

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ

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

Во всем многообразии применений методов реконструктивной вычислительной томографии (РВТ) [1,2] волоконно-оптические томографические датчики (ВОТД) различных физических полей являются, пожалуй, наиболее молодой и недостаточно еще разработанной сферой научных знаний. Несмотря на это, некоторые замечательные достоинства, присущие этим системам, уже обращают на себя внимание специалистов, о чем свидетельствует появление ряда публикаций с различными предложениями об использовании методов РВТ в волоконно-оптических датчиках [3-6]. Применение волоконного световода в схеме томографа значительно расширяет круг измеряемых физических величин (температура, давление, магнитные и электрические поля, акустические волны, радиация и т.д.). Волоконный томограф, в отличие от оптического или акустического, не имеет недостатков, связанных с дифракцией и рефракцией зондирующего луча, что позволяет говорить о возможности построения ВОТД с поперечным размером поля в несколько километров.

Использование интерферометрических схем регистрации сигнала обеспечивает высокую чувствительность и быстрое действие датчиков, а малые поперечные размеры волоконного световода предполагают потенциально высокую пространственную разрешающую способность. Гибкость оптического волокна позволяет создавать схемы со сложной (отличной от прямолинейной) и наперед заданной траекторией распространения оптического луча, и расширить возможности методов реконструкции изображений. И наконец, последнее, что и составляет предмет настоящей статьи, — волоконные световоды со специальными покрытиями, чувствительными к знаку регистрируемой величины, измеряют проекции векторных величин на ось световода (например, в случае магнитного поля). В известных схемах традиционных томографов имеют дело со скалярными полями, что заложено, как правило, в принципе амплитудного измерения зондирующих полей. Автор работы [7] отмечает, что "в

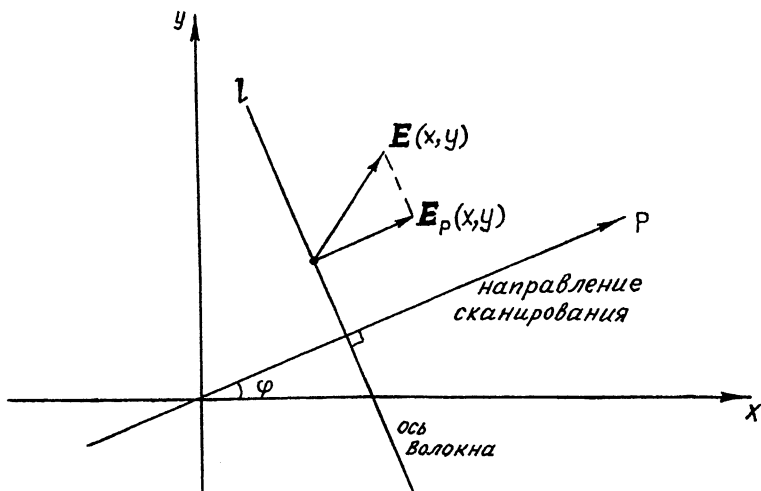


Рис. 1. К принципу действия волоконно-оптического томографического датчика векторного поля.

области реконструктивной томографии нерешенными остались две важные проблемы — проблема вычисления распределения анизотропных скалярных величин и проблема вычисления распределений векторных функций”. Малое количество публикаций по томографическому измерению векторных полей объясняется слабой теоретической и экспериментальной проработкой этих вопросов, неясностью механизма регистрации [9].

ВОТД с покрытиями световода на основе магнитоэлектрических или пьезоэлектрических материалов позволяют измерять пространственные распределения проекций соответственно магнитного и электрического полей. Как будет показано ниже, изображение векторного поля может быть реконструировано по результатам таких измерений при помощи алгебраических алгоритмов реконструкции.

Для рассмотрения способа измерения двумерного векторного поля обратимся к рис. 1. Пусть искомое распределение — напряженность электрического поля $E(x, y)$ в плоскости рисунка. Регистрирующий элемент — волоконный световод l , “активизированный” пьезоэлектрическим материалом. В случае использования пьезополимерных пленок (или пьезокерамических пластин) плоскость пленки перпендикулярна плоскости рисунка. Составляющая поля E_p , нормальная к поверхности пьезополимера, вызывает продольные деформации, приводящие к изменению длины световода, жестко связанного с пленкой. Причем знак приращения

длины волокна определяется направлением проекции E_p . Величина сдвига фазы оптической несущей, вызванного локальным изменением длины световода в каждой точке прямой l , интегральным образом зависит от функции $E_p(x, y)$, и может быть измерена известными интерферометрическими методами. Таким образом, волоконно-оптический датчик измеряет величину

$$\Delta\Phi = k\hat{f}(p, \varphi) = k \int_l E_p(x, y) dl, \quad (1)$$

где k — постоянный коэффициент, зависящий от эффективности пьезоэлектрика.

Используя декартовы составляющие искомой функции $E(x, y)$, получим вид интегрального преобразования выполняемого датчиком:

$$\hat{f}(p, \varphi) = \int_l (E_x(x, y) \cos \varphi - E_y(x, y) \sin \varphi) dl. \quad (2)$$

Обратная задача нахождения $E_x(x, y)$ и $E_y(x, y)$ по измеренным проекциям $\hat{f}(p, \varphi)$ может быть решена при помощи методов разложения в конечные ряды [8]. Применение этого метода предполагает изначальную дискретизацию реконструируемого изображения и переход к решению системы линейных уравнений (неравенств). В отличие от скалярной томографии система уравнений для реконструкции векторной функции при одинаковых размерах искомого изображения и равном числе проекций содержит в два раза больше неизвестных, и вклад каждой составляющей поля нормируется коэффициентами $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$. Несмотря на усложнение системы уравнений итерационная процедура алгоритма нахождения решения системы отличается от известной лишь введением дополнительных весовых коэффициентов при вычислении корректирующих поправок. Естественно, степень определенности (корректности) обратной задачи восстановления векторной функции снижается по сравнению с реконструкцией скалярных полей. Более актуальным становится вопрос о сходимости процедуры к какому-либо решению и о соответствии этого решения действительному распределению измеряемой величины.

Для экспериментального подтверждения работоспособности метода было измерено распределение напряженности электрического поля, созданного при помощи двух плоских электродов размером 30×7 мм. Электроды располагались

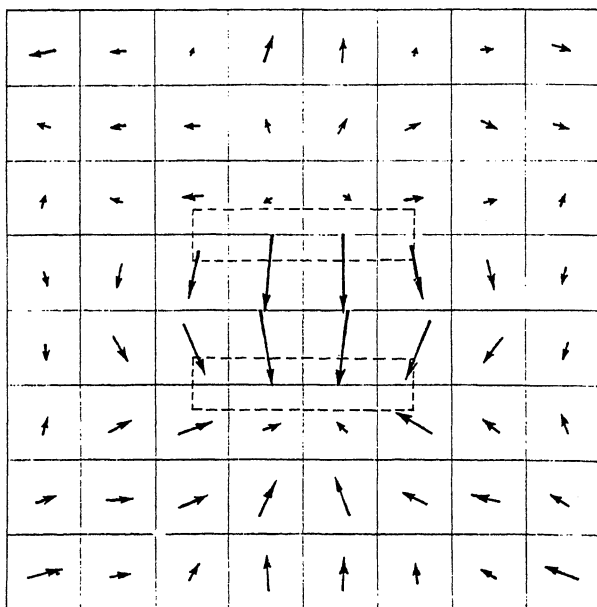


Рис. 2. Результат реконструкции изображения поля.

параллельно в одной плоскости (x, y), расстояние между электродами — 13 мм. Чувствительным элементом датчика служил отрезок одномодового анизотропного световода, укрепленный на пьезокерамической пластине. Плоскость пластины была перпендикулярна плоскости электродов, что делало возможным регистрацию только двух составляющих поля E_x и E_y (а точнее E_p). Составляющая поля E_z может регистрироваться отдельно и независимо при другом положении керамики. С целью увеличения эффективности взаимодействия поля с волокном (увеличения коэффициента k) на электроды подавалось переменное напряжение с частотой, равной частоте резонанса пьезокерамики. Наведенный сдвиг фазы оптической несущей измерялся при помощи волоконного интерферометра Фабри-Перо. Для достоверного определения знака фазового набега использовалась дополнительная модуляция фазы оптической несущей на частоте внешнего воздействия. По изменению сигнала датчика при наличии и отсутствии известной по величине подмодуляции делался вывод о знаке измеряемой величины.

Сканирование осуществлялось на расстоянии примерно 1 мм от поверхности электродов в четырех направлениях $\varphi = 0, 45, 90, 135^\circ$. Для реконструкции был выбран кадр изображения размером 8×8 см с шагом дискретизации 1 см. По восстановленным матрицам составляющих поля E_x и E_y

была построена картина векторного поля $\mathbf{E}(x, y)$ (рис. 2). Пунктирной линией обозначены электроды. Направление и длина стрелок характеризуют соответственно направление и величину электрического поля в каждом элементе изображения (среднее значение в ячейке размером 1×1 см).

Несмотря на невысокую разрешающую способность проведенных измерений; изображение в целом достоверно отображает картину поля. Величина напряженности поля в максимуме составила около 20 В/см. Наличие периферийных артефактов (некоторое увеличение $|\mathbf{E}|$ в углах изображения) и несовпадение вектора \mathbf{E} с нормалью к электродам в зазоре между пластинами свидетельствуют о недостаточном количестве экспериментальных данных для более качественной реконструкции поля. Вычисление распределений E_x и E_y в исследуемой плоскости проводилось при отсутствии какой-либо априорной информации о поле. Увеличение числа проекций и совершенствование алгоритма реконструкции позволят получить изображение лучшего качества.

Список литературы

- [1] Реконструктивная вычислительная томография. Тематический выпуск. // ТИИЭР. 1983. Т. 71. В. 3.
- [2] Вишняков Г.Н., Левин Г.Г. Оптическая томография. М.: Радио и связь, 1989.
- [3] Малетанов А.И. // Изв. вузов. Радиофизики. 1988. Т. 31. В. 11. С. 1388–1393.
- [4] Котов О.И., Медведев А.В., Николаев В.М., Петрунькин В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 2.
- [5] Кульчин Н.Ю., Витрик О.Б., Кириченко О.В., Петров Ю.С. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. В. 5. С. 513–516.
- [6] Ginevsky S.P., Kotov O.I., Medvedev A.V., Nikolaev V.M. // Proc. ISFOC-93, St.Petersburg, April 26–30, P. 313–314.
- [7] Гринлиф. // ТИИЭР. 1983. Т. 71. В. 3. С. 48–63.
- [8] Ценсор Я. // ТИИЭР. 1983. Т. 71. В. 3. С. 148–160.
- [9] Braun H., Hauck A. // IEEE Transactions on signal processing. 1991. V. 39. N 2. P. 464–471.

Санкт-Петербургский
государственный технический
университет

Поступило в Редакцию
6 декабря 1993 г.