

Секция 5. Новые принципы оптической передачи, обработки и хранения информации

ВЫСОКОТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ И СЕКТОРНЫХ ГАРМОНИК ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Литовченко С.Н.,
Стариков Р.С., Шевчук А.В.

Московский Инженерно-Физический Институт
(государственный университет), Москва, Россия

Приводятся результаты моделирования работы оптоэлектронной схемы прецизионного измерения кольцевых и секторных гармоник пространственного спектра интенсивности для задач инвариантного распознавания изображений.

Методы распознавания изображений, основанные на вычислении кольцевых и секторных гармоник Фурье-спектра интенсивности привлекательны для применения благодаря возможности получения набора признаков, инвариантного не только к сдвигу входного изображения, но и к его повороту и к изменению масштаба.

Вычисление (измерение) пространственного спектра интенсивности изображения в дифракционной оптической системе основано на известном свойстве линзы формировать в фокальной плоскости дифракционную картину Фраунгофера, с точностью до постоянного фазового множителя совпадающую с преобразованием Фурье двумерного распределения светового поля на входе.

Схемы измерения кольцевых и секторных гармоник пространственного спектра интенсивности изображений, базирующиеся на вариантах массивов фотодетекторов секторно-кольцевой топологии¹⁻³ просты в реализации и обладают высоким быстродействием. В настоящее время имеются сведения об успешном использовании сигналов подобных схем в системах распознавания изображений, основанных на нейросетевом принципе⁴.

Основным недостатком схем с фотодетекторами секторно-кольцевой топологии является аналоговая, а следовательно весьма невысокая точность измерений гармоник, ограничивающаяся, главным образом, динамическим диапазоном фоточувствительных площадок. Схема, использующая массив фотодетекторов модифицированной топологии, позволяет проводить измерение кольцевых и секторных гармоник с высокой цифровой точностью за счет увеличения числа каналов регистрации оптического сигнала и использования относительно несложной электронной цифровой постобработки.

Для моделирования работы схемы измерения кольцевых и секторных гармоник с повышенной точностью была собрана экспериментальная установка, позволяющая измерять пространственные спектры изображений с избыточными точностью и разрешением. В ходе эксперимента проводилось измерение изображений пространственных спектров для неизмененных, повернутых, масштабированных изображений и изображений, одновременно подвергнутых повороту и масштабированию. В экспериментах использовались черно-белые контурные

изображения с различным разрешением – от 64x64 до 512x512 пикс. Проведение серий снимков позволило также произвести усреднение и оценить уровень погрешностей экспериментального макета.

Измеренные изображения пространственных спектров были подвергнуты цифровой постобработке. Для проведения постобработки использовалось специально разработанное программное обеспечение. Программное обеспечение позволяет

1. удалять наследуемую ошибку измерений,
2. эмулировать работу элементов массива фотодетекторов специальной топологии с числом элементов от 8x8 до 256x256 и точностью представления сигнала элемента массива от 6 до 8 бит, а также
3. производить суммирования, необходимые для получения значений гармоник.

При постобработке результатов измерений были выделены инвариантные векторы, соответствующие наборам кольцевых и секторных гармоник измеренных пространственных спектров. Значения компонент инвариантных векторов полученных при постобработке не превышали погрешности схемы, оцененные по сериям измерений для неискаженных объектов.

Таким образом, проведенные исследования показывают возможность достижения ожидаемого повышения точности измерений в моделируемой схеме. В настоящее время можно ожидать, что точность измерений в системе, работающей с телевизионной частотой кадра, может составлять до 13-15 верных бит в каждой гармонике при общем числе измеряемых гармоник 256.

Работа выполнена при поддержке ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)» Минобрнауки России, а также при поддержке РФФИ.

1. Lendaris G.G., Stanley G.L. *Proc. IEEE*, **58**, No. 2, 198-216, (1970).
2. N. George, A.L. Kazdan, *Proc. Opt. Electron. Syst. Des. Conf.*, Calif. 494-503, (1975)
3. D. Clark. *Proc. Vision'87 Conf.*, (Soc. Manuf. Eng., Dearborn, MI.). 7-23, 7-49, (1987).
4. AOS Inc., *Odin system*. (2005).

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ВЕКТОР-МАТРИЧНЫЙ ПРОЦЕССОР: СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Стариков Р.С.

Московский Инженерно-Физический Институт
(государственный университет), Москва, Россия

В работе представлены результаты анализа реалистичных архитектур оптоэлектронных вектор-матричных процессоров. Рассматриваются возможные варианты процессоров, использующих перспективные методы представления обрабатываемых величин. Приводятся оценки скорости вычислений, точности, требуемых объема предобработки и постобработки в зависимости от используемой архитектуры и размерности процессора.

Современные успехи в создании оптической и оптоэлектронной элементной базы обусловили новый подъем интереса к оптоэлектронным вектор-матричным процессорам (ОВМП) и обеспечили появление первых относительно успешных попыток создания коммерчески конкурентоспособных вариантов их реализаций¹. С момента своего появления, ОВМП привлекают внимание исследователей и разработчиков прежде всего, теоретически чрезвычайно высоким быстродействием, объясняемым параллелизмом оптики². С другой стороны, ОВМП оперируют с дискретными данными, что в сочетании с базовостью аппарата линейной алгебры позволяет надеяться на некоторую степень универсальности их применения. Сложившаяся практика показывает, что наиболее привлекательным представляется использование ОВМП в составе цифровых систем обработки информации. При этом принципиальным недостатком ОВМП оказывается аналоговое представление результата вычислений и соответствующие ограничения его точности. Возникает необходимость в предобработке входных данных и постобработке результата; при этом, уровень необходимых аппаратных, и, в случае использования алгоритмов повышения точности, вычислительных затрат в существенной мере определяет конкурентоспособность создаваемой на основе ОВМП вычислительной системы.

Предполагается, что конкурентоспособность ОВМП по сравнению с другими вычислительными средствами определяется:

1. вычислительными параметрами,
2. схемотехническими параметрами.

Среди первых важнейшими являются скорость вычислений и точность. Ко вторым относятся параметры, определяющие технические требования, предъявляемые процессором к другим узлам вычислительной системы при подаче входных данных, съеме, поддержании и постобработке результата и т.п. В данной работе, отвлекаясь от конкретной реализации собственно схемы оптического процессора, предлагаются результаты анализа принципиальных схемотехнических ограничений, возникающих при создании ОВМП и определяющих в итоге их конкурентоспособность и перспективность.

Рассмотрена архитектура ОВМП, с точки зрения схемотехники. С учетом результатов анализа алгоритмов повышения точности³, рассмотрены методы повышения точности ОВМП, использующие принцип свертки дискретных последовательностей и получены оценки скорости и точности вычислений возможных реалистичных вариантов схем ОВМП.

Для рассматриваемых вариантов архитектур ОВМП проведен детальный анализ важных, по мнению автора, схемотехнических параметров, среди которых

1. схемотехнические ограничения возможной размерности схемы N , вызванные ограниченностью выходного динамического диапазона,
2. коэффициенты разветвления по входу и по выходу,
3. объем и скорость проведения вычислений, необходимых для предобработки и постобработки данных ОВМП.

Результаты анализа показывают, что при применении ОВМП в цифровой вычислительной системе, несомненными преимуществами перед электроникой могут обладать только схемы аналогового ОВМП и точных ОВМП работающих по схеме с временным интегрированием (ОВМП ВИ).

В случае аналогового ОВМП при бинарном входном векторе и выходном динамическом диапазоне $D=128$ различных уровней сигнала, для ОВМП размерности $N=100$ тактовая частота работы процессора f_T ограничивается, главным образом, скоростью работы АЦП и легко может достигать единиц ГГц. При $f_T=1$ ГГц

быстродействие может составить около 5×10^{13} опер/с при семибитной точности результата и аналоговом коэффициенте разветвления по выходу 100.

В случае точных ОВМП скорость ограничивается возможной скоростью вычислений постобработки. При использовании цифрового представления входных величин ОВМП по основанию $(k+1)=2$ и их разрядности $L=8$ бит (или, что эквивалентно, $(k+1)=4$, $L=4$), $D=256$ различных уровней сигнала, $N=100$ и $f_T=100$ МГц, пиковое быстродействие может достигать 10^{12} опер/с при 16-17 битной точности результата и при аналоговом коэффициенте разветвления по выходу 100. Электронный сопроцессор постобработки должен обладать при этом быстродействием на уровне 10^{10} опер/с.

По сути, для лучших вариантов ОВМП, следует говорить об их использовании в качестве специализированного вычислителя. В случае точного ОВМП, его быстродействие может превышать в $N - 2N$ раз допустимое быстродействие постобработки его результата.

1. Lenslet corp., EnLight256[®] 8000 Giga MAC/sec fixed points DSP. (2004).
2. Goodman J.W., Dias A.R., Woody L.M. *Opt. Lett.* **2**, 1-3, (1978).
3. Gary C.K. *Appl. Opt.* **31**, 6205-6211, (1992).

ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0,3\%)$

Строганов В.И., Сюй А.В., Лихтин В.В.*

Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Хабаровск, Россия

*Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,
Комсомольск-на-Амуре, Россия

Показано, что запись изображений нити накала происходит наилучшим образом при ориентации световой полоски перпендикулярно полярной оси кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (0,3 %).

Известно, что при облучении сегнетоэлектрического кристалла светом в нем работают несколько эффектов: фотовольтаический, пироэлектрический, электрооптический и фоторефрактивный¹⁻³. Запись изображений происходит за счет разделения заряда (электрооптический эффект), который может инициироваться электрическим полем световой волны, тепловым полем световой волны или внешними электрическими и тепловыми полями³.

В данной работе исследуется возможность записывать изображение источника света (нити накала лампы). В качестве источника света используется лампа накаливания ПЖ-1000, объектом исследования является кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (0,3 %) с геометрическими размерами $1,9 \times 12 \times 12$ мм³ вдоль кристаллографических осей $X \times Y \times Z$ соответственно. Свет от лампы фокусируется на переднюю грань кристалла в виде восьми примерно параллельных полос (форма нити накала лампы). На рис.1 представлено изображение нити накала лампы при ориентации нити накала перпендикулярно полярной оси кристалла. Уже при угле между нитями накала и полярной осью кристалла в 30° изображение записывается гораздо хуже. Если нити накала ориентировать параллельно полярной оси кристалла, то изображение практически не записывается, записываются только перпендикулярные составляющие изображения.

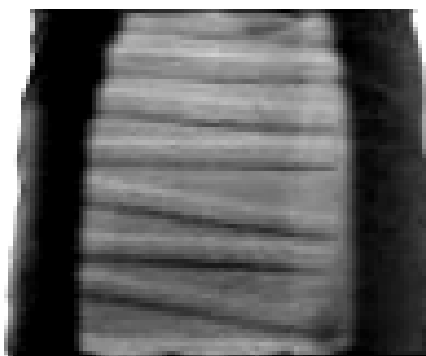


Рис.1. Записанное изображение нити накала лампы

При фокусировке световой полоски размерами $5 \times 12 \text{ мм}^2$ от одной нити накала на переднюю грань кристалла, ориентированную параллельно его полярной оси хорошо записывается изображение нити, и даже его такие мелкие детали как витки спирали из которых состоит нить. Во всех случаях запись происходит за 60-100 секунд. При дальнейшем облучении кристалла изображение становится более контрастным и за 300-350 секунд набирает наилучший контраст. Изображение сохраняется контрастным при комнатной температуре в темноте около суток.

Запись изображения нити накала также зависит от температуры окружающей среды. При температуре окружающей среды $40-85 \text{ }^\circ\text{C}$ изображение записывается дольше (8-15 минут) и хранится дольше (35-40 часов). Если превысить температуру $85 \text{ }^\circ\text{C}$, то запись изображения затрудняется, так как при $150 \text{ }^\circ\text{C}$ уже стирается наведенная оптическая неоднородность.

При записи изображения нити накала лампы одновременно регистрировалось напряжение электростатическим вольтметром с граней кристалла перпендикулярных его полярной оси. Любопытным фактом является то, что в первоначальный момент наблюдается резкий всплеск напряжения, затем плавное достижение максимума и плавный спад до нуля по экспоненциальному закону. При отключении лампы форма кривой напряжения от времени повторяется, причем всплеск напряжения по величине примерно одинаковый с первоначальным в случае если световая полоска параллельна полярной оси кристалла и больше в 1,5 раза в случае если световая полоска перпендикулярна полярной оси кристалла. Величина максимума зависит от ориентации световой полоски по отношению к полярной оси кристалла. При перпендикулярной ориентации наблюдается наименьшее напряжение, а при параллельной ориентации наибольшее, причем по величине примерно в два раза больше. Время релаксации напряжения после выключения лампы одинаковое как при перпендикулярном положении световой полоски по отношению к полярной оси кристалла, так и при параллельном положении (~ 20 минут).

Если на кристалл воздействовать направленным тепловым потоком, то форма кривой напряжения от времени идентична кривой при облучении светом от лампы накаливания с ориентацией световой полоски перпендикулярно полярной оси кристалла. Время релаксации зависит от мощности теплового потока. Чем больше мощность, тем больше время релаксации и максимум напряжения. Изображение сечения теплового потока не записывается в кристалле. При одновременном облучении кристалла светом и воздействии направленного теплового потока записи изображения нити накала нет, хотя напряжение фиксируется с похожей кинетикой.

Наиболее вероятно, что запись нити накала обусловлена фоторефрактивным эффектом, который проявляется при облучении кристалла светом. Фотовольтаический и пироэлектрический эффекты являются своеобразными

катализаторами при записи изображения. Визуализация изображения происходит только при наблюдении на просвет, причем фронт световой волны должен повторять форму записанного изображения для наилучшего контраста.

1. Ю.С. Кузьминов, *Ниобат и танталат лития – материалы для нелинейной оптики*, М.: Наука, 288 с, (1975).
2. Б.Н. Стурман, В.И. Фридкин, *Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии и родственные явления*, М.: Наука, 208 с, (1992).
3. И.Ф. Канаев, В.В. Малиновский, *Физика твердого тела*, 24, №7, 2149-2158, (1982).

PARALLEL-HIERARCHICAL TRANSFORMATION AS THE SYSTEM MODEL OF NEUROLIKE SCHEME OF DATA PROCESSING

Kozhemyako V.P., Timchenko L.I. *, Yarovyy A.A.

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

*Kyiv University of Economy and Transport Technologies, Kyiv, Ukraine

Unified methodological approach was developed for analysis of parallel processes. This approach considers influence of structural hierarchy in dynamics, in other words it tracks processes of spatial areas transformation of correlated and generation of uncorrelated in time elements of generated network, at the time of transition of the network from one stable stage to another. The main feature of the proposed method is the studying of the dynamics of spatial-correlated procedure for transformation between current and output units in neural network. This procedure gives an opportunity to present processing in neural network as the process of parallel-sequential transformation of diverse image components and consideration of temporal characteristics of transformation. In addition, physical parameters (as amplitude, frequency, phase or input image texture) of input elements, which are involved in correlation-decorrelation process, are determined by the type of used transformation depended on the class of current tasks.

The given research offers new approach to the creation of computing medium - of parallel-hierarchical (PH) networks, being investigated in the form of model of neurolike scheme of data processing. The approach has a number of advantages as compared with other methods of formation of neurolike media (for example, already known methods of formation of artificial neural networks). The main advantage of the approach is the usage of dynamics of multilevel parallel interaction of information signals at different hierarchy levels of computer networks, that enables to use such known natural features of organization of computations in cortex as: topographic nature of mapping, simultaneity (parallelism) of signals operation, inlaid cortex, structure, rough hierarchy of the cortex, spatially correlated in time mechanism of perception and training. The formation of multi-stage PH networks assumes the process of sequential transformation of correlated and formation of decorrelated in time elements of neural networks at its transition from one stable state into another. The key feature of the offered approach is analysis of dynamics of spatially correlated mechanism of transformation of current and formation of resultant elements of neural networks. Such mechanism allows to present in a new way the

processing in neural networks as the process of parallel-sequential transformation of various components of image and account of time responses of transformation. Physical contents of input elements of neural networks, that participate in correlation - decorrelation, such as, for example, the amplitude or frequency, phase or energy of signals, cohesion or texture of images, is determined by the type of transformation being used, the selection of which depends on the class of problems being solved. In general view the multistage concept regarding image processing can be formulated in the following way. The image analysis presents sequential transformation of concurrent and detection of discrepant in time image components at transition of neural networks elements from current energy state with certain space coordinates into states with less energy with other space coordinates. Such process of image analysis occurs at many stages, each of which includes fulfilment of above-stated procedure. The condition for transition of image components at higher level is availability of dynamics of mutual coincidence of intermediate results of processing in time in parallel channels of lower layer. The outcome of image analysis is formed from insulated in time-space area image components.

In the given research considers problems connected with the creation of efficient system analysis of parallel processes, that would allow to change structural hierarchy in dynamics, that is put forward while development of promising computing systems.

The researches shows, that the most promising and studied means intended for presentation of hierarchical structures is a tree-like structure¹. Main examples of tree-like structures application as hierarchical description in terms of decomposition of the target in space have been examined. It is noted, that the existence of strictly tree-like order relations between levels of hierarchy structure is not obligatory^{1,2}. These relations may exist within one hierarchical level. The second, not less important version of hierarchical structures are those structures that combine aim decomposition in temporal and spatial planes. They are called spatial-temporal hierarchical structures, that realize the method of spatial-multilevel data representation and temporal-network principle of their analysis. Two groups of spatial-temporal hierarchical structures are suggested: pyramidal and parallel-hierarchical, correspondingly with strong and weak links. The given groups are investigated on model, algorithmic, structural-functional, system and circuit levels^{1,3,4}.

The suggested work gives system notion of neurobiological process in the form of convergent-divergent structures as concept base needed for PH networks construction. For this purpose the results of modern histological and electrophysiological studies have been analyzed¹. The analysis shows that in sensor and, particularly, in associative zones of the cortex along with vertical neuron routes there exists also numerous horizontal neural routes, which connect nerve cells situated near each other^{1,2,3}. Taking into account this peculiarity it is suggested to take into consideration the horizontal routes in hierarchical structure of PH transformation, as a result we obtain the structure of 3D network. It has been noted that in case of such mixed usage of neuron routes: horizontal route - vertical route - horizontal route etc., of each level of the networks temporal shift is formed, described in early 1970's in structures of one-dimensional N networks by Professor W.Grenander, and later, in 1980's the shift was suggested on 2D optoelectronic devices in the works of Professor V. Kozhemyako⁴.

1. V.P. Kozhemyako, Yu.F. Kutaev, S.V. Svechnikov, L.I. Timchenko, A.A. Yarovyv Parallel-hierarchical transformation as the system model of effective artificial intelligence tools. *Monograph*. – Vinnytsia, Universe- Vinnytsia. – 324 pages, (2003).

2. L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, V.P. Kozhemyako, A.A. Yarovyuy, A.A. Gertsiy, A.T. Terenchuk, N.Shweiki, *Proc. SPIE*, 4790, 465-479, (2002).
3. V.P. Kozhemyako, L.I. Tymchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Yaroviy, *Optoelectronic Information-Power Technologies*, №1, 110-124, (2001).
4. V.P. Kozhemyako, L.I. Timchenko, Yu.F. Kutaev, A.A. Gertsiy, A.A. Yarovyuy, N.I. Kokryatskaya, N.P. Grebenyuk, O.A. Poplavskyy, *Proc. SPIE*, 5175, 222-236, (2003).
5. V.P. Kozhemyako, *Optoelectronic logic-temporal information-computing environments. Monograph.* – Tbilisi, Metsniereba. – 368 pages, (1984).

УПРАВЛЯЕМАЯ СВЕТОМ НАНОКОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИК- ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Михайлов В.Н., Стаселько Д.И.

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Предложено использовать голографические наноконпозиции на основе галогенидов серебра для записи информации в ближнем ИК-диапазоне спектра в режиме импульсного разрушения короткоживущих первичных продуктов фотолиза. Показана возможность реализации на таких материалах высоких значений чувствительности и разрешающей способности, необходимых для записи импульсных голограмм, в сочетании с длительной сохраняемостью фотослоя.

Несмотря на имеющиеся в настоящее время успехи в разработке высокочувствительных устройств для регистрации ИК-излучения, они по совокупности свойств ещё далеки от совершенства. Так, высокочувствительные пироэлектрические видиконы относительно дороги и имеют невысокую разрешающую способность. Другие способы записи, как например, использующие эффект абляции некоторых материалов (желатин, масляные пленки, воск и т.д.) обладают существенно большим разрешением, но имеют низкую чувствительность и небольшой динамический диапазон. Недостаточный динамический диапазон имеют также устройства визуализации с использованием холестерических жидких кристаллов. Наибольшую разрешающую способность имеют голографические галогенидосеребряные эмульсии, сенсibilизированные красителями, обеспечивающими поглощение ИК-излучения. Однако, такие эмульсии обладают существенно более низким временем хранения, поскольку их сенсibilизация к ИК-излучению значительно увеличивает скорость их вуалирования.

Собственная чувствительность спектрально несенсibilизированных нанокристаллов галогенидов серебра лежит в диапазоне длин волн $\lambda < 0,4$ мкм. Таким образом, излучение ИК-диапазона ($\lambda > 700$ нм) является неактивным для данной среды, так как энергия квантов ИК-излучения существенно меньше ширины запрещенной зоны.

В работе ¹ было предложено использовать для регистрации ИК-излучения в наноконпозициях галогенидов серебра эффект Гершеля, т.е. разрушение непрерывным излучением стабильных многоатомных частиц фотолитического серебра - центров скрытого изображения и проявления. Такой подход позволил

реализовать значения дифракционной эффективности голограмм до 25%, при экспозициях $10^3 \dots 10^4$ Дж/см², что на 5-6 порядков превосходит экспозиции, необходимые для записи голограмм актиничным излучением.

В данной работе для решения этой проблемы использовалось явление импульсного дефотолита, связанного с разрушением импульсами неактиничного излучения не конечных, а первичных продуктов фотолита^{2,3}. Принцип записи основан на образовании под действием импульсов света промежуточных короткоживущих ловушек захвата, глубина которых ($0,65 \text{ эВ} < E < 1,1 \text{ эВ}$) обуславливает поглощение ИК-излучения на длинах волн $0,7 \text{ мкм} < \lambda < 1,5 \text{ мкм}$. При высокой интенсивности такого ИК-излучения захваченные фотоносители за время импульса могут многократно освобождаться из ловушек, что повышает вероятность их потери на центрах рекомбинации, конкурирующих с центрами чувствительности.

Таким образом, действие ИК-излучения приводит к увеличению результирующей вероятности потерь фотоэлектронов, участвующих в образовании кластеров фотолитического серебра и снижению квантового выхода фотолита и числа центров проявления. Как и в эффекте Гершеля, это вызывает снижение плотности (просветление) проявленного фотографического изображения.

Экспериментально изучена чувствительность к дефотолиту нанокпозиций AgBr на основе промышленных и лабораторных образцов голографических эмульсий с размерами кристаллов от 25 до 90 нм при изменении в широком диапазоне условий экспонирования: длины волны неактиничного излучения, длительности импульсов и временного сдвига между ними, а также уровня актиничной засветки. Показано, что предложенный метод записи отличается достаточно высокой чувствительностью к ИК излучению, составляющей $0,01 \dots 1$ Дж/см². В отличие от чувствительности к актиничному излучению, максимальная ИК-чувствительность достигается при длительностях, составляющих $10^{-8} \dots 10^{-7}$ с. Кроме того, скорость включения ИК-чувствительности фотослоев зависит от длины волны записи, изменяясь на два порядка (от 10^{-10} до 10^{-8} с) при переходе от длин волн $1,1 \dots 1,3$ мкм к длине волны $0,69$ мкм. Такое различие связано с разной природой первичных продуктов фотолита, участвующих в записи информации. В первом случае скорость включения определяется временем жизни свободных электронов в зоне проводимости, тогда как во втором, ИК-излучение освобождает электроны из более глубоких центров, возникающих на последующих стадиях фотолита, скорее всего, атомов фотолитического серебра, энергии фотоионизации которых составляют $1,6 \dots 1,9$ эВ⁴. Высокая ИК-чувствительность сохраняется в диапазоне времён $10^{-7} \dots 10^{-8}$ с, а затем падает в результате снижения скорости рекомбинации.

Практическое отсутствие тепловых и ионных стадий обеспечивает высокую разрешающую способность ($> 1000 \text{ мм}^{-1}$) и быстроедействие метода. Эксперименты по голографической записи информации проводились на фотоэмульсиях ВРП с использованием пространственной частоты, равной 1000 мм^{-1} , длины волны ИК-излучения $1,06$ мкм и длительности импульса 10^{-8} с. Дифракционная эффективность полученных амплитудных голограмм соответствовала теоретическому пределу, как и в случае записи актиничным излучением на длине волны $0,53$ мкм. Это позволяет прогнозировать возможность получения на этих фотоэмульсиях фазовых голограмм с эффективностью до 50-70%, достигнутой ранее при записи голограмм актиничным излучением⁵.

1. A. Graube, *Appl. Phys.Lett.*, **27**, 136–137, (1975).

2. В.Н. Михайлов, Д.И. Стаселько, *Оптика и спектроскопия*, **75**, №5, 1001-1008, (1993).
3. А.А. Бугаев, В.Н. Михайлов, Д.И. Стаселько, С.А. Тихомиров, *Оптика и спектроскопия*, **98**, №2, 280-287, (2005).
4. С.С. Охотников, А.Н. Латышев, О.В. Овчинников, *Журн. науч. и прикл. спектроскопии*, **70**, №6, 721-724, (2003).
5. V.N. Mikhailov, J.Y. Son, O.V. Grinevitskaya, H.S. Lee, Y.J. Choi, *Proc. SPIE*, **2688**, 155-161, (1996).

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgCdTe

Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М.

Сибирский физико-технический институт, Томск, Россия

Экспериментально исследованы фотоэлектрические характеристики МДП-структур на основе гетероэпитаксиального HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Интерес к МДП-структурам на основе HgCdTe обусловлен необходимостью пассивации поверхности матриц фотодиодов на основе данного материала, а также новыми возможностями создания монолитных фотоприемников с обработкой сигнала внутри фоточувствительной матрицы на основе HgCdTe¹⁻³. Использование метода молекулярно-лучевой эпитаксии предоставляет возможности создания пленок HgCdTe с заданными профилями распределения по толщине компонентного состава и легирующей примеси. Использование таких варизонных структур позволяет улучшить характеристики фотоприемных устройств за счет управления свойствами приповерхностной области полупроводника.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований зависимостей фотоэдс, емкости и проводимости от напряжения, частоты и температуры для МДП-структур HgCdTe/SiO₂/Si₃N₄ и HgCdTe/АОП. МДП-структуры формировались на основе гетероэпитаксиальных варизонных пленок Hg_{1-x}Cd_xTe электронного (x=0.21-0.32) и дырочного (x=0.22) типов проводимости, выращенных на подложках из GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Выявлены особенности электрофизических и фотоэлектрических свойств МДП-структур на основе HgCdTe, связанные с большими значениями сопротивления объема эпитаксиальной пленки, а также с наличием приповерхностных варизонных слоев. Показано, что сопротивление объема может приводить к уменьшению измеряемых значений емкости диэлектрика в режиме обогащения, а также к появлению максимумов емкости в начале обогащения. Предложена методика, позволяющая исключить влияние сопротивления объема на измеряемую емкость МДП-структуры⁴.

Установлено влияние приповерхностных варизонных слоев на вид зависимостей фотоэдс от напряжения смещения и температуры. Показано, что независимо от типа использованного диэлектрического покрытия наличие приповерхностных широкозонных слоев приводит к реализации классического вида зависимости фотоэдс от напряжения смещения. Для МДП-структур без варизонных слоев при компонентном составе CdTe x=0.22 типичен спад фотоэдс в режиме сильной инверсии (рис.1). Измерения вольт-фарадных характеристик позволили установить, что в МДП-структурах без варизонного слоя вблизи границы раздела

присутствуют глубокие уровни с энергией 0.04 эВ от потолка валентной зоны. Показано, что для МДП-структур на основе n-HgCdTe с $x=0.22$ при низких температурах существенны процессы туннельной генерации через глубокие уровни в приповерхностном слое полупроводника.

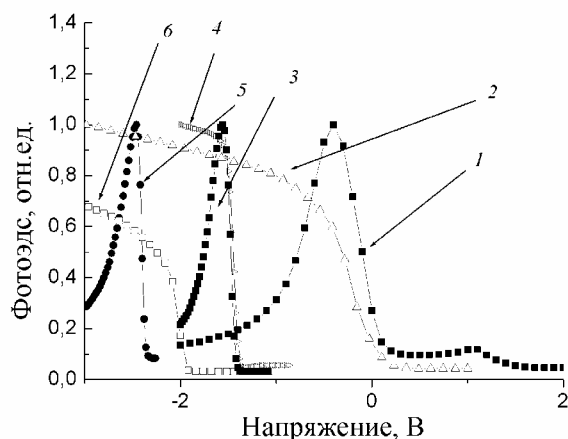


Рис.1. Зависимости фотоэдс от напряжения для МДП-структур на основе HgCdTe($x=0.22-0.23$) с варизонным слоем(2,4,6) и без варизонного слоя(1,3,5)

Измерения температурных зависимостей фотоэдс позволили установить, что при различия этих зависимостей для структур с варизонными слоями и без варизонных слоев наблюдаются при низких температурах и связаны с дополнительным туннельным механизмом рекомбинации через глубокие уровни в структурах без приповерхностных широкозонных слоев.

Экспериментально исследовано влияние концентрации основных носителей, а также наличия варизонных слоев на объемное время жизни неосновных носителей заряда для МДП-структур на основе n-HgCdTe. Измерения частотных зависимостей фотоэдс свидетельствуют о том, что объемное время жизни в несколько раз больше в структурах с приповерхностными варизонными слоями, что связано с исключением влияния рекомбинации на поверхности на время жизни неосновных носителей заряда в объеме полупроводника. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования МДП-структур с варизонными слоями для создания матриц монолитных фотодетекторов, действующих в спектральных диапазонах 3-5 и 8-12 мкм.

1. А. Рогальский, *Инфракрасные детекторы*, Нвсб: «Наука», 636 с, (2003).
2. В.Н. Овсяк, Г.Л.Курышев, Ю.Г. Сидоров и др. *Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона*. Нвсб.: «Наука», 376 с, (2001).
3. А.В.Войцеховский, В.Н.Давыдов *Фотоэлектрические МДП-структуры из узкозонных полупроводников*, Томск: Радио и связь, 327 с, (1990).
4. А.В. Войцеховский, С.Н. Несмелов, С.М. Дзядух, *Известия ВУЗов. Физика*, №6. С.31-37, (2005).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МАЛОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА

Волынский М.А.

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Исследован метод дискретной линейной фильтрации Калмана применительно к восстановлению амплитуды интерференционных сигналов. Проведено сравнение с методом синхронной демодуляции.

Оптические бесконтактные методы контроля объектов предпочтительны в биомедицине, при исследовании свойств материалов и в других задачах. Из них наиболее точными являются интерференционные методы. Интерференционный сигнал содержит информацию о свойствах исследуемого объекта. При обработке сигналов необходимы точные и помехоустойчивые методы их обработки и восстановления амплитуды. Особый интерес представляют адаптивные фильтры рекурсивного типа, такие как фильтр Калмана¹⁻³.

Рассмотрим последовательность точек исследуемой поверхности, расположенных на одной прямой (оси x). Изменение рельефа происходит в соответствии с нестационарным уравнением Ланжевена¹:

$$\frac{dh(x)}{dx} = -\alpha h(x) + w_h(x), \quad (1)$$

где $h(x)$ – отклонение рельефа, $w_h(x)$ – случайный шум. Для каждой точки поверхности было проведено моделирование интерференционного сигнала, получаемого в соответствующей точке плоскости наблюдения при изменении положения опорного отражателя. Этот сигнал описывается формулой

$$s(x, y) = s_0 + s_m(x, y) \cos(2\pi fy) + n(x, y), \quad (2)$$

где s_0 – фоновая составляющая сигнала, f – частота, $n(x, y)$ – случайный белый гауссовский шум⁴, $s_m(x, y)$ – амплитуда, форма которой близка к гауссовской:

$$s_m(x, y) = A \exp\left(-\frac{[y - h(x)]^2}{\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где A – константа, σ – константа, зависящая от свойств источника света. Амплитуда сигнала $s_m(x, y)$ содержит информацию о фазовой задержке в измерительном тракте³, которую и требуется определить. Отклонение рельефа $h(x)$ можно определить с высокой точностью в широком диапазоне допустимых значений по положению максимума функции $s_m(x, y)$. В результате численного моделирования для каждой точки были получены интерференционные сигналы, каждый из которых описывается уравнениями (2) и (3). При моделировании использовались следующие параметры интерференционной системы: центральная длина волны 400 нм, длина когерентности излучения источника 10 мкм, шаг смещения опорного отражателя по оси y 0,016 мкм, диапазон отклонения поверхности 80 мкм, шаг дискретизации по оси x 1 мкм.

Рассмотрим восстановление амплитуды интерференционного сигнала для строки интерференционной картины. На рис. 1 представлены интерференционный сигнал, полученный в результате численного моделирования, после вычитания фоновой составляющей и оценка его амплитуды. Среднее квадратическое

отклонение (СКО) оценки амплитуды, вычисленное для каждой точки и усредненное по всему сигналу, составило 3%.

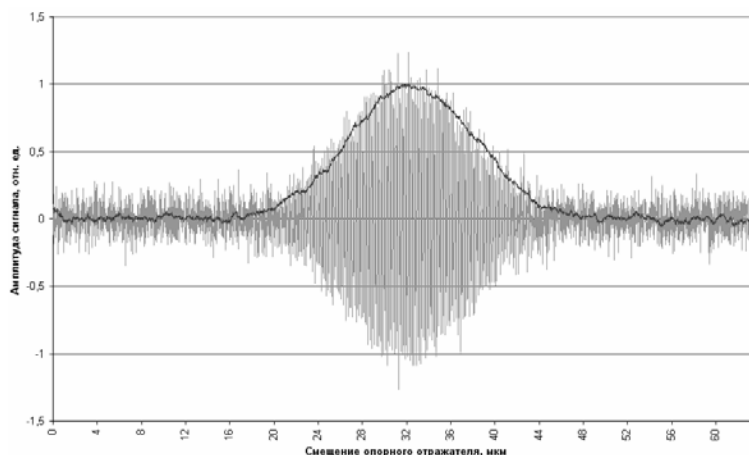


Рис. 1. Оценка амплитуды интерференционного сигнала и зашумленный сигнал без фона

Недостатком рекурсивных методов является необходимость задания начальных оценок параметров. При значительных погрешностях начальных оценок необходимо несколько точек для адаптации фильтра. Если можно гарантировать отсутствие максимума амплитуды в первых точках, метод оказывается устойчивым к неточности начальных оценок. Это требование не является существенным ограничением, т.к. данное минимальное расстояние от начальной точки до максимума много меньше диапазона изменения смещения опорного отражателя.

Характеристики метода фильтрации зависят от параметров фильтра – ковариационных матриц шума системы и шума наблюдения³. При увеличении значений элементов ковариационной матрицы шума системы растет способность фильтра отслеживать быстрые изменения параметров сигнала, но падает помехоустойчивость. При увеличении значений элементов ковариационной матрицы шума наблюдения – наоборот.

После построчной фильтрации сигналов, полученных для каждой точки поверхности, эта поверхность была реконструирована (рис. 2). СКО при восстановлении рельефа составило около 0,8 мкм.

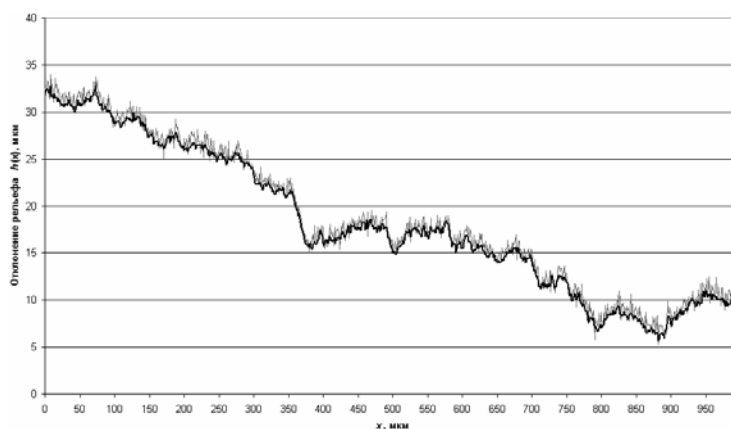


Рис. 2. Исходная поверхность и ее оценка

Было проведено сравнение характеристик метода фильтрации Калмана и метода синхронной демодуляции (рис. 3а). СКО оценки амплитуды методом синхронной демодуляции составляет 4%. При повышении степени подавления шума происходит деформация восстановленной амплитуды (рис. 3б) и СКО составляет

8%. В задаче восстановления рельефа СКО оценки методом синхронной демодуляции составляет 1,1 мкм. Таким образом, восстановление амплитуды методом синхронной демодуляции характеризуется искажениями формы восстановленной амплитуды или зашумленностью восстановленной амплитуды. Дискретная нелинейная фильтрация Калмана обеспечивает более точное восстановление амплитуды.

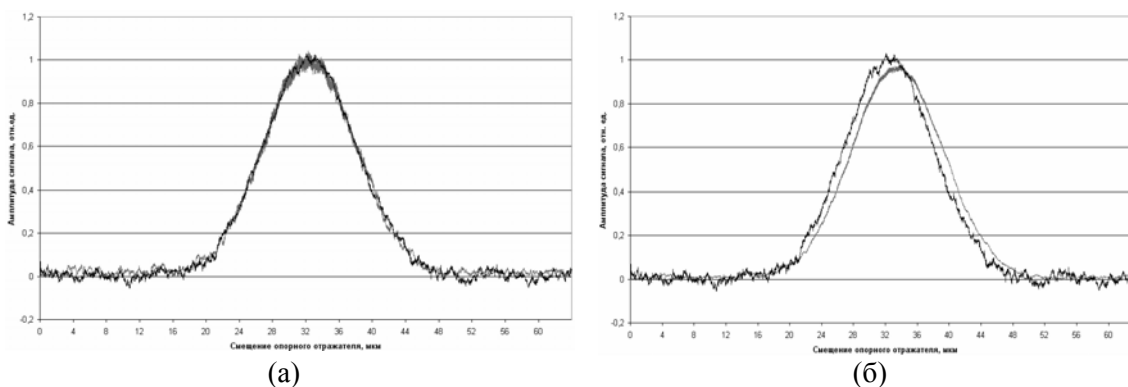


Рис. 3. Сравнение метода Калмана с методом синхронной демодуляции

Метод дискретной линейной фильтрации Калмана применительно к восстановлению амплитуды интерференционного сигнала дает достаточно точные оценки. В частности, он более устойчив к шуму, чем хорошо изученный и широко используемый метод синхронной демодуляции.

Автор выражает благодарность за активное содействие в выполнении данной работы н.с. каф. компьютерной фотоники СПбГУ ИТМО А.С. Захарову.

1. I. Gurov, E. Ermolaeva, A. Zakharov, *J. Opt. Soc. Am. A.*, **21**, №2, 242-251, (2004).
2. И.П. Гуров, А.С. Захаров, *Изв. ВУЗов. Приборостроение*, **45**, №1, 58-63, (2002).
3. А.С. Захаров, *Нелинейный анализ стохастических параметров интерференционных систем // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*, (2005).

ИНДИКАТРИСЫ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ

Данилова Е.В., Максименко В.А., Сьюй А.В.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения,
Хабаровск, Россия

Получены и исследованы индикатрисы фотоиндуцированного рассеяния света в кристаллах ниобата лития. Предложен новый цифровой метод построения и анализа индикатрис фотоиндуцированного рассеяния света, позволяющий оценивать применимость различных моделей рассеяния.

Кристаллы ниобата лития обладают уникальным набором свойств, обуславливающих их широкое применение в оптическом приборостроении. Одним из наиболее интересных эффектов, наблюдаемых в ниобате лития, является

фоторефрактивный эффект, заключающийся в локальном изменении показателя преломления при прохождении через кристалл лазерного луча.

Следствием фоторефрактивного эффекта является рассеяние оптического излучения на фотоиндуцированных мелкомасштабных неоднородностях показателя преломления, называемое фотоиндуцированным рассеянием света (ФИРС). Изучение особенностей ФИРС позволяет получить дополнительную информацию о свойствах кристаллов.

Было проведено изучение индикатрисы ФИРС в направлении прошедших лучей в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$ (0,01 вес. %), $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ (0,03 вес. %). Исследуемые кристаллы представляют собой плоскопараллельные пластинки x-срезов толщиной 1 мм, оптическая ось параллельна входным граням.

ФИРС регистрировалось цифровой камерой, полученные изображения обрабатывались с помощью персонального компьютера. Цифровая фотография была представлена в виде информационного двумерного массива, в котором каждый элемент соответствует пикселю изображения. Индексами отдельного элемента массива являются координаты x и y соответствующего пикселя на фото, значением отдельного элемента массива является интенсивность I данного пикселя. Была проведена проверка отклика камеры при регистрации изображений различной интенсивности. Значения уровней интенсивности изменялись калиброванными светофильтрами. Подобран режим работы фотоаппарата, в котором обеспечивается линейный отклик и имеет место реальное соотношение интенсивностей регистрируемых изображений. Индикатрисы построены с помощью специализированного математического пакета.

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НА ЦИЛИНДРЕ КАК СРЕДСТВО ОЦЕНКИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ

Мусалимов В.М., Воронцов Е.А

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, Россия,

Решена задача построения адекватных функций естественного для человека зрительного восприятия пространства. Разработана методика оценки зрительной восприимчивости.

Одной из основных характеристик зрительного анализатора является разрешающая способность или острота зрения. Как известно, у здорового человека острота зрения условно равна единице- это способность глаза различить две светящиеся точки раздельно под углом $1'$.

К стандартным средствам определения остроты зрения относятся таблицы опто типов. Известны методы исследования остроты зрения Снеллена, Головина-Сивцева, Ландольта, Монуайе, таблицы РОРБА¹. На сегодняшний день существуют средства автоматизации проверки остроты зрения, в частности, проекторы опто типов. Для удобства работы проекторы часто снабжены горизонтальными и вертикальными масками для быстрого предъявления нужной строки, столбца или даже отдельного знака. Современные проекторы знаков характеризуются большим разнообразием масок, которые играют большую роль в процессе диагностики.

Как с точки зрения диагностики нарушения функции зрения, так и проведения профессионального отбора, где требуется высокая острота зрения, все методы имеют одно принципиальное ограничение: они ориентируются на горизонтальную шкалу зрительного восприятия.

Комплексные исследования характеристик зрения необходимы не только непосредственно для человека, но и для решения основной проблемы технического (оптического) зрения - проблемы адаптации технического зрения к зрению человека. При этом данная задача может быть прямой и обратной. Прямая задача заключается в адаптации системы технического зрения к зрению человека. Обратная задача заключается в создании системы технического зрения, работающей по законам естественного видения.

На сегодняшний день средства и большая часть методов не позволяют провести комплексную оценку характеристик зрения, особенно в области восприятия пространства. «Умение» воспринимать особенности пространства предлагается назвать *восприимчивостью*.

В основе нашего подхода лежит концепция отображения изображения с использованием базового понятия «перспектива». Известны различные системы перспективы² (проекционного построения пространства на плоскости): прямая перспектива (линейная), обратная и др. Согласно теории зрительного восприятия человек воспринимает ближний план в обратной перспективе, неглубокий дальний - в аксонометрии и только дальний план в прямой перспективе. Для того чтобы оценить искажения или внести коррективы в плоское изображение трехмерных объектов вводится функция $F(L)$. Эта функция зависит от расстояния наблюдения объекта. На рис.1 представлены функции преобразования для трех координат, и адекватная функция $F0(L)$.

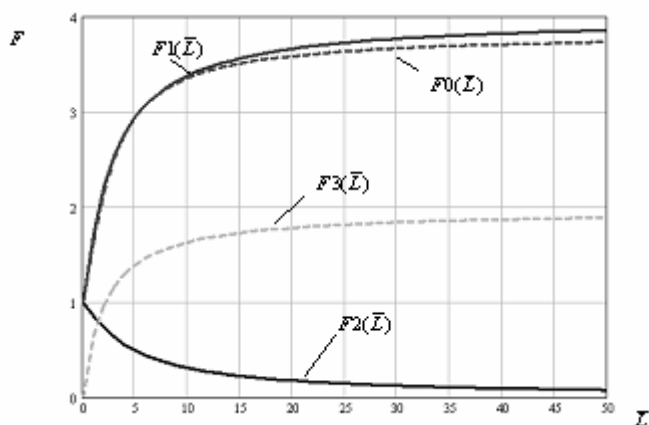


Рис.1. Функции преобразования

Следует отметить, что речь идет о восприятии на плоскости, а базисом является естественная линия горизонта.

Приводится аналитическая функция преобразования, предложенная Раушенбахом². Для решения прямой и обратной задачи естественного восприятия получены адекватные функции естественного зрительного восприятия. Функции восприятия необходимы как для построения естественного образа (изображения) объекта или пространства, так и для его количественной и качественной оценки.

Анализ рассчитанной на основе экспериментальных данных функции преобразования позволяет сделать вывод о пригодности предложенных функций для описания функции $F(L)$. Для количественной оценки адекватности описания

функции преобразования было рассчитано среднеквадратическое отклонение (СКО) экспериментальных данных.

Возможность отображения объекта на поверхности с положительной и отрицательной кривизнами позволяет синтезировать методы определения остроты зрения и перцептивности восприятия.

Нами разработан новый способ оценки свойств зрения. Предлагается, с использованием стандартных симметричных оптотипов (например, буквы Т, Ф, Ж могут быть зеркально получены из Г, Р, К), построить таблицу проверки перцептивной остроты зрения (рис.2).

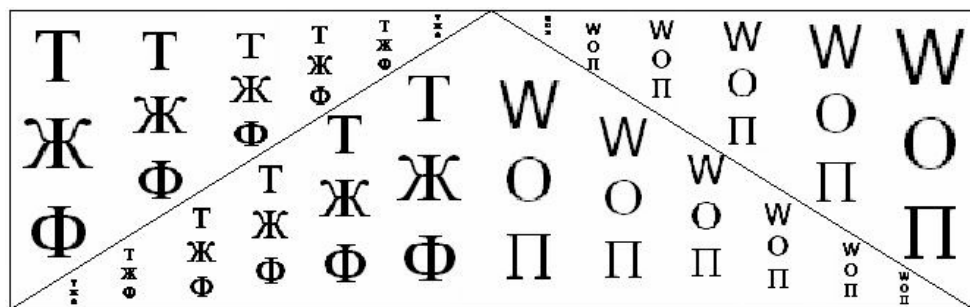


Рис.2. Таблица симметричных оптотипов

Отображая полученную таблицу на боковую поверхность цилиндра^{3,4}, мы получаем цилиндрическая шкала зрительной восприимчивости (рис.3.).

Возможны два варианта работы со шкалой. Первый вариант заключается в наблюдении боковой поверхности цилиндра с внешней стороны. Во втором варианте испытуемого помещают в центр цилиндра. В обоих вариантах предполагается вращение цилиндра вокруг своей оси.

Отметим, что разные варианты образующей цилиндра: от линейной до нелинейной, расширяют возможности шкалы, а вращение цилиндра вокруг оси дает возможность работать с подобными масками с учетом любых линий горизонта.

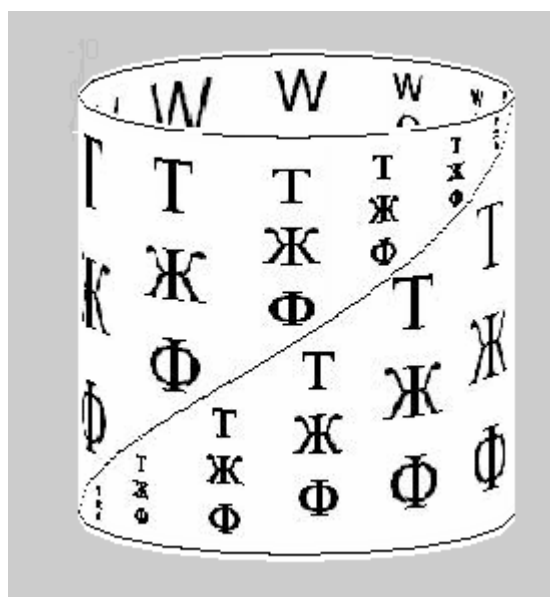


Рис.3. Цилиндрическая шкала зрительной восприимчивости

Результатом работы является построение функций адекватности технического зрения и зрения человека, разработка метода оценки перцептивной остроты зрения, построение цилиндрической шкалы зрительной восприимчивости.

1. Е.А. Воронцов, А.С. Черноусов, *Вестник III межвузовской конференции молодых ученых СПб ГУ ИТМО. Сборник научных трудов* – 2006 г., СПб: СПбГУ ИТМО, (2006).
2. Б.В. Раушенбах, *Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы*. М.: Наука, 256 с, (1986).
3. В.М. Мусалимов, «*Фундаментальные проблемы теории точности*», СПб, Наука, с.36-64, (2001).
4. Е.А.Воронцов, *Материалы конференции Робототехника, мехатроника и интеллектуальные системы*, Таганрог: Издательство ТРТУ, с.250, (2005).

ФОРМИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ДИСПЕРСИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯТОРАХ

Родин В.Г., Стариков С.Н.

Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), Москва, Россия

Описан процесс формирования сигналов в дисперсионных голографических корреляторах. Определены требования к голографическим Фурье-фильтрам, используемым в таких корреляторах. Приведены экспериментальные результаты корреляционного анализа.

Новые возможности при создании оптических корреляторов связаны с разработкой принципов представления в них информативных параметров объектов анализа, допускающих реальный временной масштаб обработки излучающих объектов. В таких корреляторах, получивших название дисперсионных, помимо пространственных характеристик объектов информативными также являются спектральные характеристики излучения, пространственное и временное распределение спектрального состава излучения. Корреляционная обработка спектров излучения протяженных источников по их пространственным и спектральным характеристикам осуществляется в реальном масштабе времени.

Рассмотрены дисперсионные корреляционные методы оптической обработки информации, при которых в качестве информативных признаков используются пространственные и спектральные характеристики излучающих объектов. Получены расчетные соотношения, описывающие процесс формирования сигналов в таких корреляторах, обусловленный дисперсионным взаимодействием собственно излучения анализируемого объекта с голографическим фильтром-памятью. Показано, что при совпадении пространственных и спектральных характеристик излучающего объекта с заданным будет наблюдаться совокупность окрашенных пространственных корреляционных сигналов, локализованных в определенном месте выходной плоскости.

Рассмотрены особенности формирования голографическим Фурье-фильтров, используемых в таких корреляторах. Осуществлены запись голографических фильтров и эксперименты по корреляционному распознаванию объектов по их пространственным и спектральным характеристикам, подтверждающие полученные соотношения. Рассмотрено применение голограмм, синтезированных на компьютере, в качестве голографических фильтров в дисперсионных корреляторах.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА

Поляков А.В., Ксенофонтов М.А.*

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

*НИИ ПФП им. А.Н. Севченко, Минск, Беларусь

Описана структура многофункциональной прецизионной волоконно-оптической измерительной системы. Основу этой системы составляет волоконно-оптический датчик, в котором измерения производятся по частоте рециркуляции одиночного импульса. Показана перспективность использования такой системы на примере измерителя температуры.

Основные исследования по созданию оптоэлектронных информационно-измерительных систем с использованием волоконно-оптических датчиков (ВОД) для обработки информации в настоящее время ведутся по пути создания простых, надежных и унифицированных устройств, а также реализации на их основе методов, исключающих или значительно снижающих влияние внешних факторов на точность измерений. Самые распространенные амплитудные датчики просты, дешевы и надежны, однако часто обладают недостаточной чувствительностью. Наиболее чувствительные фазовые ВОД достаточно сложны конструктивно и требовательны к условиям эксплуатации. В этой связи необходимо разрабатывать новые методы обработки сигналов и построения ВОД, сочетающие в себе такие основные принципы как простота, надежность, дешевизна с многофункциональностью и необходимой точностью измерений. Одним из перспективных путей решения подобных задач является переход к частотному представлению измеряемой величины, основанный на зависимости времени задержки оптического излучения в волоконном световоде (ВС) от измеряемых физических параметров.

В описанном в работе ¹ ВОД рециркуляционного типа измерения осуществлялись по частоте автомодуляционных колебаний, возникающих за счет проявления нелинейности амплитудных характеристик звена усилитель-модулятор тока инжекционного лазера (ИЛ), либо ватт-амперной характеристики ИЛ, либо мог иметь место вариант одновременного проявления нелинейности обоих типов. В результате в системе устанавливались колебания частотой 27 МГц при длине ВС 350 м, относительная долговременная нестабильность составляла величину $\chi = 7 \cdot 10^{-5}$. Проведенные в ² экспериментальные исследования показали, что для того чтобы не допустить развития субгармонических бифуркаций, необходимо поддерживать коэффициент усиления усилителя с погрешностью не более 5%. Кроме того отмечено, что при создании волоконно-оптических резонансных устройств в широком динамическом диапазоне наблюдается нелинейность отклика от возмущающего воздействия.

Нами разработаны многофункциональные системы измерения физических величин по частоте рециркуляции одиночного импульса с его периодической регенерацией, что позволило уменьшить число источников погрешности измерений и, как показали экспериментальные исследования, повысить на порядок стабильность частоты рециркуляции при сравнимой длине ВС ($f = 654$ кГц при $L = 300$ м, $\chi = 2 \cdot 10^{-6}$). Для последующей интерпретации и автоматизированной обработки получаемых результатов на основе такого подхода созданы достаточно

простые и точные математические модели, связывающие частоту рециркуляции с измеряемой величиной.

Поскольку для предлагаемого метода измерений не требуется информация о фазе и поляризации оптической волны, в схеме ВОД использовались многомодовые инжекционные лазеры и ВС, что значительно упрощало стыковку между оптическими элементами и повышало надежность при эксплуатации. Применение многомодового ИЛ позволяло уменьшить уровень шумов, связанных с источником излучения, поскольку в силу малой когерентности многомодовый лазер обладает пониженной чувствительностью к шумам, обусловленным попаданием отраженного излучения в активную область ИЛ.

Чувствительный элемент ВОД представлял собой отрезки кварцевых многомодовых градиентных ВС. Принцип измерения основан на том, что воздействие измеряемой физической величины приводит к изменению оптической длины волокна за счет изменения геометрической длины и показателя преломления ВС. Это служит причиной изменения времени распространения оптического импульса по ВС, т.е. изменяется частота рециркуляции. Данное изменение регистрировалось достаточно просто и с высокой точностью. На каждом цикле рециркуляции проводилось восстановление информационного импульса по форме, амплитуде и длительности, что позволяло поддерживать процесс рециркуляции неограниченно долго. Измерения частоты рециркуляции во всех экспериментах проводились с помощью специально разработанного частотомера типа ПЧМ-2/130, выполненного в виде платы для IBM PC. Значения частоты рециркуляции заносились в ЭВМ, где их отклонения от начального среднего значения по соответствующему алгоритму преобразовывались в значение той или иной измеряемой величины, а также наглядно отображалась динамика процесса.

Широкое применение автоматизированных систем контроля и управления, внедрение новых технологических процессов, переход к гибким автоматизированным производствам вызывает все возрастающий интерес к волоконно-оптическим датчикам различного назначения. Одно из лидирующих мест по спросу и предложению занимают волоконно-оптические датчики температуры (ВОДТ). Рост температуры световода приводит к увеличению его геометрической длины, изменению показателя преломления и появлению дополнительной задержки во времени распространения сигнала (изменению частоты рециркуляции). Для увеличения чувствительности датчика необходимо использовать ВС с металлическим покрытием. Проведенные исследования³ показали, что с помощью такого ВС длиной 100 м можно контролировать температуру с точностью $0,1^{\circ}\text{C}$. Приведенное значение для чувствительности ВОДТ соответствует стандартному телекоммуникационному оптоволокну. При использовании специальных волокон с повышенным температурным коэффициентом изменения показателя преломления чувствительность системы можно повысить до значения порядка $0,03^{\circ}\text{C}$.

Максимальная измеряемая температура ВОДТ ограничивается не только температурой плавления металлического покрытия и термическим порогом разрушения самого ВС, но и максимальным напряжением, которое может испытывать ВС при однократном растяжении. Для того чтобы волокно могло выдерживать много циклов измерений в течение продолжительного времени величина напряжения не должна превышать 1 ГПа. Так, при использовании алюминиевого покрытия максимальная измеряемая температура составляет 600°C (ограничивается напряжением в ВС), а при использовании никелевого покрытия в сочетании с алюмосиликатным ВС эта температура составляет 800°C .

(ограничивается термическим разрушением волокна)³. Важной характеристикой является изменение чувствительности ВОДТ в широком диапазоне измеряемых температур. Были проведены сравнительные исследования чувствительности амплитудных и частотных датчиков в интервале температур от минус 30 °С до плюс 500 °С. Получено, что для амплитудного датчика, использующего температурное смещение границы спектра поглощения, чувствительность ухудшалась с 0,3 °С до 0,8 °С. Для частотного ВОДТ рециркуляционного типа чувствительность изменялась в пределах от 0,1 °С до 0,2 °С. Сравнительные характеристики волоконно-оптических датчиков температуры различных типов представлены в таблице.

Таблица. Характеристики волоконно-оптических датчиков температуры

Тип ВОД	Макс. измеряемая температура	Время измерения	Чувствительность в диапазоне от 0°С до 100°С
Амплитудные	300°С	1-2 с	±0,3-0,5°С
Фазовые	650°С	0,1-1 с	±0,002°С
Поляризационные	180°С		±2°С
Частотные	600°С-800°С	0,5-1 с	±0,1°С

Из исследований частотного ВОД рециркуляционного типа на примере датчика температуры следует, что такие устройства, обладая всеми преимуществами амплитудных датчиков (простота, надежность, дешевизна и т.д.), имеют существенно лучшую чувствительность и по своим метрологическим характеристикам могут занять нишу между амплитудными и фазовыми датчиками. Данная система позволяет измерять температуру, электрические величины, осуществлять контроль качества соединений ВС и других оптических элементов, проводить анализ дисперсионных характеристик многомодовых волоконных световодов и т.п.

1. В.В. Григорьянц, Ю.Б. Ильин, В.Н. Константинов, В.А. Прокофьев // *Квантовая электроника*, **13**, №12, 2408–2413, (1986).
2. В.С. Иванов, А.Ф. Котюк, А.В. Кузин // *Измерительная техника*, №10, 22–33, (1998).
3. А.В. Поляков // *Оптический журнал*. **71**, №9. 84–87, (2004).

СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Евтихийев Н.Н., Рейзин Б.М., Сироткин С.А., Стариков Р.С., Шевчук А.В.
Московский Инженерно-Физический Институт
(государственный университет), Москва, Россия

Представлены результаты моделирования оптоэлектронного корреляционного различения изображений с использованием корреляционных фильтров с линейным фазовым коэффициентом.

В системах корреляционного различения изображений одним из перспективных способов достижения инвариантности корреляционного пика при наличии искажений распознаваемого объекта относительно эталонного является применение инвариантных корреляционных фильтров.

Одним из перспективных типов КФ является – композитный фильтр на основе линейных фазовых коэффициентов¹ (Linear Phase Coefficient Composite filter, LPCC фильтр). LPCC фильтр привлекателен благодаря высоким значениям отношения сигнал/шум, кроме того, такой фильтр «экономен» в плане вычислительных затрат необходимых для его синтеза. Фильтры могут быть синтезированы для достижения инвариантности изображения при определенных искажениях входного изображения (поворот, изменение масштаба, поворот + изменение масштаба).

В работе представлены результаты моделирования корреляционного различения с использованием LPCC фильтров. Исследована возможность реализации LPCC фильтров в виде синтезированных голограмм, реализованных способом, аналогичным методу Ван-дер-Люгта.

Работа выполнена при поддержке ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)» Минобрнауки России, а также при поддержке РФФИ.

1. L. Hasebrook, B. V. K. Vijaya Kumar, L Hostetler. *Opt Eng.* **29**, 1033-1043, (1990).
2. B. V. K. Vijaya Kumar. *Appl. Opt.*, **31**, 4773-4801, (1992).

Секция 5. Новые принципы оптической передачи, обработки и хранения информации	241
ВЫСОКОТОЧНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ КОЛЬЦЕВЫХ И СЕКТОРНЫХ ГАРМОНИК ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Литовченко С.Н., Стариков Р.С., Шевчук А.В.	241
ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ВЕКТОР-МАТРИЧНЫЙ ПРОЦЕССОР: СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ Стариков Р.С.	242
ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0,3\%)$ Строганов В.И., Сюй А.В., Лихтин В.В. *	244
PARALLEL-HIERARCHICAL TRANSFORMATION AS THE SYSTEM MODEL OF NEUROLIKE SCHEME OF DATA PROCESSING Kozhemyako V.P., Timchenko L.I. *, Yarovyu A.A.	246
УПРАВЛЯЕМАЯ СВЕТОМ НАНОКОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОЙ ЗАПИСИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ИК-ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА Михайлов В.Н., Стаселько Д.И.	248
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДП-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР HgCdTe Войцеховский А.В., Несмелов С.Н., Дзядух С.М.	250
ВОССТАНОВЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МАЛОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА Волынский М.А.	252
ИНДИКАТРИСЫ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ Данилова Е.В., Максименко В.А., Сюй А.В.	254
ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ НА ЦИЛИНДРЕ КАК СРЕДСТВО ОЦЕНКИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ Мусалимов В.М., Воронцов Е.А.	255
ФОРМИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ДИСПЕРСИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯТОРАХ Родин В.Г., Стариков С.Н.	258
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТИПА Поляков А.В., Ксенофонтов М.А. *	259
СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНЫХ ФИЛЬТРОВ С ЛИНЕЙНЫМ ФАЗОВЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ДЛЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯТОРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ Евтихийев Н.Н., Рейзин Б.М., Сироткин С.А., Стариков Р.С., Шевчук А.В.	261