

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 51

СЕНТЯБРЬ 2008

№ 9

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ПРИБОРЫ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

Под редакцией доктора технических наук, профессора Э. Д. Панкова

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	
Артеменко Ю. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные системы измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа)	5
Коняхин И. А., Мерсон А. Д. Оптико-электронная система измерения угла скручивания на основе анаморфирования	10
Ворона А. М., Коняхин И. А. Исследование регулярного виньетирования в оптико-электронных системах измерения угловых деформаций	14
Алеев А. М., Араканцев К. Г., Тимофеев А. Н., Ершова К. Б., Петуховский В. В., Петуховский С. В., Холин А. Е. Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути относительно реперных меток	18
Анисимов А. Г., Горбачев А. А., Краснящих А. В., Пантюшин А. В. Оптико-электронная система контроля соосности элементов турбоагрегатов	22
Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н., Богатинский Е. М., Яковлев П. В. Направления развития оптико-электронных систем с оптической равносигнальной зоной	27
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ	
Горбунова Е. В., Коротаяев В. В., Тимофеев А. Н., Чертов А. Н. Об особенностях сепарирования алмазов по категориям в цветовом пространстве RGB	32
Торшина И. П. Компьютерное моделирование многодиапазонных оптико-электронных систем	37
Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Оптическое считывание — один из путей совершенствования микроболометрических приемников излучения (по материалам зарубежной печати)	41

Мельников Г. С., Самков В. М., Солдатов Ю. И., Клишо Н. А., Панков Э. Д., Коротаев В. В. Реализация режима сверхразрешения при комплексировании терагерцового и ИК-диапазонов на QWIP-матрицах.....	47
Алеев Р. М., Алеев Д. Р. Открытая и взаимозависимая архитектура тепловизионных приборов	54
Горбунов Г. Г., Сивяков И. Н., Таганов О. К., Шилов В. Б. Особенности использования многоэлементных приемников в фурье-спектрометрии	60
Горбунов Г. Г., Лапко А. П., Таганов О. К. Калибровка шкалы спектрального пропускания радиометра с использованием фурье-спектрометра	66
Белоусов А. А., Явленский А. К., Севастьянов А. А., Волков А. С., Жаворонков К. А. Разработка систем диагностики оборудования в цифровом кинематографе	69
РЕФЕРАТЫ	74

THEMATIC ISSUE

DEVICES OF A REMOTE MONITORING OF DEFORMATIONS OF LARGE DIMENSION CONSTRUCTIONS AND OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH MULTI-ELEMENT PHOTODETECTORS

By Edition of E. D. Pankov, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

INTRODUCTION	3
OPTOELECTRONIC MONITORING SYSTEMS OF DEFORMATIONS LARGE DIMENSION CONSTRUCTIONS	
Artemenko Yu. N., Konyakhin I. A., Pankov E. D., Timofeev A. N. Optoelectronic Systems Construction Elements Deformations Measurement for the Radio Telescope of a Millimeter-Wave RT-70 (Suffa).....	5
Konyakhin I. A., Merson A. D. Optoelectronic System for Roll Angle Deformations Measuring with Anamorphosis Effect Using.....	10
Vorona A. M., Konyakhin I. A. Research of a Regular Vignetting in Optoelectronic Systems of Measurement of Angular Deformations	14
Aleev A. M., Arakantsev K. G., Timofeev A. N., Ershova K. B., Petukhovskiy V. V., Petukhovskiy S. V., Kholin A. E. Optoelectronic System for Control Position of Railway Path of Rather Reference Marks ...	18
Anisimov A. G., Gorbachev A. A., Krasnyaschih A. V., Pantyushin A. V. Optoelectronic Monitoring System Turbo-Units Coaxiality	22
Musyakov V. L., Pankov E. D., Timofeev A. N., Bogatinsky E. M., Yakovlev P. V. Directions of Development of Optoelectronic Systems with an Optical Equisignal Zone	27
OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH MULTI-ELEMENT MATRIX PHOTODETECTORS	
Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Timofeev A. N., Chertov A. N. About Separation of Diamonds on Categories in Colour Space RGB	32
Torshina I. P. Computer Simulation of Multispectral Optoelectronic Systems.....	37

Tarasov V. V., Yakushenkov Yu. G. Optical Reading — a Means for of Perfecting Microbolometers (on Materials of Foreign Publishing).....	41
Melnikov G. S., Samkov V. M., Soldatov Yu. I., Klisho N. A., Pankov E. D., Korotaev V. V. Implementation of a Mode of High Resolution at an Integration Terahertz and IR-Ranges on QWIP-Matrixes	47
Aleev R. M., Aleev D. R. Open and Interdependent Architecture of Thermovision Devices.....	54
Gorbunov G. G., Sivyakov I. N., Taganov O. K., Shilov V. B. Features of Usage of Multi-Element Receivers in a Fourier-Spectrometry.....	60
Gorbunov G. G., Lappo A. P., Taganov O. K. Calibration of a Scale of Spectral Passing of the Radiometer with Usage of a Fourier- Spectrometer.....	66
Belousov A. A., Yavlensky A. K., Sevastyanov A. A., Volkov A. S., Zhavoronkov K. A. System Development of Diagnostics of the Equipment in a Digital Cinematograph.....	69
ABSTRACTS	74

Editor-in-Chief L. F. Porfiriev

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем тематическом выпуске журнала представлены результаты научных исследований и разработок сотрудников ряда ведущих учебных и научно-производственных учреждений в области оптического и оптико-электронного приборостроения.

Кафедра оптико-электронных приборов и систем Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, которая в течение многих лет занимается исследованиями принципов построения и разработками систем для передачи направления и управления по лучу, а также систем дистанционного контроля деформаций и позиционирования элементов крупногабаритных конструкций и сооружений (типа больших оптических и радиотелескопов с поворотными антеннами), представила семь статей, отражающих последние разработки в этой области.

От Московского государственного университета геодезии и картографии представлены работы, посвященные состоянию развития систем с многоэлементными матричными фотоприемниками.

Большой теоретический и практический интерес имеют статьи, представленные сотрудниками ФГУП НПК „Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова“ (Санкт-Петербург), связанные с разработками матричных фотоприемников с квантовыми ямами для терагерцового диапазона спектра длин волн и развитием фурье-спектрометрии.

Дополняют системотехническую направленность выпуска работы, представленные научно-производственной фирмой „ОПТООЙЛ“, Казань (статья посвящена новым принципам проектирования тепловизионных приборов с открытой архитектурой) и Санкт-Петербургским государственным университетом кино и телевидения (анализируются нейросетевые методы диагностики сложных технических систем).

*Заведующий кафедрой
оптико-электронных приборов и систем СПбГУ ИТМО
доктор технических наук, профессор В. В. КОРОТАЕВ,
доктор технических наук, профессор И. А. КОНЯХИН*

INTRODUCTION

Current issue presents results of scientific researches and development works in the area of optical and optoelectronic instrument-making held in several major educational and research institutions.

Optoelectronic Devices and Systems Department of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics presented seven articles about the latest research in a field of direction transmission, ray-guided control, remote deformation control of the large constructions.

Moscow State University of Geodesy and Cartography presented articles on the current state of the systems based on area imagers and of area imagers themselves.

Researchers of „Vavilov State Optical Institute“ presented articles concerning terahertz wave length range area imagers with quantum wells and Fourier spectrometry. These are of a big theoretical and practical interest.

The „OptOil“ corporation presents the article about new thermo vision devices and State University of Cinema and TV presents the results of the new diagnostic system researches.

*Doctor of Technical Science, Professor V. V. KOROTAEV,
Doctor of Technical Science, Professor I. A. KONYAKHIN*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 681.7.08,681.78

Ю. Н. АРТЕМЕНКО

*Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева
Москва*

И. А. КОНЯХИН, Э. Д. ПАНКОВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РТ-70 (СУФФА)

Рассматривается структура комплекса оптико-электронных систем измерения деформаций основного зеркала, контррефлектора и элементов опорно-поворотного устройства радиотелескопа. Приводятся результаты исследований оптико-электронных систем на компьютерных и физических моделях.

Ключевые слова: радиотелескоп миллиметрового диапазона, оптико-электронная система измерения пространственных координат, видеосистема.

Одним из основных направлений развития современной радиоастрономии является исследование объектов Вселенной в миллиметровом диапазоне длин волн. Освоение этого диапазона, занимающего промежуток между сантиметровым и оптическим диапазонами в радиосистемах, позволит решить ряд важнейших научных проблем и практических задач (таких, как формирование, физика и эволюция звезд и галактик; геодинамика и геотектоника; координатно-временное обеспечение научной и хозяйственной деятельности, сверхточная спутниковая и космическая навигация) [1].

В настоящее время Россия совместно с Узбекистаном реализует крупный проект по созданию радиообсерватории миллиметрового диапазона на плато Суффа (Узбекистан). Основной инструмент обсерватории — полноповоротный радиотелескоп (РТ) типа РТ-70 со следующими элементами: основное зеркало (ОЗ), представляющее собой осесимметричный фрагмент параболоида с фокусным расстоянием 21 м, составленный из 1200 отражающих щитов, диаметр зеркала 70 м; контррефлектор (КР) диаметром 3 м [1, 2].

Особенность РТ как средства исследований в миллиметровом диапазоне длин волн заключается в высоких требованиях к качеству параболической поверхности ОЗ (среднее квадратическое отклонение точек поверхности от теоретического параболоида не должно

превышать 0,05 мм), стабильности взаимного расположения основного зеркала и контррефлектора (соответственно 0,07 мм), точности наведения зеркальной системы по углам азимута и места (допустимая погрешность 1,5...2") [2].

Вместе с тем многотонный вес и влияние температурных изменений приводят к деформациям элементов конструкции РТ: нарастающим линейным смещениям точек поверхности ОЗ, достигающим в краевой зоне 30 мм, смещению КР на величину до 60 мм. Также вследствие деформаций элементов конструкции угловое положение оси диаграммы направленности РТ будет отличаться от измеренного преобразователями угла на величину до 10'.

Таким образом, для обеспечения требуемого качества элементов отражающей системы РТ-70, а также для реализации точного наведения необходимо создание комплекса систем измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа [2].

Развитие оптоэлектроники и оптических средств измерения обуславливает эффективность построения комплекса на основе оптико-электронных систем измерения пространственных координат конструктивных элементов.

В результате анализа различных вариантов разработана трехуровневая неоднородная структура системы контроля положения элементов РТ-70 (рис. 1, а).

Компоненты системы третьего уровня размещены на жестком элементе конструкции — опорном кольце в вершине ОЗ — и включают две отдельные подсистемы: измерения координат точек поверхности ОЗ (ИКОЗ) и определения положения КР (ОПКР). Измерительные каналы каждой подсистемы определяют координаты визирных целей (ВЦ), размещенных в контрольных точках ОЗ и КР, относительно опорного кольца как промежуточной базы.

Система второго уровня определяет угловое положение опорного кольца (промежуточной базы) относительно базового элемента управляющего комплекса РТ-70 — трехосной гиросtabilизированной платформы (ГСП), расположенной на пересечении азимутальной и угломестной осей внутри несущей сигары зеркальной системы. Измерительный канал системы, в котором используется автоколлимационный метод измерения углов поворота, содержит оптико-электронный автоколлиматор АК1, расположенный на внутренней поверхности опорного кольца, и отражающий контрольный элемент КЭ1, расположенный на внешней конструкционной базе корпуса ГСП. Реализация ГСП осуществляется на основе прецизионного электростатического гироскопа, обеспечивающего измерение углов поворота в диапазоне 360° с точностью 1,5". Измерение угла азимута с указанной точностью реализуется в течение трех часов, по истечении которых необходима калибровка датчиков угла азимута ГСП, выполняемая измерительной системой первого уровня.

Базами системы первого уровня являются шесть реперных вертикальных плоскостей, расположенных под известными азимутальными углами. Для калибровки датчиков угла азимута радиотелескоп разворачивается до совмещения угломестной оси с ближайшей реперной плоскостью. Каждая реперная плоскость определяется осями излучающих коллиматоров ИК1, ИК2, расположенных вблизи основания РТ. С использованием принимающих коллиматоров, соответственно ПК1 и ПК2, измеряется угловое положение жестких элементов конструкции — цапф угломестной оси — относительно реперной плоскости. Два дополнительных измерительных канала определяют угловое положение ГСП относительно цапф как промежуточных баз. Каждый дополнительный измерительный канал по структуре аналогичен системе второго уровня и включает автоколлиматор, установленный на внутренней поверхности цапфы (АК2, АК3) и контрольный элемент (КЭ2, КЭ3), расположенный на внешней конструкционной базе корпуса ГСП (см. рис. 1, б). В результате осуществляется привязка угловых датчиков ГСП к реперным плоскостям.

Для реализации систем первого и второго уровня применяются оптико-электронные автоколлимационные угломеры, позволяющие обеспечить требуемые метрологические параметры измерительных каналов этих систем (дальность 10...15 м, диапазон до 10', погреш-

ность измерения до 2") при использовании алгоритмов компенсации систематической погрешности измерения, возникающей вследствие виньетирования рабочего пучка [3].

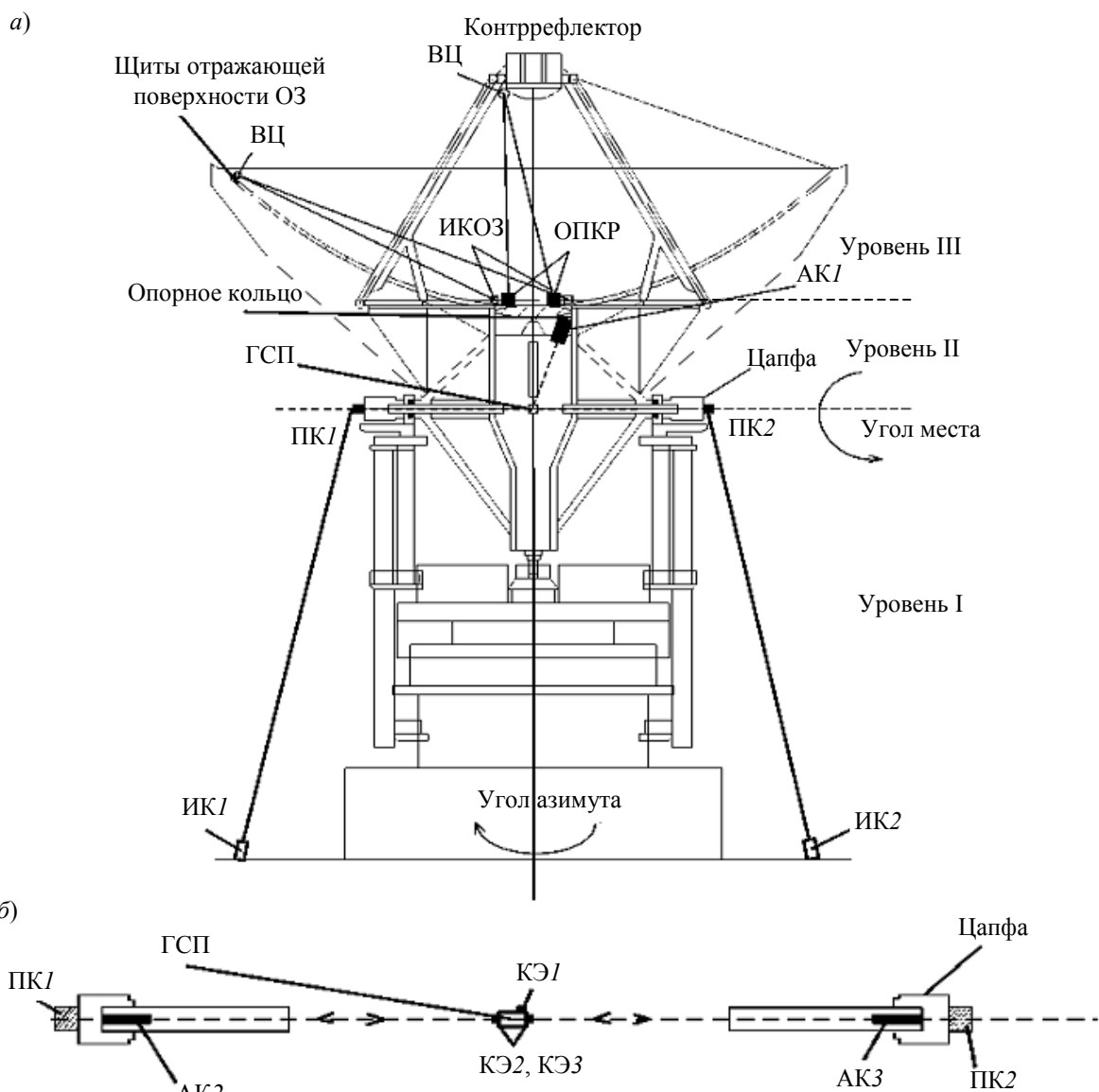


Рис. 1. Структурная схема комплекса систем измерения деформаций элементов конструкции РТ-70 (Суффа)

Составляющие системы третьего уровня, размещенные на опорном кольце, фактически являются первичными измерительными преобразователями электромеханических систем коррекции возникающих деформаций: системы адаптации поверхности ОЗ и системы подстройки положения КР. Команды управления для электродвигателей отработки формируются в соответствии с определенным системой третьего уровня положением щитов ОЗ и КР.

Измерительные каналы системы третьего уровня выполнены в виде оптико-электронных систем, реализующих метод „угловой засечки“ (рис. 2). ОЭС включает две видеосистемы, центры входных зрачков объективов которых смещены относительно друг друга на некоторое базовое расстояние B . В контролируемой точке на щите ОЗ или КР расположена визирная цель — точечный источник излучения в виде полупроводникового излучающего диода (ПВД). Координатная плоскость XOZ приборной системы координат полагается совпадающей с плоскостью опорного кольца. С помощью видеосистем измеряются углы визирования ν_1 , ν_2 ВЦ в вертикальной плоскости и углы φ_1 , φ_2 между базовой линией (ось OX) и направлением

на источник излучения в горизонтальной плоскости. Координаты визирной цели определяются в соответствии с методом прямой засечки [4, 5].

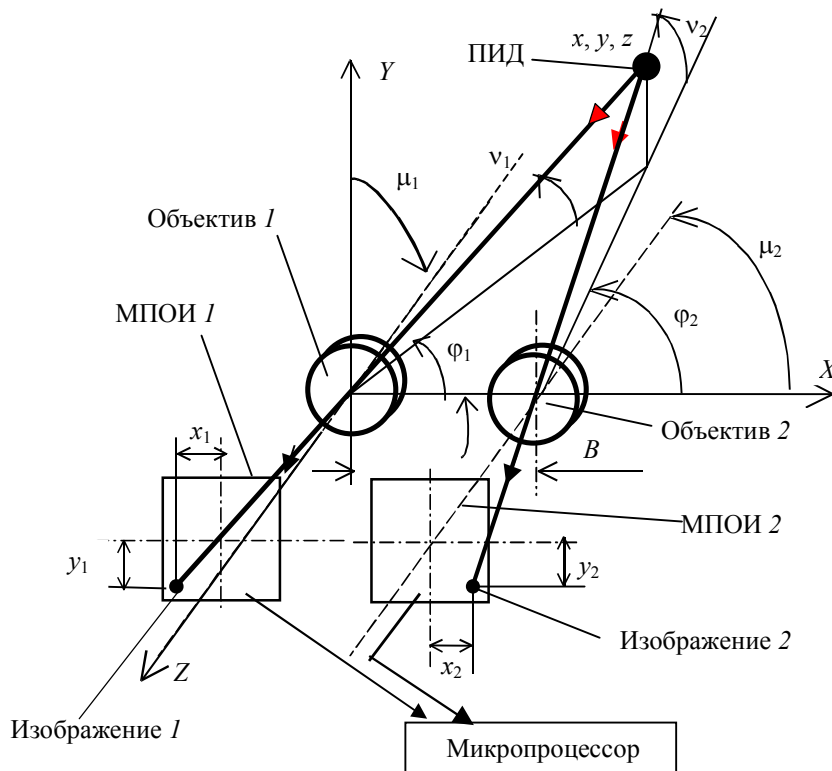


Рис. 2. Схема ОЭС, реализующей метод „угловой засечки“

Для проверки теоретических положений и расчетных методик было выполнено имитационное компьютерное и физическое моделирование ОЭС со следующими характеристиками [5, 6]: ПЗС-матрица SONY ICX259AL (Type 1/3) CCD форматом 752×582, размер пиксела 6,50×6,25 мкм; визирная цель на основе полупроводникового излучающего диода SFH 485 P (фирмы „Siemens“, Германия) с мощностью излучения 10 мВт; погрешность измерения координат изображения не более 0,05 пиксела; фокусное расстояние объективов 450 мм; базовое расстояние $B = 8000$ мм. Результаты экспериментов показали (при физическом моделировании базовое расстояние макета и дистанция были пропорционально уменьшены в 7 раз), что при определении пространственного положения КР (с использованием трех контрольных точек на КР, дальность 22,35 м) реализуется требуемая точность измерения всех трех координат (при среднем квадратическом значении погрешности $\sigma \leq 0,07$ мм). Для ОЭС измерения координат визирной цели на щите ОЗ (расстояние до ВЦ 3...39 м) требуемая точность (при $\sigma \leq 0,05$ мм) достигается при измерении координат x, y , при измерении координаты z — только в 45 % случаев.

Как следует из результатов компьютерного и физического моделирования, требуемая точность измерения смещений системы третьего уровня принципиально достижима при использовании в ОЭС несканирующих длиннофокусных видеосистем с малым угловым полем, измеряющих координаты одной визирной цели. Поскольку поверхность ОЗ составлена из 1200 щитов, система, организованная по принципу „одна ОЭС — одна визирная цель“, не реализуема.

Создание системы измерения деформаций ОЗ как совокупности ОЭС возможно с учетом важной особенности РТ-70: в соответствии с реализуемым в конструкции принципом гомологии результатом малых деформаций исходного (номинального) параболоидального ОЗ является также параболоид, но с несколько иными параметрами. Фактически для определения положения поверхности ОЗ после деформаций достаточно измерить смещения относи-

тельно малого количества визирных целей с последующим математическим построением аппроксимирующего параболоида как нового положения поверхности ОЗ. Моделирование показывает, что для определения координат аппроксимирующего параболоида необходимо измерение не менее чем в 30—40 точках его поверхности.

Дальнейшее упрощение структуры измерительной системы можно осуществить исходя из геометрических свойств ОЗ. Регулярность формы параболоидального ОЗ позволяет для известного начального положения визирной цели вычислить ее смещение вдоль оптической оси одной из видеосистем (изменение дальности) по измеренной величине смещения y по вертикали (см. рис. 2 — первая видеосистема при $\varphi_1 = \mu_1$). Следовательно, из структуры ОЭС измерительного канала можно исключить одну видеосистему.

Согласно изложенным принципам построения общая структура системы третьего уровня (рис. 3) включает 40 измерительных каналов (одиночных видеосистем), объединенных в 8 базовых блоков, расположенных по окружности опорного кольца. Каждый блок объединяет 5 видеосистем, измеряющих смещения x, y визирных целей соответственно в пяти контрольных точках. (На рис. 3 изображены один базовый блок системы контроля поверхности ОЗ и один измерительный канал контроля положения КР.)

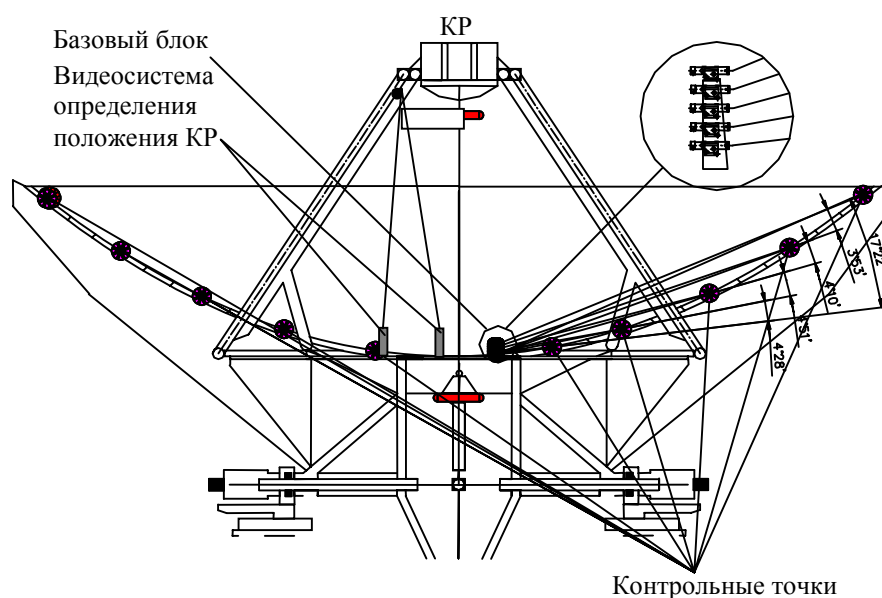


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы третьего уровня

Изменение пространственного положения КР относительно ОЗ определяется посредством измерения координат трех его точек. Визирная цель, установленная в каждой точке, регистрируется одним из трех измерительных каналов, каждый из которых включает две видеосистемы (см. рис. 2).

Результаты теоретического анализа и компьютерного моделирования подтверждают возможность реализации комплекса оптико-электронных систем измерения деформаций элементов конструкции РТ-70 (Суффа) с требуемыми параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубаренко В. В. Радиотелескопы миллиметрового диапазона // Содружество. 2005. № 1. С. 16.
2. Артеменко Ю. Н., Парщиков А. А. Радиотелескоп на плато Суффа. Ход работ по корректировке проекта // Материалы Всерос. астрокосм. конф. ВАК-2004 „Горизонты Вселенной“. М.: Изд-во МГУ, 2004.
3. Коняхин И. А., Лю Лэй. Компенсационный алгоритм автоколлимационных измерений повышенной точности // XXXV науч. и учебно-метод. конф. СПбГУ ИТМО, 2—4 февр. 2005 г., Санкт-Петербург: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. Вып. 18. С. 232—236.

4. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин, Э. Д. Панков; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
5. Коняхин И. А., Бузян А. Т. Моделирование ОЭС измерения пространственных координат на основе метода „прямой угловой засечки“ // Результаты научно-исследовательских работ: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. Вып. 18. С. 304—307.
6. Бузян А. Т., Коняхин И. А. Исследование эффективности полнофакторных экспериментов на макете типового канала системы контроля положения элементов конструкции радиотелескопа РТ-70 // Сб. трудов VII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2006“, 16—20 окт. 2006 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. Т. 1. С. 129—133.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

УДК 681.7.08

И. А. КОНЯХИН, А. Д. МЕРСОН

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАМОРФИРОВАНИЯ

Рассматривается метод измерения угла скручивания на основе анаморфирования. Исследована зависимость коэффициента анаморфирования и угла расходимости пучка излучения от коллимационных поворотов анаморфотного контрольного элемента.

Ключевые слова: автоколлиматор, угол скручивания, телескопическая анаморфотная система.

Обеспечение нормального функционирования крупногабаритных конструкций (доков, подкрановых путей, трубопроводов, несущих опор радио- и оптических телескопов) во многих случаях требует контроля специфической угловой деформации — скручивания. Под углом скручивания понимается угол поворота контролируемого объекта (блока или элемента конструкции) относительно линии, соединяющей объект и некоторый базовый пункт.

В частности, характерным примером деформации является скручивание угломестной (горизонтальной) оси полноповоротного радиотелескопа (РТ). При ориентировании много-тонной зеркальной системы по углу места происходит скручивание угломестной оси, что приводит к погрешности наведения РТ. Для компенсации возникающей погрешности необходимо производить измерение указанного угла скручивания.

Известен ряд автоколлимационных систем для измерения угла скручивания, построенных с использованием тетраэдрических отражательных элементов [1]. Для работы таких систем необходимо наличие трассы „контролируемый объект — базовый пункт“ со световым диаметром до сотен миллиметров. Конструкция угломестной оси РТ, реализуемая на основе полого вала, не обеспечивает необходимую трассу при расположении измерительной системы внутри вала.

В условиях узкой трассы эффективно использование автоколлимационных систем измерения угла скручивания на основе анаморфирования [1]. Оптическая схема такой системы представлена на рис. 1.

На базовом пункте устанавливается автоколлиматор 1, излучающий канал которого, образованный светоделителем 5, включает источник 2, подсвечивающий через конденсор 3 квадратную марку — диафрагму 4, расположенную в фокальной плоскости объектива 1. В фокальной плоскости объектива 6 приемного канала расположен приемник в виде ПЗС-матрицы 7. Сформированный матрицей видеоквадр обрабатывается компьютером (на рисунке не показан). На контролируемом объекте располагается контрольный элемент, состоящий из телескопической анаморфотной системы 8, установленной на половине апертуры уголкового отражателя (трипель-призмы) 9. Параллельный пучок лучей, сформированный излучающим каналом, проходит через анаморфотную систему 8 и, после отражения, выходит из открытой части апертуры отражателя 9. Пройдя через объектив 6, отраженный пучок формирует изображение диафрагмы-марки 4 на ПЗС-матрице 7. Вследствие действия анаморфотного элемента 8 изменяется угол расходимости пучка в плоскости главного сечения составляющих систему оптических клиньев δ' и δ'' , что приводит к изменению формы изображения марки по сравнению с исходной.

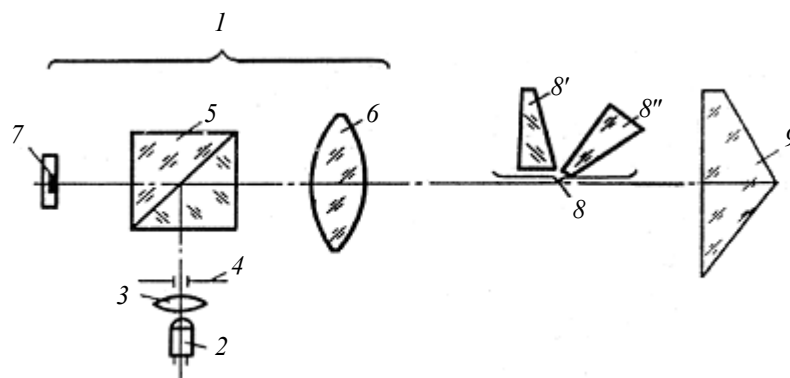


Рис. 1. Оптическая схема системы измерения угла скручивания

Поворот контролируемого объекта на угол скручивания относительно оптической оси объектива вследствие соответствующего разворота главного сечения анаморфотной системы приводит к дополнительному изменению формы и размера изображения марки. Параметры формы изображения определяются в результате обработки видеоквадра, сформированного ПЗС-матрицей, их изменения характеризуют измеряемый угол скручивания.

В наиболее простом варианте анаморфотная телескопическая система включает два оптических клина (рис. 2) [2]. Клинья установлены последовательно по ходу луча таким образом, что углы падения ε_1 и преломления ε'_1 луча на первой преломляющей грани первого клина и соответствующие углы ε_3 и ε'_3 для второго клина равны нулю, а углы Θ_{12} , $-\Theta_1$, Θ_2 равны.

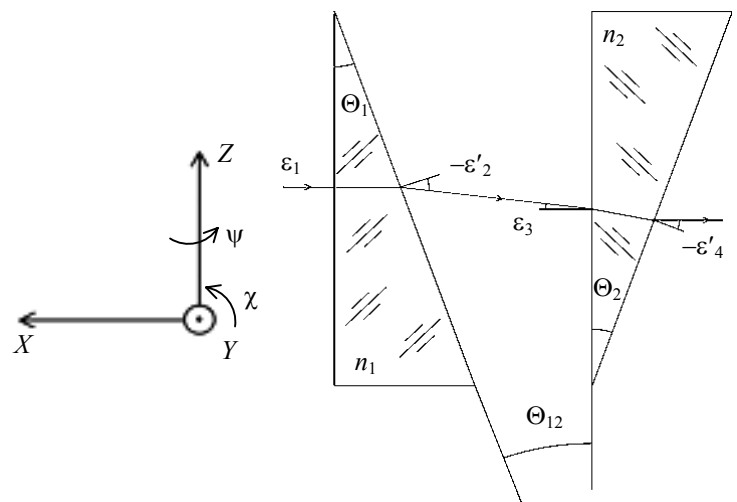


Рис. 2. Анаморфотная телескопическая система

Телескопичность системы при сохранении ее анаморфотных свойств обеспечивается тем, что клинья выполняются из оптического стекла разных марок с показателями преломления n_1 и n_2 соответственно.

Повороты анаморфотной системы на коллимационные углы относительно осей, перпендикулярных оси скручивания, приводят к изменению хода лучей через клинья и, следовательно, могут являться источником погрешности измерения.

Цель исследований, описываемых в настоящей статье, — определение влияния коллимационных поворотов на параметры анаморфотной системы.

Рассмотрим математическую модель действия анаморфотной системы.

Зададим базовую систему координат (СК) XYZ , ось OX которой совпадает с оптической осью и противоположна по отношению к орту луча. С анаморфотным элементом свяжем систему координат $X_k Y_k Z_k$ оптических клиньев (клиновую), оси и начало координат которой в исходном положении совпадают с осями базовой системы. Углы поворота клиновой системы относительно осей OY , OZ являются коллимационными углами χ , ψ .

Пусть падающий луч задается в базовой СК ортом \mathbf{A} . Тогда после перехода в клиновую СК луч будет описываться вектором \mathbf{A}_k :

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{Q}^{-1} \cdot \mathbf{A},$$

где \mathbf{Q} — матрица преобразования координат, записываемая как

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos \chi \cos \psi & -\cos \chi \sin \psi & \sin \chi \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ -\sin \chi \cos \psi & \sin \chi \sin \psi & \cos \chi \end{bmatrix}.$$

Орт \mathbf{A}'_k луча после выхода из первого клина определяется как

$$\mathbf{A}'_k = \begin{bmatrix} \frac{A_{kx}}{|A_{kx}|} \sqrt{1 - (A_{ky})^2 - \left(\sin \varepsilon'_2 \cdot \sqrt{1 - (A_{ky})^2} \right)^2} \\ A_{ky} \\ \sin \varepsilon'_2 \cdot \sqrt{1 - (A_{ky})^2} \end{bmatrix}.$$

Здесь A_{kx} , A_{ky} — проекции орта \mathbf{A}_k на соответствующие координатные оси, ε'_2 — угол преломления луча на второй грани первого клина:

$$\varepsilon'_2 = \arcsin(n'_1 \sin(\Theta_1 + \varepsilon'_1)),$$

где $n'_1 = n_1 (\sin \beta_2 / \sin \beta_1)$ — эффективный показатель преломления, зависящий от углов β_1 , β_2 падения и преломления луча в плоскости XOY :

$$\beta_1 = \arccos(-A_{ky}), \quad \beta_2 = \arccos\left(\frac{-A_{ky}}{n_1}\right), \quad \varepsilon'_1 = \arcsin\left(\frac{A_{kz}}{\sqrt{A_{kx}^2 + A_{kz}^2}}\right).$$

Для того чтобы определить орт \mathbf{E}_k падающего на второй клин луча, осуществим поворот орта \mathbf{A}'_k по часовой стрелке на угол Θ_1 :

$$\mathbf{E}_k = \begin{bmatrix} A'_{kx} \cos(-\Theta_1) + A'_{kz} \sin(-\Theta_1) \\ A'_{ky} \\ A'_{kz} \cos(-\Theta_1) - A'_{kx} \sin(-\Theta_1) \end{bmatrix}.$$

Аналогично рассчитав для второго клина соответствующие величины β_3 , β_4 , n'_2 , ε_3 , ε'_3 , ε'_4 , получим вектор \mathbf{E}'_k луча после выхода из второго клина, который для учета наклона его

выходной грани необходимо повернуть по часовой стрелке на угол Θ_2 . В результате получаем вектор $\mathbf{E}'_{k\text{п}}$, умножив который на матрицу преобразования координат \mathbf{Q} , определим орт \mathbf{W} луча в базовой системе координат на выходе анаморфотной системы:

$$\mathbf{W} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{E}'_{k\text{п}}.$$

Рассмотрим коэффициент анаморфирования $K_{\text{ан}}$ системы, определяющий ее чувствительность к измеряемому углу скручивания [3]. Коэффициент $K_{\text{ан}}$ будет равен произведению соответствующих коэффициентов для каждого клина:

$$K_{\text{ан}} = K_{\text{ан1}} K_{\text{ан2}},$$

где

$$K_{\text{ан1}} = \cos \varepsilon_1 \frac{\sqrt{(n'_1)^2 - \sin^2 \varepsilon_1} \cdot \cos \Theta_1 - \sin \varepsilon_1 \sin \Theta_1}{\sqrt{(n'_1)^2 - \sin^2 \varepsilon_1} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \varepsilon_1 \cos \Theta_1 + \sqrt{(n'_1)^2 - \sin^2 \varepsilon_1} \cdot \sin \Theta_1 \right)^2}},$$

$$K_{\text{ан2}} = \cos \varepsilon_2 \frac{\sqrt{(n'_2)^2 - \sin^2 \varepsilon_2} \cdot \cos \Theta_2 - \sin \varepsilon_2 \sin \Theta_2}{\sqrt{(n'_2)^2 - \sin^2 \varepsilon_2} \cdot \sqrt{1 - \left(\sin \varepsilon_2 \cos \Theta_2 + \sqrt{(n'_2)^2 - \sin^2 \varepsilon_2} \cdot \sin \Theta_2 \right)^2}}.$$

При осевом падении исходного луча на первый клин (орт $\mathbf{A} = [-1, 0, 0]^T$) величина угла γ отклонения выходящего из второго клина луча от исходного определяет нетелескопичность системы; угол γ определяется как

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{W_z}{\sqrt{W_x^2 + W_z^2}} \right),$$

где W_z, W_x — составляющие вектора \mathbf{W} .

Исследование проводилось по следующему алгоритму.

1. Задавалась величина углов χ, ψ от -5 до 5° с шагом $30'$.
2. Для каждого значения угла вычислялись коэффициент анаморфирования $K_{\text{ан}}$ [3] и величина угла γ .

При моделировании рассматривались два варианта анаморфотной системы.

Для первого варианта показатели преломления клиньев различны: $n_1 = 1,5215$ (марка стекла К100) и $n_2 = 1,6140$ (марка стекла БФ21). Эти марки стекол были предварительно выбраны исходя из условия телескопичности анаморфотной системы. По результатам расчета получены следующие параметры системы: $K_{\text{ан}} = 1,414$; $\gamma = 0$.

Для второго варианта клинья были выполнены из ординарного стекла К8 с показателем преломления $n = 1,5163$; рассчитанные параметры системы: $K_{\text{ан}} = 1,375$; $\gamma = 3,12'$.

Из сравнения следует, что во втором варианте система менее чувствительна к измеряемому углу скручивания и имеет малое отклонение от телескопичности, однако ее реализация значительно дешевле по сравнению с первым вариантом, в котором используются специальные марки оптических стекол.

Анализ результатов моделирования показал, что рассматриваемые анаморфотные системы практически инвариантны к повороту на коллимационный угол ψ относительно оси OZ : коэффициент анаморфирования изменяется на $0,1\%$, изменение телескопичности не более $2''$.

Существенное влияние на параметры анаморфотной системы оказывает поворот ее вокруг оси OY (рис. 3). Для первого варианта системы относительное изменение коэффициента

анаморфирования составило величину $dK_{ан} = 0,064$, отклонение от телескопичности до $4,5'$, для второго варианта $dK_{ан} = 0,087$ при увеличении отклонения от телескопичности до $5,3'$.

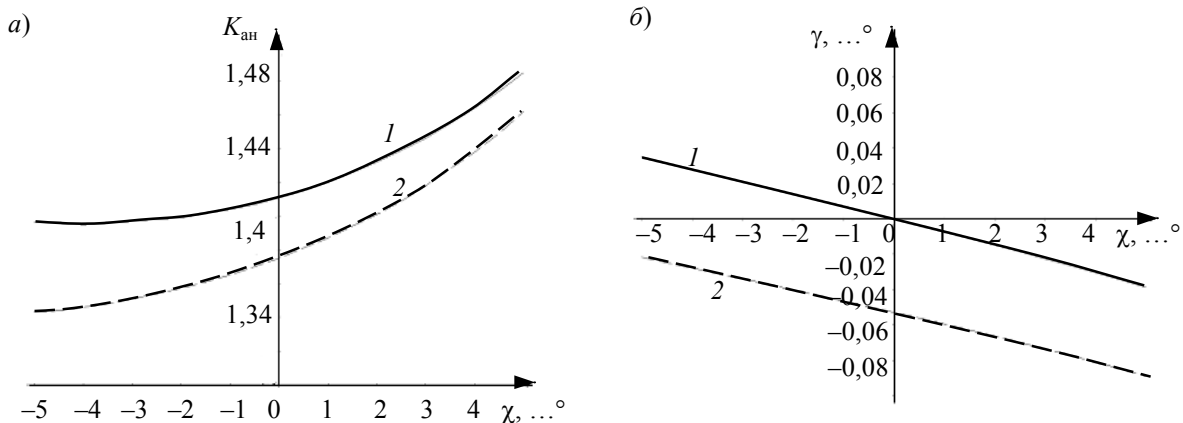


Рис. 3. Зависимость коэффициента $K_{ан}$ (а) и угла γ (б) от угла смещения χ :
1 — специально подобранные марки оптических стекол, 2 — стекло марки К8

При известном значении коллимационного угла погрешность измерения угла скручивания может быть уменьшена введением поправки, рассчитанной по математической модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000.
2. Бегунов Б. Н. Трансформирование оптических изображений. М.: Искусство, 1965.
3. Мерсон А. Д. Анализ схем построения систем измерения параметров угловой пространственной ориентации на основе явления анаморфозы // Тр. IV Межвуз. конф. молодых ученых. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 39—41.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

УДК 681.7.08,681.78

А. М. ВОРОНА, И. А. КОНЯХИН

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО ВИНЬЕТИРОВАНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Рассматривается процесс регулярного виньетирования оптического пучка в авторефлексионных углоизмерительных системах на примере измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа РТ-70 (Суффа).

Ключевые слова: оптико-электронный углоизмерительный автоколлиматор, аналитическое описание виньетирования, погрешность измерения.

Метрологическое обеспечение процесса изготовления современных энергоблоков, крупногабаритных транспортных средств, установок для научных исследований требует точного контроля углового положения элементов их конструкции при сборке, юстировке и по-

следующей эксплуатации. Например, такие измерения обязательны при создании авиационных и корабельных стапелей, координатных стендов, наземных радиотелескопов, ускорителей заряженных частиц. Типичным примером является задача измерения угловых деформаций элементов опорно-поворотного устройства создаваемого радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа) со следующими параметрами: дистанция от базового до контролируемого элемента 25 м, углы поворота порядка $10'$, среднее квадратическое значение погрешности измерения $2''$.

Для измерения отклонения углового пространственного положения элементов конструкции от номинального (например, вследствие деформаций, вызванных весовыми или температурными изменениями) эффективным является использование оптико-электронных автоколлимационных углоизмерительных систем. Их преимущество заключается в отсутствии электрической связи с контролируемым объектом, на котором располагается малогабаритный зеркальный контрольный элемент в виде плоского зеркала или отражающей призмы [1].

Однако реализация измерительной системы с требуемыми параметрами на основе известных автоколлимационных схем практически невозможна из-за появления значительной погрешности, обусловленной виньетированием отраженного пучка. Эта систематическая составляющая погрешности возникает вследствие изменения формы регистрируемого изображения из-за неодинакового виньетирования элементарных пучков лучей, формирующих симметрично расположенные точки (так называемое „радикальное виньетирование“) [2].

Для уменьшения погрешности, вызванной виньетированием, следует использовать специальный вариант автоколлимационной системы — авторефлексионную схему.

Структурная схема оптико-электронной авторефлексионной углоизмерительной системы (ОЭАУС) представлена на рис. 1. Пучок излучающей марки I (в качестве марки используется точечный источник излучения, например, инфракрасный излучающий диод) после отражения от контрольного элемента — плоского зеркала 2 — принимается объективом 3 , который формирует в сопряженной плоскости на матричном приемнике оптического излучения 4 изображение излучающей марки I' . В результате микропроцессорной обработки видеокadra, поступающего с приемника 4 , компьютером 5 определяются координаты изображения марки на его чувствительной площадке. Поворот контрольного элемента 2 приводит к смещению изображения марки, которое является мерой измеряемого угла поворота.

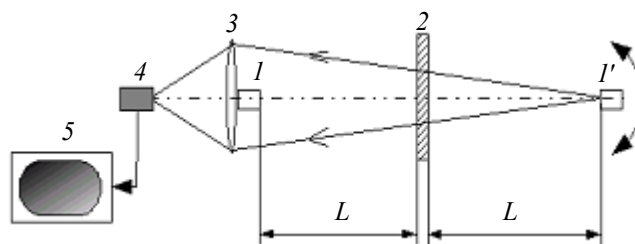


Рис. 1. Структура ОЭАУС

При решении рассматриваемой задачи в ОЭАУС реализуется так называемое „регулярное“ виньетирование, приводящее к нарушению симметрии распределения облученности в изображении марки без изменения его формы.

Регулярное виньетирование становится радикальным при предельном угле поворота контрольного элемента [3]

$$\Theta_{\max} = \frac{D_{\text{об}}}{4L},$$

где $D_{\text{об}}$ — диаметр объектива, L — расстояние до контрольного элемента (КЭ).

Величина Θ_{\max} определяет диапазон измерения смещения рассматриваемой ОЭАУС.

Для регулярного виньетирования может быть в явном виде получена аналитическая зависимость между величиной угла поворота контрольного элемента и возникающей погрешностью измерения и, следовательно, построен алгоритм компенсации погрешности.

Цель исследований — аналитическое описание регулярного виньетирования в ОЭАУС.

Рассмотрим виньетирование пучка оправами оптических элементов ОЭАУС как действие некоторого пространственного фильтра. При этом будем использовать функцию виньетирования, описывающую относительную величину виньетирования оптического пучка в зависимости от угла поворота Θ контрольного элемента и угла β между осевым и рассматриваемым пучками. Функция виньетирования $\Psi(\beta, \Theta)$ может быть определена как отношение площадей входного зрачка приемного объектива для внеосевого пучка: в направлении поворота КЭ и против него.

В качестве меры влияния регулярного виньетирования на изображение марки при заданном угле поворота Θ используется коэффициент виньетирования

$$\varepsilon(\Theta) = \frac{\int (1 - \Psi(\beta, \Theta)) d\beta}{\int \Psi(\beta, \Theta) d\beta}.$$

Заметим, что вследствие симметричного строения оптического пучка при отсутствии виньетирования коэффициент ε равен нулю, тогда как при максимальном регулярном виньетировании $\varepsilon = 1$.

Искажение формы изображения марки в плоскости анализа вследствие виньетирования описывается нормированной функцией $\psi(x, \varepsilon)$, где x — линейная координата в плоскости анализа в направлении поворота КЭ.

Рассмотрим связь нормированной функции искажения изображения с коэффициентом виньетирования, для чего установим граничные условия ее определения.

В соответствии с инвариантностью регулярного виньетирования к знаку угла Θ , а также зависимостью максимального значения линейной координаты изображения от предельного угла Θ_{\max} , определяемой выражением

$$x_{\max} = \Theta_{\max} F = \frac{D_{\text{об}} F}{4L},$$

на нормированную функцию виньетирования могут быть наложены следующие граничные условия:

— условие нормирования:

$$\psi(x = 0, \varepsilon) \equiv 1, \quad \psi(x, \varepsilon = 0) \equiv 1;$$

— условие симметричности:

$$\psi(x, \varepsilon) - 1 = -(\psi(-x, \varepsilon) - 1);$$

— условие сохранения энергии:

$$\psi(x = -\infty, \varepsilon) = 0, \quad \psi(x = \infty, \varepsilon) = 2;$$

— условие проявления регулярного виньетирования:

$$\psi\left(x = \frac{D_{\text{об}} F}{4L}, \varepsilon\right) = 1 - \varepsilon,$$

где F — фокусное расстояние объектива.

Основываясь на анализе работы авторефлексионных систем [3], можно сделать вывод о полиномиальной зависимости $\varepsilon(\Theta) \sim P(\sin \Theta)$.

Так как при малых углах поворота КЭ (до единиц градусов) зависимость площади входного зрачка объектива от их величины для каждого элементарного оптического пучка линейна и нечетна, функция виньетирования непосредственно определяется функцией, описывающей распределение энергии в пучке. Поскольку в авторефлексионной схеме плоскость анализа удалена от источника на расстояние, превышающее дистанцию формирования пучка, распределение энергии в пучке и, следовательно, функция виньетирования определяется функцией рассея-

ния точки (ФРТ) оптической системы. Таким образом, при известных значениях ФРТ (при расчетах можно использовать функцию $E_0(x, y)$ распределения освещенности в плоскости анализа при отсутствии поворота КЭ) с использованием определенного алгоритма вычисления координат центра изображения по распределению его освещенности $E(x, y)$ и с учетом основных габаритных характеристик оптических элементов системы можно построить алгоритм компенсации систематической погрешности, обусловленной регулярным виньетированием.

Рассмотрим результаты моделирования системы на основе линейной ФРТ.

Для объективов с малой светосилой возможно приближение ФРТ линейной функцией вида $E_0(x) = 1 - |x|$. В этом случае функция $\psi(x, \varepsilon)$ линейна относительно x и с учетом граничных условий имеет вид

$$\psi(x, \varepsilon) = 1 - 4 \frac{L\varepsilon}{D_{об}F} x.$$

При определении координат центра изображения часто используется центровзвешенное суммирование [1]:

$$x_{изм} = \frac{\int xE(x) dx}{\int E(x) dx}. \quad (1)$$

Интегрируя выражение (1) при $E(x) = E_0(x)\psi(x, \varepsilon)$, получаем погрешность измерения вследствие виньетирования, определяемую как

$$\sigma_B = \frac{2L\varepsilon}{3D_{об}F} = \frac{2L}{3D_{об}F} \sin^2 \Theta. \quad (2)$$

Для проверки данных, полученных путем теоретических выкладок, а также выработки практических рекомендаций были проведены эксперименты на макете ОЭАУС. Параметры макета: объектив с фокусным расстоянием 400 мм и относительным отверстием 1:8, марка в виде полупроводникового излучающего диода SFH 485 P (фирмы „Siemens“, Германия) мощностью 10 мВт. Анализатор — КМОП-матрица OV5610 Color CMOS QSXGA (5.17 MPixel), размер пиксела 2,8×2,8 мкм. Контрольный элемент — плоское зеркало со световым диаметром 75 мм — расположен на расстоянии 23 м. Определялась статическая характеристика макета системы в диапазоне $\pm 8'$.

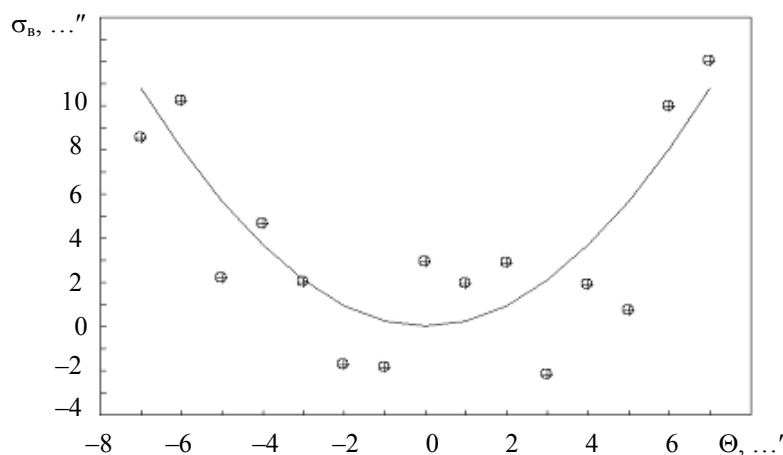


Рис. 2. Погрешность измерения угла поворота контролируемого объекта

В результате эксперимента было выявлено наличие обусловленной регулярным виньетированием систематической погрешности, составляющей до 12" на краю диапазона (см. рис. 2, кружками показаны экспериментальные значения). Теоретическая зависимость (2), показанная сплошной линией, соответствует экспериментальным данным, что позволяет

скорректировать статическую характеристику. В результате среднее квадратическое значение нескомпенсированной случайной составляющей погрешности измерения составило 2,30", что соответствует требованиям к точности оптико-электронной авторефлексионной углоизмерительной системы определения деформаций элементов конструкции РТ-70.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2000. 197 с.
2. Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры. Справочник. М.: Недра, 1991. 224 с.
3. Ворона А. М., Лю Лэй. Экспериментальное исследование погрешности авторефлексионных измерений вследствие виньетирования // Тр. III Межвуз. конф. молодых ученых. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. С. 55—57.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

УДК 536.8:621.384

А. М. АЛЕЕВ, К. Г. АРАКАНЦЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

К. Б. ЕРШОВА, В. В. ПЕТУХОВСКИЙ, С. В. ПЕТУХОВСКИЙ, А. Е. ХОЛИН

*Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта
Москва*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕПЕРНЫХ МЕТОК

Рассматриваются особенности построения и технические характеристики оптико-электронной системы контроля положения железнодорожного пути в продольном профиле, плане и по уровню. Контроль осуществляется относительно инфракрасных реперных меток, расположенных на опорах контактной сети и задающих проектное положение железнодорожного полотна.

Ключевые слова: оптико-электронная система, внутрибазовая схема, матричный фотоприемник, реперная метка, погрешность измерения координат.

Измерение параметров положения железнодорожного пути и оценка полученных результатов являются важными аспектами совершенствования процесса ремонта пути современными высокопроизводительными путевыми машинами. Измерения должны производиться в автоматическом режиме при движении по пути в достаточно жестких условиях эксплуатации (вибрации, удары, засветки и т.д.) [1].

В настоящее время во Всероссийском научно-исследовательском институте железнодорожного транспорта (Москва) опробованы методы и схемы, позволяющие синхронно с другими измерениями регистрировать параметры положения пути в пределах практически любого участка [2]. Применение существующих оптико-электронных средств хотя и обеспечивает более высокую степень автоматизации измерения геометрических параметров пути, однако

позволяет измерять лишь некоторые из них [3, 4], тогда как задача комплексного определения положения железнодорожного пути в системе координат, привязанной к геодезической опорной сети, полностью практически не решена.

Разработанная в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики опτικο-электронная система контроля положения реперных меток (ОЭС КПРМ) позволяет в процессе движения выправочной машины определять прокладки рельсовой нити в вертикальной плоскости (выправка), взаимное положение рельсовых нитей по высоте (поперечный уровень) и положение в плане (рихтовка) относительно инфракрасных реперных меток, сопряженных с геодезической опорной сетью.

Схема измерений, положенная в основу работы ОЭС КПРМ, представлена на рис. 1. В системе базовый блок 1, расположен на тележке 3, которая жестко базируется на железнодорожном пути 4. Положение базового блока относительно реперных меток 2 определяется в приборной системе координат $OXYZ$ (ось OX — рихтовка, ось OY — выправка). Координаты, а также угол поворота базового блока вокруг оси OZ (поперечный уровень) измеряются в момент прохождения выправочной машины мимо опоры с закрепленной на ней меткой.

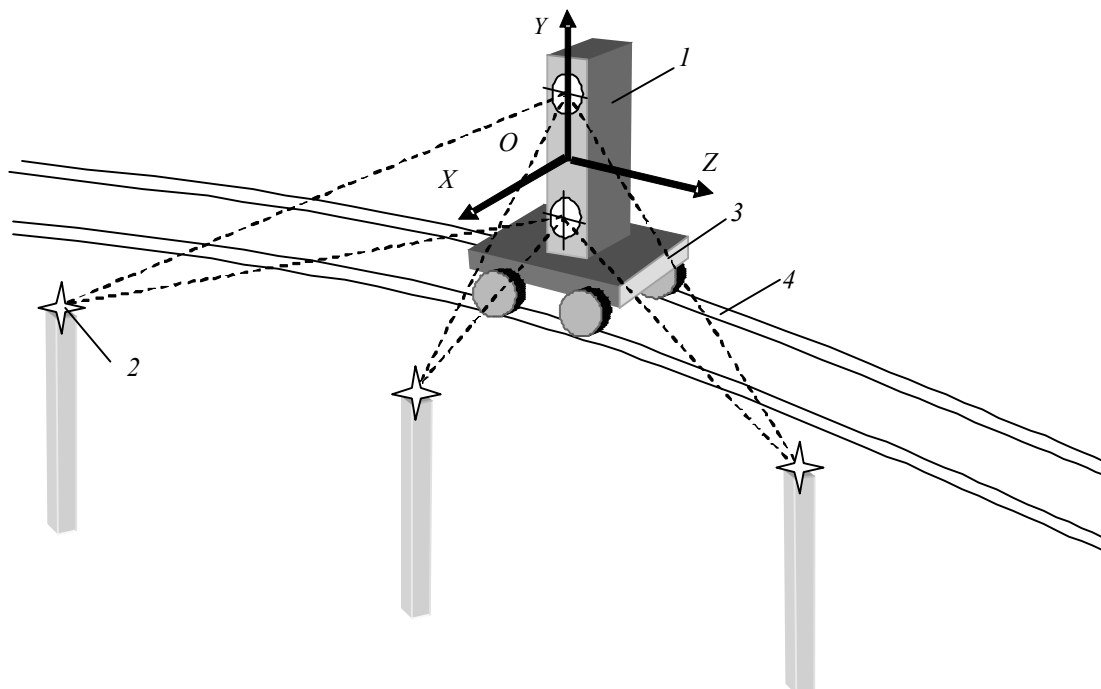


Рис. 1. Схема измерений координат положения пути

В основу измерений положена внутрибазовая схема [5, 6], представленная на рис. 2. При использовании в этой схеме двух фотоприемных модулей (ФМ), каждый из которых содержит объектив 1 и матричный фотоприемник 2, измеряются координаты y'_1 и y'_2 изображений реперной метки 3 на фотоприемниках. По этим координатам вычисляются координаты Y_1 и Z_1 (выправка и рихтовка) положения железнодорожного пути в профиле и плане:

$$Y_1 = \left[B_1 \left(\frac{B_2 - y'_2}{Z_{02} - a'_2} \right) - B_2 \left(\frac{B_1 - y'_1}{Z_{01} - a'_1} \right) \right] / \left(\frac{B_2 - y'_2}{Z_{02} - a'_2} + \frac{B_1 - y'_1}{Z_{01} - a'_1} \right);$$

$$Z_1 = (B_1 + B_2) / \left(\frac{B_2 - y'_2}{Z_{02} - a'_2} + \frac{B_1 - y'_1}{Z_{01} - a'_1} \right),$$

где B_1 и B_2 — расстояния (базы) от оси OZ приборной системы координат до оптических осей объективов верхнего и нижнего ФМ; a'_1 и a'_2 — задние отрезки объективов верхнего и нижнего ФМ; y'_1 и y'_2 — координаты изображений реперной метки, измеренные в верхнем и нижнем ФМ в системе координат матричных фотоприемников.

Потенциальная точность измерений во внутрибазовых схемах определяется погрешностью измерения координат $\Delta y'_1$ и $\Delta y'_2$. Относительные частичные погрешности $\partial Z_{1\Delta y'_i}$, $\partial Y_{1\Delta y'_i}$ измерения координат смещений пути от величины $\Delta y'_i$ определяются выражениями

$$\partial Z_{1\Delta y'_i} = \frac{\Delta y'_i}{a'_i(N+M)}; \quad \partial Y_{1\Delta y'_i} = \frac{N^{(2-i)}(-M)^{(i-1)}(B_1+B_2)\Delta y'_i}{a'_i(B_1N-B_2M)(N+M)},$$

где $i=1$ соответствует верхнему ФМ, $i=2$ — нижнему ФМ, $N = \left[\frac{B_2}{Z_{02}} - \frac{y'_2}{a'_2} \right]$, $M = \left[\frac{B_1}{Z_{01}} - \frac{y'_1}{a'_1} \right]$.

Зависимости суммарных относительных погрешностей $\partial Z_{1\Delta y'}$, $\partial Y_{1\Delta y'}$ от $\Delta y'_i$ имеют следующий вид:

$$\partial Z_{1\Delta y'} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\partial Z_{1\Delta y'_i})^2}, \quad \partial Y_{1\Delta y'} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\partial Y_{1\Delta y'_i})^2}.$$

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что метод энергетического взвешивания позволяет измерять координаты изображения реперной метки с погрешностью 0,01—0,04 размера пиксела матричного фотоприемника [7].

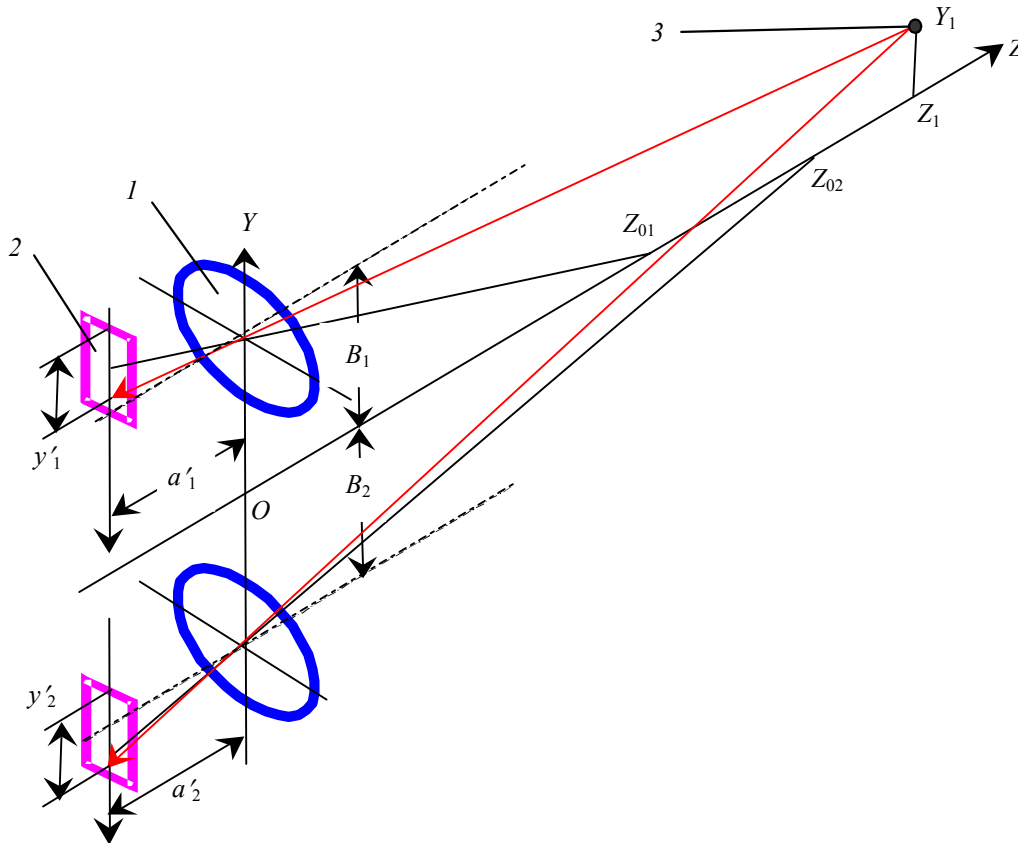


Рис. 2. Принципиальная схема ОЭС КПРМ

Графики, отражающие теоретические зависимости погрешностей измерения координат железнодорожного пути от погрешностей определения координат изображений реперной метки, представлены на рис. 3. Анализ графиков показывает, что основным фактором, определяющим такие параметры системы, как фокусное расстояние объектива (f') и расстояние между каналами ФМ, является погрешность определения координаты смещения пути в плане. Из анализа хода кривых следует, что в целях увеличения потенциальной точности системы необходимо увеличивать расстояние между каналами ФМ. При этом для обеспечения работы системы во всем заданном диапазоне смещений пути следует уменьшать фокусное расстояние

объектива. В соответствии с техническим заданием на размер базы наложено жесткое ограничение: она равна 300 мм. Это обстоятельство определяет выбор фокусного расстояния объектива, а также предельную точность системы (см. рис. 3, кривые 2).

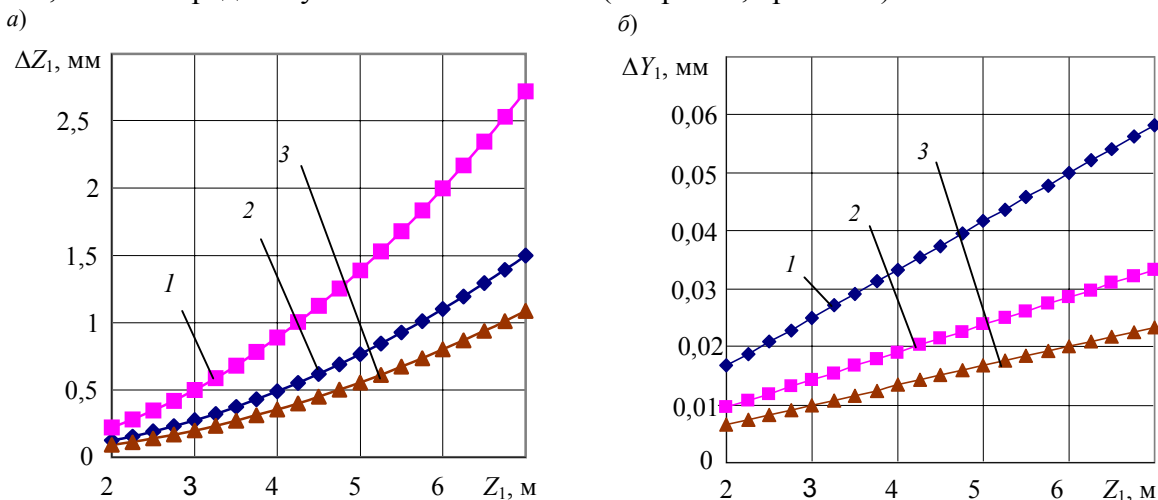


Рис. 3. Графики зависимости погрешностей измерения координат смещения пути в профиле (а) и в плане (б) от величины Z_1 :

1 — при $f'=40$ мм, $B=150$ мм; 2 — при $f'=35$ мм, $B=300$ мм; 3 — при $f'=30$ мм, $B=500$ мм.

Для реализации опытного образца системы были выбраны КМОП-матрица OV5610 Color CMOS QSXGA фирмы „Omni Vision“, США (размер пиксела $5,5 \times 5,5$ мкм), объектив Гелиос 33 ($f'=35$ мм). В качестве излучателя, установленного на реперной метке, применен светодиод SFH 485 P фирмы „Siemens“, Германия ($\lambda=880$ нм).

В ходе исследований были обнаружены существенные погрешности измерения координат смещения пути в плане $\Delta Z_1(Y_1)$ и в профиле $\Delta Y_1(Y_1)$, которые имеют нелинейный характер. В обоих случаях прослеживается наличие накопленной систематической погрешности [8]. В целях их уменьшения были уточнены некоторые параметры системы. В результате обработки серий измерений заранее заданных координат были уточнены базы каналов, задние отрезки объективов, наклон и разворот матричных приемников относительно визирных осей каналов.

Экспериментальные исследования величин среднеквадратических отклонений измеряемых параметров показали, что при движении реперной метки со скоростью до 10 км/ч СКО регистрируемых смещений пути в профиле (ось OY) не превышает 0,3 мм, а СКО смещений пути (ось OZ) в плане не превышает 1,8 мм.

Согласно анализу результатов экспериментов для различных скоростей движения на среднее квадратическое значение погрешности измерений положения железнодорожного полотна существенное влияние оказывает режим работы фотоприемных модулей, поэтому переход на единое измерительное поле (внутрибазовую схему с одним ФМ) позволит значительно модернизировать систему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуленко Н. Н., Фомин В. В. Механизация и автоматизация путевых работ за рубежом. М.: Транспорт, 1975. 232 с.
2. Актуальные проблемы выправки и приемки пути после ремонта / А. Я. Коган, К. Б. Ершова, В. В. Петуховский и др. // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 5. С. 7—9.
3. Пат. 2256575 РФ. Способ измерения геометрии рельсового пути и устройство для его осуществления / И. В. Бондаренко, М. А. Великотный, А. П. Калужный // Б.И. 2005. № 20.

4. Джабиев А. Н., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной / Под ред. Э. Д. Панкова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 1998. 238 с.
5. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966. С. 564.
6. Алеев А. М., Араканцев К. Г., Тимофеев А. Н. Исследование схемы внутрибазового оптико-электронного канала двойного изображения с матричной фотоприемной частью для контроля смещений // Сб. трудов VII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2006“, 16—20 окт. 2006 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. Т. 1. С. 43—47.
7. Араканцев К. Г., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н. Пути совершенствования распределенных оптико-электронных систем контроля смещений // Исследования в области оптики и физики: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. Вып. 18. С. 215—221.
8. Алеев А. М., Араканцев К. Г. Экспериментальная оценка систематических погрешностей измерения смещений внутрибазовой оптико-электронной системой контроля положения железнодорожного пути // Тр. Пятой междунар. конф. молодых ученых и специалистов „Оптика — 2007“, 15—19 окт. 2007 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 230—231.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

УДК 681.786

А. Г. АНИСИМОВ, А. А. ГОРБАЧЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, А. В. ПАНТЮШИН

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ

Рассматривается оптико-электронная система контроля соосности элементов турбоагрегатов, реализованная на основе анализа матричного поля. Приводится методика пересчета координат для измерительных и технологических баз.

Ключевые слова: контроль положения, соосность, прямолинейность, линейное и угловое позиционирование, турбоагрегат, фоточувствительный прибор с рядовой связью, метод авторефлексии.

Для осуществления безотказной работы современных крупногабаритных технологических агрегатов необходимо соблюдение высоких требований по линейному и угловому позиционированию составляющих. Актуальной проблемой является обеспечение точности позиционирования (до 0,06 мм и менее) опор турбоагрегатов атомных и гидроэлектростанций относительно линии вала. Общий уровень автоматизации данных агрегатов требует соответствующего уровня автоматизации и унификации систем пространственного контроля.

При решении задач пространственного контроля сочетание таких факторов, как дистанционность и бесконтактность, возможность полной автоматизации процесса измерений, а также высокое быстродействие при обработке информации обеспечивает перспективность использования оптико-электронных систем. В большей степени решения подобного класса задач реализованы в оптико-электронной системе контроля соосности (ОЭС КС) [1]. Однако при создании таких систем возникают вопросы их рационального построения. Настоящая статья направлена на восполнение информации о построении этих систем.

Основной задачей ОЭС КС является определение линейного смещения геометрических центров корпусных деталей цилиндров (КДЦ) турбоагрегатов относительно рабочей линии ротора или другой протяженной измерительной базы в двух взаимно перпендикулярных поперечных направлениях (с погрешностью, не превышающей 0,06 мм на расстояниях до 20 м). В процессе измерений линия ротора в пространстве определяется в передней и задней базовых расточках (ПБР, ЗБР) [2].

В ОЭС КС на фоточувствительный прибор с зарядовой связью (ФПЗС) 1 (рис. 1, а), находящийся в приемно-передающем блоке 2, через телеобъектив 3 и светофильтр 4 посредством отражателя 8 проецируются изображения двух полупроводниковых излучающих диодов (ПИД). Для обеспечения требуемого диапазона смещений по дистанции в системе используются две пары ПИД 5 и 6, закрепленных на плоскопараллельной пластинке. Отражатель (трипель-призма) 8 закрепляется в центроискателе 9, который устанавливается последовательно при измерениях во всех КДЦ, ПБР и ЗБР. Особенность центроискателя заключается в возможности замены соответствующих стандартных микрометрических нутромеров 10: это позволяет производить измерения на различных типах турбоагрегатов разного диаметра, что является необходимым требованием по унификации системы контроля [2].

В процессе измерений определяются координаты изображений i -го ПИД, в пикселах (методом определения энергетического центра). Достоинствами используемого метода являются простота и высокая точность (погрешность составляет 0,1—0,01 размера пиксела) [3]. Высокая скорость и производительность при обработке результатов измерений достигается благодаря использованию аппаратно-программной реализации блока предварительной обработки. Для камеральных условий экспериментально установлено, что при серии из 30 измерений получается достаточно полная статистическая выборка. Статистически обработанные результаты передаются по каналу связи в компьютер, заносятся в базу данных и выводятся в удобном для оператора виде.

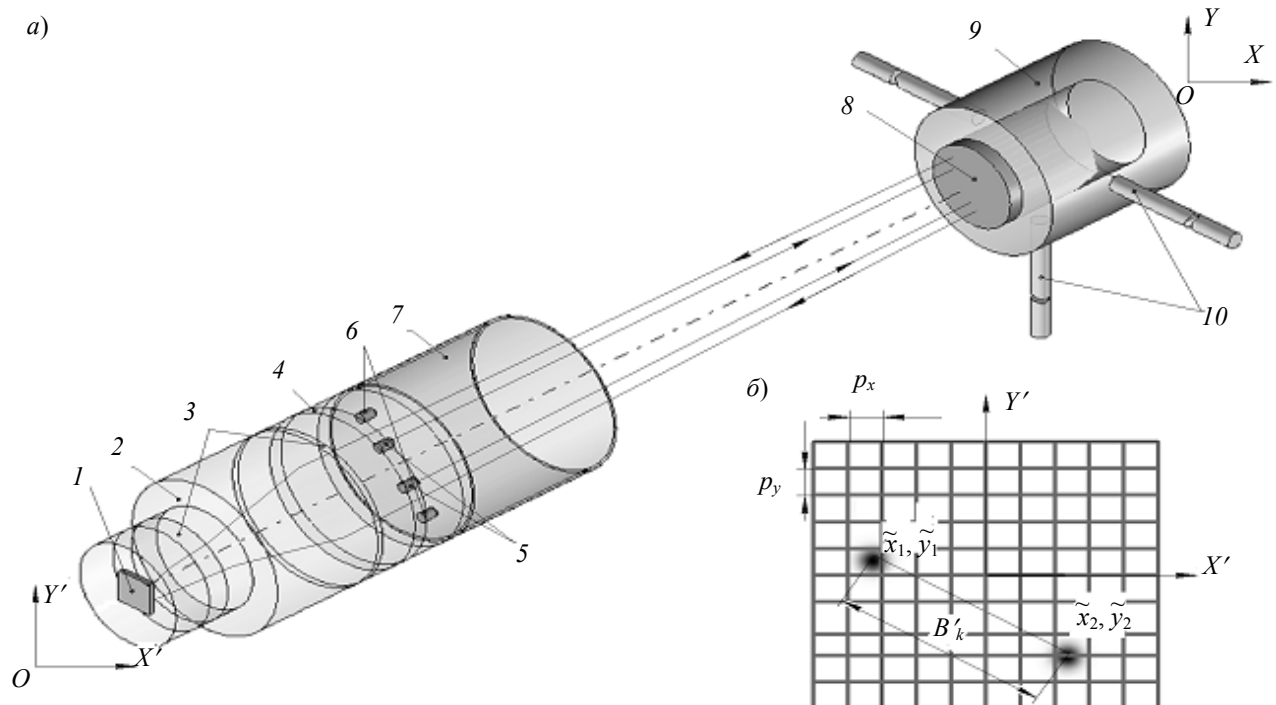


Рис. 1. Схема ОЭС КС:

а — принцип работы системы, б — к определению координат изображений ПИД

Координаты центра КДЦ (x, y) в плоскости анализа (см. рис. 1, а) связаны с координатами изображений на ФПЗС (x', y') следующими выражениями:

$$x = x'L / f'; \quad y = y'L / f', \quad (1)$$

где L — расстояние между отражателем и объективом; f' — заднее фокусное расстояние объектива, $L \gg f'$; при этом $x' = (x'_1 + x'_2) / 2$ и $y' = (y'_1 + y'_2) / 2$, где $x'_i = p_x \tilde{x}_i$, $y'_i = p_y \tilde{y}_i$ — координаты изображения i -го ПИД, мм; p_x и p_y — горизонтальный и вертикальный шаг пиксела, мм (см. рис. 1, б); \tilde{x}_i и \tilde{y}_i — координаты изображения i -го ПИД, пиксел.

В системе используются задающие базу ПИД, вследствие чего расстояние L определяется автоматически:

$$L = B_k f' / (2B'_k), \quad (2)$$

где B_k и $B'_k = \sqrt{(x'_1 - x'_2)^2 + (y'_1 - y'_2)^2}$ — база k -й пары ПИД и ее изображение (см. рис. 1, б).

Удвоенное значение B'_k объясняется авторефлексионной схемой исполнения ОЭС КС. Также стоит отметить повышенную в два раза чувствительность к поперечным смещениям используемой схемы по сравнению с коллимационной.

С учетом выражений (1) и (2) получаем координаты центра КДЦ в плоскости анализа:

$$x = \frac{p_x B_k (\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2)}{4\sqrt{p_x^2 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)^2 + p_y^2 (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2)^2}}, \quad y = \frac{p_y B_k (\tilde{y}_1 + \tilde{y}_2)}{4\sqrt{p_x^2 (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)^2 + p_y^2 (\tilde{y}_1 - \tilde{y}_2)^2}}.$$

Для автоматизации задач позиционирования авторами настоящей статьи предложена методика согласования баз. Пересчет осуществляется между системами координат, связанными с системной базой (СБ) ОЭС КС — визирной линией оптической системы, теоретической базой (ТБ) — осью, соединяющей центры ПБР и ЗБР, и практической базой (ПБ) — рабочей линией ротора. Взаимное расположение баз в пространстве изображено на рис. 2, а.

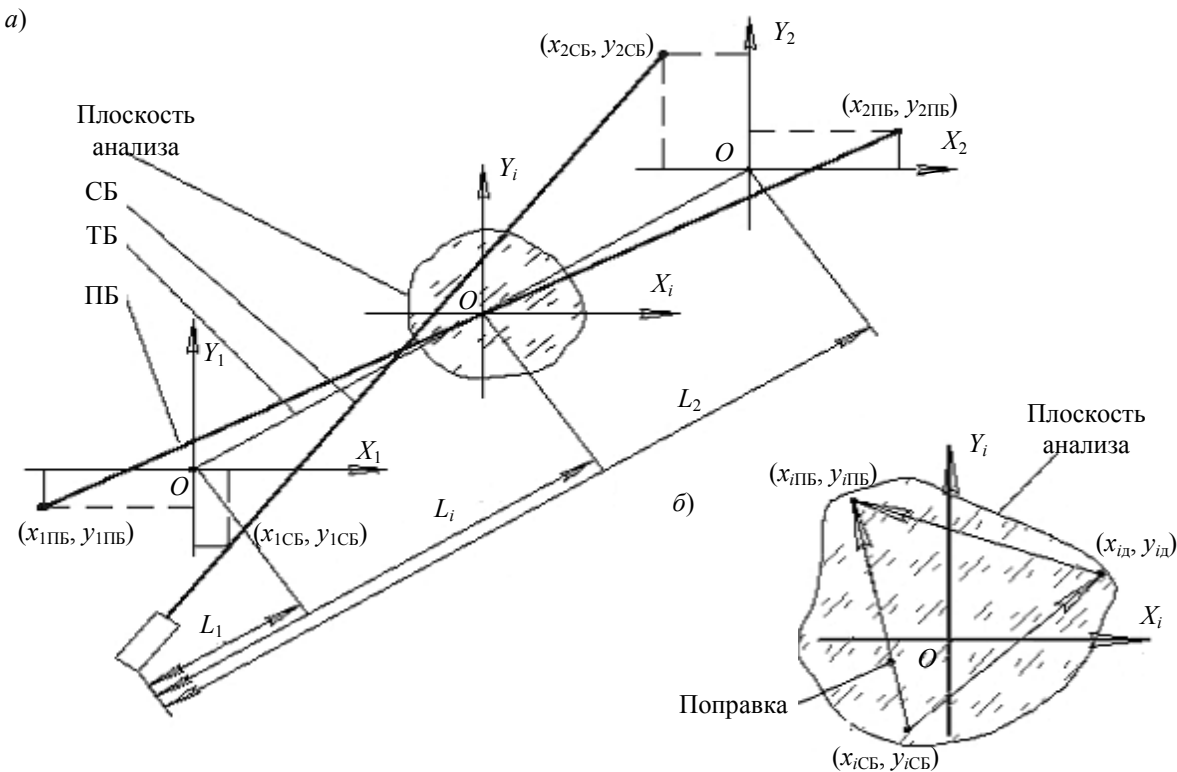


Рис. 2. Взаимное расположение систем координат:

а — расположение СБ, ТБ и ПБ в пространстве; б — пересечение СБ, ТБ и ПБ с плоскостью анализа

Суть методики заключается в пересчете результатов измерений смещений ОЭС КС между координатами точек, образованных пересечением практической и системной баз с плоскостью анализа.

Координаты точки пересечения СБ с плоскостью анализа ($x_{iСБ}$, $y_{iСБ}$):

$$x_{iСБ} = \frac{x_{2СБ} - x_{1СБ}}{L_2 - L_1} (L_i - L_1) + x_{1СБ}, \quad y_{iСБ} = \frac{y_{2СБ} - y_{1СБ}}{L_2 - L_1} (L_i - L_1) + y_{1СБ},$$

где ($x_{1СБ}$, $y_{1СБ}$), ($x_{2СБ}$, $y_{2СБ}$) — координаты точек пересечения СБ с плоскостями ПБР и ЗБР; L_1 , L_2 , L_i — расстояния от ОЭС КС до ПБР, ЗБР и i -й КДЦ.

Координаты точки пересечения ПБ с плоскостью анализа ($x_{iПБ}$, $y_{iПБ}$):

$$x_{iПБ} = \frac{x_{2ПБ} - x_{1ПБ}}{L_2 - L_1} (L_i - L_1) + x_{1ПБ}, \quad y_{iПБ} = \frac{y_{2ПБ} - y_{1ПБ}}{L_2 - L_1} (L_i - L_1) + y_{1ПБ},$$

где ($x_{1ПБ}$, $y_{1ПБ}$), ($x_{2ПБ}$, $y_{2ПБ}$) — координаты точек пересечения ПБ с плоскостями ПБР и ЗБР.

Необходимые поправки (см. рис. 2, б) получаем следующим образом:

$$x_{iП} = x_{iПБ} + x_{iСБ}, \quad y_{iП} = y_{iПБ} + y_{iСБ}.$$

Истинные координаты центра i -й КДЦ ($X_{iПБ}$, $Y_{iПБ}$), произвольно расположенной в пространстве относительно ПБ, определяются как

$$X_{iПБ} = x_{iД} - x_{iП}, \quad Y_{iПБ} = y_{iД} - y_{iП},$$

где ($x_{iД}$, $y_{iД}$) — координаты центра КДЦ относительно СБ.

Применение предложенной методики позволило исключить из процесса подготовки к измерениям согласование системной базы с практической, что дало возможность существенно сократить время и трудоемкость производимых операций по сравнению с ранее используемым прибором ППС-11 [2]. Следует отметить, что применение данной методики позволяет получить результат измерений смещений ОЭС КС относительно ПБ (базы, не связанной с системой). Таким образом, снимаются жесткие ограничения на совмещение оптической оси объектива ОЭС КС с центром ФПЗС и на децентрировку ПИД, что значительно упрощает юстировку системы.

Решение задачи непосредственной оценки результатов измерений не представляется возможным, поскольку отсутствуют объективные методы контроля положения крупногабаритных элементов в пространстве с высокой точностью. Поэтому предложено оценивать результаты измерений с помощью опытного образца ОЭС КС по результатам измерений с помощью борштанги и прибора ППС-11, так как они в настоящее время являются наиболее точными и достоверными (точность приборов, согласно работе [4], составляет 0,05 мм в условиях эксперимента).

Экспериментальное подтверждение точностных характеристик ОЭС КС проводилось на специализированном стенде (рис. 3) на базе предприятия „Курсктурбоатомэнергоремонт“ (г. Курчатова). Стенд оборудован кронштейном 1, ОЭС КС 2 в штативе 3, центроискателем 4 с отражателем 5, ПБР 6, КДЦ 7 и ЗБР 8, опорными роликами для борштанги 9, блоком обработки информации 10, монитором 11. Расстояние от ОЭС КС 1 до ПБР 6 составляет 1650 мм, до КДЦ 7 — 3850 мм и до ЗБР 8 — 5815 мм.

Эксперименты проводились при условии, что координаты линии ротора в плоскостях ПБР и ЗБР находились в диапазоне ± 5 мм. Разность показаний по горизонтальной составляющей составила $x=0,061 \pm 0,036$ мм при доверительной вероятности $\alpha=0,95$, по вертикальной составляющей — $y=0,021 \pm 0,023$ мм при $\alpha=0,95$. Как видно из результатов, погрешность измерения положения КДЦ относительно оси ротора в сравнении с измерениями с использованием ППС-11 и борштанги в горизонтальной плоскости на 0,037 мм превосходит максимально допустимую погрешность, в вертикальной плоскости точность соблюдена. Последнее особо ценно, так как при центрировке турбоагрегатов наибольшее внимание уделяется

установке КДЦ в вертикальной плоскости. Полученные технические характеристики ОЭС КС приведены ниже.

Диапазон измеряемых смещений по двум координатам (в вертикальной и горизонтальной плоскостях), мм.....	±5
Дальность, м.....	От 1,2 до 20
Цена единицы младшего разряда определения смещения, мм.....	0,001
Предел неисключенной систематической составляющей основной погрешности, мм.....	0,07
Предел допустимого СКО случайной составляющей основной погрешности, мм.....	0,02
Время подготовки системы к измерениям, мин.....	10
Масса ОЭС КС, кг.....	6
Потребляемая мощность, Вт, не более.....	20

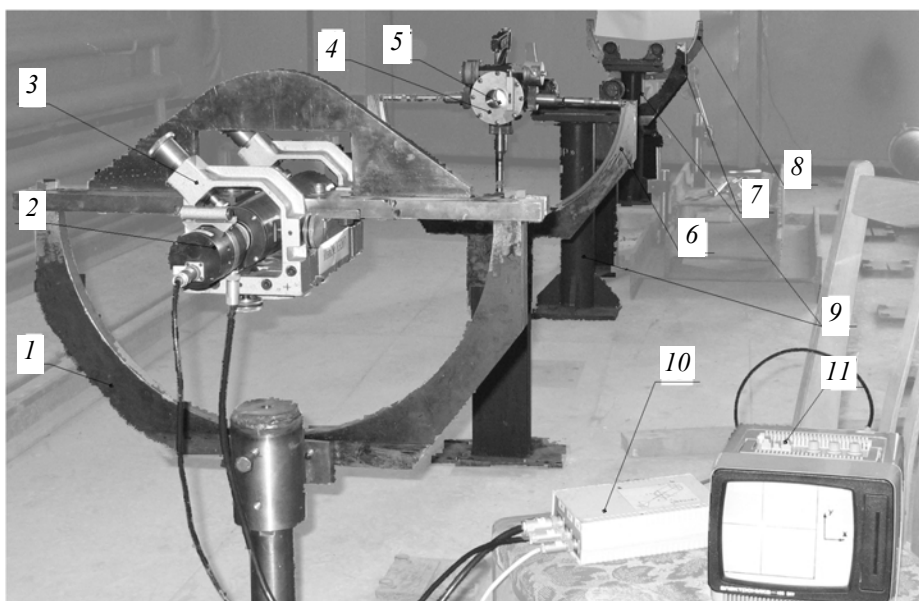


Рис. 3. ОЭС КС на испытательном стенде

Итак, предложены авторефлексионная схема исполнения измерительного канала ОЭС КС и основные соотношения для проведения расчетов. Отличительной особенностью ОЭС КС является автоматическое определение расстояния до КДЦ, что позволило реализовать автоматически калибрующуюся систему. Использование предложенной методики согласования баз значительно сокращает время и трудоемкость проводимых измерений, обеспечивая высокоточный контроль пространственного положения объектов, что является значительным достижением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крайлюк А. Д., Краснящих А. В., Мусяков В. Л. и др. Оптико-электронная система контроля положения центра корпусных деталей турбоагрегатов относительно оптической оси // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 61—63.
2. Карасев В. И., Монэс Д. С. Методы оптических измерений при монтаже турбоагрегатов. М.: Энергия, 1973.
3. Соломатин В. А., Якушенков Ю. Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1986. Т. 29, № 9. С. 62—69.
4. Данилевич Ф. М., Никитин В. А., Смирнова Е. П. Сборка и юстировка оптических контрольно-измерительных приборов. Справ. пособие. Л.: Машиностроение, 1976.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

В. Л. МУСЯКОВ, Э. Д. ПАНКОВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ,
Е. М. БОГАТИНСКИЙ, П. В. ЯКОВЛЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНОЙ

Показано, что совершенствование систем с оптической равносигнальной зоной возможно путем формирования элементов схемы с использованием современных электронных и оптических компонентов, позволяющих оптимизировать выполняемые ими преобразования сигналов, в особенности для инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: *оптико-электронная система, оптическая равносигнальная зона, пространственное распределение, лазерные диоды, регулярная рефракция, полихроматический метод.*

Оптико-электронные системы с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ) характеризуются высокой эффективностью, обусловленной возможностью обеспечения полной автоматизации процессов управления в статическом и динамическом режимах, а также возможностью корректировки результатов измерений с учетом влияния условий эксплуатации [1].

Возрастающие требования к точности определения местоположения объектов при строительстве, на железнодорожном транспорте, в самолетостроении, геодезии [2, 3] и микроэлектронике обуславливают необходимость продолжения работ по совершенствованию ОЭС с ОРСЗ (далее — системы с ОРСЗ).

Обобщенная структурная схема системы с ОРСЗ (рис. 1) содержит блок, задающий базовое направление (блок ЗБН), приемную часть (ПЧ), размещаемую на контролируемом объекте, и блок обработки команд управления (БОКУ). Перечисленные блоки находятся в физической среде и имеют энергетическое обеспечение. Поскольку носителем информации является оптическое излучение, которое распространяется в воздушном тракте, в структуре физической среды должен присутствовать воздушный тракт (ВТ), а также должны учитываться эксплуатационные воздействия (ЭВ) на элементы ОЭС, обусловленные изменениями температуры, вибрацией, солнечными засветками и т.д.

В состав блока ЗБН, формирующего в физической среде необходимое пространственное распределение информативных параметров, в результате чего и реализуется ОРСЗ, входят: излучатель 1, содержащий источник оптического излучения 7 и конденсор 8; базовый узел 2, который содержит элемент формирования ОРСЗ 9, создающий в пространстве несколько полей излучения с различающимися информативными параметрами, и объектив 10; оптический компенсатор 3, необходимый для компенсации неточности изготовления оптических элементов блока ЗБН.

Приемная часть преобразует информацию, содержащуюся в оптических пучках с равносигнальной зоной, в электрические сигналы, т.е. осуществляет предварительную обработку информации о своем пространственном положении относительно ОРСЗ. В процессе преобразования ПЧ осуществляет концентрацию потока излучения на фоточувствительном элементе приемника оптического излучения (ПОИ), а также пространственную селекцию сигнала от помех. Особенность ПЧ заключается в том, что регистрация ее положения реализуется с помощью анализа распределения в пространстве основного информативного параметра оптического

излучения. В состав ПЧ входят: оптическая система 4, состоящая из оптического фильтра 11 и объектива 12, которая реализует функции преобразования оптического сигнала (иногда вводится анализатор); ПОИ 5; электронная схема предварительной обработки электрического сигнала 6, содержащая предусилитель 13 и электронный фильтр 14.

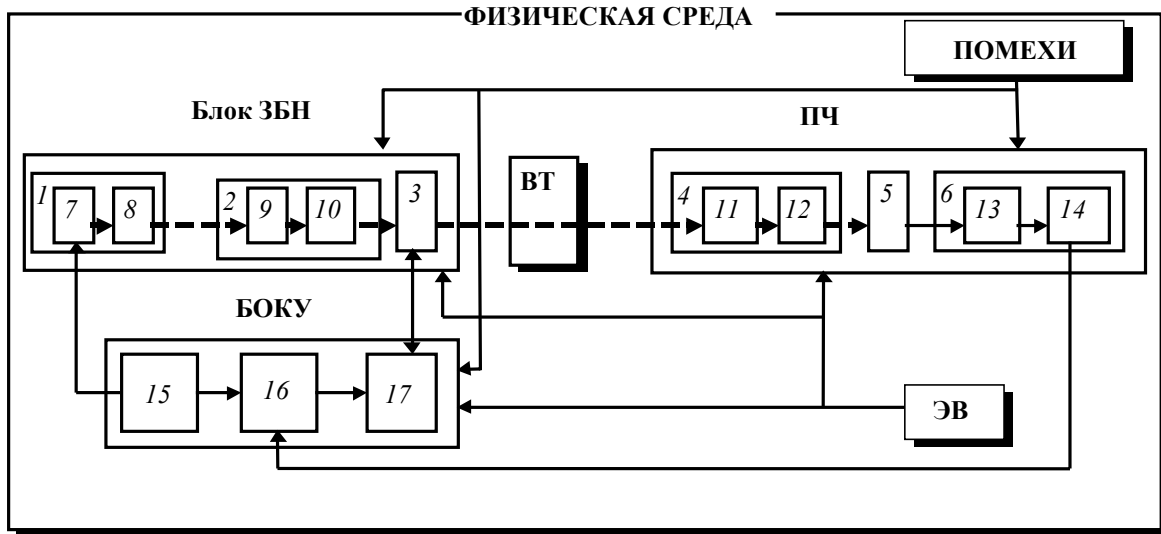


Рис. 1. Обобщенная схема ОЭС с оптической равносигнальной зоной

Блок отработки команд управления обеспечивает блок ЗБН и ПЧ требуемыми питающими напряжениями, обрабатывает электрические сигналы, полученные от ПЧ, и выдает информацию о величине смещений ПЧ относительно ОРСЗ. В структуре этого блока можно выделить: узел питания источника излучения 15; схему окончательной обработки информации, содержащую, как правило, блок окончательной обработки электрического сигнала 16 и узел индикации информации 17.

Анализ работы устройств по описанной схеме показывает, что совершенствование систем возможно осуществлять в двух следующих направлениях:

- формирование элементов схемы с использованием современных электронных и оптических компонентов, позволяющих оптимизировать выполняемые ими преобразования сигналов;
- определение принципов и методов ослабления влияния внешних факторов, снижающих технические характеристики систем, на основе теоретического анализа физических явлений и экспериментального исследования их воздействия.

Особенно интенсивное развитие оптико-электронных систем с ОРСЗ наблюдалось в 80-е годы прошлого столетия, когда благодаря прогрессу в технологии электронных компонентов было освоено производство полупроводниковых источников оптического излучения (светодиодов и лазерных диодов) мощностью 100 мВт с высоким показателем параметра наработки на отказ (5—6 лет) [4].

Важное преимущество оптической равносигнальной зоны перед радиотехнической — отсутствие принципиальных ограничений на частоту модуляции оптического излучения, параметры которой определяются не принципами и средой передачи, а техническими характеристиками модулирующих элементов и частотными свойствами ПОИ [1]. Так как скорость передачи данных достигла отметки десятков, а при мультиплексировании по длине волны — сотен гигабит в секунду, перспективы развития систем обработки информации в ОЭС с ОРСЗ весьма оптимистичны.

Особый интерес представляет развитие систем в области ИК-диапазона, поскольку работы по созданию мощных полупроводниковых источников излучения осуществляются именно в этом диапазоне. ИК-диоды с излучением с поверхности целесообразно применять

в основном при дальности до 1 км, в низкочастотных системах, работающих при скорости обработки информации до 10 Мбит/с, в то время как использование лазерных ИК-диодов с излучением с торца перехода позволяет обеспечить дальность до 4—15 км при скорости обработки до 10 Гбит/с.

Блоки ЗБН, использующие полупроводниковые (ПП) диоды (ИК-диоды с излучением с поверхности), менее чувствительны к резонансному поглощению в атмосфере благодаря широкой полосе излучения (около 50 нм), что, однако, может вызвать сложности при передаче высокочастотного сигнала (разные составляющие оптического сигнала поступают на вход приемника с различной задержкой), и на выходе приемника распознать сигнал будет уже крайне сложно. При правильном выборе длины волны излучения, не попадающей в полосы поглощения газов атмосферы, применение в качестве источников излучения лазерных диодов мощностью 1 Вт и более (при полосе излучения около 1 нм) позволит достигнуть дальности более десятка километров. Однако эллиптическая форма диаграммы направленности излучения обуславливает в этом случае необходимость применения в конденсоре анаморфотных оптических систем.

Не менее перспективно использование в блоке ЗБН лазерных VCSEL-диодов с излучением с поверхности в результате объемного резонанса. Таким диодам присущи преимущества как лазерных диодов — узкая полоса излучения (в некоторых режимах всего одна мода), так и ПП-диодов — продолжительное время наработки на отказ и сферическая форма диаграммы направленности. Однако в настоящее время они уступают по мощности излучения источникам, названным выше.

Относительно применения в ОЭС приемников оптического излучения, можно однозначно утверждать, что все высокочастотные системы должны использовать лавинные фотодиоды, а низкоскоростные системы — обычные кремниевые $p-i-n$ -фотодиоды, чувствительность которых почти на порядок ниже.

Очевидно, что в процессе эксплуатации отсутствует возможность обеспечения стабильных, однородных и изотропных пространственно-временных условий применения систем с ОРСЗ. К числу важных особенностей прохождения ИК-излучения через атмосферу относятся факторы, которые по уменьшению степени их влияния на процессы работы систем можно классифицировать следующим образом:

- градиенты температуры воздушного тракта;
- аэрозольное затухание;
- резонансное поглощение;
- наличие осадков;
- флуктуации температуры и турбулентность воздушной среды.

Факторы первой группы вызывают так называемую регулярную рефракцию лучей за счет изменения среднего значения коэффициента преломления среды по длине воздушного тракта, что приводит к искривлению пучков лучей [5]. В настоящее время для ослабления влияния этих факторов перспективно использование полихроматического метода (метода спектральных разностей [6]) с применением принципов мультиплексирования сигналов. Внедрение технологии мультиплексирования в БОКУ, например компанией „Lucent Technologies“, США (продукт WaveStar OpticAir), обеспечивает скорость передачи и обработки информации до 10 Гбит/с на четырех длинах волн.

Затухание сигнала при тумане и дожде легко формализуется расширенной моделью аэрозольного поглощения. Такая преграда, как дождь, например, с интенсивностью до 75 мм/ч (почти тропический ливень), что плохо преодолевается радиорелейными системами в диапазонах 18—54 ГГц, не представляет серьезной угрозы для систем с ИК ОРСЗ и не нарушит их функционирование при работе на расстояниях до 2 км.

ИК-излучение может преодолеть практически все погодные явления, но не физические преграды. Это приводит к тому, например, что птицы и насекомые, пересекая луч, кратковременно прерывают оптический канал. В таких случаях возможно применение многолучевых или широкопольных систем, но это значительно увеличит габариты системы и соответственно ее стоимость.

Совершенствование систем возможно также путем модернизации оптической части. Так, оптимальной для контроля пространства в некоторой сравнительно широкой кольцевой зоне (360° по азимуту, десятки градусов по углу места) является система с панорамной концентрической оптикой [7].

В таких системах создается плоская проекция полусферы (или области, близкой к ней). Достоинства их очевидны: отсутствие механического сканирования, единый оптический канал и возможность различных способов анализа изображения.

Рассмотрим модель блока, задающего базовую плоскость (рис. 2), для оптико-электронной системы с ОРСЗ [8]. Эту модель можно представить двумя концентрическими объективами 3 и 4, строящими изображения излучающих поверхностей радиально установленных полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) 1, 5. Кольцевая заслонка 2 перекрывает часть пучков излучения ПИД для того, чтобы изображения подсвеченных границ при максимальном расстоянии соприкасались, и, таким образом, образовывалась ОРСЗ. Диоды переключаются с частотами f_1 и f_2 в верхнем и нижнем каналах, благодаря чему информативным параметром ОРСЗ является частота.

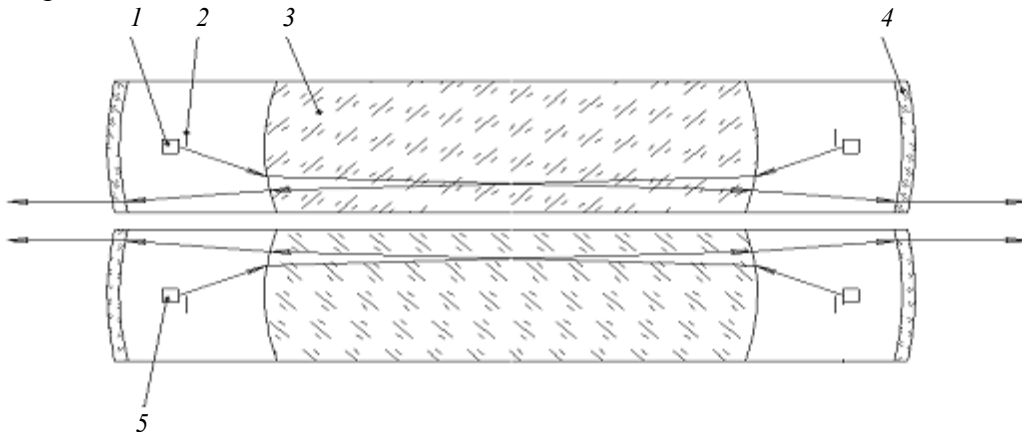


Рис. 2. Схема блока, задающего базовую плоскость

Для обеспечения непрерывности распределения облученности в круговой планарной ОРСЗ предлагается использовать многоэлементный источник излучения, представляющий собой кольцо, составленное из расположенных вплотную друг к другу ПИД.

Наряду с очевидным, с точки зрения техники проектирования, применением современной электронной элементной базы совершенствование ОЭС с оптической равносигнальной зоной должно осуществляться и в направлении построения систем, автоматически адаптирующихся к воздействию внешних условий. При этом одним из основных критериев обработки информации в таких системах должен быть минимум систематической и случайной составляющих погрешности.

Исследования, описанные в настоящей статье, проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 06-08-00356.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной: Монография / Под ред. Э. Д. Панкова. СПб.: СПбГУ ИТМО, 1998. 238 с.

2. Ли Шифан, Панков Э. Д., Румянцова Д. М., Крайлюк А. Д. Следящая оптико-электронная система // Оптическое приборостроение: Тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 225-летию МИИГАиК. М.: МИИГАиК, 2004. С. 50—55.
3. Высокоточные угловые измерения / Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
4. Великотный М. А. Применение матриц арсенид-галлиевых светодиодов для систем контроля и управления прямолинейным перемещением // Применение оптико-электронных приборов в измерительной технике: Сб. М.: МДНТП, 1973. С. 36—38.
5. Неумывакин Ю. К. и др. Автоматизация геодезических измерений в мелиоративном строительстве. М.: Недра, 1984. 128 с.
6. Витол Э. А., Мусяков В. Л., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Сб. трудов VI Междунар. конф. „Прикладная оптика“, 18—21 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. Т. 1. С. 37—40.
7. Елизаров А. В., Куртов А. В., Соломатин В. А., Якушенков Ю. Г. Обзорно-панорамные оптико-электронные системы // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 2. С. 37—45.
8. Богатинский Е. М., Тимофеев А. Н. Габаритно-энергетический расчет в оптико-электронной системе с круговой оптической равносигнальной зоной // Современная оптика: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. Вып. 34. С. 209—212.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ МАТРИЧНЫМИ ФОТОПРИЕМНИКАМИ

УДК 536.8: 621.384

Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

*Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики*

А. Н. ЧЕРТОВ

*Научно-производственное предприятие „Буревестник“, ОАО
Санкт-Петербург*

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СЕПАРИРОВАНИЯ АЛМАЗОВ ПО КАТЕГОРИЯМ В ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ RGB

Рассматриваются возможности выделения определенного цветового оттенка на поле изображения алмаза. Проводится исследование сигналов в цветовых каналах сепаратора для различных категорий алмазов.

Ключевые слова: *сортировка алмазов, цветовое пространство, цветовой сепаратор, фотометрический блок, гистограммы распределения цветов, программная фильтрация.*

Метод оценки цветовых характеристик различных продуктов и материалов активно применяется во многих странах при производстве алюминия, для сортировки вторичного стекла и промышленных отходов, а также при добыче различных полезных ископаемых [1, 2]. Аналогичная проблема стоит при качественной сортировке алмазов по различным категориям. Так, например, компанией „Алроса“ (Республика Саха, Якутия) предлагается разделение алмазов по 16 категориям (см. таблицу) [3]. Стандарты определения цветовых категорий алмазов, таких как ряды желтых и коричневых алмазов, основаны на цветовом восприятии человеческим глазом, для которого подобная система оценок является равномерной, с другой стороны, для систем машинного зрения она неравномерна, т.е. объем цветового пространства, занимаемый одной категорией, будет не равен объему, занимаемому другой категорией, причем возможны пересечения цветовых пространств (см., например: *Домосев М. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения: <http://www.nordicdreams.net.ru>; Шадрин А., Френкель А. Color Management System (CMS) в логике цветовых координатных систем: <http://www.designclub.com.ua>*).

Цель настоящей статьи — анализ возможности выделения определенного цветового оттенка на изображении алмаза, а также оценка сигналов в цветовом пространстве RGB фотометрического блока сепаратора для различных категорий алмазов.

Термины, применяемые в классификации алмазов по цветовым характеристикам

Наименование	Индекс	Характеристика, визуальное восприятие
Экстра	Ext	Бесцветные высшие, в том числе с оттенком голубизны, на фоне белой бумаги сливаются
1-й желтый	1C	На фоне белой бумаги прозрачные, бесцветные, но не сливаются с ней
2-й желтый	2C	С едва уловимым желтым оттенком
3-й желтый	3C	С незначительным желтым оттенком
4-й желтый	4C	С небольшим желтоватым оттенком
5-й желтый	5C	С видимым желтым оттенком
6-й желтый	6C	С ясно видимым желтым оттенком
7-й желтый	7C	Желтые, с желтым нацветом во всем объеме
8-й желтый	8C	С ярко выраженным оттенком желтого цвета
9-й желтый	9C	С желто-коричневым нацветом
1-й коричневый	1Brn	С незначительным коричневым оттенком в периферийной зоне
2-й коричневый	2Brn	С незначительным коричневым оттенком, распространенным во всем объеме
3-й коричневый	3Brn	С выраженным коричневым нацветом
4-й коричневый	4Brn	Коричнево-серые, с желтизной во всем объеме
5-й коричневый	5Brn	Темно-коричневые
6-й коричневый	6Brn	Сильно выраженные темно-коричневые

Один из возможных принципов работы системы сепарации материалов основан на определении положения изображения объекта в трехмерном цветовом пространстве путем измерения и совокупной оценки его параметров отражения или (и) поглощения оптического излучения в трех спектральных областях — красной (R), зеленой (G) и синей (B) — системы RGB [4]. В зависимости от степени отражения и пропускания оптического излучения объектом и используемых аппаратных и программных средств фотометрический блок может распознавать до 500 тыс. оттенков (в ряде случаев есть возможность различать до 16 млн. цветовых оттенков) [5]. Обычно в системе сепарации материал (сырье), подаваемый на сортировку по транспортному лотку (рис. 1), в зоне анализа облучается источниками освещения, укомплектованными набором сменных фильтров, а регистрация отраженного излучения производится сканирующей камерой. Характеристики и положение частиц сырья определяются с точностью, обеспечивающей высокую степень анализа. Ширина потока, которую современная сканирующая камера „успеивает“ просматривать при скорости подачи материала 2—3 м/с, может достигать 1200 мм.

Принцип работы системы сепарации основан на теории распознавания образов сепарируемых объектов по набору заранее заданных параметров (цвет, размер и прозрачность), при этом, как правило, процесс сепарации характеризуется наличием пыли и высокой влажностью воздуха, что значительно влияет на погрешность работы сепаратора [5].

Выделение на поле изображения областей определенной цветности может быть произведено при помощи команд ограничения выходных сигналов каналов цветности RGB в программе Photoshop. Это подтверждается возможностью применения подобной операции программной фильтрации каналов при высокоскоростной регистрации движущихся объектов в поле зрения фотометрического блока сепаратора минерального сырья.

При помощи программы Photoshop были произведены некоторые ограничения выходных цифровых сигналов каналов цветности RGB фотографии розового алмаза на черном фоне, освещаемого ярким источником света с выраженным желтым цветом. В результате этого выяснилось, что на определение цвета объекта оказывает влияние наличие бликов на его

поверхности от источника освещения, поскольку области бликов от источника входят в области цвета алмаза и по насыщенности превосходят их [6].

Исключить блики посредством программной фильтрации практически невозможно, поскольку блик — отражение источника освещения объекта — является очень ярким и содержит в себе, кроме того, яркость изображения рассматриваемого объекта. Следовательно, для уменьшения погрешности определения цвета необходимо исключить появление бликов, например, посредством установки матового стекла перед ярким источником освещения объекта.

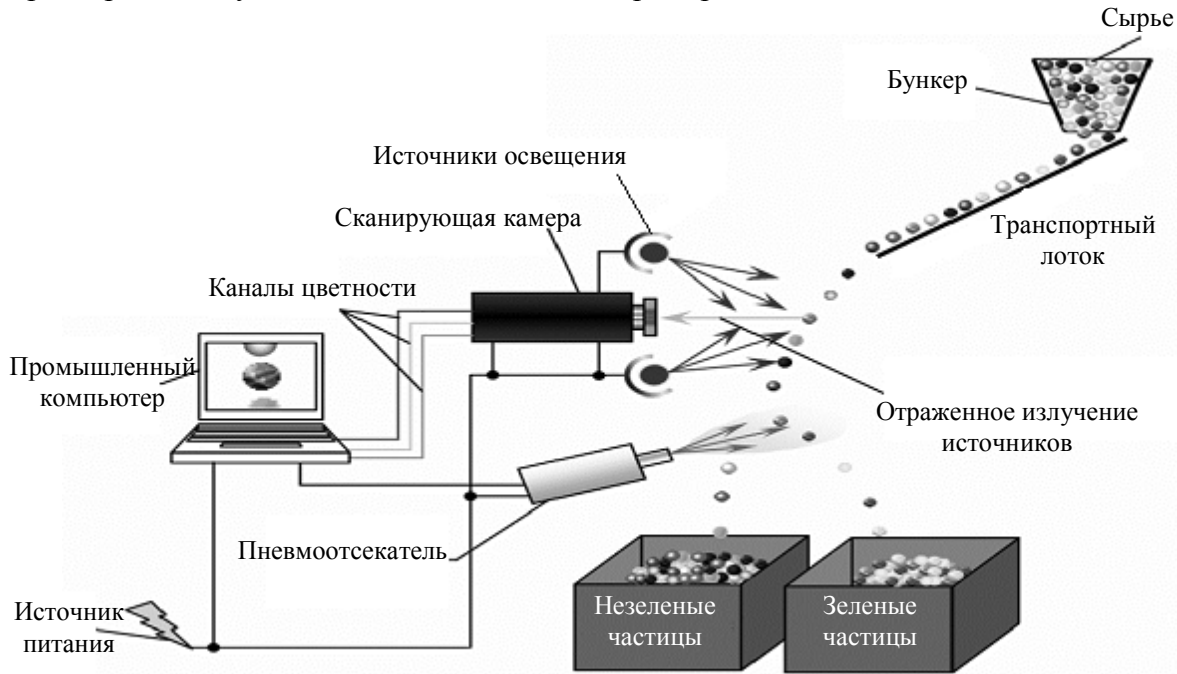


Рис. 1. Принцип работы сепаратора

Для рассмотрения сигналов в цветовых каналах RGB изображений алмазов различных категорий качества были выбраны фотографии цветового ряда коричневых алмазов, алмазов в оболочке и технических алмазов. Фотографии были приведены к белому фону, поскольку на гистограммах цветовых каналов он определяется единственным пиком на правом краю.

На рис. 2 представлены фотографии четырех цветовых категорий для коричневого ряда алмазов и их гистограммы распределений цветов в системе RGB. Как показывает анализ фотографий, каждая категория имеет присущие только ей гистограммы распределения цветов в каждом цветовом канале, хотя суммарные гистограммы распределений могут быть похожими по форме. Так, например, в изображении коричневого алмаза первой категории (см. рис. 2, а) ярко выражены цвета с координатами цветности по системе RGB (130, 146, 139) и (195, 220, 229), соответствующие светлым серо-коричневому и голубоватому оттенкам. При рассмотрении следующих категорий коричневых алмазов можно заметить, что пик серо-коричневого оттенка постепенно смещается в область более насыщенных цветов (т.е. становится более темным), а пик голубоватого оттенка теряет интенсивность и переходит в область желто-зелено-коричневого оттенка.

Следовательно, для качественного определения категории отдельного алмаза необходимо применение фильтрации в каждом из цветовых каналов R, G, B в отдельности, а не в суммарном канале, что может вызвать грубые ошибки при определении цвета. Для осуществления программной фильтрации в каждом цветовом канале потребуется значительное усложнение алгоритма обработки сигналов, поступающих с фотометрического блока в микропроцессор сепаратора, что приведет к увеличению времени обработки кадров. Однако современные матричные многоэлементные фотоприемные устройства могут производить первичную

обработку сигналов изображений посредством заложенного алгоритма обработки кадров, что позволит сократить время обработки изображения сразу по трем каналам цветности. Эта проблема легче реализуется в цветовых матричных КМОП-структурах.

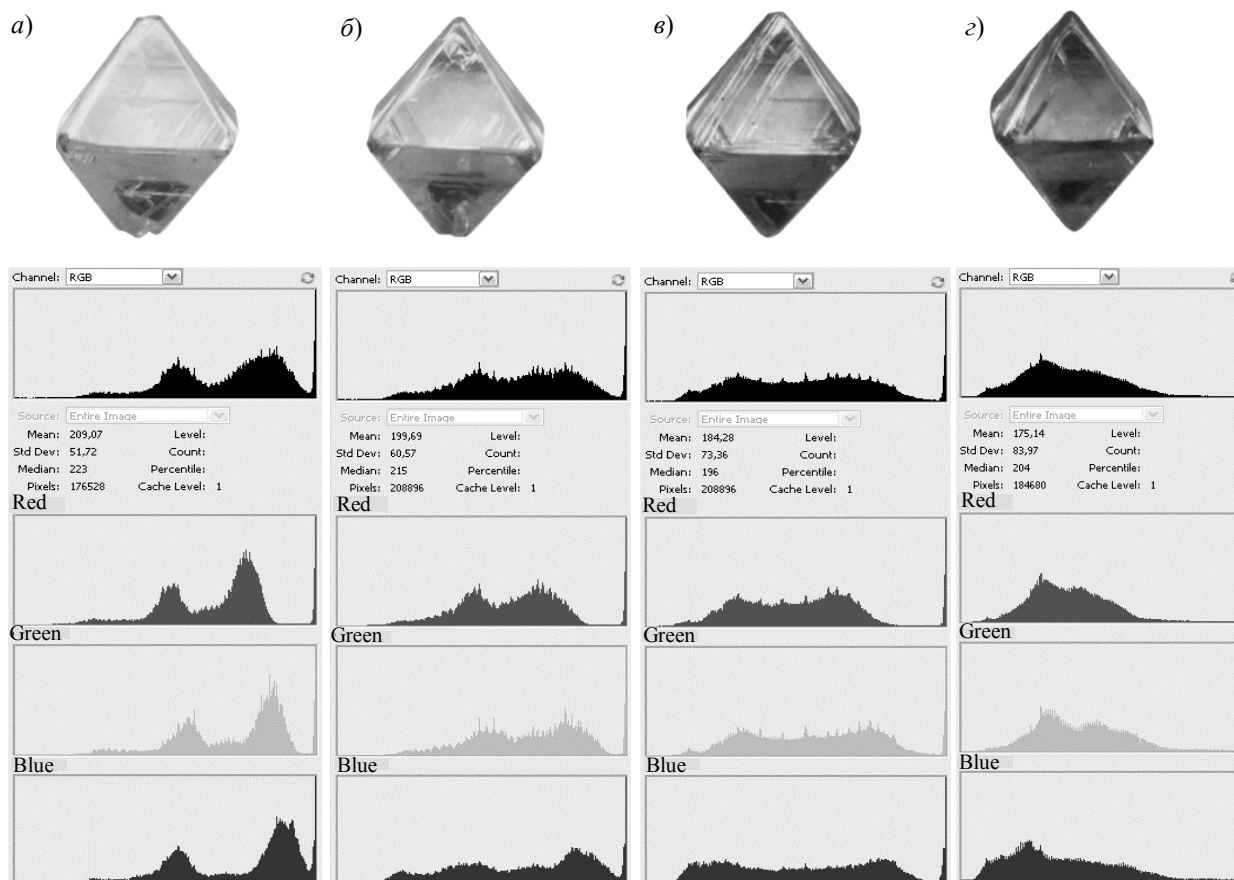


Рис. 2. Фотографии коричневых алмазов и соответствующие им гистограммы распределений цветов в канале RGB и цветовых каналах R, G и B:
а—г — коричневые алмазы 1-й, 2-й, 3-й и 4-й цветовой категории соответственно

На рис. 3 представлены фотографии алмазов в оболочке и технических алмазов [3], а также их гистограммы распределений цветов в системе RGB. Алмаз в оболочке первой категории (см. рис 3, а) имеет бледный желто-оранжевый оттенок, а алмаз в оболочке второй категории (см. рис 3, б) отличается насыщенным желто-зеленым оттенком, технические алмазы третьей и четвертой категорий (см. рис. 3, в, г) имеют розовато-коричневый и насыщенный коричневый оттенки соответственно. Тем не менее, формы гистограмм распределения цветов в суммарных каналах на рис. 3, б и 3, г очень схожи, что подтверждает необходимость параллельной обработки всех трех каналов цветности изображений.

На основании изложенного можно заключить, что для точной цветовой селекции близких оттенков цветов в конструкции фотометрического блока должен присутствовать эталон сравнения (в идеале белый фон, поскольку он описывается узким пиком на границах цветовых гистограмм и может быть однозначно отделен от цветового оттенка объекта селекции). Кроме того, видеосигнал фотоприемного устройства не должен подвергаться тоновой коррекции, так как это ведет к искажению цветовых гистограмм и неправильному отображению оттенков.

Как показали проведенные исследования, решение задачи качественного определения цвета фотометрическим блоком сепаратора и надлежащие условия сепарации позволяют эффективно определить границы рабочих диапазонов цветового сепаратора, что, в конечном итоге, обеспечит повышение качества сепарации.

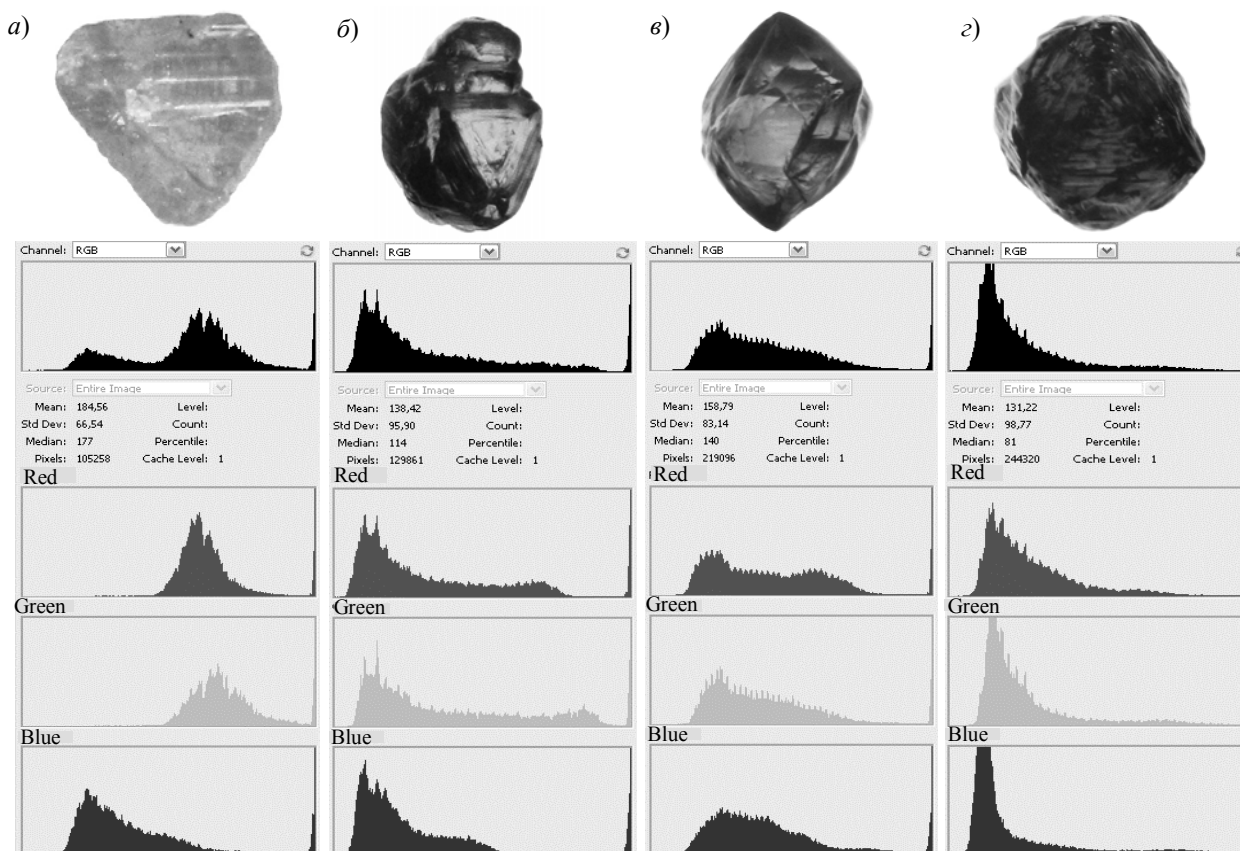


Рис. 3. Фотографии алмазов и соответствующие им гистограммы распределений цветов в канале RGB и цветовых каналах R, G и B:
 а, б — алмазы в оболочке 1-й и 2-й категории соответственно,
 в, з — технические алмазы 3-й и 4-й категории соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tako P. R. de Jong*. The Economic Potential of Automatic Rock Sorting. The Netherlands, Delft Univ. of Technology, Department of Geotechnology, 2005.
2. *Reinhardt C*. The use of a mogensen sizer and mikrosort optoelectronic system in aluminium production // *Aufbereitungs Technik*. 2002. 43. N 7.
3. *Шелементьев Ю. Б., Окоемов Ю. К., Хапкина Т. П.* и др. Алмазное сырье: Учеб.-справ. пособие. М.: Наука, 2007. 304 с.
4. *Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н., Чертов А. Н.* Особенности энергетического расчета фотометрического канала цветового сепаратора сырья с матричными фотоприемниками // Сб. трудов VII Междунар. конф. „Прикладная оптика — 2006“, 16—20 окт. 2006 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. Т. 1. С. 122—114.
5. *Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н.* Оценка погрешности работы цветового фотометрического блока сепаратора минерального сырья // *Современная оптика: науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО*. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. Вып. 43. С. 228—231.
6. *Горбунова Е. В.* Оценка погрешности измерения координат цветности фотометрическим блоком сепаратора минерального сырья. // Тр. Пятой междунар. конф. молодых ученых и специалистов „Оптика — 2007“, 15—19 окт. 2007 г., Санкт-Петербург. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 252.

Рекомендована кафедрой
 оптико-электронных приборов и систем
 СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
 14.01.08 г.

И. П. ТОРШИНА

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДИАПАЗОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются особенности компьютерного моделирования многодиапазонных (многоспектральных) оптико-электронных систем, основанного на использовании обобщенной компьютерной модели ОЭС.

Ключевые слова: моделирование, многодиапазонная оптико-электронная система, фоноцелевая обстановка, структура, коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС.

Методы и средства компьютерного моделирования широко используются для сравнительного анализа оптико-электронных систем и алгоритмов их функционирования [1—4]. Компьютерное моделирование снижает риски на начальных этапах проектирования, уменьшает его общую продолжительность и стоимость.

Применение многодиапазонных (многоспектральных) оптико-электронных систем (МОЭС) позволяет повысить эффективность решения многих практических задач, улучшить показатели качества работы таких систем, например, увеличить скорость принятия решений при распознавании объектов, повысить вероятности обнаружения, распознавания и идентификации целей [5].

Компьютерная модель многодиапазонной ОЭС (КМ МОЭС) может быть построена на основе обобщенной компьютерной модели ОЭС (КМ ОЭС) [6—8] с добавлением модуля „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“, включая коррекцию баз данных модели (рис. 1).

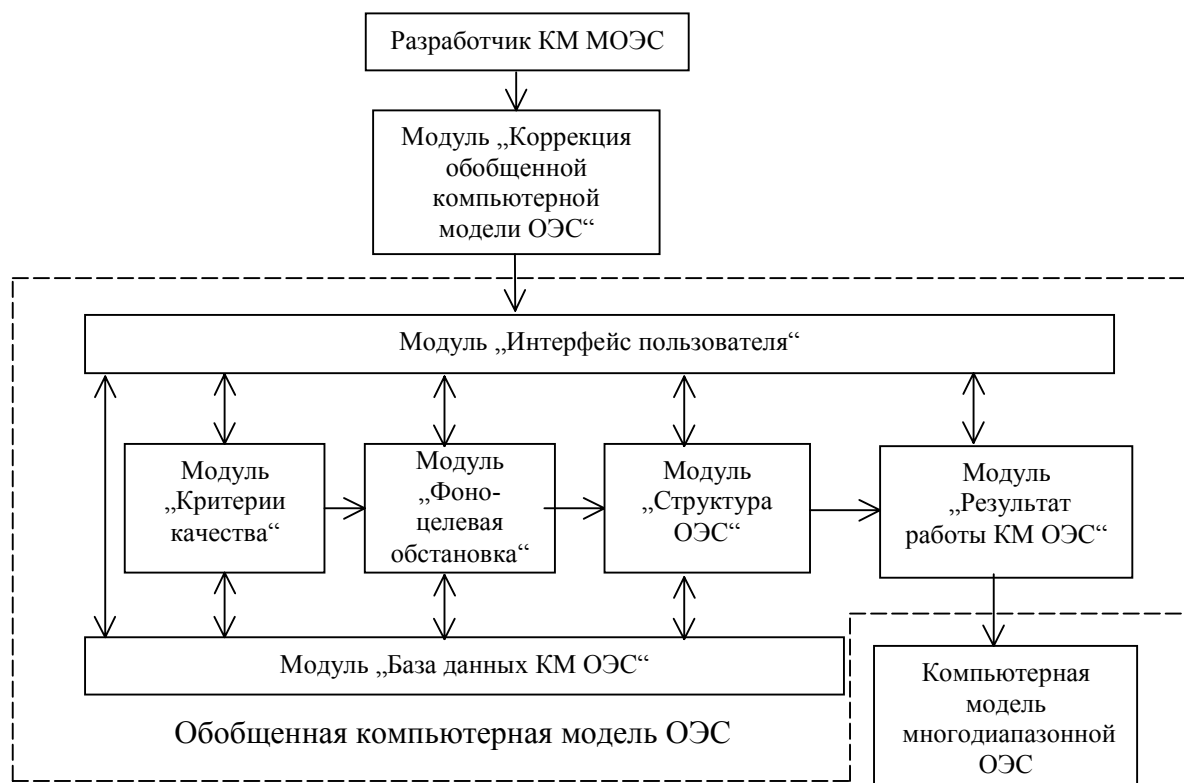


Рис. 1. Схема формирования компьютерной модели многодиапазонной ОЭС

Рассмотрим специфику формирования КМ МОЭС.

Для некоторых МОЭС, работающих активным методом и использующих несколько узкополосных источников излучения или несколько полос излучения одного источника, необходимо дополнение соответствующей базы данных.

Вследствие невозможности усреднения и принятия постоянным коэффициента пропускания среды распространения излучения в сравнительно широком спектральном рабочем диапазоне, что допустимо в моделях однодиапазонных ОЭС (см., например, [9]), в КМ МОЭС следует более детально учитывать спектральную селективность пропускания среды (атмосферы).

В базе данных оптических систем КМ МОЭС желательно иметь характеристики оптических материалов с коэффициентом пропускания, охватывающим все рабочие спектральные диапазоны системы, а также параметры диспергирующих систем (призм, дифракционных решеток, наборов узкополосных светофильтров и др.).

В ряде современных МОЭС используются двух- и многодиапазонные (многоспектральные) приемники излучения (МПИ) [5]. Известны системы, в которых применяются матричные МПИ, реализующие одновременно способы спектральной селекции и пространственной фильтрации в одном элементе. Это также должно найти отражение в базах данных КМ МОЭС.

Наконец, следует учитывать наличие в составе многих МОЭС систем совмещения изображений, получаемых в разных рабочих спектральных диапазонах.

Компьютерная модель многодиапазонной ОЭС, как и КМ ОЭС, описывает процесс формирования сигнала на входе системы, ее структуру и процесс функционирования. Модули, входящие в состав КМ, могут отражать спектральные, пространственные и временные преобразования.

Модули „Фоноцелевая обстановка“ и „Структура ОЭС“ содержат перечни операторов (зависимостей, математических моделей и др.), представляющих физические процессы (например, формирование сигналов от целей, помех и фонов на входе ОЭС), и операторов, воздействующих в определенной последовательности на входной сигнал.

Как известно, источники излучения и сигналы от них могут быть описаны спектральными, энергетическими, геометрическими, динамическими и другими характеристиками. Целесообразно разбить совокупность используемых операторов на отдельные группы. Следует отметить, что некоторые операторы могут использоваться только один раз в процессе моделирования ОЭС, в то время как другие, зависящие, например, от спектрального диапазона работы системы или времени прохождения процессов в динамических системах, могут использоваться неоднократно. Введение в КМ МОЭС модуля „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“ позволит производить необходимые расчеты при моделировании систем конкретного назначения, а также изменять количество повторений при выполнении тех или иных операторов.

На рис. 2 приведены некоторые из циклических операторов, входящих в отдельные блоки модуля „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“ (на рисунке: ПИ — приемник излучения).

В общем случае процедуру моделирования МОЭС можно свести к следующим этапам.

1. Выбор (или задание) критериев качества (показателей эффективности) для каждого спектрального диапазона. При этом уравнения для их расчета могут быть заложены в обобщенной КМ ОЭС с использованием отдельных параметров и характеристик всей системы, отображающих физическую природу сигналов и механизм ее работы.

2. Составление системы уравнений выбранных критериев.

3. Решение системы уравнений в целях определения параметров МОЭС (или диапазона их изменений) для синтеза системы или расчета показателей ее эффективности при анализе работы МОЭС (с известными параметрами).

4. Оптимизация МОЭС в случае неудовлетворительного результата выполнения 3-го этапа. Алгоритмы оптимизации закладываются в модуль „Структура ОЭС“.

Следует отметить наличие возможности исключения некоторых операторов при текущей реализации программы КМ МОЭС для последующей оценки их влияния на результат работы системы.



Рис. 2. Схема модуля „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“

Обычно критерии качества конкретной МОЭС задаются или выбираются на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации подобных систем. Так, например, в программе моделирования тепловизионных систем IRISIM [10] предусмотрено прогнозирование и оценка минимальной разрешаемой разности температур, отношений сигнал/шум и сигнал/помеха, контраста цели, чувствительности и пространственного разрешения.

Как и при компьютерном моделировании однодиапазонных ОЭС, при моделировании МОЭС необходимо учитывать разнообразие собственно ОЭС и их элементной базы, фоноцелевой обстановки и условий работы системы, а также множество математических методов описания сигналов и способов их обработки. Выше уже отмечалось, что при моделировании МОЭС требуется более детальное представление спектральных характеристик излучения и отражения целей, помех и фонов, сред распространения оптических сигналов, спектральных характеристик оптических систем и приемников излучения. Поэтому вопрос о допущениях и упрощениях при компьютерном моделировании МОЭС при сохранении адекватности модели МОЭС объекту-оригиналу должен решаться уже на начальных этапах.

Для упрощения расчета спектральной яркости допускается использование ряда предположений об описании фоноцелевой обстановки функциями с разделяющимися переменными.

Среди фоновых образований можно выделить типы, различающиеся физической природой и пространственной макро- и микроструктурой. Выделенные типовые случайные поля

с некоторой степенью приближения можно считать гауссовыми и марковскими. Введение такого разбиения позволяет упростить последующую работу с базой данных.

В работе [11] предполагается, что в модели NVTherm все материалы и поверхности источников излучения непрозрачные и ламбертовские. Это позволяет учитывать только их отражательные и излучательные свойства. Использование неламбертовских поверхностей заметно усложняет модель. Предположение о ламбертовском характере поверхностей позволяет осуществлять расчеты геометрикооптических и спектральных параметров отдельно, что заметно сокращает объем вычислений.

При формировании математической модели теплообмена между целью и окружающей средой могут быть приняты следующие общие допущения: при исследовании одномерных температурных полей толщина поверхности цели принимается постоянной, и в начальный момент времени температура поверхности по всей толщине одинакова; теплофизические параметры поверхности цели постоянны и равны средним значениям в рабочем температурном интервале; внутренние источники тепла отсутствуют.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать следующий вывод: пользователь обобщенной КМ ОЭС с помощью операторов, содержащихся в модуле „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“, включая коррекцию баз данных КМ ОЭС и применяя ряд допущений при моделировании конкретной МОЭС, может сформировать компьютерную модель многодиапазонной (многоспектральной) ОЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bushlin Y., Baum G., Engel M. Y.* FPA sensor performance study using computer simulation // Proc. SPIE. 1996. Vol. 2743. P. 252—263.
2. *Simmons O. D., Jayner T. W., Weppner M. B.* et al. Infrared sensor stimulator (IRSS) installation in the ACETEF, NAWC-AD // Pros. SPIE. 2001. Vol. 4366. P. 331—340.
3. *Maurer T., Driggers R. G., Vollmerhausen R., Friedman M. M.* 2002 NVTherm improvements // Proc. SPIE. 2002. Vol. 4719. P. 15—23.
4. *McKee D. C., Simmons O. D., Makar R. J.* et al. Real-time IR/EO scene simulator (RISS) product improvements // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5092. P. 259—267.
5. *Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Логос, 2007. 192 с.
6. Проектирование оптико-электронных приборов / *Ю. Б. Парвулюсов, С. А. Родионов, В. П. Солдатов* и др.; Под ред. *Ю. Г. Якушенкова*. М.: Логос, 2000. 488 с.
7. *Максимова Н. Ф., Сагитов К. И., Якушенков Ю. Г.* Компьютерная модель тепловизионной системы // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений: Сб. Вып. 1. М.: ЦНИИ „Циклон“, 2001. С. 133—138.
8. *Торшина И. П.* Формирование баз данных для компьютерной модели оптико-электронной системы // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2002. № 3. С. 149—155.
9. *Jaggi S.* ATTIRE (Analytical Tools for Thermal Infrared Engineering) – A thermal sensor simulation package // Proc. SPIE. 1992. Vol. 1689. P. 285—296.
10. *Guissin R., Lavi E., Palatnik A.* IRISIM: Infrared Imaging Simulator // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5784. P. 190—203.
11. *Franning J., Halford C., Jacobs E.* et al. Multispectral imager modeling // Proc. SPIE. 2005. vol. 5784. P. 136—145.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

В. В. ТАРАСОВ, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)

ОПТИЧЕСКОЕ СЧИТЫВАНИЕ — ОДИН ИЗ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ ЗАРУБЕЖНОЙ ПЕЧАТИ)

Описываются схемы оптического считывания сигналов с отдельных элементов чувствительного слоя микроболометрических приемников излучения, предлагаемые для улучшения их пороговой чувствительности.

Ключевые слова: микроболометр, схема считывания, сегнетоэлектрический кристалл, перестраиваемый эталон Фабри — Перо.

Известные достоинства неохлаждаемых тепловых многоэлементных приемников излучения (МПИ) — микроболометров — сопровождаются рядом недостатков, ограничивающих круг их применения. К числу последних относятся наличие теплового шума Джонсона и избыточного токового $1/f$ -шума, а также возникновение джоулева нагрева чувствительных элементов, проявляющегося в образовании тока смещения измерительной схемы, и, как следствие перечисленных факторов, невысокая, по сравнению с фотонными МПИ, пороговая чувствительность [1, 2].

Для устранения этих недостатков в целях улучшения пороговой чувствительности микроболометров и приближения ее значения к величинам, характеризующим энергетическое разрешение фотонных МПИ, в последние годы предлагается ряд путей. Один из них — оптическое считывание сигналов, образующихся в отдельных элементах чувствительного слоя микроболометрических МПИ.

Достоинствами оптических схем считывания являются:

— отсутствие проводниковых соединений элементов чувствительного слоя со схемой считывания и, следовательно, отсутствие теплового шума Джонсона и избыточного токового $1/f$ -шума;

— возможность сочетания кремниевых чувствительных элементов с кремниевой схемой считывания;

— увеличение коэффициента заполнения пиксела* микроболометра за счет устранения столбиков-контактов, соединяющих чувствительные элементы со схемой считывания;

— возможность отказа от температурной стабилизации в микроболометрах с перестраиваемым эталоном Фабри — Перо.

Представляет интерес схема, основанная на зависимости показателя преломления чувствительного элемента — пиксела МПИ — от его температуры (рис. 1). Описание механизма работы такого приемника с электрически управляемым оптическим считыванием приводится в работе [3]. Чувствительным элементом приемника является сегнетоэлектрический кристалл, в котором при приложении электрического поля возникает эффект двойного лучепреломления. Величина двойного лучепреломления зависит от температуры пиксела, которая определяется облученностью попадающей на него части изображения просматриваемой сцены. Помещая пиксел в поток поляризованного излучения лазера и регистрируя с помощью

* В настоящее время термин „пиксел“ обозначает не только элемент изображения, но и элемент чувствительного слоя многоэлементного приемника (см., например: Новый англо-русский словарь по радиоэлектронике. М.: Руссо, 2005. Т. 2. С. 156; Фотоника. Словарь терминов. Новосибирск, 2004).

анализатора и расположенного за ним приемника лазерного излучения мощность сигнала на выходе такой схемы считывания, можно контролировать изменения облученности в изображении сцены.

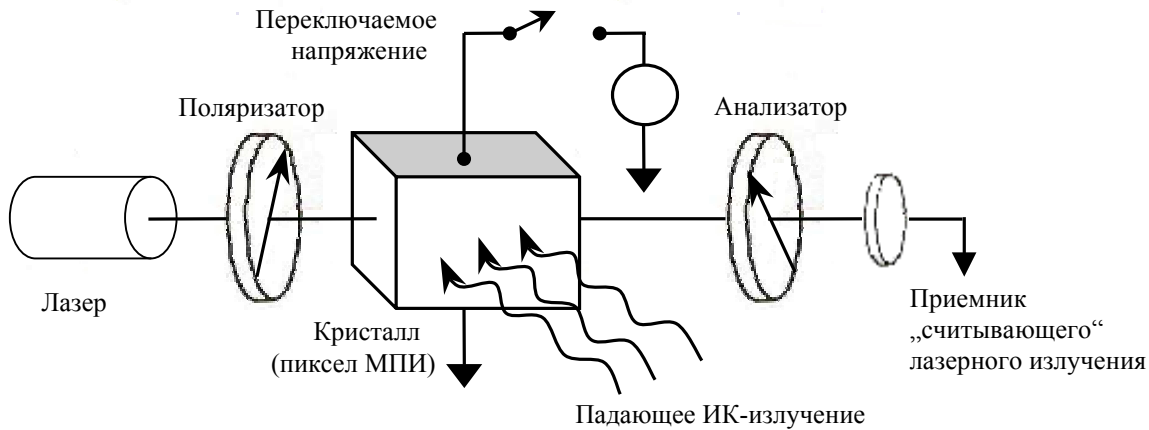


Рис. 1. Устройство считывания с электрооптическим термочувствительным кристаллом

В схеме считывания выходная мощность $W_{\text{вых}}$ падающего на приемник лазерного излучения определяется как

$$W_{\text{вых}} = W_{\text{вх}} \tau \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

где $W_{\text{вх}}$ — поток, создаваемый лазером на входе схемы; τ — коэффициент пропускания системы считывания; φ — разность фаз, изменяющаяся при изменении температуры кристалла на величину ΔT .

Разность фаз может быть представлена следующим образом [4]:

$$\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\frac{\partial(n_e - n_o)}{\partial T} \right] \Delta T, \quad (2)$$

где d — длина кристалла в направлении распространения „считывающего“ излучения; λ — длина волны „считывающего“ излучения; n_e и n_o — показатели преломления необыкновенной и обыкновенной волны „считывающего“ излучения соответственно.

В состав оптической схемы входит также компенсатор фазы для калибровки смещения, возникающего вследствие сдвига фазы, вызванного различными факторами.

Изменения мощности $W_{\text{вых}}$ могут наблюдаться в видимом диапазоне с помощью обычного фотонного приемника лазерного излучения, работающего без охлаждения.

В качестве материала сегнетоэлектрического кристалла может быть выбран танталолитиевый ниобат калия (ТЛНК), для которого при напряженности E электрического поля, приложенного к кристаллу, равной $3 \cdot 10^3$ В/см, двулучепреломление $\Delta n = n_e - n_o = 6 \cdot 10^{-3}$. Это значение приблизительно на два порядка больше Δn такого известного электрооптического материала, как LiNbO_3 . При длине кристалла $d = 50$ мкм, что близко к размерам пикселей МПИ, мощность $W_{\text{вых}}$ при диапазоне изменений ΔT в 1 К изменяется гораздо заметнее, чем сопротивление болометров, которое при $\Delta T = 1$ К изменяется на несколько процентов.

Сегнетоэлектрические кристаллы могут быть выращены в виде тонких пленок на кремниевой подложке. На поверхность кристалла наносится тонкий поглощающий обнаруживаемое излучение слой. (В работе [3] предлагается на кристалл ТЛНК наносить слой SiN .) В отличие от резистивных микроболометров не требуется выполнять этот слой из изоляционного материала. При электрически проводящем слое его поглощающая способность максимизируется, а теплоемкость минимизируется.

На рис. 2 приведена схема работы столбца (строки) чувствительных элементов. Считывающий луч проходит через столбец элементов, к которым поочередно прикладывается напряжение.

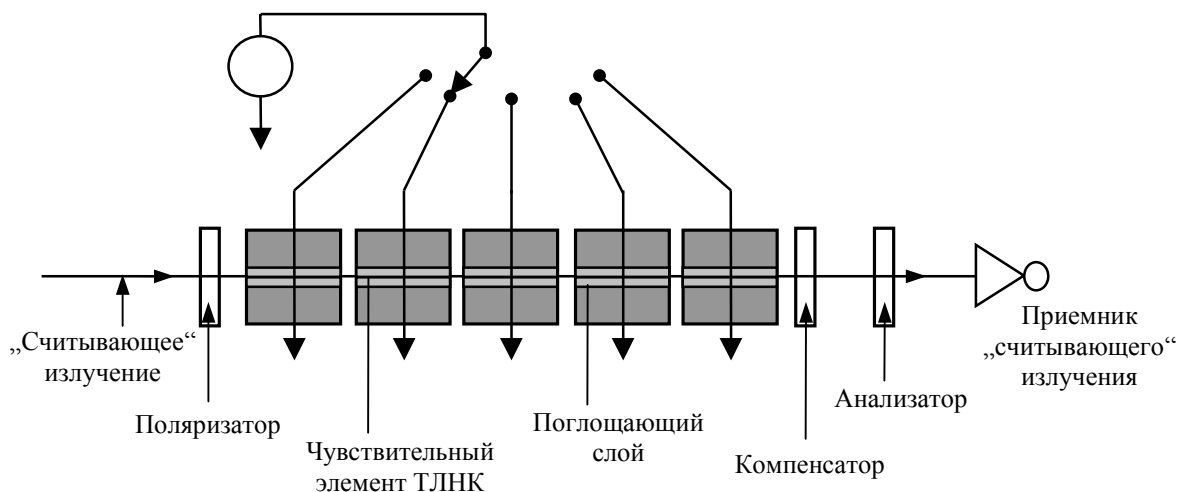


Рис. 2. Схема работы столбца (строки) неохлаждаемых электрооптических термочувствительных элементов МПИ

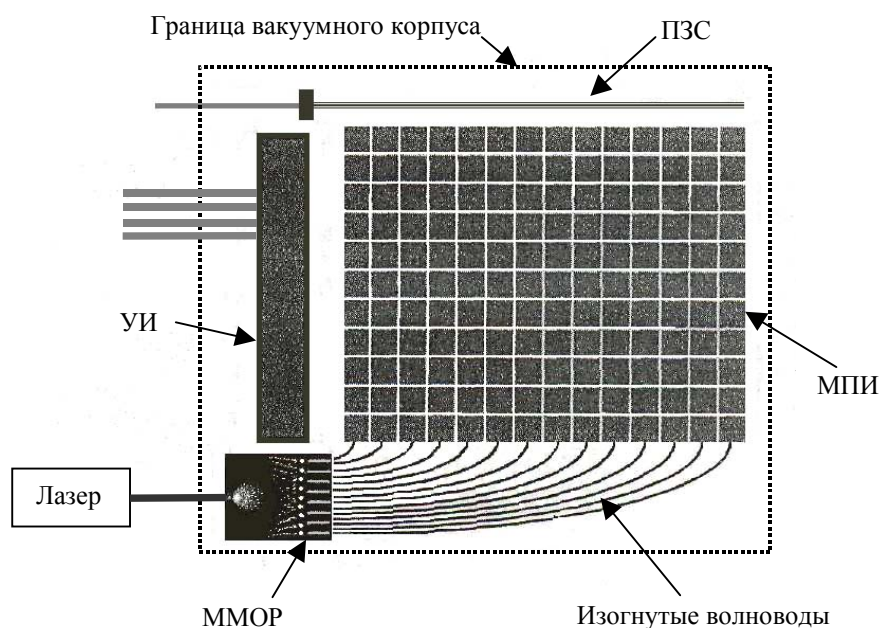


Рис. 3. Схема работы двумерного МПИ

Схема работы двумерного МПИ (матричного) с лазерным считыванием представлена на рис. 3. Лазер располагается вне вакуумированного корпуса МПИ. Его излучение с помощью оптического волокна поступает на вход многомодового объемного резонатора (ММОР) в интегральном исполнении, который распределяет входной поток на N выходов. С этих выходов с помощью изогнутых оптических волокон (волноводов) потоки подводятся к N столбцам элементов МПИ. Параллельные пучки лучей проходят через M строк МПИ и поступают на одномерную матрицу ПЗС, считывающую выходные сигналы $W_{\text{вых}}$ и выдающую стандартный видеосигнал. Управляющий интерфейс (УИ) является, по существу, декодером по вертикальной оси МПИ и используется для смещения (подачи напряжения) одновременно на одну из строк МПИ. Выбирая достаточно большую длительность переключающего импульса, можно усреднять шумы на выходе, возникающие в процессе считывания. Поскольку кристаллы образуют емкостную нагрузку

из-за их большого сопротивления, рассеяние тепла, образующегося в схеме при считывании, осуществляется посредством УИ, что заметно снижает мощность, потребляемую термоэлектрическим охладителем, которым снабжается МПИ. (На рис. 3 охладитель не показан.)

Основными видами шума рассматриваемого МПИ являются тепловой шум, вызванный флюктуациями его температуры, и шум схемы оптического считывания. Эквивалентная шуму разность температур, определяемая первой из этих составляющих, может быть рассчитана по формуле [1]

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{8K^2 T \sqrt{kG\Delta f}}{\tau_0 \beta A_{\text{ПИ}} \alpha (\Delta\Phi/\Delta T)_{\Delta\lambda}},$$

где K — диафрагменное число объектива, строящего изображение на МПИ; T — температура элемента МПИ; k — постоянная Больцмана; G — коэффициент теплопроводности; Δf — ширина полосы пропускания частот; τ_0 — коэффициент пропускания оптической системы (объектива); β — коэффициент заполнения чувствительного слоя МПИ; $A_{\text{ПИ}}$ — площадь чувствительного элемента МПИ; α — коэффициент поглощения излучения чувствительным слоем МПИ; $\Delta\Phi/\Delta T$ — отношение, характеризующее изменение потока, испускаемого черным телом — аналогом наблюдаемого излучателя, на единицу площади при температуре T внутри спектрального рабочего диапазона $\Delta\lambda$.

При значениях ожидаемых параметров системы на базе ТЛНК, принятых в работе [3], а именно: $G = 1,6 \cdot 10^{-7}$ и $5,5 \cdot 10^{-8}$ Вт/К для элементов, расположенных с шагом 50 и 25 мкм, что соответствует тепловой постоянной времени 10 мс в общих случаях; $\beta = 0,96$ для элементов с шагом 50 мкм и $\beta = 0,92$ для элементов с шагом 25 мкм; $\alpha = 0,8$; $\tau_0 = 0,9$; $\Delta f = 25$ Гц; отношении $\Delta\Phi/\Delta T$, вычисленном для спектрального диапазона 8—12 мкм и температуры 293 К, — были получены следующие значения:

$$\Delta T_{\text{п}} = 5 \text{ мК при шаге } 50 \text{ мкм, } \Delta T_{\text{п}} = 12 \text{ мК при шаге } 25 \text{ мкм.}$$

Эти значения $\Delta T_{\text{п}}$ могут быть улучшены за счет снижения теплоемкости пикселей путем использования поглощающего слоя с лучшей проводимостью, например Au вместо SiN, что приведет к увеличению коэффициента α с одновременным уменьшением теплоемкости. Кроме того, можно уменьшить поперечное сечение волноводов, связывающих лазер с пикселями МПИ.

Шумы схемы оптического считывания могут появиться из-за флюктуаций интенсивности считывающего лазерного пучка лучей, а также из-за шума считывания в ПЗС, который весьма невелик.

При сильном электрическом поле (больших значениях E) полный диапазон выходных сигналов соответствует малому диапазону температур пикселей T (порядка 1 К). При значительном диапазоне возможно превышение фазового сдвига на π , т.е. возникновение фазовой неопределенности, приводящей к неоднозначности решений (1) относительно ΔT . Для исключения такого положения можно реализовать дополнительное считывание с низкой разрешающей температурной способностью, которое выполняется под воздействием невысокого напряжения электрического поля. Это позволяет перекрыть путем считывания большой интервал температур пикселей с однозначным их соответствием выходным сигналам. Связав результаты основного и дополнительного считывания, можно избавиться от фазовой неопределенности.

Стремлением нивелировать указанные недостатки микроболометрических МПИ, а также использовать для считывания сигналов с пикселей МПИ кремниевые интегральные схемы обусловлено применение термооптического эффекта в полупроводниках вместо преимущественно используемых в настоящее время в микроболометрах терморезистивного или пироэлектрического эффектов [2]. В матричном микроболометрическом приемнике, описанном в работе [5], термочувствительные элементы преобразуют длинноволновое ИК-излучение в ближневолновое.

В плоскости изображения, образованного в длинноволновой ИК-области, располагается матрица тонкопленочных перестраиваемых фильтров-резонаторов, настроенных на длины

волн ближнего ИК-диапазона. С помощью оптической схемы считывания сигналы (потoki), создаваемые источником излучения этой схемы (лазером) и прошедшие через эти фильтры, принимаются стандартными ПЗС- или КМОП-фотоприемниками.

Перестраиваемые фильтры представляют собой эталоны Фабри — Перо, в которых резонансная полость выполняется из аморфного кремния с однородностью по толщине в пределах 2 % на пластинах диаметром до 100 мм. Отражательные многослойные зеркала выполняются из аморфного кремния и нитридов кремния. Ширина полосы пропускания фильтров составляет 0,15 нм.

Изменение пиковой длины волны фильтров при изменении показателя преломления под воздействием меняющейся температуры, объясняемое уменьшением ширины запрещенной зоны полупроводника при увеличении температуры, для полости из аморфного кремния характеризуется высоким термооптическим коэффициентом, равным $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ при 300 К.

Коэффициент перестройки фильтра, определяемый как отношение смещения пиковой длины волны спектральной характеристики к изменению температуры, в системе, описанной в работе [5], составил 0,06 нм/К в диапазоне температур 295—355 К.

Основным элементом этой системы является матрица перестраиваемых фильтров-пикселей, размещаемых на теплоизоляционных опорах, с другой стороны которых имеется теплопроводная и прозрачная для ближневолнового ИК-излучения подложка (рис. 4). Формируемое объективом изображение в длинноволновом ИК-диапазоне (входное) строится на матрице фильтров-пикселей, из-за нагрева которых происходит сдвиг пиковых длин волн фильтров. Система считывания направляет на фильтры-пиксели „считывающее“ излучение ближневолнового ИК-диапазона с длиной волны, близкой к пиковым длинам волн спектральных характеристик фильтров-пикселей. Коэффициент пропускания фильтров зависит от их температур, поэтому на фотоприемной матрице (ПЗС или КМОП), принимающей „считывающее“ излучение, формируется изображение, соответствующее нагреву фильтров-пикселей, т.е. входному изображению в длинноволновом ИК-диапазоне. Коэффициент перестройки тем выше, чем уже спектр „считывающего“ излучения и чем круче фронты спектральных характеристик этого излучения и пропускания фильтров-пикселей.

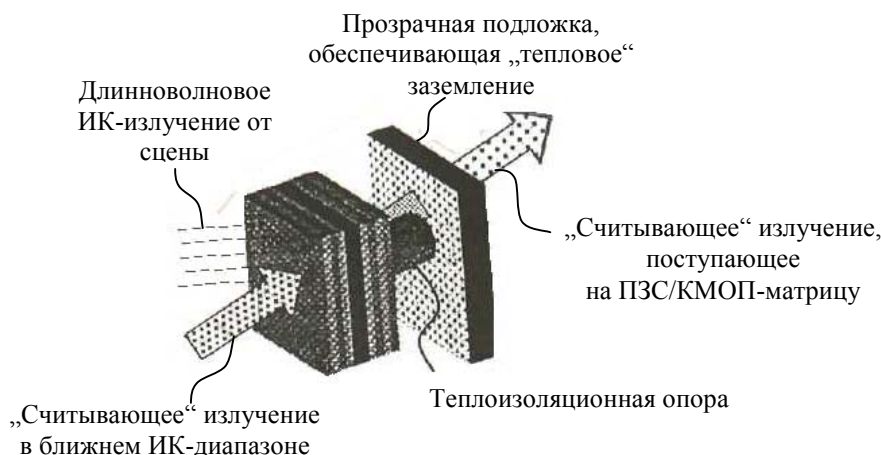


Рис. 4. Схема работы перестраиваемого фильтра-пикселя

Температурный коэффициент системы считывания, определяемый изменением коэффициента пропускания пикселя, приходящимся на 1 К изменения температуры, составляет несколько десятков процентов, что гораздо выше температурных коэффициентов сопротивления материалов традиционных микроболометров (3 % для оксидов ванадия и 1,5 % для аморфного кремния).

Необходимо отметить, что в такой схеме отсутствуют проводниковые соединения со схемой считывания: это снижает уровень шума и дает возможность увеличить коэффициент

заполнения МПИ. В пикселе приемника используется лишь одна опора, а не две, как в терморезистивных микроболометрах, что позволяет получить коэффициент заполнения МПИ, превышающий 90 %.

Спектр „считывающего“ излучения можно перестраивать в соответствии с настройкой фильтров-пикселей в зависимости от окружающей температуры. Эти процессы происходят одновременно, что позволяет отказаться от устройства контроля за температурой окружающей среды без потери качества воспроизведения входного изображения. Как отмечается в работе [5], технология изготовления таких микроболометров существенно упрощается по сравнению с технологией изготовления традиционных терморезистивных микроболометрических МПИ. Она совместима с кремниевыми технологиями изготовления КМОП-интегральных схем. Процент годных пикселей достигает в некоторых образцах 99,9.

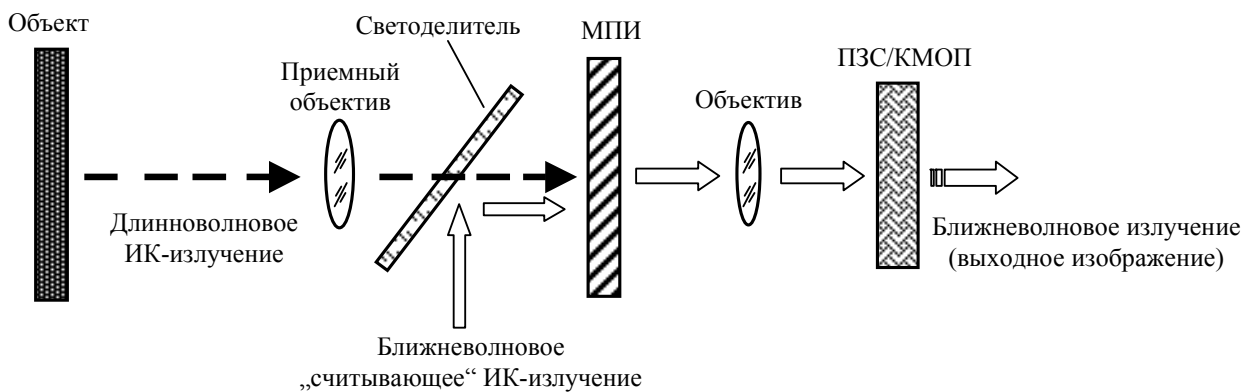


Рис. 5. Устройство макетного образца тепловизионной камеры

Устройство макетного образца системы [5] показано на рис. 5. Использовался объектив с диафрагменным числом $K = 0,86$. Источником „считывающего“ излучения был светодиод с фильтром ближневолнового ИК-излучения. Пропускание светоделителя, совмещающего длинноволновое и ближневолновое ИК-излучение, составило 92 % в области спектра, равной 8—15 мкм, и 100 % — в ближнем ИК-диапазоне. Частота кадров равнялась 22 Гц. Для МПИ формата 160×120 эквивалентная шуму разность температур $\Delta T_{\text{п}}$ составила 280—550 мК. При этом отсутствовала какая-либо температурная стабилизация. Столь большие значения $\Delta T_{\text{п}}$ авторы работы [5] объясняют несовершенством отдельных элементов макета (неоднородностью теплового отклика пикселей МПИ, неоднородностью распределения шума в ПЗС/КМОП-матрицах системы считывания, несовершенством оптической системы, недостаточным качеством программно-обеспечиваемой пространственной фильтрации изображения). Тем не менее, авторы работы [5] весьма оптимистичны в оценке описанной системы, предназначенной для производства дешевых тепловизоров многих гражданских применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kruse P. W. Uncooled thermal imaging-arrays, systems, and applications // SPIE Press. 2001. Vol. TT 51. P. 34—42.
2. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004.
3. Secundo L., Lubianiker Y., Arganat A. I. Uncooled FPA with optical reading: reaching the theoretical limit // SPIE Proc. 2005. Vol. 5783. P. 483—495.
4. Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. Методы модуляции и сканирования света. М.: Наука, 1970.
5. Ming Wu, Cook I., DeVito R. et al. Novel low-cost uncooled infrared camera // SPIE Proc. 2005. Vol. 5783. P. 496—505.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

Г. С. МЕЛЬНИКОВ, В. М. САМКОВ, Ю. И. СОЛДАТОВ

ФГУП НПК „Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова“
Санкт-Петербург

Н. А. КЛИШО

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“

Э. Д. ПАНКОВ, В. В. КОРОТАЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО И ИК-ДИАПАЗОНОВ НА QWIP-МАТРИЦАХ

Обсуждаются возможности построения комплексированной системы ИК- и терагерцового диапазонов. Анализируются принципы реализации режима сверхразрешения для дальнего диапазона чувствительности QWIP-матрицы.

Ключевые слова: QWIP-матрица, сверхразрешение, комплексированная система.

При комплексировании ИК- ($\Delta\lambda=2,8\dots 14$ мкм) и СВЧ- ($\Delta\lambda=300$ мкм ... 3 мм) каналов необходимо учитывать, что между этими диапазонами электромагнитных колебаний находится терагерцовый (ТГц) диапазон ($\Delta\lambda=30\dots 300$ мкм).

В обзоре [1] рассмотрены публикации (более 300 работ, опубликованных в 1990—2002 гг.) в области генерации, регистрации и использования излучения в терагерцовом диапазоне частот, соответствующем длинам волн 3—300 мкм. (Следует отметить, что ряд авторов, включая и авторов работы [1], ошибочно относят ИК-диапазон 3—30 мкм к ТГц-диапазону.)

Использование аппаратуры пассивного и активного радиовидения ТГц-диапазона позволяет решить некоторые практические задачи, а именно:

- таможенный досмотр ручной клади и нательное обнаружение запрещенных к перевозке предметов;
- определение химического состава сыпучих материалов и жидкостей по их интерференционному отклику на активное когерентное излучение;
- анализ и распознавание текстов, находящихся в запечатанных конвертах или на закладках транспарантов между страницами книг.

Однако при создании комплексированных систем ИК- и ТГц-диапазонов возникает задача совмещения изображений, формируемых в этих диапазонах, дифракционные пределы которых отличаются на порядок. Возможность построения матричных фотоприемников, чувствительных как в ИК-, так и в ТГц-диапазоне спектра электромагнитных колебаний, рассмотрена, например, в работах [2—4].

Современные фотоэлектрические приемники ИК-диапазона могут быть выполнены на основе различных материалов: халькогенидов свинца (PbS, PbSe), соединения кадмий — ртуть — теллур (HgCdTe), антимонида индия (InSb), силицида платины (PtSi), примесных соединений кремния (Si:x) и германия (Ge:x), а также многослойных структур с квантовыми

ямами на базе GaAs/AlGaAs — так называемых QWIP-детекторах (QWIP — Quantum Well Infrared Photodetector.)

Рассмотрим, на примере некоторых публикаций, перспективы разработок QWIP-детекторов. Первоначально наибольший интерес вызывали сверхрешетки — многослойные периодические гетероструктуры с чередующимися слоями полупроводников толщиной 1—10 нм. Наиболее простой и совершенной структурой здесь остаются сверхрешетки GaAs/AlGaAs, хотя создание сверхрешеток на основе других комбинаций полупроводников (A3B5, A2B6 и напряженных слоев Ge—Si) достаточно хорошо освоено. В таких структурах потенциал с периодом d сверхрешетки приводит к размерному квантованию электронного спектра и возникновению узких минизон в электронной и дырочной зонах соответственно, что проявляется в радикальном изменении оптических и транспортных свойств этих структур [2].

В 90-е гг. XX в. появились тепловизионные приборы на QWIP-матрицах форматом 256×256, 320×240, 320×256, 640×512 и др., обладающие высокой технологичностью, воспроизводимостью и поэлементной однородностью. Температурная чувствительность таких матричных приемников довольно высока: у лучших — ниже 10 мК, у типовых — 20 мК. Кроме того, QWIP-матрицы обладают способностью управления спектральной чувствительностью, что позволит перейти в будущем от гибридных структур фокальных матриц к монолитным [5].

Расширение области чувствительности фокальных фотоприемных матриц, первоначально названных оптоэлектронными приборами (наноструктуры с так называемыми квантовыми точками QD — quantum dots) [6], получившими впоследствии название QWIP-матрицы — матрицы ИК-фотоприемников с множественными квантовыми ямами (структура GaAs/AlGaAs), осуществлялось постепенно. Принципы расчета области чувствительности таких матриц и эволюция технологической обработки чувствительных элементов (ЧЭ) рассматриваются в работах [5, 7—11].

Технологическая обработка матриц осуществляется посредством расширения диапазона чувствительности ее элементов и совершенствования параметров чувствительности, что отражено, например, в публикациях [5, 12]. В этих работах отмечается, что в последние годы разработан унифицированный ряд многооконных модулей, предназначенных для использования в оптико-электронных системах различного назначения, и созданы макетные образцы модулей матричных двухоконных фотоприемных устройств (на 3—5 и 8—12 мкм) на основе структур с квантовыми ямами, а также образцы матричных микроболометрических приемников излучения.

В наибольшей степени требованиям к разработке многооконных систем удовлетворяют фотоприемники на основе квантово-размерных эффектов (КРЭ). Физические структуры таких фотоприемников могут быть получены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющей формировать на подложке монокристаллические полупроводниковые (ПП) слои с необходимыми свойствами и размерами, вплоть до моноатомной толщины. В качестве технологического обеспечения для выполнения этих работ могут использоваться, например, результаты разработки гетероэпитаксиальных структур GaAs/AlGaAs и GaAs/CdHgTe методом МЛЭ [13, 14].

Фотоприемники на основе КРЭ, по сравнению с другими аналогичными устройствами, обладают таким уникальным свойством, как возможность варьирования области их спектральной чувствительности путем изменения ширины квантовой ямы (которая определяется толщиной слоя узкозонного полупроводника и является параметром размера) и ее глубины, зависящей от размера призматических элементов, контактирующих с зонами проводимости широкозонного и узкозонного ПП-материалов. Благодаря этому свойству появляется возможность в рамках единого процесса на основе двух пар ПП-материалов с различной шириной запрещенной зоны получать монолитные матрицы фоточувствительных элементов, по крайней мере, с двумя различными окнами (областями спектральной чувствительности). При этом выбор пар материалов не имеет принципиального значения.

Принцип формирования мультиспектральных приемников на основе структур с квантовыми ямами продемонстрирован на заимствованном из работы [3] рис. 1, где *а* — профили полосы двойного кванта QWIP-модулятора, полученные путем их размещения в соседних квантовых колодцах (точках); *б* — схемное решение устройства, реализованное за счет создания смещений V_d на *n*-колодцах и V_m на *w*-колодцах; сплошными линиями обозначены уровни энергии E_{n0} , E_{w0} , точками — место их совмещения.

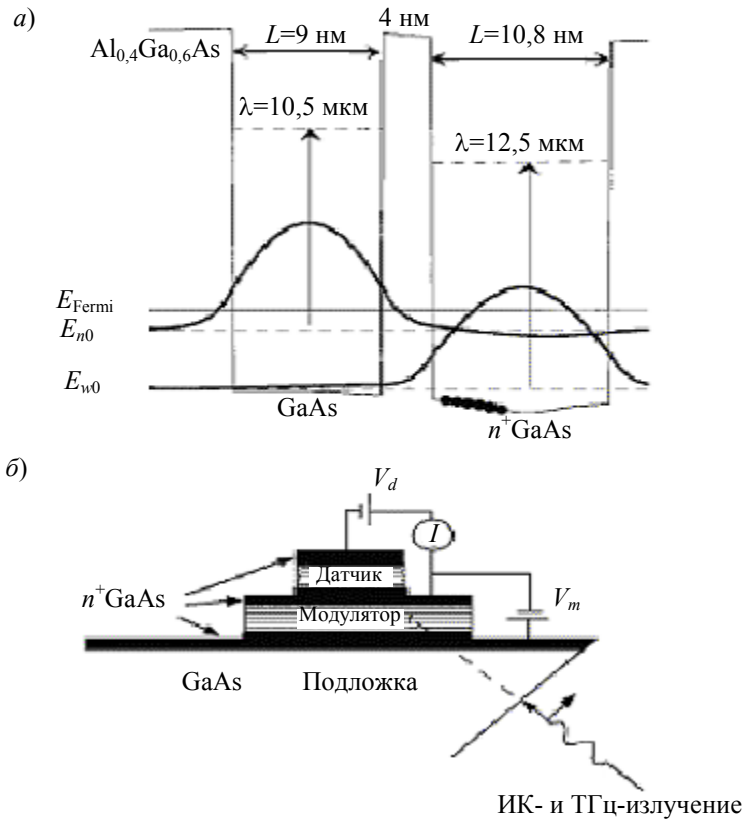


Рис. 1. Принцип формирования мультиспектральных приемников на основе структур с квантовыми ямами

Одно из первых технических решений по созданию двуспектральных QWIP-матриц иллюстрируется рис. 2 (по данным работы [3]).

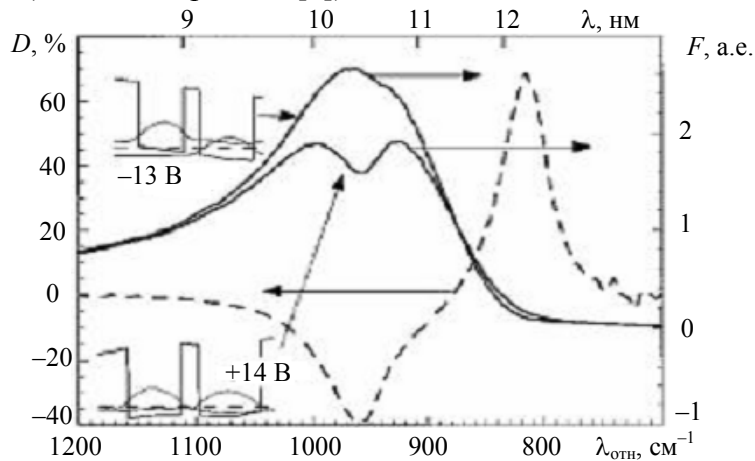


Рис. 2. График фоточувствительности элементов при негативном (-13 В) и позитивном (14 В) смещении

На рисунке приняты следующие обозначения: *D* — уровень модуляции, *F* — „фотоответ“ датчика, λ — длина волны, $\lambda_{отн}$ — волновое число. Структура полосы соответствующего модулятора показана сплошными кривыми, пунктирные линии обозначают уровни Ферми.

Возможность управления смещением в квантовых ямах реализуется путем применения изложенных в работе [10] принципов, согласно которым каждый вольтово-чувствительный фотодатчик объединяется в матрице из квантовых колодцев с гетероструктурным биполярным фототранзистором, формируя, таким образом, пиксел в 2D фокальной приемной матрице.

Последовательное достижение расширения областей чувствительности двухдиапазонных QWIP-матриц прослеживается по патентам [8, 9, 11] соответственно следующим образом: $\Delta\lambda_1 = 4 \dots 8$ ($5 \dots 12$) мкм, $\Delta\lambda_2 = 6 \dots 14$ ($7 \dots 20$) мкм; $\Delta\lambda_1 = 26 \dots 35$ мкм, $\Delta\lambda_2 = 36 \dots 60$ мкм; $\Delta\lambda_1$ составляет единицы микрометров, $\Delta\lambda_2$ — сотни.

Недостатком приемников на основе квантово-размерных структур (КРС) является необходимость соблюдения условий ввода излучения (поляризованного вдоль слоев с расположенными в них квантовыми ямами) в чувствительный элемент, иными словами, такие приемники не могут работать с падающим по нормали излучением. Однако этот недостаток преодолевается с помощью применения двумерной дифракционной решетки с соответствующим периодом, благодаря чему обеспечивается достаточно эффективный ввод поляризованного излучения в поглощающий слой [5].

Технология создания гетероструктур фоточувствительных элементов с КРЭ в настоящее время реализована на ПП-материалах соединений АЗВ5. Методом МЛЭ, самым низкотемпературным из существующих методов эпитаксии, на основе гетеропары GaAs—AlAs удается получить резкие границы гетеропереходов, обеспечить локализацию легирующей примеси в заданных активных слоях, почти идеальное согласование параметров решеток и, как следствие, относительно высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев КРС (см. рис. 3).

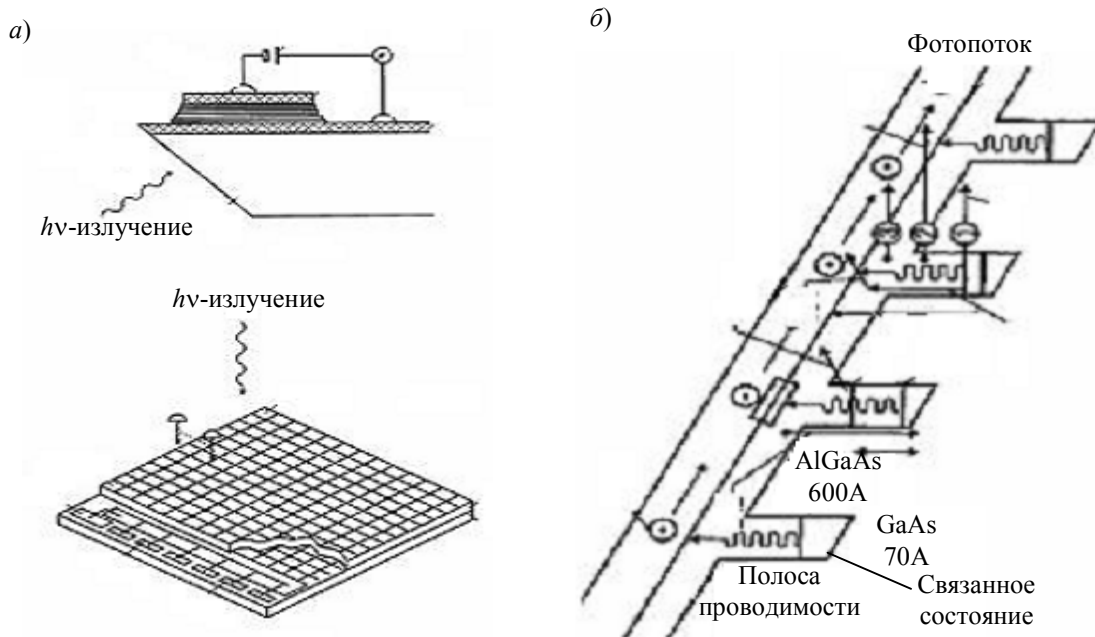


Рис. 3. Схема построения (а) и считывания (б) двухдиапазонной QWIP-матрицы (по патенту [12])

В работе [15] предлагаются решения по реализации аппаратного построения комплексированной системы, объединяющей ИК- и терагерцовый каналы. В разработанном авторами проекте сочетаются преимущества методик, предложенных в работах [16, 17], и возможности восстановления (электронного масштабирования) изображения, формируемого на полноформатной QWIP-матрице. Функциональная схема построения комплексированной системы на QWIP-матрице, в которой реализуется алгоритм сверхразрешения по методике [15], приведена на рис. 4.

По этой методике в ИК-изображения (поля зрения $4 \times 5^\circ$, $8 \times 10^\circ$ и $16 \times 20^\circ$), формируемые германиевым панкратическим объективом на QWIP-матрице, с помощью блока обработки изображений, с полукадровой сменой, в центральную часть экрана встраивается изображение, формируемое в ТГц-диапазоне на той же QWIP-матрице внешним зеркальным объективом с полем зрения $1,5 \times 1,9^\circ$.

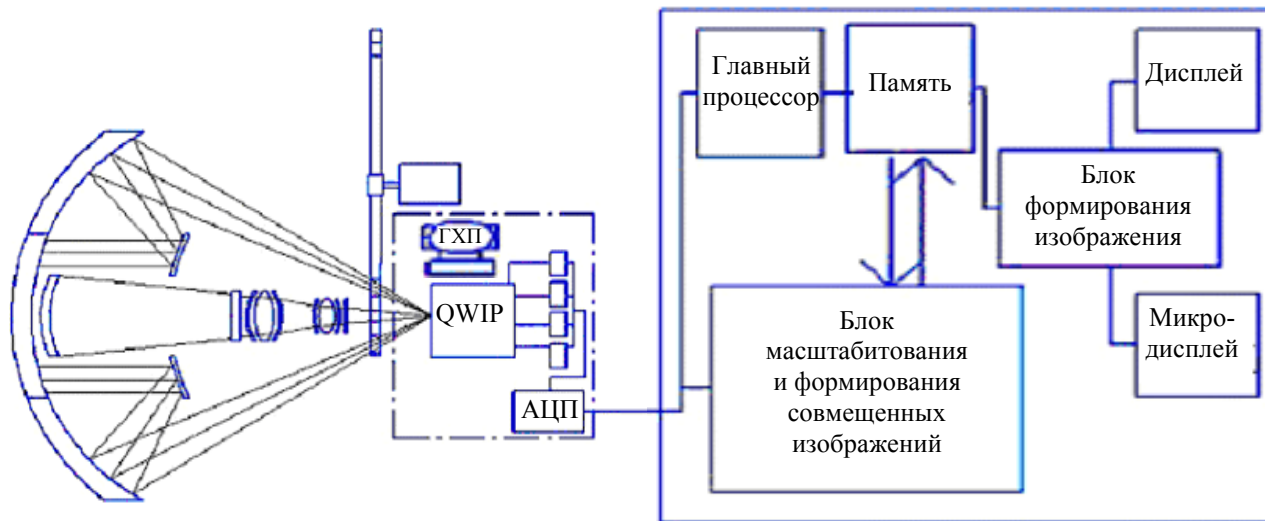


Рис. 4. Функциональная схема построения комплексированной системы (ГХН — газовая холодильная машина)

При этом обеспечение беспараллаксного режима работы канала распознавания (терагерцового диапазона) и канала наблюдения (ИК-диапазона) осуществляется путем попеременного поступления на одну матрицу потоков излучения от панкратического ИК-объектива и зеркального узкопольного объектива ТГц-диапазона. Режим перестройки обеспечивается последовательным вводом диафрагм кругового или кольцевого типа (см. рис. 5), при этом оба съюстированных объектива формируют изображения на одной приемной QWIP-матрице.

Предлагаемое решение заключается в том, что изображение в одном из каналов комплексированной системы формируется узкопольным двухзеркальным объективом высокого разрешения с относительным отверстием $1:0,8$, во втором канале используется панкратический объектив или объектив с переменным фокусным расстоянием, который размещается внутри зеркального объектива без виньетирования его лучей.

Отличительной особенностью предлагаемого решения является возможность одновременного формирования изображений в ИК- и в терагерцовой областях спектра на одной матрице чувствительных элементов — QWIP-матрице.

Главным недостатком систем радиовидения является ухудшенный дифракционный предел, характеризуемый выражением

$$r = \frac{1,2197\lambda_{\max}}{D/f},$$

где r — угловой радиус кружка Эри, D — диаметр входного зрачка, f — фокусное расстояние оптической системы.

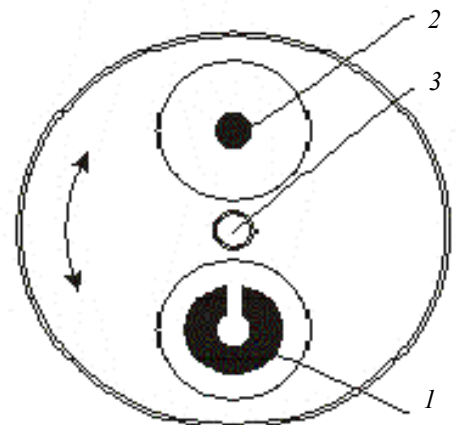


Рис. 5. Схема блока диафрагм кругового или кольцевого типа: 1, 2 — диафрагмы, обеспечивающие работу каналов распознавания и наблюдения соответственно, 3 — ось вращения блока диафрагм

Для его устранения предложена схема получения изображения в ТГц-области спектра со сверхразрешением, которая реализуется следующим образом [18—20]. Разделение длинноволновой и коротковолновой областей чувствительности матрицы в целях коррекции абберационного пятна рассеяния в дальней зоне осуществляется введением полукадровой коммутации соответствующих потоков. Принцип коммутации показан на рис. 5.

Изображение в области ТГц-диапазона формируется зеркальным сегментом, для чего защитное окно имеет сферическую форму и состоит из кольцевой зоны для двухзеркального объектива с областью прозрачности ТГц-диапазона. Центральная круговая зона предназначена для панкратического объектива ($\Delta\lambda = 7,5 \dots 14$ мкм) с тремя полями зрения $4 \times 5^\circ$, $8 \times 10^\circ$, $16 \times 20^\circ$, согласованными со стандартом матрицы (640×512 эл.). В этом случае изображение в ТГц-диапазоне с полукадровой сменой (более 50 Гц) формируется „опрашиваемой“ QWIP-матрицей в последовательно-параллельном режиме в постоянном поле наблюдения $1,5 \times 1,9^\circ$ зеркального объектива при селекции потока излучения на кольцевой зоне защитного окна. В качестве фильтра в ТГц-диапазоне могут быть применены кольцевые мениски из фторопласта или плавленного кварцевого стекла с добавками.

Изображение в ИК-области спектра (в другом полукадре) формируется QWIP-матрицей также в последовательно-параллельном режиме считывания, принцип организации которого иллюстрируется рис. 6 (затемненные и „оконтуренные“ области на рисунке соответствуют формированию ТГц-области чувствительности).

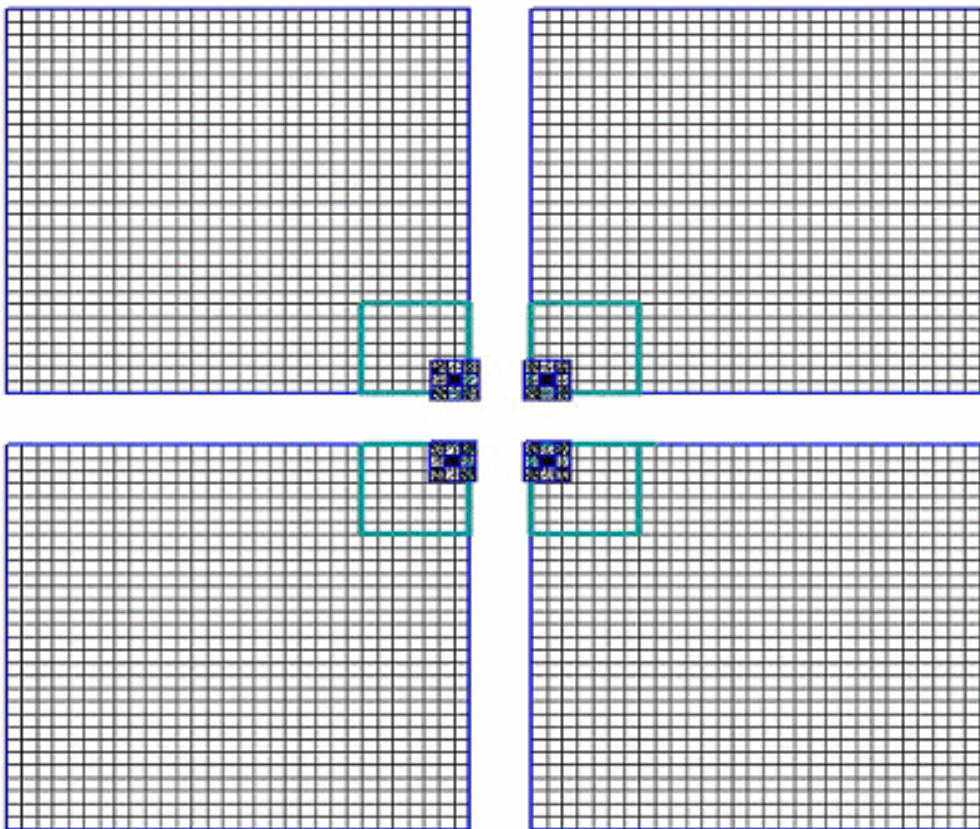


Рис. 6. Принцип организации параллельно-последовательного считывания объединяемых пикселей изображения полноформатной QWIP-матрицы (со сменными весовыми коэффициентами для каждого элемента)

Процессорный блок обработки изображений формирует его основную площадь в соответствующих полях зрения панкратического объектива. Изображение, формируемое при параллельном считывании (опросе) в ТГц-диапазоне, встраивается в центральную область общего изображения в поле зрения $1,5 \times 1,9^\circ$ с попиксельной коррекцией изображения, фиксацией

центральных максимумов в исходном изображении и обнулениями соседних пикселей в формируемом масштабируемом изображении.

При каждом опросе и в ИК-, и в ТГц-диапазоне матрицей формируется один и тот же стандарт разложения (в используемой матрице — 640×512 эл.), что обеспечивает возможность объединения элементов: 7×7 эл. (при поле зрения $4 \times 5^\circ$); 13×13 эл. (при поле зрения $8 \times 10^\circ$) и 25×25 эл. (при поле зрения $16 \times 20^\circ$).

Таким образом, в поле зрения $16 \times 20^\circ$ центральная совмещенная зона изображения при масштабировании с весовыми коэффициентами обеспечивает режим сверхразрешения в терагерцовом диапазоне по сравнению с областью изображения в ИК-диапазоне. В поле зрения $8 \times 10^\circ$ зоны изображений в ИК- и ТГц-диапазонах имеют равные абберационные характеристики элементов, и лишь при поле зрения $4 \times 5^\circ$ абберационные характеристики терагерцовой зоны в 1,2—1,4 раза превышают значения аббераций кружка рассеяния (в сравнении с зоной формирования ИК-изображения).

Итак, предложенная функциональная схема и алгоритм совмещения изображений, формируемых в ИК- и терагерцовом диапазонах, обеспечивают возможность дополнения базовой информации ИК-канала наблюдения информацией, получаемой от ТГц-канала распознавания, с реализацией режима сверхразрешения в длинноволновом канале.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князев Б. А., Черкасский В. С. Терагерцовое излучение: публикации последнего десятилетия. Новосибирск: Ин-т ядерной физики им. Г. И. Будкера. 2002.
2. Покровский Я. Е. Физика конденсированных сред // Вестн. РФФИ. 1999. № 4.
3. *Almogy G., Yuanjian Xu, Tong A. et al. Monolithic integration of quantum well infrared photodetector and modulator / Amer. Institute of Physics. 1996. S0003-6951~96!00415-5.*
4. Литвиненко К. Л., Хвам Й. М., Лысенко В. Г. Влияние свободных электрон-дырочных пар на насыщение экситонного поглощения в GaAs/AlGaAs-квантовых ямах // Физика твердого тела. 1998. Т. 40, № 6.
5. Дмитриев Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2005. № 8.
6. *Hameau S., Guldner Y., Verzellen O., Ferreira R. Nano-Optoelectronics. Concepts, Physics and Devices / Ed. by M. Grundmann. Berlin: Springer, 2002.*
7. Pat. JP2002320148, 2002-10-31. Photodetector / *Nishino Hiroshi.* (Priority number: JP20010126282 20010424).
8. USP 20020074542. Multi-quantum-well detector for low-background applications / *Gunapala, Sarath D. Choi. et al.* 2002.
9. USP 20050258415. Heterojunction far infrared photodetector / *Perera, A. G. Unil et al.* 2005.
10. USP 20070063219. Voltage tunable integrated infrared imager / *Sa'ar Amir, J. Shappir.* 2007.
11. USP 20070215860. Infrared photodetector / *Komiyama, Susumu et al.* 2007.
12. USP 6,967,345. Dual band QWIP focal plane array / *Gunapala, Sarath D. Choi, Kwong Kit Bandara, V. Sumith.* 2005.
13. Акинишина Г. В. Расчет интервала технологического допуска для гетероструктур ИК-фотоприемников // Материалы I Междунар. науч.-техн. конф. „Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании“. Ставрополь: Ставропольский гос. ун-т, 2005.
14. Волков В. Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения // Спец. техника. 2001. № 2.
15. Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в ИК- и терагерцовой областях спектра / Г. С. Мельников, Н. А. Клишо, В. М. Самков и др. Заявка на патент РФ. БОИП ИТМО, 2007.

16. Пат. 2273036 РФ. Способ создания семейства комплексированных систем наблюдения, распознавания и прицеливания на основе семейства универсальных объективов и комплексированная система для его реализации / Г. С. Мельников, Г. А. Донцов и др. ОАО „ТКС—Оптика“. 2003.
17. Пат. 2305393 РФ. Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в УФ, видимой и ИК-областях спектра / Г. С. Мельников, Г. А. Донцов и др. ОАО „ТКС—Оптика“. 2005.
18. Пирогов Ю. А., Гладун В. В., Иванов В. С. и др. Многолучевые системы пассивного радиовидения миллиметрового диапазона. М.: Изд-во МГУ, 1999.
19. Pirogov Yu. A., Gladun V. V., Shlemin I. V. et al. Super-resolution and coherent phenomena in multi-sensor systems of millimeter-wave radio imaging // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5077. P. 110—120.
20. Тимановский А. Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения: Автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук. М., 2007.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

УДК 621.383

Р. М. АЛЕЕВ, Д. Р. АЛЕЕВ

*Научно-производственная фирма „ОПТООЙЛ“
Казань*

ОТКРЫТАЯ И ВЗАИМОЗАВИСИМАЯ АРХИТЕКТУРА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

На основе синергетического подхода, когда целое (тепловизионный прибор) обладает свойствами, отсутствующими у его частей (модулей), сформулированы принципы разработки тепловизионных приборов с открытой модульной архитектурой, обладающей максимальным модернизационным потенциалом.

Ключевые слова: *Синергетический эффект, открытая архитектура, взаимозависимая (закрытая) архитектура, принципы создания тепловизионных приборов с открытой архитектурой, пространство (плоскость) объектов и их изображений, базовые присоединительные поверхности, воздушное и наземное базирование.*

В современных экономических условиях при производстве оптических и оптико-электронных приборов в целях поддержания необходимого уровня его прибыльности определяющую роль играют такие конкурентные показатели, как скорость выхода новой разработки в серийное производство, уровень ее „интеллектуальности“, гибкость производственно-технологических линий, снижение накладных расходов.

Широкий выбор взаимозаменяемых оптических, оптико-электронных и, в частности, тепловизионных приборов (ТВП) обуславливает для производителей ТВП необходимость ориентироваться на узкие сегменты рынка: например, установку приборов на платформы воздушного, наземного или морского базирования в составе поисковых, обзорных, обзорно-прицельных и других систем.

Современные технологии и степень технического совершенства такого сложного продукта, как ТВП приводят к тому, что при достижении требуемого уровня его функциональной надежности качество прибора перестает быть заметным конкурентным преимуществом.

А такие технические свойства ТВП, как сканирование в сходящихся или параллельных пучках вообще малозначимы.

Мировой рынок конкурентных предложений и выполнение производителями ТВП требований соответствия международным стандартам качества выводят на первый план удовлетворение индивидуальных запросов потенциальных покупателей. Для этой цели большинство производителей предлагают заказчику возможность выбора продукта индивидуальной конфигурации при его реализации за короткий срок. Разработка продукта открытой архитектуры, формируемой по модульному принципу, преследует эти же цели.

Архитектура ТВП является открытой модульной, если его создание и производство не зависят от того, как разработаны его отдельные модули. Место соприкосновения двух модулей ТВП называется контактной зоной или — в современной терминологии — интерфейсом, который может быть механическим, информационным, технологическим, эксплуатационным, ценовым и т.д. Если в контактной зоне появляются непредсказуемые взаимосвязи, то производителю ТВП необходимо одновременно разрабатывать и создавать оба модуля. Архитектура ТВП называется взаимозависимой (интегральной) закрытой, если хотя бы один его компонент нельзя создать отдельно от других, т.е. если его разработка и производство зависят от того, как разработаны и производятся остальные составляющие [см. лит.]. Варианты взаимозависимых (закрытых) и открытых модульных архитектур — это две крайние точки „динамического диапазона“ существования архитектур ТВП, и большинство востребованных, по-видимому, находятся между ними.

Производитель быстрее добивается успеха, если архитектура любого продукта определяется конкуренцией на рынке. На начальном этапе развития данной техники, когда конкуренция разворачивается вокруг качества прибора, производитель не может себе позволить собирать ТВП из стандартных компонентов. В этом случае он должен контролировать разработку и производство всех важнейших компонентов, определяющих качество ТВП. При переизбытке качества, не оцениваемом потребителем, появляется техническая возможность перейти от закрытой интегрированной конструкции ТВП к открытой модульной конструкции. С технической точки зрения, если конкуренция разворачивается вокруг качества ТВП, модульная архитектура — это поражение. Но если происходит насыщение рынка продаж и требуется быстрое освоение новых ниш при финансово-временных ограничениях, модульный принцип открытой архитектуры имеет бесспорное преимущество с учетом серьезного модернизационного запаса.

Рассмотрим основные принципы разработки ТВП с открытой модульной архитектурой. В состав ТВП входят следующие компоненты: телескопическая насадка (ТН), разворачивающее устройство (РУ), узел калибровки (УК), фотоприемное устройство (ФПУ), блок электронной обработки (БЭО) и видеосмотровое устройство. Наиболее функционально значимым, например, для ТВП 2-го поколения является разворачивающее устройство, которое, по существу, определяет архитектуру прибора — открытую модульную или закрытую взаимозависимую. По мнению авторов настоящей статьи, в ТВП 2-го поколения РУ и сам прибор должны удовлетворять ряду принципиальных требований (руководящим установкам для конструктора), при выполнении которых РУ превращается в универсальный тепловизионный модуль (УТМ2), а ТВП становится прибором с открытой архитектурой с присущей ей длительным модернизационным запасом.

На рис. 1 в виде структурной схемы представлены основные принципы разработки УТМ2 и ТВП с открытой модульной архитектурой.

Практическое следствие одного из основных принципов разработки ТВП с открытой модульной архитектурой — наличие внутренней и внешней базовых поверхностей — рассмотрим на вариантах „привязки“ модуля УТМ2 к платформам воздушного (ВБ) и наземного (НБ) базирования, называемых далее носителями. Понятно, что предварительно оптическая ось модуля УТМ2 должна быть „привязана“ к его внешней базовой присоединительной поверхности (БПП). Взаимная ориентация в пространстве базовых поверхностей УТМ2 и носителя представлены на рис. 2. (На рисунке телескопическая насадка и узел калибровки не показаны.)

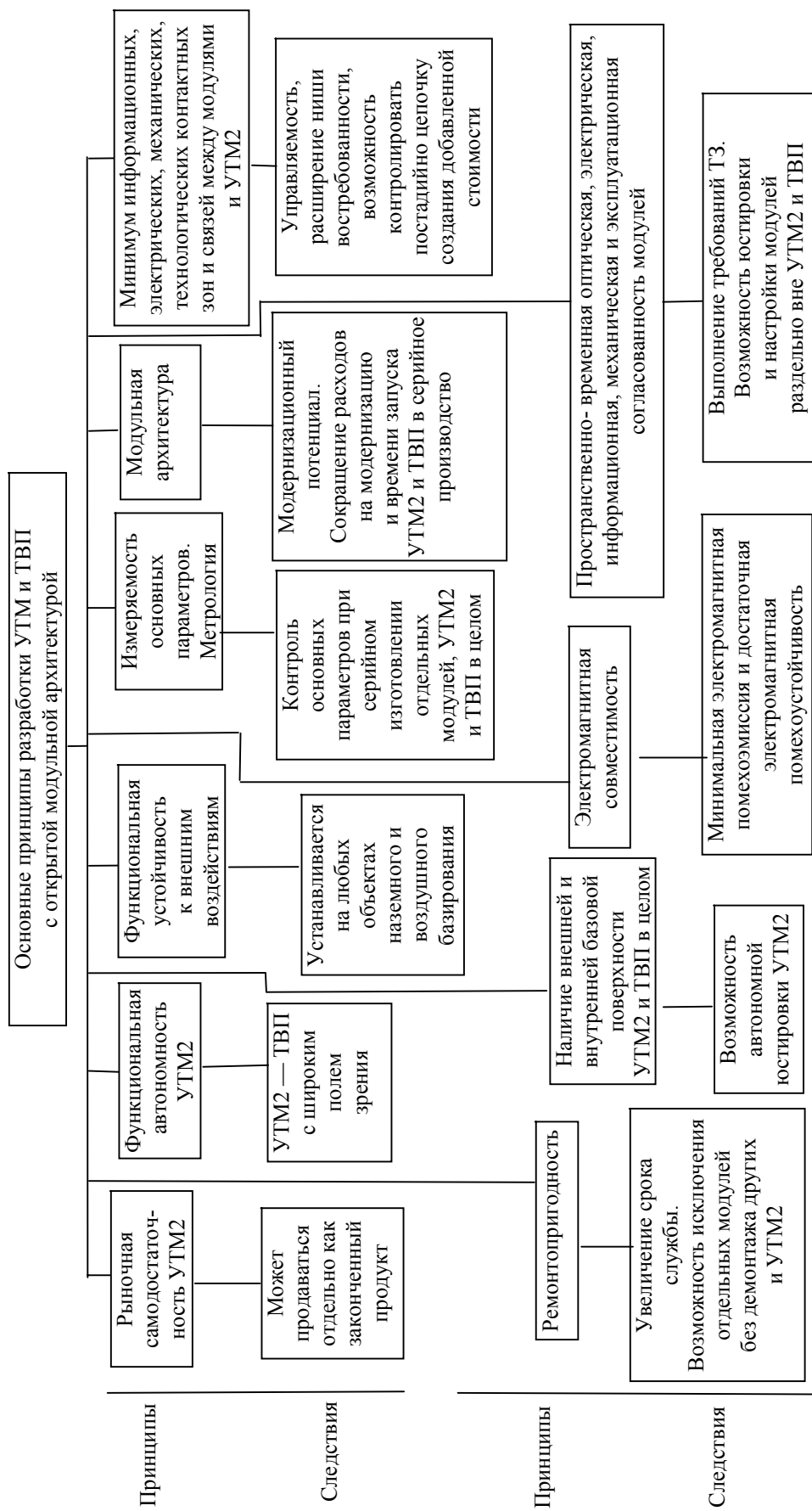
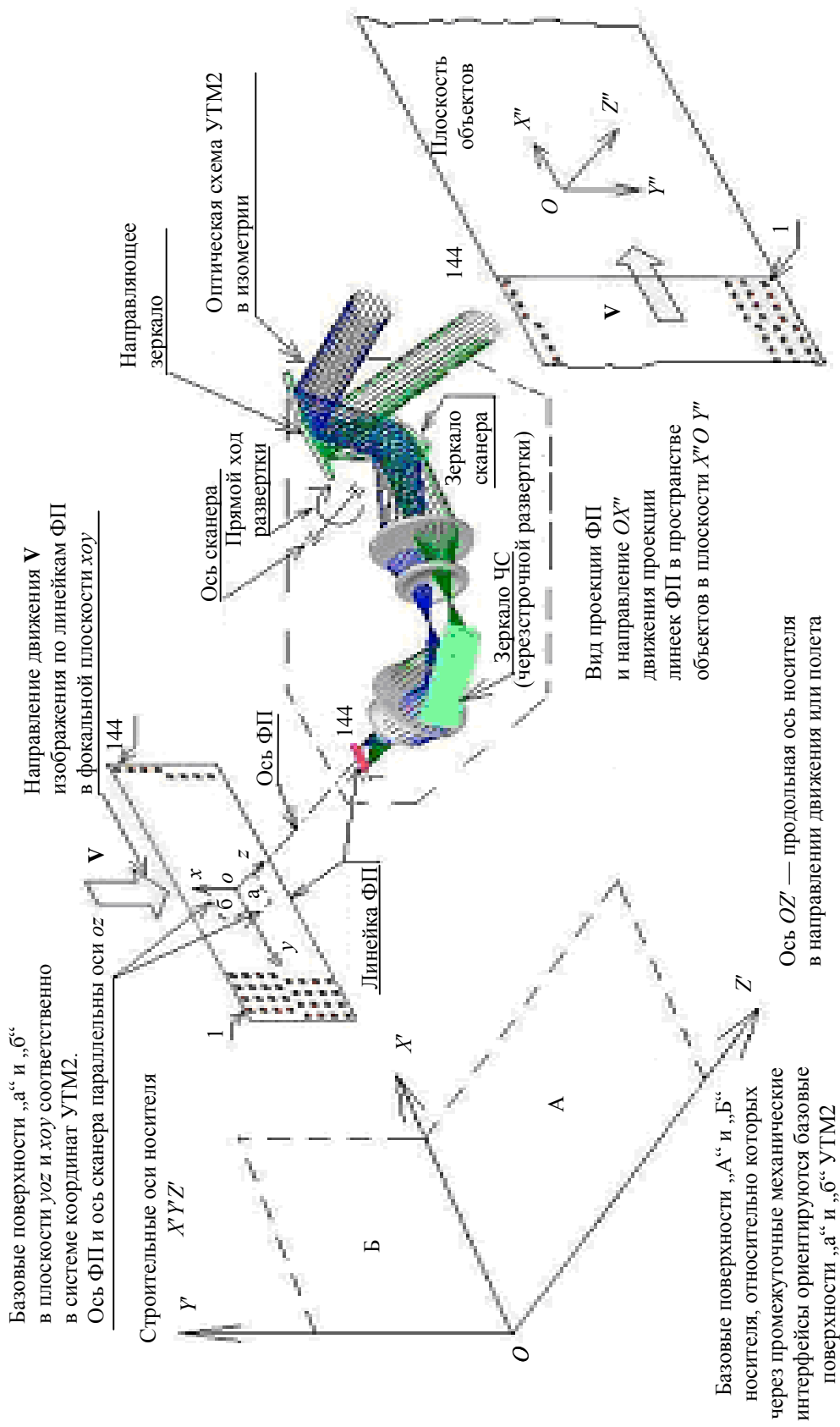


Рис. 1. Основные принципы разработки ТВП с открытой модульной архитектурой



Базовые поверхности „а“ и „б“ в плоскости yoz и xoy соответственно в системе координат УТМ2. Ось ФП и ось сканера параллельны оси oz

Строительные оси носителя $X'Y'Z'$

Базовые поверхности „А“ и „Б“ носителя, относительно которых через промежуточные механические интерфейсы ориентируются базовые поверхности „а“ и „б“ УТМ2

Ось OZ' — продольная ось носителя в направлении движения или полета

Рис. 2. Взаимная ориентация в пространстве базовых поверхностей УТМ2 и носителя

При установке ТВП на платформу воздушного базирования ТН расположена перед направляющим зеркалом (НЗ), и его оптическая ось параллельна базовой поверхности „а“ (А) и оси oz (OZ'), см. рис. 2. При установке ТВП на платформу наземного базирования ТН расположена после НЗ, и его оптическая ось параллельна базовой поверхности „б“ (Б) и оси ox (OY'). Некоторые наиболее часто встречающиеся схемы „привязки“ модуля УТМ2 к БПП носителей представлены на рис. 3.

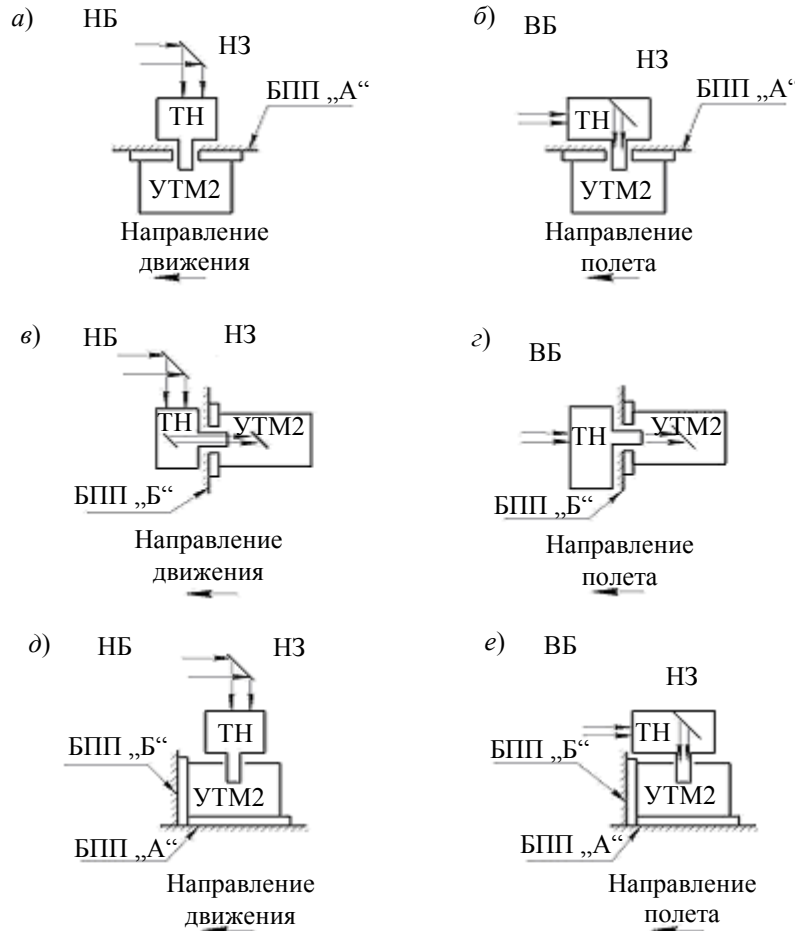


Рис. 3. Схемы „привязки“ УТМ2 к базовым поверхностям носителя

В варианте, приведенном на рис. 3, а, б, входное окно УТМ2 расположено параллельно горизонтальной БПП „А“, параллельной плоскости „А“ (см. рис. 2). Платформа, образующая верхнюю горизонтальную плоскость корпуса УТМ2, является несущей для модулей, входящих в его состав, к ней также может крепиться защитный кожух.

В состав УТМ2 входят следующие модули: развертывающее устройство, фотоприемное устройство, узел калибровки, блок электронной обработки. Конструктивно модуль РУ2 состоит из модуля сканирующего устройства и модуля фокусирующей оптики, смонтированных на единой платформе, имеющей базовую поверхность, что позволяет проводить независимую юстировку и настройку, а также устанавливать модуль РУ2 в УТМ2. Модуль ФПУ состоит из фотоприемника (ФП), микрокриогенной системы и блока ее управления, смонтированных на корпусе держателя ФП, который обеспечивает установку ФПУ в УТМ2. Модуль электронной обработки состоит из электронного блока, блоков питания и общего кронштейна, посредством которого модуль устанавливается в УТМ2. При снятом защитном кожухе обеспечивается доступ ко всем компонентам УТМ2. При данной компоновке УТМ2 ось сканера и ось ФП параллельны оси движения носителя, центр масс УТМ2 должен быть максимально приближен к БПП „А“ (см. рис. 3, а, б).

В варианте, приведенном на рис. 3, в, з, для обоих видов носителей предлагается расположить входное окно УТМ2 в вертикальной плоскости модуля, параллельной плоскости „Б“ (см. рис. 2), которая в данном случае является базовой присоединительной поверхностью. Конструктивная особенность рассматриваемого варианта заключается в наличии в составе УТМ2 дополнительного ломающего зеркала. Доступ к компонентам УТМ2 осуществляется при снятом кожухе. При данном расположении и компоновке модуля оси сканера и ФП также параллельны оси движения носителя.

В варианте, приведенном на рис. 3, д, е, для обоих видов носителей предлагается расположить входное окно УТМ2 горизонтально. Присоединительных базовых поверхностей будет две — вертикальная БПП „Б“ и горизонтальная БПП „А“. В отличие от предыдущих вариантов крепление УТМ2 осуществляется к его нижней горизонтальной плоскости, что обеспечивает дополнительные удобства при проведении ремонтных и настроечных работ. Дополнительное крепление УТМ2 к вертикальной БПП „Б“ требуется при его установке на носитель наземного или воздушного базирования при серьезных ударных нагрузках и наличии проблемы отвода тепла. Доступ к компонентам УТМ2 осуществляется при снятом кожухе. Оси сканера и ФП при заданном расположении и компоновке модуля параллельны оси движения носителя.

В рассмотренных схемах „привязки“ компоновка УТМ2 удовлетворяет принципу ремонтпригодности и обеспечивает удобство юстировки, настройки и эксплуатации ТВП в соответствии с рис. 1.

В заключение необходимо отметить следующее. Анализ российского (советского) тепловизионного приборостроения показывает, что задача разработки первого отечественного серийного ТВП, как 1-го, так и 2-го поколения, с одновременным выполнением требования модульности конструкции до сих пор не решена, ибо на существовавшей в то время элементной базе предельно достижимые характеристики ТВП по дальности обнаружения и распознавания при жестких ограничениях на массогабаритные параметры могли быть реализованы только прибором с взаимозависимой закрытой архитектурой (интегральной конструкции). Подтверждением этого тезиса является ТВП 2-го поколения „Модуль-Авиа“, разработанный ФГУП „НПО ГИПО“ (Казань), бесспорным лидером отечественного тепловизионного приборостроения. По существу, этот ТВП не имеет модернизационного запаса, поэтому для его установки на другую платформу (также воздушного базирования) требуется новая разработка, что приведет к новым финансово-временным затратам.

Эволюционный ход развития элементной и технологической базы диктует, по мнению авторов, необходимость перехода к открытой модульной архитектуре ТВП и их серийному производству. Это потребует организационного развития и дезинтеграции производственных структур, что представляется вполне оправданным в целях получения максимальной прибыли от производства ТВП с открытой модульной архитектурой.

ЛИТЕРАТУРА

Christensen C. M., Raynor M. E. The Innovator's Solution / Harvard Business School Publishing Corporation. 2003.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

Г. Г. ГОРБУНОВ, И. Н. СИВЯКОВ, О. К. ТАГАНОВ, В. Б. ШИЛОВ

ФГУП НПК „Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова“
Санкт-Петербург

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРИЕМНИКОВ В ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИИ

Исследуются особенности использования многоэлементных фотоприемников в спектральной аппаратуре типа фурье-спектрометра. Выявлены положительные качества, которые приобретает интерференционная спектральная аппаратура в случае применения многоканального приемника излучения.

Ключевые слова: *фурье-спектрометрия, видеоспектрометрия, гиперспектральные приборы.*

Первые опыты использования гиперспектральных видеоспектрометров при дистанционном зондировании Земли со спутников и самолетов были проведены в интересах геологоразведки для поиска рудных, нефтяных и газовых месторождений. Информация, получаемая с видеоспектрометров, представляет собой двухмерные изображения исследуемой местности, сформированные в различных спектральных интервалах с образованием так называемого „куба данных“ [1]. Если видеоспектрометр регистрирует информацию в более чем сотне спектральных интервалов, его называют гиперспектральным, при регистрации более тысячи интервалов — ультраспектральным [2]. Уже при использовании первых разработок гиперспектральных видеоспектрометров было идентифицировано более ста минералов, накоплена статистика данных и создан каталог спектральных особенностей этих минералов. В настоящее время осуществляется гиперспектральная идентификация динамических природных объектов: сельскохозяйственных культур, лесов, водных сред, защитных сооружений и т.д.

Исследования атмосферы, состава ее газов, аэрозолей и водяных паров показали необходимость ультраспектрального разрешения в широком спектральном диапазоне, хотя и при более низких пространственных разрешениях.

Увеличение объема регистрируемого „куба данных“ осуществляется путем усовершенствования всех основных элементов видеоспектрометра: осветителя, кодирующего устройства и приемника излучения (чаще всего — матрицы), но наибольшее значение имеет элемент, кодирующий спектральную информацию, т.е. спектрометр. Создание гипер- и ультраспектральных видеоспектрометров на основе фурье-спектрометра с многоэлементными приемниками (фотоприемными матрицами — ФПМ) значительно улучшает основные характеристики прибора, увеличивает объем получаемых данных и отношение сигнал/шум [3].

Использование фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками обеспечивает максимальные возможности для развития и совершенствования видеоспектрометрической аппаратуры. В ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“ (Санкт-Петербург) создан базовый модуль фурье-спектрометра, который может работать как в режиме спектрофотометра, так и спектрорадиометра [4].

Структурная схема этого прибора приведена на рис. 1, здесь:

1 — входной объектив модуля; при использовании модуля в качестве спектрорадиометра представляет собой сканирующее зеркало, направляющее исследуемый поток излучения в спектрорадиометр, при работе в качестве спектрофотометра — объектив, направляющий излучение в измерительную часть фурье-спектрофотометра;

- 2 — источник излучения референтного (монохроматического) канала — стабилизированный метрологический лазер;
- 3 — неподвижное зеркало интерферометра (в качестве такого зеркала может использоваться и зеркальный триэдр);
- 4 — система юстировки неподвижного зеркала интерферометра;
- 5 — светоделительный узел;
- 6 — подвижное зеркало интерферометра (также может использоваться зеркальный триэдр);
- 7 — задающие генераторы системы подвижки зеркала интерферометра;
- 8 — частотно-фазовый дискриминатор системы подвижки;
- 9 — усилители системы электродинамической подвижки зеркала интерферометра;
- 10 — система арретирования механизма подвижки, используемая при транспортировке модуля фурье-спектрометра для предохранения механизма от повреждения;
- 11, 12 — электронно-оптические датчики рабочего положения подвижного зеркала интерферометра, предназначенные для ограничения работы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сигнала основного канала фурье-спектрометра вне рабочего положения зеркала;
- 13 — предварительный усилитель приемника референтного канала;
- 14 — полосовой усилитель сигналов референтного канала;
- 15 — усилитель-формирователь импульсов запуска АЦП сигнала интерферограммы основного канала, соответствующих, с точностью до $\pm 2^\circ$, определенной фазе сигнала референтного канала;
- 16 — выходной конденсор, фокусирующий излучение основного канала, прошедшее через интерферометр, на фотоприемник, при использовании многоэлементного приемника — формирующий на нем изображение исследуемой сцены;
- 17, 17' — одноэлементный или многоэлементный фотоприемник излучения основного канала;
- 18, 18' — предварительные усилители сигнала, поступающего с каждого элемента фотоприемника;
- 19, 19' — полосовые усилители сигнала основного канала;
- 20 — коммутатор сигналов многоэлементного фотоприемника основного канала;
- 21 — аналогово-цифровой преобразователь сигналов интерферограмм основного канала;
- 22 — согласующее устройство (интерфейс) выхода АЦП с управляющим компьютером;
- 23 — управляющий компьютер, типа PC Pentium 4 или Notebook HP Omnibook XE 4500, с помощью которого производится запись, запоминание и последующая обработка интерферограмм основного канала фурье-спектрометра;

24, 25 — источник излучения и приемник дополнительного канала „белого света“, этот канал предназначен для определения положения нулевой разности хода лучей в интерферометре.

Внешний вид прибора с системой охлаждения приемника представлен на рис. 2.

В разработанном фурье-спектрометре установлен глубокоохлаждаемый приемник (Ge—Cu), имеющий 2 линейки по 14 элементов в каждой и работающий в спектральном диапазоне от 3,0 до 15 мкм. Размер единичного элемента $0,2 \times 0,1 \text{ мм}^2$, при этом длинная сторона приемника ориентирована вдоль линейки. Время регистрации интерферограммы со всех 28 приемников менее 5 с. Спектральное разрешение не хуже $0,5 \text{ см}^{-1}$. Число точек каждой интерферограммы около 10 тыс., разрядность АЦП — 14. Для снятия интерферограмм использовался один АЦП, переключение его входного сигнала осуществляется с помощью коммутатора, последовательно подключающего соответствующий приемник к входу АЦП. Первая ячейка приемника подключалась по импульсу, соответствующему определенной фазе референтного канала. Следовательно, ошибки скорости перемещения подвижного зеркала системы не сказывались на измерении сигнала интерферограммы этой ячейки. Однако переключения коммутатора синхронизированы только во времени, при этом не отслеживаются возможные

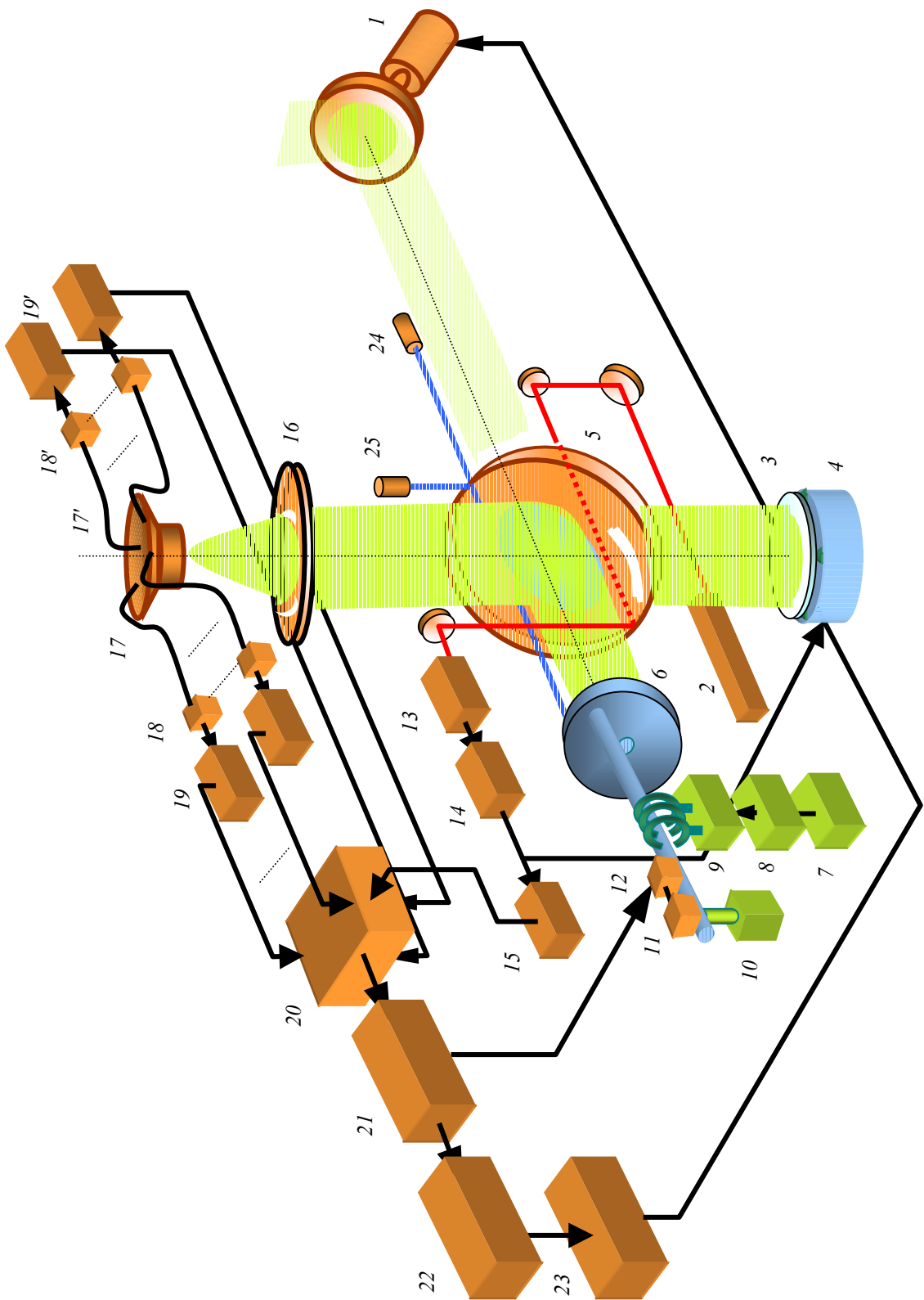


Рис. 1. Структурная схема фурье-спектрометра с многоэлементным приемником

мгновенные изменения скорости подвижного зеркала. Переключение приемников осуществляется с интервалом в 2 мкс, скорость перемещения подвижного зеркала составляет около 2000 мкм/с, следовательно, максимальная ошибка при определении разности хода лучей для последнего подключенного приемника в коротковолновой части спектра составит уже около 4 % от длины волны, что необходимо учитывать при дальнейшей обработке информации.

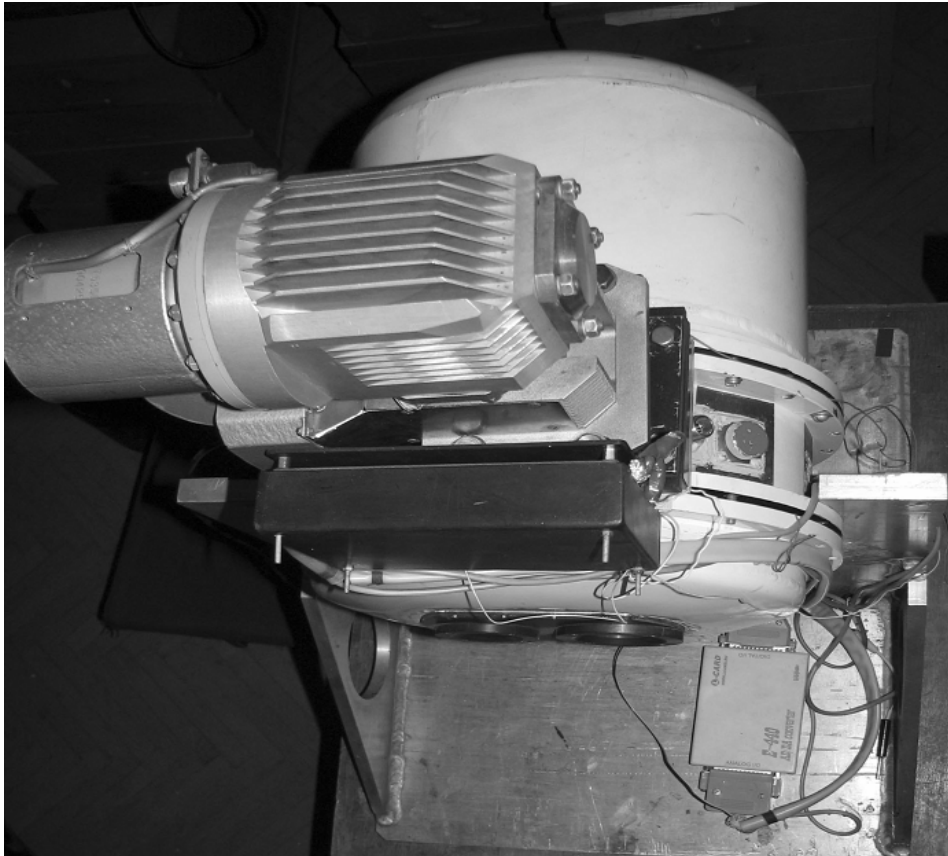


Рис. 2. Вид фурье-спектрометра с многоэлементным охлаждаемым приемником

Кроме того, для каждого отдельного элемента обеих линеек приемников истинная разность хода отличается от разности хода, отсчитываемой по референтному каналу, за счет появления дополнительного угла между лучом распространения излучения, регистрируемого референтным каналом, и лучом излучения каждого отдельного элемента приемника основного канала, что также необходимо учитывать для точной привязки шкалы волновых чисел.

При изменении положения точечного объекта на малоразмерном приемнике значительно изменяется и интерферограмма. В зависимости от расположения точечного объекта относительно оси приемника можно получить интерферограммы различного вида — от симметричной до полностью асимметричной (чисто синусной) и даже перевернутой (максимум симметричной интерферограммы становится отрицательным). При исследовании этого явления было доказано [5, 6], что оно связано с остаточной разъюстировкой интерферометра, которая в той или иной мере присутствует в приборах. Как теоретически, так и экспериментально показано, что в сканирующем интерферометре с остаточной разъюстировкой при наблюдении точечного источника амплитуда, глубина модуляции и начальная фаза интерференционного сигнала существенно зависят от соотношения размеров абберрационного изображения точечного источника и приемника, а также от их взаимного расположения [6]. Значение начальной фазы интерферограммы (фазовый спектр) содержит информацию о положении точечного источника в поле зрения сканирующего интерферометра. Определение значения начальной

фазы в интерферограмме позволяет определить величину рассогласования центров изображения точечного источника и приемника, много меньшую размеров элемента приемника [5, 6].

На рис. 3 показаны экспериментальные фазовые спектры (зависимость $\varphi(\nu)$ фазы интерферограммы в точке нулевой разности хода от волнового числа) и спектрограммы атмосферы (зависимость $B(\nu)$ спектральной яркости от волнового числа), полученные при испытании прибора: на рис. 3, а — спектрограмма $B(\nu)$, полученная прямым расчетом из экспериментальной интерферограммы, а на рис. 3, б — рассчитанный фазовый спектр $\varphi(\nu)$ той же интерферограммы; на рис. 3, в — мнимая (Im) и реальная (Re) составляющие спектрограммы с учетом фазового спектра, а на рис. 3, г — окончательный результат — реальная составляющая рассчитанного спектра, свернутая с функцией фазовой коррекции ($R_0(\nu)$). Анализ рисунка наглядно показывает влияние фазового спектра на истинный вид спектрограммы исследуемой атмосферы.

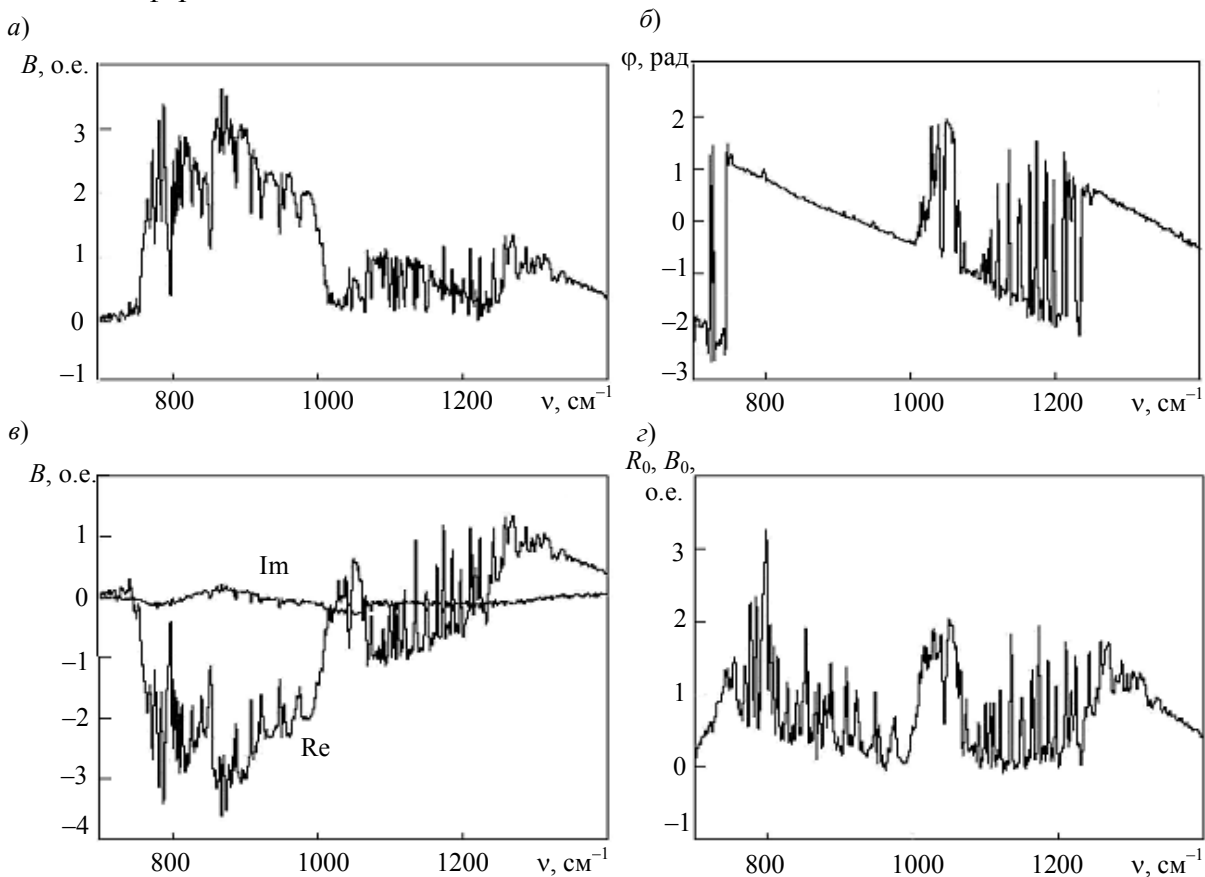


Рис. 3. Фазовый спектр и спектрограммы атмосферы

Как известно, при использовании в фурье-спектрометре многоэлементных приемников аппаратура приобретает следующие преимущества [3]:

— получение дополнительной информации (осуществляемое с помощью фазовых спектров фурье-спектрометра с многоэлементным приемником), которую можно использовать для распознавания наличия излучающего точечного подвижного объекта (в его поле зрения) и определения направления движения;

— определение направления на точечный излучающий объект с точностью не хуже одной десятой величины элемента приемника;

— возможность использования фурье-спектрометра с многоэлементным приемником не только в качестве кодирующего элемента спектровизора, но и в качестве датчика волнового фронта адаптивного телескопа по произвольному или искусственному объекту.

Вместе с тем, однако, необходимо проведение дополнительных расчетов, позволяющих учесть непараллельность лучей излучения референтного канала и каждого элемента многоэлементного приемника, возможные ошибки при определении разности хода лучей вследствие запаздывания при считывании информации, получаемой от различных приемников, а также фазовый спектр зарегистрированной интерферограммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hardin R. W.* Hyperspectral imaging: how mach is hype? // *Photonic Spectra*. 1997. N 7. P. 82—92.
2. *Coetz A. F. H., Vane G.* et al. Imaging spectrometry for Earth remote sensing // *Science*. 1985. Vol. 228, N 4704. P. 1147—1153.
3. *Горбунов Г. Г., Еськов Д. Н., Рябова Н. В., Серегин А. Г.* Новые применения фурье-спектрометров с многоэлементными приемниками // *Оптич. журн.* 2005. Т. 72, № 8. С. 71—77.
4. *Афонин А. В., Давыдов В. С., Горбунов Г. Г., Решетников А. И.* Наземный спектрометрический комплекс для исследования содержания антропогенных газов в пограничном слое атмосферы и валидации спутниковых измерений // Там же. 2004. Т. 71, № 11. С. 72—76.
5. *Горбунов Г. Г., Гридин А. С., Дубков В. И.* и др. Сигнал в сканирующем двухлучевом интерферометре с остаточной разъюстировкой при точечном источнике излучения // *Оптика и спектроскопия*. 1989. Т. 67, вып. 5. С. 1204—1207.
6. *Бурмистров Б. Н., Воронич В. Б., Горбунов Г. Г., Дубков В. И.* Пространственные свойства сигнала в сканирующем двухлучевом интерферометре при малоразмерном источнике излучения // Там же. 1991. Т. 70, вып. 1. С. 208—210.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

Г. Г. ГОРБУНОВ, А. П. ЛАППО, О. К. ТАГАНОВ

ФГУП НПК „Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова“
Санкт-Петербург

КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ РАДИОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

Описан пример использования лабораторного фурье-спектрометра для определения коэффициентов спектрального пропускания фильтрового многоканального радиометра.

Ключевые слова: фурье-спектрометрия, радиометрия, шкала волновых чисел.

Оптико-электронная радиометрическая аппаратура находит широкое применение в задачах, связанных с необходимостью измерения потоков (мощности) излучения источников разной природы в определенных областях спектра. Исходя из функциональных особенностей приборов этой группы требуется проводить калибровку шкал длин волн и интенсивности потока, а также определить спектральные границы чувствительности. Если энергетическая калибровка осуществляется до сих пор классическим методом — путем освещения прибора потоком излучения эталонных источников (лампы, модели абсолютно черных тел разных температур и др.), то определение спектрального пропускания затруднено вследствие требований к средствам измерений. Одна из причин такого положения связана с тем, что спектральное пропускание радиометра необходимо оценивать при освещении его потоком излучения, при этом его форма в максимальной степени должна воспроизводить форму потока при функционировании прибора в реальных условиях. Спектральное пропускание радиометра определяется совокупностью оптических спектральных характеристик его элементной базы — окон, светоделителей, фильтров, приемника — и, кроме того, зависит от поля зрения прибора, и только абсолютное заполнение его входного зрачка обеспечивает точное представление о параметрах спектрального пропускания.

Авторами настоящей статьи предложен способ калибровки шкалы длин волн трассового радиометра с помощью фурье-спектрометра, диапазон работы которого совпадает со спектральной областью [1]. Использование в качестве калибратора шкалы длин волн спектрального прибора, а именно фурье-спектрометра, в наибольшей степени соответствует требованиям задачи, поскольку этот прибор в референтном канале имеет свой внутренний стандарт длин волн — линию излучения He-Ne-лазера. Большой геометрический фактор $\Omega \times S$ (Ω — телесный угол, стерadian, при котором излучение поступает в прибор; S — площадь параллельного пучка лучей в приборе, см²), характерный для фурье-спектрометров [2], позволяет заполнить входной зрачок исследуемого радиометра практически полностью, что затруднительно при использовании классических дифракционных спектрометров.

Для исследования возможностей интерференционной спектральной аппаратуры при таком нетрадиционном применении использовался лабораторный фурье-спектрометр, разработанный в ФГУП НПК „ГОИ им. С. И. Вавилова“ (Санкт-Петербург) [3]. Диаметр параллельного пучка лучей в интерферометре этого прибора составляет 50 мм, угол поля зрения 2°, спектральное разрешение 2 см⁻¹, время регистрации одного спектра (интерферограммы) 3 с. Источником излучения служит нихром-керамический излучатель с температурой около 1200 К и размерами излучающего элемента 10×10 мм². Рядом с приемником установлено поворотное зеркало, чтобы направить пучок излучения из интерферометра фурье-спектрометра через

радиометр на приемную систему последнего, которая подключена через интерфейс фурье-спектрометра к персональному компьютеру. Такое расположение радиометра практически обеспечивает его абсолютное заполнение излучением, а использование в качестве приемника фурье-спектрометра собственного приемника радиометра позволяет полностью имитировать рабочий режим радиометра. При этом интерферограмма (функция автокорреляции исследуемого спектра) оцифровывается по разности хода лучей с помощью референтного канала с He-Ne-лазером. Это позволяет использовать известное преимущество фурье-спектрометра — точность привязки шкалы волновых чисел во всем спектральном диапазоне работы прибора [2]. Зарегистрированные интерферограммы преобразовывались в спектр.

Как обычно, при спектрофотометрических измерениях сначала регистрировалось излучение нихром-керамического источника фурье-спектрометра в стандартном режиме, затем вводилось поворотное зеркало и регистрировалось излучение того же источника, но прошедшее через радиометр на его приемную систему. После операции фурье-преобразования с помощью персонального компьютера полученные спектры фона и радиометра нормировались каждый к своему максимуму, чтобы учесть разницу в чувствительности приемников фурье-спектрометра и радиометра, и затем производилось деление спектра радиометра на спектр фона. В результате этой процедуры получалась не только откалиброванная для радиометра шкала длин волн, но и рассчитывалось распределение относительного пропускания радиометра. Последнее, например, дополнительно позволило обнаружить в ходе эксперимента дефект изготовления одного из фильтров радиометра.

На рис. 1 представлена принципиальная схема калибровочной установки. В оптико-механическом блоке фурье-спектрометра излучение от источника 1 коллиматорным зеркалом 2 передается в интерферометр Майкельсона, состоящий из подвижного 4 и неподвижного 6 зеркал и светоделителя с компенсатором 3, 5. Собирающая система 7 фокусирует излучение, прошедшее через интерферометр, на приемнике 9. Для калибровки шкалы длин волн радиометра 10 в ход лучей вводится поворотное зеркало 8, которое направляет проинтерферированное излучение на вход радиометра.

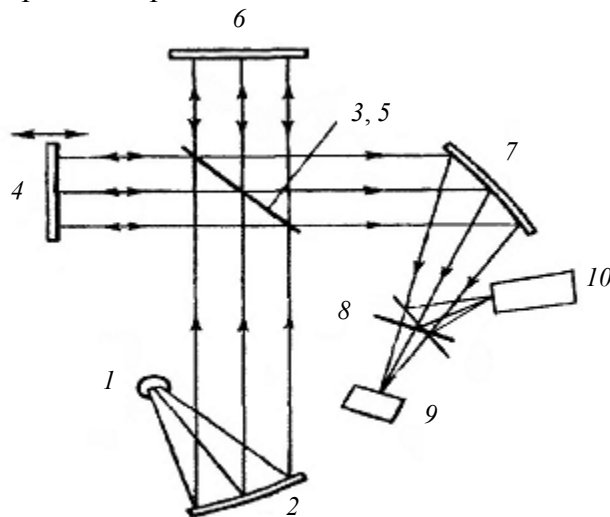


Рис. 1. Структурная схема установки для калибровки шкалы длин волн фильтрового радиометра с помощью фурье-спектрометра

На рис. 2, а представлен измеренный относительный спектр пропускания одного из каналов исследуемого радиометра в виде зависимости интенсивности излучения (I) от волнового числа (ν). Анализ рисунка демонстрирует возможность определения не только основного рабочего участка спектрального пропускания радиометра, но и небольших зон пропускания за границей этого участка, которые важны для правильного использования информации,

получаемой с радиометра, но обнаружить их другими известными способами затруднительно. Нижний участок этой кривой (см. рис. 2, а), но в увеличенном масштабе, приведен на рис. 2, б.

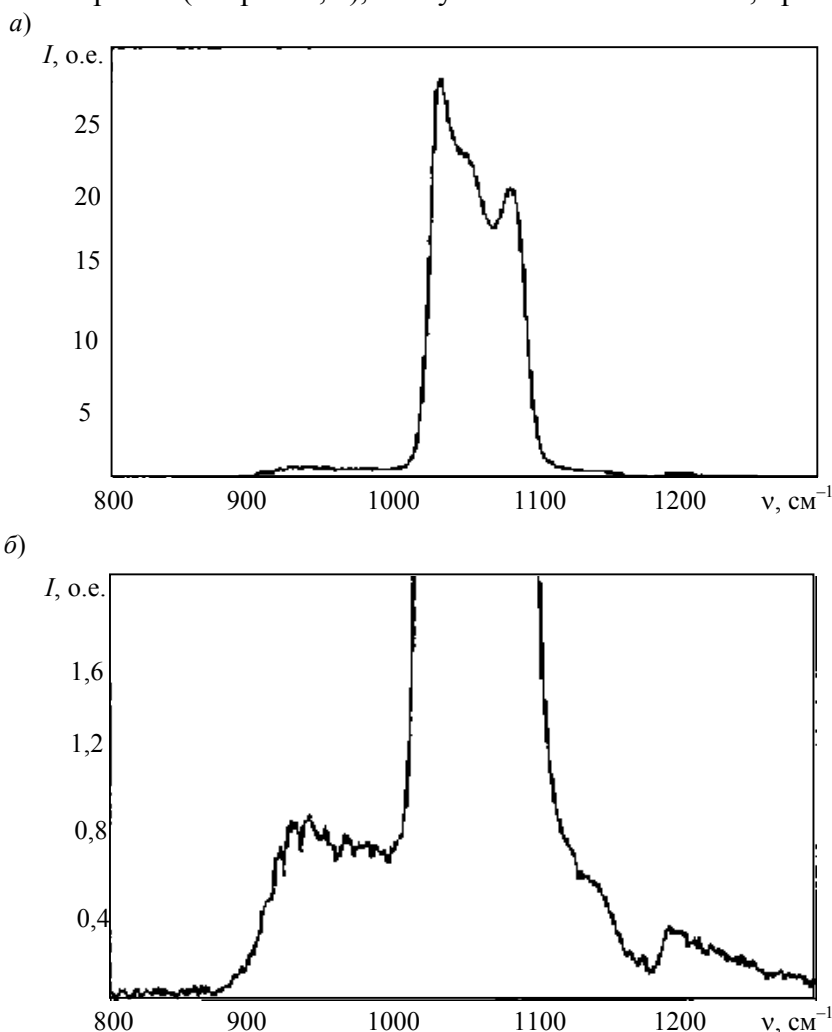


Рис. 2. Спектральное пропускание одного из каналов многоканального радиометра (а), то же, в увеличенном масштабе (б)

Значительная величина отношения сигнал/шум, точная привязка по шкале длин волн, абсолютное заполнение входного зрачка радиометра исследуемым излучением, быстрота получения результатов и их точность позволяют сделать вывод о преимуществе использования фурье-спектрометра для измерения спектральных коэффициентов пропускания оптоэлектронной аппаратуры, например фильтровых радиометров, в том числе, в целях калибровки шкалы длин волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atkinson N. C., Wilson S. N. S., Girox J. Measurement and simulation of instrument line shape // 7th ASSFTS, Oberpfaffenhofen. 1996. May.
2. Светосильные спектральные приборы: Сб. статей // Под ред. К. И. Тарасова. Л.: Наука, 1988. 264 с.
3. Горбунов Г. Г., Киселев Б. А. Фурье-спектрометрия: состояние и тенденции развития // Оптич. журн. 1993. № 12. С. 1—6.

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем
СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

А. А. БЕЛОУСОВ, А. К. ЯВЛЕНСКИЙ, А. А. СЕВАСТЬЯНОВ,
А. С. ВОЛКОВ, К. А. ЖАВОРОНКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ КИНЕМАТОГРАФЕ

Рассматриваются вопросы диагностики оборудования в цифровом кинематографе. Предложен способ идентификации технического состояния исполнительных узлов оборудования, основанный на регистрации трибоакустического сигнала.

Ключевые слова: трибоакустика, диагностика, цифровой кинематограф.

Комплекс оборудования для цифрового кинопоказа состоит из нескольких серверов управления и хранения данных, системы цифрового воспроизведения (мультиплексор), видеопроектора и акустической системы. Надежность функционирования оборудования достигается за счет непрерывного контроля и диагностирования состояния отдельных устройств, своевременного распознавания возможной неисправности и оперативного ввода резервных систем. Элементная база оборудования включает радиоэлектронные компоненты и механические узлы (системы вентиляции, накопители информации и приводы, автоматические системы подачи носителей, исполнительные узлы блоков управления отражающими зеркалами). По статистическим данным на отказы механических узлов приходится свыше трети всех возникающих поломок.

Интегральные схемы цифровых устройств, с одной стороны, подвержены влиянию температуры, а с другой — являются тепловыми источниками. Температура нормально функционирующего электронного блока должна находиться в определенном интервале. Таким образом, температура является диагностическим параметром при контроле исправности системы электроники рассматриваемого комплекса. Контроль осуществляется путем мониторинга тестовых сигналов, что предусмотрено разработчиками оборудования. Диагностика механических узлов осложнена вследствие миниатюрных размеров объектов контроля. Известные методики определения дефектов по вибросигналу не могут обеспечить распознавание всех критических дефектов, а также служить основой для прогнозирования технического состояния комплекса. Однако выборочное их использование в конкретных случаях оправдано. Для решения задачи определения технического состояния оборудования для цифрового кинопоказа авторами настоящей статьи разработан способ контроля, основанный на трибоакустическом сигнале (ТАС).

Относительное перемещение активных механических поверхностей вызывает упругие микродеформации материала и сопровождается появлением волн ультразвукового (реже звукового) диапазона [1] — ТАС. Исследованию генерации акустических волн посвящена работа [2].

На рис. 1 представлены спектры измеренных трибоакустических сигналов ($A(f)$) для двух узлов трения: поверхностей с низким износом, соответствующих высокому классу точности (рис. 1, а), и поверхностей с высоким износом, соответствующих низкому классу точности (рис. 1, б). Информационные параметры ТАС, получаемые путем специальных процедур спектрального анализа („следающей“ фильтрации), зависят от вида и траектории относительного движения поверхностей. Это должно учитываться на этапе анализа с помощью коэффициентов регрессии. Таким образом, регрессионная функция может характеризовать

техническое состояние объекта контроля и служить для сравнения с нормативными значениями параметров, определяющих его качество.

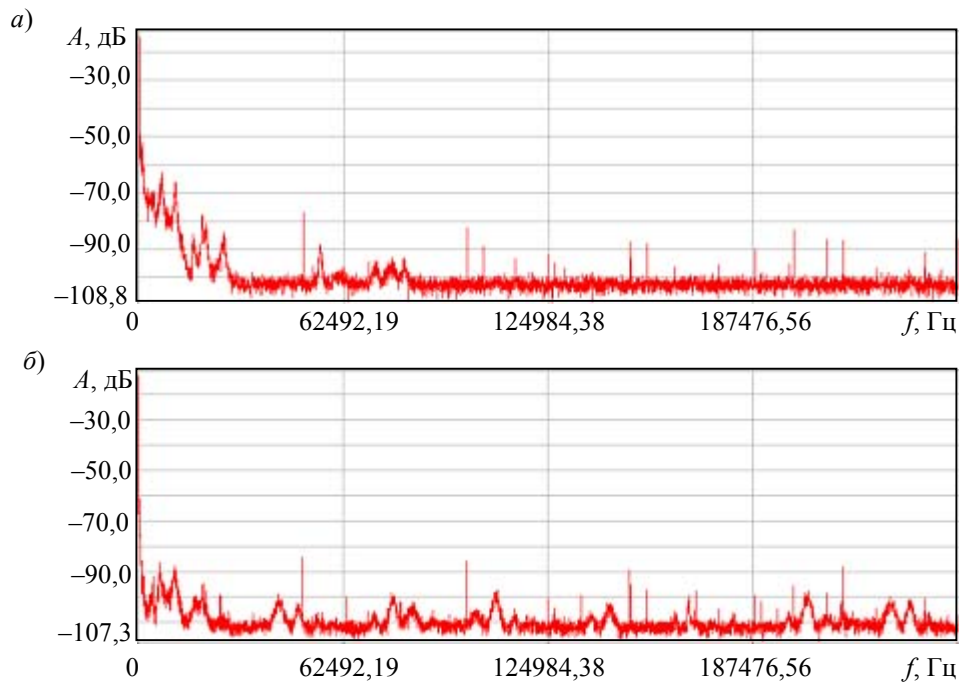


Рис. 1. Спектры измеренных ТАС:

а — „нормальные“ трибоповерхности, б — „изношенные“ трибоповерхности

Скорость относительного перемещения поверхностей при трении либо рассчитывается, либо измеряется. Так, при фиксированном линейном движении в кривошипно-ползунном механизме, которое можно считать равноскоростным, необходимо учитывать пропорциональные коэффициенты, позволяющие выделить диапазон частот, где в явном виде обычно проявляются волнистость и шероховатость поверхности.

Расчет базируется на следующих формулах:

$$f_w = v_{cp} / S_w ; f_m = v_{cp} / S_m ,$$

где f_w , f_m — средние частоты следящих фильтров для линейно взаимодействующих поверхностей; S_w — средний шаг волнистости, мм; S_m — средний шаг неровности профиля, мм; v_{cp} — средняя скорость относительного движения контактирующих поверхностей, мм/с.

Значения S_w и S_m задаются для эталонной поверхности известного класса точности [3].

В рассматриваемых диапазонах частот проявляются также микроупругие свойства поверхностей трения (например, микротвердость).

Автоматизированную виртуальную систему обеспечения надежности кинопоказа удобно реализовать как подсистему рассматриваемого технического комплекса. Процесс диагностирования оборудования целесообразно осуществлять по двум сигналам:

— сигналу с датчика температуры, которая измеряется постоянно, что обеспечивает возможность определения исправности или неисправности системы;

— единому акустическому сигналу (вибросигналу и ТАС), измеряемому с некоторой периодичностью на механических узлах: вентиляторах, приводах блоков считывания информации, управления микрзеркалами и др.

Реализация автоматизированной подсистемы базируется на принципах, общих для современных средств контроля. Сигналы от первичных преобразователей через соответствующие модули сбора данных и DSP-процессоры (первичное нормирование, согласование, преобразование информации в соответствии с используемыми стандартами) поступают в компьютерный блок (микроконтроллер или персональный компьютер). Функциональность подсистемы реализована посредством системы специального программного обеспечения компьютерного блока („виртуального прибора“).

Принцип работы цифрового анализатора „виртуального прибора“ (рис. 2) основан, помимо обычных процедур сбора данных, спектрального анализа, „следающей“ фильтрации, на использовании нейросетевых (НС) алгоритмов.

НС-алгоритмы классификации получаемой информации являются альтернативой вероятностным методам, так как могут применяться для анализа данных в режиме реального времени. Основу каждой нейронной сети составляют однотипные элементы — нейроны. Текущее состояние j -го нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$s_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} + b_j; \quad j = 1, \dots, m,$$

где x_i — входные сигналы; w_{ij} — весовые коэффициенты; b_j — смещение; m — число нейронов; n — число входов нейрона.

Выходное значение нейрона есть функция его состояния:

$$y_j = g(s_j).$$

Нелинейная функция g называется активационной или передаточной и может иметь различный вид. Наиболее распространенной является логистическая функция или сигмоид (т.е. функция S-образного вида):

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}},$$

откуда следует, что выходное значение нейрона находится в диапазоне $[0,1]$. Нейрон полностью описывается своими весами и передаточной функцией.

Нейросети также можно классифицировать по числу слоев. Задачи, решаемые НС, сводятся к классификации входных сигналов, принадлежащих n -мерному гиперпространству. Теоретически число слоев и число нейронов в каждом слое может быть произвольным. Задавшись определенной структурой НС, необходимо найти оптимальные значения всех переменных весовых коэффициентов. Этот этап называется обучением НС.

Неуправляемое обучение сетей осуществляется путем саморегулирования на основе анализа входных данных. Такие сети находят закономерности в данных по мере их поступления и могут автоматически находить принципы классификации.

Одним из малоизученных вопросов является построение специализированных сетей, а также использование априорной информации и инвариантов НС. Так как режимы движения исследуемого объекта изменяются, то соответствующим образом меняются и его информационные характеристики.

Для того чтобы создать систему распознавания объекта, учитывающую явления такого рода, необходимо принимать во внимание диапазон трансформаций наблюдаемого сигнала. Соответственно основным требованием при распознавании объектов является создание такого классификатора, который инвариантен к этим трансформациям.

Существуют несколько способов обеспечения инвариантности нейронной сети к подобным трансформациям. Рассмотрим метод, основанный на предположении о том, что из

входного сигнала можно выделить составляющие (признаки), которые описывают самую существенную информацию, содержащуюся в наборе данных, и при этом инвариантны к трансформациям входного сигнала (см. рис. 2). Использование пространства инвариантных признаков имеет три важных преимущества: 1) уменьшается количество входных признаков, 2) снижаются требования к структуре сети, 3) гарантируется инвариантность всех объектов по отношению к известным трансформациям [4].

Предлагается использовать гетеродирование спектральных характеристик. Эту задачу решает препроцессор (см. рис. 2), обеспечивающий инвариантность признаков по отношению к скорости и режимам движения поверхности. Постпроцессор используется для диагностирования дефектов или прогнозирования технического состояния объекта.

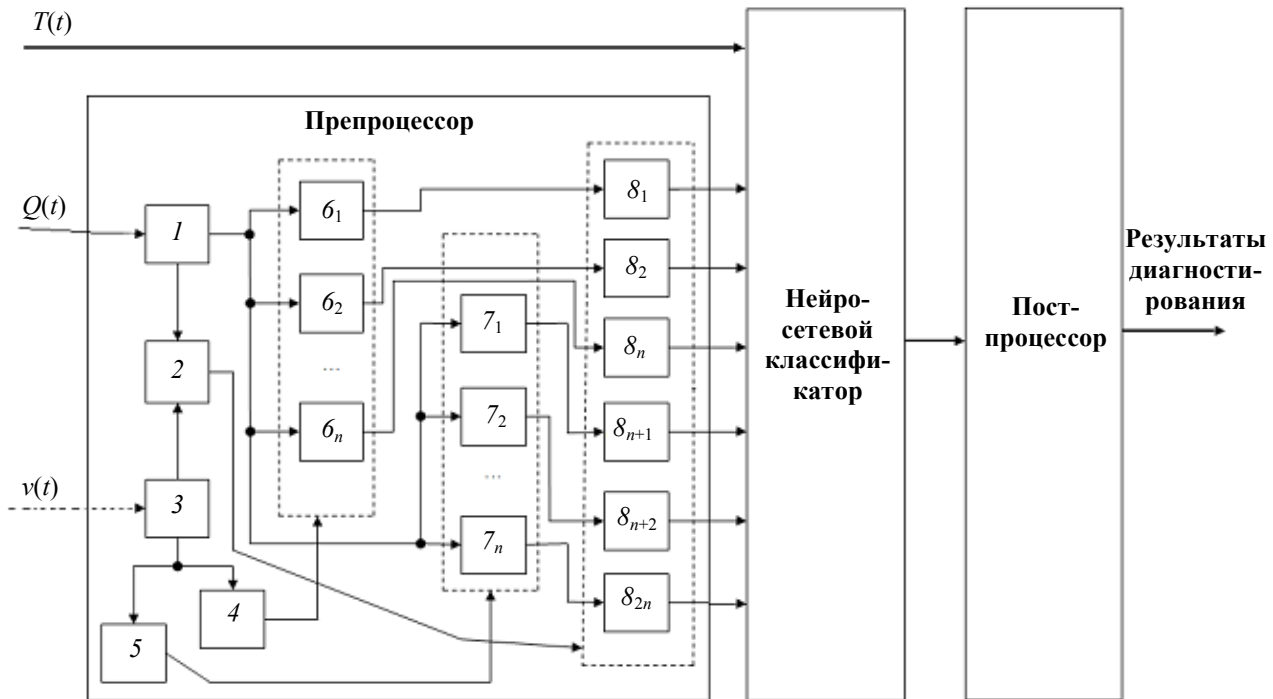


Рис. 2. Структура цифрового анализатора

Цифровой анализатор, представленный на рис. 2, позволяет осуществлять диагностирование оборудования цифрового кинопоказа одновременно по сигналам $T(t)$ с датчика температуры и ТАС. С первичных преобразователей сигнал $T(t)$ попадает непосредственно на нейросетевой классификатор, ТАС $Q(t)$ поступает на переключатель режимов 1. В режиме „Диагностика“ сигнал поступает на системы следящих фильтров „волнистость“ $b_1 \dots b_n$ и „шероховатость“ $7_1 \dots 7_n$, настраиваемых на информационные частоты. Амплитуды ТАС в блоках умножения $\delta_1 \dots \delta_{2n}$ умножаются на коэффициенты регрессии, определяемые в блоке 2 и в режиме „Обучение“. В НС-классификаторе осуществляется обработка значений, поступающих с блоков $\delta_1 \dots \delta_{2n}$. Постпроцессор определяет принадлежность объекта контроля к эталонным техническим диагнозам и выдает результат диагностирования. Скорость движения поверхностей $v_{ср}$ регистрируется (или рассчитывается, если движение возможно смоделировать) в блоке задатчика скорости 3. В блоках слежения частот „волнистости“ 4 и „шероховатости“ 5 формируются величины полос пропускания для перестраиваемых следящих систем фильтров $b_1 \dots b_n, 7_1 \dots 7_n$.

В результате на основе рассмотренной структуры реализуется подсистема, позволяющая идентифицировать техническое состояние оборудования для цифрового кинопоказа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. М.: Мир, 1982. С. 92—93.
2. Колубаев А. В., Колубаев Е. А., Вагин И. Н., Сизова О. В. Генерация звука при трении скольжении // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31, вып. 19. С. 6—13.
3. Явленский К. Н., Явленский А. К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. Л.: Машиностроение, 1983. 239с.
4. Barnard E., Casasent D. Invariance and neural nets // IEEE Transact. on Neural Networks. 1991. Vol. 2. P. 498—508.

Рекомендована кафедрой
физики и оптики

Поступила в редакцию
14.01.08 г.

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.7.08,681.78

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ РАДИОТЕЛЕСКОПА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА РТ-70 (СУФФА) / Ю. Н. АРТЕМЕНКО, И. А. КОНЯХИН, Э. Д. ПАНКОВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 5—10.

Анализируются принципы построения комплекса оптико-электронных систем измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона длин волн РТ-70 (Суффа). Описывается трехуровневая неоднородная структура системы контроля положения элементов РТ-70: компоненты системы третьего уровня размещены на опорном кольце в вершине основного зеркала и включают две отдельные подсистемы: измерения координат точек поверхности основного зеркала и измерения положения контррефлектора, каждая из которых состоит из измерительных каналов, реализующих метод „угловой засечки“; система второго уровня определяет угловое положение опорного кольца (промежуточной базы) относительно трехосной гиросtabilизированной платформы; система первого уровня обеспечивает периодическую калибровку датчиков гиросtabilизированной платформы по азимуту. Для реализации систем первого и второго уровня используются оптико-электронные автоколлимационные угломеры.

Приведены результаты компьютерного и физического моделирования.

Ил. 3, библиогр. 6.

УДК 681.7.08

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СКРУЧИВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАМОРФИРОВАНИЯ / И. А. КОНЯХИН, А. Д. МЕРСОН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 10—14.

Рассматриваются принципы работы автоколлимационных систем измерения угла скручивания на основе анаморфирования. Разработана детерминированная математическая модель двухклиновой анаморфотной системы, рассмотрены два варианта ее построения. По результатам исследований показано существенное влияние коллимационных поворотов относительно оси, перпендикулярной плоскости главного сечения клиньев, на коэффициент анаморфирования и телескопичность анаморфотной системы. Сформулированы рекомендации по выбору показателя преломления стекла клиньев, составляющих анаморфотную систему.

Ил. 3, библиогр. 3.

УДК 681.7.08,681.78

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО ВИНЬЕТИРОВАНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ / А. М. ВОРОНА, И. А. КОНЯХИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 14—18.

Исследуется процесс регулярного виньетирования отраженного пучка с использованием оптико-электронной авторефлексионной углоизмерительной системы.

Получена теоретическая зависимость значения составляющей погрешности измерения, обусловленной регулярным виньетированием, от параметров оптических элементов авторефлексионной системы. Приведены результаты эксперимента. Практическое использование теоретической зависимости для коррекции статической характеристики макета авторефлексионной системы позволило уменьшить погрешность измерения с 12 до 2,3".

Ил. 2, библиогр. 3.

УДК 536.8:621.384

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ОТНОСИТЕЛЬНО РЕПЕРНЫХ МЕТОК / А. М. АЛЕЕВ, К. Г. АРАКАНЦЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, К. Б. ЕРШОВА, В. В. ПЕТУХОВСКИЙ, С. В. ПЕТУХОВСКИЙ, А. Е. ХОЛИН, // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 18—22.

Исследуется оптико-электронная система контроля положения реперных меток (ОЭС КПРМ), предназначенная для измерения просадок рельсовой нити в вертикальной плоскости, определения взаимного положения рельсовых нитей по высоте (поперечный уровень), положения пути в плане (рихтовка) и определения длины пройденного пути относительно системы инфракрасных реперных меток, расположенных на опорах контактной сети и задающих проектное положение железнодорожного полотна.

Рассматриваются особенности построения и выбора параметров ОЭС КПРМ, разработанной по внутрибазовой схеме. Показано, что для уменьшения систематической погрешности необходимо уточнить геометрические параметры системы, а также учесть влияние толщины защитных стекол используемых матричных фотоприемников. Приведены результаты экспериментов, согласно которым на среднее квадратическое значение погрешности измерений железнодорожного полотна существенное влияние оказывает режим работы фотоприемных модулей системы. Использование схемы с единым измерительным полем позволит существенно снизить данную составляющую погрешности.

Ил. 3, библиогр. 8.

УДК 681.786

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СООСНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОАГРЕГАТОВ / А. Г. АНИСИМОВ, А. А. ГОРБАЧЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, А. В. ПАНТЮШИН // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 22—26.

Рассматривается оптико-электронная система контроля соосности (ОЭС КС) элементов крупногабаритных турбогенераторов. Приводятся основные соотношения для реализации измерительной системы и методика пересчета измерительных баз.

Приводятся результаты экспериментального исследования точности ОЭС КС на специализированном стенде. Полученные значения в горизонтальной плоскости незначительно превосходят заданные, в вертикальной плоскости точность соблюдена. Показано, что использование авторефлексионных оптико-электронных систем контроля соосности, и ОЭС КС в частности, обеспечивает контроль пространственного положения объектов с необходимой точностью.

Ил. 3, библиогр. 4.

УДК 681.7.08, 681.78

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНОЙ / В. Л. МУСЯКОВ, Э. Д. ПАНКОВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, Е. М. БОГАТИНСКИЙ, П. В. ЯКОВЛЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 27—31.

Исследуются оптико-электронные системы контроля пространственного положения объектов, основанные на принципах оптической равносигнальной зоны. Анализируются пути совершенствования систем на основе полупроводниковых излучателей инфракрасного диапазона, при этом выделены два направления:

— формирование элементов схемы с использованием современных электронных и оптических компонентов, позволяющих оптимизировать выполняемые ими преобразования сигналов;

— определение принципов и методов ослабления влияния факторов, снижающих технические характеристики систем, на основе теоретического анализа физических явлений и экспериментального исследования их воздействия.

Отмечено, что в настоящее время для ослабления влияния указанных факторов перспективен полихроматический метод (метод спектральных разностей).

Ил. 2, библиогр. 8.

УДК 536.8: 621.384

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СЕПАРИРОВАНИЯ АЛМАЗОВ ПО КАТЕГОРИЯМ В ЦВЕТОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ RGB / Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, А. Н. ЧЕРТОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 32—36.

Рассматриваются возможности выделения определенного цветового оттенка на поле изображения алмаза и исследуются сигналы в цветовых каналах сепаратора для различных категорий алмазов.

Показано, что каждая категория алмазов имеет присущие только ей гистограммы распределения цветов в каждом цветовом канале, хотя формы суммарных гистограмм распределений могут быть похожими. Решением проблемы является перенос части алгоритма обработки кадров на плату многоэлементного фотоприемного устройства, что позволит компенсировать потери в быстродействии.

В качестве примера использовались фотографии цветового ряда категорий качества для коричневых алмазов и фотографии алмазов в оболочке и технических алмазов двух категорий.

Ил. 3, табл. 1, библиогр. 6.

УДК 681.78.01

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОДИАПАЗОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ / И. П. ТОРШИНА // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 37—40.

Рассматриваются особенности компьютерного моделирования многодиапазонных (многоспектральных) оптико-электронных систем, основанного на использовании обобщенной компьютерной модели (КМ) ОЭС. Предложен принцип формирования КМ многодиапазонных ОЭС посредством использования операторов, содержащихся в модуле „Коррекция обобщенной компьютерной модели ОЭС“, с включением коррекции баз данных КМ ОЭС и применением ряда допущений при моделировании системы.

Ил. 2, библиогр. 11.

УДК 621.384

ОПТИЧЕСКОЕ СЧИТЫВАНИЕ — ОДИН ИЗ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ (ПО МАТЕРИАЛАМ ЗАРУБЕЖНОЙ ПЕЧАТИ) / В. В. ТАРАСОВ, Ю. Г. ЯКУШЕНКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 41—46.

Для улучшения пороговой чувствительности микроболометрических многоэлементных приемников излучения чувствительных элементов предлагается использовать оптические схемы считывания сигналов с этих элементов: схему, основанную на применении сегнетоэлектрического кристалла, и схему с матрицей тонкопленочных перестраиваемых фильтров-резонаторов, работающих в ближневолновом инфракрасном диапазоне длин волн.

Ил. 5, библиогр. 5.

УДК 681.785:536.5

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА СВЕРХРАЗРЕШЕНИЯ ПРИ КОМПЛЕКСИРОВАНИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО И ИК-ДИАПАЗОНОВ НА QWIP-МАТРИЦАХ / Г. С. МЕЛЬНИКОВ, В. М. САМКОВ, Ю. И. СОЛДАТОВ, Н. А. КЛИШО, Э. Д. ПАНКОВ, В. В. КОРОТАЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 47—54.

Рассмотрены основные тенденции построения нового класса квантовых матричных приемников излучения — QWIP-матриц. Описан метод построения комплексированной системы с одной приемной матрицей с разнесением областей ее чувствительности на ИК- и терагерцовый (ТГц) диапазоны с разделением по потоку излучения. Предъявление изображений, формируемых в ИК- и ТГц-диапазонах, на совмещенном мониторе предлагается проводить в полукадровом считывании с решением задачи формирования сверхразрешения в дальнем диапазоне чувствительности QWIP-матрицы.

Ил. 6, библиогр. 20.

УДК 621.383

ОТКРЫТАЯ И ВЗАИМОЗАВИСИМАЯ АРХИТЕКТУРА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ / Р. М. АЛЕЕВ, Д. Р. АЛЕЕВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 54—59.

Обсуждаются проблемы развития тепловизионного приборостроения. Показано, что при существующей элементной и технологической базе, чтобы выполнить требования технического задания, разработчик вынужден создавать тепловизионные приборы (ТВП) с взаимозависимой архитектурой (интегрированной конструкции). В условиях конкуренции и изменяющихся требований заказчиков необходимо проводить новую разработку, что связано со значительными финансово-временными затратами, единственным способом снижения которых является переход к открытой модульной архитектуре (конструкции) ТВП.

Сформулированы принципы разработки ТВП с открытой модульной архитектурой, обладающей максимальным модернизационным потенциалом.

Ил. 3, библиогр. 1.

УДК 681.785.574

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПРИЕМНИКОВ В ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИИ / Г. Г. ГОРБУНОВ, И. Н. СИВЯКОВ, О. К. ТАГАНОВ, В. Б. ШИЛОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 60—65.

Исследуются особенности, которые приобретает интерференционная спектральная аппаратура типа фурье-спектрометра в случае применения многоэлементного фотоприемника. Учтены ошибки определения нулевой разности хода интерферограммы, вносимые электронным трактом аппаратуры и различными положениями ячеек фотоприемника. Перечислены преимущества фурье-спектрометров, использующих многоэлементные приемники.

Ил. 3, библиогр. 6.

УДК 681.785.574

КАЛИБРОВКА ШКАЛЫ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ РАДИОМЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА / Г. Г. ГОРБУНОВ, А. П. ЛАППО, О. К. ТАГАНОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 66—68.

Описан опыт применения фурье-спектрометрической аппаратуры в качестве метрологического средства калибровки шкалы пропускания оптико-электронной аппаратуры.

По результатам исследований с использованием лабораторного фурье-спектрометра, разработанного в ГОИ им. С. И. Вавилова, показано, что значительная величина отношения сигнал/шум, точная привязка по шкале длин волн, абсолютное заполнение входного зрачка радиометра исследуемым излучением, быстрота получения результатов и их точность позволяют сделать вывод о преимуществе использования фурье-спектрометра для измерения спектральных коэффициентов пропускания оптико-электронной аппаратуры, например фильтровых радиометров, в том числе, в целях калибровки шкалы длин волн.

Ил. 2, библиогр. 3.

УДК 775+621.39+621.85

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ В ЦИФРОВОМ КИНЕМАТОГРАФЕ / А. А. БЕЛОУСОВ, А. К. ЯВЛЕНСКИЙ, А. А. СЕВАСТЬЯНОВ, А. С. ВОЛКОВ, К. А. ЖАВОРОНКОВ // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 69—73.

Рассматриваются вопросы диагностики в цифровом кинематографе. Предложен способ идентификации технического состояния исполнительных узлов оборудования, основанный на регистрации трибоакустического сигнала. Внимание уделено созданию автоматизированной виртуальной подсистемы обеспечения надежности кинопоказа, которая использует в качестве информационных сигнал с датчика температуры и трибоакустический сигнал. В структуре анализатора подсистемы применены нейросетевые алгоритмы.

Ил. 2, библиогр. 4.