

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
ПРЕФЕКТУРА ЮЖНОГО АДМИНИСТРАТИВНОГО ОКРУГА г. МОСКВЫ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

## НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ-2008

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Секция ФОТОНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ ОПТИКА**

Руководители секции:  
ЕВТИХИЕВ Н.Н., д.ф.-м.н., профессор,  
МАНЬКИН Э.А., д.ф.-м.н., профессор

Москва, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

СЮЙ А.В. Запись изображения некогерентным широкополосным излучением в кристаллах ниобата лития.....	5
КРИШТОП В.В. Управление спектральным составом излучения.....	7
ВЛАСОВ Н.Г., КУЛИШ С.М. Нелинейная обработка интерферограмм (теория).....	8
ВЛАСОВ Н.Г., КУЛИШ С.М. Нелинейная обработка интерферограмм (эксперимент).....	10
ВОЛЬФ И.Э., МАЛОВ А.Н., СЫЧЕВСКИЙ А.В. Диагностика подповерхностных дефектов прозрачных и полупрозрачных изделий.....	12
КУЛЬЧИН Ю.Н., ВИТРИК О.Б., ЛАНЦОВ А.Д. Исследование 1-D полей деформации с применением томографической волоконно-оптической измерительной системы.....	14
РОМАШКО Р.В., КУЛЬЧИН Ю.Н., ДИ GIРОЛАМО С., КАМШИЛИН А.А. Порог детектирования в адаптивном интерферометре на основе многомодового световода.....	16
КОМОЦКИЙ В.А., СОКОЛОВ Ю.М. Исследование оптоэлектронного датчика угловых смещений и колебаний.....	18
ЧЕХЛОВА Т.К., ДАВЫДОВ А.А., ТИМАКИН А.Г. Оптические волноводы на основе пленок $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ , изготовленных по золь-гель технологии.....	20
ЯЦЕНКО Ю.П., МАВРИЦКИЙ А.О. Измерение нелинейного показателя преломления в волоконных световодах с помощью D-scan метода.....	22
ЗАВЕСТОВСКАЯ И.Н., МЕНЬКОВА Н.А., КРОХИН О.Н. Анализ нелинейных механизмов поглощения света при облучении диэлектриков и широкозонных полупроводников лазерными импульсами фемтосекундной длительности.....	24
ВИТУХНОВСКИЙ А.Г., ИСАЕВ А.А., КОЗЛОВСКИЙ К.Н. Реализация многоэкситонных состояний в квантовых точках при возбуждении последовательностями фемто- и наносекундных импульсов.....	26
БАШКЕЕВ А.А. Динамика перепутывания квантовых состояний двух двухуровневых систем в поле общего термостата.....	28
ОЖЕНКО С.С., ЕЛЮТИН С.О., МАЙМИСТОВ А.И. Когерентные эффекты в тонком слое метаматериала.....	29
СОРОКИНА Е.А., МАЙМИСТОВ А.И. Модуляционная неустойчивость в бозе-эйнштейновском конденсате в оптической сверхрешетке.....	31

ВАЙЧАС А.А., МАЛОВ А.Н., ШЕВЧЕНКО Е.В., НЕУПОКОЕВА А.В. Распространение лазерного излучения в жидкой фоточувствительной пленке.....	33
ЕСЕПКИНА Н.А., ИВАНОВ С.И., ЛАВРОВ А.П., МОЛОДЯКОВ С.А. Калибровка частотной шкалы акустооптических спектрометров радиосигналов.....	35
КОННИК М.В., МАНЬКИН Э.А., СТАРИКОВ С.Н. Увеличение линейного динамического диапазона коммерческих цифровых фотокамер для отображающих оптико-цифровых систем.....	37
БОРОДИН А.Н., МАЛОВ А.Н., МАРКИН В.А. Улучшение изображения, формируемого при яркой внешней засветке.....	39
ГРИЧУК Е.С., КУЗЬМИНА М.Г., МАНЬКИН Э.А. Селективная сегментация изображений осцилляторно-сетевым методом.....	41
КАЙТУКОВ Ч.Б. Расчет данных для электронного литографа при имитации голографического фазового рельефа оптической голограммы.....	43
КУЗНЕЦОВ А.С., ОДИНОКОВ С.Б. Оптико-электронное устройство для регистрации магнитных сигналограмм с носителей видеозаписи.....	44
БЫКОВСКИЙ А.Ю., ЕГОРОВ А.А. Защищенное кодирование нечетко-логической модели объектов сцены, формируемой в памяти агента по последовательности кадров.....	46
АЛЕКСЕЕВ А.М., ПАВЛОВ А.В. О возможности реализации немонотонных рассуждений методом фурье-голографии: логика с исключением.....	48
РОМАШКО Р.В., КУЛЬЧИН Ю.Н., КАМШИЛИН А.А. Мультиплексирование динамических отражательных голограмм в кубическом фоторефрактивном кристалле.....	50
НЕУПОКОЕВА А.В., МАЛОВ А.Н., БОРОДИН А.Н. Запись голограмм излучением твердотельного лазера с диодной накачкой.....	52
ОДИНОКОВ С.Б., ПАВЛОВ А.Ю. Анализ схем устройств для получения голограмм с защитными элементами и их идентификации в оптико-электронном векторно-матричном процессоре.....	54
ОДИНОКОВ С.Б., ЦЫГАНОВ И.К., БОВСУНОВСКИЙ И.В. Оптическая система для получения ГОЭ-ДОЭ с использованием жидкокристаллического пространственного модулятора света.....	55
ОДИНОКОВ С.Б., КОВАЛЕВ М.С., ЛУШНИКОВ Д.С., МАРКИН В.В. Исследование влияния температурных изменений на положения знака в голографическом коллиматорном прицеле.....	57

ЕВТИХИЕВ Н.Н., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., СИРОТКИН С.А., СТАРИКОВ Р.С.,  
СТАРИКОВ С.Н.

Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: реализация в виде бинарных амплитудных голограмм для схемы дифракционного коррелятора изображений.....58

ЕВТИХИЕВ Н.Н., ВОЛОДАРСКИЙ А.И., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., СТАРИКОВ Р.С.

Исследование методов бинаризации амплитудных голографических инвариантных корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом.....60

КОННИК М.В., РОДИН В.Г., СТАРИКОВ С.Н., ТЕТЕРЕВСКИЙ Е.Э.

Коррелятор эмиссионных спектров с синтезированной голограммой.....61

А.В. СЮЙ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

## ЗАПИСЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ НЕКОГЕРЕНТНЫМ ШИРОКОПОЛОСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Приведены экспериментальные результаты записи изображения некогерентным широкополосным излучением в кристаллах ниобата лития. Выявлены механизмы и оптимальные условия для записи некогерентного изображения в кристаллах ниобата лития.

В кристаллах ниобата лития ярко проявляется фоторефрактивный эффект (ФРЭ), который лежит в основе многих интересных и практически значимых научно-технических направлений [1, 2]. В последние годы значительно возрос интерес к разработке оптических систем записи, хранения и обработки информации на основе фотосегнетоэлектриков, к которым относится кристалл ниобата лития [2]. До настоящего времени, исследования в области оптической записи изображений в подавляющем большинстве работ проводились и проводятся с использованием когерентного излучения, источником которого служит лазер. Возможность использования некогерентного широкополосного излучения для получения качественной оптической записи, хотя и не отрицается [2], но практически совершенно не изучена. В настоящее время известно несколько способов записи информации в кристаллах ниобата лития [3-8]. В фоторефрактивных кристаллах возможна как запись изображений, так и запись голограмм для которых используется либо некогерентный широкополосный свет, либо лазерное излучение соответственно [2]. Под действием света в фотосегнетоэлектрике возникает ток [10]:

$$j = \chi\beta I + D \nabla I + \sigma E. \quad (1)$$

Он состоит из токов фотовольтаического ( $\chi\beta I$ ), диффузионного ( $D \nabla I$ ) и тока проводимости ( $\sigma E$ ). Здесь  $\chi$ ,  $\beta$ ,  $D$  – соответственно коэффициенты поглощения света, фотовольтаический и диффузии;  $\sigma$  – проводимость;  $E$  – напряженность электрического поля (фотонаведенная или приложенная к кристаллу).  $I(r)$  – распределение интенсивности света. Ток  $j$  производит пространственное перераспределение зарядов, согласованное с распределением  $I(r)$ , в результате чего возникает в кристалле

электрическое поле  $E(r)$  пропорциональное  $I(r)$ . Наведенное поле  $E(r)$  изменяет показатель преломления вследствие электрооптического эффекта  $\Delta n_{ij} = r_{ijk} E_k$ .

Нами получена оптическая запись в кристаллических пластинках ниобата лития X(Y) – среза толщиной 1-2 мм (полярная ось кристалла лежит в плоскости пластинки) от некогерентного широкополосного излучения (лампа накаливания ПЖ-1000). Излучение фокусировалось на переднюю грань кристалла в виде спирали нити накаливания, полосы, букв, геометрических фигур. Плоскость поляризации падающего излучения ориентировалась относительно полярной оси кристалла под различными углами  $0^\circ$ - $90^\circ$ . При повышении температуры время записи увеличивается, а хранения уменьшается. Наилучшая запись производится при ориентации световой полосы перпендикулярно, а плоскости поляризации излучения параллельно полярной оси кристалла, что свидетельствует в пользу фотовольтаического механизма переноса заряда. Наиболее быстрая запись происходит в кристаллах ниобата лития с примесью железа, а самое длительное время хранения с примесью родия.

В результате проведенных экспериментов выявлено, что основным механизмом записи является фотовольтаический, но и диффузионный механизм также присутствует (согласно формуле 1).

*Список литературы*

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике, СПб.: Наука, 1992, 320с.
2. Кузьминов Ю.С. Электрооптический и нелинейнооптический кристалл ниобата лития, М.: Наука, 1987, 264с.
3. Трушин В.Н., Жолудев А.А., Фадеев М.А., Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф. Формирование рентгеновских изображений воздействием оптического изображения на дифрагирующий кристалл ниобата лития – Журнал технической физики, т.67, № 9, 1997, с.76-79.
4. Фрегатов С.О., Шерман А.Б. Локальное формирование заряда в  $\text{LiNbO}_3$  с помощью подвижного иглообразного электрода - Физика твердого тела, т.41, №3, 1999, с.510-513.
5. Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И. Инверсные домены в ниобате лития – Письма в журнал технической физики, т.22, 1997, с.34-38.
6. Педько Б.Б., Кислова И.Л., Волк Т.Р., Лебедев Э.В. Эффект термооптической записи в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  – Кристаллография, т.44, №1, 1999, с.143-148.
7. Голенищев-Кутузов А.В., Калимуллин Р.И. Фотоиндуцированные домены в ниобате лития – Физика твердого тела, т.40, № 3, 1998, с.531-533.
8. Сюй А.В., Строганов В.И., Лихтин В.В. Градиентная запись изображения в кристаллах ниобата лития – Оптический журнал, т.74, № 6, 2007, с.17-19.
9. Стурман Б.И., Фридкин В.М. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления, М.: Наука, 1992, 208с.
10. Amodei J.J. Electron diffusion effect during holographic recording in insulators – Appl. Phys. Lett., v.18, 1971, p.22-25.

В.В. КРИШТОП

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **УПРАВЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Показано, что положением в спектре преобразованного излучения можно управлять в широких пределах. Использование различных типов нелинейнооптического взаимодействия, угла между пучком излучения и оптической осью и приложение внешнего электрического поля позволяют изменять положение максимума в диапазоне от сотен до единиц нанометров.

Особое место в современной технике обработки оптической информации занимают системы преобразования излучения по частоте. Японскими учеными предложен перестраиваемый фильтр на базе одномодовой волоконной решетки, изготовленной из анизотропного кристалла CF<sub>4</sub> методом плазменного травления. Показано, что длина волны отраженного света смещается линейно с углом искривления согнутого волокна (сдвиг до 3,5 нм при исходной длине волны 1550 нм). Для определенных приложений (визуализация инфракрасных объектов) требуется перенос спектра излучения в значительно более широких диапазонах. В этом случае перспективными являются методы нелинейной оптики.

В работе рассмотрены способы изменения положения максимума в спектральной плотности за счет изменения угла между осью пучка и оптической осью кристалла, за счет изменения угловой апертуры пучка, за счет изменения состояния поляризации падающего излучения, за счет наложения внешнего электрического поля. Показано, что каждый из методов обеспечивает перенос максимума в различном диапазоне длин волн.

Изменение угла может обеспечить изменение положения максимума в диапазоне порядка 100 нм (от 430 до 550 нм) при использовании излучения вольфрамовой нити в качестве источника инфракрасного излучения. Изменение угловой апертуры и поляризации пучка позволяет изменить положение максимума на 10-40 нм.

Наложение внешнего электрического поля позволяет управлять положением максимума в диапазоне нескольких нм.

Сочетание этих методов позволяет обеспечить грубую и более точную подстройку спектра преобразованного излучения, что может быть использовано в различных технических приложениях.

Н.Г. ВЛАСОВ, С.М. КУЛИШ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

## НЕЛИНЕЙНАЯ ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ (ТЕОРИЯ)

Описан нелинейный алгоритм цифровой обработки интерферограмм, позволяющий увеличить чувствительность и оценить уровень шумов.

В голографической интерферометрии фазовых объектов хорошо известна нелинейная обработка голограмм с целью повышения чувствительности. Напомним, что под чувствительностью  $S$  понимают отношение изменения сигнала  $\Delta f(x)$  на выходе измерительной системы к изменению  $\Delta x$  входного сигнала. В интерферометрии  $f(x) = N$ ,  $x = l$ , где  $N$  – число интерференционных полос,  $l$  – оптический путь. Соответственно,

$$S = \frac{\Delta N}{\Delta l} = \frac{1}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – длина волны зондирующего излучения. Обсуждаемый метод основан на том, что в волновом поле, восстановленном в высших порядках дифракции, возникающих при нелинейной обработке, фаза волнового поля равна  $\pm m\varphi(x, y)$ , где  $m$  – порядок дифракции,  $\varphi(x, y)$  – пространственное распределение фазы в первоначальном, анализируемом волновом поле. При наложении сопряженных волновых полей  $m$ -ого порядка чувствительность увеличивается в  $2m$  раз [2].

В настоящее время большинство методов голографической интерферометрии реализовано в оптико-цифровом варианте, согласно которому голограмму регистрируют на ПЗС-матрице, благодаря чему становится возможным ввести в компьютер информацию о пространственном распределении амплитуды и фазы анализируемого волнового поля и после соответствующей обработки получить цифровой аналог интерферограммы. Однако нелинейная регистрация голограммы подразумевает, что регистрирующая среда должна разрешить не только

основную пространственную частоту, но и ее более высокие гармоники, что явно превосходит разрешающую способность ПЗС-матрицы.

В настоящей работе предлагается нелинейный алгоритм фазовых шагов – альтернативного по отношению к голографии метода ввода в компьютер пространственного распределения амплитуды и фазы волнового поля (см., напр., обзор [3]). Введем в компьютер три распределения интенсивности:  $I(x, y)$ ,  $I_1(x, y)$ ,  $I_2(x, y)$ , где  $I(x, y)$  соответствует интерферограмме, полученной при настройке интерферометра на полосу бесконечной ширины,  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$  – интенсивности объектного и опорного волновых полей по отдельности. Для каждой точки (пикселя) плоскости  $(x, y)$  вычислим

$$\cos \varphi(x, y) = \frac{I(x, y) - I_1(x, y) - I_2(x, y)}{2\sqrt{I_1(x, y)}\sqrt{I_2(x, y)}}, \quad (1)$$

где  $I(x, y)$ , как обычно, равно:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)}\sqrt{I_2(x, y)} \cos \varphi(x, y). \quad (2)$$

Возводя выражение (1) в квадрат и умножая на два получим, в соответствии с формулами тригонометрии:

$$2 \cos^2 \varphi(x, y) = 1 + \cos 2\varphi(x, y). \quad (3)$$

Вычитая единицу из выражения (3), возведем полученную разность в квадрат и умножая на два можно получить на дисплее распределение интенсивности, соответствующее  $\cos 4\varphi(x, y)$  и т. д.

*Список литературы*

1. Бекетова А.К., Белозоров А.Ф., Березкин А.Н. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов, Л: Наука, 1979, 232с.
2. Schwider J. Isophotes and enhancement of phase sensitivity through optical filtering of image holography – Материалы III Всесоюзной школы по голографии, Л.: ЛИАФ, 1972, с.247-254.
3. Власов Н.Г. Безлинзовая цифровая микроскопия – Измерительная техника, №10, 2006, с.12-21.

Н.Г. ВЛАСОВ, С.М. КУЛИШ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

## НЕЛИНЕЙНАЯ ОБРАБОТКА ИНТЕРФЕРОГРАММ (ЭКСПЕРИМЕНТ)

Описан эксперимент по нелинейной цифровой обработке интерферограмм, позволяющий увеличить чувствительность и оценить уровень шумов.

В оптико-цифровом эксперименте в компьютер вводилась напечатанная на фотобумаге центральная часть интерферограммы тепловой деформации экрана кинескопа цветного телевизора, остывавшего после штамповки. Эта интерферограмма была получена ещё в 1970 г. [1]. Для данного конкретного эксперимента без существенной потери точности можно пренебречь зависимостью интенсивностей от координат (x,y) в пределах их изменения хотя бы на одном – двух периодах, тогда алгоритм пересчета интенсивности пикселей интерферограммы удобно начать с нахождения величины их минимального значения на этих интервалах. Учитывая, что  $I_1 = I_2 = I_0$ , найдем  $2I_0 = 0,5I_{\max}$ . После этого с помощью компьютерной обработки мы можем построить изображение интерферограммы с распределением интенсивности по закону:

$$I(x, y) = 2I_0(1 + \cos m\varphi), \quad (1)$$

где  $m = 2^n$ , n – число пошаговой обработки, совпадающее с введенной нелинейностью по интенсивности. Ниже на рис. 1 приведено экспериментально полученное изображение (рис. 1, слева вверху), а следующие пять – после компьютерной обработки первого.

Далее интерференционные полосы становятся такими частыми, что их затруднительно передать в маломасштабном полиграфическом изображении. При n=6 изображение практически тонет в шумах.

Моделирование одного из главных типов шумов – аддитивного – можно провести численно, если к идеальной интерферограмме – в данном случае функции  $y = \cos(\varphi)$  добавим случайную функцию (моделирующую шум) и пересчитаем по вышеприведенному алгоритму косинусы более высоких порядков. На рис. 2. приведены графики для случая относительной амплитуды шума в 2%. Для удобного представления мы обрезаем максимальную амплитуду шумов.

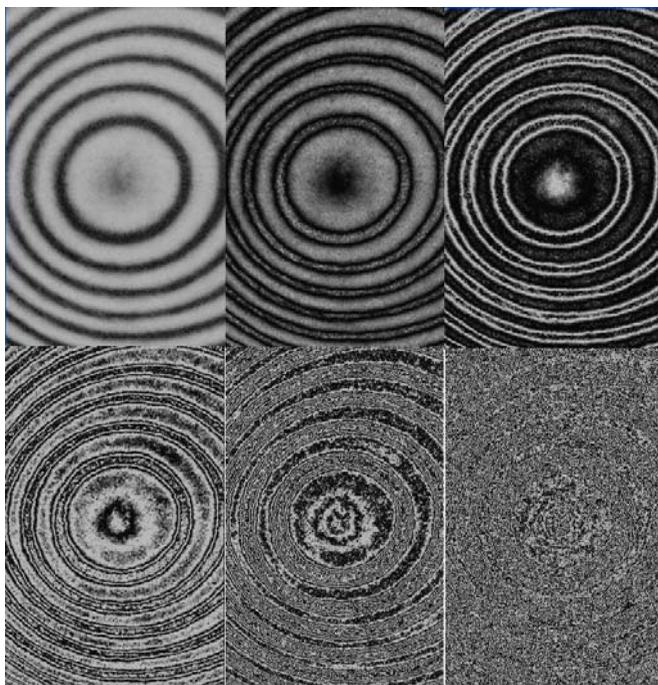


Рис. 1. Первоначальная интерферограмма (слева сверху) и последующие пять – результат нелинейной обработки при соответствующих значениях ( $n=0, m=1$ ), ( $n=1, m=2$ ), ( $n=2, m=4$ ), ( $n=3, m=8$ ), ( $n=4, m=16$ ), ( $n=5, m=32$ ).

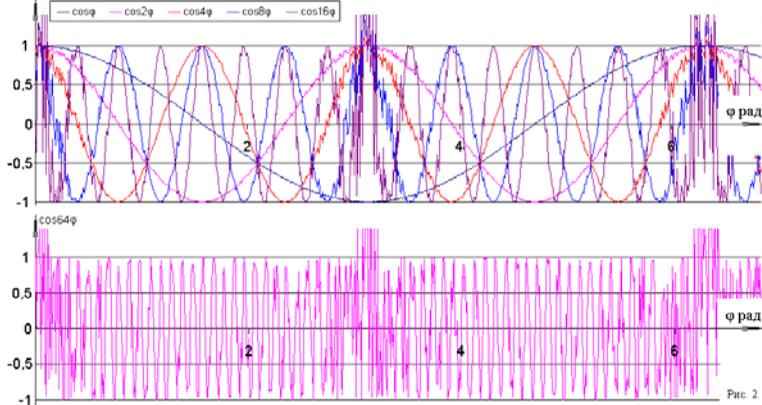


Рис. 2. Графики для случая относительной амплитуды шума в 2%.

В заключение кратко обсудим возможное практическое применение предложенного метода. Помимо уже отмеченного увеличения чувствительности, становится возможным находить уровень шумов на интерферограммах различного типа и по нему определять предельную чувствительность методов, которыми они были получены. Можно также проанализировать архивные интерферограммы каких-либо ответственных экспериментов и пересчитать их результат с учетом увеличенной чувствительности.

*Список литературы*

1. Богомолов А.С., Власов Н.Г., Соловьёв Е.Г. Метод усреднения по времени в голографической интерферометрии непериодически движущихся объектов – Оптика и спектроскопия, v.31, №3, 1971, с.487-482.

**И.Э. ВОЛЬФ, А.Н. МАЛОВ, А.В. СЫЧЕВСКИЙ<sup>1</sup>**

*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище  
(военный институт),*

*<sup>1</sup>Иркутский государственный медицинский университет*

## **ДИАГНОСТИКА ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРОЗРАЧНЫХ И ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Рассмотрен метод компьютерной голографии для определения степени дефектности прозрачных и полупрозрачных объектов.

При дефектоскопии авиационных остеклений (фонари кабин, фотолоуки, иллюминаторы, стекла фар) в настоящее время используются методы визуального контроля, страдающие высокой степенью субъективности. Появление доступных миниатюрных диодных лазеров, ПЗС-камер и ноутбуков позволяет перейти к более объективному методу контроля, основанному на использовании принципов когерентной оптики.

Для контроля прозрачных объектов, имеющих развитую микроструктуру по всему объему образца, применен метод компьютерной голографии. Использовалась Габоровская схема записи [1] с численным восстановлением на базе программного обеспечения Matlab R2006a.

Экспериментально исследовались микродефекты и сколы на фрагменте стекла глубиной 9 мм. Подобный объект удовлетворяет условиям записи и восстановления голограмм Габора [2]. Объект был помещен на расстоянии 210 мм от камеры и освещался параллельным когерентным пучком для записи голограммы в плоскости фотоприемника.

В качестве когерентного источника света использовался компактный полупроводниковый лазер с мощностью излучения 20 мВт на длине волны 650 нм. В эксперименте использовалась цифровая камера с разрешением 6 Мрпх. Записанная цифровая голограмма является действительным массивом данных. Восстановление голографических изображений осуществляется компьютерным моделированием дифракции опорной волны на голограмме. Расчет восстанавливаемых сечений трехмерного изображения основан на использовании дифракционного интеграла для восстановления волнового фронта, как двумерного Фурье-преобразования и перемножения с функцией импульсного отклика системы. Проводилось сравнение полученных при восстановлении сечений объемного изображения с шагом 2 мм (рис. 1).

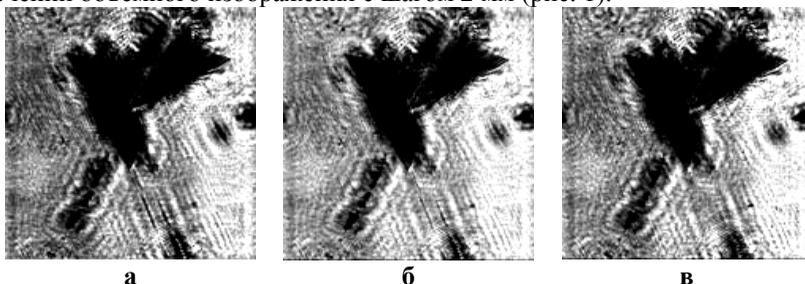


Рис. 1. Результат компьютерного восстановления изображения на расстоянии от ПЗС - камеры: а) 216 мм, б) 218 мм, в) 220 мм

На рис.1 заметна разница изображений восстановленных для различных глубин исследуемого объекта. Полученные данные позволяют получить необходимую количественную информацию о дефектах исследуемого объекта по всей глубине. Для получения более точных данных можно исследовать объект с шагом 0,1 мм. Метод компьютерной голографии позволяет разработать объективные количественные критерии для оценки качества прозрачных объектов и, в частности, исследовать временную динамику формирования в глубине стекла дефектов, приводящих к «серебрению», например, фонаря самолета.

Работа выполнена по проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) 05-08-33639, 06-08-00596 и 06-08-01109.

*Список литературы*

1. Borodin A.N., Ichenko V.V., Malov A.N., Sychevskiy A.V. Computer Holography by means of the Laser Diodes – Proceedings of SPIE, v.6595, 2007, 65951T.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970, 364с.

Ю.Н. КУЛЬЧИН, О.Б. ВИТРИК, А.Д. ЛАНЦОВ

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ 1-D ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Исследованы возможности создания одномерной томографической волоконно-оптической измерительной системы на основе волоконно-оптических измерительных линий с интегральной чувствительностью. Показано, что указанная система может быть создана с применением в качестве чувствительных элементов одноволоконных многомодовых интерферометров.

В настоящее время для исследования внутренней структуры различных объектов и распределений физических полей в них успешно применяются томографические методы исследований, основанные на тестировании объектов проникающим излучением [1]. Томографические методы являются высокоэффективными неразрушающими методами исследования, однако существуют объекты, непрозрачные для проникающего излучения или сильно его рассеивающие, что затрудняет применение томографии. Для исследования подобных объектов лучи, несущие информацию об интегралах функции распределения исследуемого параметра объекта или поля, могут быть заменены протяженными волоконно-оптическими измерительными линиями с интегральной чувствительностью [2]. Такая замена демонстрирует новые возможности для томографических исследований, связанные с большей помехозащищенностью, точностью измерений, а также с изменяемой топологией измерительных сетей, обуславливаемых гибкостью волоконно-оптических измерительных линий, что позволяет соответствовать геометрии исследуемого объекта и восстанавливать распределения параметров векторных полей [3].

Однако во многих случаях исследуемый объект отличается значительными габаритными размерами и иными конструктивными особенностями, что делает невозможным применение трех- и двумерной томографии [4]. В этих случаях целесообразно применение различных видов компьютерной сонографии, заключающейся в сканировании исследуемого объекта проникающим излучением по глубине с регистрацией параметров изучения, отражающегося или рассеивающегося

назад от различных неоднородностей объекта. Получаемые при этом данные несут интегральную информацию о влиянии всех встречаемых лучами слоев объекта, что предполагает использование специальных, подобных томографическим, методов регистрации и обработки отраженных сигналов для разделения вкладов отдельных слоев. Представляется, что и в данном случае возможна замена лучей протяженными волоконно-оптическими измерительными линиями в форме петель, что позволит организовать измерение распределений параметров физических полей внутри непрозрачных объектов вдоль одной пространственной координаты.

Поэтому целью настоящей работы является изучение возможностей создания одномерной томографической измерительной системы на основе протяженных волоконно-оптических измерительных линий с интегральной чувствительностью.

В работе рассмотрены возможности создания одномерной волоконно-оптической измерительной системы томографического типа на основе набора волоконно-оптических измерительных линий в форме петель различной протяженности. В качестве измерительных линий предложены одноволочные многомодовые интерферометры, использующие явление интерференции мод одного и того же волоконного световода [5]. Предложена геометрия расположения указанных интерферометров, входящих в состав многоканальной одномерной томографической системы. Разработан алгоритм обработки сигналов данной системы и продемонстрировано в динамическом режиме восстановление профиля распределения поперечных деформаций на тестируемый объект. Полученные результаты демонстрируют возможности создания одномерных волоконно-оптических томографических систем для исследования распределений параметров физических полей внутри объектов различного назначения.

*Список литературы*

1. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии, М.: Мир, 1990.
2. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Кириченко О.В., Петров Ю.С. Многомерная обработка сигналов с использованием волоконно оптической распределенной измерительной сети – Квантовая электроника, т.20, 1993, с.513-516.
3. Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Каменев О.Т., Ромашко Р.В. Восстановление векторных физических полей с использованием двумерной волоконно-оптической измерительной сети – Измерительная техника, т.6, 1999, с.21-28.
4. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии, М.: Физматлит, 2004.
5. Витрик О.Б., Ланцов А.Д. Корреляционный метод обработки спекловой картины сигналов одноволочных многомодовых интерферометров с использованием приборов с зарядовой связью – Квантовая электроника, т.36, 2006, с.339-342.

Р.В. РОМАШКО, Ю.Н. КУЛЬЧИН,  
С. ДИ ГИРОЛАМО<sup>1</sup>, А.А. КАМШИЛИН<sup>1</sup>

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

*<sup>1</sup>Университет г. Куопио, Финляндия*

## **ПОРОГ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ В АДАПТИВНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ НА ОСНОВЕ МНОГОМОДОВОГО СВЕТОВОДА**

Исследовано происхождение поляризационного шума, как наиболее существенного в адаптивном волоконно-оптическом интерферометре, сформированного на основе многомодовых волоконных световодов и динамических фоторефрактивных голограмм. Предложен и экспериментально исследован подход, позволяющий снизить уровень поляризационного шума и тем самым порог детектирования флуктуаций фазы световой волны.

Известно, что интерферометрический принцип регистрации малых флуктуаций фазы световой волны позволяет создавать измерительные системы, обладающие предельно высокой чувствительностью. Вместе с тем высокая чувствительность затрудняет применение таких систем на практике, требуя особых мер по защите их от внешних воздействий (дрейф температуры, давления, механические промышленные шумы и пр.). Использование для демодуляции фазы световой волны динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах, делает измерительные системы адаптивными, способными автоматически подстраиваться под неконтролируемые изменения параметров окружающей среды, сохраняя рабочую точку интерферометра в области максимальной чувствительности [1]. При этом минимальные флуктуации фазы, регистрируемые интерферометром, (предел детектирования) определяются как чувствительностью, так и уровнем шумов в интерферометре.

В настоящей работе экспериментально исследуются шумы адаптивного волоконно-оптического интерферометра, чувствительным элементом которого является многомодовый волоконный световод. Установлено, что источником максимального шума является поляризационный шум, связанный с модуляцией состояния поляризации световых мод, распространяющихся в волоконном световоде при воздействии на него [2]. Наличие поляризационного шума уменьшает динамический диапазон регистрации фазовых флуктуаций сигнальной

световой волны и увеличивает порог детектирования с  $1,9 \times 10^{-9}$  рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$  (теоретический предел, полученный в предположении наличия только дробового шума фотодетектора) до  $35,3 \times 10^{-9}$  рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$  (при использовании стандартного многомодового световода с диаметром сердцевины 50 мкм). Флуктуации состояния поляризации сигнальной волны после ее прохождения через поляризационные элементы, используемые в интерферометре, преобразуются в флуктуации интенсивности (шум), которые не могут быть устранены за счет применения динамической голограммы, компенсирующей лишь дрейф фазы.

В работе предложен и экспериментально исследован подход, позволяющий существенно снизить уровень поляризационного шума. Суть подхода заключается в увеличении числа мод распространяющихся по волоконному световоду, что достигается за счет использования многомодового световода с большим диаметром сердцевины. Это позволяет добиться лучшего усреднения вкладов в поляризационный шум отдельных мод. Показано, что увеличение диаметра сердцевины волоконного световода ( $NA = 0,22$ ) с 50 мкм до 550 мкм приводит к увеличению числа поддерживаемых мод на длине волны 1064 нм с 430 до 53000, что в свою очередь влечет собой увеличение отношения сигнал/шум с 15 дБ до 30 дБ, и снижение реального порога детектирования до  $6,8 \times 10^{-9}$  рад $\sqrt{\text{Вт/Гц}}$ , что всего в 3,6 раза превышает теоретический предел.

Таким образом, практически достигнутая чувствительность адаптивного волоконно-оптического интерферометра при обеспечении световой мощности в 10 мВт позволяет в реальных (нелабораторных) условиях устойчиво детектировать в широкой полосе частот (10 МГц) удлинения волоконного световода (вызванные, напр., вибрацией) с амплитудой в диапазоне от 30 пм до 110 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-91015-АФ\_а).

*Список литературы*

1. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике, М.: Наука, 1992, 127с.
2. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. Sensing of multimode-fiber strain by a dynamic photorefractive hologram – Opt. Lett., v.32, N.13, 2007, p.1821-1823.

В.А. КОМОЦКИЙ, Ю.М. СОКОЛОВ  
 Российский университет дружбы народов, Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО ДАТЧИКА УГЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ И КОЛЕБАНИЙ

Предложено оригинальное устройство [1] для измерения малых угловых смещений и колебаний объектов на основе интегрального блока-сенсора. Проведен теоретический анализ характеристик датчика, и проведены эксперименты по измерению колебаний тестовой конструкции с помощью нескольких образцов датчиков.

Основным элементом датчика (рис.1) является блок-сенсор, представляющий собой пластину из прозрачного материала толщиной несколько миллиметров, на одной стороне которой находится рельефная решетка с профилем в виде меандра, а на другой стороне напылена отражающая пленка. В основе работы датчика лежит принцип последовательной двойной дифракции лазерного пучка на фазовой дифракционной решетке, имеющей профиль в форме меандра. Блок-сенсор закрепляется на исследуемой конструкции, и просвечивается лазерным пучком, который падает на блок, дифрагирует на фазовой дифракционной решетке, распространяется в прозрачном материале пластины, отражается от зеркальной пленки и повторно дифрагирует на фазовой решетке. При небольшом угловом отклонении поверхности, к которой прикреплен блок-сенсор, отраженный от зеркальной поверхности луч сдвигается по решетке. Если фазовая дифракционная решетка имеет прямоугольный профиль в форме меандра, то зависимости мощностей

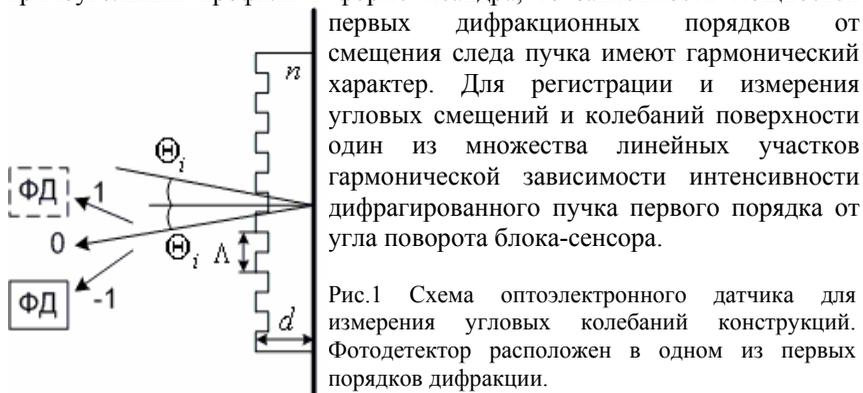


Рис.1 Схема оптоэлектронного датчика для измерения угловых колебаний конструкций. Фотодетектор расположен в одном из первых порядков дифракции.

Выполнен теоретический анализ характеристик и расчет оптимальных параметров блока-сенсора. Изготовлено несколько образцов датчиков с различными параметрами, и разработаны методики их настройки. Проведено измерение статических характеристик датчика, а также измерены угловые колебания тестовой конструкции, которая представляет собой металлическую планку, закрепленную на двух стойках (рис.2).

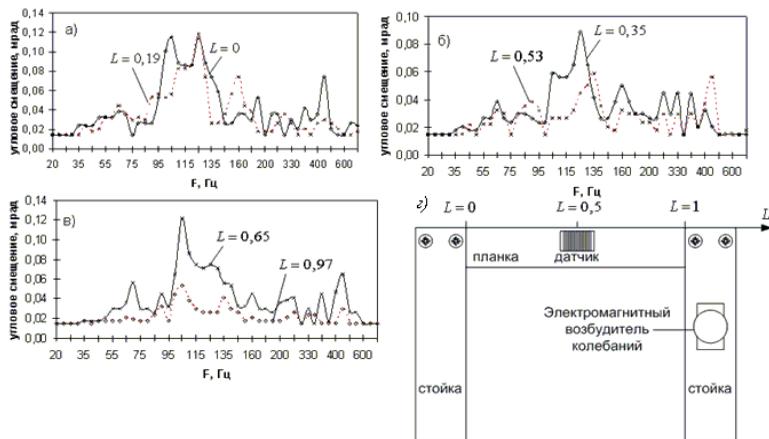


Рис.2. Частотные зависимости амплитуды угловых колебаний тестовой конструкции, измеренные в различных точках конструкции

Отличительной особенностью измерителя является то, что он способен регистрировать колебания с очень низкими частотами, вплоть до нулевых частот. Датчик имеет малые размеры основания порядка 1ммx1мм. Экспериментальная чувствительность датчика с периодом решетки 100мкм составила величину 0,01мрад при значении крутизны преобразования 0,675В/мрад. Датчик нечувствителен к поступательным колебаниям конструкций и случайным механическим вибрациям фотодетектора. Результаты измерений выражаются в абсолютных единицах углов, а не в относительных единицах. Датчик может быть использован на практике для исследования низкочастотных колебаний крупногабаритных конструкций, в сейсмометрии и других приложениях.

#### Список литературы

1. Комочки В.А., Соколов Ю.М. Оптоэлектронное устройство для измерения угловых колебаний конструкций – патент на полезную модель (приоритет от 23.05.2006 по заявке №2006117556).

Т.К. ЧЕХЛОВА, А.А. ДАВЫДОВ, А.Г. ТИМАКИН  
*Российский университет дружбы народов, Москва*

## **ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ , ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ**

Исследованы характеристики оптических волноводов на основе пленок  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ , изготовленных по золь-гель технологии, в расширенном диапазоне температур и их зависимость от технологических параметров и толщины пленки. Установлена зависимость отрицательного термооптического коэффициента волновода от наличия ОН-групп. Проанализирован механизм затухания в волноводах, изготовленных при разных параметрах технологического режима. Исследована временная стабильность характеристик волноводов. Определен технологический режим получения однородных по толщине волноводящих пленок.

В последнее время в работах, относящихся к области разработки и исследования элементной базы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), проявился большой интерес к оптическим волноводам, сформированным на основе пленок, изготовленных по золь-гель технологии [1, 2], которая обеспечивает хорошие оптические характеристики волноводов и при этом не требует дорогостоящего оборудования и специально обученного персонала для его обслуживания. Помимо этого волноводы, сформированные на основе указанных пленок, могут обладать рядом специфических свойств, дающих дополнительные возможности для улучшения характеристик интегрально-оптических (ИО) устройств ВОЛС.

Одной из главных особенностей пленок, изготовленных по золь-гель технологии, является относительно большой отрицательный термооптический коэффициент (ТОК). Это свойство может быть использовано для подстройки параметров и создания температурно-независимых устройств, ИО элементов, таких как системы уплотнения и разуплотнения каналов, узкополосные фильтры, резонаторы и др. Структура пленок, изготовленных по указанной технологии, допускает легирование их веществами, позволяющими создавать элементы ИО, такие как лазеры и усилители, электрооптические устройства и др.

В настоящей работе были исследованы характеристики оптических волноводов на основе пленок  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ , изготовленных по золь-гель технологии. Основное внимание было уделено рассмотрению коэффициента замедления волновода и его термооптического коэффициента в зависимости от толщины пленки в расширенном диапазоне температур, а также потерь при распространении излучения в волноводе, однородность параметров по длине волновода и их временная стабильность, поскольку именно эти показатели определяют работоспособность устройств и их характеристики

Проведенные исследования характеристик серии образцов волноводов с разной толщиной пленок, изготовленных при разных технологических параметрах режима, в расширенном температурном диапазоне показали, что отрицательный ТОК пленок  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  связан с наличием ОН групп, количество которых зависит от температуры отжига и температуры окружающей среды. Измерения проводились для ТЕ и ТМ волн.

Установлено, что величина термооптического коэффициента (ТОК) постоянной распространения волновода  $\gamma(T)$  определяется степенью концентрации поля волны в пленке  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ , обладающей отрицательным ТОК, и температурой окружающей среды.

В процессе исследований были определены параметры технологического режима, а именно, температура и время отжига пленок, обеспечивающие минимальные потери. Временная стабильность параметров волноводов была очень высокой. Исследование однородности пленок по толщине вдоль подложки показало, что однородность зависит от скорости вытягивания подложки из пленкообразующей смеси. Экспериментально проведен выбор скорости вытягивания пленки из раствора для получения максимально однородных по толщине пленок.

*Список литературы*

1. Yeatman E.M. An integrated optical technology based on sol-gel glasses on silicon: the nodes project – Proceedings of Microwave and Optoelectronics Conference, v.2, 1995, p.779-783.
2. Kim W.-S., Lee J.-H., Shin S.-Y., Bae B.-S., Kim Y.-C. Fabrication of ridge waveguides by UV embossing and stamping of sol-gel hybrid materials – IEEE Photonics Technology Letters, v.16, N8, 2004.

Ю.П. ЯЦЕНКО<sup>1</sup>, А.О. МАВРИЦКИЙ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

*<sup>1</sup>Научный центр волоконной оптики при ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

## **ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ С ПОМОЩЬЮ D-SCAN МЕТОДА**

В работе изучается зависимость нелинейного показателя преломления  $n_2$  от концентрации  $\text{GeO}_2$  в новых высоконелинейных германосиликатных световодах методом дисперсионного сканирования (D-scan).

В последние годы достигнут существенный прогресс в изготовлении нелинейных световодов, таких как германосиликатные, теллуритные и висмутовые. Обладая высокой нелинейностью, они весьма перспективны для использования в телекоммуникационных системах, основанных на нелинейных эффектах, в частности, в параметрических преобразователях частоты в широком спектральном диапазоне.

Особое значение при разработке таких систем имеет нелинейный показатель преломления  $n_2$  и динамика его изменения. Экспериментальному определению этого параметра при распространении сверхкоротких импульсов фемтосекундного диапазона по новым высоконелинейным световодам и посвящена данная работа.

Изучение зависимости показателя  $n_2$  от концентрации имеет важное значение, так как нелинейные свойства волокна с высокой концентрацией  $\text{GeO}_2$  в сердцевине отличаются от свойств волокна с низким содержанием  $\text{GeO}_2$ . Мы измерили  $n_2$  в волокнах с различным содержанием  $\text{GeO}_2$ , в том числе с высокими концентрациями  $\text{GeO}_2$  – 66, 75 и 100 мол. %.

Для определения  $n_2$  в германатных волоконных световодах с различным составом сердцевины с высокими концентрациями  $\text{GeO}_2$  мы использовали метод дисперсионного сканирования (D-scan). Сравнение существующих методов измерения  $n_2$  [1-4] показало, что метод D-scan удобен для измерений  $n_2$  в высоконелинейных волоконных световодах, поскольку он позволяет надежно измерять нелинейную рефракцию в световодах с высокими потерями и большой дисперсией.

Метод дисперсионного сканирования (D-scan) [2], являясь временным аналогом пространственного метода продольного сканирования (Z-scan) [3,4], идеологически базируется на сходных принципах, однако, обладает рядом явных преимуществ, позволяющих рассматривать его как уникальный самостоятельный метод. Этот метод определения нелинейного показателя преломления  $n_2$  в волоконных световодах и объемных средах основан на изменении интенсивности и ширины спектра фемтосекундного лазерного импульса при прохождении исследуемого образца вследствие фазовой самомодуляции в зависимости от величины и знака чирпа импульса на входе в исследуемый образец.

В работе впервые определены значения нелинейного показателя преломления  $n_2$  в световодах с высокой концентрацией  $\text{GeO}_2$  (66, 75 и 97 мол. %). Значения величин  $n_2$   $4,11 \cdot 10^{16}$ ;  $4,38 \cdot 10^{16}$  и  $4,97 \cdot 10^{16}$   $\text{см}^2/\text{Вт}$  (соответственно), полученные для исследованных световодов, насколько нам известно, являются рекордно высокими среди опубликованных результатов исследований быстрой электронной компоненты  $n_2$  в световодах с  $\text{GeO}_2$  сердцевиной.

Также были измерены значения  $n_2$  в световодах с концентрациями  $\text{GeO}_2 \leq 30$  мол.%. Их сравнение с полученными ранее другими методами показало хорошее согласование и совпадение с эмпирической зависимостью  $n_2$  от концентрации  $\text{GeO}_2$ , предложенной в работе [1].

*Список литературы*

1. Boskovich A., Chernikov S.V., Taylor J.R., Gruner-Nielsen L., Levring O.A. Direct continuous measurement of  $n_2$  in various types of telecommunication fiber at 1,55  $\mu\text{m}$ . – Opt. Lett., 21, 1996, p.1966.
2. Louradour F., Lopez-Lago E., Couderc V., Messager V., Barthelemy A. Dispersive-scan measurement of the fast component of the third-order nonlinearity of bulk materials and waveguides – Opt.Lett., 24, 1999, p.19.
3. Sheik-Bahae M., Said A.A., Van Stryland E.W. High-Sensitivity; Single-Beam  $n_2$  Measurements – Opt. Lett., 14, 1989, p.955.
4. J.Wang et al. – J.Opt.Soc.Am. B., 11, 1994, p.1009.

И.Н. ЗАВЕСТОВСКАЯ<sup>1</sup>, Н.А. МЕНЬКОВА, О.Н. КРОХИН<sup>1</sup>

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

*<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЗМОВ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

Представлены результаты теоретического исследования механизмов нелинейного поглощения света в прозрачных материалах при взаимодействии с мощными лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Получена величина порога разрушения материала и исследована ее зависимость от термодинамических характеристик материала, в том числе от ширины запрещенной зоны.

Лазерные импульсы с интенсивностями порядка нескольких ТВт/см<sup>2</sup> широко используются для прецизионной обработки поверхностей полупроводников и диэлектриков, в том числе соединений на основе полупроводниковых нитридов.

В работах [1,2] были определены пороги абляции GaN и других прозрачных материалов, таких как сапфир (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и стеклообразный SiO<sub>2</sub>, а также такой же SiO<sub>2</sub> с примесью Ge, при идентичных режимах облучения. Была установлена зависимость лазерно-индуцированного порога разрушения от ширины запрещенной зоны исследованных материалов. В результате экспериментально установлено, что интенсивность лазерного облучения на пороге поверхностного повреждения вышеперечисленных материалов под действием единичных лазерных импульсов (длина волны - 400 нм, длительность импульса - 150 фс) растет как ширина запрещенной зоны (величина края полосы поглощения)  $E_g$  в степени  $3,1 - E_g^{3,1}$ .

Наличие абляции прозрачных материалов означает, что существует эффективный нелинейный механизм поглощения квантов света с интенсивностью порядка десятков ТВт/см<sup>2</sup> и длительностями импульса порядка сотни фемтосекунд в области прозрачности. В случае такого нелинейного процесса коэффициент поглощения составляет величину порядка  $2.5 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$ , тогда как линейное поглощение, например, в GaN при длине волны 400 нм составляет величину менее  $100 \text{ см}^{-1}$  [3].

В настоящей работе показано, что при указанном лазерном режиме доминирующим нелинейным механизмом поглощения света в широкозонных полупроводниках и диэлектриках является механизм туннельного поглощения. На основании модели Л.В. Келдыша [4, 5] теоретически определена зависимость пороговой интенсивности лазерного излучения (порога абляции) от термодинамических характеристик облучаемого материала. Показано, что порог лазерной абляции зависит от ширины запрещенной зоны как  $E_g^3$ , что находится в хорошем согласии с экспериментом.

*Список литературы.*

1. Eliseev P.G., Zavestovskaya I.N., Juodkazis S., Misawa H. Femtosecond ablation and laser processing of gallium nitride semiconductor epitaxial layers – Eur. Conf. Laser Interact. Matter, Moscow, 2002.
2. Eliseev P.G., Sun H.-B., Juodkazis S., Sugahara T., Sakai S., Misawa H. Laser-Induced Damage Threshold and Surface Processing of GaN at 400 nm Wavelength – Jpn. J. Appl. Phys., 38, 1999, p.839-841.
3. Eliseev P.G., Krokhin O.N., Zavestovskaya I.N. Nonlinear absorption mechanism in ablation of transparent materials by high power and ultrashort laser pulses – Applied Surface Science, 248, 2005, p.313-315.
4. Keldysh L.V. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave – JETP (USSR), 47, 1964, 1945.
5. Keldysh L.V. Multiphoton excitation of semiconductors by a very short pulses – private communication, 2000.

А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.А. ИСАЕВ<sup>1</sup>, К.Н. КОЗЛОВСКИЙ  
*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*  
<sup>1</sup>*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЭКСИТОННЫХ СОСТОЯНИЙ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ ФЕМТО- И НАНО- СЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ**

В работе представлена альтернативная схема оптической накачки для исследования многоэкситонного излучения квантовых точек на примере CdSe/ZnS (Core-Shell). В отличие от ультракоротких методов, данная схема предъявляет меньшие требования к экспериментальной технике, поскольку для регистрации используются медленные (наносекундные) приемники.

Для образования многоэкситонной системы необходимо иметь достаточно высокую плотность экситонов. Для массивных полупроводников существует фундаментальное ограничение по их плотности, которое связано с существованием порога диссоциации экситона ( $n_{th}$ ). Грубо, этот порог определяется числом экситонов на один экситонный объем  $n_{th} \sim a_B^{-3}$ , где  $a_B$  – Боровский радиус экситона (для CdSe это около 10 нм). Выше этого порога, т.е. выше, чем один экситон на экситонный объем, происходит диссоциация экситонов и диэлектрический (электро - нейтральный) экситонный газ трансформируется в металлоподобную электрон-дырочную ( $e - h$ ) плазму (т.е. в не связанные носители зарядов). В квантовых точках (далее, КТ) с размерами меньшими 10 нм возможен новый тип сильно взаимодействующих многоэкситонных состояний, которых нет в массиве.

При размерах КТ много меньше Боровского радиуса экситона возможна генерация состояний, когда несколько экситонов появляются в объемах меньших, чем один экситонный объем (так называемые сжатые экситоны). При этом происходит принудительное перекрытие волновых функций электрона, за счет чего усиливается многочастичное взаимодействие, и уменьшение диэлектрического экранирования. Носители заперты в наночастице посредством жестких граничных условий, что приводит к образованию многоэкситонных (два, три, четыре т.д.) состояний.

Динамика и излучение многоэкситонных состояний изучается обычно с использованием ультракоротких методов, которые требуют

использования фотолюминесцентной ап-конверсии [1], что существенно усложняет экспериментальное оборудование. В данной работе использовалась альтернативная схема оптической накачки для исследования многоэкситонного излучения, в которой КТ накачивались в квази-непрерывном режиме [2]. Использовались импульсы накачки с длительностями короче времени релаксации возбужденных носителей, но с периодом следования импульсов сравнимым как со временем рекомбинации экситонов, так и с временами Оже процессов. Для этого использовался фемтосекундный лазер на титан-сапфире. Импульсно-периодический лазер на парах меди с длительностью импульсов существенно большей, чем времена релаксации возбужденных носителей в КТ (15 нс) и частотой следования 10 кГц использовался для реализации квазистационарной населенности многоэкситонных состояний, величина которой определяется ступенчатым возбуждением.

Метод импульсно-периодического фотовозбуждения использует простую экспериментальную технику, поскольку для регистрации возможно использование медленных (наносекундных) приемников. Этот метод дает возможность непрерывно накачивать КТ до высоких экситонных состояний за счет увеличения потока фотонов, что позволяет не только регистрировать высоковозбужденные полосы экситонов, но и наблюдать порядок их появления. В виду ступенчатого механизма образования многоэкситонных состояний [3], по зависимости интенсивности пиков люминесценции от мощности возбуждения легко можно устанавливать к каким многоэкситонным состояниям эти полосы принадлежат.

В работе получены результаты экспериментального исследования квантовых точек CdSe/ZnS (Core-Shell) вышеописанным методом. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическими предсказаниями.

*Список литературы*

1. Achermann M., Hollingsworth J.A., Klimov V.I. Multiexcitons confined within a subexcitonic volume: Spectroscopic and dynamical signatures of neutral and charged biexcitons in ultrasmall semiconductor nanocrystals – Physical review B, 68, 2003, 245302.
2. Oron D., Kazes M., Shweky I., Banin U. Multiexciton spectroscopy of semiconductor nanocrystals under quasi-continuous-wave optical pumping – Physical review B, 74, 2006, 115333.
3. Fisher B., Caruge J.M., Zehnder D., Bawendi M. Room-Temperature Ordered Photon Emission from Multiexciton States in Single CdSe Core-Shell Nanocrystals – Physical review letters, 94, 2005, 087403.

А.А. БАШКЕЕВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **ДИНАМИКА ПЕРЕПУТЫВАНИЯ КВАНТОВЫХ СОСТОЯНИЙ ДВУХ ДВУХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ ОБЩЕГО ТЕРМОСТАТА**

Теоретически исследовано перепутывание в системах, состоящих из двух двухуровневых атомов (кубитов), находящихся в поле общего термостата. Выявлена зависимость стационарного перепутывания от симметрии начальных условий атомной подсистемы и характерных параметров задачи

Перепутывание в двухатомных системах, взаимодействующих с общей средой, обладает рядом особенностей. В настоящей работе были исследованы две такие системы. В одной в качестве общей среды используется поле общего термостата, взаимодействующего напрямую с атомной подсистемой, в другой атомы находятся в микрорезонаторе и взаимодействуют с термостатом через потери на зеркалах.

Исследовано совокупное влияние нескольких различных видов взаимодействий на перепутывания в системе: взаимодействия с классическим полем, диполь-дипольного взаимодействия, а так же наличия у атомов собственных каналов релаксации. Учтено влияние факторов, которые могут иметь место в реальных системах: различных частот переходов у атомов, набега фазы резонансной волны (вызванного различным положением атомов в пространстве), ненулевой температуры и сжатия общего термостата.

В ходе исследования была выявлена принципиально различная эволюция системы в зависимости от симметрии начальных условий по отношению к перестановкам атомов. Данный вид симметрии влияет на существование стационарного перепутывания в системе, его величину, а так же на качественную зависимость этой величины от характерных параметров задачи. Установлено принципиальное сходство в картине стационарного перепутывания в зависимости от начальных условий между системами, взаимодействующими с термостатом напрямую, и системами, взаимодействующими с термостатом через потери на зеркалах. Так же в результате исследования были получены характерные параметры систем и соответствующие им начальные условия, которые позволяют получать стационарные квантовые корреляции с произвольной мерой перепутанности.

С.С. ОЖЕНКО, С.О. ЕЛЮТИН, А.И. МАЙМИСТОВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКОМ СЛОЕ МЕТАМАТЕРИАЛА**

В работе обсуждается преломление предельно коротких импульсов электромагнитного излучения на тонкой пленке нелинейного метаматериала. Особое внимание уделяется случаю, когда тонкая пленка переходит в режим левой среды. Так же представлены результаты численного моделирования отклика пленки.

В начале 60-х годов прошлого столетия Веселаго [1] впервые исследовал электромагнитные свойства сред с отрицательным показателем преломления. В таких средах вектора  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{k}$  образуют левую тройку, из-за чего они получили название левых сред (Left Handed Materials - LHM) [1-3], а фазовая и групповая скорость направлены в разные стороны [4-6]. Именно последнее свойство является наиболее важным для левых сред. Только в начале нового тысячелетия, с развитием нанотехнологий, удалось получить среды, имеющие отрицательный эффективный показатель преломления. Такие композитные среды состоят из множества нанотрубочек, нанопроволочек и прочих наночастиц.

Экспериментально удалось показать существование LHM сначала в микроволновом диапазоне [3], а развитие нанотехнологий сделало возможным провести такие эксперименты и в оптическом диапазоне [7-8], однако количество экспериментов пока не столь уж велико.

В силу технологических особенностей метаматериалы получают в виде тонких пленок, вытекает постановка обсуждаемой задачи. В данной работе рассматривается тонкая пленка, находящаяся на границе раздела диэлектрических сред с различным показателем преломления. Построив модель для описания прохождения предельно короткого импульса через пленку мы можем, варьируя частоту падающей волны, наблюдать, как изменяются отношения между падающей и прошедшей волнами при переходе пленки из режима правой среды в левую. Для описания отклика пленки используется модель осцилляторов для наночастиц и наноконтуров, описываемых уравнениями (1).

Проведенный численный анализ показал, что нелинейность оптического отклика структурных элементов пленки оказывает существенное влияние на ее характеристики. Особенно это заметно в спектральной зависимости коэффициентов отражения и пропускания в случае нелинейного отклика пленки. Притом, что кроме коэффициента нелинейности  $3\kappa/2\omega_0 = 0.05$ , прочие параметры остались в точности такими же, как и для случая рассмотренного мы легко смогли проследить тот вклад, который дает нелинейность в исследуемые свойства. Очевидно, наиболее существенное влияние нелинейность оказывает на прохождение импульсов с частотой несущей близкой к резонансам. Понять этот результат совсем несложно, если обратить внимание на уравнение для осцилляторов

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \omega_d^2 P + \Gamma_e \frac{\partial P}{\partial t} + \kappa P^3 = \frac{\omega_p^2}{4\pi} E, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial t^2} + \omega_T^2 M + \Gamma_m \frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{\beta_m}{4\pi} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}$$

из которого видно, что нелинейность, которая физически должна быть величиной малой, даст существенный вклад в случае, когда величина нелинейного отклика сравнима с линейным слагаемым.

Работа частично поддерживалась РФФИ (грант N 06-02-16406).

*Список литературы*

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  – УФН, т.92, 1967, с.517.
2. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J., Youngs I. – Phys. Rev. Lett., v.76, 1996, p.4773.
3. Smith D.R., Kroll N. – Phys. Rev. Lett., v.85, 2000, p.2933.
4. Мандельштам Л.И. – ЖЭТФ, т.15, 1945, с.475.
5. Agranovich V.M., Shen Y.R., Baughman R.H., Zakhidov A.A. – Phys. Rev. B, v.69, 2004, p.165112.
6. Агранович В.М., Гартштейн Ю.Н. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света – УФН, т.176, 2006, с.1051.
7. Drachev V.P., Cai W., Chettiar U., Yuan H.-K., Sarychev A.K., Kildishev A.V., Klimeck G., Shalaev V.M. Experimental verification of an optical negative-index material – Laser Phys. Lett., v.3, 2006, p.49.
8. Cai W., Chettiar U.K., Yuan H.-K., de Silva V.C., Kildishev A.V., Drachev V.P., Shalaev V.M. Metamagnetics with rainbow colors – Opt. Express, v.15, 2007, p.3333-3341.

Е.А. СОРОКИНА, А.И. МАЙМИСТОВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКОМ КОНДЕНСАТЕ В ОПТИЧЕСКОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ**

Найдено стационарное распределение амплитуд вероятности заполнения узлов оптической одномерной сверхрешетки. Показано, что это решение системы уравнений, описывающих динамику бозе-эйнштейновского конденсата в сверхрешетке, модуляционно неустойчиво при достаточно высокой заселенности узлов. В рамках линейной теории устойчивости найдено выражение для инкремента неустойчивости, как функции волнового числа слабой пространственной модуляции.

Оптическая решетка представляет собой массив микроскопических потенциалов, индуцированных за счет интерферирующих лазерных пучков, который может быть использована для удержания охлажденных атомов, образующих при определенных условиях бозе-эйнштейновский конденсат (БЭК). Для описания БЭК в оптической решетке используют либо уравнение Гросса-Питаевского с периодическим потенциалом, либо модель Бозе-Хаббарда [1], описывающую слабо связанные между собой капли БЭК в узлах решетки. С недавнего времени [2] стали рассматриваться оптические сверхрешетки – решетки с двумя сортами микроскопических потенциалов в элементарной ячейке. Из-за различия энергетических уровней в каждой из микроскопических потенциалов при низкой температуре квантовое туннелирование и термоактивированные перескоки частиц между соседними узлами сверхрешетки подавлены. Возможен, однако, фотоиндуцированный перенос частиц в такой решетке [1,3,4]. При постоянной интенсивности электромагнитных полей, в решетке возможно распространение различных типов волн, при этом параметры этих волн могут контролироваться внешним излучением, которое меняет величину интеграла перескока между узлами решетки. Часто нелинейные уединенные волны, в частности солитоны, возникают в результате развития неустойчивости стационарной волны с постоянной амплитудой по отношению к слабой модуляции. Модуляционная неустойчивость в оптической решетке с одинаковыми микропотенциалами исследована в [5].

В настоящей работе рассмотрен бозе-эйнштейновский конденсат в одномерной оптической сверхрешетке с двумя сортами микроскопических потенциалов, достаточно глубоких, чтобы система описывалась моделью Бозе-Хаббарда. Используя ранее полученную систему уравнений [3], определяющую динамику амплитуд вероятности заполнения узлов (или вероятности обнаружить бозон в данном узле) сверхрешетки, в условии точного резонанса, найдено стационарное распределение населенностей. При этом фазы амплитуд вероятности заполнения однотипных узлов меняются на  $\pi$  при переходе от узла к узлу. Устойчивость такого состояния БЭК относительно малые возмущения зависит от параметра нелинейности системы, а также от частоты самой модуляции. При значении параметра нелинейности превышающем области неустойчивости единицу найденное распределение является неустойчивым для всех волновых чисел из зоны Бриллюэна. Но, в противном случае в зоне Бриллюэна появляются области устойчивости. При этом распределение бозонов по узлам модуляционно неустойчиво для коротковолновых возмущений, а длинноволновые возмущения затухают. С уменьшением параметра нелинейности (или среднего числа бозонов в узле сверхрешетки) области неустойчивости сокращаются. Аналитически найденные значения инкремента неустойчивости сравнивались с результатами численного моделирования и найдено хорошее согласие между этими величинами в той области времен, где линейный анализ устойчивости справедлив. Нелинейный режим развития модуляционной неустойчивости изучен с помощью численного моделирования, которое показывало образование со временем ряда максимумов в распределении населенностей узлов, расположенных вдоль сверхрешетки. Предварительные расчеты указывают на развитие в дальнейшем хаотического поведения рассматриваемой системы.

Работа частично поддерживалась РФФИ (грант N 06-02-16406).

*Список литературы*

1. Jaksch D., Bruder C., Cirac J.I., Gardiner C.W., Zoller P. Cold Bosonic Atoms in Optical Lattices – Phys.Rev.Lett., 81, №15, 1998, p.3108-3111.
2. Goerlitz A., Kinoshita T., Haensch T.W., Hemmerich A. – Phys.Rev. A, 64, 2001, 011401.
3. Маймистов А.И., Елютин С.О. Эхо охлаждённых бозонов в оптических решётках – Известия РАН, сер.физ. 2004, т.68, №9, с.1264-1267.
4. Маймистов А.И. Нелинейные поляритонные волны в оптической двойной решетке с фотоиндуцированным переносом атомов – Оптика и спектроскопия, т.97, №6, 2004, с.981-990.
5. Baizakov B.B., Konotop V.V., Salerno M. – J.Phys. B, 35, №24, 2002, p.5105-5119.

А.А. ВАЙЧАС<sup>1</sup>, А.Н. МАЛОВ, Е.В. ШЕВЧЕНКО<sup>1</sup>,  
А.В. НЕУПОКОЕВА

*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище  
(военный институт),*

*<sup>1</sup>Иркутский государственный медицинский университет*

## **РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖИДКОЙ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ**

Исследовано распространение лазерного излучения в жидких пленках, созданных из самопроявляющегося дихромированного желатина.

В [1, 2] установлено, что лазерное излучение, вводимое в жидкие органические пленки в самих пленках, разбивается на совокупность узких тонких треков (рис. 1), которые наблюдаются визуально, обладают рядом свойств и особенностей распространения.

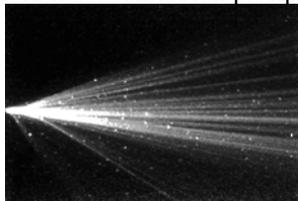


Рис. 1. Вид треков лазерного излучения, распространяющегося в горизонтальной пленке из смеси 5% раствора желатина и глицерина, при фокусировке на пленку излучения гелий-неонового лазера мощностью 15 мВт.

Целью работы являлось исследование распространения лазерного излучения в жидких пленках, созданных из светочувствительных материалов. Поскольку слои на основе самопроявляющегося дихромированного желатина (СПДЖ) используются для записи голограмм [3, 4], то был проведен эксперимент, в котором на поверхность пленки из 5% раствора СПДЖ в течение 5-20 минут (в зависимости от мощности) фокусировалось излучение лазера. Для проведения данного эксперимента использовались гелий-неоновые лазеры различной мощности (1 мВт при плотности мощности в фокусе около  $50 \text{ Вт/см}^2$ , 50 мВт при плотности мощности в фокусе около  $65 \text{ кВт/см}^2$ ), а также полупроводниковый лазерный диод мощностью 5 мВт (плотность мощности около  $700 \text{ Вт/см}^2$ ). В пленке сфокусированное лазерное излучение разбивалось на совокупность треков. Со временем разбиение на треки постепенно становилось менее заметным.

Несмотря на различие в мощности и интенсивности вводимого в пленку излучения его разбиение на треки происходило одинаково эффективно. Треки, возникающие в пленках из СПДЖ, обладали теми же

свойствами и особенностями распространения, что и треки в пленках из смеси 5% раствора желатина и глицерина. Отличие заключалось в том, что яркость треков в пленках из СПДЖ была меньше. После воздействия лазерного излучения пленки дополнительно исследовались с помощью теневого прибора, который позволяет визуализировать фазовые неоднородности прозрачных объектов, том числе и пленок. В результате проведенного эксперимента было установлено, что в области распространения треков возникают фазовые неоднородности, повторяющие форму и направление треков (рис. 2).

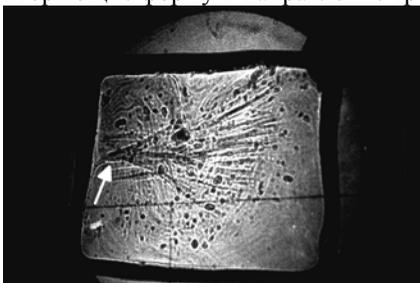


Рис. 2. Фазовые неоднородности, возникающие в пленке из раствора СПДЖ 5% концентрации в результате воздействия излучения гелий-неонового лазера мощностью 50 мВт. Стрелкой показано место фокусировки излучения на пленку.

Таким образом, следует отметить, что использование светочувствительного материала для создания пленки позволяет зафиксировать возникающие в пленки треки. Принимая во внимание потери в виде отраженного, рассеянного и прошедшего излучения с учетом толщины пленки, времени ввода и коэффициента поглощения приблизительно равного  $0,1 \text{ см}^{-1}$ , величина плотности энергии закачиваемой в пленку в области ввода составляет около  $0,01-0,02\%$  от плотности всей падающей на пленку энергии. Считая, что энергия перераспределяется между возникающими треками в равных количествах, получаем, что в зависимости от времени ввода и количества треков плотность энергии, приходящейся на один трек, по грубым оценкам, составляет приблизительно от  $0,5 \text{ Дж/см}^2$  до нескольких десятков  $\text{Дж/см}^2$ .

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований по проекту 05-08-33639.

*Список литературы*

1. Стойлов Ю.Ю. Лазерный луч в мыльной пленке – УФН, 2004, №12, с.1359-1369.
2. Вайчас А.А., Малов А.В., Шевченко Е.В. – Известия ВУЗов. Физика, т.48, №6, 2005, с.69-70.
- 3 Богдан И.В., Малов А.Н. и др. // Доклады Академии наук, 382, 2002, с.754.
4. Reinhand N.O., Malov A.N.et al. Nontraditional dichromated gelatin recording media synthesis technologies for holography – Proceedings of SPIE, v.5134, 2003, p.162-172.

Н.А. ЕСЕПКИНА, С.И. ИВАНОВ,  
А.П. ЛАВРОВ, С.А. МОЛОДЯКОВ

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

## **КАЛИБРОВКА ЧАСТОТНОЙ ШКАЛЫ АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ РАДИОСИГНАЛОВ**

При изменении температуры наблюдается дрейф частотной шкалы акустооптического спектрометра. Авторы исследовали этот процесс и применительно к задачам радиоастрономических наблюдений предложили методику и аппаратуру автоматической калибровки данных в процессе их накопления.

Акустооптические спектрометры (АОС) широко используются для параллельного спектрального анализа широкополосных радиосигналов, например, в радиоастрономии для регистрации спектров слабых сигналов космических источников с отношением с/ш много меньше единицы.

Известно, что при изменении температуры  $T$  наблюдается дрейф частотной шкалы АОС - функциональной зависимости  $f = f(n, T)$  номера спектрального канала  $n$  и соответствующей частоты  $f$  входного радиосигнала. Основная причина дрейфа – это изменение скорости  $V$  акустической волны в звукопроводе акустооптического модулятора. (АОМ) [1, 2]. Используются следующие методы для повышения температурной стабильности частотной шкалы: термостабилизация объема, где расположен АОС; использование частотной калибровки на одной или нескольких фиксированных опорных частотах входного радиосигнала (использование реперов); регистрация температуры объема в процессе измерений с последующей коррекцией температурного изменения частотной шкалы АОС на основе предварительных измерений.

В работе проведено экспериментальное измерение частотной шкалы АОС при фиксированной температуре  $T_0$ . Найдено, что эта нелинейная зависимость  $f(n, T_0)$  достаточно точно аппроксимируется полиномом третьей степени номера канала  $n$  (СКО составляет 1,6 кГц) во всем диапазоне изменения частоты  $\Delta f$  входных радиосигналов. Проведены также и экспериментальные исследования изменения положения опорных точек частотной шкалы АОС в широком диапазоне изменения температуры:  $\pm 10^0\text{C}$  от "опорной" температуры  $T_0 = 18^0\text{C}$ .

Авторы разработали методику калибровки частотной шкалы АОС, которая проводится автоматически в процессе длительного накопления

выходного сигнала. В радиоастрономии, например, в ряде задач из-за малого отношения сигнал/шум профиль сигнала на выходе формируется в течение нескольких часов. Частотная калибровка внедрена в АО пульсарный приемный комплекс крупнейшего отечественного радиотелескопа РТ-64 (г.Калезин, Тверская обл.). Пульсарный комплекс предназначен для регистрации времени прихода и профилей импульсов периодических источников космического радиоизлучения – пульсаров (вращающихся нейтронных звезд). Ядром приемного комплекса являлся созданный в СПбГПУ АОС, имевший полосу анализа  $\Delta f = 80$  МГц и число каналов 1000 [2, 3], при этом  $\Delta f/f_0 = 50\%$ . В АОС был использован АОМ на кристалле  $\text{TeO}_2$ .

Для частотной калибровки в приемный комплекс радиотелескопа перед АОС был введен коммутатор, который периодически в процессе наблюдений подключал вход АОС к генератору частотных реперов – гребенке частот с шагом 5 МГц. Период переключения зависит от скорости дрейфа характеристик АОС и для условий на радиотелескопе он составлял 10 мин.

Алгоритм частотной калибровки, которую можно проводить как в реальном времени, так и при вторичной обработке регистрируемых данных, включал следующие шаги. Поиск максимумов откликов от частотных реперов  $f_k$  и определение их положения  $n_k$ . Построение по полученным парам  $(f_k - n_k)$  аппроксимирующей частотной зависимости  $f = f(n)$ . Нахождение смещения частотной шкалы  $\Delta n_0$  для центрального репера  $f_0$ . Суммирование промежуточных профилей сигналов при получении интегрального профиля с учетом найденных смещений  $\Delta n_0$ .

Описанный алгоритм обеспечивает достаточную для большинства задач точность измерений профилей сигналов, в том числе и профилей импульсов радиоизлучения пульсаров. В докладе представлены некоторые результаты применения АОС с периодической частотной калибровкой в радиоастрономических наблюдениях, см. также [2, 3].

Работа поддержана грантами РФФИ №07-02-01211 и №06-08-00090.

*Список литературы*

1. Виленский А.В., Лысой Б.Г., Чередниченко О.Б. Компенсация температурного дрейфа длины волны настройки акустооптического спектрофотометра – Квантовая электроника, т.32, №3, 2002, с.232-234.
2. Esepkina N.A., Lavrov A.P., Molodyakov S.A. Acoustooptical pulsar processor usage for interstellar medium dispersion measurements – Proc. SPIE, v.5447, 2004, p.288-295.
3. Есепкина Н.А., Илясов Ю.П., Лавров А.П. и др. Применение акустооптического процессора для наблюдения радиоизлучения пульсаров – Письма в ЖТФ, т.29, вып.21, 2003, с.32-39.

М.В. КОННИК, Э.А. МАНЬКИН, С.Н. СТАРИКОВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА КОММЕРЧЕСКИХ ЦИФРОВЫХ ФОТОКАМЕР ДЛЯ ОТОБРАЖАЮЩИХ ОПТИКО- ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ**

Описывается метод линеаризации снимков коммерческих цифровых фотокамер, позволяющий использовать их в отображающих оптико-цифровых системах. Показано, что использование линеаризованных данных позволяет увеличить линейный динамический диапазон камеры до 10 раз. Приводятся экспериментальные результаты применения метода линеаризации в оптико-цифровой системе с оптическим кодированием.

Гибридные оптико-цифровые отображающие системы, основанные на принципе “кодирования волнового фронта” (wave-front coding) [1,2], позволяют совмещать параллелизм оптических систем и гибкость цифровых методов обработки изображений. Такие системы позволяют создавать компактные и относительно недорогие устройства с недостижимыми для обычной оптики характеристиками.

Для широкого распространения отображающих оптико-цифровых систем требуется применение в них недорогих цифровых фоторегистраторов. В этом случае для линейности передачи полутонов фотосенсорами необходимо применение специализированные программных средств. Такие программы позволяют использовать коммерческие цифровые камеры в качестве измерительных и получать максимально возможный линейный динамический диапазон. В данной работе для этого применяется свободно доступный конвертер RAW-файлов DCRAW[3,4]. Получение линейного отклика от камеры возможно при использовании конвертера DCRAW в документальном режиме при записи данных изображений в 16-битный формат TIFF или PPM.

Экспериментально показано, что применение DCRAW позволяет увеличить линейный динамический диапазон с 36 dB до 58 dB. Это до 10 раз больше динамического диапазона, который может быть получен стандартным конвертером от производителя фотокамеры (см. рис.1).

Получены экспериментальные результаты использования линеаризованных данных коммерческой цифровой фотокамеры в оптико-цифровой системе с оптическим кодированием.

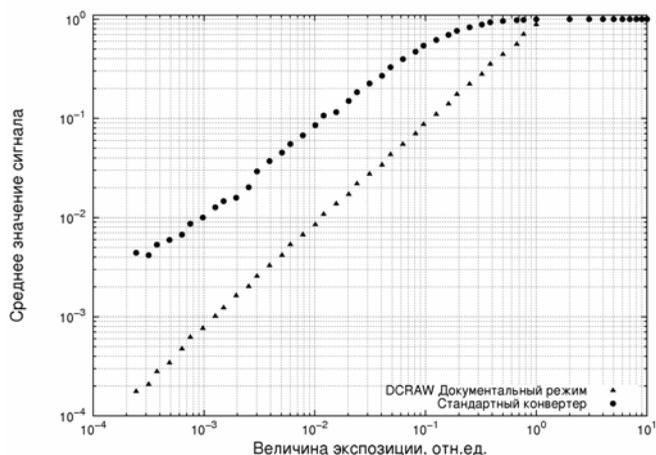


Рис.1. Зависимости среднего значения нормированного цифрового сигнала от величины экспозиции для конвертера DCRAW и стандартного конвертера

Сравнение экспериментальных данных показало, что при обработке снимков стандартным конвертером, среднеквадратическое отклонение формируемого изображения от оригинала составило около 87%, в то время как при обработке специализированным конвертером DCRAW отличие от оригинала менее 20%. Так же отмечено существенное повышение визуального качества восстановленных изображений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Программа "Развитие научного потенциала высшей школы", проект РНП.2.1.2.5657).

#### *Список литературы*

1. Cathey W. T., Tucker S.C., Dowski E.R. Jr. Extended depth of field and aberration control for inexpensive digital microscope systems – Optics Express, v.4, N.11, 1999, p.467–474.
2. Dowski E.R. Jr., Danz R., Faulstich A., Faltermeier B., Walraven J.A. Wavefront coded imaging systems for mems analysis / et.al. – Proc. of ISTFA, 2002, p.295–303.
3. Coffin D. Raw digital photo decoding – <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcrawl/>, referred 07.03.2007.
4. Starikov S.N., Konnik M.V., Manykin E.A. Image linearization of commercial digital camera for holographic optical-digital imaging systems – Proceedings of the conference “Holography in Russia and abroad. Theory and practice”, 2007, p.79–80.

А.Н. БОРОДИН, А.Н. МАЛОВ, В.А. МАРКИН  
*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище  
(военный институт)*

## **УЛУЧШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО ПРИ ЯРКОЙ ВНЕШНЕЙ ЗАСВЕТКЕ**

В данной работе обсуждается практическая возможность получения фотографического изображения при наличии яркой засветки оптической системы без существенного снижения качества снимка.

При фотографировании различных объектов или публичных мероприятий часто сталкиваются с таким видом технической защиты информации как создание с ярких паразитных источников излучения, расположенных вблизи от объекта наблюдения и маскирующих его. В роли такого яркого источника излучения может выступать мощная лазерная установка, постоянно направленная на систему наблюдения и производящая засветку оптической системы.

Были проведены наблюдения засветки поля зрения при различных углах между осью оптической системы и направлением на источник яркой засветки. Эксперимент показал, что существенное влияние источника засветки происходит при углах направления на источник до  $60^\circ$  и более. В качестве источника применялся полупроводниковый лазер мощностью 10 мВт.

Дополнительным мешающим фактором является рассеянный свет в фотокамере. Известно, что чем больше контраст объекта съемки, тем на большую величину уменьшается контраст из-за рассеяния света. При съемке объектов, имеющих нормальный интервал яркости 1:33, уменьшение контраста в фотокамере  $\sim 8\%$ . При интервале яркостей объекта 1:100 уменьшение контраста составляет 15%, а при интервале 1:1000 (что может иметь место при наличии мешающей засветки) - 40%.

Таким образом, оптимально располагать специальный фильтр непосредственно перед линзой объектива, тем самым, снижая уровень рассеянного в камере света [1]. При этом яркое неинформативное излучение отфильтровывается до попадания на рассеивающие элементы. Фильтр может быть выполнен в виде совокупности нескольких компенсационных элементов (экранов), расположенных в рабочем поле входной апертуры объектива.

На рис. 1 приведен увеличенный фрагмент поля зрения при наблюдении условного объекта с различной степенью подавления помехи таким фильтром.

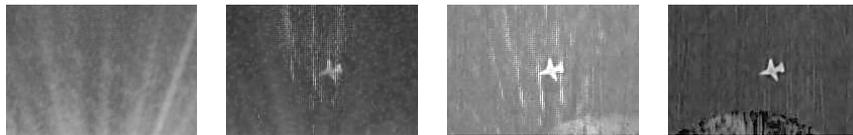


Рис. 1. Наблюдение условного объекта вблизи источника яркой засветки с различной степенью её подавления.

За прототип фильтра принят коронограф с внешним затмевающим устройством [1, 2].

Для определения качественных характеристик фильтра использован объектив диаметром  $D=67$  мм и фокусным расстоянием  $f=0,3$  м. (данные приведены в таблице). Из таблицы видно, что использование фильтра не ведет к существенному снижению разрешающей способности.

	без системы фильтрации	с системой фильтрации
Пропускание по полю зрения	1	0.13
Разрешающая способность по полю зрения, л/мм	83	62.2 (уменьшение 25%)
Расширение динамического диапазона	-	10 - 100

Работа выполнена по проектам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) № 05-08-33639 и № 06-08-01109.

*Список литературы*

1. Бородин А.Н., Малов А.Н. Использование трехмерных фильтрующих элементов в обработке изображений – Известия ВУЗов. Физика, т.48, №6, 2005, с.41-43.
2. Borodin A.N., Malov A.N., Chuprakov S.A. The installation for scattering light level measurements in the shadow of the coronagraph's external occulter system – Proc. SPIE, v.5851, 2005, p.213-217.

Е.С. ГРИЧУК, М.Г. КУЗЬМИНА<sup>1</sup>, Э.А. МАНЬКИН

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

*<sup>1</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва*

## **СЕЛЕКТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОСЦИЛЛЯТОРНО-СЕТЕВЫМ МЕТОДОМ**

Работа посвящена разработке осцилляторно-сетевого метода сегментации реальных полутоновых яркостных изображений на основе модели осцилляторной сети с самоорганизованным динамическим связыванием и управляемой кластерной синхронизацией.

В области компьютерного зрения существует большое количество традиционных методов обработки изображений. Несмотря на это, большой интерес исследователей прикован также и к так называемым нейроморфным методам, основанным на имитации нейробиологических процессов в нейронных структурах мозга. Основные преимущества этих методов следующие: параллельный и распределенный способ обработки информации, надежность и устойчивость к повреждениям, «автоматизм» срабатывания, способность к самонастройке и подавлению шумов.

Основная цель нашей работы заключается в построении примера биологически мотивированной модели нейросети из нелинейных динамически взаимодействующих осцилляторов и разработке осцилляторно-сетевого метода сегментации изображений на основе этой модели.

Моделью нейронного осциллятора служит осциллятор предельного цикла (подходящим образом модифицированный осциллятор Гинзбурга-Ландау). Осцилляторы сети локализованы на плоскости в узлах двумерной прямоугольной решетки, которая согласована с пиксельным массивом изображения так, что полное число осцилляторов совпадает с числом пикселей. Связи между осцилляторами построены так, что два осциллятора оказываются существенно связанными, если они оба активны и расположены в сети на расстоянии, не превышающем заданный конечный радиус пространственного взаимодействия. Сегментация изображения состоит из двух фаз: 1) предварительной настройки сети, 2) процесса последовательного выделения всех фрагментов изображения. Предварительная настройка сети заключается в задании внутренних параметров каждого осциллятора сети, нелинейно зависящих от яркости соответствующего этому осциллятору пикселя изображения. Фаза

сегментации состоит из последовательности процессов релаксации осцилляторной сети в состоянии синхронизации при различных конфигурациях сетевых связей, возникающих в соответствии с правилом сетевого связывания. В конце этой фазы вся осцилляторная сеть оказывается разложенной на совокупность внутренне синхронизованных, но взаимно десинхронизованных кластеров, соответствующую полному набору фрагментов изображения.

Серии компьютерных экспериментов показали, что описанный метод сегментации изображений действительно «работает» и позволяет сегментировать реальные черно-белые яркостные изображения (фотографии). Пример сегментации географической карты приведен на рис.1. Также было построено векторное расширение данной модели для сегментации цветных изображений.

В качестве основных направлений развития рассматриваемой модели можно выделить следующие:

1) увеличение скорости интегрирования путем оптимизации алгоритма интегрирования и методов хранения промежуточных результатов вычислений;

2) усовершенствование существующих и разработка иных принципов динамического связывания;

3) проведение численных экспериментов для детального сравнения возможностей разработанного алгоритма с другими методами сегментации.



Рис.1. Пример сегментации черно-белой карты (492 × 475 пикселей): а) исходное изображение, б) сегментированное изображение.

*Список литературы*

1. Wang D., Terman D. Locally Excitatory Globally Inhibitory Oscillator Networks – IEEE Trans. on NN, v.6., N.1, 1995, p.283.
2. Кузьмина М.Г., Манькин Э.А., Сурина И.И. Осцилляторная сеть с самоорганизованными динамическими связями для сегментации изображений – Нейрокомпьютеры, №4, 2004, с.34-55.
3. Grichuk E.S., Kuzmina M.G., Manykin E.A. Oscillatory network for synchronization-based adaptive image segmentation – Proc. of IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vancouver, Canada, 2006, p.8962-8967.

Ч.Б. КАЙТУКОВ

*Научно-технический центр «Атлас», Москва*

## **РАСЧЕТ ДАННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛИТОГРАФА ПРИ ИМИТАЦИИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО РЕЛЬЕФА ОПТИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАММЫ**

Обсуждены особенности расчета и изготовления голограмм на электронном литографе.

Защитные оптические элементы, изготавливаемые методами электронной литографии, обычно представляют собой поверхность с бинарным, то есть двухуровневым микрорельефом. Из такого микрорельефа состоят дифракционные решётки. Малые области, заполненные одной дифракционной решёткой с определёнными параметрами, складываются в изображение аналогично построению изображения по пикселям. Параметры дифракционных решёток рассчитываются в зависимости от визуального эффекта, который необходимо передать.

Представляет интерес синтезирование на электронном литографе рельефа аналогичного рельефу той же радужной голограммы, но записанной при помощи лазера.

Использование методов цифровой голографии привлекательно тем, что в процессе математического расчета появляется возможность устранять, или даже не принимать во внимание многие проблемные моменты, связанные с использованием реального оптического оборудования и лазера. Недостаточная стабильность и мощность лазера, неидеальная плоскость фронта опорной волны, абберации в оптических элементах схемы, энергетическая несимметричность записи различных цветов и, как следствие, пространственное расхождение цветов (по яркости) на голограмме. Все эти и другие сложности оптической записи голограмм можно обойти, решая задачу математически. Привлекает так же возможность создания голограмм, используя объёмные компьютерные модели, минуя стадию создания реальных моделей.

Очевидны сложности на пути создания программного продукта, позволяющего моделировать реальный голографический рельеф: адекватность выбранной математической модели физического явления самому этому явлению, корректно определение границ применимости используемых формул, успешное применение быстрых математических

алгоритмов. Однако, при наложении некоторых ограничений на свойства исходных объектов и, учитывая разрешающие характеристики литографа при создании рельефа на резисте, можно получить решение такой задачи для некоторого набора исходных объектов, достаточного для создания насыщенных дизайнов.

Надо заметить, что такие голограммы не являются альтернативой оптическим способам записи радужных голограмм. Тем более, принимая во внимание, что в результате оригинации литографическим методом, аналоговый рельеф оптической голограммы будет фактически заменён цифровым, с той или иной степенью приближения в зависимости от параметров электронного литографа.

Основным отличительным качеством таких голограмм будет полная идентифицируемость на экспертном и приборном уровнях, так как они будут обладать хорошо читаемыми признаками микрорельефа, не зависимо от условий производства, хранения, нанесения на защищаемый объект или условий эксплуатации.

Наибольший интерес, данный вид голограмм будет представлять в области производства защитных знаков. Появление на рынке голограмм рассчитанных математически в результате моделирования оптической схемы записи, а произведённых на электронном литографе дополнит арсенал средств борьбы с подделкой товаров и документов.

**А.С. КУЗНЕЦОВ, С.Б. ОДИНОКОВ**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МАГНИТНЫХ СИГНАЛОГРАММ С НОСИТЕЛЕЙ ВИДЕОЗАПИСИ**

Рассмотрено устройство визуализации скрытых магнитных изображений на основе магнитооптического эффекта Фарадея. Показаны достоинства и недостатки данного метода, подтвержденные экспериментальными результатами.

Проблема достоверного и оперативного выявления магнитной информации при исследовании вещественных доказательств всегда была и остается актуальной для криминалистики. Технологии и методы, позволяющие определить характер распределения магнитных полей

рассеяния над носителем, например, для проведения криминалистических экспертных исследований магнитных сигналограмм ленточных носителей видеозаписи представляют особый интерес. В связи с этим методы визуализации магнитных полей рассеяния с магнитных носителей информации и устройства на их основе, позволяющие получить доступ к информации на физическом уровне, приобретают особую актуальность.

В этих условиях альтернативным путем является создание оптико-электронных устройств, позволяющих визуализировать локальные поля магнитных носителей. Данные устройства должны отвечать требованиям:

- 1) отсутствие возможности повреждения, либо разрушения анализируемой магнитной записи;
- 2) регистрация магнитных полей, обеспечивающих перекрытие динамического диапазона носителя записи;
- 3) регистрация пространственных частот до 200 лин/мм;
- 4) защита документов от подделки и проверка их на подлинность.

Основным методом неразрушающей визуализации магнитных полей с носителей являются магнитооптические методы (МО), основанные на эффекте Фарадея или Керра.

На основе поляризационного микроскопа «ПОЛАМ Р-312» (ЛОМО) был разработан макет оптико-электронного устройства для визуализации магнитограмм ленточных носителей видеозаписи. Принцип работы данного макета прибора основан на магнитооптическом эффекте Фарадея при использовании в качестве промежуточной среды считывания Вi-содержащую магнитную пленку феррит-граната.

Основные технические параметры и характеристики разработанного макета прибора:

- увеличение макета прибора, крат.....	252
- увеличение объективов, крат.....	21
- увеличение окуляров, крат.....	10
- поле зрения, мм:	
при визуальном наблюдении с окуляром 10х.....	0.71
- размер рабочей зоны, мм.....	5x13
- разрешающая способность, мкм.....	4
- цена деления нониуса анализатора.....	6'
- габаритные размеры, мм.....	400x580x180
- масса, кг.....	8

А.Ю. БЫКОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.А. ЕГОРОВ

Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

## ЗАЩИЩЕННОЕ КОДИРОВАНИЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ СЦЕНЫ, ФОРМИРУЕМОЙ В ПАМЯТИ АГЕНТА ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ КАДРОВ

Рассмотрены возможные приемы защищенного МЗЛ кодирования структур нечетко-логических данных, описывающих динамическую модель объектов сцены, контролируемой с помощью TV камеры.

Проблема информационной защиты передаваемых команд и данных в коллективе роботизированных агентов МАС [1] рассматривалась в [2,3,4]. Использование моделей многозначной (МЗЛ) алгебры Аллена-Живона [5] для некантового открытого оптического канала связи показало интересную возможность реализовать приемы работы, близкие к методу “одноразового шифровального блокнота” без алгоритма факторизации простых множителей. Методики МЗЛ кодирования позволяют также предложить способы защиты набора нечетко-логических правил и нечетко-логических функций принадлежности (ФП), составляющих основу причинно-следственной модели сцены в памяти агента.

Генерирующая секретный код МЗЛ функция  $n$  переменных задается в виде

$$\begin{aligned} F(x_1, \dots, x_n) = & 1 * Z_1(a_{11}, b_{11}) * Z_2(a_{12}, b_{12}) * \dots * Z_n(a_{1n}, b_{1n}) + \\ & + 2 * Z_1(a_{21}, b_{21}) * Z_2(a_{22}, b_{22}) * \dots * Z_n(a_{2n}, b_{2n}) + \\ & \dots \\ & + (z-1) * Z_1(a_{z1}, b_{z1}) * Z_2(a_{z2}, b_{z2}) * \dots * Z_n(a_{zn}, b_{zn}), \end{aligned} \quad (1)$$

и записывается в памяти агента с помощью констант  $1 \dots (z-1)$ , операторов MAX (“+”), MIN (“\*”) и LITERAL ( $Z_n(a_{1n}, b_{1n})$ ). Для записи МЗЛ функции с 30 переменными и 256-значной логики потребуется заранее ввести в память агентов не более 16000 параметров.

Получая от генератора случайных (квазислучайных) чисел исходную последовательность  $(q_2, \dots, q_m)$ , ее подставляют в МЗЛ функцию (1) в качестве значений параметров  $x_2, \dots, x_n$  и, далее задавая  $x_1 = 0, \dots, 256$ , вычисляют ненулевую кодирующую/декодирующую последовательности  $(0 \rightarrow z'_1, 1 \rightarrow z'_2, \dots, 256 \rightarrow z'_z) / (z'_1 \rightarrow 0, z'_2 \rightarrow 1, \dots, z'_z \rightarrow 256)$ .

Защищаемые информационные массивы в памяти агента представляют собой преимущественно наборы нечетких правил “Если ...То...” и

соответствующих ФП [1]. В структуре одного нечеткого правила

$$\begin{array}{l} \text{Если } x_1 \text{ есть } m_{\text{ап1}}(x_1), \dots, x_k \text{ есть } m_{\text{ап1}}(x_k), \\ \text{То } y_1 \text{ есть } m_{\text{бп1}}(y_1), \dots, y_j \text{ есть } m_{\text{бп1}}(x_j), \text{ иначе...} \end{array} \quad (2)$$

легче всего перекодировать метки переменных  $x_1, \dots, x_k, y_1, \dots, y_j$  и метки ФП  $m_{\text{ап1}}(x_1), \dots, m_{\text{ап1}}(x_k), m_{\text{бп1}}(y_1), \dots, m_{\text{бп1}}(x_j)$ .

Следующий шаг защищенного кодирования заключается в перекодировке значений аргументов  $x_i$  и самих значений ФП  $m_{\text{п1}}(x_i)$ . Во многих случаях достаточно использовать простейшие “треугольные” ФП, на одну такую функцию достаточно перекодировать 3 числа в интервале  $0 \dots 256$ .

Секретные МЗЛ функции большой размерности обеспечивают возможность сгенерировать внутри агента очень большое количество вариантов его внутренней перекодировочной последовательностей, которое для  $z=256$  (число логических уровней) и  $n=30$  (число переменных) составит  $z^n = 256^{30} = 1,7 \cdot 10^{72}$  (из этого числа следует исключить последовательности с нулевыми элементами!). При необходимости задать одинаковый код в паре агентов, оснащенных одинаковыми МЗЛ функциями, достаточно по открытому каналу переслать второму агенту текущий набор параметров  $(q'_2, \dots, q'_m)$ , с помощью которых второй агент сгенерирует аналогичную кодирующую/декодирующую последовательность. Защищенную перекодировку внутренних данных отдельных агентов и групп агентов следует периодически обновлять.

Обсуждается вариант указанного алгоритма для 8 битного микроконтроллера, вычисляющего модельную задачу анализа расположения простых объектов (прямоугольников), перемещаемых в поле зрения TV камеры и оцифровываемых стандартными средствами.

#### *Список литературы*

1. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика, М.: Эдиториал УРСС, 2002.
2. Быковский А.Ю., Владимиров И.В., Компанец И.Н. Способы защищенной передачи правил нечетко-логического вывода в аппаратно распределенной многоагентной системе – Радиотехника, N1, 2007, с.110-120.
3. Antipov A.L., Bykovsky A.Yu., Vasiliev N.A., Egorov A.A. Protected Query Coding in Multi-Agent Optoelectronic System – Optical Memory and Neural Networks, N4, 2007.
4. Antipov A.L., Bykovsky A.Yu., Vasiliev N.A., Egorov A.A. Multiple-valued logic-protected coding for an optical non-quantum communication line – Journal of Russian Laser Research, 27, N5, 2006, p.492-505.
5. Computer Science and Multiple-Valued Logic: Theory and Applications /Ed. by Rine D.C., Amsterdam, North Holland, 1984.

А.М. АЛЕКСЕЕВ, А.В. ПАВЛОВ  
Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики

## О ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕМОНОТОННЫХ РАССУЖДЕНИЙ МЕТОДОМ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАФИИ: ЛОГИКА С ИСКЛЮЧЕНИЕМ

Предложен подход к реализации немонотонных рассуждений методом фурье-голографии, развивающий ранее разработанный способ реализации логико-лингвистического моделирования. Приведены результаты численного моделирования голографической реализации логики с исключениями.

Реализация в искусственных системах присущего человеку способа рассуждений остается одной из актуальных задач Искусственного Интеллекта (ИИ). Один из подходов к решению этой проблемы основан на использовании нечетких логик и метода логико-лингвистического моделирования (ЛЛИМ) [1]. Реализация ЛЛИМ методом фурье-голографии была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена в работах [2-4]. Логика, реализованная в этих работах, относится к классу общезначимых или монотонных логик, т.е. логик, в которых добавление новых знаний не изменяет истинности вывода. В то же время, наибольший интерес представляют немонотонные логики, в которых истинность высказывания при добавлении новых знаний может изменяться [5, 6]. Немонотонные логики более адекватны реальной обстановке, в которой приходится действовать системам ИИ и их применение позволяет увеличить адаптационные способности системы ИИ. Поэтому актуальна задача разработки модели реализации немонотонной логики.

В развитие ранее разработанного метода реализации ЛЛИМ техникой фурье-голографии, в докладе излагается подход к голографической реализации логики с исключениями как частного случая немонотонных логик.

Продукционное правило логики с исключениями может быть представлено следующим образом:

$$\text{Если } \langle P \text{ (посылка)} \rangle, \text{ то } \langle C \text{ (заключение)} \rangle, \text{ если не } \langle t \cdot E \text{ (исключение)} \rangle$$

(1),

где  $t$  - параметр, описывающий актуальность исключения  $t \in [0,1]$

Первая часть этого правила,

*Если*  $\langle P \text{ (посылка)} \rangle$ , *то*  $\langle C \text{ (заключение)} \rangle$  , (2)

известная как правило вывода «Обобщенный Modus Ponens», была реализована в работах [2-4]. Задача представленной работы заключалась в реализации оператора исключения *если не*.

Поскольку реальная физическая схема позволяет реализовать ограниченный набор логических операторов, в качестве оператора исключения был принят оператор импликации, используемый в правиле «Modus Ponens», но с инверсной зависимостью значения заключения от значения посылки. На основании ранее полученных экспериментальных данных было проведено численное моделирование реализуемой логики. Показана возможность перенастройки логики («под пользователя» или «под задачу») за счет изменения передаточной функции голограммы. В частности, введение дополнительной фильтрации в Фурье-области позволяет реализовать перенастройку логики без переобучения системы.

Таким образом, предложен и подтвержден результатами численного моделирования на основе экспериментальных данных подход к реализации немонотонных рассуждений методом голографии Фурье.

#### *Список литературы*

1. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений – Математика. Новое в зарубежной науке, вып.3, 1976.
2. Павлов А.В. Реализация логико-лингвистических моделей методом Фурье-голографии – Известия Академии Наук. Теория и системы управления, 2, 2003, с.118-125.
3. Павлов А.В., Шевченко Я.Ю. Нейро-нечеткая голографическая система: вывод на лингвистических шкалах – Труды Международных научно-технических конференций IEEE AIS'03 CAD-2003, т.1., 2003, с. 542-548.
4. Алексеев А.М. Константинов А.М., Павлов А.В. Использование метода Фурье-голографии для моделирования принципа образности мышления – Оптический журнал, т.73, №9, 2006, с.77-82.
5. Виньков М.М., Фоминых И.Б. Немонотонные рассуждения в динамических интеллектуальных системах – Новости Искусственного Интеллекта, №4, 2005, с.12-23
6. Астанин С.В., Калашникова Т.Г. Модель немонотонных рассуждений на основе нечеткой логики – Материалы Международной НТК "Интеллектуальные САПР", Таганрог, № 2, 2000, с. 81-84.

Р.В. РОМАШКО, Ю.Н. КУЛЬЧИН, А.А. КАМШИЛИН<sup>1</sup>

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

*<sup>1</sup>Университет г. Куопио, Финляндия*

## **МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ В КУБИЧЕСКОМ ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ**

Выполнено теоретическое исследование возможности углового мультиплексирования динамических отражательных голограмм в кубическом фоторефрактивном кристалле с целью создания многоканальной адаптивной интерферометрической измерительной системы.

Использование в оптических и волоконно-оптических интерферометрах динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах, позволяет создавать адаптивные измерительные системы, способные в реальных (нелабораторных) условиях устойчиво регистрировать сверхмалые физические величины (вибрации, динамические деформации, переменные силовые поля пр.) [1]. Вместе с тем, при создании многомерных распределенных волоконно-оптических измерительных систем, состоящих из большого числа сенсорных линий (волоконных световодов), возникает необходимость в использовании соответствующего количества как фоторефрактивных кристаллов, так и опорных световых пучков, что влечет собой нежелательное усложнение измерительной системы. Одним из возможных решений данной проблемы является мультиплексирование набора динамических голограмм в одном фоторефрактивном кристалле с использованием одного опорного светового пучка и создание на основе таких мультиплексированных голограмм многоканальной адаптивной системы фазовой демодуляции.

В настоящей работе теоретически исследованы особенности формирования нескольких динамических отражательных голограмм в одном фоторефрактивном кристалле кубической симметрии (точечные группы  $23$  и  $\bar{4}3m$ ) с использованием нескольких сигнальных и одного опорного световых пучков (Рис.1). Показано, что в общем случае множество когерентных световых пучков, смешиваемых в кристалле, приводит к возникновению в кристалле множества динамических голограмм двух типов: 1 – основных, формируемых парой световых пучков «сигнальный-опорный», и 2 – перекрестных, формируемых парой

«сигнальный-сигнальный». Наличие перекрестных голограмм приводит к возникновению перекрестных шумов между различными сигнальными световыми пучками (каналами). Вместе с тем теоретически показано, что при распространении световых волн в кристалле вдоль кристаллографической оси [001] перекрестные фазовые голограммы не будут формироваться в кубическом кристалле в силу анизотропии электрооптического эффекта в том случае, если вектор решетчатой перекрестной голограммы будет направлен строго перпендикулярно оси [001]. Нарушение же ортогональности приведет к возникновению перекрестных шумов, однако их уровень не превышает собственных шумов в каждом канале в широком диапазоне углов отклонения от ортогонального направления (до 15 градусов).

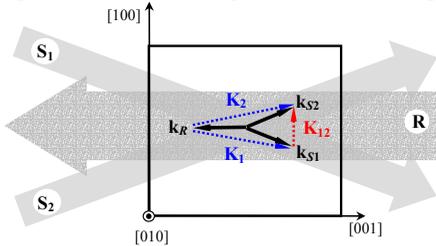


Рис.1. Геометрия углового мультиплексирования динамических отражательных голограмм в фоторефрактивном кристалле: R – опорный световой пучок; S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> – сигнальные световые пучки; K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> – волновые вектора основных голограмм, K<sub>12</sub> – волновой вектор перекрестной голограммы.

Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что перекрытие различных сигнальных пучков (каналов) приводит к ослаблению дифракционной эффективности соответствующих голограмм в силу уменьшения контраста интерференционного поля, и как следствие к уменьшению чувствительности адаптивного интерферометра в каждом канале. Вместе с тем, при достаточной фокусировке световых пучков, такое ослабление может быть сведено к минимуму. Так, при толщине кристалла 6 мм и поперечном диаметре сигнальных световых пучков ~ 1 мм, средняя степень их перекрытия составляет 50%. Формирование 20-ти каналов в одном кристалле при таком перекрытии приводит к уменьшению чувствительности в каждом канале всего на 15%. При этом время отклика голограммы в каждом канале остается практически неизменным при сохранении суммарной интенсивности световых пучков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-91015-АФ\_а).

*Список литературы*

1. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N., Launay J.-C. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V – Optics Express, v.15, N.2, 2007, p.545-555.

А.В. НЕУПОКОЕВА, А.Н. МАЛОВ, А.Н. БОРОДИН  
*Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище  
(военный институт)*

## ЗАПИСЬ ГОЛОГРАММ ИЗЛУЧЕНИЕМ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Экспериментально показана возможность записи на сухие и самопроявляющиеся слои дихромированного желатина излучением с длиной волны 0,53 мкм от твердотельного лазера с диодной накачкой.

Цель работы - определение возможности записи голограмм на дихромированном желатине излучением твердотельного лазера с зеленой (0,53 мкм) длиной волны. Применялся твердотельный лазер с диодной накачкой (типа «АТС 53-250»), работающий на принципе удвоения частоты. Известно [1], что несенсибилизированные слои дихромированного желатина (ДЖ) чувствительны к излучению диапазона 0,44-0,48 мкм. Поэтому следовало определить возможность записи голограмм излучением твердотельного лазера с диодной накачкой.

Экспериментально записаны решетки с частотой 10 лин/мм на несенсибилизированных слоях ДЖ толщиной около 200 мкм. Самопроявляющиеся (СП) слои ДЖ, представляли собой 10% желатиновую эмульсию с добавлением бихромата аммония (50% по массе сухого желатина) и 1 мл метиленового голубого на 10 мл эмульсии (в виде раствора 10 мг красителя в 100 мл воды) [2]. Время студения при температуре 15-17°C составляло 24 часа.

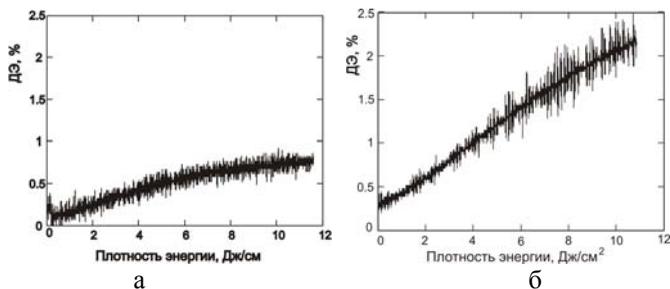


Рис. 1. ДЭ решеток с пространственной частотой 10 лин/мм, записанных на ламинированные слои толщиной 200 мкм. Интенсивность: а – 9 мВт/см<sup>2</sup>, б – 17 мВт/см<sup>2</sup>.

Обнаружено, что слои СПДЖ без красителя чувствительны к излучению с длиной волны 0,53 мкм и с ростом интенсивности, ДЭ записываемой решетки возрастает.

Была также выполнена запись дифракционных решеток с пространственной частотой до 80 лин/мм на сухие слои ДЖ с мокрым проявлением. Как исходный материал использовались фотопластинки ПФГ-04, отмытые в воде (17°C) и выдержанные в 5% растворе БХА в течение 5 мин для насыщения ионами хрома и восстановления чувствительности. Запись решеток с пространственной частотой 50 лин/мм и 80 лин/мм производилась при мощности 85 мВт (плотность мощности при записи от 0,8 до 8 мВт/см<sup>2</sup>). После записи пластинки проявлялись по стандартной методике [2] (рис. 2). Оптимальная интенсивность записи для данного типа источника лазерного излучения составляет 2 мВт/см<sup>2</sup>.

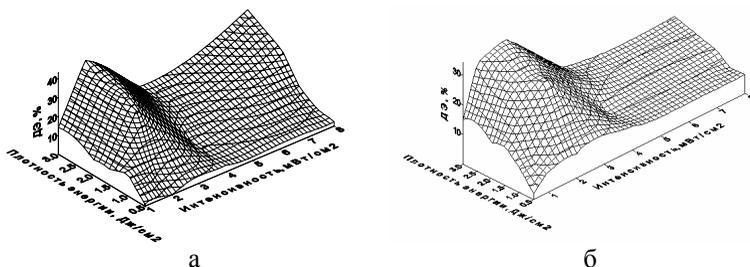


Рис. 2. ДЭ решеток с пространственной частотой 50 лин/мм (а), 80 лин/мм (б), записанных на очувствленные пластинки ПФГ\_04.

Работа выполнена по проектам РФФИ 05-08-33639, 06-08-00596 и 06-08-01109.

*Список литературы*

1. Крюков А.И., Шерстюк В.П., Дилунг И.И. Фотоперенос электрона и его прикладные аспекты, Киев: Наукова Думка, 1982, 240с.
2. Ерко А.И., Малов А.Н. Оптимизация параметров обработки слоев дихромированного желатина для записи оптической информации, Черногловка: ИФТТ АН СССР, 1979, 24с.

С.Б. ОДИНОКОВ, А.Ю. ПАВЛОВ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

## **АНАЛИЗ СХЕМ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГОЛОГРАММ С ЗАЩИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОМ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОМ ПРОЦЕССОРЕ**

Проведен анализ преимуществ и недостатков оптических схем устройств получения голограмм со скрытым кодированным изображением и идентификации их (голограмм), используя оптическое векторно-матричное умножение сигналов.

В работе были проанализированы следующие оптические схемы, применимые для реализации оптико-электронной системы идентификации голограмм:

- 1) традиционная схема голографического коррелятора по схеме Вандер Люгта;
- 2) схема голографического коррелятора с одним фурье-преобразующим объективом;
- 3) схема голографического коррелятора по модифицированной схеме Вандер Люгта.

Основными критериями анализа были: возможность реализации на основе данных схем алгоритма реализации цифрового умножения с помощью аналоговой свертки, сложность компенсации искажений вносимых ими в декодированное изображение, габариты и практическая реализация. Также был произведен анализ устойчивости данных схем к несанкционированному доступу к закодированному изображению.

Основными выводами проведенной работы является то, что, во-первых, схема голографического коррелятора по модифицированной схеме Вандер Люгта является наиболее выгодной для практической реализации в системе идентификации голограмм со скрытым кодированным изображением на основе векторно-матричного процессора, во-вторых, данная схема так же является самой устойчивой к несанкционированному доступу к закодированному изображению по критерию максимальной трудность такого доступа для злоумышленников.

С.Б. ОДИНОКОВ, И.К. ЦЫГАНОВ, И.В. БОВСУНОВСКИЙ  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

## **УСТАНОВКА СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА**

Предложена оптическая схема стенда для изготовления ДОО-ГОО по технологии Dot-matrix с использованием ЖК-ПМС. Приведены методика и результаты расчета параметров компонентов оптической схемы.

ДОО-ГОО изготовленные по технологии Dot-matrix, нашли применение в различных областях, таких как защита от подделки различных товаров, упаковка и т.д. Эти голограммы содержат набор пикселей с дифракционными решетками, имеющими различные пространственные частоты и ориентации.

Процесс изготовления представляет собой последовательное экспонирование пикселей на фоторезист. Количество пикселей очень велико (порядка  $10^5$ - $10^6$ ), поэтому время изготовления мастер матрицы значительно. Один из вариантов построения данной установки с использованием жидкокристаллического пространственного модулятора света представлен в этой работе, приведены методика и результаты расчета параметров компонентов оптической схемы, в частности репродукционного объектива.

Оптическая схема стенда для изготовления ДОО-ГОО по технологии Dot-matrix содержит когерентный источник излучения (полупроводниковый лазер). Расширяющая оптическая система формирует слабо-сходящийся пучок требуемого размера для освещения ЖК-ПМС. Этот пучок фокусируется в передней фокальной плоскости специализированного репродукционного объектива. Специализированный объектив перепроецирует изображение, выведенное на ЖК-ПМС с компьютера, на пластинку с фоторезистом, формируя пиксели требуемого размера и формы. Дифракционная картина после ЖК-ПМС представляет собой сложную структуру. В передней фокальной плоскости проекционного объектива установлен пространственный фильтр. Он пропускает только +1 и -1 порядки дифракции. В результате, эти порядки, проходя через репродукционный объектив, интерферируют в плоскости

пластинки с фоторезистом, образуя голографическую дифракционную решетку.

В связи с большим количеством пикселей и из-за специфических особенностей схемы к репродукционному объективу предъявляются следующие требования:

длина волны лазерного излучателя  $\lambda$ : 0.4416 мкм;

линейное поле зрения в пространстве предметов  $2\alpha$ : 36 мм;

линейное увеличение  $\beta$ : 1/180х;

передняя апертура: 0.0025;

расстояние от последней механической поверхности объектива до плоскости с фоторезистом должно быть не более: 4.5 мм;

расстояние от ЖК-ПМС до пространственного фильтра: 400-600 мм;

пространственный фильтр должен быть установлен в переднем фокусе репродукционного объектива на расстоянии не менее 4 мм от первой механической поверхности объектива.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Лазерные и оптико-электронные приборы и системы» была разработана и собрана многофункциональная установка для изготовления ГОЭ-ДОЭ по технологии Dot-matrix и рассчитан репродукционный объектив, характеристики которого представлены ниже.

Технические характеристики репродукционного объектива:

Рабочая длина волны ..... 441.6 нм

Линейное поле зрения в пространстве предметов  $2\alpha$ ..... 36 мм

Фокусное расстояние ..... 2,776 мм

Передний рабочий отрезок –S ..... 500 мм

Задний рабочий отрезок S' ..... 5,5 мм

Передний фокальный отрезок –S'F' ..... 0,0095 мм

Задний фокальный отрезок S'F' ..... 5,4867 мм

Номинальное увеличение ..... 1/180X

Передняя апертура ..... 0,0025

Задняя апертура ..... 0,4504

Данный объектив был применен в заявляемой установке, где показал удовлетворительные результаты при записи ГОЭ-ДОЭ.

С.Б. ОДИНОКОВ, М.С. КОВАЛЕВ, Д.С. ЛУШНИКОВ,  
В.В. МАРКИН

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ПОЛОЖЕНИЯ ЗНАКА В ГОЛОГРАФИЧЕСКОМ КОЛЛИМАТОРНОМ ПРИЦЕЛЕ**

Рассмотрены методы компенсации ухода углового положения прицельного знака в голографическом коллиматорном прицеле.

В работе проведен сравнительный анализ методов компенсации ухода углового положения прицельного знака в голографическом коллиматорном прицеле (ГКП). Было получено, что оптимально использование двух вариантов компенсации:

- стабилизация температуры при помощи нагрева и охлаждения области излучающей площадки полупроводникового лазерного диода;
- оптическая стабилизация излучения, падающего на ГОЭ, при помощи компенсационных оптических элементов.

В качестве основных компенсационных оптических элементов могут быть использованы пропускающие и отражающие дифракционные решётки, интерференционные фильтры по типу Фабри - Перо и некоторые другие оптические элементы.

В результате проведённого исследования были разработаны компенсационные оптические схемы: 1) голограмма и компенсационная дифракционная решетка расположены параллельно друг другу; 2) угол между дифракционной решёткой и голограммой составляет величину  $\alpha$  (причём с различным соотношением пространственных частот  $\nu_{\text{КДР}}$  и  $\nu_{\text{ГОЭ}}$ ); 3) угол между дифракционной решёткой и голограммой составляет величину  $\alpha$  (причём с различным соотношением пространственных частот  $\nu_{\text{КДР}}$  и  $\nu_{\text{ГОЭ}}$ ), но голограмма стоит первым элементом от объектива; 4) системы с двумя и более дифракционными элементами.

В результате проведённого исследования было выяснено, что дифракционные решётки являются наиболее эффективными по компенсации ухода углового положения прицельного знака и экономически наиболее выгодными.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, С.А. СИРОТКИН,  
Р.С. СТАРИКОВ, С.Н. СТАРИКОВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **ИНВАРИАНТНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ: РЕАЛИЗАЦИЯ В ВИДЕ БИНАРНЫХ АМПЛИТУДНЫХ ГОЛОГРАММ ДЛЯ СХЕМЫ ДИФРАКЦИОННОГО КОРРЕЛЯТОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Приводятся результаты работ по разработке инвариантных фильтров для задач корреляционного различения изображений.

Целью работ является разработка методов применения инвариантных корреляционных фильтров (КФ) в современных системах корреляционного различения изображений. Реализация КФ в случае оптоэлектронного коррелятора требует решения задачи синтеза дифракционного элемента для формирования комплексного импульсного отклика оптической системы, адекватного фильтру.

С использованием имеющегося программного обеспечения, был синтезирован КФ с линейным фазовым коэффициентом (Linear Phase Coefficient Composite filter, LPCC фильтр) [1,2], инвариантный к повороту входного объекта в диапазоне  $\pm 90$  градусов. В качестве эталонного объекта использовано бинарное контурное изображение размерности 256x256 пикс. Фильтр был рассчитан на основе 18 изображений эталонного объекта, повернутых с шагом 10 градусов. С помощью имеющегося программного обеспечения для реализации синтезированного фильтра в схеме коррелятора была рассчитана амплитудная Фурье-голограмма. Размерность голограммы – 512x512 отсчётов. С помощью стандартного лазерного фотонаборного аппарата Scitex Dolev 800 голограмма была изготовлена. Для кодирования уровней пропускания отсчётов голограммы применено частотно-модулированное стохастическое растривание. При числе градаций серого – 27 размер отсчёта голограммы составляет около 80 мкм.

С использованием КФ в схеме коррелятора Вандер Люгта проведены успешные эксперименты по инвариантному корреляционному распознаванию изображений. В ходе экспериментов в корреляционной области выходного поля коррелятора были получены адекватно локализованные корреляционные пики, уверенно сохраняющиеся при

повороте входного изображения в пределах  $\pm 90$  градусов. Примеры сигналов коррелятора, подвергнутых операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика представлены на рис.6.

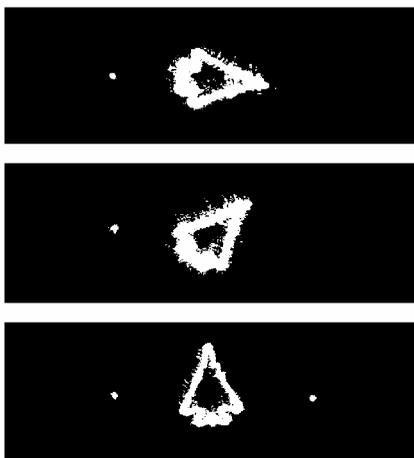


Рис. 1. Примеры сигналов коррелятора, подвергнутых операции порога на уровне 0,5 от максимального значения корреляционного пика для углов поворота 0, -45 и -90 градусов. В последнем случае в области свёртки так же присутствует пик, так как фильтр содержит симметричные положения  $\pm 90$  градусов.

Работа выполнена в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ (проект РНП.2.1.2.5657), а также при поддержке РФФИ.

*Список литературы*

1. Hassebrook L., Vijaya Kumar B.V.K., Hostetler L Linear phase coefficient composite filter banks for dictorsion-invariant pattern recognition – Opt Eng., 29, 1990, p.1033-1043.
2. Евтихийев Н.Н., Захарцев А.В., Иванов П.А., Рейзин Б.М., Сироткин С.А., Стариков Р.С. Синтез и исследование инвариантных фильтров с линейным фазовым коэффициентом для задач оптико-электронного корреляционного различения изображений – Научные технологии, т.6, №5, 2005.
3. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Злоказов Е.Ю., Сироткин С.А., Стариков Р.С. Реализация инвариантных голографических фильтров с линейным фазовым коэффициентом в схеме коррелятора Вандер Люгта – 2007, в печати.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, А.И. ВОЛОДАРСКИЙ,  
Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, Р.С. СТАРИКОВ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ**

Приводятся результаты работ по разработке инвариантных фильтров для задач корреляционного различения изображений.

Существенной проблемой реализации инвариантных корреляционных фильтров (КФ) в схемах оптоэлектронных корреляторов является ограниченность динамического диапазона реально существующих средств ввода, используемых для представления КФ в оптической системе. При этом весьма интересной с практической точки зрения представляется возможность использования бинарного представления отсчетов КФ.

Проведены работы по исследованию и реализации методов бинаризации КФ. В среде MatLab разработаны элементы программного обеспечения, позволяющие осуществлять бинаризацию амплитудных КФ. Программные средства допускают использование глобальных и локальных методов бинаризации - методов глобального порога, Отса, метода гистограмм, Бернсена, Ниблэка и др. [1]. Программы допускают варьирование формата и размеров изображения, параметров бинаризации и т.д. Разработанные программные средства были опробованы при проведении бинаризации КФ с линейной комбинацией фазовых коэффициентов. Проведен анализ ухудшения корреляционных свойств КФ при бинаризации или ограничении числа градаций серого.

Работа выполнена в рамках программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ (проект РНП.2.1.2.5657), а также при поддержке РФФИ.

### *Список литературы*

1. Прэтт У. Цифровая обработка изображений, Москва: Мир, 1982.

М.В. КОННИК, В.Г. РОДИН, С.Н. СТАРИКОВ,  
Е.Э. ТЕТЕРЕВСКИЙ

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет)*

## **КОРРЕЛЯТОР ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ ГОЛОГРАММОЙ**

Рассматривается новая реализация спектрокоррелятора, в котором в качестве голографического фурье-фильтра используется синтезированная на компьютере голограмма. Приводятся результаты экспериментов по распознаванию тестовых спектров при применении изготовленных синтезированных голограмм.

Новые возможности по анализу эмиссионных спектров излучения связаны с использованием дисперсионных оптических корреляторов, осуществляющих формирование корреляционных сигналов в монохроматическом свете. Корреляционная обработка спектров излучения протяженных источников осуществляется в таких корреляторах, называемых спектрокорреляторами, в реальном масштабе времени. В качестве корреляционных фильтров в таких устройствах используются как спектрограммы [1], так и голографические фурье-фильтры, записанные оптическим способом [2].

В работе предложена новая реализация спектрокоррелятора, в котором в качестве голографического фурье-фильтра используется синтезированная на компьютере голограмма.

Компьютерный синтез голограмм для спектрокоррелятора включает этапы: 1) подготовка графического образа, содержащего информацию о распознаваемом спектре; 2) вычисление фурье-преобразования от входной картины; 3) создание графического файла синтезированной голограммы.

Необходимым условием для формирования графического образа является то, что расстояния распознаваемых спектральных компонент от центра картины обратно пропорциональны их длинам волн  $\lambda_i p_i = \text{const}$ , где  $\lambda_i$  – длина волны  $i$ -й компоненты спектра,  $p_i$  – расстояние (в отсчетах) распознаваемых спектральных компонент от центра картины).

Для синтеза голограммы распознаваемого спектра требуются следующие исходные данные: 1) значения спектральных компонент  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  и их энергетические веса; 2) требуемое разрешение по спектру  $\delta\lambda/\lambda$ ; 3) изображение распознаваемого источника излучения.

Таким образом, на голограмму записывается информация о распознаваемом спектре в виде пространственной структуры, состоящей из набора линий спектра. Далее, при корреляционном анализе на каждой из длин волн источника излучения формируются корреляционные сигналы, причем суммарный сигнал взаимной корреляции спектра анализируемого источника излучения с распознаваемым наблюдается в строго определенном месте выходной плоскости спектрокоррелятора.

Были рассчитаны и изготовлены бинарные синтезированные голограммы для экспериментальной установки спектрокоррелятора. Максимальное количество отсчетов (512x512) и размер одного отсчета (42,3 мкм) изготовленных голограмм определялись использовавшимся устройством вывода – лазерного принтера HP LaserJet 1200. Проведены тестовые эксперименты по корреляционному распознаванию дискретных спектров протяженных источников излучения в реальном масштабе времени. Полученные результаты подтверждают работоспособность спектрокоррелятора с синтезированными голограммами при распознавании спектров излучения.

Собственное спектральное разрешение  $\delta\lambda/\lambda$  использовавшихся в корреляторе синтезированных голограмм равно 0,004. Расчетное значение разрешения для установки коррелятора составляет 0,016 и обусловлено размером входной щели. Экспериментальное значение спектрального разрешения установки, измеренное по ширине корреляционного сигнала на половине высоты, составило  $0,014 \pm 0,001$ . Однако уменьшение сигнала на 25% фиксировалось при смещении одной из трех линий спектра уже на  $\delta\lambda/\lambda = 0,005$ . Полученные результаты позволяют перейти к синтезу голограмм для дисперсионных корреляторов, обеспечивающих существенно лучшее спектральное разрешение и возможность использования при распознавании источника его пространственных характеристик, что потребует изготовления таких голограмм на специализированных устройствах, обеспечивающих высокое разрешение. Такие корреляторы могут найти применение в астронавигации, экологии и контроле окружающей среды.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Программа "Развитие научного потенциала высшей школы", проект РНП.2.1.2.5657).

*Список литературы*

1. Быковский Ю.А., Иванова С.Д., Маркилов А.А., Смажेलюк М.Ф., Стариков С.Н. Коррелятор сигналов со спектральным кодированием – Тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции по оптической обработке информации, Фрунзе, 1990, с.95.
2. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Дисперсионные корреляторы в системах оптической обработки информации – Инженерная физика, №1, 1999, с.32-35.

**ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ**

**-А-**

*Алексеев А.М. 48*

**-Б-**

*Башкеев А.А. 28*  
*Бовсуновский И.В. 55*  
*Бородин А.Н. 39, 52*  
*Быковский А.Ю. 46*

**-В-**

*Вайчас А.А. 33*  
*Витрик О.Б. 14*  
*Витухновский А.Г. 26*  
*Власов Н.Г. 8, 10*  
*Володарский А.И. 60*  
*Вольф И.Э. 12*

**-Г-**

*Гричук Е.С. 41*

**-Д-**

*Давыдов А.А. 20*  
*Ди Гиrolамо С. 16*

**-Е-**

*Евтихийев Н.Н. 58, 60*  
*Егоров А.А. 46*  
*Елютин С.О. 29*  
*Есепкина Н.А. 35*

**-Ж-**

**-З-**

*Завестовская И.Н. 24*  
*Злоказов Е.Ю. 58, 60*

**-И-**

*Исаев А.А. 26*  
*Иванов С.И. 35*

**-К-**

*Кайтуков Ч.Б. 43*  
*Камишлин А.А. 16, 50*

*Ковалев М.С. 57*  
*Козловский К.Н. 26*  
*Комоцкий В.А. 18*  
*Конник М.В. 37, 61*  
*Криштон В.В. 7*  
*Крохин О.Н. 24*  
*Кузнецов А.С. 44*  
*Кузьмина М.Г. 41*  
*Кулиш С.М. 8, 10*  
*Кульчин Ю.Н. 14, 16, 50*

**-Л-**

*Лавров А.П. 35*  
*Ланцов А.Д. 14*  
*Лушников Д.С. 57*

**-М-**

*Маврицкий А.О. 22*  
*Маймистов А.И. 29, 31*  
*Малов А.Н. 12, 33, 39, 52*  
*Манькин Э.А. 37, 41*  
*Маркин В.А. 39*  
*Маркин В.В. 57*  
*Менькова Н.А. 24*  
*Молодяков С.А. 35*

**-Н-**

*Неупокоева А.В. 33, 52*

**-О-**

*Одинокоев С.Б. 44, 54, 55, 57*  
*Оженко С.С. 29*

**-П-**

*Павлов А.В. 48*  
*Павлов А.Ю. 54*

**-Р-**

*Ромашко Р.В. 16, 50*

**-С-**

*Сироткин С.А. 58*  
*Соколов Ю.М. 18*  
*Сорокина Е.А. 31*

*Стариков Р.С. 58, 60*

*Стариков С.Н. 37, 58, 61*

*Сычевский А.В. 12*

*Сюй А.В. 5*

**-Г-**

*Тетеревский Е.Э. 61*

*Тимакин А.Г. 20*

**-У-**

**-Ф-**

**-Х-**

**-Ц-**

*Цыганов И.К. 55*

**-Ч-**

*Чехлова Т.К. 20*

**-Ш-**

*Шевченко Е.В. 33*

**-Щ-**

**-Э-**

**-Ю-**

**-Я-**

*Яценко Ю.П. 22*