot interferometers are represented. Functionality and efficiency of a principle of construction of the distributed fiber-optical measuring system and also efficiency of offered methods and signals processing algorithms are confirmed experimentally.

#### REFERENCES

1. S.P.Ginevsky, O.I.Kotov, V.M.Nikolaev, V.Yu.Petrunkin. Use of reconstructive computerised tomography methods in fiber-optic sensor. *Quantum Electronics*, 22, № 10, 1995.
2. Levin G.G. Vishnjakov S.P. *Optical Tomography*. -M.: Radio i Sviaz, 1989, 224 p.