

07:12

©1993 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ТОМОГРАФИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ

С.П.Гиневский, О.И.Котов, А.В.Медведев, В.М.Николаев

Показана возможность применения технологий волоконно-оптических измерений для томографических исследований пространственных распределений физических величин. Проведены измерение и реконструкция изображения поля температур в плоскости. Оценены чувствительность и разрешающая способность волоконно-оптического томографического датчика температуры. Приведены подробные характеристики реализованного макета волоконно-оптического томографического измерительного комплекса.

Использование методов реконструктивной томографии широко известно в различных областях научных исследований. Многие из них проработаны достаточно глубоко и с успехом применяются на практике. Прежде всего это — ставшая традиционной и широко используемая в медицине рентгеновская томография, ЯМР интроскопия, ультразвуковая, оптическая и СВЧ томография [1-4].

В данной работе показано, что томографические методы исследования пространственных распределений физических величин могут быть успешно применены в волоконно-оптических датчиках (ВОД). С другой стороны, технологии волоконно-оптических измерений открывают принципиально новые возможности методов реконструктивной томографии. Использование световодов с различными покрытиями и материалами сердцевины и оболочки существенно расширяет (в сравнении с традиционной томографией) круг измеряемых физических величин. В волоконно-оптическом томографе достаточно просто реализовать различные схемы сканирования с практически любыми криволинейными "траекториями" волокна с точно контролируемой геометрией, что открывает широкие перспективы в разработке новых алгоритмов реконструкции изображений. Кроме того, есть все основания предполагать, что волоконно-оптические томографические датчики позволят исследовать двумерные и трехмерные поля с очень высокими точностью и пространственным разрешением (примерно диаметра волокна). Основные принципы построения волоконно-оптических томографических датчиков и результат простейшего двухкурсного исследования распределения

температуры были опубликованы в работе [5]. Краткое сообщение по результатам дальнейших исследований было представлено на международной конференции [6].

Рассмотрим работу волоконно-оптического томографического датчика на основе фазового ВОД температуры. Внешнее воздействие — изменение температуры волокна приводит к появлению дополнительного сдвига фазы световой волны, регистрация которого дает информацию о величине воздействия. Если предположить, что основным фактором в изменении фазы φ является локальное изменение длины волокна

$$dl(T) = \alpha(T - T_0)dl(T_0) = \alpha\Delta T dl(T_0), \quad (1)$$

где α — коэффициент линейного расширения материала световода, T_0 — температура среды за пределами измеряемого физического поля, T — температура элемента световода, то полный фазовый набег $\Delta\varphi$ определяется выражением

$$\Delta\varphi = \int_0^L \beta(l)dl = \beta\alpha \int_0^L \Delta T dl, \quad (2)$$

где β — постоянная распространения световой волны, L — общая длина волокна (чувствительного элемента).

При равномерном распределении температуры вдоль оси световода ($T = \text{const}(l)$) приходим к обычному представлению о волоконно-оптическом датчике температуры

$$\Delta T = \frac{\Delta\varphi}{\beta\alpha L}. \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что при линейной ориентации чувствительного световода выражение (2) представляет собой линейный интеграл функции $\Delta T(X, Y)$ или проекцию. Совокупность таких интегралов вдоль всех возможных линий на плоскости (X, Y) определяет преобразование Радона функции $\Delta T(X, Y)$, хорошо известное в интегральной геометрии и томографии [7,8]. Отсюда непосредственно напрашивается вывод, что исходное поле температур $T(X, Y)$ можно восстановить, используя известные в традиционной томографии методы реконструкции изображений.

В реальном эксперименте исследовалось распределение температуры воздуха в плоскости над горизонтально расположенной нагретой спиралью. Структурная схема макета томографического измерительного устройства приведена на рис. 1. Волоконно-оптический датчик представлял собой одномодовый волоконный интерферометр Фабри–Перо, работающий на проход, с введением дополнительной двухчастотной модуляции фазы света с помощью пьезокерамического цилиндра [9]. Излучение гелий-неонового лазера типа ЛГН-207 вводилось в одномодовый волоконный световод, часть которого наматывалась на пьезокерамический цилиндр, образуя фазовый модулятор, чувствительный отрезок волокна располагался непосредственно над исследуемым объектом на высоте 2–3 мм. Волоконно-оптический модулятор и подводящие концы волокна во избежание паразитных воздействий температурного поля были

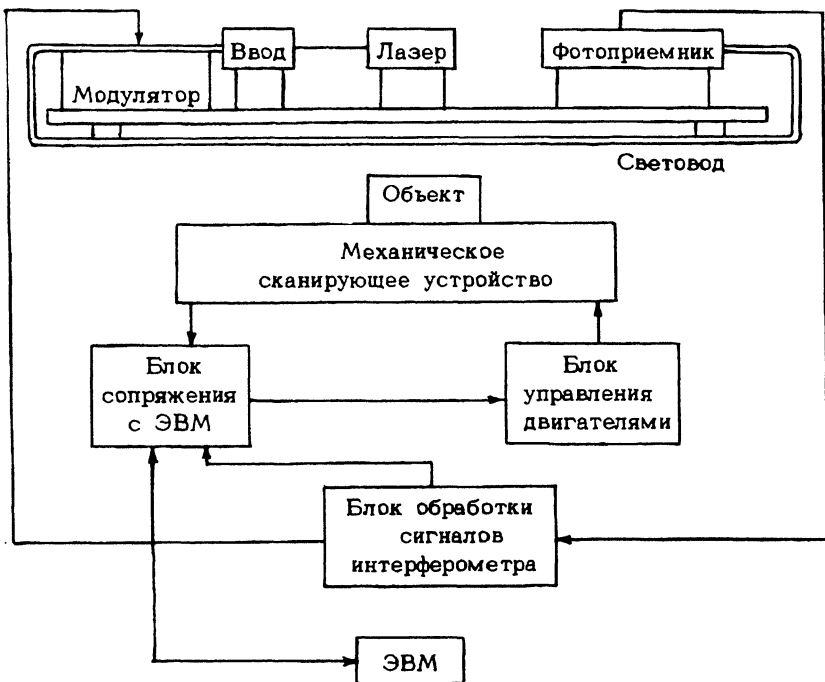


Рис. 1. Структурная схема макета томографического измерительного устройства.

тщательно теплоизолированы. С выхода фотоприемника сигнал подавался на блок обработки сигналов интерферометра, с которого информация об измеряемом поле через блок сопряжения поступала в ЭВМ. Механическое сканирующее устройство позволяло поворачивать исследуемый объект в диапазоне углов от 0 до 360° и перемещать его относительно центра вращения на ± 100 мм со скоростями 40 град/мин и 15 мм/мин соответственно. Для определения текущих координат объекта использовались фотодатчики, механически связанные с приводом сканирующего устройства. Точность определения положения объекта составляла 0.1° для угловой и 0.05 мм для линейной координат. Скорость снятия информации с датчика была установлена примерно равной 0.25 отсчета в секунду, таким образом, пространственная частота отсчетов составила около одного отсчета на миллиметр. Инерционность волоконно-оптических датчиков температуры достигает достаточно малых значений — менее 10^{-4} с [10], следовательно, шаг дискретизации определяется лишь скоростью съема информации и при необходимости может быть выбран значительно меньше 1 мм. Управление электродвигателями, регистрация координат и сигнала датчика производились в автоматическом режиме по заданной в ЭВМ программе.

Для пояснения схемы сканирования обратимся к рис. 2, на котором представлен вид сверху источника температурного поля (спирали). Объект устанавливался так, чтобы ось волокна проходила через начало декартовой системы координат (центра вращения), жестко связанной с объектом, и составляла с положительным направлением оси OX угол $90^\circ + \gamma$, где γ — угол святия проекции (направление перемещения объекта). Точка, совпадающая с началом координат, является серединой проекции.

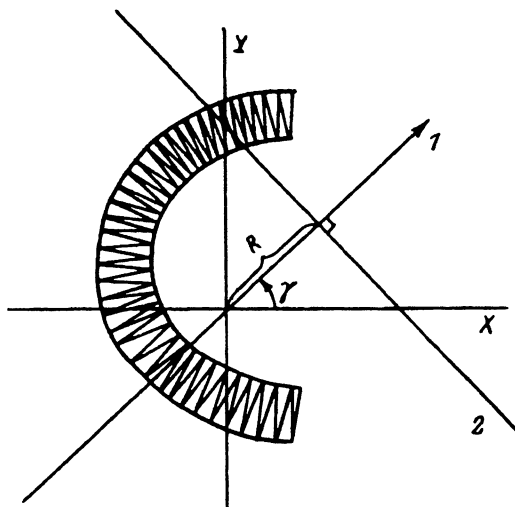


Рис. 2. Источник температурного поля и схема сканирования.

1 — направление перемещения, 2 — ось волокна.

Проекция снимается при непрерывном движении объекта в данном направлении от $-R_{\max}$ до R_{\max} , где $2R_{\max}$ — физическая длина проекции. Описанная процедура повторяется для всех остальных направлений. Таким образом, волоконно-оптический датчик дает возможность определить радионовский образ $\hat{T}(R, \gamma)$ функции $T(X, Y)$. На рис. 3 в качестве примера приведена одна из измеренных проекций $\hat{T}(R, 45^\circ)$. Физическая длина снятых проекций ($2R_{\max}$) составила приблизительно 7 см, каждая проекция содержала по 80 отсчетов. Количество и направления снятия проекций определялись конкретной программной реализацией выбранного алгоритма восстановления. Восстанавливаемое изображение поля представлялось в виде квадратной сетки, в пределах каждой ячейки которой

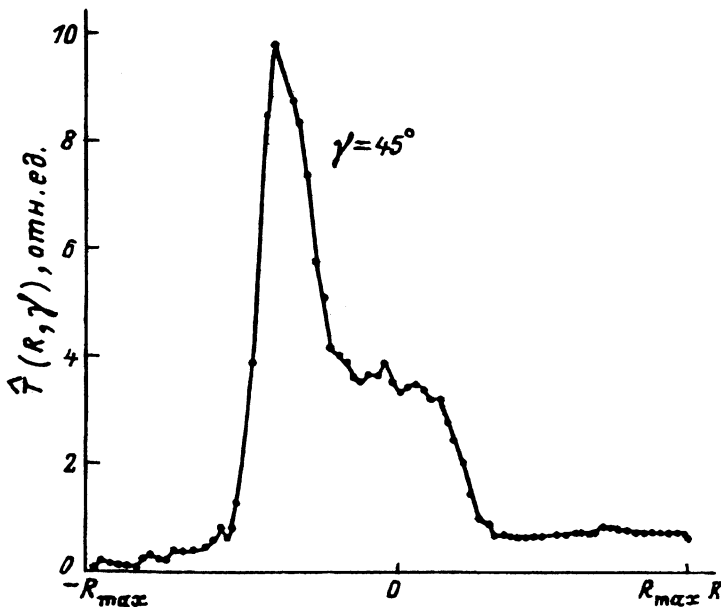


Рис. 3. Пример измеренной проекции.

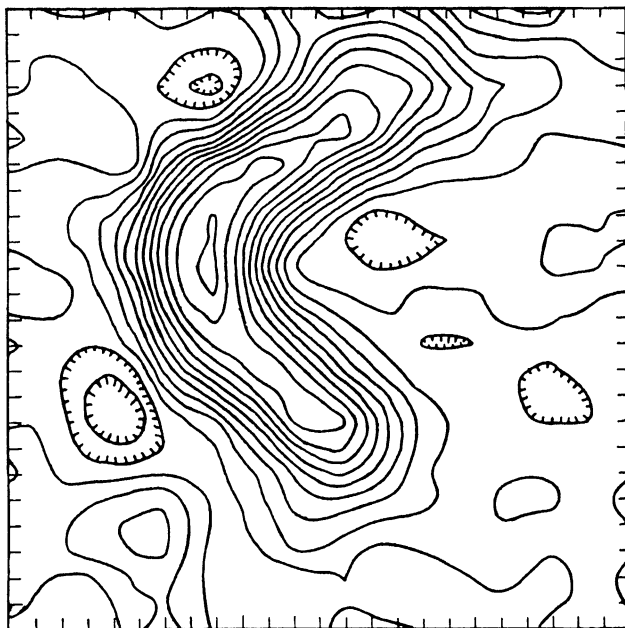


Рис. 4. Томограмма реконструированного изображения.

температуру считали постоянной. Реконструкция изображения производилась при помощи алгоритма решения систем линейных уравнений (метод Качмажа) [7]. По результатам реконструкции аппроксимировалась непрерывная функция $T(X, Y)$. На рис. 4 приведена послойная томограмма реконструированного по двенадцати проекциям изображения. Шаг координатной сетки 2 мм. Температура в максимуме функции $T(X, Y)$ составила около 260°C , величина фона соответствует комнатной температуре 20°C . Изотермические линии проведены с интервалом 20°C .

Субъективный сравнительный анализ томограммы и формы реального источника температурного поля позволяет сделать вывод о вполне качественной, по мнению авторов, реконструкции. Полученное с помощью волоконно-оптического томографического датчика изображение распределения температуры в плоскости над объектом достаточно полно характеризует структуру источника, четко выражены резкие перепады температуры, что свидетельствует о высокой разрешающей способности датчика, с учетом расхождения температурного "факела" определены форма и размеры объекта. Наличие неравномерностей по краям изображения объясняется наличием шумов в экспериментальных данных, случайным дрейфом температуры при снятии проекций и неравномерностью самого исследуемого поля.

Оценивая чувствительность и разрешающую способность волоконно-оптического томографического датчика температуры, следует отметить высокую фазовую чувствительность ВОД при использовании новой техники детектирования сигнала интерферометра с введением дополнительной двухчастотной модуляции фазы света. Блок регистрации сигнала интерферометра позволяет измерять фазу с точностью до $6 \cdot 10^{-3}$ Рад,

что соответствует интегральной температурной чувствительности около $0.06^\circ\text{C}\cdot\text{мм}$ (минимальное регистрируемое значение ΔT при длине чувствительного элемента 1 мм). Таким образом, волоконно-оптический томографический датчик температуры, построенный на изложенных выше принципах, дает возможность исследования двумерных температурных полей с контрастностью в несколько десятых долей градуса при разрешающей способности порядка 1 мм. При повышении контрастности поля и снижении требований по чувствительности пространственное разрешение может быть существенно меньше 1 мм. Однако рост разрешающей способности датчика возможен только при значительном увеличении количества обрабатываемых проекций, что в свою очередь накладывает жесткие требования на временную стабильность исследуемого поля, координатную привязку проекций и точность процедуры реконструкции изображения.

В силу химической и электрической нейтральности кварцевого световода — чувствительного элемента датчика ВОД с использованием методов реконструктивной томографии могут найти применение в тех областях исследований, где необходимо измерять пространственные распределения физических величин в условиях активных сред, сильных электромагнитных полей и т.п. и неволоконные измерительные системы исчерпывают свои возможности. Длина чувствительного элемента волоконного датчика может достигать километра и более, что позволяет охватить измерительной сетью из нескольких волокон большие территории и контролировать с определенной точностью площади в несколько квадратных километров (Геологоразведка, сейсмология, гидролокация и др.). Для контроля распределения температуры в объеме твердого тела можно использовать предварительную заделку сети волоконных датчиков при изготовлении узлов и деталей объекта и последующую обработку измерительных сигналов методами реконструктивной томографии.

Список литературы

- [1] Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. Основы реконструктивной томографии. М.: Мир, 1983.
- [2] Вишняков Г.Н., Левин Г.Г. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989.
- [3] Реконструктивная вычислительная томография. Тематический выпуск. ТИИ-ЭР. 1983. Т. 71. № 3.
- [4] Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. // УФЖ. 1983. Т. 141. № 3. С. 469–498.
- [5] Котов О.И., Медведев А.В., Николаев В.М., Петрунькин В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 2. С. 90–93.
- [6] Ginevsky S.P., Kotov O.I., Kozareva L.I. et al. // Proc. II Intern. Russian Fiber Optic Conf. ISFOC-92. St.Petersburg, 1992. P. 328–329.
- [7] Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
- [8] Гельфанд И.М., Граев М.И., Виленкин Н.Я. Интегральная геометрия и связанные с ней вопросы теории представлений. М.: Физматгиз, 1962.
- [9] Ginevsky S.P., Kotov O.I., Medvedev A.V. et al. // Proc. ISFOC-91. Leningrad, 1991. Vol. 1. P. 309–312.
- [10] Mourer G.S., Cole J.H. Vucaro J.A. Opt. Lett. 1982. Vol. 7. P. 561–563.

С.-Петербургский государственный
технический университет

Поступило в Редакцию
12 января 1993 г.