

PACS numbers: 07.07.Dr, 42.30.Wb

Адаптивные распределенные оптоэлектронные информационно-измерительные системы

Ю.Н. Кульчин

1. Введение

Процесс интенсивного развития и внедрения волоконно-оптических телекоммуникационных систем привел к появлению одной из наиболее динамично развивающихся областей оптоэлектроники — волоконно-оптических датчиков (ВОД) физических величин [1]. Органичное сочетание в едином тракте волоконного световода (ВС) системы связи и системы мониторинга физических величин открывает широкие перспективы для создания протяженных и разветвленных информационно-измерительных систем (ИИС), функциональное назначение и конфигурация которых могут непрерывно совершенствоваться без привлечения дополнительных магистралей связи. При этом важным достоинством ВОД является привнесение в ИИС таких качеств, как высокая чувствительность, малые размеры, устойчивость к электромагнитным помехам и агрессивным воздействиям окружающей среды, возможность мультиплексирования отдельных датчиков в сложные измерительные системы и потенциально низкая стоимость [2]. Перечисленные достоинства и наметившийся в последние годы переход от дискретных ВОД физических величин к протяженным распределенным ВОД позволили начать разработку распределенных волоконно-оптических измерительных сетей (РВОИС) и "чувствительных поверхностей", способных реконструировать пространственные распределения параметров исследуемых физических полей (ФП) [3].

Переход к РВОИС большой размерности, развитие и совершенствование методов обработки информационных массивов на выходе РВОИС, основанных на использовании новых физических явлений и применении современных нейросетевых технологий обработки сигналов, открывают широкие возможности для придания ИИС таких новых качеств, как способность к обучению и адаптивность [4, 5], что является важным шагом на пути создания практических распределенных ИИС, предназначенных для исследования ФП и мониторинга состояний технических и технологических объектов.

Цель настоящей работы — рассмотрение подходов к решению проблемы создания адаптивных распределенных оптоэлектронных ИИС как одного из перспективных направлений современного физического приборостроения.

2. Томографические РВОИС для реконструкции распределений скалярных и векторных физических полей

Традиционный подход к решению задачи восстановления многомерных функций распределения физических полей посредством использования РВОИС, состоящих из набора "точечных" ВОД, в которых измерения соотносятся с вполне определенным дискретным набором точек в пространстве, не всегда оказывается успешным вследствие возникающих технических сложностей мульт-

типлексирования/демультиплексирования сигналов, получаемых от большого числа "точечных" ВОД. Это не позволяет добиться высоких пространственного разрешения и быстродействия [1, 3]. Последовательное объединение "точечных" ВОД в протяженную волоконно-оптическую измерительную линию (ВОИЛ) либо использование распределенных ВОД позволяет получить интегральный фазовый или амплитудный сигнал воздействия внешнего ФП на ВОД вдоль траектории укладки ВС [3, 6].

В общем случае интегральный сигнал о воздействии ФП на ВОИЛ может быть представлен в виде [7–16]

$$g(p, \phi) = \int_{L(p, \phi)} h(x, y, \phi) dL, \quad (2.1)$$

где $h(x, y, \phi)$ — функция чувствительности ВОИЛ к воздействию ФП:

$$h(x, y, \phi) = \begin{cases} qf(x, y) & \text{для скалярного ФП,} \\ q\hat{F}[\mathbf{A}(x, y), \mathbf{m}(x, y, \phi)] & \text{для векторного ФП,} \end{cases}$$

$f(x, y)$ — функция пространственного распределения регистрируемого параметра ФП, $\mathbf{A}(x, y)$ — вектор напряженности исследуемого поля, \mathbf{m} — единичный вектор касательной (\mathbf{e}) или нормали (\mathbf{n}) к контуру укладки ВОИЛ, $\hat{F}[\dots]$ — оператор; x, y — декартовы координаты в плоскости регистрации (S), q — постоянный коэффициент, задающий погонную чувствительность ВОИЛ к измеряемому параметру ФП, L — координата вдоль контура, по которому проложена ВОИЛ, (p, ϕ) — полярные координаты, задающие положение контура ВОИЛ в плоскости регистрации (рис. 1а).

Описываемые выражением (2.1) сигналы несут косвенную информацию о функции распределения параметров ФП. Поэтому для ее восстановления требуются специальные математические методы. В случае скалярного ФП такие методы основываются на теории томографии [17]. Согласно этой теории для решения задачи восстановления функции $f(x, y)$ необходимо получить набор интегральных образов $g(p, \phi)$ для разных значений (p, ϕ) . Данный набор образов составит прямое преобразование Радона от искомой функции $f(x, y)$, для восстановления которой к полученному массиву данных необходимо применить процедуру обратного преобразования Радона [17, 18].

В случае векторного ФП задача реконструкции распределения параметров $\mathbf{A}(x, y)$ не имеет прямого решения методами томографии. Поэтому для каждого вида зависимости $h(x, y, \phi)$ следует применять свой метод обработки результатов измерений.

Существующие алгоритмы вычислительной томографии позволяют достаточно точно восстанавливать оригинал скалярных функций ФП только при обеспечении достаточно высокой частоты выборки по каждому из параметров p и ϕ преобразования Радона (2.1). В нашем случае получить требуемую выборку можно посредством покрытия плоскости S распределенной волоконно-оптической измерительной сетью, составленной из ВОИЛ, уложенных с определенным шагом по радиальной и угловой координатам [7–10]. Одно из достоинств такого подхода составляет возможность получения результата сканирования в реальном времени. Требуемая периодичность отсчетов в РВОИС по

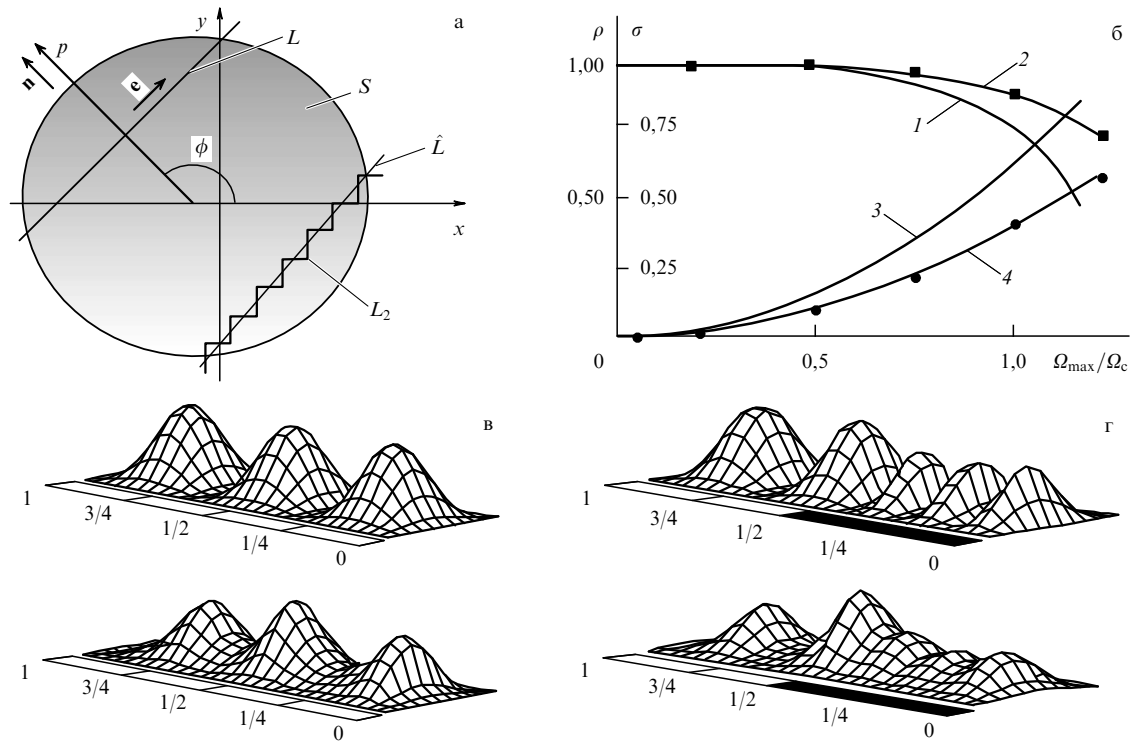


Рис. 1. Восстановление распределений физических полей с использованием РВОИС: (а) расположение ВОИЛ в области реализации ФП, (б) расчетные (1, 3) и экспериментальные (2, 4) зависимости коэффициента корреляции ρ (1, 2) и среднеквадратичной ошибки σ (3, 4) для исходной и восстановленной функций распределения ФП, (в, г) расчетные (вверху) и экспериментальные (внизу) распределения интенсивности поперечных колебаний стенок пустого и наполовину заполненного металлического резервуара соответственно.

полярному углу и полярному радиусу определяется из следующих выражений [17]:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{D\Omega_{\max}}, \quad \Delta p = \frac{\pi}{\Omega_{\max}}, \quad (2.2)$$

где D — характерный поперечный размер области S , Ω_{\max} — максимальная пространственная частота вариаций физического поля.

Поскольку построение ИИС на основе сети ВОИЛ приводит к ограничению числа интегральных отсчетов (2.1), это влечет за собой некорректность решения обратной задачи восстановления ФП [9, 10]. Поэтому для наиболее достоверного восстановления оригинала по неполному набору интегральных данных вычислительный алгоритм восстановления необходимо дополнить правилом оценки оригиналов восстанавливаемых функций с помощью зависимостей, имеющих минимальную норму отклонения от своего среднего значения в области S [8, 10]. А к самой РВОИС следует предъявить требование, чтобы ее характерная пространственная частота, определяемая из выражения $\Omega_c = \sqrt{6K/S}$ (где K — число ВОИЛ в составе сети), превышала частоту Ω_{\max} [8, 10]. Совместное действие указанных требований иллюстрируется расчетными и экспериментальными зависимостями параметров качества восстановления ФП от соотношения между частотами Ω_c и Ω_{\max} (рис. 1б) [9].

На рисунке 1в, г как пример использования РВОИС для восстановления распределений скалярных ФП показаны экспериментальные и расчетные результаты, полученные при реконструкции распределения интенсивности поперечных колебаний стенок металлических

резервуаров для различных уровней их заполнения жидкостью [8, 9].

Если воздействие векторного ФП на выходной сигнал ВОИЛ пропорционально проекции $\mathbf{A}(x, y)$ на направление единичного вектора \mathbf{e} , касательного к оси ВОИЛ, то выражение (2.1) может быть представлено в виде [13, 16]

$$g(p, \phi) = \int_{(L)} \mathbf{A}(L)\mathbf{e} dL = C(p, \phi) \sin \phi - B(p, \phi) \cos \phi, \quad (2.3)$$

где $C(p, \phi) = \int_{(L)} A_X(x, y) dL$, $B(p, \phi) = \int_{(L)} A_Y(x, y) dL$ — коэффициенты, содержащие информацию о преобразовании Радона от проекций напряженности поля $\mathbf{A}(x, y)$ на оси декартовых координат X и Y соответственно. Для разделения вклада величин C и B в общий интегральный сигнал целесообразно воспользоваться комбинированной РВОИС с дополнительными ВОИЛ, уложенными так же, как и исходные, но чувствительными к проекции вектора напряженности поля $\mathbf{A}(x, y)$ на вектор нормали (\mathbf{n}) к оси ВОИЛ. Интегральный сигнал на выходе таких дополнительных ВОИЛ можно описать выражением

$$g_1(p, \phi) = \int_{(L)} \mathbf{A}(L)\mathbf{n} dL = C(p, \phi) \cos \phi + B(p, \phi) \sin \phi. \quad (2.4)$$

Совместное решение (2.3) и (2.4) дает: $C = g \sin \phi + g_1 \cos \phi$ и $B = -g \cos \phi + g_1 \sin \phi$. (Заметим, что вклад величин C и B также разделяется при использовании дополнительной непрямолинейной ВОИЛ с неравномерной по длине чувствительностью [13, 16]). Таким образом, задача восстановления распределения декартовых компонент вектора напряженности вектор-

ного ФП сводится к уже рассмотренной выше томографической задаче восстановления функции распределения скалярных величин по известным интегральным образам.

Согласно (2.3) и (2.4), если в РВОИС использовать ВОИЛ только одного типа, например чувствительные к проекции вектора на ось ВС, это позволяет восстановить только вихревую компоненту векторного ФП [14–16]. А использование РВОИС на основе ВОИЛ, чувствительных только к проекции вектора на нормаль к оси ВС, позволяет восстановить только потенциальную компоненту векторного ФП [14–16]. Экспериментальное подтверждение работоспособности таких РВОИС на примере восстановления распределения электростатического поля дано в [12].

В каждом конкретном случае исследования векторных ФП выбор траектории укладки ИЛ в РВОИС зависит от типа используемых ВОИЛ. Например, в задачах восстановления распределений полей продольных смещений необходимо использовать ВОИЛ, в которых воздействие векторного поля на ВС пропорционально производной продольной компоненты вектора \mathbf{A} в направлении касательной к световоду: $\partial A_L / \partial L$. (Такие ВОИЛ могут быть созданы, например, на основе протяженных волоконных интерферометров [14–16].) При этом ВОИЛ целесообразно укладывать по ломаной траектории, составленной из одинаковых прямоугольных ступеней (L_2 на рис. 1а). Для таких ВОИЛ величина интегрального сигнала (2.1) описывается выражением

$$g(p, \phi) = \int_{(L_2)} dL_2 \left(\frac{\partial(\mathbf{A} \cdot \mathbf{e})}{\partial L_2} \right) = \sqrt{2} \int_{(\hat{L})} \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} \right) d\hat{L} = \sqrt{2} \int_{(\hat{L})} \text{div} \mathbf{A}(x, y) d\hat{L}. \quad (2.5)$$

В (2.5) введен новый контур интегрирования \hat{L} — прямая линия, ориентированная вдоль размещения ступенчатого контура (рис. 1а). Как видно, (2.5) представляет элемент преобразования Радона от функции $\text{div} \mathbf{A}(x, y)$ для заданных значений координат (p, ϕ) . Таким образом, используя РВОИС, состоящую из ступенчатых ВОИЛ, можно решить задачу томографического восстановления распределения $\text{div} \mathbf{A}(x, y)$, т.е. восстановить потенциальную составляющую векторного поля.

В то же время, чтобы восстановить распределение вихревой компоненты векторного ФП необходимо использовать ступенчатые ВОИЛ, сигнал которых формируется под действием производной поперечной компоненты вектора ФП в направлении касательной к ВС: $\partial A_n / \partial L$. В этом случае после выполнения операции обратного преобразования Радона будет восстановлено распределение функции $\mathbf{k} \cdot \text{rot} \mathbf{A}(x, y)$, которое и описывает вихревую природу ФП [14, 15]; \mathbf{k} — нормаль к плоскости (x, y) .

В работах [14–16] при изучении продольных деформаций упругих поверхностей РВОИС из ступенчатых интерферометрических ВОИЛ жестко прикреплялась к исследуемой поверхности. На рисунке 2а приведены линии исследуемого поля смещений, а на рис. 2б показан результат его восстановления по сигналам измерительной сети (коэффициент корреляции между приведенными распределениями составляет 0,95).

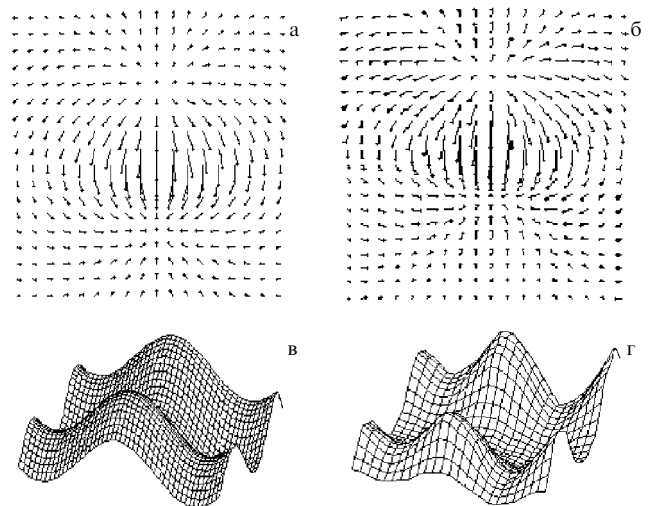


Рис. 2. Томографическое восстановление распределений параметров векторных ФП с использованием РВОИС: (а) расчетное распределение потенциальной составляющей поля продольных деформаций плоского объекта, (б) распределение потенциальной составляющей поля продольных деформаций плоского объекта, восстановленное по сигналам РВОИС, (в) расчетное распределение квадрата модуля вектора градиента поля поперечного смещения упругой пластины, (г) распределение квадрата модуля градиента поля поперечного смещения упругой пластины, восстановленное по сигналам РВОИС.

Воздействие векторного ФП на ВОИЛ также может быть пропорционально квадрату проекции продольной компоненты вектора $\mathbf{A}(x, y)$ на направление касательной к ВС: $(A_L)^2$. Задача такого типа возникает, например, при воздействии градиента поля поперечных смещений упругих поверхностей на ВОИЛ интерференционного типа [13–16]. При укладке ВОИЛ по траектории L_2 (рис. 1а) на ее выходе получаем сигнал вида

$$g(p, \phi) = 0,5 \int_{(L_2)} (\mathbf{A}(x, y) \cdot \mathbf{e})^2 dL_2 = \int_{(\hat{L})} |\mathbf{A}(x, y)|^2 d\hat{L}. \quad (2.6)$$

Таким образом, выполняя обратное преобразование Радона для массива данных, получаемых РВОИС, можно восстановить функцию распределения квадрата модуля вектора напряженности ФП. Данный вывод экспериментально проверялся в работах [13–16]. На рисунке 2в, г для сравнения приведены расчетное и экспериментально восстановленное распределения квадрата модуля вектора градиента поперечной деформации тонкой упругой пластины.

3. Протяженные ВОИЛ на основе одноволоконных многомодовых интерферометров и методы адаптивной пространственной фильтрации

Разработка РВОИС для томографических ИИС мониторинга распределений ФП сопряжена с решением одной из ключевых проблем: создания протяженных ВОИЛ. Такие ВОИЛ могут быть выполнены на основе практически любых распределенных или квазираспределенных ВОД физических величин, описание и классификация которых даны в [3]. В то же время исследования в [7–9, 13–16] показали, что для создания ВОИЛ в томографических ВОИС наиболее подходят ВОД на основе одноволоконных многомодовых интерферометров (ОМИ). В ОМИ для измерения величины воздействия ФП используется результат межмодовой интерференции направ-

ляемых мод одного и того же многомодового ВС. ВОИЛ на основе ОМИ обладают высокой чувствительностью, способны направлять излучение большой мощности и не требуют использования опорного плеча, что выгодно отличает их от других типов интерференционных измерительных устройств.

Излучение на выходе ОМИ представляет собой сложный (спекловый) оптический сигнал, являющийся результатом интерференции большого числа направляемых мод, имеющих различные фазовые скорости. Воздействие на ОМИ приводит к дополнительным сдвигам фаз между модами ВС, что находит отражение в коррелированной пространственной перестройке спекловой картины [19]. Это позволило предложить для обработки излучения из ОМИ корреляционные методы пространственной фильтрации, основанные на использовании амплитудных и голографических пространственных фильтров, мощность сигнала на выходе которых может быть представлена в виде [20–22]

$$P_{\text{out}}(t) = \iint_S I(x, y, t) T(I_0(x, y, 0)) dx dy, \quad (3.1)$$

где $I_0(x, y, 0)$ и $I(x, y, t)$ — распределение интенсивности излучения в плоскости пространственного фильтра на стадиях записи фильтра и обработки сигналов ОМИ соответственно; $T(I_0(x, y, 0))$ — функция пропускания пространственного фильтра; S — площадь фильтра; t — время.

Исследование процессов модуляции фаз мод в многомодовых ВС и корреляционной обработки излучения из ОМИ показало, что для обоих типов пространственных фильтров мощность корреляционного сигнала является функцией максимальной дополнительной разности фаз $\Delta\Phi_{\text{max}}(t)$ между направляемыми модами в ОМИ [21, 22]:

$$P_{\text{out}}(t) \propto \sin^2\left(\frac{\Delta\Phi_{\text{max}}(t)}{2}\right). \quad (3.2)$$

Поэтому метрологические характеристики ВОИЛ на основе ОМИ определяются числовой апертурой, длиной и материалом используемых ВС. В результате этого порог чувствительности ОМИ, например к относительной деформации ВС, может изменяться в пределах от 10^{-10} до 10^{-5} , а динамический диапазон измерений в статическом режиме достигать 30–40 дБ [3].

Как и для всех типов волоконно-оптических интерферометров, для ВОИЛ на основе ОМИ актуальна проблема низкочастотного фединга интерференционного сигнала, обусловленного случайными неконтролируемыми воздействиями, такими, как дрейф температуры, технологические вибрации, случайные механические воздействия, дрейф частоты лазера и т.п. [3]. Поэтому для создания практических систем ВОИС, предназначенных для длительного мониторинга ФП, были разработаны оригинальные адаптивные способы обработки и стабилизации рабочих характеристик протяженных ВОИЛ, основанные на использовании методов адаптивной пространственной фильтрации (АПФ) поля излучения из ОМИ [23–25, 37].

Эффективным подходом к реализации метода АПФ служит использование явлений нелинейно-оптического взаимодействия световых волн в фоторефрактивных кристаллах (ФРК), например $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$. При освещении таких кристаллов излучением с неоднородным распре-

лением интенсивности в них возникает пространственно неоднородное распределение электрического заряда, вызывающее изменение показателя преломления материала ФРК, пропорциональное градиенту интенсивности излучения [26–28]. Следствием этого являются процессы усиления самодифракции световой волны (эффект фанинга) [28–30] и поляризационной самомодуляции излучения [31, 32].

При вводе в ФРК излучения из ОМИ оно рассеивается на неоднородностях кристалла. Поля интерференции рассеянных волн с основной волной создают в ФРК хаотически ориентированные объемные динамические дифракционные решетки. При выборе определенных размеров кристалла, его ориентации, угла ввода излучения в ФРК и состояния поляризации излучения на этих динамических дифракционных решетках происходит усиление рассеянных волн (эффект фанинга). Эффективность преобразования основной волны в волны фанинга может достигать 90 % [33]. Пространственно-угловая селективность такого набора динамических решеток (при длине кристалла 10 мм) достигает $\sim 10^{-4}$ рад, что делает их чрезвычайно чувствительными к изменению распределения интенсивности в поле излучения из ОМИ.

Как показано в [23], образованная излучением из ОМИ на выходе из ФРК волна фанинга является корреляционным сигналом, мощность которого пропорциональна функции корреляции распределений комплексных амплитуд полей излучения из ОМИ до ($U_1(x, y, 0)$) и после ($U_2(x, y, t)$) воздействия ФП на ОМИ:

$$P_{\text{out}}(t) \propto \text{Re} \iint_S U_2^*(x, y, t) U_1(x, y, 0) dx dy. \quad (3.3)$$

Это дало возможность создания эффективных пространственных фильтров для реализации метода АПФ при обработке сигналов ОМИ. Наблюдающийся в ФРК процесс конкуренции волн рассеяния ведет к образованию стационарного набора объемных динамических дифракционных решеток с постоянной времени записи корреляционного фильтра τ_R . Поэтому любые быстрые изменения ($\tau < \tau_R$) поля излучения из ОМИ на входе в ФРК не отразятся на состоянии пространственного фильтра, что приведет к модуляции выходного сигнала $P_{\text{out}}(t)$ в соответствии с (3.3). Если же изменения будут медленные ($\tau > \tau_R$) или редкие, то старый корреляционный фильтр сотрется и сформируется новый, соответствующий измененному распределению интенсивности излучения на входе в ФРК. В этом случае выходной сигнал $P_{\text{out}}(t)$ останется неизменным.

Результаты экспериментального исследования описанного метода АПФ обработки сигналов ОМИ [23, 24] продемонстрировали не только его высокую эффективность, но и долговременную стабильность его рабочих характеристик (более 8 ч), а также возможность обработки сигналов с частотами выше 0,1 МГц.

Явление поляризационной самомодуляции заключается в изменении состояния поляризации распространяющегося по ФРК излучения с неоднородным распределением интенсивности, являющегося следствием возникновения индуцированного им динамического во времени неоднородного распределения показателя преломления в кристалле [26, 31, 32]. Появление анизотропии оптических свойств ФРК выражается в изменении интенсивности проходящего через кристалл излучения на выходе из расположенного за ним анализатора [34, 35].

Функция пропускания пары "ФРК – анализатор" может быть представлена как [26]

$$T_{\text{PSM}}(x, y) = \cos^2(a[E_A + E_{\text{SC}}(x, y)]), \quad (3.4)$$

где a — константа, учитывающая свойства кристалла и излучения, E_A — напряженность внешнего электрического поля; $E_{\text{SC}}(x, y)$ — напряженность внутреннего электрического поля, зависящая от градиента интенсивности поля излучения из ОМИ в ФРК.

Проведенный в [25] комплекс исследований показал, что размещаемая на выходе из ОМИ комбинация "поляризатор – ФРК – анализатор" способна выполнять функцию амплитудного пространственного фильтра в соответствии с (3.1), обеспечивать его адаптивность к неконтролируемым воздействиям и тем самым реализовать метод АПФ-обработки сигналов ОМИ.

В [36] исследовалось взаимное влияние полей излучения различных ОМИ при их перекрытии в объеме ФРК. Было установлено, что перекрытие оптических полей приводит к ослаблению интенсивности корреляционных сигналов и не влияет на их информационную составляющую, что открывает возможность создания многоканальных систем для обработки сигналов методом АПФ.

В [37] сообщается об исследовании возможности реализации метода АПФ на основе аналогового электронного устройства, состоящего из матрицы фотодиодов, пространственно согласованной со спекловой структурой поля излучения из ОМИ, и многоканального блока обработки электрических сигналов, эффективного при обработке сигналов ВОИЛ на основе маломодовых ВС.

4. Нейросетевые методы обработки сигналов в распределенных волоконно-оптических ИИС

Создание на основе РВОИС ИИС большой размерности или разрешающей способности неразрывно связано с решением ряда проблем: обработки больших массивов информации в реальном времени; распознавания и классификации восстановленных образов ФП; адаптации измерительной системы под условия эксплуатации и под конкретную задачу и т.п. Это явилось предпосылкой использования в распределенных ИИС нейросетевых вычислительных методов обработки томографических данных, что предполагает наиболее радикальное решение обозначенных проблем [3, 38–44]. В работах [38, 45] показано, что из-за удобного интерфейса согласования с РВОИС и возможности полностью оптоэлектронной реализации в распределенных ИИС целесообразно использовать многослойные нейронные сети (НС) типа персептрон.

Для томографической реконструкции распределения ФП на основании массива данных, получаемых от РВОИС, персептрон должен выполнять следующее функциональное преобразование:

$$\mathbf{Y} = F(\mathbf{X}), \quad (4.1)$$

где $F(\dots)$ — функционал обратного преобразования Радона; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ — вектор входных данных нейронной сети, составленный из значений сигналов на выходе каждой из ВОИЛ в РВОИС; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)$ — вектор выходных данных, составленный из массива реконструированных значений параметров ФП.

Функционал $F(\dots)$ в (4.1) определяется матрицами коэффициентов связи между нейронами входного, выходного и внутренних слоев НС [45, 46]. Например,

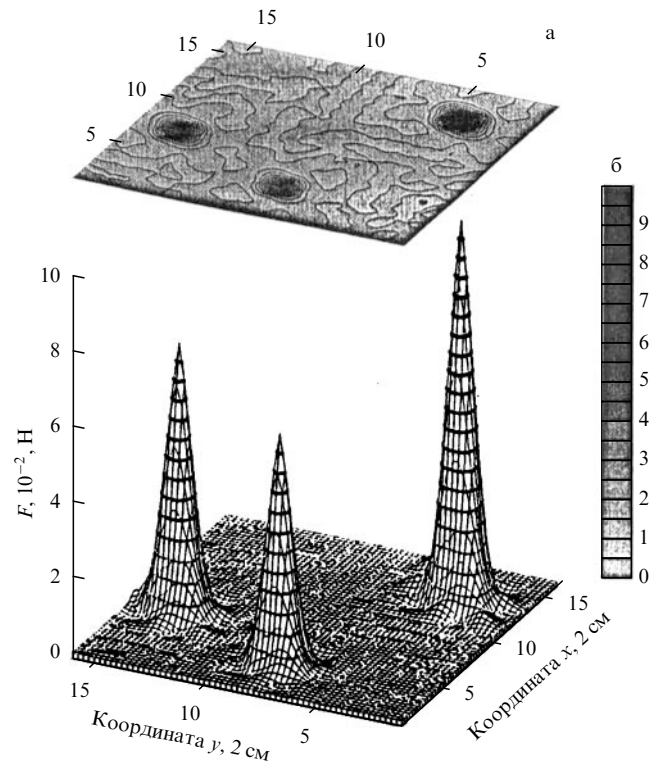


Рис. 3. Экспериментально восстановленное пространственное распределение гравитационного воздействия на РВОИС, полученное с использованием оптоэлектронной НС: (а) контурная схема изоурвней поля сила тяжести, (б) пространственное распределение силы тяжести.

для трехслойной НС компоненты выходного вектора определяются как

$$y_i = \sum_j \omega_{ij} s_j = \sum_j \omega_{ij} f\left(\sum_l w_{jl} x_l\right), \quad (4.2)$$

где ω_{ij} и w_{jl} — соответствующие коэффициенты матриц связи между слоями НС, $i = (1, \dots, N)$, $j = (1, \dots, M)$; N — число ВОИЛ в РВОИС (входных нейронов), M — количество точек (выходных нейронов) восстановления значений ФП; l — число нейронов в промежуточном слое, количество которых зависит от заданного качества восстановления значений ФП; $f(\dots)$ — передаточная функция.

Точность восстановления распределения ФП определяется качеством обучения НС, т.е. подбором значений элементов матриц связей и вида передаточных функций [46]. Для обучения используется обучающая страница, состоящая из пар входных и выходных векторов $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}')^\mu$, где μ — номер пары. В процессе обучения стремятся достичь минимума квадратичной ошибки рассогласования между требуемыми и реконструированными распределениями ФП, представленными в обучающей странице [38–44].

Полученные в [42] результаты показали, что применение НС позволяет расширить возможности распределенных ИИС за счет использования всей передаточной характеристики ВОИЛ, а не только ее линейного участка. Это достигается в результате оптимального сочетания методов сопряженных градиентов, градиентного спуска и термического отжига при обучении персептрона [42–44] и использования передаточной функции вида $f(\dots) = \tanh(\dots)$.

Развитые представления о структуре и методах обучения НС были реализованы в [41, 43] при создании оптоэлектронной НС с голографической матрицей связи, позволяющей в реальном времени восстановить распределение ФП в ИИС с точностью от 6 до 20 %, действие которой проиллюстрировано на рис. 3.

5. Заключение

Целью настоящей работы явилось изложение результатов, приведших к прогрессу в развитии нового направления в физическом приборостроении, появившегося на стыке таких современных отраслей знаний, как лазерная физика, оптоэлектроника и искусственный интеллект. Возникновение этого направления связано со стремительным внедрением в практику процессов и объектов, контроль и управление которыми должны осуществляться в реальном времени. Эти задачи выдвигают на передний план требования по созданию высокоточных, надежных и быстродействующих измерительных устройств, которые обладали бы способностями адаптации к конкретным условиям их эксплуатации, обучения и решения задачи при недостаточности полученных данных, а также распознавания образов и прогнозирования ситуации. Поэтому в будущем проблемы разработки физических принципов и технологий создания адаптивных оптоэлектронных ИИС должны стать центральными в их практическом применении.

Список литературы

1. Kersey A D *Opt. Fiber Technol.* **2** 291 (1996)
2. Бутусов М М и др. *Волоконная оптика и приборостроение* (Под ред. М М Бутусова) (Л.: Машиностроение, 1987)
3. Кульчин Ю Н *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М.: Физматлит, 2001)
4. Пинчевский А Д *Измерительная техника* (8) 3 (1991)
5. Иванов В Н, Кавалеров Г И *Измерительная техника* (10) 8 (1991)
6. Малеханов А И *Изв. вузов. Радиофизика* **31** 1388 (1988)
7. Кульчин Ю Н и др. *Квант. электрон.* **20** 513 (1993)
8. Кульчин Ю Н, Витрик О Б *Измерительная техника* (3) 24 (1999)
9. Кульчин Ю Н и др. *Измерительная техника* (3) 32 (1995)
10. Vitrik O B et al., in *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensor IV* (Proc. SPIE, Vol. 2294, Eds A D Kersey, J P Dakin) (San Diego: SPIE, 1994) p. 165
11. Котов О И и др. *Письма в ЖТФ* **16** (2) 90 (1990)
12. Гиневский С П и др. *Квант. электрон.* **22** 1013 (1995)
13. Кульчин Ю Н и др. *Квант. электрон.* **22** 1009 (1995)
14. Кульчин Ю Н и др. *Квант. электрон.* **24** 467 (1997)
15. Kulchin Yu N et al. *Fiber Integrated Opt.* **17** 75 (1998)
16. Кульчин Ю Н и др. *Измерительная техника* (6) 21 (1999)
17. Натгерер Ф *Математические аспекты компьютерной томографии* (М.: Мир, 1990)
18. Тихонов А Н, Арсенин В Я *Методы решения некорректных задач* (М.: Наука, 1979)
19. Быковский Ю А и др. *Квант. электрон.* **17** 1080 (1990)
20. Кульчин Ю Н, Обух В Ф *Квант. электрон.* **13** 650 (1986)
21. Быковский Ю А, Витрик О Б, Кульчин Ю Н *Квант. электрон.* **17** 1377 (1990)
22. Быковский Ю А и др. *Квант. электрон.* **17** 95 (1990)
23. Kamshilin A A, Jaaskelainen T, Kulchin Yu N *Appl. Phys. Lett.* **73** 705 (1998)
24. Kulchin Yu N et al., in *Distributed Fiber Optical Sensors and Measuring Networks* (Proc. SPIE, Vol. 4357, Ed. Yu N Kulchin) (Bellingham, Wash.: SPIE, 2001) p. 130
25. Kulchin Yu N, Romashko R V, Kamenev O T, in *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics* (Proc. SPIE, Vol. 5129, Eds Yu N Kulchin, O B Vitrik) (Bellingham, Wash.: SPIE, 2003) p. 168
26. Kamshilin A A et al. *Appl. Phys. B: Laser Opt.* **68** 1031 (1999)
27. Бородин М В и др. *Изв. вузов. Физика* **44** (10) 38 (2001)

28. Feinberg J J. *Opt. Soc. Am.* **72** 46 (1982)
29. Воронов В В и др. *Квант. электрон.* **7** 2313 (1980)
30. Xie P et al. *J. Appl. Phys.* **74** 813 (1993)
31. Kamshilin A A et al. *Opt. Lett.* **24** 832 (1999)
32. Kamshilin A A et al. *Appl. Phys. Lett.* **74** 2575 (1999)
33. Cronin-Golomb M, Yariv A J. *Appl. Phys.* **57** 4906 (1985)
34. Arizmendi L, Cabrera J M, Agullo-Lopez F *Int. J. Optoelectron.* **7** 149 (1992)
35. Kobozev O et al. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **3** L9 (2001)
36. Кульчин Ю Н и др. *Письма в ЖТФ* **26** (12) 23 (2000)
37. Kulchin Yu N et al. *Opt. Eng.* **36** 1494 (1997)
38. Кульчин Ю Н, Каменев О Т, в сб. *Кибернетика и вуз* Вып. 28 (Томск: ТПУ, 1994) с. 3
39. Kulchin Yu N et al. *Opt. Memory Neural Networks* **6** 149 (1997)
40. Kulchin Yu N, Kamenev O T *Laser Biology* **4** 625 (1995)
41. Кульчин Ю Н, Денисов И В, Каменев О Т *Письма в ЖТФ* **25** (6) 65 (1999)
42. Kulchin Yu N, Panov A V *Pacific Sci. Rev.* **3** 1 (2001)
43. Kulchin Yu N et al., in *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics* (Proc. SPIE, Vol. 5129, Eds Yu N Kulchin, O B Vitrik) (Bellingham, Wash.: SPIE, 2003) p. 162
44. Kulchin Yu N et al., in *Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics* (Proc. SPIE, Vol. 5129, Eds Yu N Kulchin, O B Vitrik) (Bellingham, Wash.: SPIE, 2003) p. 176
45. Mikaelian A L et al. *Opt. Memory Neural Networks* **1** 7 (1992)
46. Уосерман Ф *Нейрокомпьютерная техника* (М.: Мир, 1992)

PACS numbers: 42.62.-b, 87.56.By, 87.59.Dj

Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения для медицинских применений

Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов, М.В. Горбунков, А.Г. Турьянский, Р.М. Фещенко, Ю.В. Шабалин

1. Введение

В настоящее время большое количество диагностических процедур и вмешательств в кардиологии, нейрохирургии и др. проводится под контролем рентгеновского излучения. При этом единственным источником излучения, используемым в практической медицине (не говоря о радиоизотопной диагностике), остаются рентгеновские трубки. Они обладают полихроматическим спектром (рис. 1). Известно, что использование монохроматиче-

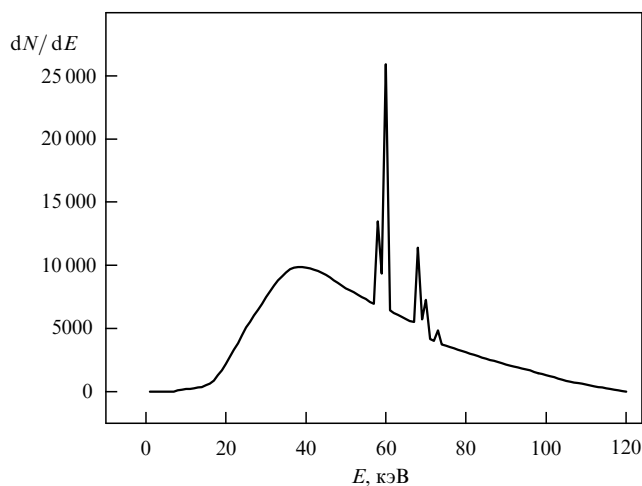


Рис. 1. Спектр медицинской рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом при напряжении 120 кВ по табличным данным [17].