

УДК 681.326

Д.Ю. Музалевский, С.И. Саитов

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГОЛОГРАФИИ И ФУРЬЕ-ОПТИКИ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ТРАКТОВ

*Предлагается новый подход к решению задачи повышения оперативности и методической достоверности непрерывного контроля линейных трактов волоконно-оптических систем передачи основанный на использовании перспективных методов голографии и Фурье-оптики.*

**Ключевые слова:** информационно-измерительная методология, непрерывный контроль, контролируемые параметры, информационно-измерительная система, ассоциативная голографическая память, волоконно-оптический линейный тракт, объект контроля

### Введение

Многочисленные исследования в Фурье-оптике, голографии и смежных с ними предметных областях показали широчайшие возможности средств обработки оптической информации. Однако непосредственное применение имеющихся достижений в телекоммуникациях невозможно без представления задач эксплуатации и непрерывного контроля линейных трактов (ЛТ) волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) в новом вычислительном базисе. Для этого, например, необходимо обосновать комплекс первичных контролируемых параметров, с достаточной достоверностью описывающих состояние ЛТ, увязать значения этих характеристик с системными свойствами ВОСП (достоверностью передачи информации, пропускной способностью и пр.).

**Исследование основных направлений совершенствования систем контроля состояния элементов линейного тракта ВОСП.** По мнению большинства специалистов [1, 2], наиболее перспективным средством повышения показателей качества контроля ВОСП является разработка и применение специализированных средств оптической обработки информации, использующих современные достижения интегральной и нелинейной оптики, голографии, фотоники и нейрокompьютинга. Очевидно, что для использования средств оптической обработки информации необходима разработка научно-методического аппарата, позволяющего учитывать, с одной стороны, особенности ВОСП с мультиплексированием по длине волны (МДВ) и волоконно-оптическими усилителями (ВОУ) как объекта контроля, а, с другой -

использовать определяющие параметры, обработка которых возможна перечисленными выше методами. В качестве научно-практической базы для создания такого аппарата можно использовать современное развитие общей теории измерений – информационно-измерительную методологию.

**Идея разрабатываемого подхода к организации непрерывного контроля состояния функционирующих ВОЛТ.** Проведенные авторами исследования показали, что в качестве контролируемых параметров целесообразно использовать интенсивность оптического излучения, попадающего за один тактовый интервал на вход фотоприемного устройства (ФПУ).

Часть оптического излучения посредством 1 или 5% ответвителя может быть доставлена в систему контроля (рисунок 1), где реализуется его параллельная и одновременная для всех спектральных каналов интеллектуальная обработка.

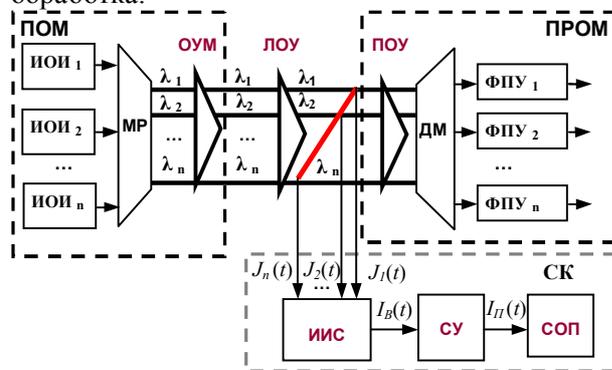


Рисунок 1 - Организация непрерывного контроля с применением ИИС

Система контроля представляет собой информационно-измерительную систему (ИИС),

разработанную на основе методологии интеллектуального анализа данных и реализованную средствами нелинейной и интегральной оптики. Обучение ИИС производится при инсталляционных измерениях и испытаниях ВОСП в различных режимах ее функционирования. Так, например, для реализации НСД к функционирующему оптическому линейному тракту необходимо изогнуть оптическое волокно. В этом случае интенсивность оптического излучения, ответвленного в подсистему контроля, падает с определенной скоростью. Предварительно обученная система выдает сигнал "Тревоги" за время порядка 1,25 сек. Это позволяет оперативно оповестить группу реагирования, а информационный тракт переключить на резервный тракт (для СЦИ время переключения составит промежуток времени не больший 50 мс). На аналогичных принципах ИИС может идентифицировать увлажнение, рост микротрещины, радиационное замутнение ОВ и прочие дестабилизирующие факторы.

В разрабатываемой авторами ИИС применяется ассоциативная голографическая память. Этап записи информации в ассоциативную память соответствует процессу обучения, контекстом которого является, например, совокупность актуальных значений управляемых параметров объекта контроля или характеристики [3, 4].

Обученная ИИС в ходе контроля работоспособности может наблюдать вектор текущих параметров ВОСП, являющийся фрагментом вектора данных, запомненного ею в ходе обучения. Тогда задача ИИС будет состоять в восстановлении известного вектора данных по ключу – его фрагменту. В случае если измеренная в ходе контроля работоспособности совокупность параметров не совпадает ни с одной из известных ИИС, то реализуется поиск вектора, ближайшего к наблюдаемому в выбранной метрике.

Формально процессы преобразования оптического сигнала в ИИС можно записать в виде:

$$S(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y) = S_1(f_x, f_y) \quad (1)$$

где функция  $H(f_x, f_y)$  – Фурье-образ изопланарной переходной функции, иначе *передаточная функция* системы, а  $S(f_x, f_y)$  и  $S_1(f_x, f_y)$  – Фурье-образы входного и выходного сигналов соответственно, или, другими словами, многомерные функции простран-

ственных частот  $f_x$  и  $f_y$  соответственно.

Из приведенного соотношения видно, что спектр пространственных частот выходного сигнала равен произведению спектра частот входного сигнала и передаточной функции. Выражение (1) играет фундаментальную роль в теории систем записи и обработки оптической информации. Имея представление о характере передаточной функции, появляется возможность, опираясь на принципы голографии пространственных сигналов, реализовать запись, восстановление, обращение во времени и опознавание световых импульсов. Преимущество метода голографии в данном случае заключается в том, что он позволяет записывать как амплитуду, так и фазу световых колебаний в плоскости наблюдения. В основе голографической записи лежит идея [3, 5], согласно которой для выявления фазовой информации надо создать интерференцию исследуемой (объектной) волны с некоторой вспомогательной (опорной) волной. Поле опорной волны может быть представлено распределением

$$S_a = S_a^0(M) \exp[i\varphi_a(M)] \quad (2)$$

а поле объектной волны распределением

$$S_b = S_b^0(M) \exp[i\varphi_b(M)] \quad (3)$$

где  $S_a^0$ ,  $S_b^0$  и  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$  – соответственно амплитуды и фазы колебаний. В плоскости голограммы ( $M$ ) происходит интерференция указанных световых полей. При этом результирующая световая интенсивность будет иметь вид:

$$I(M) = |S_a(M) + S_b(M)|^2 = (S_a^0)^2 + (S_b^0)^2 + S_a^0 \cdot S_b^0 \exp[i(\varphi_a - \varphi_b)] + S_a^0 \cdot S_b^0 \exp[i(\varphi_b - \varphi_a)] \quad (4)$$

В процессе записи (обучения) эта результирующая интенсивность записывается на голограмме. Модуляционная характеристика голограммы  $T(M)$  в этом случае

$$T(M) \sim I(M) \quad (5)$$

Как правило, в качестве восстанавливающего поля используется поле, совпадающее с полем опорной волны  $S_a$ . В этом случае в

световом поле на выходе голограммы должна присутствовать составляющая с фазовым множителем  $\exp[i\varphi_b(M)]$ , который имеется в составе последнего слагаемого в выражении (4). Эта составляющая воспроизводит объектную световую волну. Таким образом, видно, что для восстановления волнового фронта объектной волны, нужно на этапе восстановления освещать голограмму световой волной, повторяющей опорную волну, на этапе записи голограммы.

Если в процессе записи полезный оптический сигнал  $S_a$  использовать в качестве опорной волны, а в качестве объектной оптический когерентный сигнал (маску), то такая голограмма может быть использована для распознавания сигнала  $S_a$ . Данный случай представляет наибольший интерес, так как позволяет выделить, в процессе оптической обработки из смеси полезных оптических сигналов и сопутствующих им оптических шумов, необходимую информацию о состоянии оптического линейного тракта. Для селекции сигнала, содержащего информацию о состоянии оптического линейного тракта, может быть использовано пороговое нелинейное оптическое устройство, ВРМБ – селектор, в англоязычной терминологии SBS (нелинейное оптическое устройство, работа которого основана на вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна), в котором осуществляется обращение фронта волны, поступающей с выхода голограммы. Исследования [6] показали, что имеется возможность реализации голографической ассоциативной памяти с использованием только оптических элементов.

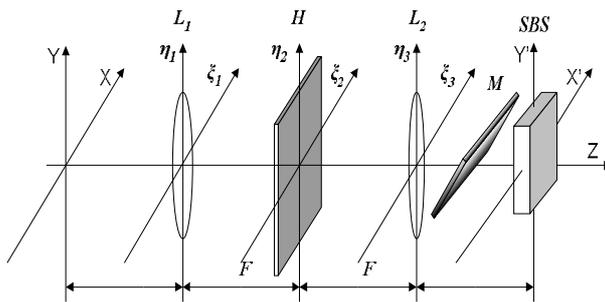


Рисунок 2 - Схема двойного Фурье – преобразования и ее использование для реализации ассоциативной памяти.

Другим вариантом реализации ассоциативной памяти [7, 8] может быть схема, состоящая из двух линз (рисунок 2), расположенных таким образом, что предметная плоскость  $(X, Y)$  совпадает с передней фокальной плоскостью линзы  $L_1$ , а задняя фокальная

плоскость линзы  $L_1$  совпадает с передней фокальной плоскостью линзы  $L_2$ . Плоскость изображений  $(X', Y')$  совместим с задней фокальной плоскостью линзы  $L_2$ .

Для удобства и наглядности на рис.2 показан вариант, когда линзы имеют одинаковые фокусные расстояния  $F$ , однако на практике возможно применение линз с различными оптическими свойствами.

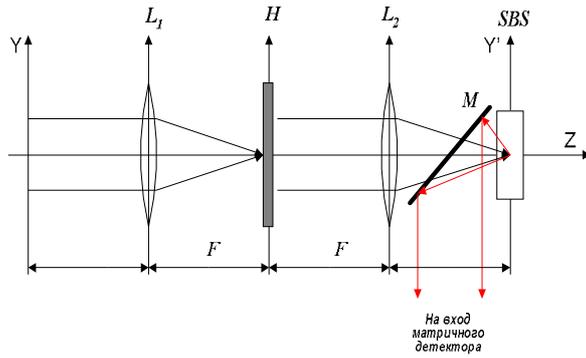
Так же обозначены и выделены плоскость  $(\xi_1, \eta_1)$ , которая является плоскостью линзы  $L_1$ , плоскость  $(\xi_2, \eta_2)$  являющуюся спектральной плоскостью (плоскостью в которой расположена голограмма  $H$ ), и плоскость  $(\xi_3, \eta_3)$  - плоскостью линзы  $L_2$ . Рассматриваемая оптическая система, известная в литературе [7, 8, 9] как система  $4-F$ , осуществляет два последовательных преобразования Фурье. Сначала входной сигнал подвергается Фурье-преобразованию линзой  $L_1$ . Световое поле в плоскости  $(\xi_2, \eta_2)$  распределено в соответствии со спектром сигнала  $S(f_x, f_y)$

$$\psi_\xi(\xi_2, \eta_2) = \frac{1}{\lambda F} \iint_{-\infty}^{\infty} \psi(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy = \frac{1}{\lambda F} S(f_x, f_y), \quad (6)$$

где  $\xi_2 = \lambda F f_x$ , а  $\eta_2 = \lambda F f_y$ . Сигнал  $\psi_\xi(\xi_2, \eta_2)$ , пропорциональный спектру  $S(f_x, f_y)$ , подвергается аналогичному преобразованию Фурье при прохождении через линзу  $L_2$ . Тем самым в плоскости изображений распределение поля будет иметь вид

$$\psi'(x', y') = \frac{1}{\lambda^2 F^2} \iint_{-\infty}^{\infty} S(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x x' + f_y y')] d\xi_2 d\eta_2 = \iint_{-\infty}^{\infty} S(f_x, f_y) \exp[-i2\pi(f_x x' + f_y y')] df_x df_y = \psi(-x', -y'). \quad (7)$$

Таким образом, видно, что система  $4-F$  восстанавливает в плоскости изображений входной сигнал в перевернутом виде. Если во входной волне содержится сигнал (рисунок 3), несущий информацию о каких-либо изменениях оптической мощности группового оптического сигнала то присутствие в системе согласованного фильтра приводит к появлению в выходной плоскости сигнала, который отражает эти изменения. В качестве такого фильтра может применяться ВРМБ – селектор. В излучении, пошедшем голограмму, содержатся две компоненты: сигнальная и опорная.



**Рисунок 3 - Реализация в схеме двойного Фурье преобразования обращения волнового фронта и выделение опорного сигнала**

Опорная световая компонента, в свою очередь, является «квазидетерминированной». После обращения волнового фронта происходит передача световой волны посредством полупрозрачного зеркала на массив матричного детектора. Фиксируя появление этого сигнала, можно регистрировать наличие на входе системы распознаваемого сигнала. Другими словами, в процессе записи (обучения) голограммы необходимо моделировать различные нештатные ситуации, приводящие к ухудшению качества обслуживания абонентов, таких как повреждение, сгиб волоконно-оптического кабеля (ВОК) с целью НСД, намокание ВОК и т.д.

#### **Выводы.**

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в ВОСП с МДВ и ВОУ целесообразно реализовать непрерывный контроль посредством ответвления части оптического излучения в ИИС [1, 6]. В условиях применения оптических средств обработки информации и отсутствия шумов фотодетектирования контроль по интенсивности излучения при адекватности получаемых результатов может быть реализован более наглядно и оперативно.

Использование принципов голографии пространственных сигналов и динамической голографии позволит реализовать запись, восстановление, обращение во времени и распознавание световых импульсов, предоставит возможность осуществлять сверхбыстрые преобразования временных и пространственных оптических сигналов.

Реализация предлагаемых научно-технических решений позволит автоматизировать непрерывный контроль линейных трактов ВОСП любого состава, что существенно повысит их защищенность.

#### **Библиографический список**

1. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания Сайрус Системс, 1999. – 671 с.
2. Заркевич Е.А., Скляр О.К., Устинов С.А. Тестирование и мониторинг параметров в сетях WDM. Непрерывный контроль и измерение системных параметров в сетях WDM // Технологии и средства связи. № 2. 2002; № 3. 2002.
3. Дьяков В.А., Тарасов Л.В. Оптическое когерентное излучение. – М.: Советское Радио, 1974. – 169 с.
4. Романов В.Н., Соболев В.С., Цветков Э.И. Интеллектуальные средства измерений. – М.: РИЦ "Татьянин день", 1994. – 280 с.
5. Т.Кохонен. Ассоциативные запоминающие устройства. – М.: Мир, 1982. – 384 с.
6. Матвеев А.З., Пасманик Г.А. Реализация ассоциативной памяти с помощью нелинейного селективного зеркала // Квантовая электроника. 20 № 5. 1993.
7. Парыгин В.Н., Балакиев В.И. Оптическая обработка информации. – М.: Изд. МГУ, 1987. – 141 с.
8. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
9. Короленко П.В. Оптика когерентного излучения. – М.: Издательство МГУ, 1997. – 142 с.