



Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая
академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОЗДАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

Бакланов А.И., Ключников М.В.

Возможности повышения характеристик космического комплекса КА «Аист-2Д».....

3

**Бакланов А.И., Герасименко В.В., Ключников М.В.,
Гринько А.П., Малахов И.А., Жевако В.В., Халус Д.В.,
Радин Е.А., Афонин А.Н., Мастюгин А.С., Невоструев К.В.,
Алаторцев В.Л., Костенков П.А., Дюльдин Р.С.,
Бунтов Г.В., Разживалов П.Н., Тюрин А.А., Хватов А.В.,
Матвеев Р.В., Логвин А.В., Сафронов Д.Н., Кузменко А.А.**
Комплекс аппаратуры наблюдения высокого разрешения
для малого космического аппарата

8

Афонин А.Н., Бакланов А.И., Блинов В.Д., Забиякин А.С.
КШМСА и опыт ее эксплуатации в составе КА
«Ресурс-П» №1 и №2

15

Радин Е.А., Мастюгин А.М.

Оптико-электронный преобразователь комплекса целевой
аппаратуры малого космического аппарата

20

Афонин А.Н., Разживалов И.Н.

Особенности проектирования блоков ОЭП для широко-
захватной многоспектральной аппаратуры среднего разре-
шения

23

Ключников М.В.

Оценка характеристик оптико-электронных камер ДЗЗ
высокого разрешения на основе строчно-кадровых и ВЗН
матриц ПЗС

26

**Квитка В.Е., Ключников М.В., Князев А.Н.,
Алаторцев В.Л., Гущин Д.М.**

Разработка и исследование макетного гиперспектрометра
на основе «клинового» светофильтра

31

Абрамов А.И., Иванов Б.Б., Старкин Ю.А., Тарасов П.А.

Основные тенденции развития датчиков лазерного
излучения

36

Бокшанский В.Б.

Оптико-электронные системы ЦНИИ «Циклон»

41

Чунарев Д.А., Давыдова Л.А.

Многоканальные приборы

51

ИННОВАЦИИ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Карпов В.В., Чишко В.Ф., Петренко В.И., Семенов
В.И., Бородин Д.В., Осипов Ю.В., Васильев В.В.**

Спектральные характеристики фотодиодов КМОП матрич-
ного фотоприемника формата 256x256 элементов

55



СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

Карандин А.В., Лаврентьев А.С., Меренков И.В., Пинчук В.А. Алгоритм обнаружения малоразмерных объектов на сложных фонах	58
Вельтищева В.В., Большакова Т.А. Проблемы импортозамещения на примере зеркальных угловых отражателей для инфракрасных фурье-спектрометров	62
Семенов П.А. Фазовая синхронизация в многоканальных лазерных системах с использованием итерационных алгоритмов обработки изображений	68
Осипович И.Р. Измерение функции концентрации энергии объективов с помощью автоматизированных средств контроля качества изображения	74
Артёмов А.Д. Двухкоординатный цифровой автоколлиматор	78
Алымов О.В., Лобанова Е.Г., Минкин В.А., Татаурщиков С.С. Создание отечественной электронной компонентной базы (фотоприемников УФ, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов) для построения современных телевизионных камер и устройств	81
ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ	
Ширипов В.Я., Хохлов Е.А., Жавнерко Г.К. Технологические комплексы последнего поколения для формирования оптических структур от компании «Изовак» ...	84
Волохов И.В. Оборудование для исследования свойств тонких пленок с использованием эллипсометрии	91
ИНФОРМАЦИЯ	
Волосатова Т.М., Чичварин Н.В. Фонетика и тайнопись	98
Рунге В.Ф., Титов Е.И. 50 лет отделу дизайна Красногорского завода имени С.А.Зверева	111
Памяти Томаля Владимира Степановича	123
К юбилею Мирумянца Сурена Осиповича	124

СОЗДАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ХАРАКТЕРСТИК КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КА «АИСТ-2Д»

БАКЛАНОВ А.И., КЛЮШНИКОВ М.В.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru, bai@mail.ru, klyushnikov_mv@mail.ru

Рассмотрены возможности модернизации КА «Аист-2» и его целевой аппаратуры в направлении повышения разрешающей способности. Рассмотрены варианты изменения высоты орбиты, уменьшения размера пикселя, увеличения фокусного расстояния и диаметра оптической системы.

Ключевые слова: дистанционно зондирование земли, высокое разрешение, оптико-электронная камера, оптическая система, ВЗН матрица, разрешающая способность.

В настоящее время АО «РКЦ «Прогресс» завершает изготовление КА «Аист-2». КА «Аист-2» с ОЭА «Аврора» имеет следующие характеристики:

- высота орбиты – 490 км,
- проекция пикселя – 1,47 м
- полоса захвата – 39,7 км,
- фокусное расстояние объектива – 2000 мм,
- относительное отверстие объектива – 1/5,7,
- размер элемента – 6 мкм,
- количество элементов в строке – 27000,
- линейное поле зрения – 162 мм.

Съемка осуществляется без тангажного замедления.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для зачетных условий¹ приведена на рис. 1.

Направлениями модернизации КА «Аист-2» в части увеличения разрешающей способности могут быть:

- уменьшение высоты орбиты,
- уменьшение размера элемента,

- увеличение фокусного расстояния объектива.

Каждое из этих направлений имеет свои преимущества и недостатки. Они приведены в табл. 1.

Рассмотрим каждое из этих направлений более подробно.

В варианте уменьшения высоты орбиты рассмотрим случаи исходной высоты орбиты, высот 500, 400 и 300 км.

Параметры КА «Аист-2» в этих случаях приведены в табл. 2.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных высот орбиты приведена на рис. 2.

Таким образом, видно, что уменьшение высоты орбиты является перспективным способом увеличения разрешающей способности. В самом «экстремальном» случае возможно достижение разрешающей способности на уровне, близком к 1 метру при сохранении полосы захвата на уровне лучше, чем у

¹ Контраст мира – 0,06, максимальное альbedo мира – 0,17, наблюдение в надир.

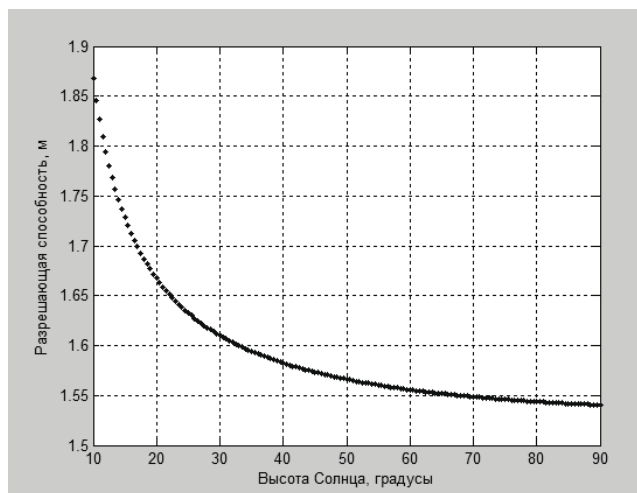


Рисунок 1.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом

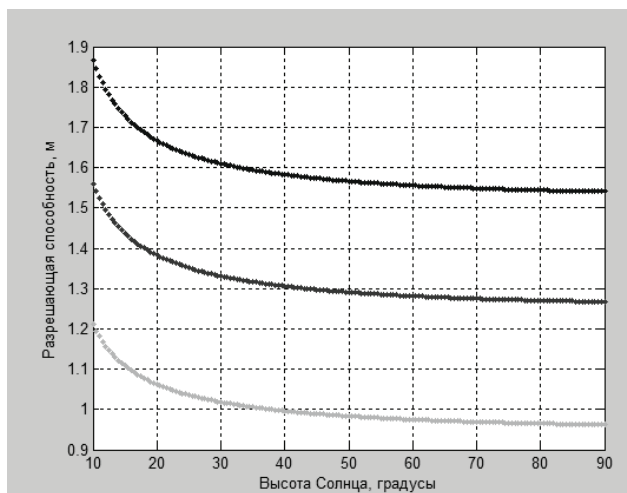


Рисунок 2.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных высот орбиты

Таблица 1

Направление модернизации	Преимущества	Недостатки
Уменьшение высоты орбиты	- Минимальный объем доработок КА, - Минимальная стоимость и сроки работ	- Уменьшение полосы обзора - Уменьшение полосы захвата - Уменьшение производительности из-за более коротких сеансов связи с КА
Уменьшение размера элемента	- Сохранение полосы обзора, - Сохранение полосы захвата	- Необходимость разработки нового фотоприемника и СППИ - Уменьшение зарядовой емкости фотоприемника и его динамического диапазона - Уменьшение КПК на рабочей пространственной частоте
Увеличение фокусного расстояния объектива	Сохранение полосы обзора	- Необходимость модернизации или разработки нового объектива - Увеличение массы ОЭА - Уменьшение полосы захвата

Таблица 2

Высота орбиты	490 км	400 км	300 км
Проекция пикселя, м	1,47	1,2	0,9
Полоса захвата, км	39,7	32,3	24,3
Полоса обзора, км	577	461	346
Относительная периодичность наблюдения	1	0.8	0.6

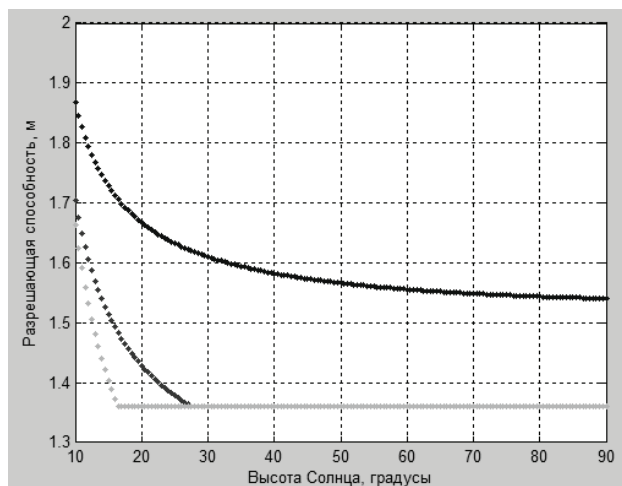


Рисунок 3.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных размеров пикселя

большинства космических систем высокого разрешения. Ухудшение характеристик по полосе обзора и производительности могут быть скомпенсированы за счет увеличения числа КА. С учетом минимальной стоимости такой модернизации увеличение числа КА может быть оправдано с экономической точки зрения.

Вариант уменьшения размера элемента ограничен возможностями отечественной микроэлектронной промышленности. В настоящее время подтверждается возможность изготовления фотоприемников с размером элемента 4,5 мкм. Возможность изготовления фотоприемников с размером элемента 3 мкм отечественными производителями не подтверждается, однако в принципе (при условии модернизации

технологической линейки в НПП «ЭЛАР») такая возможность имеется.

Замена фотоприемников на фотоприемники с меньшим размером элемента потребует разработки СППИ с увеличенной производительностью – в 1,7 раза при переходе на размер 4,5 мкм и в 4 раза при переходе на размер 3 мкм, с соответствующим увеличением массы опто-электронных преобразователей, емкости и массы запоминающего устройства и пропускной способности радиолинии.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных размеров пикселя приведена на рис. 3.

Видно, что при высоте Солнца 100 переход на меньший размер практически не улучшает разрешающую способность. Это объясняется тем, что при малых высотах Солнца над горизонтом фотоприемники с малым размером пикселя проигрывают из-за уменьшенной чувствительности и малого динамического диапазона, как это было неоднократно показано в материалах НПП «ОПТЭК». в области больших высот Солнца, в данном случае, преимущество фотоприемником минимально, поскольку их частота Найквиста лежит за пределами граничной пространственной частоты оптической системы. Так, для высот Солнца, близких к 900 переход на меньший размер дает прирост разрешающей способности на уровне 12%, что связано с влиянием частоты «среза» оптической системы.

Направление увеличения фокусного расстояния объектива должно рассматриваться в двух вариантах – с сохранением диаметра

Таблица 3

Объектив	F=2000		F=2500		F=3000		F=4000	
Диаметр, мм	350	350	437	350	525	350	700	
Относительное отверстие	1/5,7	1/7,1	1/5,7	1/8,5	1/5,7	1/14	1/5,7	
Проекция пикселя, м	1,47	1,17	1,17	0,98	0,98	0,73	0,73	
Полоса захвата, км	39,7	31,7	31,7	26,5	26,5	14,8	14,8	
Относительная масса*	1	1	1,94	1	3,37	1	8	

* Принято допущение, что масса пропорциональна кубу диаметра объектива

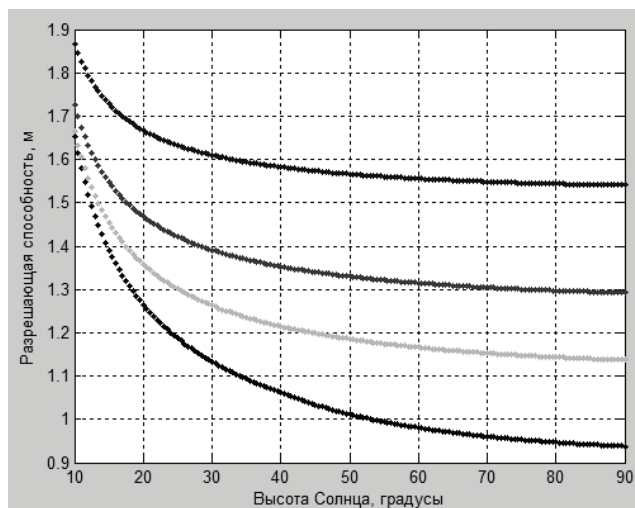


Рисунок 4.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном диаметре объектива (350 мм)

объектива и с сохранением относительного отверстия. Вариант с сохранением диаметра объектива обеспечивает минимизацию прироста массы ОЭА, но уменьшает граничную пространственную частоту оптической системы. Вариант с сохранением относительного отверстия обеспечивает полное использование преимуществ увеличенного фокусного расстояния, но увеличивает массу ОЭП. Примем варианты увеличения фокусного расстояния до 2500, 3000 и 4000 мм. Во всех случаях предположим, что линейное поле зрения объектива сохраняется. Данное допущение является консервативным, так как при увеличении фокусного расстояния линейное поле зрения объектива, как правило, увели-

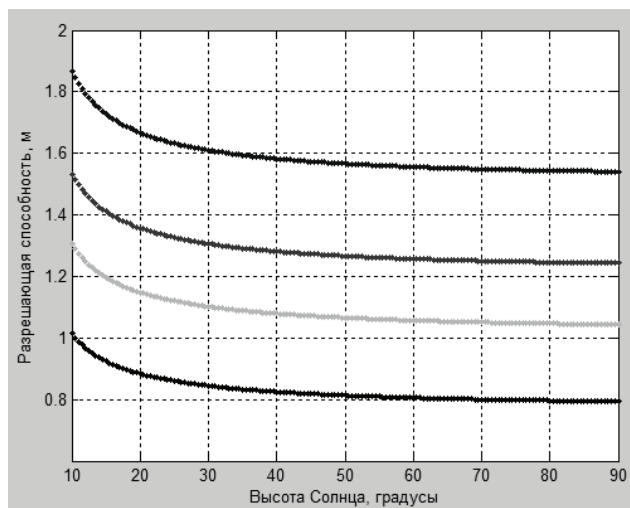


Рисунок 5.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном относительном отверстии (1/5,7)

чивается, хотя и не пропорционально приросту фокусного расстояния.

Параметры КА «Аист-2» в этих случаях приведены в табл. 3.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном диаметре объектива (350 мм) приведена на рис. 4. Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном относительном отверстии (1/5,7) приведена на рис. 5.

Из рис. 4 и 5 видно, что вариант с сохранением диаметра объектива 250 мм приемлем только до фокусного расстояния 2500 мм. И

Таблица 4

Вариант	1	2	3	4	5	6
Высота орбиты, км	400	400	400	300	300	300
Фокусное расстояние, мм	2500	3000	4000	2500	3000	4000
Проекция пикселя, м	0,96	0,8	0,6	0,72	0,6	0,45
Полоса захвата, км	26	21,6	16,2	19,4	16,2	12,1
Полоса обзора, км	461	461	461	346	346	346

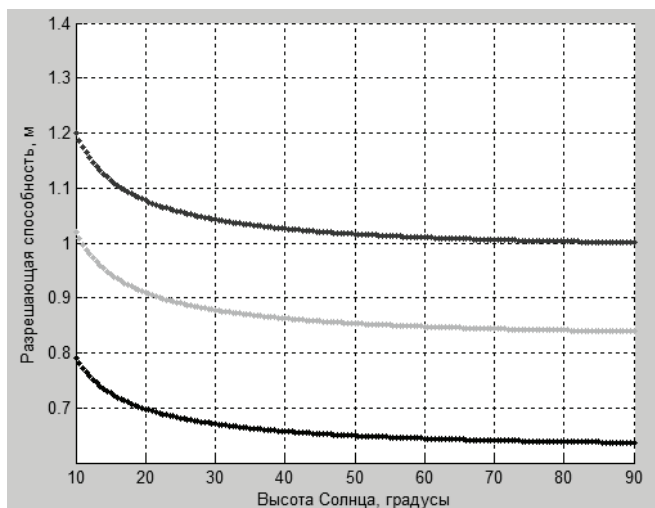


Рисунок 6.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном относительном отверстии для высоты орбиты 400 км

даже в этом варианте разрешающая способность увеличивается только на 10%, а при сохранении относительного отверстия при том же фокусном расстоянии 2500 мм прирост разрешающей способности оказывается уже равным 20%. Также характерно, что при больших фокусных расстояниях при сохранении диаметра объектива при малых высотах солнца разрешающая способность даже ухудшается, несмотря на уменьшение проекции пикселя. Это связано с чрезмерным уменьшением относительного отверстия, что, как и в случае с уменьшением размера пикселя, приводит к сильному уменьшению величины сигнала и отношения «сигнал/шум».

Таким образом, увеличение фокусного расстояния должно сопровождаться увеличением диаметра объектива с целью сохранения относительного отверстия на уровне $1/5,6$ – $1/7$. Для достижения высокого разрешения увеличение фокусного расстояния должно быть максимально возможным. В качестве ограничения роста фокусного расстояния должно выступать соображение об ограничении массы ОЭА.

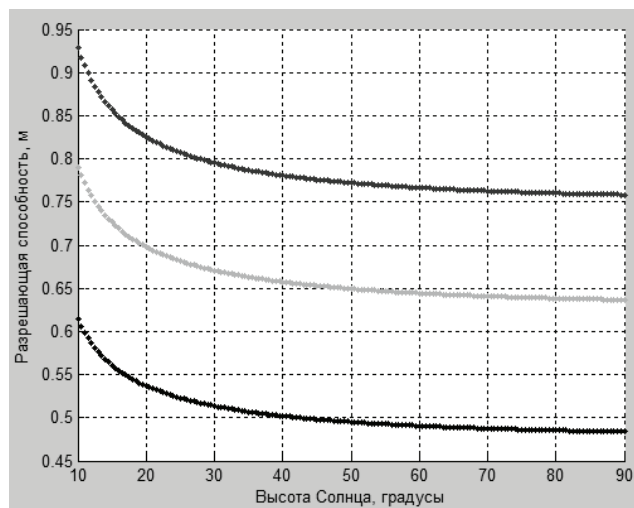


Рисунок 7.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном относительном отверстии для высоты орбиты 300 км

Сочетание фокусных расстояний 2500 – 4000 мм и снижения высоты орбиты до 300–400 км позволяет достичь высоких пространственных разрешений. Такие варианты ОЭА приведены в табл. 4.

Зависимость разрешающей способности от высоты Солнца над горизонтом для различных фокусных расстояний при постоянном относительном отверстии для высоты орбиты 400 км и 300 км приведена соответственно на рис. 6 и 7.

Таким образом, существует возможность модернизации КА «Аист-2» с доведением разрешающей способности до уровня вплоть до 0,5 м. При этом по возможностям съемки в панхроматическом канале модернизированный КА «Аист-2» приблизится к самым совершенным зарубежным КА типа WorldView-1,2 и GeoEye-1. Это потребует разработки новой оптической системы с фокусным расстоянием 4000 мм и диаметром 0,5–0,7 м. Характеристики блоков ОЭП КО-ЭЦА позволяют обеспечить съемку с данной разрешающей способностью.

КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

БАКЛАНОВ А.И., ГЕРАСИМЕНКО В.В.^{**}, КЛЮШНИКОВ М.В., ГРИНЬКО А.П., МАЛАХОВ И.А., ЖЕВАКО В.В., ХАЛУС Д.В., РАДИН Е.А., АФОНИН А.Н., МАСТЮГИН А.С., НЕВОСТРУЕВ К.В., АЛАТОРЦЕВ В.Л., КОСТЕНКОВ П.А., ДЮЛЬДИН Р.С., БУНТОВ Г.В., РАЗЖИВАЛОВ П.Н., ТЮРИН А.А., ХВАТОВ А.В., МАТВЕЕВ Р.В., ЛОГВИН А.В., САФРОНОВ Д.Н.^{*}, КУЗМЕНКО А.А.^{*}

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

^{*}ЗАО НПП «САИТ»

^{**}ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: optecs@mail.ru

Описан комплекс оптико-электронной целевой аппаратуры наблюдения для МКА «Аист-2Д». Комплекс включает в себя панхроматический и мультиспектральный оптико-электронные преобразователи, инфракрасную камеру теплового диапазона на основе микроболометрических матриц, запоминающее устройство и бортовую радиолинию. Аппаратура позволяет осуществлять съёмки поверхности Земли с высоким разрешением в видимой области спектра. Инфракрасная камера предназначена в первую очередь для отработки новых технологий в области приборостроения для ДЗЗ. Отличительной особенностью КОЭЦА являются компактность и небольшие весовые характеристики при высоком разрешении и большой полосе захвата

Ключевые слова: фото-приёмные блоки, оптико-электронные преобразователи, инфракрасная камера, бортовое запоминающее устройство, бортовая радиолиния.

Создаваемый в АО «РКЦ «Прогресс» МКА «Аист-2Д» предоставляет удобную платформу для отработки новых идей конструктивно технологических решений и создания задела для будущих перспективных систем. Проект осуществляется, в основном молодёжным коллективом с широким участием ВУЗов. Поэтому полезная нагрузка МКА «Аист-2Д» включает в себя большое количество разнообразных научных приборов, а также оптико-электронную и радиолокационную аппаратуру для наблюдения Земли. Для наблюдения в оптическом диапазоне используется оптико-электронная аппаратура «Аврора», которая функционально использует фотоприёмные блоки оптико-электронных преобразователей из состава комплекса оптико-электронной целевой аппаратуры (КОЭЦА), создаваемого в филиале АО «РКЦ «Прогресс» - НПП

«ОПТЭКС». КОЭЦА специально создавался для использования в составе малогабаритного опытно-технологического космического аппарата демонстратора «Аист-2Д». При создании КОЭЦА и в ходе его дальнейшей опытной эксплуатации запланировано решение нескольких разноплановых конструктивных, технологических и программно-методических задач. Среди них в первую очередь необходимо отметить:

- отработку методологии проектирования и изготовления оптико-электронной аппаратуры, запоминающих устройств и бортовой радиолинии с повышенной плотностью интеграции и уменьшенными габаритами для использования в составе малогабаритного КА;
- отработку конструкции широкозахватных оптико-электронных преобразователей на основе матриц ПЗС ВЗН для малогабаритной

оптико-электронной камеры видимого диапазона высокого разрешения;

- обработку схемотехнических, конструктивных решений и методов съёмки в тепловом ИК-диапазоне с помощью микроболометрической матрицы;

- оценку достижимых параметров и условий применения микроболометрических приёмников;

- исследование возможности использования микроболометрических приёмников в системах ДЗЗ среднего и высокого разрешения,

- определение характеристик инфракрасной аппаратуры в условиях космического полёта;

- обработку методов и программ управления КОЭЦА в составе МКА;

- проведение летной сертификации блоков и устройств КОЭЦА в условиях космического пространства;

- обработку целевой аппаратуры, наземных средств управления, приёма и обработки информации и методов обработки информации ДЗЗ с высоким разрешением.

Основное назначение КОЭЦА это получение панхроматических и мультиспектральных изображений поверхности Земли высокого разрешения путем преобразования непрерывно движущегося изображения в видимом спектральном диапазоне, сформированного оптической системой «Аврора» в плоскости фотоприёмников, в цифровой электрический сигнал. Сканирование осуществляется за счёт движения космического аппарата по орбите. Кроме того входящая в состав КОЭЦА инфракрасная камера КОЭ-ИКД позволяет получать тепловые изображения поверхности Земли в спектральном диапазоне 8-14 мкм с невысоким пространственным разрешением. Аппаратура позволяет проводить цифровую обработку получаемой информации, сжатие её, хранение и передачу по скоростной радиолинии на наземные приёмные пункты.

КОЭЦА имеет несколько режимов работы и позволяет осуществлять или одновременно панхроматическую и мультиспектральную съёмку, или панхроматическую и инфракрасную съёмку, или съёмку в каждом спектральном диапазоне отдельно. Аппаратура спро-

ектирована таким образом, что обеспечивает съёмку в диапазоне высот орбиты от 350 до 700 км и при отклонениях МКА по крену до $\pm 30^\circ$. Объектив ОЭА «Аврора», используемой в составе КА «Аист-2Д» имеет фокусное расстояние 2 метра, что обеспечивает получение пространственного разрешения 1,47 метра в панхроматическом канале с круговой орбиты высотой 490 км. Полоса захвата при этом составит 39,7 км. Производительность съёмки комплексом, при однопунктной схеме приема, достигает 100 тыс. кв. километров в сутки с высоким пространственным разрешением.

Данные дистанционного зондирования получаемые КОЭЦА подойдут для решения широкого круга задач: картографии, мониторинга чрезвычайных ситуаций, гидрологии, сельского, лесного и рыбного хозяйства, составления прогнозов урожая и карт продуктивности, экологического мониторинга, обнаружения пожаров и т.п.

Сравнение характеристик оптико-электронной аппаратуры КА «Аист-2Д» с отечественными и зарубежными аналогами показано в табл. 1. Видно, что КА «Аист-2Д» приблизительно соответствует КА SPOT-6 и превосходит стальные КА аналогичного класса по разрешающей способности и полосе захвата, а также наличию ИК канала.

Характеристика оптико-электронной аппаратуры ВД и ИК диапазона приведены для высоты круговой орбиты 490 км, на которую планируется вывести КА «Аист-2Д» припутном запуске с КА «Ломоносов».

Комплекс оптико-электронной целевой аппаратуры КОЭЦА разработан в филиале «АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС». Над созданием аппаратуры трудился большой коллектив молодых специалистов предприятия при участии студентов и аспирантов Московского института электронной техники (МИЭТ).

Структурная схема КОЭЦА приведена на рис. 1. В состав КОЭЦА входят два широкоформатных оптико-электронных преобразователя высокого разрешения на основе матриц ПЗС, работающих в режиме

Таблица 1.
Сравнение характеристик некоторых КА ДЗЗ

Спутник	Страна	Год запуска	Разрешение, м			Полоса захвата, км		
			ПХ	МС	ИК	ПХ	МС	ИК
Cartosat-1	Индия	2005	2,2	----	----	26,4	----	----
Formosat-1	Тайвань	2004	2,0	8	----	24	24	----
Theos	Таиланд	2008	2,0	15	----	22	90	----
ALOS	Япония	2006	2,5	10	----	70 2 камеры	70 2 камеры	----
DubaiSat-1	ОАЭ	2009	2,5	5	----	20	20	----
AlSat-2	Алжир	2010	2,5	10	----	17,5	1,5	----
Канопус-В	Россия	2012	2,1	10,5	----	23,3	20,1	----
Nigersat-2	Нигерия	2011	2,5	5	----	20	20	----
Spot-6, 7	Франция	2012,2013	2,0 (1,5)	8	----	60 2 камеры	60 2 камеры	----
Канопус-В-ИК	Россия	2015	2,1	10,5	130	23,3	20,1	2000
Аист-2Д	Россия	2015	1,5	4,5	123	40,5	40,5	47,2

временной задержки и накопления (ВЗН), – панхроматический (ОЭП-АПХ) и мульти-спектральный (ОЭП-АМС) вместе с источниками питания (ИП-ОЭП), инфракрасная оптико-электронная камера, запоминающее устройство (БЗУ-А) и два (основной и резервный) радиопередатчика (ПРД-3) и антенна (АФУ). Объектив с фокусным расстоянием 2 м (оптико-электронной аппаратуры ОЭА «Аврора») разрабатывается ОАО КМЗ и в состав КОЭЦА не входит. Передача видеoinформации от блоков ОЭП и КОЭ-ИКД в БЗУ-А осуществляется с использованием волоконно-оптических линий связи. В комплексе отсутствует собственная подсистема управления. Управление КОЭЦА осуществляется от системы управления КА по интер-

фейсу CAN2.0, путем выдачи команд непосредственного исполнения. Также в БЗУ по интерфейсу CAN может вводиться дополнительная, например, телеметрическая или научная информация от систем КА, которая передаётся затем на Землю.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Оптико-электронные преобразователи ОЭП-АПХ и ОЭП-АМС выполнены на матрицах ПЗС ВЗН аналогичных используемым в системе приёма и преобразования информации «Сангур-1У» ОЭА «Геотон» космического аппарата «Ресурс-П».

Фоточувствительную зону панхроматического блока ОЭП образуют 18 матриц ПЗС ВЗН «Круз-6» с размером пикселя 6х6 мкм². Формат каждого фотоприёмника 1536х192 пикселя. Таким образом, суммарная длина строки составляет около 27 тысяч пикселей. Матрицы секционированы и обеспечивают съёмку с 192, 128, 96, 64, 48 или 32 шагами накопления. Таким образом достигается дискретное изменение чувствительности ОЭП при изменении условий наблюдения. Рабочий спектральный диапазон 0,5-0,8 мкм.

В мультиспектральном блоке ОЭП-АМС используется модификация фотоприёмных модулей «Круз-Ц-Б» со светофильтрами обеспечивающими съёмку в 3-х спектральных диапазонах: 0,45 - 0,52 мкм; 0,53 - 0,6 мкм; 0,61 - 0,7 мкм. Характеристики свето-

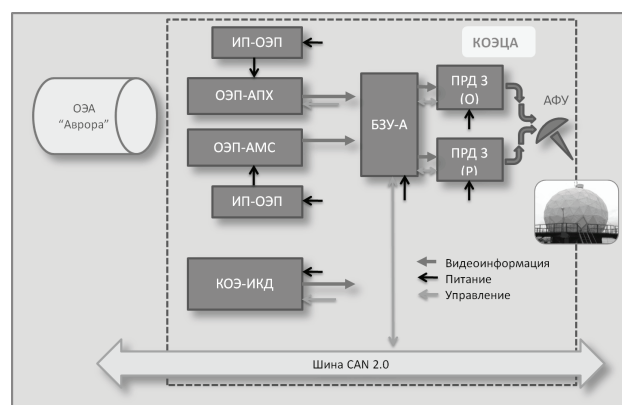


Рисунок 1.
Структурная схема КОЭЦА



Рисунок 2.
Блоки ОЭП-АПХ и ОЭП-АМС

фильтров обеспечивают формирование качественного цветного изображения. В блоке ОЭП-АМС установлено 12 таких матриц форматом 768x64 пикселей размером 18x18 мкм². Суммарная длина строки около 9 тыс. пикселей. Число шагов накопления изменяется с коэффициентом 2 в диапазоне 64, 32 и 16.

Внешний вид панхроматического и мультиспектрального блоков ОЭП показан на фото (рис. 2).

Электронная начинка блоков ОЭП обеспечивает все необходимые аналоговые и цифровые функции: управления матрицами ПЗС, усиления и оцифровки видеосигнала, цифровую обработку, сжатие и упаковку данных, обработку команд управления поступающих от БКУ КА по интерфейсу CAN 2.0, привязку видеоинформации к бортовой шкале времени, а также формировании телеметрической информации. Цифровая видеоинформация

из каждого блока ОЭП выдается по двум волоконно-оптическим линиям связи, которые хорошо себя зарекомендовали на КА «Ресурс-П». Блоки ОЭП имеют несколько режимов работы обеспечивающих съёмку и тестовые проверки. Предусмотрены режимы съёмки, как со сжатием (ДИКМ – дифференциально-импульсная кодовая модуляция) так и с передачей исходной не сжатой информации. Каждый режим задаётся внешними командами управления, но даже при отсутствии таких команд блок будет работать в определённом фиксированном режиме. Все необходимые для работы блоков ОЭП питающие напряжения формируются в блоках вторичного питания ИП-ОЭП.

Характеристики опико-электронных блоков КОЭЦА приведены в табл. 2.

ИНФРАКРАСНАЯ КАМЕРА

Одной из задач, которые предстоит решать на борту МКА «Аист-2Д» является исследование возможности использования в ДЗЗ микроболометрических матриц работающих в тепловом диапазоне. Для проведения этих исследований и испытаний в натуральных условиях создана инфракрасная камера КОЭ-ИКД на основе микроболометрического модуля разработки ЗА НПП «ЭЛАР». Камера призвана обеспечивать получение информации о Земной поверхности в тепловом

Таблица 2.
Характеристики ОЭП-АПХ и ОЭП-АМС

Параметр	ОЭП-АПХ	ОЭП-АМС
Количество спектральных диапазонов	1	3
Спектральный диапазон, мкм	0,5-0,8	0,45 - 0,52 мкм 0,52 - 0,60 мкм 0,63 - 0,69 мкм
Размер элемента, мкм	6	18
Длина строки, мм	162	162
Количество элементов в строке	27648	9 216
Разрядность выходного сигнала, бит	10	10
Сжатие видеоинформации, бит/пикс.	4 (ДИКМ)	
Число строк накопления	192, 128, 96, 48, 32	64, 32, 16
Скорость бега изображения, мм/с	10÷42	
Масса, кг	4,9	5,2
Энергопотребление, Вт	28	28

ИК- диапазоне от 8 до 14 мкм при съёмке в диапазоне высот от 350 до 700 км в надири и при отклонениях МКА по крену до $\pm 30^\circ$. При этом пространственное разрешение составит 122 метра, а полоса захвата 47 км. Камера имеет кадровую организацию. Формат кадра 384x288. Оценки с использованием результатов наземных измерений показывают, что при определенных методах обработки можно ожидать получения температурное разрешение около 0,1 °К. Примеры изображений, полученных камерой КОЭ-ИКД в наземных условиях, показаны на рис. 3.

КОЭ-ИКД (рис. 4) входит в состав КОЭЦА. В камере тепловое изображение сформированное инфракрасным объективом преобразуется в аналоговый сигнал. Затем происходит аналого-цифровое преобразование (14 бит) и формирование выходной структуры видеoinформации для передачи в бортовое ЗУ. Все необходимые для работы вторичные напряжения питания формируются внутри самой камеры. Управление режимами работы КОЭ-ИКД осуществляется командами по интерфейсу CAN. Кроме цифровой видеoinформации на выход камеры передаётся необходимая телеметрия. Основные характеристики КОЭ-ИКД показаны в табл. 3.

Одновременно с бортовой аппаратурой разрабатываются алгоритмы наземной обработки информации, которая будет поступать с КОЭ-ИКД. Предполагается отработать методы повышения чувствительности цифрового накопления, коррекции неоднородности теплового изображения, калибровки, сшивки протяженного изображения на основе отдельных кадров и т.п.



Рисунок 3.

Примеры изображений полученных камерой КОЭ-ИКД в наземных условиях

Таблица 3.
Характеристики КОЭ-ИКД

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, мкм	8-14
Размер элемента, мкм	25
Размер кадра, пикселей	384×288
Проекция пикселя, м	122
Размер кадра, км	47,2 x 35,1
Температурное разрешение, НЕΔТ, °К	0,1
Информационный поток, Мбит/с	45
Масса, кг	4,4
Энергопотребление, Вт	5,4

БОРТОВОЕ ЗАПОМИНАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО

БЗУ-А - бортовое запоминающее устройство предназначено для приёма, записи, хранения и воспроизведения целевой видеoinформации, поступающей от оптико-электронных преобразователей ОЭП-АПХ, ОЭП-АМС, а также камеры КОЭ-ИКД по оптоволоконным линиям связи. Кроме того, БЗУ-А обеспечивает те же самые функции и для научной, а также специальной телеметрической информации, которая поступает в блок по интерфейсному каналу CAN. Эти данные передаются в виде пакетов и включают в себя идентификаторы источника, метки времени и другую необходимую служебную информацию.

Информация хранится в энергетически независимой ФЛЭШ-памяти. Емкость БЗУ-А на начало срока активного существования 160 Гб. На конец срока прогнозируется около 140 Гб. В процессе испытаний подтверждена скорость записи информации от 0,04 до 1,92 Гб/с., что обеспечивает все сочетания работы аппаратуры. Воспроизведение информа-

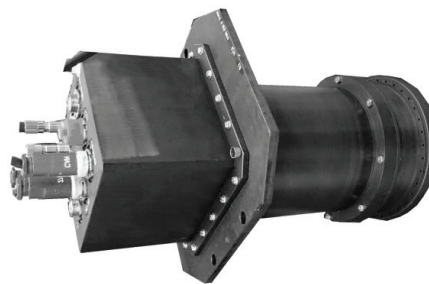


Рисунок 4.

КОЭ-ИКД – инфракрасная оптико-электронная камера



Рисунок 5.

Бортное запоминающее устройство БЗУ-А

ции из БЗУ в радиолинию осуществляется со скоростью 150 Мбит/с. Данные передаются в аппаратуру бортовой радиолинии по линиям LVDC. Конструктивно БЗУ-А выполнено в виде моноблока (рис. 5). Масса блока 5,7 кг. Максимальная потребляемая мощность в процессе записи 16,2 Вт.

Управление процессами записи и воспроизведения осуществляется процессорной системой входящей в состав блока. Внешние команды управления режимами работы принимаются по шине CAN. Программное обеспечение БЗУ-А организует и ведет файловую систему для записываемой, хранимой и воспроизводимой информации, осуществляет контроль работы, формирует различную телеметрию.

БОРТОВАЯ РАДИОЛИНИЯ

Результаты съёмок оптико-электронной аппаратуры «Аврора» в панхроматическом и мультиспектральных каналах (с ОЭП-АПХ и ОЭП-АМС), камеры КОЭ-ИКД в тепло-



Рисунок 6.

Блок передатчика ПРД-3

вом ИК диапазоне, а также данные от научной аппаратуры, получаемые на борту КА «Аист-2Д» передаются на наземную приёмную станцию через бортовую радиолинию передачи информации (БА РЛЦИ). Радиолиния работает в Хдиапазоне. В состав БА РЛЦИ входят два радиопередающих устройства ПРД-3 (основное и резервное) разработки ЗАО НПП «САИТ» и антенно-фидерное устройство.

Внешний вид ПРД-3 показан на фото рис. 6. В блоке передатчика осуществляется прием данных от БЗУ-А, помехоустойчивое кодирование, форматирование последовательного выходного потока данных, форматирование синфазного и квадратурного каналов, цифровую фильтрацию, цифроаналоговое преобразование, генерацию сигнала несущей частоты, модуляцию несущей и усиление ВЧ-сигнала.

Основные характеристики блока радиопередатчика приведены в табл. 4.

Таблица 4.

Основные характеристики ПРД-3

Параметр	Значение
Скорость передачи данных (полезная), Мбит/с	150
Количество несущих	1
Модуляция	QPSK
Помехоустойчивое кодирование	CCSDS 131.1-O-2 (LDPC 7/8)
Диапазон частот	X (8050-8400 МГц)
Полоса частот, до, МГц	85
Мощность передатчика, Вт	8
Потребляемая мощность, Вт	70
Интерфейс данных	Последовательный LVDS до 200 Мбит/с
Интерфейс управления/телеметрии	RS-422
Напряжение питания, В	23÷31
Рабочий диапазон температур, °С	-20...+40

Таблица 5.

Массо-габаритные и энергетические характеристики КОЭЦА

Наименование блока	Масса, кг	Мощность, Вт	Габариты, мм (Д×Ш×В)	Кол-во блоков
ОЭП-АПХ	4,92	28	360×206×60	1
ОЭП-АМС	5,18	28	360×208×60	1
ИП-ОЭП	2,3 х 2	11 х 2	233×110×49	2
КОЭ-ИКД	4,40	5,4	291×200×180	1
БЗУ	5,7	18	280×180×115	1
ПРДЗ	1,63 х 2	65	230×140×45	2
АФУ	1,53	-	220Ø300	1
Комплект жгутов	3,12	-		
Итого:	32,7	101,4 (съёмка, запись)		

Антенно-фидерное устройства (АФУ) работает в X диапазоне. Антенна ненаправленная. Зона обслуживания $\pm 70^\circ$. Коэффициент усиления в зоне 0,45-7,2.

В табл. 5 приведены массо-габаритные и энергетические характеристики блоков входящих в состав КОЭЦА.

Комплекс аппаратуры имеет небольшую массу около 33 кг и потребляет максимально около 100 Вт в режиме записи. При таких параметрах он обеспечивает прекрасные характеристики по пространственному разрешению, полосе захвата и информационной производительности. Разрешение составляет 1,5 метра в панхроматическом канале, 4,5 в мультиспектральном, экспериментальная инфракрасная камера имеет разрешение 122 метра в тепловом диапазоне 8-14 мкм. Сравнение КОЭЦА с аппаратурой, установленной на некоторых зарубежных аппаратах (табл. 1) показывает, что комплекс в составе КА «Аист-2Д» превосходит многие из них.

В составе КА демонстратора «Аист-2Д» КОЭЦА обеспечивает гибкую работу при съёмке отдельными инструментами, получение данных научной аппаратуры, а также различные их одновременные сочетания.

В табл. 6 приведены несколько режимов с возможными сочетаниями одновременной записи в БЗУ-А от различных источников информации при работе КОЭЦА, а также научной аппаратуры (НА) и телеметрической информации (ТМ).

Кроме того имеется возможность осуществлять съёмку аппаратурой ОЭА «Аврора» с одновременной с передачей информации ДЗЗ на наземный пункт приёма. Предусмотрен такой режим работы и при съёмке камерой КОЭ-ИКД.

Прием информации от КА «Аист-2Д» будет осуществлять на ЦПОИ «Самара», который дооснащается соответствующими рабочими местами и программным обеспечением. В качестве резервной приемной станции будет использоваться наземная станция НС-Аист-2 располагающаяся Зеленограде в филиале АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС».

Для станции ЦПОИ «Самара» прием на полной скорости возможен при угле места около 5 градусов. Для станции «ОПТЭКС» прием на полной скорости прием возможен при угле места от 12 градусов, на половинной скорости – от 5 градусов.

Таблица 6. Режимы записи от различных источников

	ОЭП_АПХ	ОЭП-АМС	КОЭ-ИКД	НА	ТМ
1.	▲				
2.		▲			
3.			▲		
4.				▲	
5.					▲
6.	▲	▲			
7.	▲		▲		

КШМСА И ОПЫТ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СОСТАВЕ КА «РЕСУРС-П» №1 и №2

АФОНИН А.Н., БАКЛАНОВ А.И., БЛИНОВ В.Д., ЗАБИЯКИН А.С.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru

Ключевые слова: комплекс широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры, адаптация к освещенности, дальности и скорости, характеристики мультиспектральной аппаратуры, радиометрическая калибровка.

В составе полезной нагрузки космических аппаратов «Ресурс-П» №1 и №2 успешно зарекомендовал себя комплекс широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры – КШМСА, разработанный в филиале АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС». Комплекс состоит из двух оптико-электронных камер высокого (ШМСА-ВР) и среднего (ШМСА-СР) разрешения, работа которых может осуществляться как вместе, так и автономно под контролем единой системы (блока) управления. Внешний вид камер представлен на photographиях (рис. 1).

Камеры обеспечивают одновременно панхроматическую и мультиспектральную съемку в полосе захвата 96 км (ШМСА-ВР) и 480 км (ШМСА-СР) с высоты орбиты 475 км. В панхроматическом канале ($0,43 \div 0,70$ мкм) камеры высокого разрешения проекция пиксела составляет 12 метров, а в пяти мультиспектральных каналах ($0,43 \div 0,51$ мкм; $0,51 \div 0,58$ мкм; $0,60 \div 0,70$ мкм; $0,70 \div 0,90$ мкм; $0,80 \div 0,90$ мкм) проекция пиксела составляет 24 метра. Пространственное разрешение камеры среднего разрешения в пять раз меньше чем ШМСА-ВР и составляет 60 и 120 м, соответственно. Конструктивно аппаратура КШМСА представляет собой две камеры и блок управления, расположенные на одном основании. Электроника камер практически полностью унифицирована. Они отличаются только объективами и управляющими про-

граммами. В камере ШМСА-ВР используется объектив П-200 с фокусным расстоянием 200 мм и относительным отверстием 1:3, а в камере ШМСА-СР объектив ТМ-40 с фокусным расстоянием 40 мм и относительным отверстием 1:4. Объективы ТМ-40 и П-200 были разработаны и изготовлены в ОАО «ЛЗОС» специально для использования в оптико-электронных камерах КШМСА космического аппарата «Ресурс-П» и обладают хорошими стабильными термобарическими характеристиками.

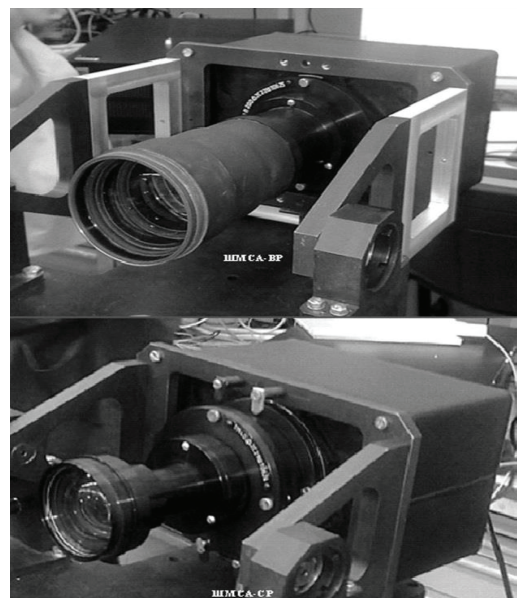


Рисунок 1.
*Камеры КШМСА на стенде
оптотехнических испытаний*

Таблица 1.
Характеристики КШМСА

Параметр	Значение параметра	
	ШМСА-СР	ШМСА-ВР
Высота орбиты, км	475	
Разрешение, м (ПХ/МС)	60/120	12 / 24
Полоса захвата, км	480	96
Фокусное расстояние объектива, мм	40	200
Количество элементов (ПХ/МС)	8000 / 4000	
Разрядность квантования, бит	12	
Спектральные диапазоны, мкм	0.43÷0.70 (ПХ) 0.43÷0.51 (В), 0.51÷0.58(Г), 0.60÷0.70 (Р), 0.70÷0.90 (IR1) 0.80÷0.90 (IR2)	
Интерфейс передачи данных	Волоконно-оптический	
Интерфейс управления	МПИ, ГОСТ Р 52070-2003	
Масса, кг	19.7	
Габариты, мм	494 X 260 X 500	
Энергопотребление, Вт	41.0	

Электроника камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР позволяет осуществлять по каждому спектральному каналу гибкое управление в широком диапазоне времен экспозиции и частот строк, адаптируясь к изменяющимся условиям освещенности, изменению дальности и скорости сканирования при кренах КА во время съёмки. В аппаратуре ШМСА-ВР частота строк может изменяться в диапазоне 184 ÷ 800 Гц в панхроматическом канале и 92÷400 Гц в мультиспектральных каналах. В аппаратуре ШМСАСР частота строк может изменяться в диапазоне 36,8÷160 Гц в панхроматическом канале и 18,4÷80 Гц в мультиспектральных каналах. Управление временем экспозиции осуществляется за счет использования электронного затвора в диапазоне 0,007 ÷ 1 периода строки для панхроматического канала и 0,05 ÷ 1 периода строки для мультиспектральных каналов.

В качестве фотоприёмников в аппаратуре используются линейки ПЗС с длиной строки 8 тысяч пикселей для панхроматического канала и 4 тысячи пикселей для каждого из пяти мультиспектральных каналов. Каналы видимого и ближнего инфракрасного диа-

пазона конструктивно несколько разнесены по пространству. На выход камер с каждого спектрального канала поступает 12-ти разрядная видеоинформация в сопровождении БШВ, соответствующей времени съёмки каждой строки, а также другой полезной служебной информации. Для передачи данных в бортовое запоминающее устройство в камерах используется оптико-волоконный интерфейс, унифицированный с другими инструментами («Геотон» и ГСА) КА «Ресурс-П» и способный передавать до 960 Мбит/с по одной линии. Масса комплекса КШМСА 19,7 кг. Максимальное энергопотребление 41 Вт.

Характеристики комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры (КШМСА) приведены в табл. 1.

Камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР осуществляют съёмку в режиме сканирования «pushbroom», использующем движение космического аппарата для обеспечения развертки по одной из координат. Электронная развертка по второй координате обеспечивается применением многоэлементных линейных фотоприемников на ПЗС.

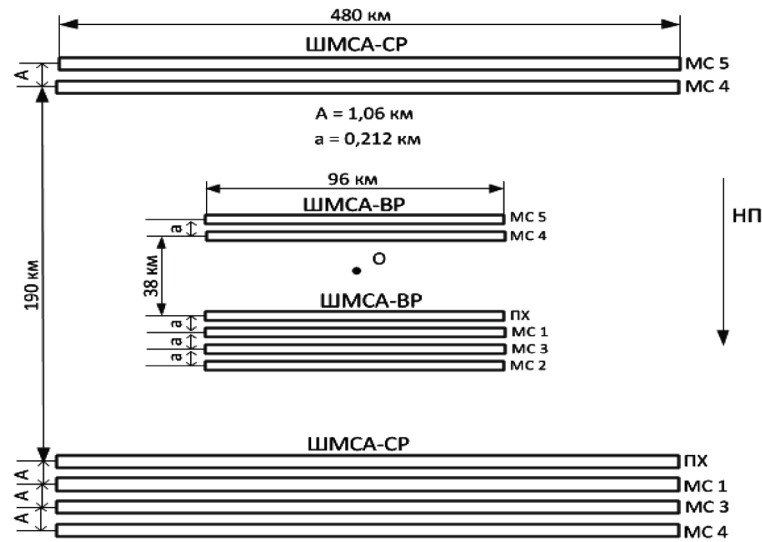


Рисунок 2.

Схема расположения проекций на местность элементов линеек ФПЗС камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР относительно друг друга и относительно направления полета КА (НП)

На рис. 2 представлены схемы расположения проекций элементов линеек ФПЗС различных спектральных каналов относительно друг друга в каждой камере, и камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР относительно друг друга и относительно направления движения изображения. Размеры приведены для высоты 475 км.

В настоящее время перед аппаратурой ДЗЗ все больше ставится задача служить средством измерения, в частности, в части радиометрических характеристик подстилающей поверхности.

Согласно [1] непосредственно измеряемой величиной в части радиометрических измерений является эффективная энергетическая яркость $L_{эфф}$ (ЭЭЯ):

$$L_{эфф} = \int_0^{\infty} L(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

где: $L(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) наблюдаемого объекта;

$S(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность камер КШМСА.

В процессе изготовления камеры ШМСА-ВР и ШМСА-СР проходят в НПП «ОПТЭКС» процедуру радиометрической калибровки. Для этого используется аттестованное в ВНИОФИ оборудование: фотометрическая сфера и спектрометр.

В процессе калибровки определяется интегральная чувствительность каждого j -ого элемента линейного ПЗС каждого i -ого спектрального канала камер ШМСА-ВР и ШМСА-СР:

$$S_{инт_{i,j}} = \frac{U_{вых_{i,j}}}{L_{эфф_i}} \quad (2)$$

где: $U_{вых_{i,j}}$ – усредненный по многократным наблюдениям выходной сигнал j -ого элемента линейного ПЗС i -ого спектрального канала в уровнях АЦП;

$L_{эфф_i}$ – усредненное по полю зрения камеры входное значение ЭЭЯ для i -ого спектрального канала.

Измеренное значение интегральной чувствительности для каждого спектрального канала заносится в формуляр КШМСА в виде нормированного значения интегральной чувствительности $S_{инт_i}$ и относительной неоднородности интегральной чувствительности по элементам ПЗС $S_{отн_{ij}}$.

Основной вклад в погрешность определения $S_{инт_i}$ вносит неопределенность относительной спектральной чувствительности камер КШМСА. Использование рассчитанной спектральной чувствительности по спектральным характеристикам пропускания объектива, спектральным характеристикам применяемых в камерах светофильтров

и спектральным характеристикам линеек ФПЗС может давать ошибку до 20 % по сравнению с непосредственно измеренными значениями спектральной чувствительности камер КШМСА.

Полученные в процессе радиометрической калибровки значения $S_{инт_i}$ для каждого спектрального канала камер КШМСА используются в процессе эксплуатации для расчета времени экспозиции с целью получения качественных изображений с высоким уровнем видеосигнала и, соответственно, высоким уровнем отношения сигнал/шум. Для аппаратуры КШМСА разработана методика расчета времени экспозиции по исходным данным, включающим в себя угол Солнца, углы съемки и альbedo подстилающей поверхности. Методика прошла отработку в процессе эксплуатации КШМСА в составе КА «Ресурс-П» №1.

Проведенная работа в части улучшения радиометрического разрешения камер – минимального приращения входной величины, которое может регистрироваться аппаратурой, показали, что при применении соответствующих схемотехнических и конструктивных решений, СКО шума выходного темного сигнала снижается до 1 уровня 12-рядного АЦП.

По своим характеристикам обе мульти-спектральные широкозахватные камеры ориентированы на проведение наблюдений и получение информации о подстилающей поверхности Земли в интересах сельского хозяйства, землепользования, контроля состояния лесных и водных ресурсов, картографирования пахотных земель, составления прогнозов урожайности. Кроме того, оперативные данные КШМСА окажут немалую пользу при мониторинге районов чрезвычайных ситуаций. Данные ШМСА-СР обзорного характера прекрасно подходят для контроля районов лесных и степных пожаров, а также окажутся полезными для метеорологии, определения границ снежного и ледового покрова, развития процессов вегетации. За полтора года работы в составе КА «Ресурс-П» №1 отсняты десятки миллионов квадратных километров суши и морских акваторий по всему Земному шару.

На рис. 3 показан фрагмент снимка камеры ШМСА-СР – Республика Саха (Якутия), пожар в районе р. Вилуй. На рис. 4 показан фрагмент снимка камеры ШМСА-ВР – Камчатка, вулкан Шивелуч.

Изготовлено 3 комплекта аппаратуры КШМСА: первый эксплуатируется в составе КА «Ресурс-П» №1, 2-й в настоящее время

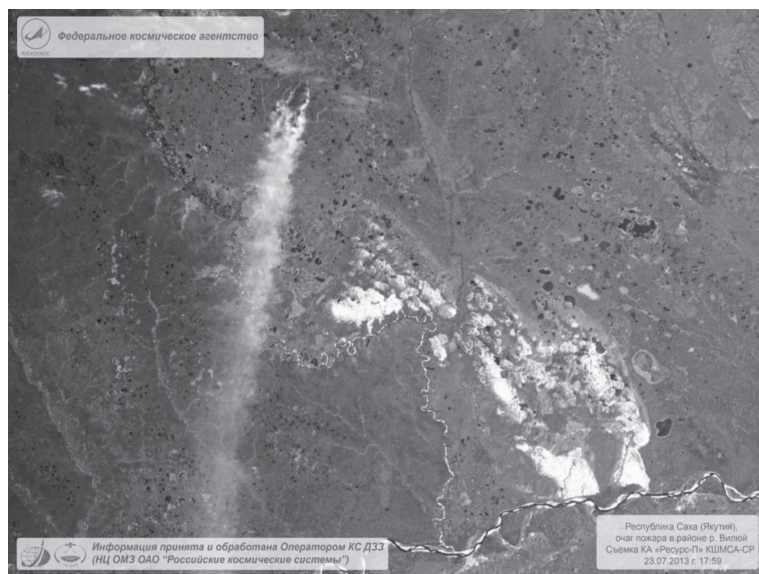


Рисунок 3.
Фрагмент снимка камеры ШМСА-СР

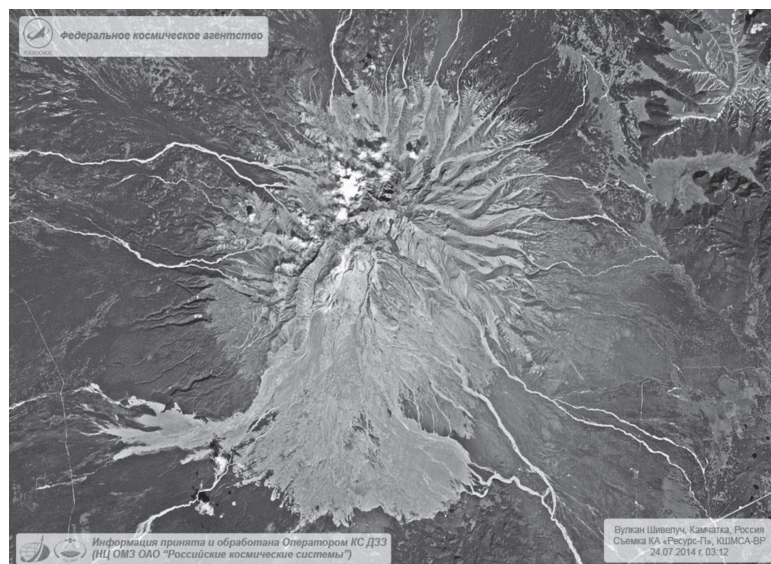


Рисунок 4.
Фрагмент снимка камеры ШМСА-ВР

завершает ЛКИ в составе «Ресурс-П» №2, а 3-й проходит наземные испытания в составе КА №3.

Наработанный опыт эксплуатации широкозахватного мультиспектрального комплекса позволяет уверенно судить о востребованности информации КШМСА, а опыт её создания и запросов потребителей позволяет определить возможные пути её модернизации для применения в составе КА «Ресурс-П» №4 и №5.

В частности, на основе разработанных камер ШМСА-ВР рассмотрена возможность построения комплекса, включающего в себя 2–3 такие камеры. Это позволит получить высокопроизводительную обзорную аппаратуру с разрешением порядка 12 м и полосой обзора 190÷300 км. Например, при применении двух камер ШМСА-ВР, установленных на посадочное основание с разворотом на угол 5,8 градусов в разные стороны относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной направлению движения, получаем аппаратуру с разрешением 12 м в ПХ и 24 м в МС каналах с полосой захвата порядка 190 км с высоты полета 475 км.

Опыт эксплуатации камеры ШМСА-ВР показал, что при съемках максимальное значение времени экспозиции составляет не

более половины времени периода строки. Этот факт наряду с большим динамическим диапазоном работы камер КШМСА позволяет модернизировать КШМСА в сторону использования более длиннофокусной оптики для повышения разрешающей способности камер. При этом не потребуются увеличения светосилы объективов и применение фотоприемных ПЗС с временной задержкой и накоплением сигнала (ПЗС ВЗН).

Специалистами НПП «ОПТЭКС» и ОАО ЛЗОС проработаны технические аспекты и показана возможность разработки и установки на КШМСА объектива с фокусным расстоянием от 300 до 500 мм для улучшения разрешающей способности до 8, или даже 5 метров. Неизбежное снижение полосы захвата отдельной камеры может быть компенсировано использованием опять же 2 – 3 однотипных камер.

Список литературы:

1. Панфилов А.С., Гаврилов В.Р., Саприцкий В.И. Условия подготовки и проведения абсолютных радиометрических измерений с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли // Исследования Земли из космоса, №1, 2014, с. 85-91.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КОМПЛЕКСА ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

РАДИН Е.А., МАСТЮГИН А.М.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru

Ключевые слова: малые космические аппараты, преобразование изображения, управление блоком ОЭП, радиационно-стойкие микросхемы, схемы передачи команд управления.

В настоящее время в связи с возросшей потребностью в создании спутников для решения конкретных задач по дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ) уделяется большое внимание развитию малых космических аппаратов (МКА). Эти КА не только обеспечивают получение снимков земной поверхности в приемлемом качестве, но и к тому же обладают малыми габаритами, являются более экономичными в плане энергозатрат и потребляемых ресурсов и позволяют снизить стоимость их разработки и выведения на орбиту.

В настоящее время завершается разработка МКА «Аист-2», на борт которого устанавливается уникальный комплекс оптико-электронной целевой аппаратуры (КОЭЦА), разработанный в НПП «ОПТЭКС». В состав КОЭЦА входит два оптико-электронных преобразователя (ОЭП) видимого диапазона (панхроматический и мультиспектральный) со своими источниками питания (ИП-ОЭП), комплекс оптико-электронный ИК-диапазона (КОЭ-ИКД), бортовое запоминающее устройство (БЗУ) и бортовая аппаратура радиолинии передачи цифровой информации (БА РЛЦИ). Несмотря на относительную простоту аппаратуры, по сравнению с аппаратурой для систем приема и преобразования информации (СППИ) больших космических аппаратов, в блоках ОЭП использован ряд схемотехнических решений, позволяющих выполнить все тре-

бования, предъявляемые к бортовой космической аппаратуре.

Блок ОЭП осуществляет преобразование движущегося изображения поверхности Земли, сформированного оптической системой, в цифровой код и передает его в запоминающее устройство (ЗУ), а далее в радиолинию МКА. ОЭП содержит фотоприёмные матрицы ПЗС (ФПЗС) и электронные платы, которые обеспечивают прием команд управления, формирование тактовой диаграммы работы ФПЗС, усиление видеосигнала, двойную коррелированную выборку, аналогово-цифровое преобразование полученных данных, сжатие и передачу информации по волokonно-оптическим линиям связи.

Для всей фотозоны ОЭП задаётся одна строчная частота, на основе которой формируются управляющие импульсы для фотоприёмников. Зона состоит из двух идентичных полузона – четной и нечетной. Четная полужона обеспечивает работу матриц с четными номерами, нечетная – матриц с нечетными номерами.

Полужона состоит из ячейки тактового питания (ТП), трех гибко-жестких плат предварительного усиления и коммутации (ПУ-ПК) и ячейки тракта обработки сигнала (ТОС) (рис. 1). Коммутация ячеек ТП и ТОС в блоке осуществляется посредством разъемных соединений, что облегчает сборку и монтаж блока на этапе регулировки.

В отличие от блоков ОЭП СППИ больших

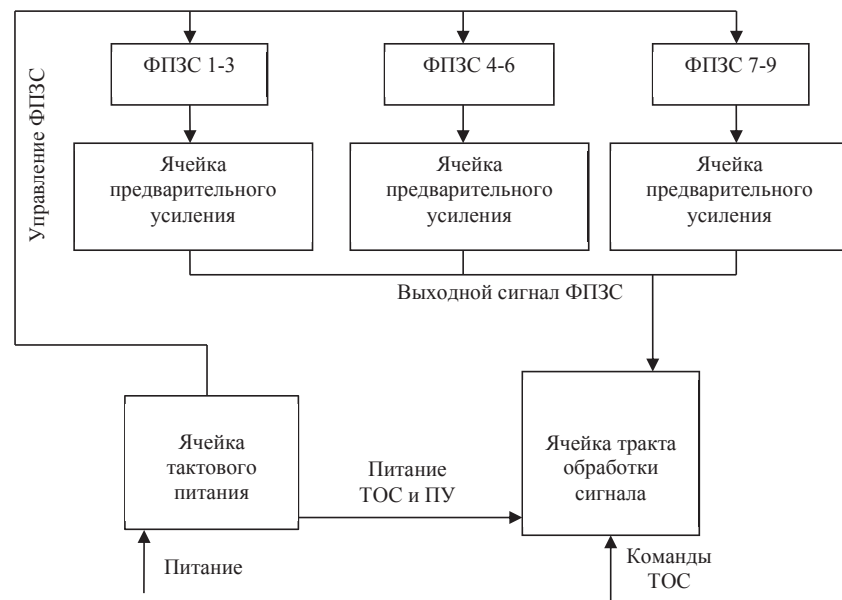


Рисунок 1.
Функциональная схема полузоны блока ОЭП

КА, имеющих отдельную резервированную ячейку управления, в ОЭП МКА «Аист-2» функции ячейки управления выполняет ячейка ТОС-1, она же вырабатывает общую для всех ячеек тактовую частоту. Управление блоком ОЭП ведется по каналу CAN от бортовой системы командного управления (БСКУ). Два приемопередатчика CAN, расположенные на ячейке ТОС-1, осуществляют прием команд управления, которые задают режим работы блока (съемка, тесты), число шагов накопления ФПЗС, строчную частоту ФПЗС, вид сжатия, время начала маршрута. Схема передачи команд управления и опорных частот блока ОЭП приведена на рис. 2.

ПЛИС ячейки ТОС формирует сигналы управления драйверами ФПЗС, которые расположены на ячейке ТП, а также сигналы управления двойной коррелированной выборкой для АЦП. Особенностью такой схемы является отсутствие ПЛИС и радиационно-стойких микросхем памяти в ячейке ТП. Это способствует уменьшению энергопотребления и стоимости блока ОЭП.

В двух микросхемах MRAM хранится конфигурационный файл для ПЛИС, записанный в 8 областей и коэффициенты усиления для АЦП. После включения питания микросхема

ПЛИС начинает загрузку конфигурационного файла из первой области памяти. Если по истечении определённого времени загрузка не произошла, то выполняется переключение на следующую область, при этом происходит смена микросхемы MRAM. Процесс повторяется до момента удачной загрузки. После чего питание микросхем памяти отключается. Питание микросхем памяти кратковременно включается только для чтения и записи коэффициентов усиления АЦП. Таким образом, обеспечивается восьмикратное резервирование, что позволяет существенно снизить вероятность катастрофического отказа из-за возникновения тиристорного эффекта в результате воздействия ТЗЧ.

Недостатком интеграции управления в ячейку ТОС является отсутствие резервирования управляющей части ОЭП.

Однако для отказа управления необходимо, чтобы одновременно отказали оба драйвера CAN, что маловероятно, или ПЛИС ТОС-1, но отказ ПЛИС ТОС приведёт одновременно и к отказу всего блока.

В то же время, интеграция ячейки управления в ячейку ТОС позволила значительно уменьшить габариты и массу блоков ОЭП, что имеет существенное значение для МКА.

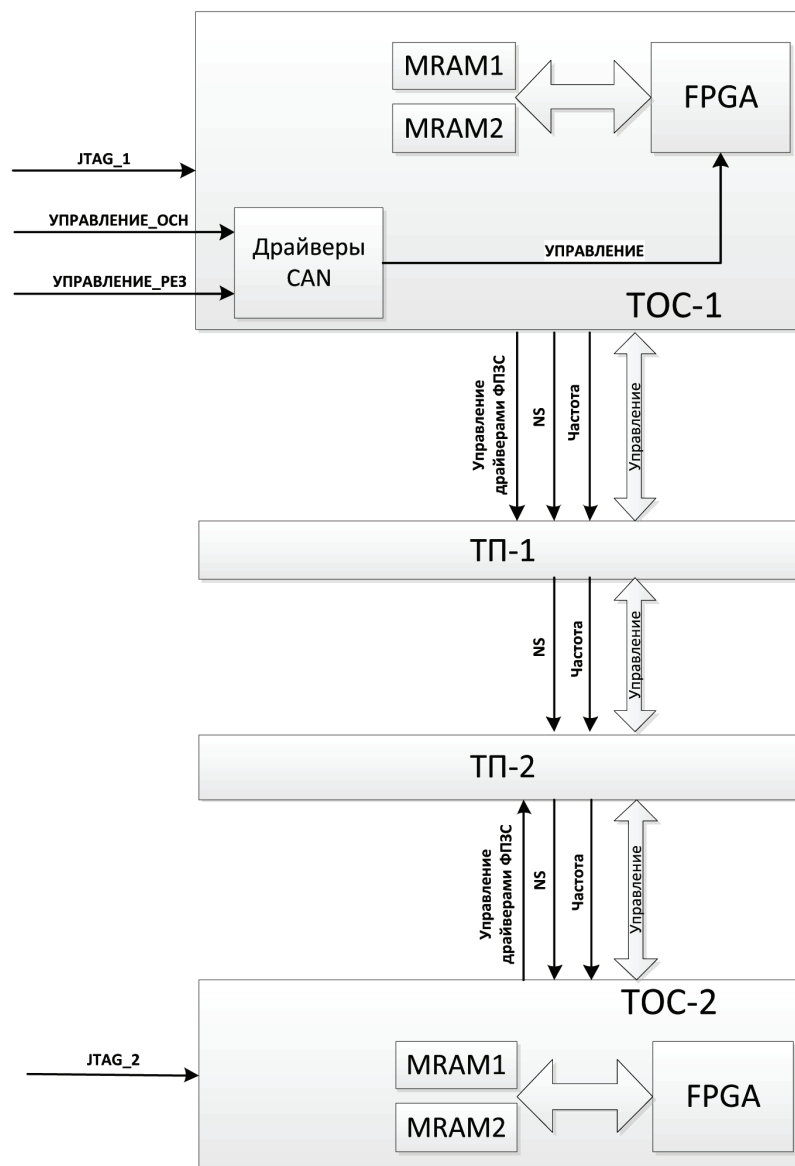


Рисунок 2.
Схема передачи команд управления и опорных частот

Отличительной особенностью от существующих блоков ОЭП является приём метки времени по отдельному каналу, что позволяет получить более высокую точность привязки видеоинформации к шкале времени.

В мультиспектральном блоке в составе фоточувствительных модулей (ФЧМ) были

применены новые светофильтры, которые обеспечивают более точное задание спектральных диапазонов и большую равномерность пропускания по полю.

Принятая архитектура построения блоков ОЭП для МКА «Аист-2» позволила создать компактные оптико-электронные блоки, полностью соответствующие требованиям технического задания.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЛОКОВ ОЭП ДЛЯ ШИРОКОЗАХВАТНОЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ

АФОНИН А.Н., РАЗЖИВАЛОВ И.Н.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru

Ключевые слова: системы приема и преобразования сигналов, новые схемотехнические решения, 3D-проектирование, цифровая обработка, корпусное исполнение ФПЗС.

Снимки ДЗЗ среднего разрешения (5-10 м) в диапазоне видимого и ближнего ИК (до 0.96 мкм) спектра востребованы в настоящее время очень многими потребителями. Для широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения (ШМАСР) разработки ОАО КМЗ им. Зверева в НПП ОПТЭКС разработана система приема и преобразования изображения среднего разрешения (СППИ-СР). В данной статье рассматриваются некоторые особенности проектирования блоков ОЭП-СР и ОЭП-СР-01 из состава СППИ-СР. Внешний вид блоков представлен на рис. 1.

Отличие между блоками состоит в применении разных светофильтров. Основные технические характеристики блока ОЭП-СР приведены в табл. 1.

Электронный тракт блоков ОЭП построен по традиционной схеме, однако при проектировании блоков ОЭП-СР для ШМАСР были реализованы новые схемотехнические и конструктивные подходы. Необходимость обеспечить размещение в фокальном узле телескопа 9-ти спектральных каналов при минимальных расстояниях между соседними спектральными каналами вынудила уменьшить размеры блоков ОЭП по направлению полета КА и подтолкнула разработчиков аппаратуры к решению разбить каждый блок ОЭП на 2 субблока (структурная схема субблока ОЭП-СР приведена на рис. 2). Такое разбиение стало возможным благодаря разработке такой оптической схемы аппа-

ратуры, которая обеспечила одновременное формирование одного и того же участка изображения на обоих субблоках.

При этом фотозона блока, сформированная из 4 ФПЗС расположенных в шахматном порядке, размещается в 2 двух субблоках: нечетные ФПЗС размещаются в одном субблоке, четные в другом. Формирование единой фотозоны в итоге обеспечивается оптической системой ШМАСР, при этом отсутствует временная задержка изображения между четными и нечетными рядами ФПЗС, характерная для случая размещения обоих рядов в одном блоке.

Задача уменьшения размеров блока привела к решению сделать объем блоков негерметичным. Разбиение блока на два субблока позволило уменьшить общее количество ячеек в субблоке, что вместе с отказом от герметичного исполнения, выбором компактных

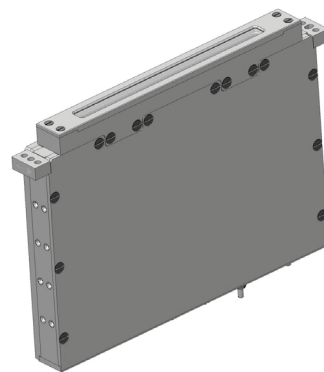


Рисунок 1.
Внешний вид блока ОЭП-СР

Таблица 1

№	Параметр	ОЭП-СР		ОЭП-СР-01	
		канал ПХ	канал МС	канал ПХ	канал МС
1	Рабочая область спектра, мкм	0,5-0,8	0,45-0,51; 0,51-0,58; 0,63-0,69; 0,77-0,89	0,5-0,8	0,71-0,75; 0,76-0,80; 0,85-0,89; 0,89-0,96
2	Размер элемента дискретизации, мкм	9	18	9	18
3	Коэффициент бинирования строк/столбцов	1, 2, 4		1, 2, 4	
4	Формат фотозоны ОЭП-СР и ОЭП-СР-01:				
	число ФПЗС в субблоке	2		2	
	число элементов в строке каждого субблока	12288	6144	12288	6144
5	Число строк накопления: - каналы ПХ - каналы МС1 - каналы МС2, МС3, МС4	64, 32, 16, 8	- 64, 32, 16 32, 16, 8	64, 32, 16, 8	- 64, 32, 16 32, 16, 8
6	Отношение с/ш при максимальном уровне входного сигнала	≥ 350	≥ 500	≥ 350	≥ 500
7	Динамический диапазон	≥ 3000	≥ 5000	≥ 3000	≥ 5000
8	Разрядность квантования сигнала, бит/выборку	12			
9	Неоднородность чувствительности, %	≤ 10		≤ 10	
10	Нелинейность светосигнальной характеристики, %	≤ 2			
11	Энергопотребление, Вт	30			

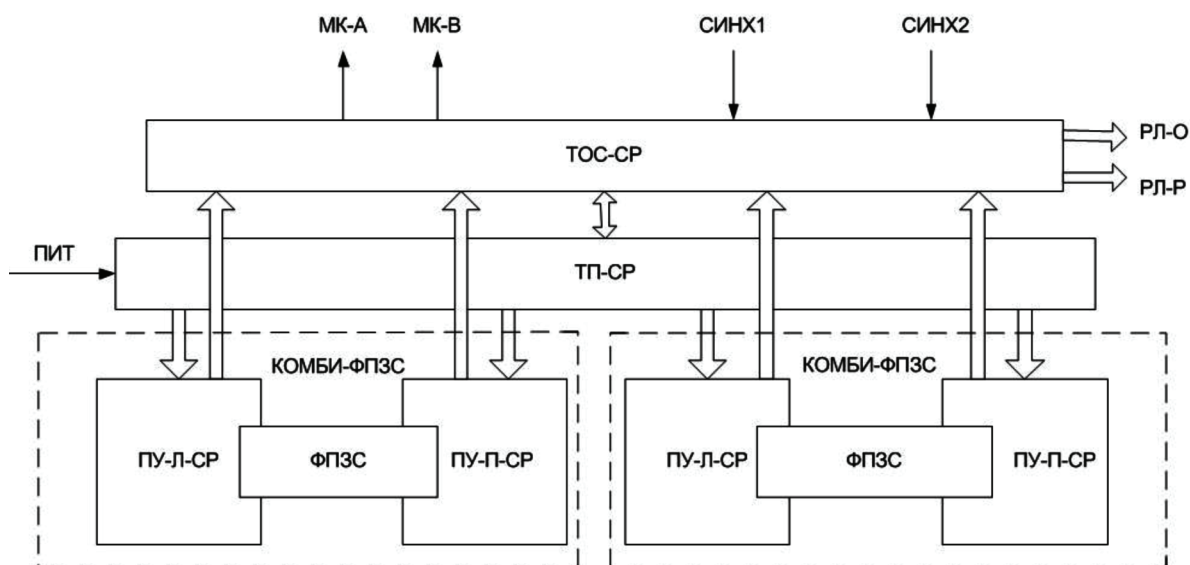


Рисунок 2.
Структурная схема субблока ОЭП-СР

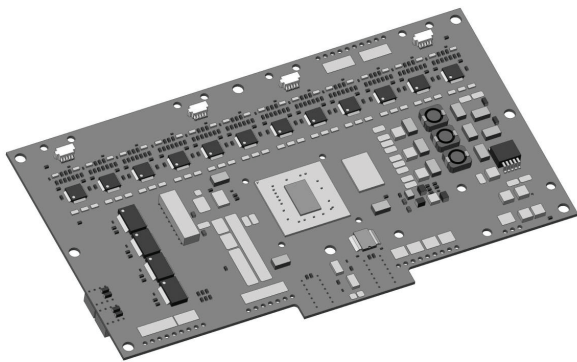


Рисунок 3.
3D модель ячейки ТОС-СР

соединителей и компонентов ЭРИ, позволило уменьшить размер («толщину») блока в наиболее критичном направлении до 24 мм.

Необходимо добавить, что для достижения требуемого габаритного размера пришлось прибегнуть к 3D проектированию ячеек из состава блока. При размещении ЭРИ на ячейках учитывалась высота ЭРИ на расположенных друг над другом ячейках с тем, чтобы место с наибольшей высотой одной ячейки совпадало с местом наименьшей высоты другой. Внешний вид 3D модели одной из ячеек блока представлен на рис. 3.

Для цифровой обработки в блоках ОЭП используется микросхема ПЛИС семейства Kintex7 производства фирмы Xilinx. Ресурсы ПЛИС позволяют решить все задачи по управлению блоком и формированию выходной видеоинформации. Для выходной видеоинформации используется оптоволоконный выход. Информация на оптопередатчик поступает в последовательном цифровом коде упакованная в пакеты по 1024 байта. Упаковка в пакеты и формирование последовательного кода осуществляется в ПЛИС. Наличие в ПЛИС встроенного сериализатора позволяет избавиться от необходимости применения специальной интерфейсной микросхемы типа «Гигастар».

В блоках ОЭП-СР применены новые уникальные ФПЗС разработки НПП ЭЛАР с 5 фотозонами: одной панхроматической и 4 мультиспектральными. Длина фотозоны одной микросхемы составляет 54 мм, что по-

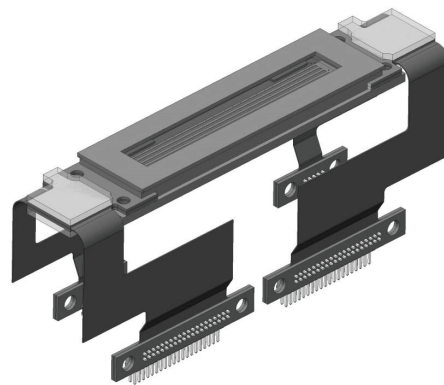


Рисунок 4.
ФПЗС-Комби

зволяет сформировать фотозону длиной 216 мм, используя всего 4 ФПЗС. При проектировании блоков еще на стадии формирования технического задания был выбран вариант корпусного исполнения ФПЗС (см. рис. 4). Корпусной вариант исполнения, помимо решения задачи размещения фоточувствительных зон на минимальном расстоянии друг от друга, существенного упрощения технологии установки и работы с ФПЗС, позволил уменьшить проводной монтаж внутри блока, т.к. в состав конструкции ФПЗС была введена гибко-жесткая печатная плата с соединителями, через которые осуществляется связь с остальными ячейками блока. Коммутация ячеек между собой так же осуществляется только при помощи соединителей. В корпусе ФПЗС также размещен предварительный усилитель видеосигнала, что позволило исключить из состава блока отдельные ячейки предварительных усилителей. Кроме того, применение корпусированной ФПЗС позволило сделать субблоки негерметичными и, соответственно, облегчить их конструкцию и уменьшить габариты.

Применение новых конструктивных и схемотехнических решений для блока и уникальных специализированных ФПЗС, в сочетании с элементной базой высокой степени интеграции, позволило разработать компактный, но очень плотный по своей компоновке, блок, отвечающий жестким требованиям по габаритам и техническим характеристикам.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КАМЕР ДЗЗ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРОЧНО-КАДРОВЫХ И ВЗН МАТРИЦ ПЗС

КЛЮШНИКОВ М.В.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru, klyushnikov_mv@mail.ru.

Проведено сравнение строчно-кадровых ПЗС и ВЗН ПЗС матриц в системах ДЗЗ высокого разрешения. Показано, что ВЗН матрицы обладают значительными преимуществами по сравнению со строчно-кадровыми ПЗС матрицами.

Ключевые слова: строчно-кадровые ПЗС, ПЗС ВЗН, дистанционное зондирование высокого разрешения.

В большинстве оптоэлектронных широкоформатных систем ДЗЗ высокого и среднего разрешения при формировании изображения используется метод заметания, или «push broom». Оптоэлектронная аппаратура в таких системах построена на многоэлементных линейных или матричных ФПЗС. Традиционно в условиях низкой освещенности используются специализированные матричные ФПЗС, позволяющие реализовать режим временной задержки и накопления (ВЗН). Этот тип приборов за счет организации синхронного с движением изображения перемещения зарядовых пакетов позволяет увеличить время накопления и, таким образом, полезный сигнал, и увеличить отношение сигнал/шум.

Практически все существующие в мире системы ДЗЗ высокого разрешения, как отечественного, так и зарубежного производства, используют ВЗН матрицы.

Существует возможность реализации режима ВЗН на матричных ФПЗС строчно-кадровой организации, серийно выпускаемых большинством зарубежных фирм-изготовителей ПЗС, технологический уровень которых превосходит отечественный. Однако строчно-кадровая организация не оптимальна для реализации режима ВЗН, что в значительной степени сводит на «нет» это превосходство.

Проведем сравнительный анализ применения двух типов матричных ФПЗС, работающих в режиме ВЗН: ФПЗС «Круиз-6» (используется целевой аппаратуре КА «Ресурс-П») и строчно-кадрового ФПЗС одного из лидеров – фирмы Kodak - KAI-2093M. Сравнительные характеристики этих приборов приведены в таблице ниже.

Анализ данных таблицы и других характеристик ФПЗС KAI-2093M в комплексе с особенностями режима ВЗН позволяет отметить следующее.

Первым недостатком строчно-кадровой матрицы является малая зарядовая емкость. Зарядовая емкость ф/чувствительной ячейки ПЗС-приемника со строчно-кадровой организацией в сравнении с матричным ФПЗС ВЗН при одинаковом размере элемента и одинаковом уровне технологии всегда будет меньше за счет того, что фотогенерация и накопление заряда происходит в фотодиоде, а перенос по вертикали – в закрытых от света вертикальных регистрах. Соответственно, и динамический диапазон ячейки строчно-кадровой матрицы принципиально меньше, чем полнокадровой матрицы или матрицы ВЗН, в которых фотогенерация и перенос осуществляются собственно вертикальным регистром.

Таблица 1.
Сравнительные характеристики ФПЗС «Круиз-6» и строчно-кадровой матрицы
фирмы Kodak KAI-2093M

Параметр	Круиз-6	KAI-2093M (типичное значение)
Размер ф/ч элемента, мкм	6 x 6	7.4 x 7.4
Формат фотозоны, эл-ты	1536 (H) x 192 (V)	1920 (H) x 1080 (V)
Напряжение насыщения ф/ч ячейки, мВ	370	560
Напряжение насыщения выходного устройства, мВ	550	1400
Зарядовая емкость, тыс. эл.	90	40
Шум, эл-ны	45	40
Крутизна выходного устройства, мкВ/эл-н	3	14
Динамический диапазон ф/ч ячейки, раз	1000	1000
Пиковая неравномерность выходного сигнала с каждого выхода при любом числе шагов накопления, %	5	нет данных
Квантовая эффективность в максимуме (λ_{max})	0.33 (720 нм)	0.44 (490 нм)
Диапазон спектральной чувствительности по уровню 0.1, мкм	0.43 – 1.05	0.3 – 0.87
Среднее значение темнового сигнала (128 ш. н.), нА/см ²	1.2	0.3
Эффективность переноса по горизонтали	0.99997	нет данных (для других матриц серии KAI >0.99999)
Эффективность переноса по вертикали	0.99995	нет данных (для других матриц серии KAI >0.99999)
Максимальный разбаланс выходного сигнала между каналами, %	10	10
Отклонение от пропорциональной зависимости сигнала от числа шагов накопления, %	1	-
ФПМ режима ВЗН (ФПМ движения изображения) на частоте Найквиста	0.955	0.637
Кратность антиблужинга	Нет а/б	300
Минимальное расстояние между фотозонами соседних матриц в гибридной сборке фокальной плоскости (топологически), мм	0.92	0.62

Второй недостаток – недостаточная регистровая частота строчно-кадровых ПЗС матриц. Так, для гипотетической ФПЗС, аналогичной KAI-2093M, но с размером элемента 6 мкм, максимальная кадровая частота составляет 30 к/с, что соответствует эффективной регистровой частоте 60 МГц, а время считывания кадра – 33 мс. Приняв, что число строк накопления должно быть равно 192, при скорости бега изображения 144 мм/с (соответствует строчной частоте 24 кГц) время

накопления составит 8 мс. Время пролета кадра (при перекрытии 25% - 810 строк, минус 192 строки на ВЗН, получаем 618 строк) составит 25 мс. Таким образом, на считывание остается 17 мс, что вдвое меньше требуемых 33 мс. В действительности же учет второстепенных факторов (перенос в вертикальный регистр, считывание темновых пикселей) делает ситуацию для строчно-кадровых ФПЗС еще хуже.

Данный недостаток является принципиальным, так как в строчно-кадровых ФПЗС периоды накопления и считывания все равно разнесены во времени, и считывание необходимо осуществлять за гораздо меньший промежуток времени (а значит с большей частотой, с большими шумами), по сравнению с ВЗН матрицами.

Третий недостаток строчно-кадровой матрицы – сравнительно низкая квантовая эффективность, также являющаяся следствием строчно-кадровой организации, поскольку чувствительный элемент – фотодиод – занимает лишь часть площади ячейки. Техническим решением, позволяющим существенно поднять квантовую эффективность, является формирование на поверхности кристалла ФПЗС микролинз, позволяющих собирать свет с большей части площади ячейки. Так, для модификации ФПЗС KAI-2093M квантовая эффективность η в максимуме составляет 44%, в то время как для модификации без линз (KAI-2093) – всего лишь 8%. Расплачиваться за такое повышение квантовой эффективности приходится повышенной неравномерностью чувствительности по полю матрицы, являющейся следствием наличия микролинз (как микро-, так и макронеравномерностью). В каталоге фирмы Kodak эта цифра вообще не приводится, однако приво-

дится зависимость квантовой эффективности от угла падения света, которая к тому же сильно отличается для вертикального и горизонтального направлений: в горизонтальном направлении при увеличении угла от нормали она падает значительно быстрее, чем в вертикальном. Из этого следует, что на краях длинной строки, собранной из нескольких матриц, при равномерной засветке сигнал будет существенно меньше, чем в центре фотозоны. Это не позволяет использовать ФПЗС с микролинзами в радиометрических системах. Зависимость квантовой эффективности от угла падения света для обоих направлений приведена на рис. 1.

Четвертый недостаток – спектральная характеристика строчно-кадровой матрицы имеет максимум на 490 нм, и основной вклад в сигнал дает сине-зеленая область. Это не оптимально для большинства систем ДЗЗ, в которых для панхроматического канала требуется (из-за сильного влияния дымки в синей области) спектральный диапазон 0.5 – 0.8 мкм. Спад в красной и ИК-области обусловлен наличием структуры вертикального антиблюминга, благодаря которой заряд, генерируемый длинноволновыми фотонами в глубине кремниевой подложки, стекает в сток антиблюминга, не попадая в потенциальную яму. Такая особенность, с одной

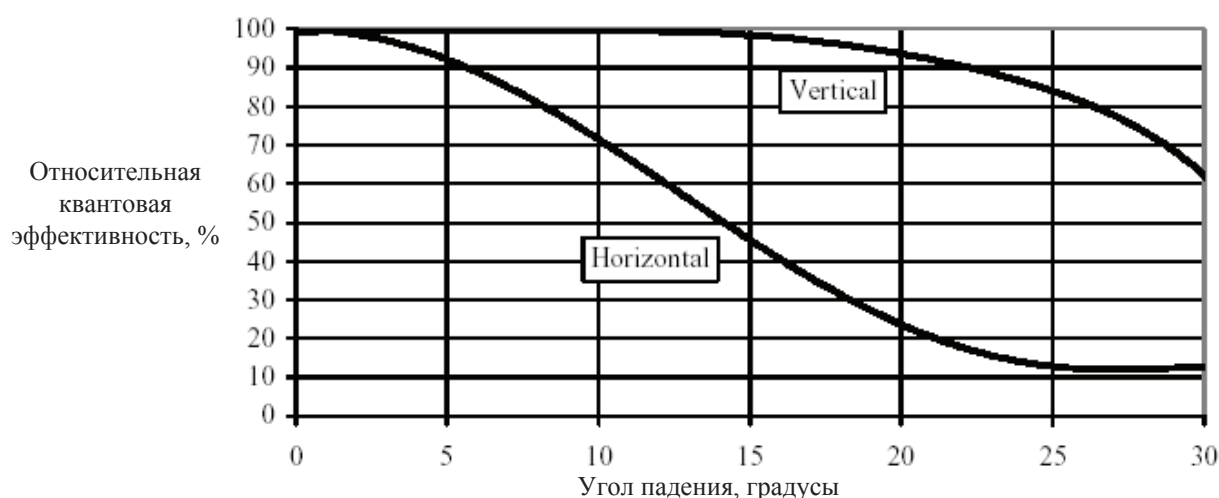


Рисунок 1.
Зависимость относительной квантовой эффективности ФПЗС KAI-2093M от угла падения света

стороны, улучшает ФПМ приемника (поскольку диффузионная компонента ФПМ вносит меньший вклад, чем в структурах без вертикального антиблужинга), но, с другой стороны, сильно снижает сигнал в панхроматической системе. По этой же причине такой приемник нельзя эффективно использовать и во многоспектральных системах, где обычно требуются красный и ближний ИК-каналы.

Это проиллюстрировано на рис. 2, где приведены графики спектральной квантовой

эффективности для ФПЗС КАИ-2093М (верхний график) и «Круиз-6» (нижний график). Двухнаправленной стрелкой показан рабочий спектральный диапазон ПХ канала.

Обращает на себя внимание, во первых, очень низкая квантовая эффективность строчно-кадровых ФПЗС без микролинз, а во вторых - очень неравномерное («треугольное») и неоптимальное распределение квантовой эффективности в рабочем спектральном диапазоне.

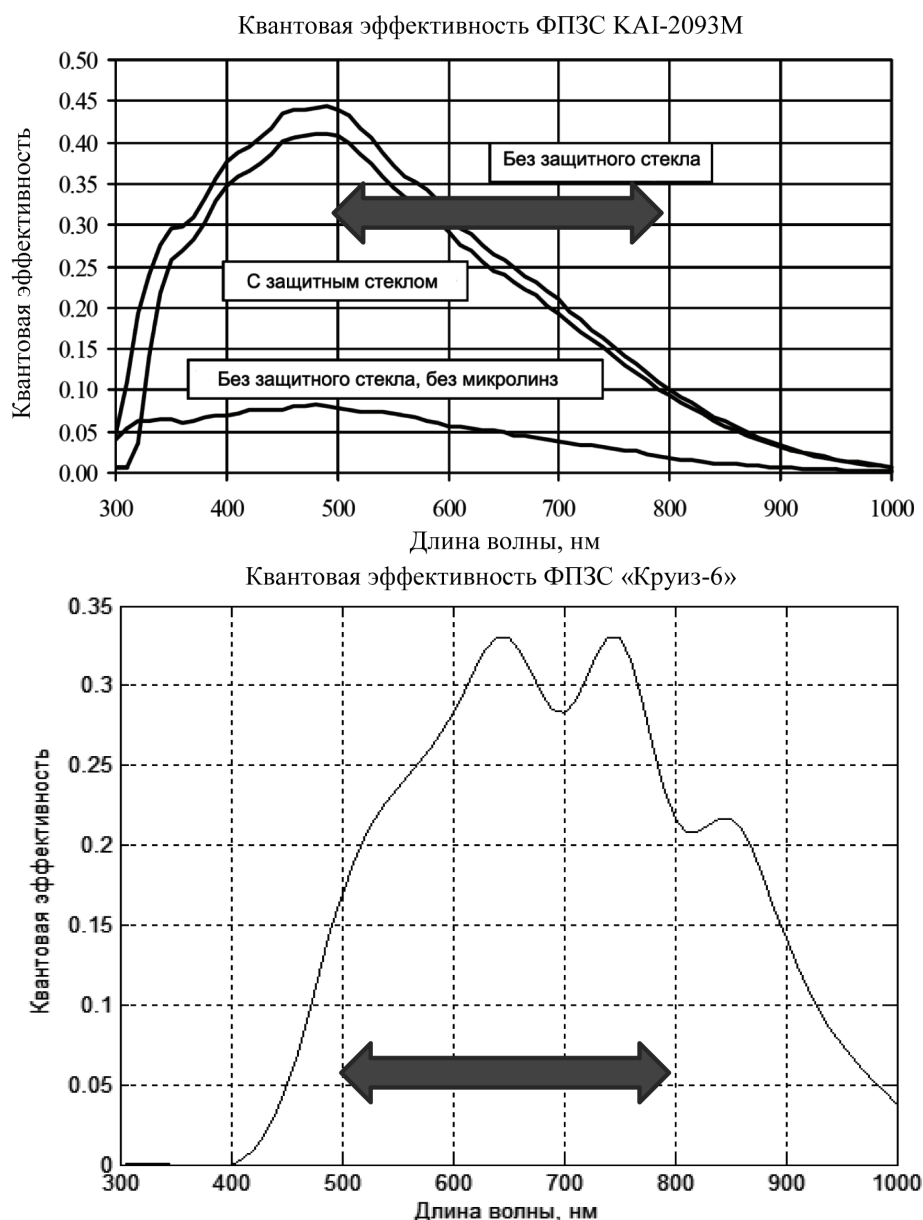


Рисунок 2.
Спектральная квантовая эффективность строчно-кадровой ФПЗС и ФПЗС ВЗН

Кроме того, учет того факта, что чувствительность ФПЗС пропорциональна произведению квантовой эффективности на длину волны, оказывается, что чувствительность ВЗН матриц в рабочем спектральном диапазоне на 9,6% выше, чем у строчно-кадровых матриц, несмотря на большую квантовую эффективность последних даже при использовании микролинз.

Пятым недостатком строчно-кадровой организации ФПЗС в применении к режиму ВЗН является сильное ухудшение ФПМ в направлении движения изображения. В режиме ВЗН всегда имеет место специфическое ухудшение ФПМ в направлении переноса заряда (по вертикали), обусловленное перемещением элемента изображения, формируемого оптической системой, относительно ф/ч элемента за время накопления сигнала. Этот эффект имеет место даже при идеальном согласовании скорости движения изображения и частоты переноса по вертикали. В случае строчно-кадровой матрицы зарядовые пакеты переносятся в следующий пиксел один раз за строку сразу на величину шага ячеек, а изображение в это время плавно перемещается в течение всего времени накопления. В результате возникает периодическое смещение между оптическим изображением и накопленным зарядом. Это приводит к появлению ФПМ дискретного перемещения заряда:

$$\Phi PM_{disc} = \sin(\pi \cdot \nu \cdot \frac{1}{n_\phi}) / (\pi \cdot \nu \cdot d \cdot \frac{1}{n_\phi})$$

где ν – пространственная частота,
 d – период расположения элементов,
 n_ϕ – число фаз вертикального переноса.
 Для строчно-кадровой матрицы $n=1$ (это

не зависит от числа фаз в вертикальном регистре, закрытом от света) и на частоте Найквиста имеем $\Phi PM_{disc}(\nu_H) = 0.637$.

Для матриц с организацией ВЗН ситуация лучше: движение заряда более близко к движению изображения. Для ФПЗС «Круиз-6» $n_\phi=4$ и $\Phi PM_{disc}(\nu_H) = 0.974$.

Шестым недостатком применения строчно-кадровой матрицы со структурой вертикального антиблэминга является дополнительное снижение эффективного динамического диапазона, поскольку за счет пространственных вариаций глубины залегания «р-кармана» по фотозоне ФПЗС различные пикселы входят в насыщение при разном уровне сигнала, и реально придется работать на уровне сигнала не более 0.8 – 0.9 от сигнала насыщения.

Седьмым недостатком является увеличение смазов, связанное с тем, что только ВЗН матрицы располагаются в меридиональной плоскости изображения, а строчно-кадровые матрицы, хотя бы в силу своего размера, оказываются за пределами меридиональной плоскости. При этом возникает существенная боковая составляющая вектора скорости движения изображения в верхних и нижних частях строчно-кадровой ПЗС матрицы, которую невозможно скомпенсировать. Особенно резко данный недостаток проявляется в системах с тангажным замедлением, в которых поле скоростей бега изображения носит резко неоднородный характер.

Таким образом, использование строчно-кадровых матриц в системах ДЗЗ нецелесообразно, так как по основным характеристиками они уступают матрицам ВЗН.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА НА ОСНОВЕ «КЛИНОВОГО» СВЕТОФИЛЬТРА

КВИТКА В.Е., КЛЮШНИКОВ М.В., КНЯЗЕВ А.Н., АЛАТОРЦЕВ В.Л., ГУЩИН Д.М.

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС», г. Зеленоград

E-mail: optecs@mail.ru

Ключевые слова: «клиновые» светофильтры, спектральные каналы, конструкция гиперспектрометра, угловое разрешение, калибровочные кривые, почленное домножение, программа обработки гиперкуба.

Для отработки новых технологий много-спектральной (гиперспектральной) съемки, а так же методов аттестации и обработки полученной информации в НПП «ОПТЭКС» выполнена работа по макетированию гиперспектрометра (ОЭА-ГС), который разрабатывался по Техническому заданию (ТЗ) АО РКЦ «Прогресс».

В соответствии с ТЗ, целенаправленно была выбрана функциональная схема построения гиперспектрометра с «клиновыми» светофильтрами (КСФ) – интерференционными светофильтрами с непрерывным пропусканием спектральных полос в определенном диапазоне спектра. Такие светофильтры позволяют получить на матричном фотоприемнике разбитое на спектральные полосы изображение объекта съемки без дополнительных диспергирующих элементов (спектральных призм и решеток).

Полосы пропускания в КСФ линейно зависят от координаты вдоль одной из сторон светофильтра. Кадры снимаются в режиме сканирования вдоль чередования полос и считываются последовательно, в результате за определенный промежуток времени формируется набор спектральных снимков, необходимых для получения стандартного куба данных X, Y, λ . Принцип работы КСФ приведен на рис. 1.

Основные преимущества предлагаемой схемы построения ГС – это создание большого количества спектральных каналов с шириной пропускания 5...7 нм в диапазоне длин волн 400...900 нм. ГС с клиновыми светофильтрами могут быть разработаны без подвижных узлов, они проще в сборке и юстировке [1], [2].

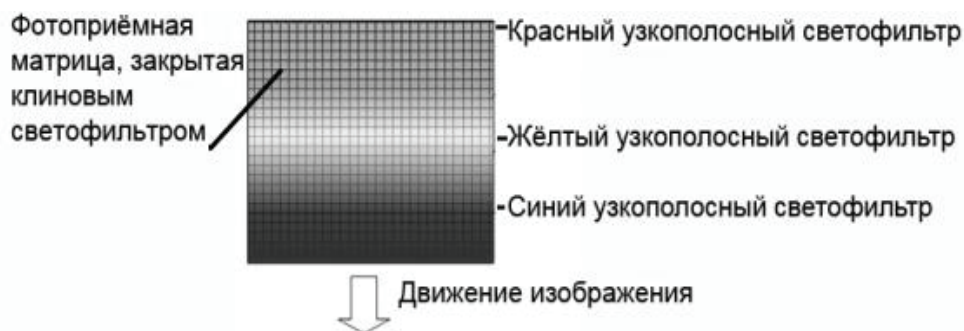


Рисунок 1

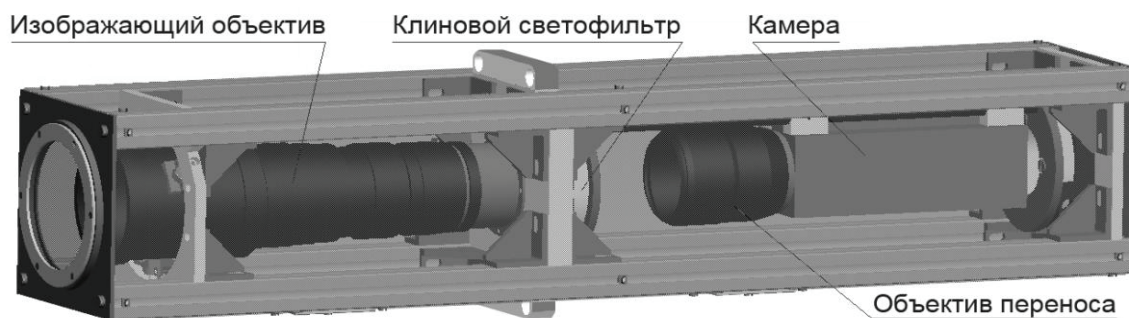


Рисунок 2

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАКЕТНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА ОЭА-ГС

Макетный образец ОЭА-ГС построен на основе высокоскоростной камеры «Fastvideo-500M» с КМОП-матрицей Lupa-1300-2 форматом 1280x1024 пикселя и размером пикселя 14x14мкм.

На рис. 2 показана конструкция гиперспектрального блока макета ОЭА-ГС, где КСФ расположен в фокальной плоскости изображающего объектива и совмещен с промежуточным изображением. Объектив камеры переносит промежуточное изображение в масштабе 1:1 на КМОП-матрицу. Для макетного образца ОЭА-ГС на фирме «ИЗОВАК» (Беларусь) были разработаны и изготовлены три клиновых светофильтра, так как оказалось проблематичным изготовить один светофильтр под определенный размер КМОП-матрицы с заданной шириной спектральных полос 7...10 нм для спектрального диапазона 410...900 нм. Полоса пропускания меняется вдоль длинной стороны КСФ. Габаритные размеры КСФ составляют 22x19x1.3 мм со световой зоной 17x14 мм. Перестановка светофильтров в макете осуществляется с помощью ручного механизма переключения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОЭА-ГС

Для определения технических характеристик ОЭА-ГС, отработки ПО и выявления замечаний к элементам конструкции, были проведены следующие исследовательские работы:

- проверка углового разрешения и углового поля зрения;
- определение повторяемости выставления положений КСФ;

- определение спектрального разрешения в спектральном диапазоне работы;
- определение чувствительности на определенной длине волны;
- определение неравномерности чувствительности по полю кадра;
- получение последовательности кадров и отработка программного обеспечения для получения гиперспектральных кадров.

Проверка углового разрешения и углового поля зрения проведена стандартным способом на оптической скамье типа ОСК-2. Для исследования использовалась мишень из состава коллиматора скамьи и углоповоротный стол. Угловое поле зрения макета - $1,95^\circ \times 2,44^\circ$.

Исследование повторяемости выставления и определение спектрального разрешения КСФ проводились на монохроматоре. Были получены калибровочные кривые - зависимости центра полосы пропускания от номера столбца кадра, показанные на рис. 3.

При переключении светофильтров возникает небольшой разброс в их установке, обусловленный люфтом в механизме держателя КСФ. Это смещение приводит к погрешности определения центра полосы пропускания.

В табл. 1 приведены результаты обработки серии снимков с фиксацией положений одной спектральной полосы в кадре.

Исследования чувствительности и её неравномерности по полю кадра проводились с использованием световой интегрирующей сферы. На входное окно ОЭА-ГС устанавливался светофильтр с полосой пропускания 700 ± 5 нм. По серии снятых с разной экспозицией кадров была определена чувствительность 230 АЦП/(Вт/м²) на длине волны 700 нм.

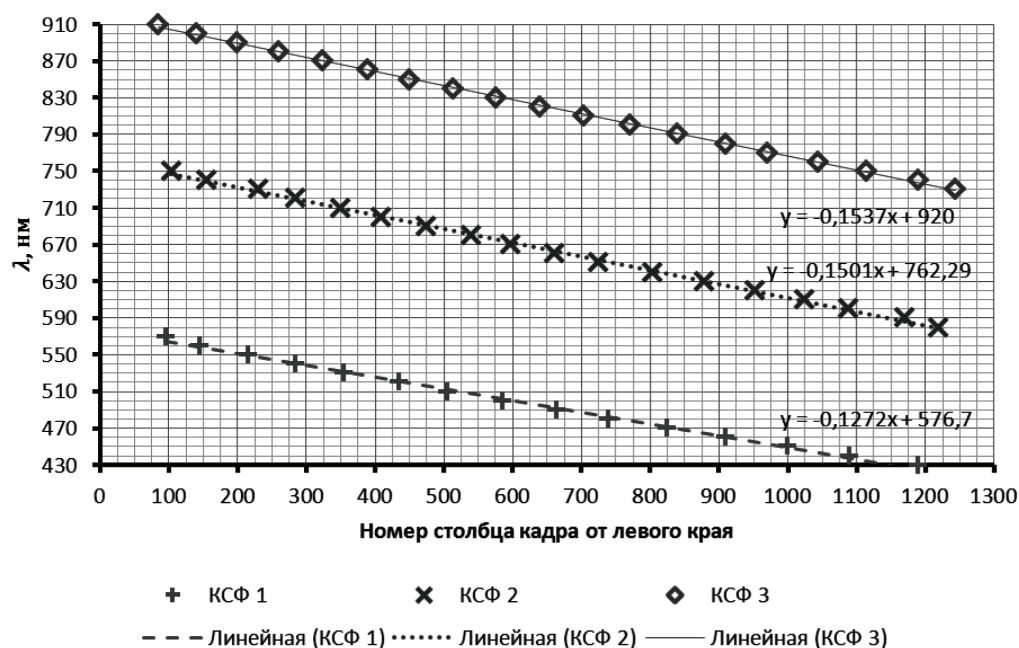


Рисунок 3

Неравномерность чувствительности по полю кадра изучалась по снимкам равномерного поля световой сферы с разными КСФ (рис. 4, 5, 6).

Видно, что в макетном приборе имеются неравномерности спектральной чувствительности, обусловленные дефектами светофильтров, колебаниями спектральных зависимостей квантовой эффективности ФПЗС и коэффициента пропускания светофильтра. Была опробована методика «Устранения неравномерности спектральной чувствительности», где считаем, что для идеальной ги-

перспектральной системы кадр равномерной засветки входного окна, нормированный на спектральную яркость лампы интегральной сферы (далее - ЛКРЗ), будет иметь вид серого прямоугольника. Вид ЛКРЗ для КСФ1 и его горизонтальный профиль приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Устранение этой неравномерности возможно после почленного домножения ЛКРЗ на калибровочную матрицу В размером 1280x1024, которая описывается формулой (1):

$$B_{ij} = \frac{\max(A)}{A_{ij}}$$

Таблица 1.

Основные характеристики гиперспектрометра ОЭА-ГС

Тип клинового светофильтра (КСФ)	КСФ 1	КСФ 2	КСФ 3
Полоса пропускания, [нм]	430-563	583-750	736-908
Количество спектральных зон	16	22	22
Ширина полосы пропускания в зоне, [нм]	9	8	8,2
Ширина спектральной зоны, [пикселей]	71	53	53
Градиент полосы пропускания КСФ, [нм/пиксель]	0,13	0,15	0,16
Погрешность установки полосы пропускания светофильтров, [нм]	±0,25	±0,18	±1,21
Предельное угловое разрешение ОЭА-ГС	7,7''	7,25''	8,15''



Рисунок 4.
КСФ1

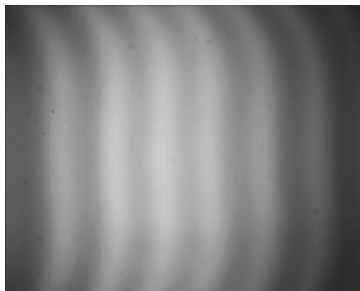


Рисунок 5.
КСФ2

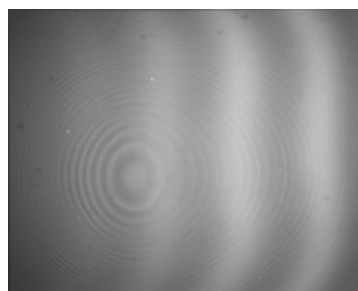


Рисунок 6.
КСФ3

Где $\max(A)$ – элемент матрицы A , описывает самый яркий пиксель ЛКРЗ.

Полученную по формуле (1) калибровочную матрицу B применили для выравнивания первичных снимков.

На рис. 9 показан исходный снимок белой стены и синего автомобиля, а на рис. 10 – снимок, выровненный почленным домножением на калибровочную матрицу B . Верхние края кадров соответствуют длине волны 430 нм, нижние – 563 нм.

Получение последовательности кадров проводилось с помощью сканирующей платформы. Были проведены пробные съёмки объектов с ярко выраженными спектральными характеристиками. Для обработки снимков и получения гиперкуба была написана Программа обработки (ПО) на языке C++. Снятые при сканировании видеосюжеты, сохранённые в формате .fvlab, загружались в приложение, где производился выбор кадров для создания гиперкуба. Далее создавался многослойный снимок в формате .tiff, каждый слой которого соответствует узкой спек-

тральной полосе. Каждый слой гиперкуба можно сохранять как отдельное изображение в градациях серого или в цвете, соответствующем длине волны. На рис. 11 и 12 показаны примеры слоёв гиперкуба, где красный автомобиль (в центре каждого кадра) изображен для длин волн 612 нм и 715 нм соответственно. Каждый слой гиперкуба сшит с помощью ПО из нескольких горизонтальных полос, взятых из разных первичных снимков и соответствующих одной спектральной зоне светофильтра.

При обработке изображений, полученных с помощью ОЭА-ГС, для каждого пикселя изображения определяется спектр отражённого от объекта съёмки солнечного излучения. Далее можно установить спектральную зависимость альбедо объекта съёмки и провести его классификацию [3].

Анализируя многослойные изображения, были построены спектральные профили синего и красного автомобилей, (рис. 13), а также проведено восстановление их цветных изображений путем сложения окрашенных



Рисунок 7



Рисунок 8



Рисунок 9



Рисунок 11.
 $\lambda = 612 \text{ нм}$



Рисунок 10



Рисунок 12.
 $\lambda = 715 \text{ нм}$

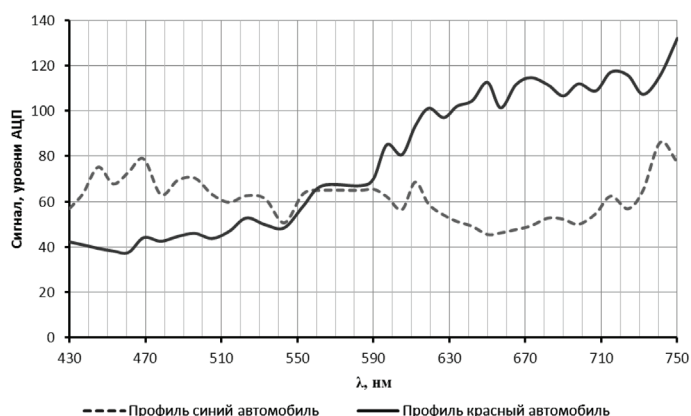


Рисунок 13.
**Спектральные профили синего
и красного автомобилей**

слоев гиперкуба, соответствующих длинам волн RGB фильтров.

Список литературы:

1. Квитка В.Е., Ключников М.В., Князев А.Н., Бунтов Г.В.. Расчёт параметров гиперспектрометра на основе клинового светофильтра. Труды 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со

дня рождения П. Л. Капицы. Аэрофизика и космические исследования.

2. Губанова Л.А. Градиентные интерференционные системы. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. СПб, ЛИТМО, 2008.

3. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 234 с.

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

АБРАМОВ А.И., ИВАНОВ Б.Б., СТАРКИН Ю.А., ТАРАСОВ П.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: laser@zenit-kmz.ru, yuranyh@gmail.com

В статье рассмотрены различные варианты построения датчиков лазерного излучения, применяемых в комплексах оптико-электронного противодействия, устанавливаемых на объектах военной техники. Для расширения спектрального диапазона датчиков предложено использовать охлаждаемые приемники оптического излучения на основе фоторезистивной структуры КРТ. Отмечена актуальность поисков путей создания датчиков для обнаружения излучения лучевых каналов управления и «полупроводниковых» дальномеров.

Ключевые слова: лазер, дальномер, обнаружение, датчик лазерного излучения.

Лазерные дальномеры начали устанавливаться на объекты военной техники в 60-х годах прошлого века. Благодаря существенным преимуществам по сравнению с ранее применяемыми «внутрибазовыми» оптическими дальномерами: малым временем измерения и высокой точностью, они нашли широкое применение. Но при работе лазерного дальномера возникает демаскирующий признак – наличие лазерного излучения в районе лоцируемого объекта. Практически сразу же начали разрабатываться системы оповещения экипажа объекта военной техники, предназначенные для определения факта лазерного облучения, координат и типа источника излучения (дальномера или целеуказателя). Получив информацию, экипаж может предпринять действия, снижающие вероятность поражения объекта: совершить маневр, использовать естественные укрытия, повернуть башню в сторону излучателя, создать задымление, включить устройство для создания помех и т.д.

Если считать коэффициент диффузного отражения объекта равным 0,3, расстояние между дальномером и объектом 4000 метров, а линейный размер сечения пучка

лазерного излучения в районе объекта порядка 1,5 метра, то при расчете отношения плотности энергии лазерного излучения на входе дальномера к соответствующему параметру в плоскости объекта составит порядка $3 \cdot 10^{-9}$.

Таким образом, требования к приемнику датчика лазерного излучения (ДЛИ), входящему в состав системы оповещения, существенно ниже, чем к приемнику дальномера. Но следует учитывать, что в приемнике ДЛИ нельзя организовать стробирование, он имеет большое угловое поле, работает в условиях высоких внешних засветок (в том числе модулированных) и значительных механических и климатических воздействий, так как обычно располагается снаружи объекта. Поэтому, при создании ДЛИ приходится решить сложные схемно-конструктивные задачи.

К настоящему времени разработано большое число систем для обнаружения лазерного излучения, подробная информация о которых содержится в обзорах [1-8]. Отечественными предприятиями в 80-е годы был создан комплекс оптико-электронного подавления «Штора-1» [9], принятый на

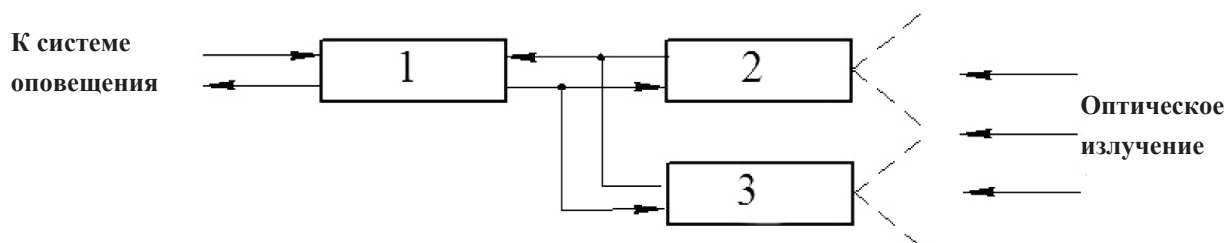


Рисунок 1.

Структурная схема приемного устройства ДЛИ:

1 – электронная аппаратура обработки сигналов;

2 – приемный канал видимого и ближнего инфракрасного диапазонов;

3 – приемный канал длинноволнового оптического диапазона

вооружение Российской армии и обеспечивающий противодействие оружию с лазерными дальномерами и целеуказателями.

Спектральный диапазон чувствительности ДЛИ, примененных в комплексе «Штора-1», как и в большинстве зарубежных датчиков, составляет от 0,65 до 1,6 мкм. На сегодняшний день имеется информация, что в системах управления американского танка Абрамс М1А2, южнокорейского танка К1/88, американского экспериментального легкого танка HSTV-L и ряда других объектов военной техники применены лазерные дальномеры, выполненные на основе двуокиси углерода и работающие на длине волны ~10,6 мкм [10-12]. В настоящее время серийные ДЛИ, обеспечивающие регистрацию излучения на этой длине волны, применены только в польской системе обнаружения лазерного излучения и защиты SSC-1 OBRA [6].

В статье [7] рассмотрены некоторые способы расширения спектрального диапазона ДЛИ:

- использование матричных фотоприемников на основе соединений «кадмий-ртуть-теллур» (КРТ), а также других матричных приемников излучения;
- применение неохлаждаемых фотоприемных устройств на базе микроболометров;
- прием оптического излучения пироэлектрическими устройствами.

С учетом опыта разработки ДЛИ для комплекса «Штора-1», представляется возможным решить данную проблему путем применения охлаждаемого резистивного приемника излучения на основе КРТ, с топологией чувствительной площадки, соответствующей коду Грея. Теоретически могут быть реализованы два варианта построения приемного устройства ДЛИ:

- на основе одного широкоспектрального приемника оптического излучения;
- на основе двух приемников оптического излучения, один из которых обеспечивает прием сигналов в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, а второй – в остальной части спектрального диапазона регистрируемого лазерного излучения.

Анализ показал, что в настоящее время отсутствуют оптические материалы с необходимыми эксплуатационными характеристиками, пригодные для изготовления оптических элементов (линз и защитных стекол) ДЛИ и имеющие высокие коэффициенты пропускания в спектральном диапазоне от видимого (0,53 мкм) до дальнего инфракрасного (12 мкм). Более приемлем второй вариант построения приемного устройства (с двумя приемниками излучения), структурная схема которого показана на рис. 1.

В приемном канале видимого и ближнего инфракрасного диапазонов может быть ис-

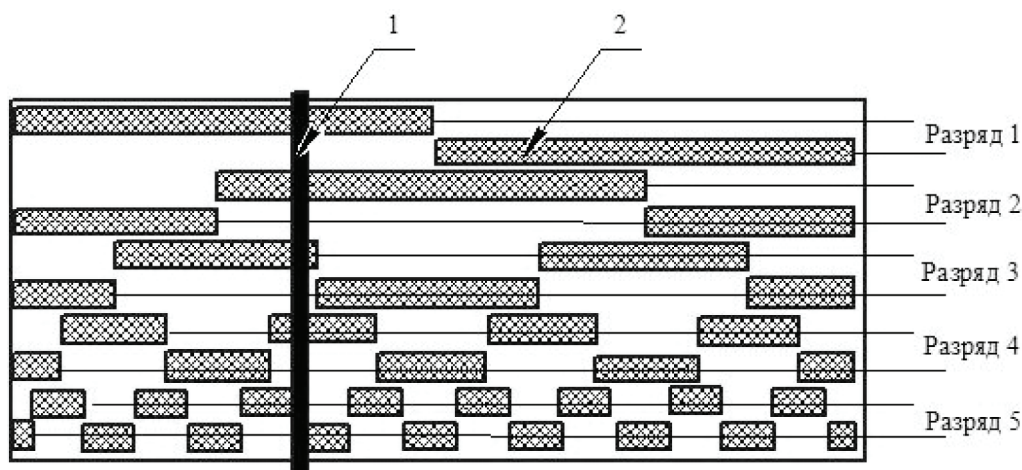


Рисунок 2.

К принципу определения угловой координаты источника излучения.

1 – полоса оптического излучения;

2 – чувствительная область приемника излучения

пользован германиевый многоэлементный фотодиод типа ФД246 [13], а в приемном канале длинноволнового диапазона - охлаждаемый многоэлементный приемник излучения (МПИ) на основе фоторезистивной структуры КРТ.

Топология чувствительной области (рис. 2) одинакова в обоих приемниках (штриховкой показаны участки приемника, не закрытые непрозрачной маской). Если указанная область располагается в фокальной плоскости цилиндрического объектива, то при изменении углового положения (в горизонтальной плоскости) источника из-

лучения относительно оптической оси объектива изображение источника (полоса оптического излучения) будет перемещаться в направлении, перпендикулярном длинной стороне площадки приемника излучения. На выходе приемника будет формироваться комбинация электрических сигналов с различных разрядов приемника, соответствующая параллельному двоичному коду Грея и обеспечивающая однозначное определение направления на источник излучения.

Вариант функциональной схемы электронной аппаратуры обработки сигналов показан на рис. 3.



Рисунок 3.

Функциональная схема платы обработки сигналов:

A1 – программируемый цифровой вычислитель; A2, A3 – аналого-цифровые преобразователи; Z1, Z2- полосовые фильтры; D1 - схема «И-НЕ»

При наличии в поле зрения ДЛИ дальномера или целеуказателя, излучающего импульс (последовательность импульсов), изображение источника излучения будет сфокусировано на чувствительной области фотодиода ФД246 (для видимого и ближнего инфракрасного спектральных диапазонов) или МПИ (для среднего и дальнего спектральных диапазонов).

Если рабочая плотность энергии импульса лазерного излучения на входном окне ДЛИ превысит минимально регистрируемое значение, то на выходе приемника излучения возникнет набор импульсных сигналов. После прохождения сигналов через полосовые фильтры и аналого-цифровые преобразователи они будут преобразованы в цифровые коды, передаваемые в систему оповещения.

Для исключения возможности срабатывания ДЛИ от широкополосной помехи (модулированной солнечной засветки, вспышек от выстрелов и т.п.) в схему введена схема «И-НЕ», которая формирует запрет на проведении вычисления при наличии сигналов, принимаемых одновременно каналами фотодиода ФД246 и МПИ [14].

Таким образом, существует реальный путь обнаружения лазерного излучения во всем спектральном диапазоне существующих лазеров.

Система оповещения, в состав которой входит одно или несколько рассмотренных выше ДЛИ, обеспечивает защиту:

- от артиллерийского вооружения, имеющего систему управления огнем с лазерным дальномером;
- от противотанковых управляемых ракет, использующих лазерную подсветку цели;
- от противотанковых управляемых ракет с полуавтоматической командной системой наведения.

Существенным недостатком такой системы является отсутствие функции обнаружения объектов, осуществляющих наведе-

ние ракет по лазерному лучу, например ракет 9M117 «Бастия», MAPATS (Израиль) и т.п. Как следует из [6], эта опция реализована лишь в датчиках фирмы Goodrich Co (США), LWS-200/300CV фирмы Avitronics (ЮАР) и в системе обнаружения лазерного излучения RALM02/V2 фирмы Marconi Communications (Италия).

Кроме того, в последние годы наблюдается существенное повышение параметров дальномеров на основе полупроводниковых лазеров. Так, дальность действия дальномерного модуля LRF5042 фирмы Vectronix (Швейцария) достигает 8000 м, при расходимости пучка излучения порядка 1 мрад [15]. Хотя информация об установке подобных дальномеров в системы управления огнем военной техники отсутствует, такая возможность не исключена в будущем.

Мощность лазерного излучения большинства «полупроводниковых» дальномеров не превышает 50...100 Вт при длительности импульса излучения 30...100 нс, т.е. энергия лазерного импульса не более 10-5 Дж.

Если образец ДЛИ рассчитан на обнаружение лазерного излучения дальномера с энергией импульса 10-2 Дж на расстоянии 5000 м, то излучение «полупроводникового» дальномера будет обнаружено на расстоянии, не превышающем 10 метров. Но «полупроводниковый» дальномер излучает, как правило, серию импульсов и эта особенность может быть учтена при создании соответствующей системы оповещения о лазерном облучении.

Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время существуют технические возможности обнаружения источников лазерного излучения во всем спектральном диапазоне, актуальными представляются поиски путей создания эффективных систем обнаружения излучения лучевых каналов управления, а также излучения «полупроводниковых» дальномеров.

Список литературы:

1. Алешин А. Средства обнаружения источников лазерного излучения // Зарубежное военное обозрение. 1995. №2. С. 48–52.
2. Ольгин С. Проблемы оптоэлектронного противодействия // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 9. С. 35-41.
3. Ogorkiewicz R.M. Detection and Obscuration Counter Anti-Armor Weapons. Development of active protection systems for combat vehicles is slowly gathering momentum // Jane's International Defense Review. January 2003. P. 49-53.
4. Огоркевич Р.М. Обнаружение противотанковых средств и противодействие им [Электронный ресурс]. URL:[http:// btvt.narod.ru/ 4/koep.htm](http://btvt.narod.ru/4/koep.htm) (дата обращения 08.10.2015).
5. Разработка систем активной защиты бронетехники [Электронный ресурс]. URL: [http://arrows.newmail.ru/ defense_tank.htm](http://arrows.newmail.ru/defense_tank.htm) (дата обращения 08.07.2015).
6. Глебов В.В. Основные проблемы и направления развития защиты боевых бронированных машин с использованием систем обнаружения электромагнитного излучения // Транспортне машинобудування. Механіка та машинобудування. Харьков: издательство ХПИ. 2012. №2. С. 84-98.
7. О возможности создания индикаторов лазерного излучения с качественно новыми характеристиками / И.И Васильченко и др. // Радіоелектроні і комп'ютерні системи: Харьков: издательство ХАИ. 2013. № 1. С.15-22.
8. Российские средства и способы радиоэлектронной борьбы в интересах защиты бронетанковых машин [Электронный ресурс]. URL:http://www.hadmernok.hu/142_32_vanyal.pdf (дата обращения 08.07.2015).
9. Комплекс оптико-электронного подавления «Штора-1» [Электронный ресурс]. URL: <http://btvt.narod.ru/4/shtora1/shtora1.htm> (дата обращения 09.07.2015).
10. Кораблин В. Системы управления огнём современных танков и боевых машин пехоты // Зарубежное военное обозрение. 2001. № 5. С. 37– 40.
11. Суворов С. Системы управления огнем танков и БМП // Техника и вооружение. 2004. №12. С. 24–26.
12. Холявский Г.Л. Полная энциклопедия танков мира 1915-2000 г.г. Минск: Харвест. 2002. 603 с.
13. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь. 1987. С. 54.
14. Абрамов А.И., Зборовский А.А., Иванов Б.Б. Устройство пеленгации точечного источника излучения. Патент РФ на полезную модель № 144121 с приоритетом от 27.02.2014, МКИ G01S 3/78.
15. Vectronix A G. Rangefinding [Электронный ресурс]. URL: [http:// vectronix.ch/integration/en/rangefinding/general/rangefinding/standard-solutions](http://vectronix.ch/integration/en/rangefinding/general/rangefinding/standard-solutions). (дата обращения 10.07.2015).

БОКШАНСКИЙ В.Б.

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», г. Москва

E-mail: info@ciclone-jsc.ru

ОАО «ЦНИИ «Циклон» - это крупное научно-производственное предприятие, известное своими наукоемкими разработками и продукцией, как в нашей стране, так и за рубежом. Предприятие обладает полным замкнутым циклом разработки и производства широкой гаммы оптико-электронных систем технического зрения: тепловизионных, низкоуровневых телевизионных, а также комплексированных многоспектральных устройств, работающих на новых физических принципах и материалах, являясь при этом единственным сертифицированным в России разработчиком и производителем неохлаждаемых тепловизоров и систем на их основе.

В настоящее время ОАО «ЦНИИ «Циклон» проводит масштабные работы в области реконструкции и создания уникальных импортозамещающих производств охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемных устройств, а также завершает отработку технологии серийного производства современных микродисплеев на основе излучающих органических светодиодов (уникальное четвертое в мире производство), что дает нашему институту возможность в лицензированной передаче технологий производства и создание промышленных предприятий с нуля.

Вся линейка выпускаемых ОАО «ЦНИИ «Циклон» тепловизоров является инновационной импортозамещающей продукцией по своим тактико-техническим характеристикам, соответствующая лучшим образцам передовых мировых производителей тепловизионных изделий.

ОАО «ЦНИИ «Циклон», как центральный научно-исследовательский институт выполняет НИР и ОКР направленные на разработку и постановку на производство по темам:

- Неохлаждаемые микроболометрические матрицы
- Охлаждаемые матрицы на квантовых ямах
- Охлаждаемые приемные устрой
- Изделия по заданным параметрам на охлаждаемых и неохлаждаемых устройствах
- Гиростабилизированные платформы
- Лазерная дальнометрия

В процессе проведения ОКР по созданию тепловизионных, телевизионных и комплексных многоспектральных систем ОАО «ЦНИИ «Циклон» является разработчиком алгоритмов и программного обеспечения для выполнения задач поставленных заказчиком для изделий воздушного и наземного базирования.

Гиростабилизированные платформы с электронной стабилизацией используются в комплексе оптико-электронных устройств для летательных аппаратов с целью компенсации возмущающего воздействия типа БПЛА, вертолетов, и.т.д..

Так же институт обладает опытом разработки и постановки на производство головок самонаведения работающие по принципу тепло-телевизионного захвата.

ОАО «ЦНИИ «Циклон» проводит масштабные работы в области создания и производства современных оптико-электронных систем и приборов, в том числе, основанных на новых физических принципах,

адаптированных под требования конкретного заказчика. К числу приоритетных направлений в этой области относятся:

- разработка и производство носимых тепловизионных приборов наблюдения и прицелов для стрелкового оружия и средств ближнего боя для современной боевой экипировки, сложноконструированных и многоспектральных «интеллектуальных» оптико-электронных систем и приборов, работающих в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах, для бортовых систем разведки и управления огнем, ДПЛА, ГСН и др.;

- разработка и производство матричных фотоприёмных устройств и модулей на базе микроболометров и многослойных структур с квантовыми ямами, работающих в инфракрасном диапазоне спектра для комплектования приборов и систем собственного производства, а также для поставки ряду ведущих отечественных предприятий оптико-электронной промышленности в обеспечение комплектования прицелов и визиров переносных и мобильных ЗРК, приборов вождения автобронетанковой техники, пилотирования вертолетов и судовождения надводных кораблей;

- серийное производство микродисплеев на органических светоизлучающих диодах (OLED);

- организация серийного производства микроболометрических матриц формата 160×120, 384×288, 640×480 и 1280×960;

- расчёт, проектирование и выпуск специализированной оптики и оптических систем видимого и ИК-диапазонов, проектирование БИС и электронных схем обработки информации типа «система на кристалле», разработка миниатюрных средств отображения информации с применением микродисплеев на базе органических светоизлучающих диодов;

- разработка и производство оптических систем и отдельных компонентов, работающих в спектральном диапазоне от 0,2 до 14 мкм, в том числе, асферических дифракционных компонентов, изготовленных методами алмазного точения;

- органические оптоэлектроника и микроэлектроника на базе электро- и фотоактивных органических и полимерных материалов, включая неорганические наноматериалы;

- сертификация ЭКБ для аппаратуры комплексов космического базирования, а также используемых в сложных условиях, в том числе для перспективных систем технического зрения в робототехнических комплексах нового поколения.

На основе разработанных институтом тепловизионных и низкоуровневых телевизионных модулей создан ряд систем, комплексов и приборов различного назначения, работающих в широком диапазоне видимого и ИК излучений, обладающих дифракционным качеством изображений.

Комплекс опытно-конструкторских работ по реализации мероприятий российской части научно-технической программы Союзного государства: «Разработка современной и перспективной технологии создания в государствах-участниках Союзного государства тепловизионной техники специального и двойного назначения на базе фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона третьего поколения» («Союзный тепловизор»).

Научно-техническая программа Союзного государства «Союзный тепловизор» утверждена постановлением Совета Министров Союзного государства от 12 декабря 2012 года № 45.

- Заказчик российской части: *Минпромторг РФ (Департамент радиоэлектронной промышленности)*.

- Срок выполнения: *2013-2016 гг.*

- Головная организация от РФ: *ОАО «ЦНИИ «Циклон»*.

- Разрабатываются: *3 типа неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников (640x480, 320x240 и 160x120 элементов с шагом элементов 25 мкм) и 2 типа охлаждаемых матричных приемников на основе структур с квантовыми ямами (640x512 и 384x288 элементов с шагом элементов 20 мкм).*

КООПЕРАЦИЯ:

По неохлаждаемым матричным микроболометрическим приемникам:

- БИС мультиплексора (3 типа) – НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь;

- керамические вакуумноплотные корпуса – ОАО «МЗ «Сапфир» (в настоящее время ОАО «Швабе-Фотосистемы»), г. Москва;

- формирование чувствительных слоев, сборка и тестирование готовых изделий – ОАО «ЦНИИ «Циклон», г. Москва.

По охлаждаемым матричным приемникам на основе структур с квантовыми ямами:

- БИС мультиплексора (2 типа) – НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл» – управляющая компания ОАО «Интеграл», г. Минск, Республика Беларусь;

- вакуумноплотные корпуса-криостаты – ОАО «МЗ «Сапфир» (в настоящее время ОАО «Швабе-Фотосистемы»), г. Москва;

- микрокриогенные системы охлаждения – ООО «НТК «Криогенная техника», г. Омск;

- формирование чувствительных слоев – ОАО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург;

сборка и тестирование готовых изделий – ОАО «ЦНИИ «Циклон», г. Москва.

ЗАМЕЩЕНИЕ ИМПОРТА ДЛЯ СИЛОВЫХ СТРУКТУР

Тепловизионный прицел «Шахин» и его модификации

Тепловизионный прицел «Шахин» предназначен для обнаружения и распознавания целей по тепловому контрасту, а также ведения прицельной стрельбы в дневных и ночных условиях, в том числе в полной темноте, в условиях задымления и тумана из стрелкового оружия нормального и крупного калибра (автомат, винтовка, пулемет).

Прицел имеет варианты модификации «Шахин 002», «Шахин 002-01», «Шахин 002-02». Тактико-технические характеристики вариантов модификации тепловизионного прицела «Шахин» представлены в табл. 1.

Прицел «Шахин» является неохлаждаемым пассивным тепловизионным прибором, не требующим для работы дополнительных искусственных источников подсветки цели. Он работает в спектральном диапазоне 8-12,5 мкм, что обеспечивает возможность ведения прицельной стрельбы из стрелкового оружия круглые сутки и в условиях пылевых помех, возникающих на поле боя.

Прицел предназначен для установки и использования совместно со всеми модификациями автоматов Калашникова и Никонова АН-94, снайперской винтовкой СВД,



Шахин 002



Шахин 002-01



Шахин 002-02

Таблица 1.
Тактико-технические характеристики

Наименование характеристики	Варианты исполнения прицела		
	«Шахин 002»	«Шахин 002-01»	«Шахин 002-02»
Характеристики			
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8 – 12,5	8 – 12,5	8 – 12,5
Размер пикселя, мкм	35	25	17
Формат микроболометрической матрицы, пикс	160 × 120	384 × 288	640 × 480
Частота кадров, гц	25	25	25
Фокусное расстояние объектива, мм	71,4	75	34
Дальность обнаружения ростовой фигуры человека (1,7 м) днём и ночью, не менее, м	650	1 200	650
Угловое поле зрения не менее, град	5,2 × 3,7	7 × 5	18 × 13,5
Масса прицела, кг:			
- с боковым кронштейном («ласточкин хвост») с элементами питания	1,7	1,7	1,3
- с верхним кронштейном (планка «Пикатинни») с элементами питания	1,5	1,5	1,1
Элементы питания	4 × CR123	4 × CR123	4 × CR123
Рабочая температура, °С	-40...+50	-40...+50	-40...+50
Время непрерывной работы прицела от элементов питания при температуре окружающей среды плюс 20 °С, не менее, ч:	4	4	6
Особенности			
Цифровой зум	–	–	2×, 4×
Режимы отображения изображения «негатив/позитив» (белый горячий/тёмный горячий)	+	+	+
Хранение баллистик (зависимостей положения прицельной сетки от выбранной дальности стрельбы, для выбранного типа патрона/оружия)	+	+	+
«Горячие» кнопки для быстрого выполнения некоторых функций (например, масштабирования)	–	–	+
Устойчивость к ударным механическим нагрузкам	+	+	+
Плавная регулировка яркости дисплея	+	+	+
Наличие видеовыхода PAL	+	+	+
Тип кронштейна для крепления на оружие:			
- боковой (типа «ласточкин хвост»)	+	+	+
- верхний (планка «Пикатинни»)	+	+	+
Возможность подключения выносного батарейного отсека	+	+	+
Тип видеоотображающего устройства (микродисплея)	OLED (органический светоизлучающий дисплей) 800 × 600 пиксел. Размер пиксела 15 мкм		

СВ-98, едиными пулемётами ПКМ и «Печенег», а также крупнокалиберными снайперскими винтовками и пулеметами «Корд».

Прицелы поставляются в комплекте с одним из двух кронштейнов – для крепления на оружии, оснащённом боковой планкой (типа «ласточкин хвост») или оснащённом креплением верхнего типа – на планке «Пикатинни».

Ввод углов прицеливания в память прицела осуществляется на заводе-изготовителе в соответствии с требованиями Заказчика. Значения углов прицеливания в памяти прицела соответствуют табличным значениям углов для вида оружия, с которым прицел эксплуатируется в боевых условиях. Энергонезависимая память прицела допускает введение не менее пяти дополнительных баллистик.

В результате сопряжения с комплексом разведки, управления и связи (КРУС) из состава «Комплекта боевой экипировки военнослужащего 6Б» (КБЭ 6Б) прицелы

позволяют осуществлять передачу видеоданных о разведанных целях (объектах) на многофункциональный информационный комплекс командира в режиме реального времени.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ОПЕРЕЖЕНИЯ И ЗАМЕЩЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ

Тепловизионный прицел «САРМАТ»

Серия тепловизионных прицелов «САРМАТ» разработана с целью оптимизации конструкции существующих тепловизионных прицелов для стрелкового оружия. Оригинальная оптическая схема объектива и окуляра позволила существенно уменьшить массу и габаритные размеры прицелов. Разработаны три модификации прицела: «САРМАТ-1», «САРМАТ-2» и «САРМАТ-3». Основные технические характеристики тепловизионных прицелов представлены в табл. 2.

В прицелах применен отечественный «полноцветный» микродисплей формата 852х600 с яркостью белого цвета не менее 70 кд/м², собственной яркостной контрастностью 100:1 отн.ед, что позволило существенно повысить четкость изображения наблюдаемых целей за счет увеличения их теплового контраста. «Полноцветный» микродисплей позволяет работать как с монохромным термальным изображением, так и с цветным, с привязкой температурного контраста целей к определенным цветам. Для удобства работы оператора возможно применение цветных прицельных марок и индикаторов.



***Варианты исполнения прицела
«САРМАТ-1», «САРМАТ-2», «САРМАТ-3»***



***Внешний вид тепло-телевизионных прицелов
«Лунь-В1» и «Лунь-В2»***

Таблица 2.
Технические характеристики

Наименование характеристики	Варианты исполнения прицела		
	«САРМАТ-1»	«САРМАТ-2»	«САРМАТ-3»
Характеристики			
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8 – 12,5	8 – 12,5	8 – 12,5
Размер пикселя, мкм	17	17	17
Формат микроболометрической матрицы, пикс	640 × 480	640 × 480	640 × 480
Частота кадров, гц	25	25	25
Фокусное расстояние объектива, мм	51	68	85
Дальность обнаружения ростовой фигуры человека (1,7 м) днём и ночью, не менее, м	800	1100	1400
Угловое поле зрения не менее, град	12,1х9,1	9,1х6,8	7,3х5,4
Элементы питания	2 × CR123	2 × CR123	2 × CR123
Рабочая температура, °С	-40...+50	-40...+50	-40...+50
Время непрерывной работы прицела от элементов питания при температуре окружающей среды плюс 20 °С, не менее, ч:	4	4	4
Цифровой зум	2×	2×	2×
Режимы отображения изображения «негатив/ позитив» (белый горячий/ тёмный горячий)	+	+	+
Хранение баллистик (зависимостей положения прицельной сетки от выбранной дальности стрельбы, для выбранного типа патрона/оружия)	+	+	+
«Горячие» кнопки для быстрого выполнения некоторых функций (например, масштабирования)	+	+	+
Устойчивость к ударным механическим нагрузкам	+	+	+
Плавная регулировка яркости дисплея	+	+	+
Наличие видеовыхода PAL	+	+	+
Тип кронштейна для крепления на оружие: - боковой (типа «ласточкин хвост») - верхний (планка «Пикатинни») - верхний (планка «Вивера»)	+	+	+
	+	+	+
	+	+	+
Возможность подключения выносного батарейного отсека	+	+	+
Тип видеоотображающего устройства (микродисплея)	OLED (органический «полноцветный» светоизлучающий дисплей 800 × 600 пиксел. Размер пиксела 15 мкм		
Масса прицела с элементами питания, не более, кг	0,654	0,710	0,8
Габариты ДхШхВ, не более, см	173х76,5х60	205х66х92	220х80х92

Таблица 3.
Технические характеристики

Модификация	Лунь-В 1	Лунь В-2
Тип ФПУ	микроболометр	
Формат, пикселей	640×480	640×480
Размер пикселя, мкм	17	17
Фокусное расстояние объектива, мм	51	68
Поле зрения (Г х В), град	12,1х9,1	9,1х6,8
Фокусное расстояние телевизионного объектива, мм	35	44
Цифровое увеличение	2 ^x	2 ^x
Дальность обнаружения ростовой фигуры человека (1,7м) днем и ночью, не менее, м	800	1100
Рабочая температура	минус 40°С до +50°С	
Время непрерывной работы (4 CR123) при +25°С, не менее, ч	4	4
Масса прицела с элементами питания, не более, кг	1,75	1,9

Тепловизионные прицелы «САРМАТ» устанавливаются на существующие образцы оружия нормального калибра с планкой типа «Пикатинни» и «ласточкин хвост». Гибкое программное обеспечение дает возможность изменять баллистику по требованию заказчика, обеспечивает вывод видеоизображения на внешние источники отображения информации (нашлемные мониторы, планшеты и т.п.). Возможно маскировочное окрашивание прицела по желанию заказчика для применения в разных природных условиях.

Тепло-телевизионный прицел «Лунь-В»

Тепло-телевизионный прицел предназначен для обнаружения и распознавания целей по телевизионному, тепловизионному или полученному цифровым сложением тепло-телевизионному изображению цели, а также ведения прицельной стрельбы в любое время суток в сложных метеоусловиях из оружия нормального калибра, имеющего боковое или верхнее крепление прицела.

Прицел имеет две модификации «Лунь-В1»

и «Лунь-В2» с разным фокусным расстоянием объектива. Основные технические характеристики тепло-телевизионных прицелов представлены в табл. 3.

Двухспектральный портативный прибор наблюдения «Дербник»

Двухспектральный портативный прибор «Дербник» предназначен для обнаружения и ведения наблюдения за различными объектами круглосуточно, даже в сложной фоноцелевой обстановке. Основные технические характеристики двухспектрального портативного прибора «Дербник» представлены в табл. 4.

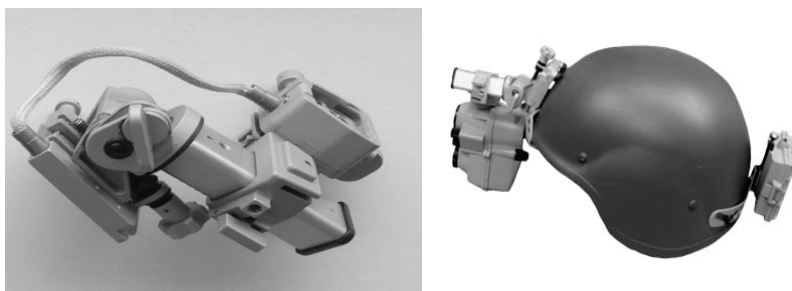
Тепло-телевизионный монокуляр состоит из двух каналов с единичным увеличением ($\Gamma^x=1$): ночного на ЭОП со стробированным источником питания, разрешением не менее 60 лин/мм и чувствительностью порядка 10^{-5} люкс; тепловизионного на неохлаждаемой микроболометрической матрице формата 640х480 с пикселем 17 мкм, без термостабилизации, чувствительной в спектральном диапазоне (8...12) мкм, с выводом после

обработки видеоизображения на микродисплей на органических материалах с разрешением 600x800 пикселей.

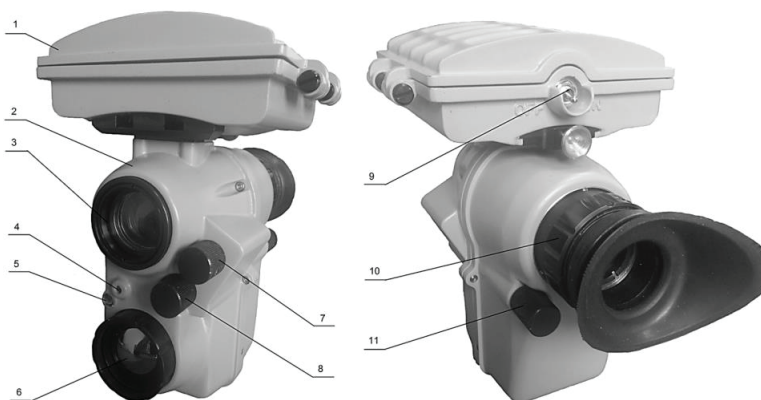
Прибор позволяет оператору использовать либо тепловизионное изображение цели, либо изображение с канала ночного видения, либо оба изображения одновременно. При этом изображение, получаемое на катодолюминесцентном экране ЭОП первого канала, и тепловизионное изображение, полученное на микродисплее второго канала, оптически складываются посредством призмы, а суммарное уже двухспектральное изображение через окуляр проецируется в глаз оператора. Это расширяет возможности оператора по поиску целей на местности, особенно замаскированных, и увеличивает детализацию изображения.

Автоматическая регулировка усиления ЭОП ночного канала и защитная крышка обеспечивают защиту ПЗС матрицы от внешних источников света и ярких вспышек, при этом тепловизионный канал не засвечивается. В результате обеспечивается круглосуточная работа двухспектрального прибора при любых условиях освещенности.

Двухспектральный портативный прибор наблюдения «Дербник» сконструирован из композитных материалов и его вес не превышает 500 грамм с батарейным блоком, а специализированный универсальный кронштейн (СУК) обеспечивает крепление двухспектрального теплотелевизионного монокуляра на общевойсковой шлем. При этом сохраняется его электрическое подключение к отстыкованному батарейному отсеку,



Внешний вид и крепление универсального кронштейна



Внешний вид двухспектрального прибора наблюдения «Дербник».

1 – батарейный отсек, 2 – прибор наблюдения, 3 – объектив ЭОП, 4 – светодиод подсветки ЭОП, 5 – датчик освещенности, 6 – объектив ИК камеры, 7 – переключатель управления ИК камерой, 8 – переключатель управления ЭОП, 9 – выключатель питания, 10 – окуляр, 11 – переключатель управления светодиодом подсветки ЭОП

Таблица 4.
Технические характеристики

Тепловизионный канал	Характеристики
Тип ФПУ	микроболометр
Формат, пикселей	640 x 480
Размер пикселя, мкм	17
Низкоуровневый канал	
Тип приемника	ЭОП (II+)
Дальность обнаружения ростовой фигуры человека (1,7м) днем и ночью, не менее, м	250
Поле зрения, град	40
Сложение изображения	Оптическое совмещение
Габаритные размеры, не более, мм	110x95x70
Вес, не более, г	500

устанавливаемому на затылочной части каски, и выполняющему функцию разгрузки.

Ниже на фото изображен внешний вид двухспектрального тепло-телевизионного прибора наблюдения 2 с присоединенным к нему батарейным отсеком 1. В передней части прибора наблюдения расположены: объектив электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 3, светодиод подсветки 4, датчик освещенности 5, объектив инфракрасной камеры 6, переключатель управления инфракрасной камерой 7 и переключатель управления электронно-оптическим преобразователем 8. В задней части прибора наблюдения расположены окуляр 10 и переключатель управления светодиодом подсветки ЭОП 11. В задней части батарейного отсека расположен выключатель питания 9.

Видеомодуль малогабаритной нашлемной индикации «Дисплей-3»

Прибор предназначен для индивидуального пользования с целью отображения визуально совмещенных видео потоков реальной боевой обстановки и сигнальной информации от носимой или бортовой аппаратуры вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), а так же обеспечивает прямое наблюдение окружающей обстановки при различной освещенности на местности. Конструкция обеспечивает компактное размещение и удобное крепление на шлеме во-

еннослужащего, практически не увеличивая его весовые параметры.

«Дисплей-3» размещается на едином общевойсковом шлеме военнослужащего в составе комплекта перспективной боевой экипировки и выполняет свои функции как автономно, так и в составе приборных комплексов.

СЕРИЙНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Системы, комплексы и приборы, серийно выпускаемые институтом сертифицированы, лицензированы и поставляются в силовые ведомства: МО, ФСБ, МВД, МЧС РФ.

Так специальные подразделения МВД РФ оснащаются миниатюрным тепловизором «Скопа-3», портативным тепловизором «Сыч-3» и тепловизионным комплексом целеуказания «Сыч-3ЦУ». Начата опытная войсковая эксплуатация нового тепловизора-дальномера «Сыч-4». В МО РФ в рамках программы «Ратник» поставляется тепловизионный прицел 1ПН139 для стрелкового оружия крупного калибра.

В конструкции нового портативного тепловизора «Сыч-5» применены передовые технологии обработки изображений и конструктивные новинки, позволившие увеличить дальность распознавания и существенно снизить массу и габаритные размеры.

МВД РФ первым из силовых структур приняло на вооружение тепловизионный при-



«Скопа-3»



«Сыч-3»



«Сыч-5»



«Сыч-4»



«Сыч-3ЦУ»

цел для стрелкового оружия «Шехин-02», который полностью разработан и производится в России. В результате его модернизации разработана линейка тепловизионных прицелов для различных тактических задач. Прицелы позволяют вести прицельную стрельбу днём и ночью, в сложных метеоусловиях из стрелкового оружия нормального и крупного калибров.

Наряду с общепринятым сегодня использованием неохлаждаемых тепловизионных приборов в качестве средств обнаружения и наблюдения, которые используются для решения задач охраны государственной границы, общественной безопасности, поисково-спасательных работ и др., оптико-электронные приборы играют одну из ведущих ролей в современных системах комплектов боевой индивидуальной экипировки (КБИЭ) военнослужащего.

Портативные тепловизионные прицелы, разработанные для КБИЭ военнослужащего и выпускаемые ОАО «ЦНИИ «Циклон», по своим тактико-техническим характеристикам не уступают зарубежным аналогам и удовлетворяют всем требованиям современной экипировки. Они предназначены

для обнаружения и распознавания целей по тепловому контрасту, а также ведения прицельной стрельбы в любое время суток в сложных метеоусловиях из стрелкового оружия нормального и крупного калибра, имеющего боковое или верхнее крепление прицела.

Дополнительно прицелы обеспечивают:

- сопряжение с комплексом разведки, управления и связи (КРУС) из состава «Комплекта боевой экипировки военнослужащего 6Б»;
- прием и передачу видеоданных о разведанных целях (объектах) на многофункциональный информационный комплекс командира или в вышестоящее звено управления в режиме реального времени;
- возможность доведения разведывательной информации до командиров рот, взводов, боевых машин и огневых средств;
- установку на оружие, имеющее боковое или верхнее крепление прицела;
- введение в энергонезависимую память прицела не менее пяти дополнительных баллистик;
- подключение внешнего видеоустройства (например, монитора на шлемного).

ЧУНАРЕВ Д.А., ДАВЫДОВА Л.Г.

АО «Швабе-Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

В статье описаны основные типы многоканальных приборов, выявлены их преимущества и недостатки. Описано влияние внешних условий на значение основного параметра. Рассмотрены тенденции развития многоканальных приборов.

Ключевые слова: многоканальные приборы, комбинирование, комплексирование, оптико-электронные приборы.

Развитие оптико-электронных приборов (далее – ОЭП) военного назначения привело к созданию комплексных систем разведки, в которых применяются приборы, основанные на использовании различных физических принципов – приборы ночного видения, приборы с телевизионными, тепловизионными и лазерными каналами. Основной предпосылкой комплексирования ОЭП является различное воздействие факторов естественного и искусственного происхождения на различные каналы получения видеoinформации, поскольку каждый из упомянутых каналов, взятый в отдельности, не в состоянии удовлетворять возросшим техническим требованиям в условиях плохой видимости, тщательной маскировки целей, активного применения средств радиоэлектронного противодействия.

При комплексировании ОЭП эффективность системы по дальности обнаружения целей оказывается выше эффективности каждого из каналов. При этом комплексирование происходит не только на основе конструктивно-технического объединения различных каналов, но и на основе частичного совмещения оптических осей, совместной обработки информации с целью ее одновременного представления на общем дисплее в виде единого изображения.

В комбинированных системах механически объединены оптико-электронные каналы, регистрирующие физически независимые устойчивые отличительные признаки целей и фона. Объединение происходит по конструктивно-техническому принципу, без совместной обработки информации. Представление информации обеспечивается отдельными дисплеями или одним дисплеем, снабженным переключателем каналов. Эффективность комплекса не уступает эффективности оптимального для данных условий канала. Создание комбинированных систем является первым этапом интеграции ОЭС.

На эффективность применения комбинированных ОЭС основное влияние оказывают три фактора: параметры атмосферы, освещенность местности, параметры фоно-целевой обстановки. Рассмотрим влияние этих факторов подробнее.

Параметры атмосферы и освещенность в основном определяют значения дальности работы ОЭС. Параметры цели определяют как дальность обнаружения, так и информативность разведки. В тепловизионных каналах (с длиной волны излучения свыше 3 мкм) температурный контраст цели с фоном оказывает особое влияние на дальность работы оптико-электронных средств.

Максимальная эффективность работы

ОЭС достигается только в окнах прозрачности атмосферы. При этом в различных участках спектра основные потери, связанные с поглощением излучения толщей атмосферы вдоль трассы наблюдения, определяются различными составами газовых сред и примесей. Следует отметить, что использование рабочего диапазона 8-12 мкм более эффективно при задымлении поля боя, чем диапазона 3-5 мкм, который более эффективен при повышенной влажности, в том числе за счет более высоких температурных контрастов.

Таким образом, при различных соотношениях концентраций газов и паров воды в атмосфере эффективность ОЭС различного диапазона будет различаться.

Фактором, ограничивающим дальность действия ОЭС, являются также потери на рассеянии излучения на частицах и молекулах. Наиболее критичным к молекулярному и аэрозольному рассеянию является ультрафиолетовый диапазон работы ОЭС, наименее критичным – длинноволновый тепловизионный диапазон (8-14 мкм).

Рассеяние и поглощение в атмосфере определяют метеорологическую дальность видимости — основной параметр, использующийся при оценке дальности действия ОЭС.

Комплексирование ОЭС, работающих в разных участках спектра, позволяет вести стабильную разведку при различных состояниях прозрачности атмосферы.

Освещенность объекта излучением атмосферы определяет уровень интенсивности отраженного излучения от объекта, фиксируемого ОЭС. Уровень освещенности определяет эффективность работы ОЭС УФ-, видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов. Так, ОЭС, работающие в видимой части спектра с использованием ТВ-камер, а также ОЭС УФ-диапазона спектра эффективны при достаточно больших уровнях освещенности, начиная от 100 лк и заканчивая десятками тысяч люкс. При этом для ОЭС УФ-диапазона спектра более предпочти-

тельно прямое солнечное облучение объекта.

Для ОЭС ближнего ИК-диапазона на основе электронно-оптических преобразователей минимальный уровень рабочей освещенности составляет 10^{-4} лк, что существенно расширяет диапазон их применения.

Эффективность работы ОЭС тепловизионного диапазона не зависит от освещенности на местности, так как определяющую роль в данном случае играет собственное тепловое излучение объекта и фона. Таким образом, ОЭС тепловизионного диапазона обладают возможностью круглосуточной работы, но более низкой информативностью, чем ОЭС видимого и ближнего ИК-диапазонов. Поэтому комплексирование ОЭС различных спектральных диапазонов позволяет добиться непрерывного круглосуточного ведения разведки.

Можно сделать вывод, что задача обеспечения круглосуточности и всепогодности боевого применения ОЭС разведки в широком диапазоне внешних условий наиболее эффективно решается путем комплексирования данных, полученных в различных спектральных диапазонах работы ОЭС.

Однако в процессе разведки возможна ситуация, при которой основные характерные признаки наблюдаемого объекта во всех спектральных диапазонах не выявляются, либо выявляются слабо, что не позволяет распознать или даже обнаружить объект разведки. Такая ситуация характерна для работы по замаскированным целям.

Задача обнаружения замаскированных целей. В настоящее время в состав прицельно-наблюдательных комплексов образцов вооружения и военной техники сухопутных войск традиционно входят оптико-электронные каналы разведки, наблюдения и прицеливания видимого, ближнего и дальнего ИК-диапазонов.

При использовании противником качественной маскировки обнаружение и распознавание объекта затруднено, соответственно, вероятность обнаружения и рас-

познавания замаскированного объекта на типовых тактических дальностях может быть близка к нулю.

ОЭП, входящие в состав подвижных разведывательных пунктов, обеспечивают дальность распознавания окопанных и замаскированных объектов бронетанковой техники менее чем 1-1,5 км, что не удовлетворяет возросшим современным требованиям.

В связи с этим проведение работ, направленных на выявление новых демаскирующих признаков, создание оптико-электронных каналов разведки, использующих данные признаки с целью повышения эффективности разведки замаскированных целей, крайне важно.

В табл. 1 приведены состав, спектральный диапазон и основное назначение каналов переносного многоспектрального прибора разведки, позволяющие решать поставленные задачи.

Многоканальные многоспектральные приборы реализованы в качестве прицельных средств (носимые прицелы для различных типов оружия), носимых и стационарных средств наблюдения и прицеливания (монокуляры, средства разведки), приборы обнаружения для авиационных носителей, средства наблюдения механиков-водителей, летчиков. Примерами комбинированных и комплексированных приборов различного назначения являются прицел «Даос» (комбинирование дневного ТВ канала с тепловизионным каналом), монокуляр с функцией комплексированного изображения AN-PSQ-20 (комбинирование ночного канала на базе ЭОП с тепловизионным), прибор механика-водителя ТКН-АИ и его модификации (комбинирование дневного канала с ночным) и ряд других приборов.

На основе приведенных и ведущихся работ можно определить общие тенденции развития многоканальных приборов и возможности оптимизации их отдельных направлений. Развитие данного направления должно идти следующими путями: со-

вершенствование элементов в различных каналах; разработка новых схемно-конструктивных решений с учетом критерия «эффективность/стоимость» и расширение области применения приборов на основе их конверсионных возможностей; технологическая отработка конструкций.

Дальнейшее продвижение по указанным направлениям связано с решением целого ряда научно-технических проблем, а именно:

- повышение характеристик тепловизионного модуля;
- повышение характеристик ЭОП, в первую очередь увеличение чувствительности фотокатода, его диаметра с 18 до 25, 40 мм и разрешающей способности;
- создание ЭОП, чувствительных в ИК области спектра до 1,5-1,7 мкм, для работы при естественной ночной освещенности (ЕНО) для визуализации изображения;
- создание твердотельных преобразователей изображения (ТПИ) — аналогов ЭОП для видимого и ИК диапазонов спектра;
- разработка и реализация методов оптимальной обработки пороговых оптических изображений в присутствии световых помех;
- развитие методов расчета нетрадиционных оптических систем (киноформных, внеосевых, голографических) для применения в ПНВ;
- реализация новейших оптических технологий полимерной, киноформной, градиентной оптики, специальных просветляющих, защитных, небликующих и дихроичных покрытий;
- внедрение полимерных и композиционных конструктивных материалов, прогрессивных методов формообразования;
- микроминиатюризация электронных схем, включая и высоковольтные источники питания;
- внедрение микропроцессорной техники и современного программного обеспечения;
- разработка систем автоматической фокусировки и регулировки рабочего режима приборов.

Таблица 1.
Основные назначения каналов наблюдения многоканальных приборов

Канал	Спектральный диапазон, мкм	Основное назначение
ТВ-канал УФ-диапазона	0,2-0,38	Обнаружение замаскированных целей Обнаружение пуска ракет
Дневной ТВ-канал	0,35-0,8	Разведка открыто расположенных целей в дневных условиях
Ночной ТВ пассивно-активный канал	0,4-1,1	Разведка открыто расположенных целей в ночных условиях в пассивном и активно-импульсном режимах Обнаружение замаскированных целей по блику от ОЭС
Оптико-электронный канал коротковолнового ИК-диапазона	0,8-2,5	Обнаружение замаскированных целей
Тепловизионный канал средневолнового диапазона	3-5	Разведка открыто расположенных целей в дневных и ночных условиях Обнаружение замаскированных целей
Тепловизионный канал длинноволнового диапазона	8-14	Разведка открыто расположенных целей в дневных и ночных условиях Обнаружение замаскированных целей
Лазерный дальномер с системой определения собственных координат	1,54	Определение координат цели Измерение дальности до объекта

Решение этих проблем должно опираться на новейшие достижения опто- и микроэлектроники, информационных технологий и других смежных областей.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что разработка приборов должна осуществляться в направлении создания адаптивных систем, работающих круглосуточно в широком диапазоне изменения внешних условий, в соответствии с которыми приборы должны оптимизировать свою работу. Поскольку решить задачу в полном объеме с использованием одноканальных приборов достаточно сложно, необходимо разрабатывать многоканальные (многоспектральные) системы и, в конечном счете, полностью интегрированные приборы, в которых изо-

бражения отдельных каналов обрабатываются в реальном масштабе времени, и формируется высококачественное интегрирование изображения. При этом необходим модульный принцип построения приборов, допускающий как создание их унифицированного ряда, так и применение модулей для многоканальной системы.

Список литературы:

1. Волков В.Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения. НТЦ «Информтехника», обзор № 5596. М., 2005 г.
2. Касаткин И.В. Луговский А.Ю. Концепция модульного принципа построения автоматизированных прицельных комплексов для сил специального назначения. День инноваций МО РФ. Сборник докладов. 2014 г, с.181-183.

ИННОВАЦИИ В ОПТИКО- ЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДИОДОВ КМОП МАТРИЧНОГО ФОТОПРИЕМНИКА ФОРМАТА 256x256 ЭЛЕМЕНТОВ

КАРПОВ В.В.*, ЧИШКО В.Ф.*, ПЕТРЕНКО В.И.*, СЕМЕНОВ В.И.*,
БОРОДИН Д.В.**, ОСИПОВ Ю.В.**, ВАСИЛЬЕВ В.В.**

*Открытое акционерное общество «Швабе-Фотосистемы», г. Москва

**Общество с ограниченной ответственностью «РТК Инпекс»

E-mail: info@shvabe-fs.ru

В статье рассматриваются спектральные характеристики квантовой эффективности фотодиодов различной топологии в составе КМОП матричного мультиплексора с целью выбора оптимальной топологии фотодиода для работы в коротковолновой части видимого и ближней ультрафиолетовой областях спектра.

Ключевые слова: квантовая эффективность, КМОП мультиплексор, пиксел.

В последнее время большой интерес вызывает ультрафиолетовый диапазон спектра электромагнитного излучения как в коммерческом секторе, так и в военном. Имеющийся набор широкозонных полупроводников позволяет реализовать любые технические требования, однако их применение при создании матричных приборов встречает значительные трудности.

Поэтому значительный практический интерес могли бы представить кремниевые фотоприемники со структурой, обеспечивающих значительную фоточувствительность в УФ-области спектра, изготовленных по стандартной КМОП технологии.

Одним из наиболее простых способов решения этой задачи является оптимизация топологии фотодиода с целью повышения чувствительности в коротковолновой области и снижения ее в ИК-диапазоне.

В работе исследованы спектральные характеристики и чувствительность фотодиодов различных топологий в составе КМОП матричного фотоприемника, разработанного ООО «РТК Инпекс» [1].

Фотоматрица разработана на основе четырехтранзисторных ячеек с размером ячеек 30×30 мкм².

Принципиальная схема ячейки представлена на рис. 1. Интегрирование фототока происходит на собственной емкости фотодиода, который на рис. 1 представлен эквивалентной схемой генератора фототока и собственной емкости. После интегрирования фототока заряд с емкости р-п-перехода передается на емкость хранения, с которой и происходит считывание напряжения фотосигнала.

Топология исследованных фотодиодов представлены на рис. 2. В варианте (а) с размером пиксела 30 мкм, имелись два параллельно включенных и расположенных друг под другом р-п-перехода (поверхностный р-п-переход: р⁺-исток - п-карман и заглубленный р-п-переход : п-карман - р-подложка).

Во втором варианте (б) имелся только один р-п-переход: Р-подложка - N-исток при размере пиксела 15 мкм. В свою очередь, в варианте (а) были исследованы характеристики с различными размерами структурных элементов.

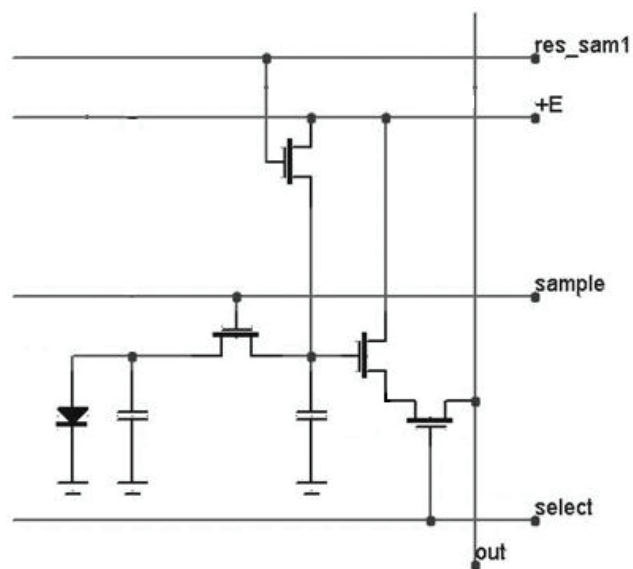
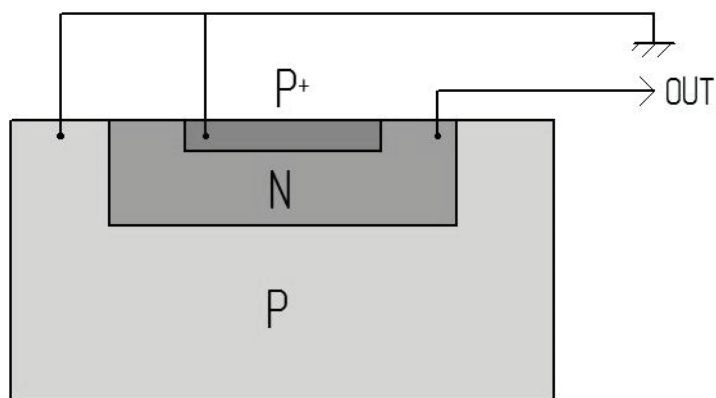
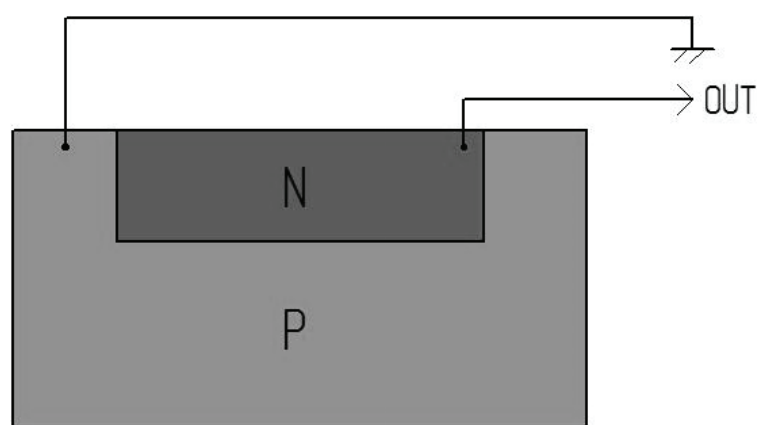


Рисунок 1.
Принципиальная схема ячейки фотоматрицы



а)



б)

Рисунок 2.
Варианты топологии фотодиодов: а) - с двумя p-n-переходами и б) - с одним p-n-переходом

Таблица 1.
Топологические размеры фотодиодов
и емкости интегрирования различных вариантов

Параметр	вариант а1	вариант а2	вариант б
площадь P^+ -истока, мкм^2	552	64	225
периметр P^+ -истока, мкм	97	27	15
площадь N-кармана мкм^2	616	44	127
периметр N-кармана мкм	102	32	11,3
емкость интегрирования, пФ	0,38	0,055	0,117



Рисунок 3.
Спектральная зависимость квантовой эффективности
фотодиодов различной топологии

Топологические размеры фотодиодов и емкости интегрирования различных вариантов представлены в табл. 1.

Спектральная зависимость квантовой эффективности фотодиодов различных вариантов представлена на рис. 3. Видно, что вариант (б) топологии фотодиода обладает наибольшим подавлением чувствительности в длинноволновой части спектра и менее крутым спадом чувствительности при длинах волн менее 0,5 мкм .

Следует отметить, что полученные значения квантовой эффективности относятся к непросветленной поверхности фотодиодов и оценки показывают, что просветление может увеличить ее примерно в 1,3-1,4 раза.

Список литературы:

1. Материалы VIII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования земли» («Системы ДЗЗ-2011»), МНТОРЭС им. А.С.Попова, Москва 2011 г., с. 269-270.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ НА СЛОЖНЫХ ФОНАХ

КАРАНДИН А.В., ЛАВРЕНТЬЕВ А.С., МЕРЕНКОВ И.В., ПИНЧУК В.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: akv176@yandex.ru, lavrent@zenit-kmz.ru, i.merenkov@zenit-kmz.ru, vmotovilo@yandex.ru

Обнаружение и распознавание объектов в инфракрасной области спектра в настоящее время является актуальной задачей в широкой сфере прикладных задач.

В рамках данной публикации рассматривается алгоритм обнаружения малоразмерных быстродвижущихся объектов (угловое перемещение объекта за время одного кадра превышает угловые размеры самого объекта) путем анализа последовательности изображений, получаемых в результате работы оптико-электронных систем (ОЭС) и используемых в охранных системах промышленного назначения.

Ключевые слова: обнаружение, фильтрация, «смаз» изображения, компьютерное моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Структурно алгоритм обнаружения малоразмерных объектов состоит из двух блоков: первичной и вторичной обработки информации.

В блоке первичной обработки производится восстановление изображения (устранение смаза изображения, возникающего из-за кругового сканирования ОЭС), его обработка и выделение объектов, соответствующих критериям обнаружения. Информация о выделенных объектах передается в блок вторичной обработки информации.

В блоке вторичной обработки происходит анализ выделенных объектов в последовательности изображений, в результате которого отбрасываются объекты, траектории движения которых не характерны для заданных объектов.

Для объектов, удовлетворяющих критериям отбора, производится определение координат, классификация по размерам, силе собственного излучения и траектории движения. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

В результате кругового сканирования входные изображения фоноцелевой обстановки оказываются «смазанными», вследствие чего в качестве первого этапа обработки видеоданных необходимо восстановить изображения исходной фоноцелевой обстановки, то есть выполнить компенсацию «смаза». Для решения данного вопроса предлагается использовать алгоритм оптимальной фильтрации Н. Винера, которая предполагает получение спектра восстанавливаемого изображения посредством умножения комплексного спектра «смазанного» изображения на комплексную функцию передачи восстанавливающего фильтра. Работа алгоритма оптимальной фильтрации Винера иллюстрируется рис. 2.

ВЫЧИТАНИЕ КАДРОВ

Для поиска движущихся объектов предлагается использовать нахождение изображения, представляющего собой разность соседних кадров видеопоследовательности. В [6] показана устойчивость данного метода к медленным изменениям фона (движение листьев деревьев, облаков и т.п.).

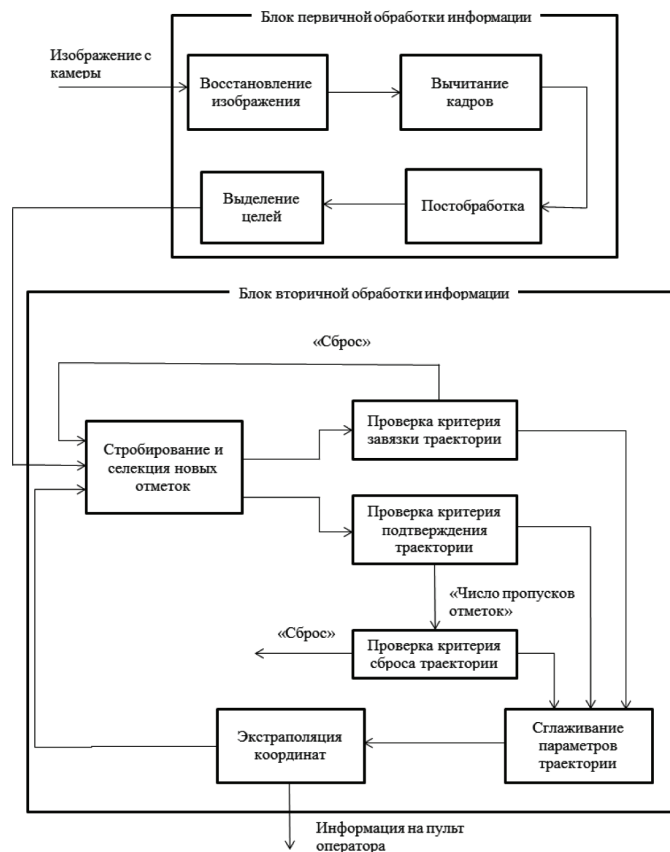
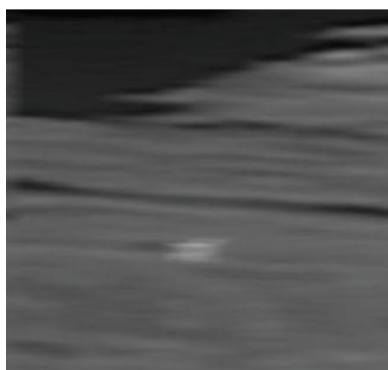


Рисунок 1.
Структурная схема алгоритма

При вычитании соседних кадров необходимо также учитывать факт вращения матрицы ФПУ. Данный вопрос решается методами одометрии, как показано в [5]. На рис. 3 показан результат сравнения (вычитания) двух последовательных кадров видеопоследовательности.

ПОСТОБРАБОТКА

После получения изображения межкадровой разности необходимо провести постобработку изображения, которая включает в себя применение морфологической фильтрации (сочетание преобразований «верх шляпы» и «дно шляпы» для повышения контрастности) с последующей бинаризацией (рис. 3г).



а)



б)

Рисунок 2.
а) - «смазанное» изображение, б) - изображение восстановлено при помощи оптимальной фильтрации Винера

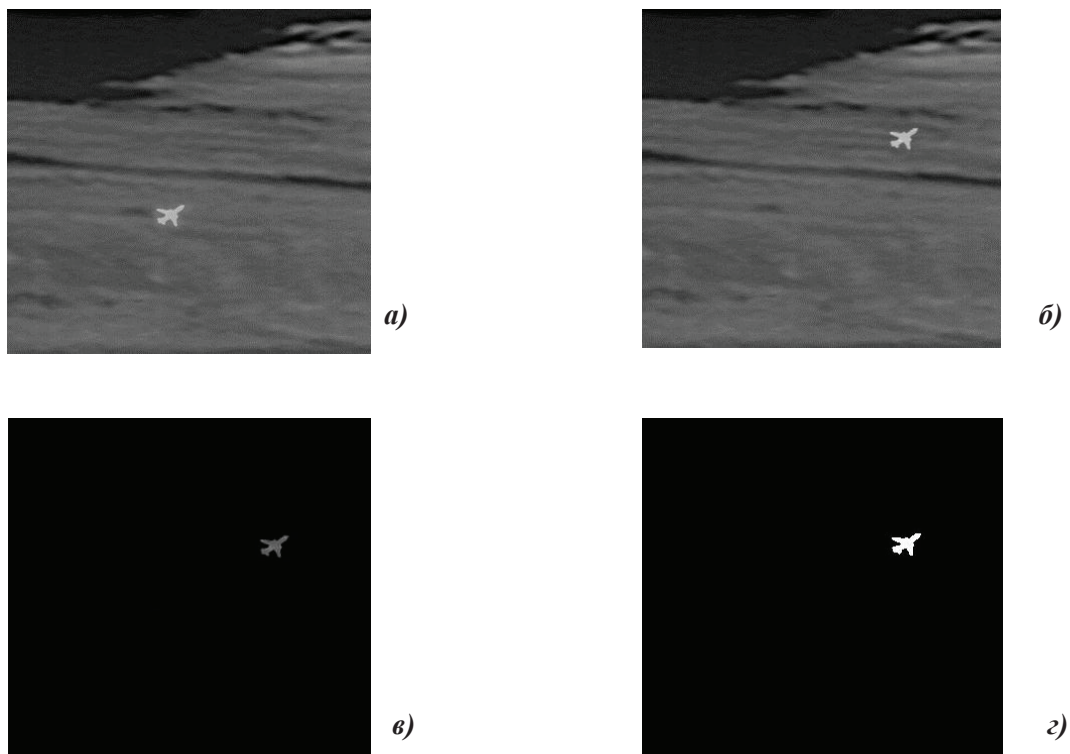


Рисунок 3.

а) - предыдущий кадр последовательности, б) - текущий кадр последовательности, в) - межкадровая разность, г) - изображение межкадровой разности после выполнения постобработки

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Затем на полученном бинарном изображении проводим поиск связанных областей (предполагаемых целей). Каждая найденная область представляет собой структуру данных (далее отметка) следующего вида

$$X = \{S, L_x, L_y, R, I\}, \quad (1)$$

где

S – площадь (число занимаемых областью пикселей),

L_x – линейный размер по координате x ,

L_y – линейный размер по координате y ,

R – координаты центра масс области,

I – максимальное значение интенсивности.

СОПРОВОЖДЕНИЕ ОБЪЕКТА

В блоке вторичной обработки информации, на основе полученных отметок решаются следующие основные задачи:

- обнаружение траекторий,
- сопровождение траекторий.

Эти задачи включают в себя оценивание параметров траектории, задаваемой обычно векторной функцией, расчет сглаженных (интерполированных) и упрежденных (экстраполированных) координат, а также операцию стробирования отметок целей. Процесс обнаружения и сопровождения траектории подробно описан в [4].

Сопровождаемым целям присваивается порядковый номер и высокий приоритет, а также соответствующее обозначение на изображении (рис. 4). Параметры обнаруженных целей выдаются в текстовом виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный алгоритм позволяет решить задачу автоматического обнаружения мало-размерных быстро движущихся объектов, определения их координат и траектории движения для ОЭС обнаружения, работающей в ИК области спектра. Компьютерное моделирование с использованием пакета расширения Image Processing Toolbox для



Рисунок 4.
Выделение на исходном изображении сопровождаемой цели

MATLAB показало эффективность данного алгоритма при обнаружении и сопровождении малоразмерных движущихся объектов в последовательности изображений в условиях сложного фона (движущиеся облака). Алгоритм может быть использован как на этапе послесенансной обработки видеоинформации, так и на этапе сопровождения движущихся объектов в реальном масштабе времени.

Список литературы:

1. Якушенков Ю.Г., Тарасов В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 430 с.;
2. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Э. Цифровая обра-

ботка изображений. - М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.;

3. Журавель И.М. Краткий курс теории обработки изображений [Электронный ресурс] URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/index.php>;

4. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

5. Ваниев А.А., Емельянов Г.М. Метод выделения быстродвижущихся объектов при использовании цифрового оптического локатора. // Компьютерная оптика, 2013, том 37, №4.

6. Матвеев Д.А. Проблемы реализации алгоритмов обработки кадра в интеллектуальных датчиках изображения. //Электроника и информационные технологии, 2011, №2(11).

ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗЕРКАЛЬНЫХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИНФРАКРАСНЫХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРОВ

ВЕЛЬТИЩЕВА В.В., БОЛЬШАКОВА Т.А.

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»

E-mail: v.veltishcheva@zenit-kmz.ru, t.bolshakova@zenit-kmz.ru

Статья посвящена проблемам импортозамещения, в частности, производству отечественных зеркальных уголковых отражателей (ЗУО), не уступающих по своим техническим характеристикам зарубежным аналогам. Обоснована актуальность поставленной задачи. Рассмотрены как зарубежные, так и отечественные способы изготовления ЗУО и технологии их производства. Реализация предложенных способов изготовления позволит разработать собственную технологию производства зеркальных уголковых отражателей, не уступающих по основным характеристикам зарубежным аналогам.

Ключевые слова: импортозамещение, триэдр, зеркальный уголковый отражатель.

ВВЕДЕНИЕ

Создание наукоёмких изделий в космической сфере требует применения передовых технических и технологических решений. Доступность импортных комплектующих для поставок в Россию привела к нерентабельности развития отечественной технологической базы и, как следствие, к потере конкурентоспособности в части сегментов рынка. Однако, введение санкций в отношении предприятий российского ВПК может изменить сложившуюся ситуацию.

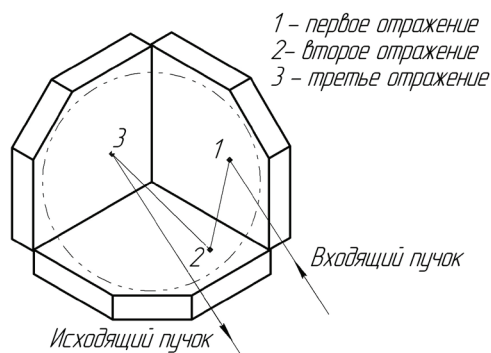


Рисунок 1.

Зеркальный уголковый отражатель

Одним из примеров является зеркальный уголковый отражатель (ЗУО) (рис. 1) - оптический компонент, который использует три взаимно перпендикулярные поверхности для отражения света обратно в сторону источника таким образом, что входящий луч параллелен отраженному независимо от ориентации ЗУО. Это свойство делает их применение полезным для систем, которые работают с подвижным источником. В литературе уголковые отражатели также называют ретрорефлекторами или триэдрами. Применяются, например, на объектах космического базирования для повышения контрастности, получаемых интерферограмм.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕРКАЛЬНЫХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ

Основные характеристики зеркальных уголковых отражателей, которые принято использовать в бортовых фурье-спектрометрах, приведены в табл. 1. Следует отметить, что высокие требования к углу расходимости ЗУО связаны с его влиянием на ошибку волнового фронта и, как след-

Таблица 1.
Основные характеристики ЗУО, используемых на ПАО КМЗ

Изделие	ИКФС-2	ИКФС-3	ИКФС-ГС
Световой диаметр, мм	60	90	60
Допустимый размах ошибки PV для $\lambda=632,8$ нм	$\leq 0,35\lambda$	$\leq 0,45\lambda$	$\leq 0,35\lambda$
Рабочий спектральный диапазон, мкм	5-15	3,6- 15,5	3,6-15,5
Угол расходимости пучка на выходе	$\leq 1''$	$\leq 1''$	$\leq 1''$
Масса, г	≤ 177	$500 \pm 10\%$	≤ 177

ствие, на контрастность интерферограммы. Известно [3], что для двухлучевого интерферометра Майкельсона контрастность интерференционной картины определяется по формуле:

$$K = \frac{\sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}\right)}{2\pi \frac{l}{\lambda}},$$

где l - дополнительное изменение расстояния между интерферирующими волнами, вызванное взаимным наклоном волновых фронтов, λ - интерферирующая длина волны. Таким образом, при увеличении расходимости выходящего пучка, например, с $1''$ до $2''$ при световом диаметре уголкового отражателя $D=58$ мм контрастность интерференционной картины для длины волны $\lambda = 5$ мкм может упасть с $K_{\text{для } 1''} = 0,91$ до $K_{\text{для } 2''} = 0,68$.

ЗУО применяются в инфракрасных фурье-спектрометрах, предназначенных для мониторинга состава атмосферы из космоса, поэтому к их деталям предъявляются высокие требования по стойкости к перегрузкам, температурным перепадам, барическим нагрузкам. В том числе высокие требования предъявляются не только к точности ЗУО, но и к их механической прочности.

В настоящее время импортозамещение уголкового зеркальных отражателей является крайне актуальной задачей. Это связано с целым рядом причин:

– заказывающими организациями на бли-

жайшие годы предусмотрено производство значительного количества аппаратуры с использованием ЗУО, указанных в табл. 1;

– существует единственный производитель, который делает уголкового отражатели, соответствующие требованиям эксплуатации в условиях космоса (нагрузки при выводе на орбиту, перепады температуры), с расходимостью выходящего пучка 1 угл. сек. и менее, - это PLX Innovative Optical Systems Inc., США;

– в связи с санкциями, введенными США в отношении России, с марта 2014 г. закупка новых ЗУО невозможна;

– в России отсутствует процедура таможенного возврата бракованных изделий иностранного производства.

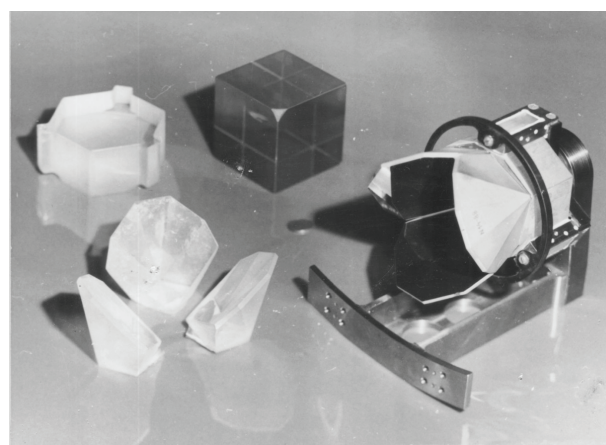


Рисунок 2.
Зеркальный уголкового отражатель,
изготовленный на «Красногорском
заводе им. С.А. Зверева»

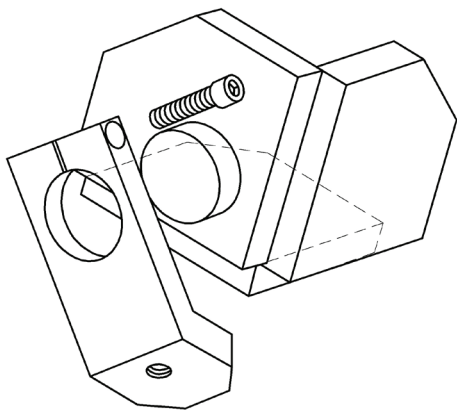


Рисунок 3.

Схема крепления ЗУО производства PLX

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗУО

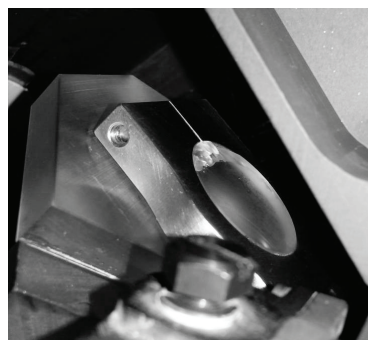
Отечественной оптической промышленностью в конце 80-х изготавливались трехзеркальные уголкового отражатели на основе технологии глубокого оптического контакта (ГОК). ЗУО (рис. 2) состоит из трёх пластин-лепестков из кварцевого стекла КУ-1, которые на ГОК крепились к пластине (основанию), выполненной из того же материала. Допуск на двугранные углы в два раза превышает фактические значения двугранных углов используемых сейчас зеркальных уголкового отражателей, а масса такого отражателя – 1,09 кг, значительно превышает требуемую для ЗУО, применяемых в бортовых фурье-спектрометрах. Рабочий световой диаметр отечественного трехзеркального уголкового отражателя составляет ~90 мм.

ЗУО производства компании PLX выполняются по технологии склейки: три пластины-лепестка склеиваются таким образом, что каждая пара образует двугранный угол 90° с погрешностью менее 1". Клеевой шов составляет 1-2 мм. На один из лепестков с тыльной стороны приклеивается стеклянный цилиндр, который затем обхватывается металлическим хомутом-креплением (рис. 3). Пластины и цилиндрическая «ножка» зеркального уголкового отражателя выполняются из материала Ругех®, металлическое крепление - из инвара.

Не смотря на высокие точностные характеристики, конструкция крепления ЗУО,



а)



б)

Рисунок 4.

Дефекты в «ножках» ЗУО из партии 2013 г.

изготовленного PLX, имеет существенный недостаток: используемый тип закрепления «металл-стекло» цилиндрической части крепления ножки в случае пережатия приводит к образованию сколов/трещин под действием внутренних напряжений.

Опыт использования уголкового отражателей компании PLX показал высокую степень брака. Дефекты в неметаллической части крепления были обнаружены в ЗУО: из партии 2007 г., из партии 2009 г., из партии 2013 г. (рис. 4 (а, б)). По п.п. 1.5, 1.6 ГОСТ 2.124-85 ответственность за обоснованность и правильность применения зеркального уголкового отражателя, как покупного изделия, лежит на разработчике изделия и его доработка возможна в рамках рекламационной работы.

Для анализа возникших дефектов в креплении ЗУО производства PLX в 2014 году было решено провести механические и климатические испытания на зеркальных уголкового отражателях 2013 г., на которых были обнаружены трещины на неметалли-

ческой части «ножки». В рамках этой работы была выпущена программа испытаний. Контроль остаточных напряжений в ножке ЗУО с трещиной на полярископе ПКС-500 после проведения всех испытаний не выявил наличия внутренних напряжений. На ножке исследуемого ЗУО на месте радужного пятна, которое свидетельствовало о наличии неснятого внутреннего напряжения, до проведения всех испытаний образовалась дополнительная трещина. После проведения испытаний контроль остаточных напряжений в ножке с трещиной ЗУО не выявил наличие внутренних напряжений. Вид трещин на ножках угловых отражателей после испытаний не изменился, и, как следствие, был сделан вывод о том, что зеркальные угловые отражатели могут быть использованы в образце для предварительных испытаний.

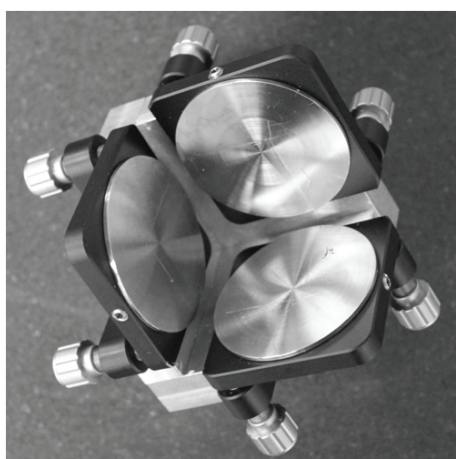
МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Таким образом, задача импортозамещения ЗУО является комплексной. Необходимо не только воссоздать высокоточную оптическую деталь, но и доработать конструкцию крепления. Предлагаются несколько вариантов технологии изготовления ЗУО: склейка трех «лепестков» с последующим креплением на «ножку», соединение де-

талей зеркального углового отражателя при помощи ГОК, либо изготовление цельнометаллического ЗУО.

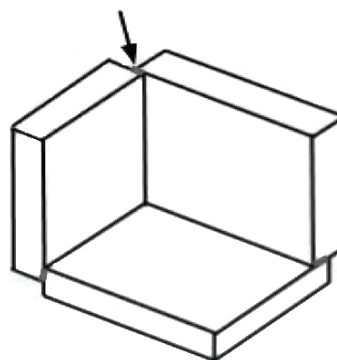
Например, в статье [1] описано приспособление с регулируемым креплением, которое состоит из трех панелей, установленных таким образом, что при помощи винта или микрометра можно выставлять независимо угол каждой из них (рис. 5(а)). Это приспособление может быть использовано для склейки ЗУО. Три панели закреплены на месте при помощи пружин и шарикоподшипников, которые вмонтированы в жесткое основание, по форме сходное с самим угловым отражателем. Между панелями предусмотрен технологический промежуток приблизительно 1,3 мм, который позволяет перемещать каждую панель независимо, и при необходимости использовать подкладки между панелями. Они могут использоваться для контроля перекрытия зеркальных пластин, по которому проходит шов склейки

Зеркальные пластины располагаются на приспособлении таким образом, что боковая сторона одной пластины внахлест заходит на зеркальную часть другой (рис. 5(б)). Начальное положение зеркал фиксируется на приспособлении и может быть проконтролировано на интерферометре, например,



а)

клеевой шов



б)

Рисунок 5.

*Макет приспособления с регулируемым креплением (а)
и область нанесения эпоксидного клея (б)*

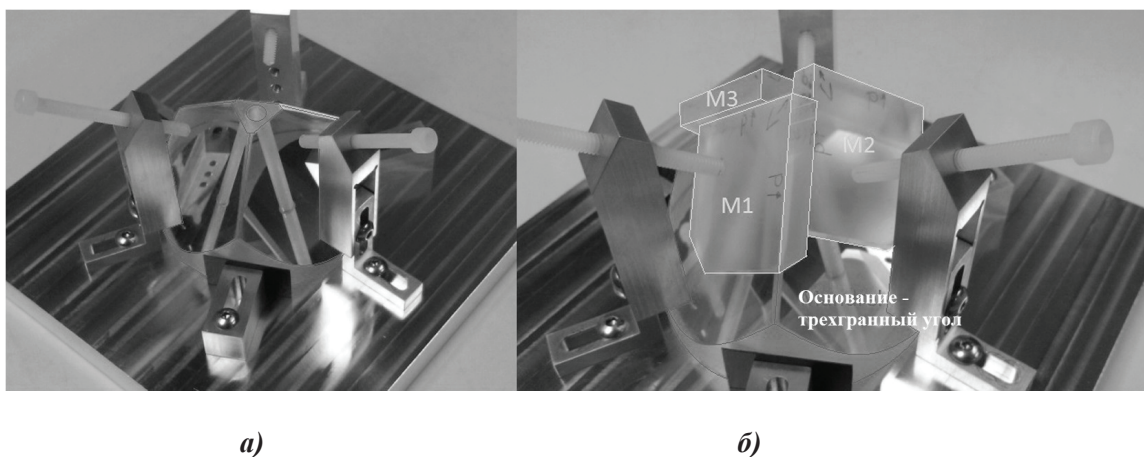


Рисунок 6.
Установка сердечника (а), фиксация стеклянных пластин (б)

ФТИ-100 или Zygo. В частности измеряются ошибки двугранных углов между пластинами, волновой фронт, расхожимость выходящего пучка уголкового отражателя. После того как зеркальные пластины предварительно выставлены на интерферометре (фиксируются соответствующее положение панелей), небольшое количество клея наносится маленькими каплями на линию шва. Подвижками винта можно регулировать положение пластин во время склейки сборки. Приспособление с закрепленными зеркальными пластинами оставляют на несколько часов, позволяя эпоксидному клею затвердеть. После этого подкладки удаляют и ещё раз проверяют сборку на интерферометре.

Сложность этого метода заключается в позиционировании деталей и подборе оптимального по своим физико-химическим свойствам клея.

Другой вид приспособления для склейки уголкового отражателя, также описанный в указанной статье, состоит из трехгранного угла куба, используемого в качестве основания. Стеклянные пластины располагаются на гранях основания, а затем склеиваются (рис. 6). На углах основания-куба нанесены фаски для того, чтобы клей, который может вытечь из соединительного шва, не попал на грани куба и не приклеил к ним стеклянные пластины.

Стеклянные пластины и основание-куб предварительно очищают ацетоном или другим растворителем, чтобы удалить загрязнения. Стеклянные пластины надежно закрепляются на основании винтами со скругленными концами. Необходимы экстремальная чистота и аккуратность при выполнении этой операции, в противном случае возможны царапины и сколы на рабочей поверхности. Выравнивание заканчивается придавливанием стеклянных пластин относительно куба и друг друга. Сердечник устанавливается первым (рис. 6 (а)), затем фиксируются стеклянные пластины (рис. 6 (б)). В рассмотренном случае вся боковая грань одной пластины располагается на рабочей поверхности другой пластины (линия клеевого шва определяется толщиной пластины). Точность установки пластин оценивается по интерференционным кольцам. Выравнивание проводится до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное значение колец. Затем затягиваются винты так, чтобы пластины были надежно закреплены в полученном положении. Интерференционные кольца необходимо проверять в течение суток, чтобы убедиться, что пластины не соскальзывают и не меняют своего положения. После этого можно использовать один из методов склейки. Зеркальное покрытие наносится на уголкового отражатель после склейки.

Аналогичное приспособление было использовано на ПАО КМЗ для изготовления зеркальных уголкового отражателей на глубоком оптическом контакте. Пластины-лепестки фиксировались на основании-кубе на ГОК, затем тем же способом к ним крепилось основание. Для осуществления такого соединения «лепестков» и «ножки» актуальны задачи уменьшения массогабаритных характеристик, повышения точности изготовления.

В случае изготовления цельнометаллического ЗУО необходима проработка как технологии нанесения покрытия, так и сохранности характеристик в течение всего срока эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация предложенных способов изготовления позволит разработать и реализовать отечественную технологию производства зеркальных уголкового отражателей, не уступающих зарубежным аналогам по всем основным характеристикам: угол расходимости пучка на выходе, допустимый размах ошибки волнового фронта, световой диаметр, рабочий спектральный диапазон, масса. Для этого должны быть решены такие задачи, как позиционирование деталей с высокой точностью, подбор клея с определенными физико-химическими свойствами, уменьшение массогабаритных характеристик.

Список литературы:

1. Alex Preston, Stephen Merkowiz «Comparison of fabrication techniques for hollow retroreflectors», Optical Engineering, volume 53(6), 065107 (Jun 26, 2014), 6 стр.
<http://spie.org/Publications/Journal/10.1117/1.OE.53.6.065107>
2. Martino, Antonio J.; Hagopian, John G «Effects of Shear, Defocus, and Wavefront Error on the Theoretical Performance of the Composite Infrared Spectrometer for Cassini», SPIE 3435, Cryogenic Optical Systems and Instruments VIII, (17 September 1998), 9 стр.
<http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.323745>
3. Коломийцев Ю.В. «Интерферометры», Л., Машиностроение, 1976 г., стр. 101
4. Robert J. Hill; Trevor L. Courtney; Samuel D. Park; David M. Jonas «Lightweight hollow rooftop mirrors for stabilized interferometry», Optical Engineering, Volume Volume 52(10) 105103, (October 2013), 6 стр.
<http://spie.org/Publications/Journal/10.1117/1.OE.52.10.105103>
5. Alix Preston, Benjamin Balaban, Gabriel T. Boothe, Guido Mueller «Stable Materials and Bonding Techniques for Space-Based», NASA Science Technology Conference 2007, 5 стр.
http://esto.nasa.gov/conferences/nstc2007/papers/Preston_Alix_C1P3_NSTC-07-0029.pdf

ФАЗОВАЯ синхронизация в многоканальных лазерных системах с использованием итерационных алгоритмов обработки изображений

СЕМЁНОВ П.А.^{1,2}

¹АО «Швабе - Исследования», г. Москва

²АО «КБ «Кунцево», г. Москва

E-mail: piter@bk.ru

В работе рассматривается задача когерентного сложения лазерных излучателей в многоканальных системах. Предложен метод активной фазовой синхронизации с использованием многоапертурного датчика волнового фронта на основе итерационного алгоритма восстановления изображений Гершберга-Сэкстона. Проведено численное и физическое моделирование по использованию данного метода к задачи восстановления фазовой информации в семиканальной системе.

Ключевые слова: фазовая синхронизация, когерентное сложение, многоканальные лазерные системы, многоапертурный датчик волнового фронта, алгоритм Гершберга-Сэкстона.

Во многих современных лазерных комплексах возникает проблема получения излучения с достаточно высокой мощностью и малой расходимостью. Однако одновременное выполнение данных требований в одноканальных системах часто бывает затруднительно, поскольку лучевая стойкость активных элементов лазера ограничена, а увеличение их поперечных размеров для достижения достаточно большой излучающей апертуры ведет к недопустимому ухудшению терморежима активной среды лазера. Кроме того, например, для волоконных лазеров, а в ряде приложений их использование наиболее целесообразно, увеличение максимальной мощности излучения, при близкой к дифракционной расходимостью выходного пучка, ограничивают нелинейные процессы в активной среде [1, 2].

Повышение мощности выходного излучения наряду с достижением дифракционной расходимости может быть достигнуто за счет создания многоканальных излучателей, в оконечных каскадах которых работает не один, а несколько активных элементов с не-

большими размерами поперечного сечения. При независимой генерации лазеров поля отдельных каналов являются некогерентными и их интенсивности просто суммируются. В случае синфазной генерации лазеров, когда частоты и фазы излучения отдельных каналов совпадают, выходной пучок образуется в результате интерференции волн и в результате интенсивность на оси такого пучка в N^2 раз оказывается больше интенсивности одного канала. На первый взгляд может показаться очевидным преимущество систем с когерентным сложением пучков, однако реализация таких систем в настоящее время, особенно для лазеров средней и высокой, технически затруднительна. Поэтому представляет практический интерес провести сравнительный анализ различных способов построения таких многоканальных излучателей и постараться выявить оптимальные условия их использования.

Рассмотрим для примера семиканальную лазерную систему с круглыми апертурами и гауссовым распределением излучения в каждом канале (рис. 1). Фаза в каждом канале

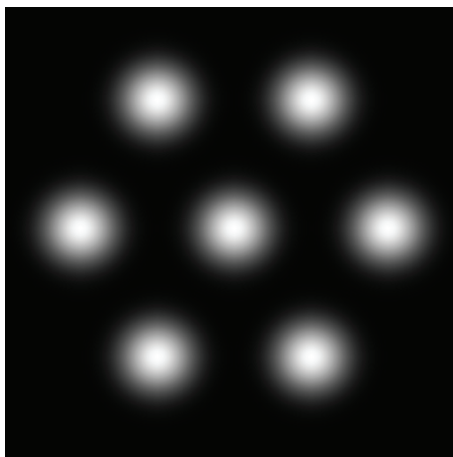


Рисунок 1.

Модель семиканальной лазерной системы, использованная в численном моделировании

для некогерентной системы выбиралась случайным образом в пределах $\pm \pi$ рад. Эффективность системы определялась по нормированной мощности излучения в плоскости цели в пятне заданной площади

$$\eta = P / P_{sng}, \quad (1)$$

где P_{sng} - соответствующая мощность для одноканальной системы, тех же размеров и той же полной мощности на выходе излучателя.

На рис. 2 представлены результаты численного расчёта по эффективности распространения многоканальных систем без атмосферного канала. Параметры системы: Общие размеры апертуры $D=0.6$ м. Длина волны $\lambda=1.07$ мкм. Площадь заданного пятна $S=100$ см². Мощность излучения в каждом канале на выходе излучателя $p_m=1$ кВт. Число каналов $N=7$.

Как видно из рисунка, при небольшой дальности (до 6 км) эффективности систем с когерентным сложением пучков и без него одинаковы и равны по эффективности одноканальной системе тех же размеров. Затем, при увеличении дальности эффективные мощности многоканальных систем резко падают. При этом, если эффективность системы без синхронизации падает практически до нуля, то значение нормированной мощности для

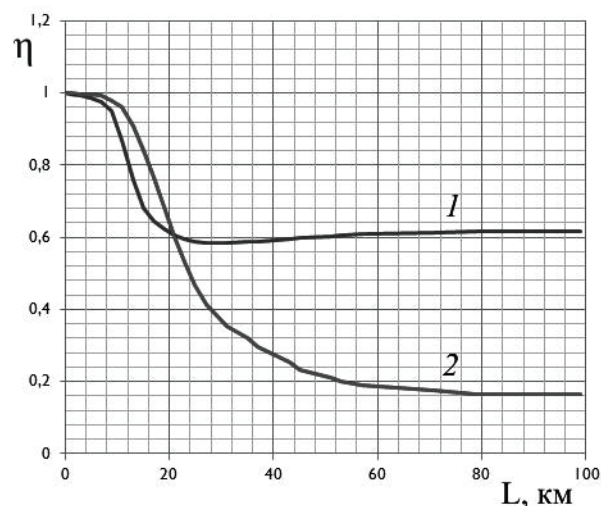


Рисунок 2.

Эффективность многоканальных систем, в зависимости от дальности (1 – когерентная система; 2 – некогерентная система)

когерентной системы устанавливается к значению 0.5-0.6 от мощности одноканальной системы.

Из полученных зависимостей видно, что существует область дальностей (около 10 км), при которой эффективность некогерентной системы оказывается выше чем аналогичной системы с когерентным сложением пучков. Данный эффект можно объяснить тем, что поскольку в некогерентной системе при сложении пучков интерференция между каналами отсутствует, то общий размер картины поля в дальний зоне ограничен. Поэтому на небольших дальностях вся мощность излучения попадает в пятно заданных размеров. При когерентном же сложении пучков, возникает интерференция между каналами, и интерференционные пики дальних порядков выходят за область заданных размеров. В сумме данные порядки достаточно малы, поэтому при увеличении дальности, когда мощность некогерентной системы начинает выходить из области заданных размеров, эффективность систем когерентного сложения становится выше. Стоит заметить, что в реальных условиях, когда чувствительность приёмников излучения ограничена, данного эффекта может не наблюдаться и эффективность систем с когерентным сложением пучков на данном расстоянии будет выше анало-

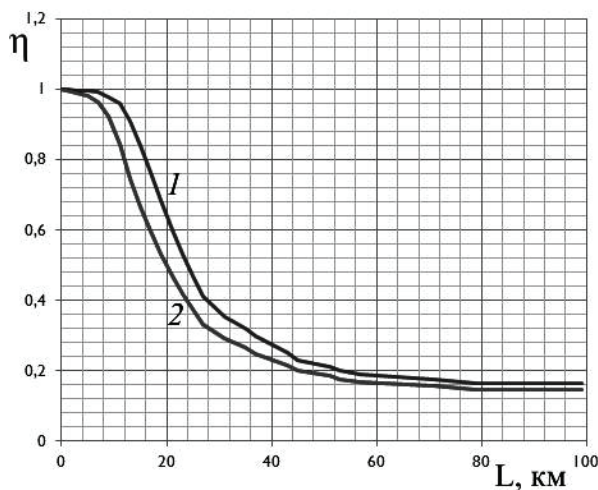


Рисунок 3.

Эффективность многоканальных систем, при наличии турбулентной атмосферы (1 – когерентная система; 2 – некогерентная система)

гичной системы без когерентного сложения.

Теперь рассмотрим эффективность распространения многоканальных систем при наличии атмосферных искажений (рис. 3). Параметры системы аналогичны первому случаю. Модель атмосферы выбиралась в виде одиночного случайного фазового экрана, параметр турбулентности $C_n^2 = 10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$. Как видно из рисунка, при наличии атмосферных искажений, эффективность систем с когерентным сложением пучков резко падает. И на больших дальностях такие системы по эффективности сравнимы с системами без когерентного сложения.

Как видно из рисунков, основное преимущество когерентных систем проявляется лишь на больших дальностях (свыше 20 км) без атмосферных искажений. При наличии турбулентной атмосферы эффективность системы с фазовой синхронизацией практически не отличается от аналогичной системы без когерентного сложения пучков. Однако данные результаты показывают эффективность мощности в пятне заданных размеров. Если целью лазерного комплекса является создание максимальной мощности на оси пучка (лазерная связь), то в данном случае значительное преимущество будет именно у систем с когерентным сложением пучков. Поэтому далее подробно будут рассмотрены именно такие системы.

В настоящее время существует более 20 различных технических решений задачи фазовой синхронизации в многоканальных лазерных системах [3, 4]. Среди них важное место занимают методы, основанные на активном управлении параметрами излучения каждого лазера в системе, которое обычно осуществляется с помощью распределенной адаптивной оптической системы, в большинстве практических случаев представляющая собой систему апертурного зондирования, на основе оптимизации функции резкости изображения [5].

В настоящей работе рассмотрена система фазовой синхронизации с активной обратной связью с многоапертурным датчиком волнового фронта (МДВФ) без опорного пучка, в основе работы которого лежит алгоритм Гершберга-Сэкстона [6]. Данный алгоритм позволяет восстанавливать комплексные поля на апертуре линзы $\tilde{E}(\xi)$ и в ее фокальной плоскости $E(\vec{r})$ по распределениям их интенсивностей $|\tilde{E}(\xi)|$ и $|E(\vec{r})|$.

Алгоритм Гершберга-Сэкстона относится к классу проективных итерационных алгоритмов. На первой итерации, для выбранного в качестве начального приближения фазы и измеренного в апертурной плоскости распределения интенсивности вычисляется комплексная амплитуда в выходной плоскости. Затем, модуль рассчитанной в выходной плоскости амплитуды поля заменяется корнем из измеренного распределения интенсивности в фокальной плоскости. Далее вычисляется обратное распространение пучка и полученная таким образом фаза, выбирается в качестве следующего приближения.

Таким образом, алгоритм Гершберга-Сэкстона может быть записан в виде следующей итерационной процедуры

$$\begin{aligned} \tilde{E}_0(\xi) &= \tilde{M}(\xi) \exp[i\phi_E^{(0)}(\xi)], \\ \tilde{E}_k(\xi) &= P_2 F T \{ P_1 F T^{-1} [\tilde{E}_{k-1}(\xi)] \}, \quad k=1,2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\phi_E^{(0)}(\xi)$ - начальная оценка фазы на апертуре, P_1 и P_2 - операторы проекций функций $E(\vec{r})$ и $\tilde{E}(\xi)$ на множества функций с заданными модулями $|E(\vec{r})| = M(\vec{r})$ и

$|\tilde{E}(\xi)| = \tilde{M}(\xi)$, а FT и FT^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье, соответственно.

Численный анализ алгоритма для задачи фазовой синхронизации проводился в работе [8]. Была показана принципиальная возможность использования алгоритма Гершберга-Сэкстона в качестве многоапертурного датчика волнового фронта для фазовой синхронизации систем вплоть до 127 каналов. Так же было установлено, что при некоторых начальных условиях, при большом числе каналов сходимость алгоритма не гарантируется – он попадает в так называемые состояния стагнации (аналог локальных экстремумов). В работе [9] были рассмотрены различные стратегии восстановления фазовой информации на основе методов глобальной оптимизации и редукции размерности задачи. Было показано, что при использовании алгоритма глобальной оптимизации «случайный мултистарт» вместе с методом редукции, основанном на блоковом принципе может эффективно восстанавливать фазовую информацию однозначным образом для систем с большим числом лазерных каналов.

Ниже показаны экспериментальные результаты по использованию алгоритма Гершберга-Сэкстона в качестве многоапертурного датчика волнового фронта.

Различные экспериментальные исследования по восстановлению фазовой информации с помощью алгоритма Гершберга-Сэкстона в

разное время были описаны в работах [9, 10]. Цель настоящего исследования – продемонстрировать работу алгоритма для многоканальных систем (в данном случае 7 каналов) для задачи фазовой синхронизации.

Физический эксперимент по восстановлению фазовой информации проводился на модели семиканальной лазерной системы с равномерным распределением интенсивности и различным фазовым сдвигом φ в каждом канале. Схема экспериментальной установки по восстановлению фазовых характеристик представлена на рис. 4. Равномерное одномодовое поляризованное излучение He-Ne лазера ($\lambda=632$ нм, $P=1$ мВт) от интерферометра Zygo Mark IV попадает на разделитель, маску, моделирующую независимую семиканальную лазерную систему с различным фазовым сдвигом в каждом канале. Ширина каждого отверстия 4.5 мм, расстояние между отверстиями 2,5 мм. Далее, проходя через светоделительную пластину, часть излучения возвращается обратно в интерферометр, где регистрируется TV камерой. Другая часть, фокусируется линзой ($f=500$ мм) на поверхность ПЗС-камеры Pulnix, которая регистрирует распределение интенсивности в фокальной плоскости. Данные распределения попадают в вычислительное устройство (компьютер), где с помощью алгоритма Гершберга-Сэкстона происходит восстановление фазовой информации.

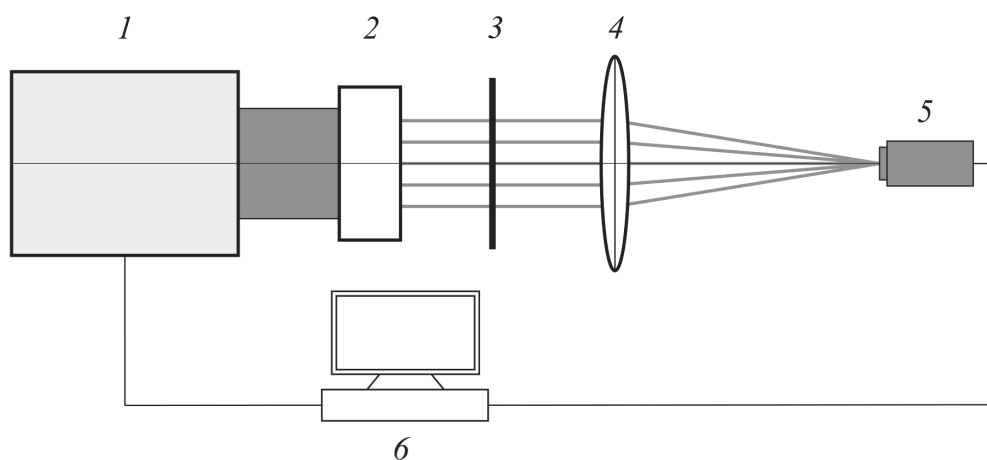


Рисунок 4.

Схема эксперимента по восстановлению фазовой информации 7 лазерных пучков

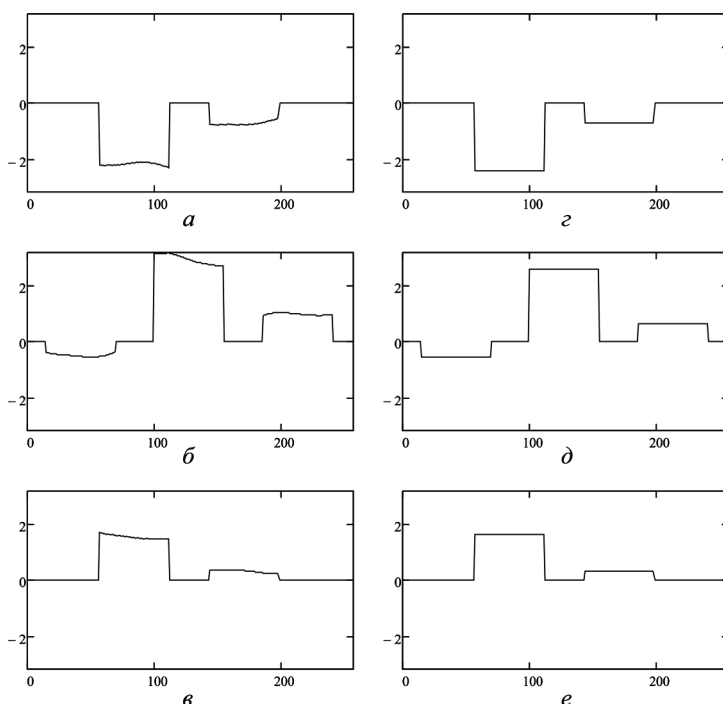


Рисунок 5.
Результаты восстановления фазовой информации
(а-в – фазы, восстановленные с помощью алгоритма Гершберга-Сэкстона;
г-е – численное моделирование)

При этом основную роль играет распределение интенсивности в фокальной плоскости, так как распределение в апертурной плоскости не изменялось в зависимости от фазовых сдвигов, и в ряде экспериментов заменялось численным моделированием. Фокус системы и нормировка полученного изображения с камеры Pulnix подбирались таким образом, чтобы распределение интенсивности для сфазированной системы максимально точно совпадало с его математическим моделированием.

Различный фазовый сдвиг моделировался путём помещения в каждый канал разделительной маски стёкол разной толщины. Диапазон изменения толщины стекла – от 0,66 мм до 0,97 мм, с шагом 0,05 мм. Для проверки и контроля фазовых сдвигов использовалась классическая схема интерферометра Физо. Для этого, в схеме на рис. 4 между интерферометром и маской ставилась полупрозрачная пластина. Интерферограмма регистрировалась TV камерой. При этом в схеме наблюдалось смещение интерференционных полос.

Данная схема была рассчитана с помощью пакета моделирования ZEMAX, при этом для стекол, при каждом значении толщины был рассчитан фазовый сдвиг. Полученные численные данные полностью совпадают с результатами физического моделирования.

На рис. 5 (а-в) представлены сечения восстановленного фазового фронта с помощью алгоритма Гершберга-Сэкстона. Восстановление происходило как из нулевой, так и из случайных начальных точек. Среднее число итераций при которых наблюдалась сходимость алгоритма равнялось 15.

Восстановленное распределение сравнивалось с численным моделированием при минимуме ошибки модуля в фокальной плоскости при 10 000 различных случайных вариациях фазовых сдвигов в каждом канале (рис. 5 г-е). При этом ошибка фазового распределения, полученного таким методом и восстановленная с помощью алгоритма, составила не более 12%, что объясняется ошибкой юстировки и точностью укрепления стёкол.

В работе проведен анализ эффективности многоканальных лазерных систем. Показано, что основное преимущество систем с фазовой синхронизацией при распространении излучения на большие дальности без атмосферных искажений. Во всех остальных случаях системы с когерентным сложением пучков и без него дают практически одинаковую эффективность.

Также в работе рассматривается метод фазовой синхронизации, основанный на алгоритме Гершберга-Сэкстона. Проведено физическое моделирование по восстановлению фазовой информации в семиканальной системе, показана принципиальная возможность построения многоаперного датчика волнового фронта, на основе данного алгоритма.

Список литературы:

1. LaFortune K.N., Hurd R.L., Fochs S.N., Rotter M.D., Pax P.H., Combs R.L., Olivier S.S., Brase J.M., Yamamoto R.M. Technical challenges for the future of high energy lasers // Proc. of SPIE. 2007. V. 6454. P. 1-11.
2. Dawson J. W., Messerly M. J., Heebner J. E., Pax P.H., Sridharan A.K., Bullington A.L., Beach R.J., Siders C.W., Barty C.P.J., Dubinskii M. Power scaling analysis of fiber lasers and amplifiers based on non-silica materials // Proc. SPIE. 2010. V. 7686. P. 768611-1 – 768611-12.
3. Coherent Laser Beam Combining. Edited by A.

Brignon. Wiley-VCH. 2013. 498 p.

4. Liu Z.J., Zhou P., Xu X.J., Wang X.L., Ma Y.X. Coherent beam combining of high power fiber lasers: Progress and prospect // Sci. China Tech. Sci. 2013 V. 56. N. 7. P. 1597–1606.
5. Vorontsov M.A., Lachinova S.L. Laser beam projection with adaptive array of fiber collimators // J. Opt. Soc. Am. A. 2008. V. 25. N. 8. P. 1949–1973.
6. Gerchberg R.W., Saxton W.O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures // Optik (Stuttgart). 1972. V. 35. N 2. P. 237–246.
7. Польских С.Д., Семёнов П.А. Адаптивная оптическая система на основе алгоритма Гершберга-Сэкстона для фазовой синхронизации одномодовых лазерных излучателей. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т.27. № 02. С. 100–104.
8. Семёнов П.А., Польских С.Д. Моделирование системы фазовой синхронизации лазерных излучателей на основе итерационных методов обработки изображений. // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. № 3. С. 370-375.
9. Ivanov V. Yu., Sivokon V P., Vorontsov M. A. Phase retrieval from a set of intensity measurements: theory and experiment // J. Opt. Soc. Am. A. 1992. V. 9. N. 9. P. 1515–1524
10. Ильина И.В., Черезова Т.Ю., Кудряшов А.В. Алгоритм Гершберга-Сакстона: экспериментальная реализация и модификация для задачи формирования многомодового лазерного излучения // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. №6. С. 521–527.

ИЗМЕРЕНИЕ ФУНКЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ОБЪЕКТИВОВ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

ОСИПОВИЧ И.Р.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: igro@zenit-kmz.ru, igroos@mail.ru

Предложен способ применения установки для контроля качества изображения объектива с матричным анализатором для исследования функции концентрации энергии объективов. Это позволяет отказаться от использования сменных диафрагм и отстроиться от погрешностей определения энергетического центра пятна рассеяния.

Ключевые слова: объектив, пятно рассеяния, функция концентрации энергии.

Функция концентрации энергии (ФКЭ) показывает зависимость энергии в пятне рассеяния, содержащейся в круге определенного диаметра, от величины этого диаметра. Поэтому ФКЭ еще называют распределением энергии в пятне рассеяния. Она является важнейшим, если не основным, критерием качества изображения оптических систем, работающих по бесконечно удаленным малоразмерным «точечным» объектам. Например, ФКЭ актуальна для объективов, применяющихся в системах контроля космического пространства или в оптической локации.

В настоящее время реализованы автоматизированные средства контроля таких функций качества изображения объективов, как функция рассеяния точки и функции передачи модуляции [1], а также дисторсии [2]. В данной работе рассмотрим возможность их использования для исследования ФКЭ.

В настоящее время регламентируемые стандартами [3, 4] методы измерения концентрации энергии в пятне рассеяния предусматривают использование сменных диафрагм различного диаметра, устанавливаемых перед приемником излучения. Полученные значения фотосигнала, нормированные на значения фотосигнала без диафрагм дает ряд значений ФКЭ.

Анализ стандартных методов показывает, что их использование сопряжено с рядом неудобств и проблем:

1. Погрешность измерений ФКЭ сильно зависит от того, насколько точно центр каждой диафрагмы совмещается с энергетическим центром пятна рассеяния. Выставление каждой диафрагмы является трудоемким процессом и занимает много времени, особенно если пятно рассеяния имеет несимметричную форму.

2. Универсальное средство измерения ФКЭ, рассчитанное на широкую номенклатуру объективов при использовании стандартного метода требует наличия большого набора диафрагм.

3. Большое время измерений требует использования источников излучения и регистрирующей аппаратуры с очень высокой временной стабильностью параметров. Так, нестабильность источника излучения согласно [3] не должна превышать 0,1%.

Поскольку первичной информацией для получения ФКЭ является функция рассеяния точки, представляется возможным использование для контроля ФКЭ установок с матричным анализатором изображения, подобных описанной в работе [1].

Анализ существующих наработок [5] по-

звolyет выделить следующие этапы контроля ФКЭ:

1. Запись кадра.
2. Выделение рабочего фрагмента с изображением пятна рассеяния.
3. Пороговая обработка сигнала.
4. Вычисление координат энергетического центра.
5. Расчет ФКЭ.

Вопрос пороговой обработки сигнала имеет ряд особенностей. Вариант обнуления величин сигналов в элементах с уровнем сигнала менее среднего темнового значения и вычитание среднего темнового значения из уровней сигнала остальных элементов, предложенный в работе [5] является очевидным. Но, как представляется, он имеет ограниченное применение. Это связано со следующими причинами:

1. У любого матричного фотоприемника имеется неравномерность чувствительности в пределах фоточувствительной области, а также неравномерность шумовых сигналов. Более того, распределение шумов носит случайный характер и меняется с течением времени.

2. На результат пороговой обработки сильно влияет наличие рассеянного излучения и возможных боковых засветок или бликов. Это усиливает неравномерность распределения мешающих сигналов, от которых надо отстроиться. А номера пикселей, на которые попадает изображение пятна рассеяния можно считать случайными величинами.

Поэтому усреднение темнового сигнала по всем пикселям может дать большую погрешность.

Экспериментальная проверка различных способов пороговой обработки кадра показала, что наиболее достоверные результаты дает обработка контрольных областей шириной $\sim 0,1 \div 0,2$ от ширины рабочего фрагмента в углах рабочего фрагмента с изображением пятна рассеяния. При условии нескольких итераций с увеличением ширины рабочей области разброс значений ФКЭ будет минимальным, а пороговый сигнал непрерывно уточняться.

Формулы для расчета координат энергетического центра пятна рассеяния хорошо известны [5]:

$$X_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} j}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}, \quad Y_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} i}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}, \quad (1)$$

где $U_{i,j}$ – сигнал на пикселе (i,j) .

После этого вычисляется энергия, попадающая в окружность заданного радиуса:

$$U_R = \begin{cases} \sum_i \sum_j U_{i,j}, & (i - X_c)^2 + (j - Y_c)^2 \leq R^2 \\ 0, & (i - X_c)^2 + (j - Y_c)^2 > R^2 \end{cases} \quad (2)$$

где R – радиус пятна в пикселях.

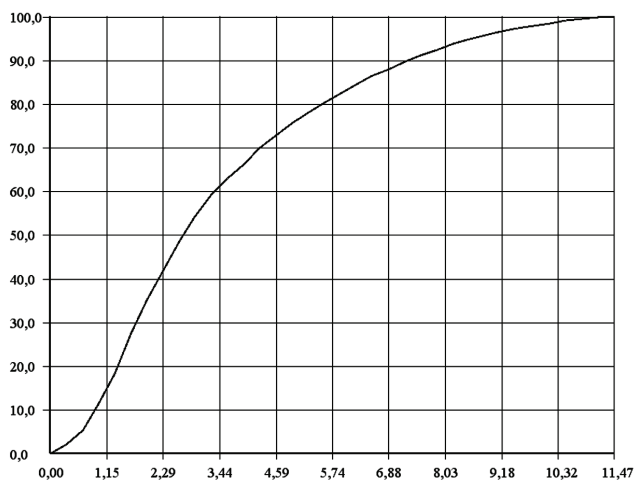
Основная проблема расчета ФКЭ по формуле (2) – определение границ пятна, энергия в пределах которых принимается за 100% из-за маскирующего действия шумов матрицы и малого градиента функции рассеяния точки в этих областях.

Для определения границ пятна рассеяния можно предложить, давая приращение радиуса пятна рассеяния на 1 пиксель, сравнивать энергию в этом пятне с энергией в пятне, имеющим радиус $R-1$ пиксель. Если отношение энергий U_{R-1}/U_R отличается от единицы на какой-то критический уровень Δ , дальнейшие итерации прекращаются.

Определение 100%-й энергии путем интегрирования по всему кадру, как показала обработка реальных объективов, может из-за шумов матрицы привести к неприемлемо большой погрешности определения энергии пятна, особенно при доминировании случайной составляющей шумов. При этом для контроля за сходимостью итерационного процесса целесообразно выполнить расчет концентрации энергии в пятне рассеяния для нескольких размеров анализируемой области кадра: начиная от кадра, охватывающего энергетический центр пятна рассеяния и постепенно увеличивая его пороговые области. Именно шумы фотоприемника являются определяющими при задании в настройках программы конкретного значения порогового уровня Δ .



а)



б)

Рисунок 1.

Вид пятна рассеяния объектива (а) и его ФКЭ (б)

В качестве примера рассмотрим определение ФКЭ объектива, изображение дифракционной точки которого показано на рис. 1,а.

Объектив имеет aberrации, а его пятно рассеяния не имеет осесимметричной формы и резкой границы. Несовпадение энергетического центра пятна с зоной максимального сигнала (на рис. 1, а обозначено крестиком) это подтверждает. Кадр получен с помощью ПЗС-матрицы с размером пикселя 6,45 мкм и объективом переноса с увеличением 20×.

Табл. 1, построенная по данным анализа ФКЭ вышеописанного объектива, показывает, как меняется результат расчета ФКЭ для различных уровней Δ при увеличении ширины анализируемой области d .

В табл. 1: R_{max} – максимальный радиус пятна рассеяния, энергия в котором в данном конкретном случае принимается за 100%,

N – количество точек ФКЭ, которые получаются при этом.

Из таблицы видно, что начиная с определенной ширины обрабатываемой области радиус пятна фиксируется и перестаёт меняться. Этот уровень как раз и принимается за 100%, а дальнейшие итерации прекращаются. Полученная для рассматриваемого в данной работе объектива ФКЭ приведена на рис. 1,б. Здесь по оси абсцисс откладывается радиус пятна в микрометрах, а по оси ординат – доля содержащейся в нем энергии в процентах.

Статистика, полученная при измерении ФКЭ объективов с разным качеством изображения, показывает, что разброс значений радиуса пятна не превышает 5-6%. Случайная погрешность измерения концентрации энергии в пятне рассеяния не превышает 0,5÷0,7% по абсолютной величине, что со-

Таблица 1.

Влияние параметров анализа пятна рассеяния объектива на измеренную ФКЭ

Δ	R_{max} , мкм	N	R_{max} , мкм	N	R_{max} , мкм	N	R_{max} , мкм	N	R_{max} , мкм	N
0,005	4,92	16	9,83	31	10,82	34	10,82	34	10,82	34
0,003	4,92	16	9,83	31	11,47	36	11,47	36	11,47	36
d , пиксели	30		60		90		120		160	

ставляет около 1% в относительных единицах. Рассмотренный в настоящей работе пример ФКЭ одного из объективов подтверждает сделанную оценку. Это заметно лучше, чем можно достичь стандартной методикой, погрешность которой по оценке [4] составляет порядка 10%. При этом обеспечивается высокая производительность процесса измерений, а ФКЭ получается одновременно с другими функциями качества изображения объектива. Доработка аппаратной части средств измерений, подобных описанным в работе [1], не требуется; все изменения и дополнения касаются исключительно программного обеспечения.

Таким образом, появляется возможность адаптации оборудования оптической лаборатории для контроля качества изображения объективов, предназначенных для работы с удаленными малоразмерными объектами.

Список литературы:

1. *Осипович И.Р.* Принципы построения автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем // Прикладная физика. - 2009. - №3. - С.127-131.
2. *Осипович И.Р.* Использование автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем для измерения дисторсии объективов //Измерительная техника. - 2011.- №1.-С.28-32.
3. ОСТ 3-6816-94. Метод измерения функции концентрации энергии.
4. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987.
5. *Нужин А.В.* Измерение концентрации энергии в малоразмерном изображении. С.-Пб., Интернет-журнал «ТелеФото Техника» (<http://www.telephototech.ru>), 2009.

ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ЦИФРОВОЙ АВТОКОЛЛИМАТОР

АРТЁМОВ А.Д.

АО «Швабе-Приборы», г. Новосибирск

E-mail: post@tochpribor.com

В статье описывается принцип работы двухкоординатного цифрового автоколлиматора, разработанного АО «Швабе – Приборы», его программного обеспечения и сравнение с существующими аналогами.

Ключевые слова: автоколлиматор, автоколлимационная марка.

Автоколлимационный контроль используется во многих отраслях научно-производственной деятельности человека, таких как геодезия, навигация, машиностроение, приборостроение, контрольно-измерительная техника и т.д. Он является одним из самых распространённых способов измерения параметров пространственного положения и движения объектов. Необходимость контроля быстропротекающих процессов, выдачи результатов измерения в форме, пригодной для обработки на ПК, исключения ошибки оператора, а также улучшения чувствительности прибора при его малых габаритах привела к появлению фотоэлектрических автоколлиматоров, разнообразие которых вызвано необходимостью решения различных задач.

Разработанный двухкоординатный цифровой автоколлиматор с автоматизированной обработкой результатов измерений предназначен для измерений неплоскостности, непрямолинейности протяженных деталей, параметров вибраций объектов, а также использования в качестве нуля-индикатора или датчика нуля в системах автоматического управления.

Целью данной работы было создание двухкоординатного автоколлиматора, имеющего повышенные технические характеристики и расширенные функциональные

возможности: расширенный диапазон измерения, повышенное быстродействие, повышенная точность измерения, работа прибора под управлением внешней ЭВМ, уменьшение габаритов и массы изделия, повышенная надёжность за счёт применения прогрессивной элементной базы.

Принцип работы автоколлиматора основан на измерении координат центра тяжести изображения марки на приемнике светового излучения – фоточувствительной поверхности камеры. Плоское зеркало устанавливается на расстоянии не более 20



Рисунок 1.
Внешний вид автоколлиматора АФ-0,05Ц

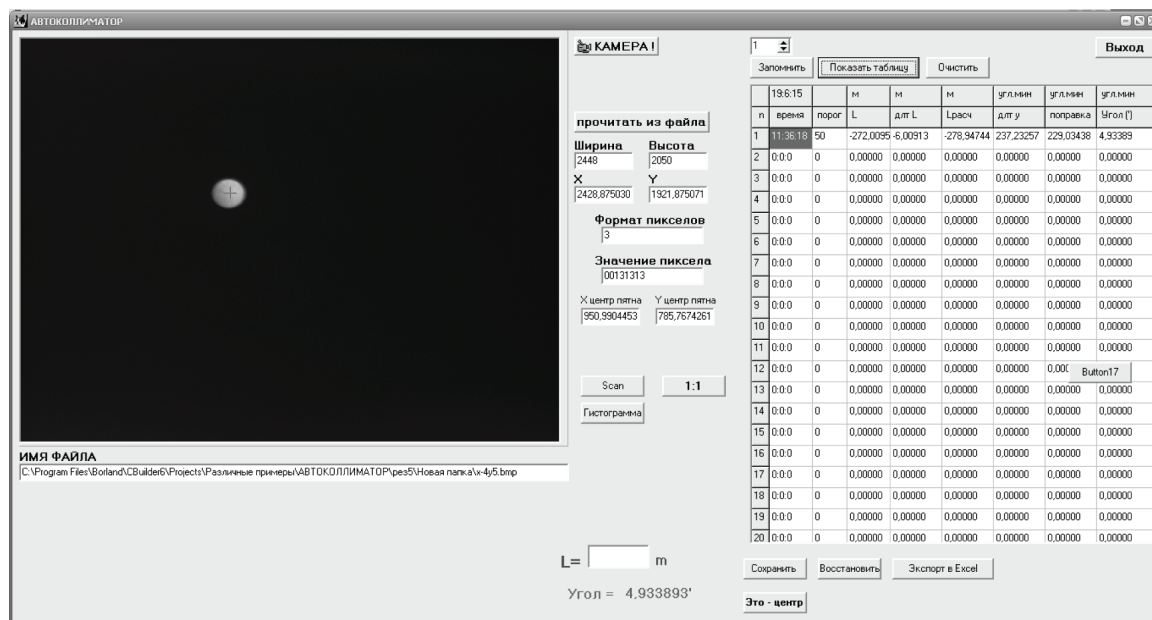


Рисунок 2.
Вид окна программы «Автоколлиматор»

м от автоколлиматора перпендикулярно его визирной оси.

Лучи света, выходящие из объектива параллельными пучками, отразившись от зеркала, вновь входят в объектив и дают изображение автоколлимационной марки на фоточувствительной поверхности камеры.

Если зеркало перемещается параллельно своему первоначальному положению, смещение изображения марки не происходит. При повороте зеркала на угол Y отраженные от него лучи поворачиваются на двойной угол $2Y$, и изображение автоколлимационной марки на фоточувствительной поверхности камеры меняет свое положение на угол Y . При различных углах наклона зеркала пучки возвращающегося потока срезаются оправой объектива или другими компонентами оптической схемы, что приводит к перераспределению энергии, т.е. смещению энергетического центра в автоколлимационном изображении и к общему уменьшению полезного сигнала. Это сказывается на погрешности и чувствительности автоколлиматора, поэтому в разрабатываемом изделии для точных измерений было необходимо устранить влияние виньетирования. Для этого поток излучения сфор-

мирован таким образом, чтобы он выходил из объектива узким пучком, не превышающим в своём поперечном сечении при попадании на зеркало размеров последнего, а приёмная апертура объектива пропускала в систему поток в пределах рабочего диапазона углов полностью, без срезания на оправе объектива. В качестве конденсора используется микрообъектив с большой передней и малой задней апертурами. Он освещает автоколлимационную марку узким пучком, не использующим всю апертуру автоколлимационного объектива, в результате из объектива выходит пучок, не превышающий по своему диаметру минимального размера зеркала, удалённого на максимальное расстояние, а возвращающийся световой поток не испытывает виньетирования на оправе объектива.

Основой измерений является камера высокого разрешения и программа обработки данных, установленная на персональном компьютере. Нахождение координат центра изображения марки производится методом поиска координат энергетического максимума на матрице камеры. Кроме того, в программе учитываются погрешности от падения освещенности при удалении изобра-

Таблица 1.
Сравнительные характеристики автоколлиматора АФ-0,05Ц,
его отечественного и зарубежного аналогов

Характеристики	АФ-0,05Ц	АК-03Ц, НПК «Диагностика»	ТА300-57 ф. TRIOPTICS, Германия
1. Диапазон измерения, угл. мин			
- в горизонтальной плоскости	± 20	± 20	± 18
- в вертикальной плоскости	± 20	± 15	± 14
2. Предел основной допускаемой погрешности, угл. с	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,37$
3. Дискретность отсчета угла, угл. с	0,05	0,05	0,05
4. Габаритные размеры, мм			
- оптико-механический блок	335x145x175	300x120x150	415x150x150
- электронный блок	—	260x200x80	—

жения автоколлимационной марки от оптической оси или центра фоточувствительной поверхности камеры, погрешности от аберрационных характеристик объектива.

Высокое разрешение матрицы камеры, низкий темновой фон и высокая равномерность чувствительности элементов матрицы позволили получить погрешность конечного изделия на уровне современных отечественных и зарубежных аналогов.

Список литературы:

1. *Латыев С.М.* Конструирование точных (оптических) приборов. «Политехника», С.-Петербург, 2007 г.
2. *Высокоточные угловые измерения* / Под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987 г.
3. *Королев А.Н., Гарцуев А.И.* Цифровой автоколлиматор / Оптический журнал. 2009 г., № 10.

СОЗДАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ (ФОТОПРИЕМНИКОВ УФ, ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ) ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР И УСТРОЙСТВ

АЛЫМОВ О.В., ЛОБАНОВА Е.Г., МИНКИН В.А., ТАТАУРЩИКОВ С.С.

ОАО «ЦНИИ «Электрон», г. Санкт-Петербург

E-mail: info@electron.spb.ru, electron.direct@mail.ru, lobanova.eg@yandex.ru, minkin@elsys.ru, stataur.46@mail.ru

В 2013 году ОАО «ЦНИИ «Электрон» успешно завершил выполнение двух ОКР по разработке современных фотоприемных устройств (ФПУ), отличающихся предельными физическими параметрами, прежде всего чувствительностью, разрешающей способностью и низким уровнем шума для заданных спектральных диапазонов.

Ключевые слова: широкоформатные ФППЗ, ФПУ, ФППЗ с обратной засветкой, гибридный модуль, солнечно-слепой модуль.

В настоящее время ОАО «ЦНИИ «Электрон» завершил работы по созданию приборов для наиболее перспективных направлений развития современной фотоэлектроники:

- ФПУ на базе крупноформатных утоненных ФППЗ, освещаемых со стороны подложки, с квантовой эффективностью в максимуме спектрального диапазона превышающей 80% [1];

- ФПУ на базе сочленённых устройств ЭОП + ФППЗ с возможностью считывания однофотонных сигналов в диапазоне спектральной чувствительности, определяемом материалом фотокатода электронно-оптического преобразователя (ЭОПа)[2].

ФПУ на крупноформатных утоненных ФППЗ являются самыми сложными изделиями из всех современных твердотельных фотоприемных устройств. Их применение распространяется на области, где необходимо достижение предельных физических параметров, прежде всего чувствительности и разрешающей способности, а значит дальности и точности обнаружения и определения параметров объекта.

Был разработан унифицированный ряд

ФПУ (ФПУ-1М с числом элементов ФППЗ 1536x1536 и ФПУ-2М с числом элементов ФППЗ 4096x4096) на базе высокочувствительных утоненных ФППЗ, освещаемых с обратной стороны.

Целью работы являлось создание унифицированного ряда ФПУ на базе крупноформатных ФППЗ для видимого, ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов спектра на основе высокотехнологичных фоточувствительных приборов с зарядовой связью.

ФПУ предназначены для применения в системах повышенной точности обнаружения малоразмерных объектов, а также для решения задач дистанционного зондирования Земли из космоса.

Применение предлагаемых к разработке ФПУ позволит повысить дальность обнаружения и распознавания малоразмерных объектов и улучшить точность определения их координат, а также обеспечить создание космических систем ДЗЗ с повышенными функциональными характеристиками.

Разработанный унифицированный ряд ФПУ на базе высокочувствительных уто-

ненных ФППЗ, освещаемых с обратной стороны, ориентирован на серийное изготовление в ОАО «ЦНИИ «Электрон».

Электрические и фотоэлектрические параметры ФПУ-1М и ФПУ-2М при приемке и поставке в нормальных климатических условиях соответствуют нормам, приведенным в табл. 1.

В ходе работы были получены и исследованы опытные образцы ФППЗ, имеющие максимум спектральной чувствительности в различных областях спектра, в зависимости от технологии просветления и очувствления кремния. Спектральные характеристики ФППЗ с различной чувствительностью приведены на рисунках 1а и 1б.

Таблица 1.

Нормы электрических и фотоэлектрических параметров ФПУ-1М и ФПУ-2М при приемке и поставке в нормальных климатических условиях

Наименование параметра, единица измерения	Буквенное обозначение	Норма	
		не менее	не более
Напряжение насыщения, мВ	Us	600	—
Заряд насыщения, тыс. эл-н	Qs	120	—
Динамический диапазон, крат	D	2400	—
Квантовая эффективность в максимуме спектрального диапазона, %	QE	80	—
Относительная неравномерность выходного сигнала, %	δU	—	10
Относительная неравномерность темнового сигнала, %	δU_d	—	2
Темновой сигнал, мВ/с	Ud	—	400
Эффективность переноса по горизонтали, отн. ед.	TEh	0,99995	—
Эффективность переноса по вертикали, отн. ед.	TEv	0,99995	—
Число дефектных элементов, шт.	N	—	2000

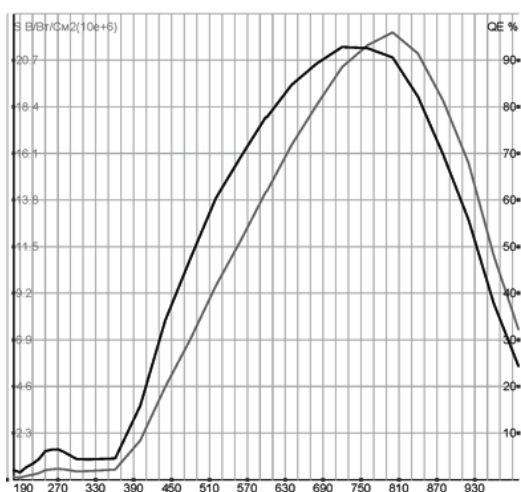


Рисунок 1а.
Спектральная чувствительность ФПУ-1М с повышенной чувствительностью в УФ области спектра

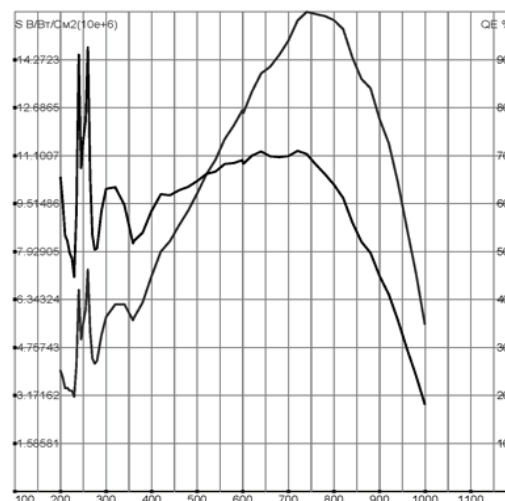


Рисунок 1б.
Спектральная чувствительность ФПУ-1М с повышенной чувствительностью в красной области спектра

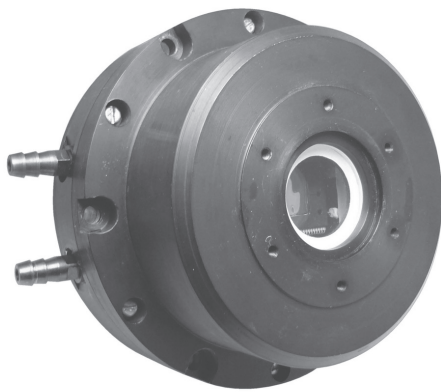


Рисунок 2а.
ФПУ-1М



Рисунок 2б.
ФПУ-2М

ФПУ предназначены для использования в температурном диапазоне от минус 600 С до плюс 600 С, имеют наработку на отказ не менее 50000 часов и срок сохраняемости не менее 20 лет. В ходе технологического ОКР планируется повысить технологический процент выхода годных и добиться повышения качества поставляемых изделий.

Внешний вид ФПУ-1М, ФПУ-2М представлен на рисунках 2а, 2б.

Разработанные и освоенные в производстве ОАО «ЦНИИ «Электрон» фотоприемные устройства находятся на современном техническом уровне и позволяют Заказчикам данных изделий повысить точность своих систем при применении унифицированных высокочувствительных ФПУ.

Список литературы

1. Алымов О.В., Минкин В.А., Левко Г.В., Стерлядкин О.К., Карпов Е.К. Перспективы создания сверхформатных ФПУ для систем ДЗЗ на основе ФПЗС с числом элементов 4Кх4К и освещенности со стороны подложки [Текст] Материалы 8-ой НТК «Системы наблюдения и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2011, с. 284.
2. Алымов О.В. Радиационностойкий матричный ФППЗ для телевизионных систем [Текст] / Алымов О.В., Костюнина О.М., Сень И.Ю., Стерлядкин О.К. // Материалы VII НТК «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», Москва, 2010, с. 272-274.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ПОСЛЕДНЕГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ОТ КОМПАНИИ «ИЗОВАК»

ШИРИПОВ В.Я., ХОХЛОВ Е.А., ЖАВНЕРКО Г.К.

ООО «Изовак Технологии», г. Минск, Беларусь

E-mail: info@izovac.com

В работе представлены последние разработки оборудования и технологий группы компаний «Изовак» в областях получения просветляющих и защитных оптических покрытий.

Рынок оптических покрытий постоянно видоизменяется ввиду совершенствования существующих и появления новых покрытий и технологий. Развитие технологий и оборудования для формирования оптических тонкопленочных структур характеризуются двумя основными тенденциями.

С одной стороны, оптические покрытия все больше проникают в повседневную жизнь человека в составе индивидуальных оптических и оптоэлектронных приборов (очковая оптика, экраны смартфонов и компьютеров и т.п.). В связи с ростом масштабов применения и спецификой обращения человека с данными приборами резко возрастают требования к производительности соответствующего технологического оборудования, а также к возможности технологий реализовывать несколько функций в одном цикле нанесения покрытий. В настоящее время востребованы покрытия, обладающие функциями просветления, износостойкости, которые также не загрязняются в процессе эксплуатации (так называемые олеофобные покрытия). Ведутся разработки гибких дисплеев, которые обладают дополнительно антибактериальными свойствами, функцией подзарядки при поглощении солнечной энергии, оборудованы дополнительно сенсорными устройствами для анализа окружающей среды. Для решения этих и подобных комплексных задач

нужна соответствующая техника. При этом следует учитывать, что в массовом производстве должны быть минимизированы материальные затраты при высокой производительности оборудования, выпускающего оптическую продукцию.

С другой стороны, для достижения оптимальных оптических характеристик нужны композиционные материалы, которые не всегда доступны на рынке или дороги из-за сложной, специальной технологии их синтеза в форме, пригодной для производства на традиционной технике испарения или распыления в вакууме. Мелкосерийный характер изготовления уникальных оптических приборов настоятельно требует появления таких технологических комплексов, которые давали бы технолог-разработчику возможность составлять рецепты композиционных оптических покрытий, пользуясь исходными чистыми химическими элементами. Иными словами нужны технологии, которые позволяют осуществлять синтез элементарных и композиционных окислов, нитридов, фторидов, сульфидов и других материалов непосредственно в тонкопленочном состоянии с составом, программируемым оператором.

В компании «Изовак» разработана линейка установок «Гиратиз». Международное название этих машин – АОС – Advanced Optical Coater.

Единая кинематическая схема всей линейки этих установок включает в себя подложкодержатель барабанного типа, место загрузки/разгрузки или смены подложкодержателя, транспортный трек для перемещения подложкодержателя с места загрузки в рабочую вакуумную камеру через шлюзовую камеру, наличие которой позволяет держать все технологические устройства в условиях высокого вакуума на протяжении многих десятков часов.

В уже созданной линейке, установки «Гиратиз» отличаются размерами барабана-подложкодержателя, а также реализуемой технологией нанесения покрытий.

Наименьшая из установок «Гиратиз» - АОС-S оснащается технологиями ионно-лучевой или ВЧ-плазменной очистки поверхности подложек, технологией синтеза окислов и нитридов методом «метамод», когда атомарный слой чистого металла прокисляется в плазме ВЧ-разряда. По второму варианту она оснащается технологией просветления на основе структуры «оксид кремния – нитрид кремния» (рис. 1), формируемой методом стимулированного плазмой химического осаждения в среде моносилана, а также технологией нанесения антизагрязняющего покрытия методом испарения из жидкой фазы. Подложкодержатель этой установки состоит из 8 граней, рабочая зона равномерного нанесения на каждой из которых имеет размер 150x150 мм².

Установки «Гиратиз» - АОС-M и АОС-ML имеют соответственно барабаны- подложко-

держатели диаметром около метра с количеством граней 15 и 16 и размерами рабочей зоны 200x270 и 200x340 мм² соответственно.

Эти установки оснащены системами ионно-лучевой очистки и полирования, технологией плазмохимического осаждения пары «оксид-нитрид кремния» и технологией нанесения антизагрязняющего покрытия. Типичная длительность цикла от загрузки до загрузки, при нанесении просветляющей структуры из четырех пар слоев $4x(\text{SiN}_x/\text{SiO}_2)$ в независимости от размеров барабана, составляет 15 минут.

Установка «Гиратиз» - АОС-S, оснащенная технологией «Метамод» позволяет формировать интерференционные структуры с числом слоев до 30-50 (проверенные варианты) с цифровой точностью задания толщины каждого слоя. При этом уровень рассеяния в структурах соответствует уровню рассеяния в слоях, полученных ионно-лучевым распылением.

Требования к точности прецизионных оптических покрытий повышаются в связи с жесткими допусками на характеристики современных приборов. Необходимые параметры достигаются в основном за счет нанесения пленок методом ионно-лучевого распыления. В настоящее время ряд ведущих мировых производителей, представляют вакуумную технику, позволяющую достигать высокой воспроизводимости и равномерности на площадях до 150-200 мм. В 2004 г. в компании ООО «Изовак» была разработана установка Аспира-150, в которой реализует-



Рисунок 1.
Вакуумная установка «Гиратиз» - АОС-M

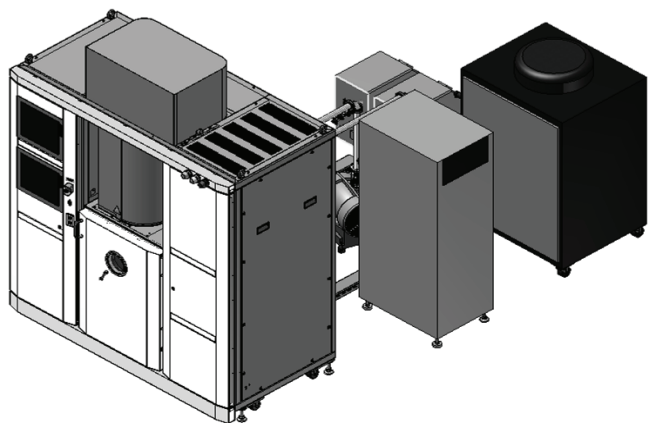


Рисунок 2.
Вакуумная установка ионно-лучевого
распыления Lidiz

ся технология ионно-лучевого распыления оптических покрытий. Она оснащалась оптическим контролем и позволяла наносить пленки высокого качества на подложку диаметром до 150 мм. Такое оборудование было поставлено заказчикам из Беларуси, РФ и Тайваня и позволило им успешно решать технологические проблемы, связанные с нанесением прецизионных оптических покрытий. В 2013 году была разработана установка Аспира-200, где был увеличен диаметр подложки до 200 мм, улучшена равномерность покрытия по подложкодержателю, а также полностью автоматизирован процесс нанесения оптических покрытий.

Для реализации технологий ионно-лучевого распыления в компании разработана и принята к производству установка «Lidiz», в которой качество слоев позволяет, в том

числе, формировать покрытия для зеркал лазерных гироскопов. В этом оборудовании, в качестве распылительного устройства используется ВЧ источник ионов, что позволило существенно снизить дефектность пленок и, тем самым, повысить выходные характеристики оптических элементов.

Основные технические характеристики установок компании «Изовак» реализующих технологию ионно-лучевого распыления представлены в таблице 1.

Достаточно большое количество пленкообразующих материалов можно наносить только испарением материала в вакууме, поэтому компания «Изовак» продолжает совершенствовать продуктовую линейку вакуумных установок «Ортус»: Ортус -700, 1100, 1500. В 2014 году был разработан и успешно прошел испытания узел оптического контроля «по пролетающему свидетелю». Спектральный диапазон контроля: 200-1100 нм. Световодный ввод-вывод излучения в напылительную камеру позволяет устанавливать систему на существующее оборудование без существенных доработок. Автоматизация остановки и переходов к следующему слою позволяет контролировать сложные неравнотолщинные структуры. Система работает только в связке с кварцевым контролем, что позволяет вести контроль в условиях скачкообразных изменений скорости распыляемого материала при использовании электронно-лучевых испарителей. Применение такой системы позволило существенно повысить

Таблица 1.
Сопоставительные характеристики оборудования
и технологических параметров процесса

Характеристики	Aspira-150	Aspira-200	Lidiz
Диаметр подложкодержателя, мм	150	200	300
Равномерность по подложкодержателю, +/- %	2,5	1,5	1
Площадь подложкодержателя с равномерностью <0,1%, см ²	19	60	150
Скорость нанесения пленки Nb ₂ O ₅ А/сек	3	1	1



«Ортус – 700»



«Ортус – 900»



«Ортус – 1100»



«Ортус – 1500»

Рисунок 3.

Серия вакуумного технологического оборудования «Ортус»

точность нанесения покрытий, тем самым расширив технологические возможности линейки установок «Ортус».

Принципиально нового, в том числе без вакуумного оборудования требует появление новых функциональных покрытий. Ярким примером является технология получения олеофобных износостойких покрытий Defensiz.

В ряде применений, таких как входные окна оптических приборов, внешние линзы объективов, архитектурные стекла или защитные стекла панелей солнечных элементов, витрин и т.д. требуется модификация больших площадей, когда вакуумное оборудование использовать нецелесообразно по экономическим причинам или достигаемым предельным параметрам.

В компании была спроектирована и построена установка GT-coater (рис. 4а), которая по-

зволяет формировать при атмосферном давлении однородные прозрачные, износостойкие покрытия на стекле, пластике и других материалах. Краевой угол смачивания таких покрытий составляет 115-117 градусов для капли воды (рис. 4б) и ~ 70 градусов – для капли гексадекана, что позволяет отнести такие покрытия к классу самоочищающихся олеофобных покрытий.

Следует отметить, что особый интерес представляют так называемые супергидрофобные покрытия [1], для которых краевой угол смачивания поверхности водой больше 150 градусов. Смачиваемость поверхности зависит от химии поверхности и ее шероховатости. На шероховатой поверхности капля «зависает» на неровностях и легко скатывается при малейшем наклоне поверхности, унося загрязнения, которые адсорбированы на поверхности. В настоящее время существует

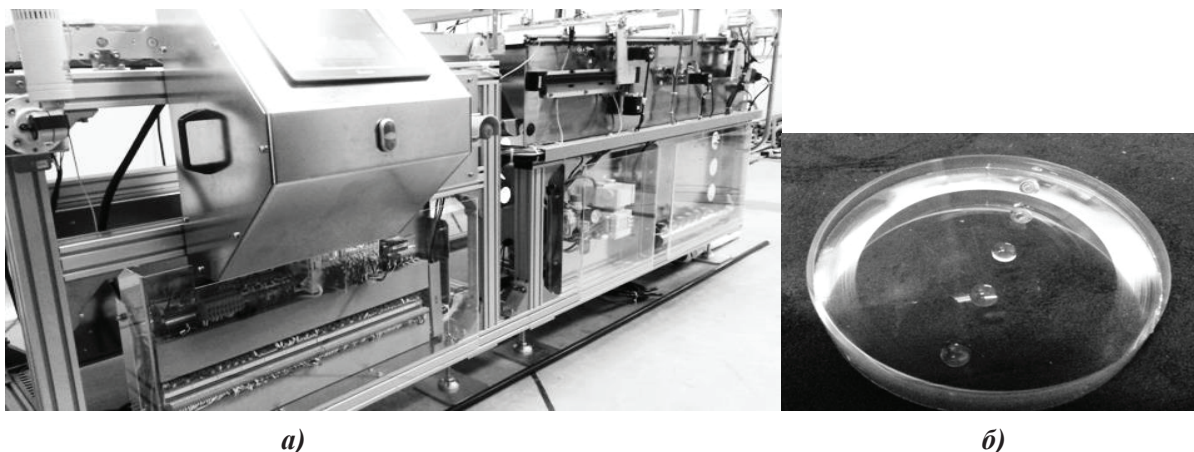


Рисунок 4.

Установка для модификации изделий из стекла и пластика износостойким олеофобным покрытием (справа) и краевой угол смачивания поверхности линзы с износостойким покрытием (слева)

ряд приемов создания таких поверхностей [2], включающих нанесение на поверхность наночастиц (создание неровностей) и гидрофобного слоя для создания низкоэнергетической поверхности. Следует отметить, что, супергидрофобное покрытие не является из-

носостойким из-за разрушения неровностей в процессе трения. Именно поэтому ищут баланс максимально допустимой неровности поверхности и физико-химических характеристик защитного покрытия.

Оптимальным поверхностно-активным (гидрофобизирующим) антизагрязняющим материалом являются производные перфторполиэфиров (ПФПЭ), которые ковалентно связываются с подложкой по реакции гидролиза концевых метоксисиланольных групп с последующей дегидратацией этих групп на гидрофильной поверхности, рис. 5.

Жидкостные методы нанесения гидрофобизирующих монослоев на поверхность можно разделить на несколько типов: методы погружения (*dip-coating*), методы центрифугирования (*spin-coating*), методы адсорбции из растворов или паров (в том числе в вакууме) и методы испаряющейся капли [3].

К сожалению, эти методы не обеспечивают плотной упаковки поверхностно-активных молекул в слое и, как результат, износостойкость таких покрытий достаточно низка. В настоящее время износостойкость олеофобных покрытий на стекле оценивают по изменению краевого угла смачивания поверхности водой в процессе абразивного износа покрытия в процессе трения участка поверхности стальной ватой, прикладывая нагрузку 1 кг к площади 1 см². Выпускаемые изделия с олеофобными покрытиями, защищающими поверхность от царапин в процессе экс-

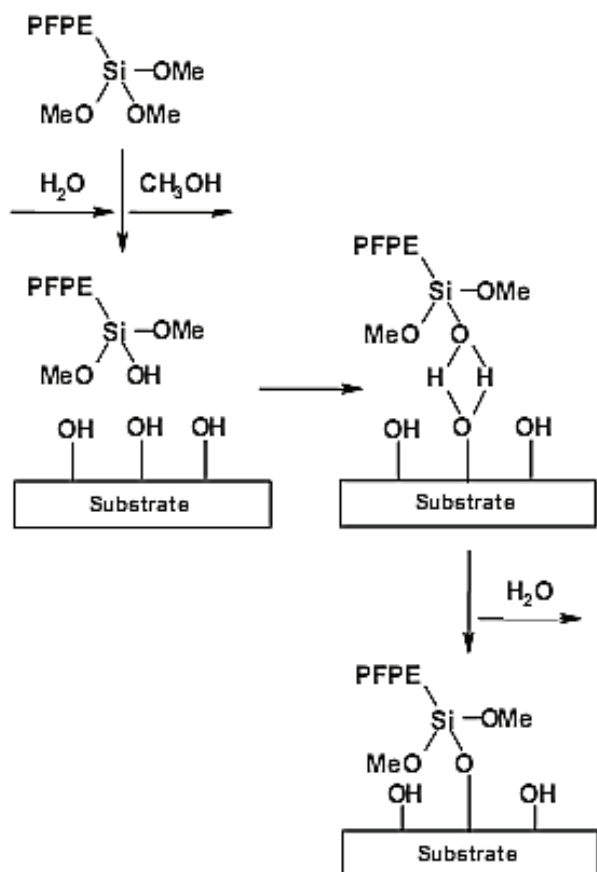


Рисунок 5.

Схема ковалентного связывания гидрофобизирующих реагентов с поверхностью

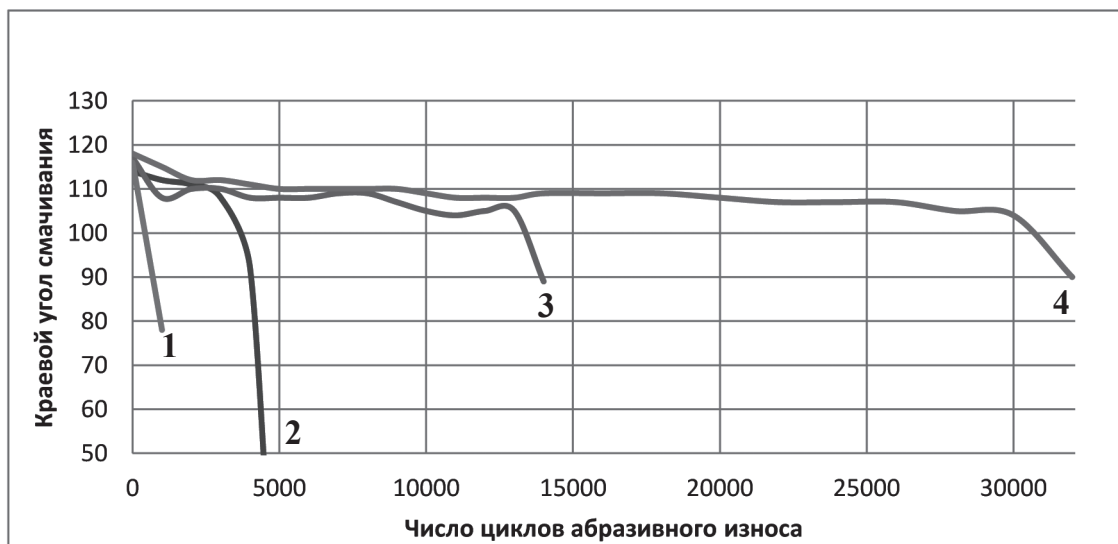


Рисунок 6.

Результаты тестирования износостойких покрытий на стекле Asahi-glass при различной обработке: в растворе (1), в вакууме (2), на разработанной установке (3, 4)

плутации, выдерживают 3000- 4000 циклов такого износа. На рис. 6 показаны сравнительные результаты тестирования различных покрытий.

Как правило, олеофобные покрытия, полученные из раствора, разрушаются спустя 1000 циклов истирания, рис. 6.1. Аналогичные покрытия, полученные испарением материала в вакууме, выдерживают порядка 3000-4000 истирания, рис. 6.2. В нашем случае, при формировании слоя плотноупакованных молекул ПФПЭ материала, износостойкость превышает 10000 циклов абразивного износа, кривая 6.3. Износостойкость в определенной мере зависит от типа стекла и его твердости. Максимально возможный результат, который удалось получить для покрытий Defensiz на стекле составил 30 000 циклов, что в десять раз превышает требования, предъявляемые к износостойкости защитных покрытий на дисплейных стеклах.

Покрытия Defensiz выдерживают также ряд дополнительных тестов, имитирующих устойчивость износостойких покрытий к воздействию окружающей среды:

1. Тест на устойчивость к солнечному излучению – облучение покрытия лампой мощностью 15 Вт, генерирующей средневолновое УФ-излучение группы В, в течение 72 часов с расстояния 20 см.

2. Тест на устойчивость к колебаниям температуры – 30 циклов колебаний температуры от минус 40 до плюс 85° С за 5 минут.

3. Тест на стабильность при высокой влажности – выдерживание изделия с покрытием 72 часа при влажности 95% и температуре 60° С.

4. Тест на устойчивость к различным растворителям.

4.1. Тест на устойчивость к соленой воде – выдерживание покрытия в 5% растворе NaCl при 35° С в течение 72 часов.

4.2 Тест на устойчивость к органическим растворителям – 250 циклов истирания при массе груза $m = 0,5$ кг, длине полосы истирания $l = 50$ мм, скорости $v = 20$ мм/с и разбрызгивании метанола по поверхности образца после каждых 50 циклов истирания.

4.3 Тест на стабильность к солнцезащитному крему – выдерживание покрытия 24 часа при влажности 80% и температуре 80° С в креме Nivea Sun Spray SPF30.

4.4 Тест на устойчивость к кислой среде – выдерживание покрытия 48 часов в растворе с $pH = 4,6$.

Статический краевой угол смачивания годного защитного покрытия с гидрофобными свойствами после проведения тестов не должен падать более чем на 10 градусов (не более чем на 15% от исходного значения).

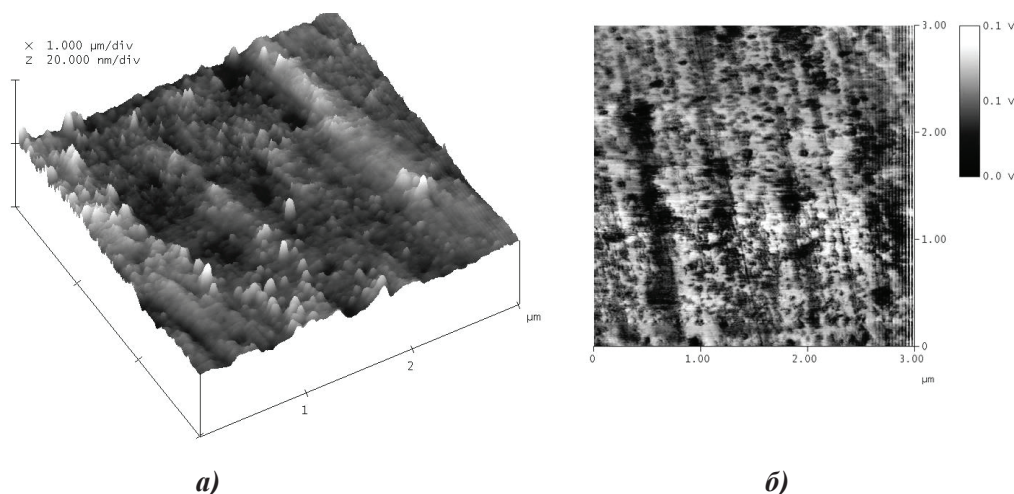


Рисунок 7.

***АСМ-изображение участка поверхности после 10 000 абразивного износа (а)
и тот же участок поверхности, снятый в режиме трения (б)***

Следует также отметить, что даже в случае, когда краевой угол смачивания в процессе трения падает ниже 100 градусов, на поверхности остается не менее 50% модифицирующего покрытия, которое продолжает выполнять функции снижения трения и защиты от загрязнений. Действительно, на рис.7 приведены АСМ-изображения поверхности стекла с защитным покрытием после 10 000 абразивного износа, рис. 7а. На изображении участка трения при тестах (рис. 7б) отчетливо видны области нанометровых размеров изношенной поверхности (темный фон изображения). Темные пятнышки (соответствуют изношенной поверхности до стекла) достаточно равномерно распределены по поверхности. По-видимому, разрушение покрытия начинается на точечных дефектах и постепенно распространяется на участки поверхности порядка десятков квадратных нанометров. Таким образом, даже после существенного абразивного износа доля олеофобного материала на поверхности значительна и такая поверхность будет сохранять антизагрязняющие свойства.

Компания Изовак продолжает разрабатывать новые подходы к технологиям оптических покрытий и оборудованию для их реали-

зации. Компания готова предлагать как технологическое оборудование, так и оказывать услуги по формированию просветляющих и олеофобных покрытий. Созданные в компании чрезвычайно износостойкие, прозрачные, самоочищающиеся покрытия выдерживают до порядка 10000-12000 циклов абразивного истирания стальной тканью при нагрузке 1 кг на 1 см². При этом контактный угол смачивания поверхности водой практически не изменяется и остается в пределах 100-108 градусов.

Олеофобное (самоочищающееся) покрытие Defensiz имеет хорошую совместимость с антиотражающим покрытием на одном оптическом изделии.

Список литературы:

1. X. Li, D. Reinhoudt, M. Crego-Calama, *Chem. Soc. Rev.* 2007, 36, 1350.
2. Yongxin Wang and Bharat Bhushan. Wear-Resistant and Antismudge Superoleophobic Coating on Polyethylene Terephthalate Substrate Using SiO₂ Nanoparticles. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. DOI: 10.1021/am5067755
3. Бойнович Л.Б. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение / Л.Б. Бойнович, А.М. Емельяненко // *Успехи химии*. – 2008. – Т. 77, №7. – С. 619–638.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

ВОЛОХОВ И.В.

АО «Научно-исследовательский институт физических измерений», г. Пенза

E-mail: info@niifi.ru

Описаны общие аспекты техники эллипсометрии, реализуемой с помощью автоматического лазерного эллипсометра модели Metricon 2010PC фирмы Metricon Corp. (США) и новейшей уникальной измерительной системы SENDURO фирмы SENTECH Instruments GmbH (Германия). Акцент сделан на практическом использовании этого метода для измерения толщины, коэффициента преломления и коэффициента отражения тонких окисных пленок на различных подложках. Приведены результаты экспериментальных измерений для пленок и подложек, которые наиболее часто встречаются в оптической и микроэлектронной технологии (стекло, кремний, ситалл, полированный металл).

Ключевые слова: эллипсометрия, лазерный эллипсометр, измерение толщины тонких плёнок.

ВВЕДЕНИЕ

Эллипсометрия (поляриметрия) — это метод измерения, основанный на анализе изменения состояния поляризации монохроматического поляризованного света, отраженного от исследуемого объекта при наклонном падении пучка лучей. Так как обычно в этом методе измеряются параметры эллиптически поляризованного света, метод назван эллипсометрическим или просто эллипсометрией.

Эллипсометр - идеальный инструмент для контроля параметров диэлектриков, потому что исследование с помощью луча света неконтактное и чрезвычайно точное. Современные автоматические лазерные эллипсометры способны измерять толщину тонкой пленки с точностью до 1 ангстрема. Эта чрезвычайная точность достигнута вследствие поляризации измеряющего луча, что является наиболее чувствительным параметром света, изменяющимся после отражения от измеряемой поверхности пленки. Изменение в поляризации светового луча непосредственно связано с толщиной и преломляющим индексом пленки и константами подложки [1, 2].

Хотя кремний - наиболее обычная для микроэлектронной технологии подложка, другие подложки типа арсенида галлия, ситалла, нержавеющей стали и стекла могут использоваться для эллипсометрического измерения. Фактически любой материал может служить подложкой, если он достаточно плоский, гладкий, отражающий и имеет индекс преломления, отличный от индекса преломления измеряемой пленки.

ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ

Большинство современных эллипсометров, примером которых является автоматический лазерный эллипсометр модели Metricon 2010PC, содержат маломощный гелий-неоновый лазер, который дает длину волны света 6328 Å. Лазер имеет множество отличных преимуществ по сравнению с ранее использовавшимися ртутными лампами. Он, имея большую интенсивность, позволяет нормально действовать в комнатных условиях без потребности в затемнении комнаты или огораживания, луч света малого диаме-

тра и ясно видим на образце, лазерный луч не требует коллимирующей оптики, что необходимо ртутному источнику света, таким образом, устраняются преломляющие компоненты, которые являются потенциальным источником ошибки при измерении. Принципиальная схема лазерного эллипсометра показана на рис. 1.

Важный аспект эллипсометрии это то, что индекс преломления тонкой пленки является независимым от толщины пленки. Для пленок толщиной менее чем $100 \text{ \AA}$ это условие разрешается с применением линейного приближения эллипсометрических уравнений, заложенных в программное обеспечение персонального компьютера.

Хотя в ручных эллипсометрах были очень упрощены установка угла падения, предварительно линеаризован источник света и устранен цилиндр компенсатора, одно измерение на них требует большого времени и сложной оценки. Обычно два цилиндра (поляризатор и анализатор) должны поочередно вращаться, чтобы установить нулевые отсчеты измерения. Фактический визуальный отсчет с помощью измерительного цилиндра и дальнейшая интерпретация диаграммы с помощью ручных методов обсчета данных могут вносить вклад в ошибки измерения.

Автоматические эллипсометры (подобные системе Metricon-2010 PC и измерительной системе SENDURO) устраняют эти недо-

статки. Они имеют скорость измерения менее чем 30 секунд и дают распечатку на принтере данных о толщине пленки и индексе менее чем за 45 секунд. Эти приборы предполагают проведение процесса измерения одним нажатием кнопки, так что обучение оператора минимально. Точность автоматических эллипсометров, использующих вращающийся с помощью шагового двигателя анализатор, приблизительно в десять раз лучше, чем у аналогичных ручных приборов.

При контакте измеряемой тонкой пленки и измеряющей призмы площадь соприкосновения приблизительно 8 мм^2 . Площадь измерения будет составлять в действительности только 1 мм в диаметре (диаметр лазерного луча).

Если на исследуемой поверхности имеется тонкая пленка, то в отражаемом световом пучке будет происходить интерференция лучей, многократно отражаемых на двух границах раздела (см. рис. 2). При этом возникает разность фаз 2δ между лучами, отраженными на первой и второй границах раздела, которая пропорциональна оптической разности хода луча на участках ABC и AD [1]:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \tilde{n}_2 d_2 \cos \tilde{\varphi}_2, \quad (1)$$

где d_2 — толщина пленки, а n_2 — ее показатель преломления.

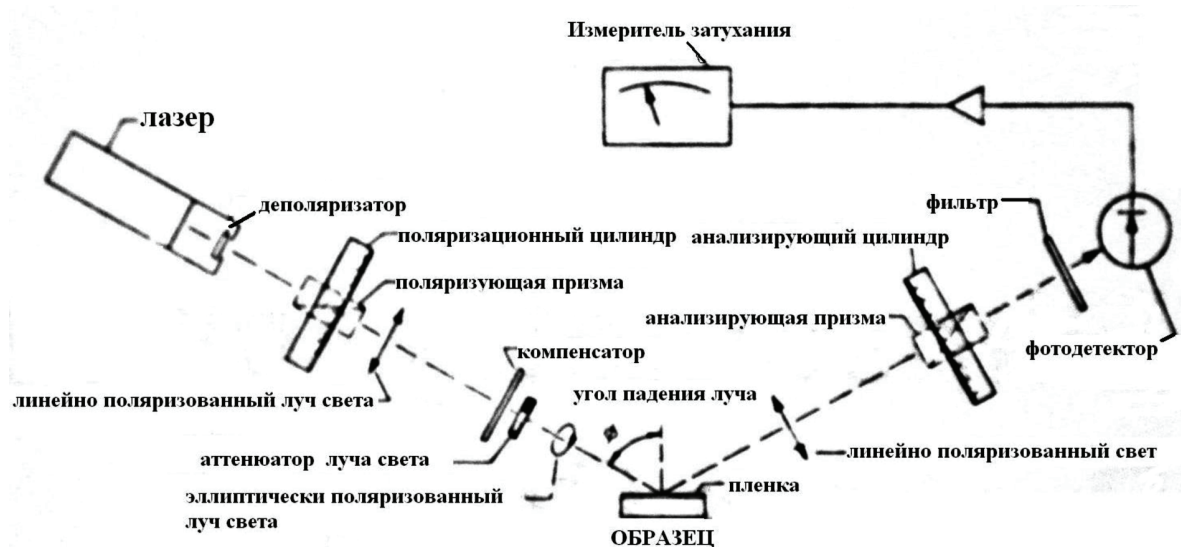


Рисунок 1.
Принципиальная схема лазерного эллипсометра

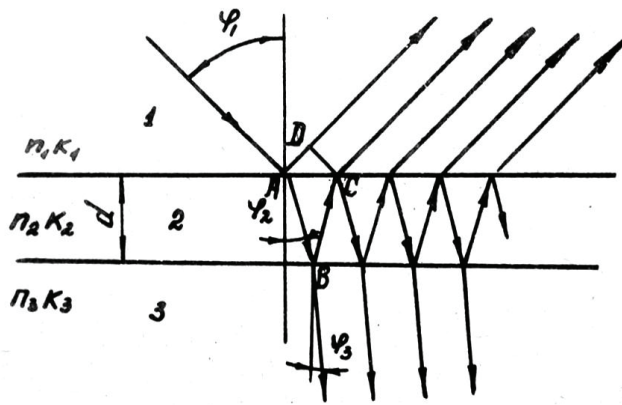


Рисунок 2.

Схема отражения света от подложки, покрытой тонкой пленкой

Чтобы учесть эту интерференцию при вычислении коэффициента отражения, используют обобщенные коэффициенты отражения для всей системы пленка - подложка:

$$\begin{aligned}\tilde{R}_P &= \frac{\tilde{R}_P^{1,2} + \tilde{R}_P^{2,3} \exp(-2i\delta)}{1 + \tilde{R}_P^{1,2} \tilde{R}_P^{2,3} \exp(-2i\delta)}; \\ \tilde{R}_S &= \frac{\tilde{R}_S^{1,2} + \tilde{R}_S^{2,3} \exp(-2i\delta)}{1 + \tilde{R}_S^{1,2} \tilde{R}_S^{2,3} \exp(-2i\delta)},\end{aligned}\quad (2)$$

где $\tilde{R}^{1,2}$ и $\tilde{R}^{2,3}$ определяются по формулам (3).

Коэффициенты отражения определяются оптическими константами граничащих (α - и β -) сред ($\tilde{n}_\alpha$ и $\tilde{n}_\beta$) и углами падения и преломления света ($\tilde{\varphi}_\alpha$ и $\tilde{\varphi}_\beta$):

$$\begin{aligned}\tilde{R}_P^{\alpha\beta} &= \frac{\tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\alpha - \tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\beta}{\tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\alpha + \tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\beta} \\ \tilde{R}_S^{\alpha\beta} &= \frac{\tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\alpha - \tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\beta}{\tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\alpha + \tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\beta}\end{aligned}\quad (3)$$

В формулах (3) $\tilde{n}$ - комплексный показатель преломления среды, записываемый обычно в виде

$$\tilde{n} = n - ik, \quad (4)$$

где n - показатель преломления, k - коэффициент экстинкции, связанный с размерным коэффициентом поглощения α соотношением

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

По определению, экстинкция света (от лат. *extinctio* - гашение) - это ослабление света при распространении в среде за счет процессов поглощения и рассеяния. Мерой экстинкции света служит коэффициент экстинкции света

$$k = 4\pi nml,$$

где n - показатель преломления,

l - длина волны,

m - показатель экстинкции света, входящий в выражение закона Бугера-Ламберта-Бера. Для прозрачных сред $k = 0$ и $\tilde{n} \equiv n$.

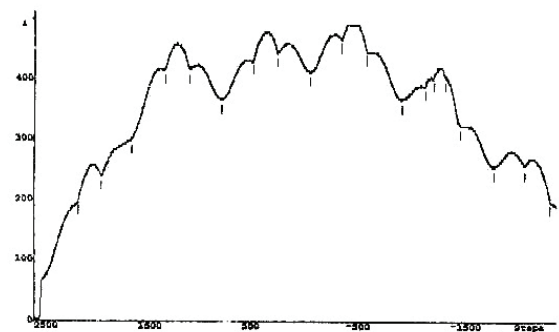


Рисунок 3.

Пример записи экстинкция отраженного от образца поляризованного света при распространении в среде за счет процессов поглощения и рассеяния

Параметры эллипса поляризации отраженного света определяются физическими свойствами отражающей системы, углом падения и длиной волны света. Связь параметров ψ и Δ с этими свойствами обычно выражается в виде основного уравнения эллипсометрии:

$$\operatorname{tg} \psi \exp(i\Delta) = \frac{\tilde{R}_P}{\tilde{R}_S} \quad (5)$$

Если на подложке с некоторыми оптическими константами n_s и k_s имеется тонкая прозрачная пленка толщиной d_2 ($\tilde{n}_2 = n_2 - i0$) (см. рисунок 2), а измерения проводятся на воздухе ($\tilde{n}_1 = 1 - i0$) при известных углах падения φ_1 и волны света λ , то уравнение (5) можно представить в виде зависимостей:

$$\begin{aligned}\psi &= f(n_2, d_2); \\ \Delta &= f(n_2, d_2).\end{aligned}\quad (6)$$

Таким образом, имеется возможность одновременного измерения толщины и показателя преломления тонкой прозрачной пленки на основе измерений величин ψ и Δ . Другие частные решения уравнения (5) будут рассмотрены в соответствующих главах обзора.

При решении уравнения эллипсометрии (5) для некоторой конкретной модели отражающей системы обычно рассматривают две задачи: прямую – нахождение параметров ψ и Δ по известным свойствам этой отражающей системы - и обратную – вычисление оптических констант и толщин пленок реальной структуры по измеренным на ней значениям поляризационных углов. Прямая задача решается расчетом на ПЭВМ теоретических значений углов ψ и Δ для всех возможных наборов величин $\tilde{n}_j$ и d_j всех j слоев. Обратная задача заключается в определении по измеренным значениям ψ и Δ реальных наборов $\tilde{n}_j$ и d_j (непосредственным расчетом на ПЭВМ).

Необходимо отметить два обстоятельства.

Во-первых, в одном измерении на эллипсометре измеряются оба угла φ и Δ , т.е. одновременно могут определяться сразу два любых независимых физических параметра ис-

следуемой системы, входящих в уравнение эллипсометрии.

Во-вторых, объектом эллипсометрических измерений может являться любая характеристика вещества окружающей среды или технологического процесса, прямо или косвенно влияющая на оптические свойства материала и/или геометрию системы (т.е. число и толщина слоев, рельеф поверхности, несплошность пленки и т.п.).

Одним из важнейших технологических параметров, из тех, которые влияют на точность и надежность изготавливаемой датчиковой аппаратуры в микроэлектронном исполнении, является толщина тонких пленок диэлектриков на стекле, металле, а также окисных пленок на кремнии и пленок полимеров (фоторезистов) на любых поверхностях. В настоящее время все замеры толщины тонких пленок менее 10 мкм производятся на микроинтерферометре Линника типа МИИ-4, который не исключает субъективного влияния оператора на результат замера. Сравнительные характеристики приборов, основанных на различных принципах преобразования, для измерения толщины тонких пленок приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Сравнительные характеристики приборов для измерения толщины тонких пленок

Марка прибора	Компания производитель, страна	Способ замера	Пределы измерения толщины (мкм)	Способ регистрации результатов замера
МИИ-4	ЛОМО (Россия)	Оптический, интерферометрический бесконтактный	0,27 – 10,0	Визуальный, ручной
Рефлектометр Nanometrics AFT200	Karl Suss (Германия)	Оптический, интерферометрический бесконтактный	0,2 – 5,0	Визуальный, ручной
Автоматический лазерный эллипсометр Metricon-2010PC	Metricon Corp (США)	Лазерная эллипсометрия	0,1 – 100,0	Автоматический, с помощью контролера на базе персонального компьютера
Эллипсометр MM40	Nikon (Япония)	Эллипсометрия	0,1 – 6,0	Визуальный, ручной
Профилометр Tencor P500	Tencor Corp (Великобритания)	Контактный (алмазная игла)	0,5 – 100,0	Автоматический, с помощью контролера на базе персонального компьютера
Измерительная система SENDURO	SENTECH Instruments GmbH (Германия)	Лазерная эллипсометрия	0,01 – 10,0	Автоматический, с помощью контролера на базе персонального компьютера

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Образец (свидетель), на котором измеряется толщина пленки и индекс преломления, устанавливается на поворотном столике и соединяется с основной измерительной призмой посредством пневмодержателя (см. рис. 4), при этом создается маленький воздушный промежуток между поверхностью тонкой плёнки и призмой. Лазерный луч проходит сквозь боковую грань призмы и частично отражается от основания призмы на фотоприемник. При некоторых дискретных углах поворота столика, называемых углами измерения, луч света попадает через воздушный промежуток между призмой и (образцом) свидетелем в тонкую плёнку и распространяется в ней по законам оптики, производя затемнение (экстинкция света) в интенсивности света (интерференционные полосы), которые фиксируются фотоприемником.

В первом приближении, первый угол замера определяет индекс тонкой плёнки, а различие между двумя замерами позволяет определять толщину пленки. Такая методика позволяет автоматическому лазерному эллипсометру измерять толщину и индекс преломления плёнки полностью независимо.

Процессом измерения управляет компьютер, который изменяет угол наклона поворотного стола и тем самым изменяет угол наклона образца и определяет местоположения каждой интерференционной картины при

распространении луча света в тонкой плёнке. Если сделаны два замера под разными углами и найдена толщина тонкой плёнки, то компьютер может рассчитать величину индекса преломления. Чем больше толщина пленки, тем большее количество замеров может сделать прибор и тем более точным будет замер. Тонкие плёнки в диапазоне толщин от одного микрона могут обеспечить четырехкратный или пятикратный замер. Если плёнка имеет достаточную толщину, чтобы обеспечить двукратный замер (типично для толщин 3000-4800 Å), автоматический лазерный эллипсометр вычисляет толщину и индекс для каждой пары замеров и показывает среднее значение толщины и среднеквадратичное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

На рис. 5 представлен образец распечатки данных реального замера толщины и индекса преломления тонкой пленки двуокиси кремния на поверхности подложки из ситалла.

По результатам экспериментальных работ проведено сравнение точности измерения приборов для контроля толщины тонких плёнок окислов на поверхности подложек из ситалла, стекла, металла и кремния. Данные приведены для микроинтерферометра Линника типа МИИ-4, автоматического лазерного эллипсометра «Metritcon-2010PC» [3] и измерительной системы SENDURO.

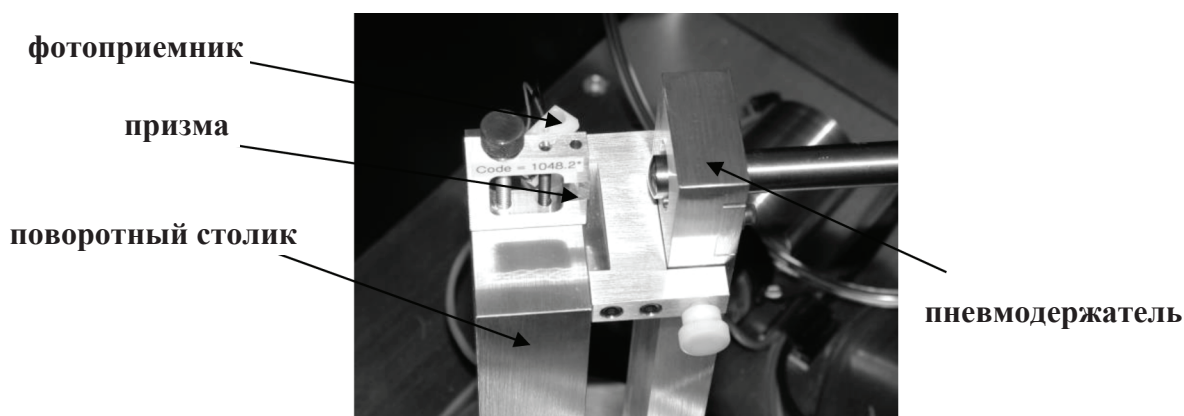


Рисунок 4.

Поворотный столик, стандартная призма с системой крепления образца и пневмодержателем на анализаторе автоматического лазерного эллипсометра Metritcon-2010 PC

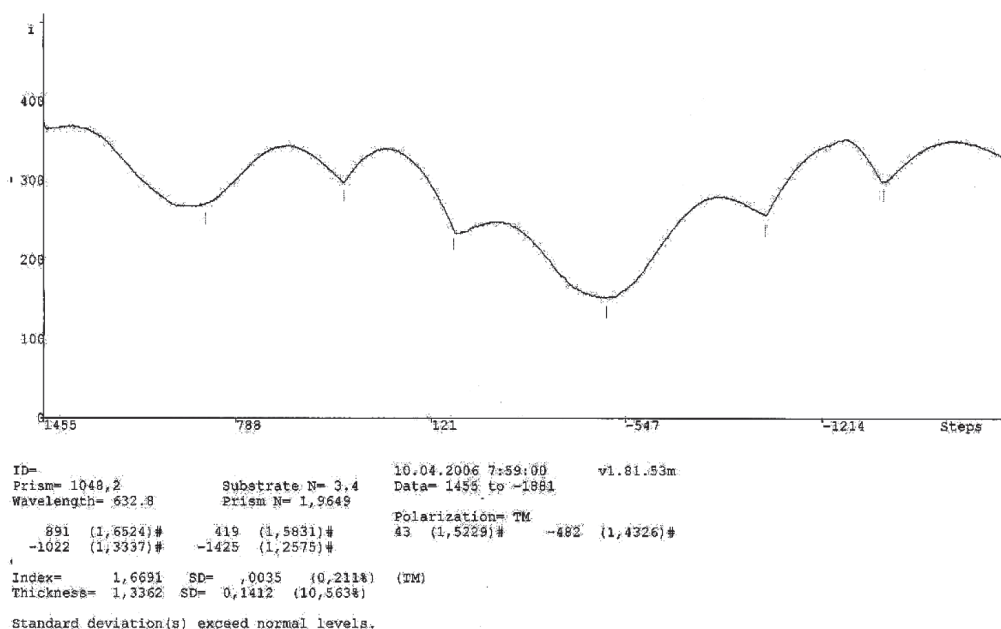


Рисунок 5.

Распечатки данных реального замера толщины и индекса преломления тонкой пленки двуокиси кремния на поверхности подложки из ситалла

Микроинтерферометр Линника МИИ-4 (ЛОМО, СССР):

- точность измерения толщины – 0,27 мкм (± 0.135 мкм),
- индекс преломления этот прибор измерять не может;

Автоматический лазерный эллипсометр «Meticon-2010PC» (Meticon Corp., США):

- точность измерения толщины $\pm 0.3\%$ (в диапазоне толщин от 10 нм до 10 мкм);
- точность измерения индекса преломления:
- абсолютная погрешность 0,05%;
- систематическая погрешность 0,01%.

Измерительная система SENDURO (SENTECH Instruments GmbH, Германия) (см. рис. 6):

SENDURO - спектроскопический эллипсометр, работающий в УФ/видимом спектре (320-820 нм), основанный на фотодиодной детекторе, характеризующийся быстрым сбором данных, полным разрешением по спектру и высоким отношением сигнал-шум.

Центровка образца выполняется встроенным датчиком высоты и угла наклона образца, что устраняет неточную центровку пользователем и ускоряет процесс измерения.

Минимальное время измерения для всех 512 точек спектра пси-дельта составляет приблизительно 1 сек, время измерения с ис-

пользованием режима пошагового сканирования обычно составляет 4 сек.

Принцип работы SENDURO основан на анализе данных с детектора с пошаговым сканированием. Наличие ахроматического замедлителя позволяет измерять эллипсометрический угол дельта во всем диапазоне – от 0 до 360° с очень высокой точностью.

Точность измерений:

- $\Delta \psi$ (Пси): 0,020 (1 сигма);
- Δ (Дельта): 0,040 (1 сигма).

Погрешность измерений:

- <100 Å SiO₂ на Si: 0,01 Å;
- 100-300 Å SiO₂ на Si: 0,15 Å;
- 300-2000 Å SiO₂ на Si: 0,50 Å;
- >2000 Å SiO₂ на Si: <0,03% .

Программное обеспечение позволяет выдавать данные:

- толщина слоя в Å или нм;
- зависимость диэлектрической функции от длины волны (320-820 нм);
- коэффициент преломления, зависимость коэффициента затухания от длины волны (320-820 нм);
- зависимость эллипсометрических углов (ψ , Δ), ($\tan \psi$, $\cos \Delta$), коэффициентов Фурье от длины волны (измеренные и подготовленные кривые);
- отчеты и протоколы измерений.



Рисунок 6.
Фотография измерительной системы
SENDURO фирмы SENTECH In-struments
GmbH (Германия)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные оптические интерферометрические методы позволяют быстро и точно измерять толщину и индекс преломления тонких плёнок окислов и полимеров на поверхности различных подложек (стекло, металл, кремний и др.). Для измерения свойств многослойных тонких пленок автоматический лазерный эллипсометр имеет уникальные преимущества перед обычными инструментами, основанными на традиционных принципах эллипсометрии:

- не требуется предварительное знание толщины или индекса преломления;
- точность замера индекса $\pm 0,0005$ - что на порядок лучше, чем обеспечивают другие методы (более высокое разрешение);
- замеры не зависят от комбинации материалов подложки и тонкой пленки;
- можно определять толщину и индекс отдельно для каждого слоя двухслойных тонкопленочных структур;
- высокая точность измерения индекса большей части материалов, применяемых для тонкопленочных покрытий и подложек;
- быстрый замер (от 4 до 30 секунд) характеристик тонкой плёнки, что обеспечивает

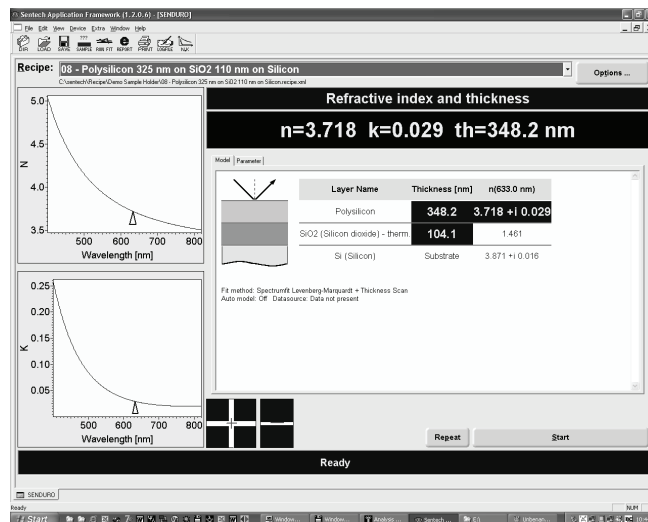


Рисунок 7.
Скриншот с экрана управляющей ПЭВМ
измерительной системы SENDURO с дан-
ными реального замера индекса преломле-
ния, коэффициента экстинкции и толщины
двухслойной тонкой пленки из поликремния и
диоксида кремния на поверхности подложки
из монокристаллического кремния

оперативный контроль технологических параметров в производстве оптоэлектронных и микроэлектронных изделий.

Список литературы:

1. Резвый Р.Р., Финарев М.С. Эллипсометрические методы исследования и контроля в полупроводниковой микроэлектронике, Обзоры по электронной технике Серия 2 Полупроводниковые приборы: Выпуск 7(472), Москва, ЦНИИ «Электроника», 1977г.
2. Kutko R.J. Ellipsometry for Semiconductor Process Control, Gaertner Scientific Co. Chicago, Illinois, 1988
3. Волохов И.В. Исследование свойств тонких диэлектрических пленок окислов с использованием эллипсометрии // Датчики и системы-2006: Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции (Россия, г. Москва, 30-31 мая 2006 г.)/Под ред. д.т.н. Мокрова Е.А. - Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006. С.136-141.

ФОНЕТИКА И ТАЙНОПИСЬ

ВОЛОСАТОВА Т.М., ЧИЧВАРИН Н.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: tamaravol@gmail.com, genrih.gertz@gmail.com

Статья посвящена результатам теоретико – экспериментальных исследований методов фонетики, стеганографии и стегоанализа в аудиофайлах. Применение методов фонетики и стеганографии в доступной литературе не приводится. Стеганографическое сокрытие особенно важно для разработке средств защиты проектной документации в аудиофайлах. Понятно, что применение в качестве контейнеров изображений весьма ограничено, поскольку ограничен объем внедряемых данных, да и сами контейнеры относительно невелики. Симфония № 40 В.А. Моцарта позволяет вместить в себя больше данных, чем картина Ван Гога, даже примитивным методом - LSB. Представляется полезным рассмотреть вопросы фонетического стегоанализа («на слух») – это достаточно тонкий аппарат совместно с вероятностными методами декодирования.

Ключевые слова: аудиосигнал, анализ, методы, контейнер, стеганография, фонетика.

ВВЕДЕНИЕ

В материалах статьи обращается внимание на полезные аналогии в методах фонетики и шифрования в аудиофайлах. Применение методов фонетики и лингвистики в поисковых и экспертных системах известно, и исследования в этом направлении продолжают. Это особенно важно для разработке средств защиты проектной документации в аудиофайлах. Понятно, что применение в качестве контейнеров изображений весьма ограничено, поскольку ограничен объем внедряемых данных, да и сами контейнеры относительно невелики. Понятно, что Симфония № 40 Вольфганга Амадея Моцарта позволяет вместить в себя больше данных, чем картина Ван Гога, даже примитивным методом - LSB. Представляется полезным рассмотреть и вопросы фонетического стегоанализа («на слух») – это достаточно тонкий аппарат.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ДОСТУПНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе поиска основное внимание было уделено вопросам стеганографии в аудиофайлах. Не менее интересны публикации, посвященные вопросам распознавания речи, которые, думается, всегда будут интересны. Однако задачи, поставленные при подготовке материалов статьи, требуют рассматривать названные вопросы только в аспекте методов фонетического разбора речи. Результаты анализа, проведенного в [1], позволили резко сократить объем настоящей публикации и сформулировать следующие задачи исследований:

- экспериментальные исследования известных алгоритмов стеганографии в аудиофайлах;
- экспериментальные исследования известных алгоритмов скремблирования в аудиофайлах;
- проведение исследований алгоритмов, реализующих авторские методы;
- отдельные вопросы стегоанализа аудиоконтейнеров.

1. Математическая модель речевого сигнала

2. Хорошо изученная математическая модель речи Вернике-Гешвинда, как известно, описывает восприятие звука слуховым регистратором [3]. Однако для описания особенностей стеганографического кодирования в звуковых сэмплах ее недостаточно. Необходимо учитывать вопросы модуляции при формировании речи. Очевидно, что человеческий аппарат генерации «простого» (без окраски) звука с достаточной адекватностью может описываться волновым уравнением. Нас интересует решение волнового уравнения во временной области. Временная компонента может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:

$$u(t) = u_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(u a_n \cos \frac{n\pi t}{T} + j u b_n \sin \frac{n\pi t}{T} \right),$$

Где u - нормирующий множитель, учитывающий размерность сигналов.

Речевое сообщение можно рассматривать, как почти периодический сигнал, модулированный по амплитуде, частоте и фазе одновременно [3]. Авторы предлагают модель, учитывающую амплитудную, частотную и фазовую модуляции при синтезе речевого сообщения в виде:

$$U(t) = U_0 \{1 + m(t)(\cos(2\pi v_t^0 t)) u[2\pi(v_t + \Delta v_t)t + (\varphi + \Delta \varphi)]\}, \quad (1)$$

где: U_0 – амплитуда, $m(t)$ – собственно сообщение, v_t – основная (несущая) частота, Δv_t – девиация частоты, происходящая при частотной модуляции, $\Delta \varphi$ – девиация фазы, соответствующая фазовой модуляции, v_t^0 – частота огибающей.

Экспериментальным путем было установлено, что для вокализованного сегмента речи, амплитуды на частотах основного тона и обертонов речевого сигнала существенно влияют на «фонетический смысл» гласных звуков. В данной модели сигнал источник (голосовых связок) представлен

в виде сложного периодического колебания, состоящего из набора гармоник с произвольными амплитудами и начальными фазами которое проходит через речевой тракт, представляющий собой несколько параллельно соединенных резонаторов. Рассмотрим полученную авторами [5] математическую модель вокализованного сегмента речи $y(t)$, являющуюся решением дифференциального уравнения, которое описывает прохождение периодических колебаний от источника в виде голосовых связок (то есть полигармонического сигнала или нескольких гармоник ряда Фурье) через систему параллельных резонаторов с затуханием:

$$\sum_{n=1}^N \frac{1}{O_n} \left(\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\alpha_n \frac{dy_n}{dt} + C_n^2 y_n \right) = \sum_{i=1}^L b_i \sin(i\omega_0 t + \varphi_i),$$

где $C_n = 2\pi F_n$; F_n – n -я формантная частота; $\omega_0 = 2\pi f_0$; f_0 – частота основного тона, α_n – коэффициент затухания n -го резонатора; b_i и φ_i – соответственно амплитудные коэффициенты и начальные фазы; характеризующие сигнал генератора, то есть сигнал, формируемый голосовыми связками; N – количество резонаторов; L – количество гармоник сигнала генератора; o – параметр, учитывающий свойства материала связок. Структура модели приведена на рис. 1.

Сравнение показывает, что приведенная

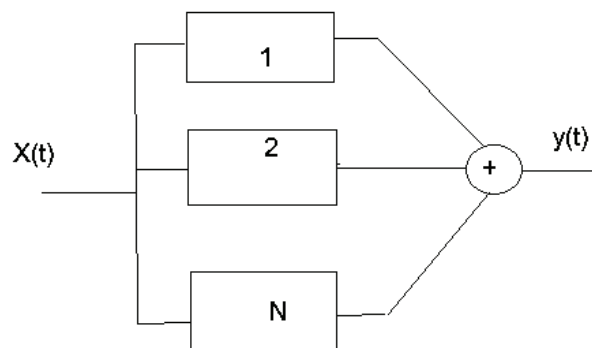


Рисунок 1.

Структурная модель речевого сигнала для вокализованного сегмента речи

модель аналогична предложенной авторами настоящей публикации. Таким образом, можно полагать, что она адекватна. Покажем удобство и адекватность модели при спектральном анализе. На рис. 2 показан модуль преобразования Фурье SI_n от функции $U(t)$, моделирующей амплитудно-модулированный гармонический сигнал:

$$U(t) = U_0 \{1 + m(t)(\cos(2\pi\nu_t^0 t))\} \cos[2\pi(\nu_t)t] \quad (2)$$

Понятно, что это классический спектр амплитудно-модулированного сигнала, содержащий несущую и две боковые частоты. Гораздо сложнее спектр амплитудно-, частотно- и фазово-модулированного гармонического сигнала (рис. 3).

Как видно, спектр на рис. 3 напоминает

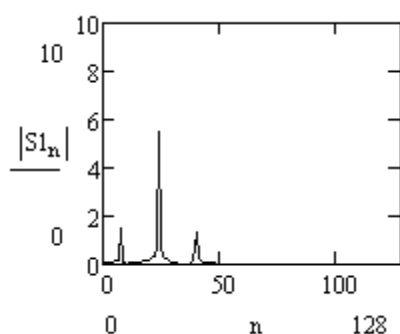


Рисунок 2.

Модуль преобразования Фурье от функции, моделирующей амплитудно-модулированный сигнал. n – автоматная частота

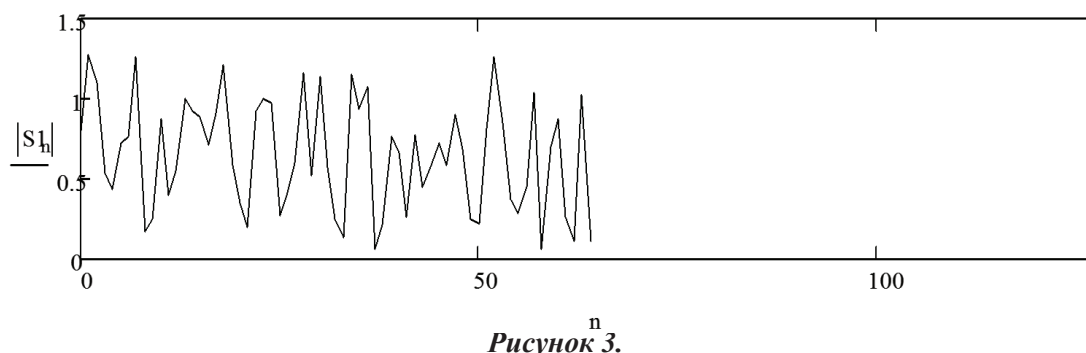


Рисунок 3.

Модуль преобразования Фурье от функции, моделирующей амплитудно-, частотно- и фазово-модулированный сигнал. n – автоматная частота

спектр реализации случайного сигнала. Становится понятным, что во многих публикациях предлагается рассматривать источник речевого сообщения, как генератор псевдослучайных сигналов. Однако, это неприемлемо для решения задач, поставленных в настоящей публикации. Речь идет об исследовании применимости методов фонетики в стеганографии и стегоанализе. Здесь вполне приемлема модель (2), учитывающая характер и семантику сообщений, передаваемых речевыми сигналами. Она же принимается для моделирования музыкальных сигналов. Рассмотрим модель звуковых сигналов, часто встречающуюся в проанализированных авторами публикациях [3, 4].

Исходные посылки. При анализе устного текста на русском языке опираются на точные знания его фонетического строя, количественного и качественного состава используемой фонетической системы, а также закономерностей ее функционирования в разговорной речи. Разговорная речь по своим акустическим характеристикам широко варьируется, причем нерегулярным образом, не только от одного языка к другому, но и от одного носителя к другому носителю одного и того же языка. В указанных условиях становится проблематичной сама идея выделения *повторяющегося* набора из разговорного потока. Кроме того, длительность отдельных фрагментов не превышает нескольких миллисекунд, и это главное препятствие для примене-

ния традиционных методов теоретической лингвистики к разговорной (устной) речи. С другой стороны, до настоящего времени проблема не была преодолена и методами экспериментальной фонетики. И главная причина здесь – отсутствие адекватной системы описания отдельных фонем. А такое описание весьма полезно при разработке новых методов стеганографии.

Критерий минимального информационного расстояния (МИР). Несмотря на существующие различия в реализациях некоторой r -ой фонемы все они воспринимаются человеком как нечто общее, иначе речь утратила бы свою информативность. Можно поэтому утверждать, что одноименные реализации $X_{r,j}$, $j = 1, \dots, J_r$, в сознании человека группируются в соответствующие классы или речевые образы фонем $X_r = \{x_{r,j}\}$, $r = 1, R$, вокруг некоторого центра – эталонной метки данного образа. В информационной теории восприятия речи указанные эталоны

$$x_r^* \in X_r$$

определяются в строгом, теоретико-информационном смысле: речевая метка образует *информационный центр-эталон* r -го речевого образа, если в пределах множества X_r она характеризуется минимальной суммой информационных рассогласований по Кульбаку-Лейблеру $X_{r,j}$, $j = 1, \dots, J_r$ относительно всех других его меток-реализаций.

При распознавании анализируемый (входной) речевой сигнал $X(t)$ в дискретном времени $t = 0, 1, \dots$ разбивается на ряд последовательных сегментов данных $x(t)$ длиной в одну: примерно 10–15 мс. После этого каждый такой парциальный сигнал рассматривается в пределах конечного списка фонем $\{X_r\}$ и отождествляется с той X_n из них, которая отвечает критерию МИР относительно вектора $x(t)$. Это известная формулировка критерия МИР в задачах автоматического распознавания речи. Задача существенно упрощается, если воспользоваться гауссовой (нормальной) аппроксимацией

закона распределения каждой фонемы вида $P_r = N_r(K_r)$, где K_r – автокорреляционная матрица (АКМ) размера $n \times n$, $n \geq 1$.

Выделим в анализируемом речевом сигнале $X(t)$ от некоторого диктора первые L отсчетов из соображений сохранения в них свойства приблизительной стационарности или однородности распределения P_r . Например, при стандартной частоте дискретизации телефонного канала связи в 8 кГц обычно полагают $L = 100 \dots 200$ (это те же 10 – 15 мс). Используем полученный минимальный сегмент данных $X_l = \{x_l, \dots, x_L\}$ в качестве обучающей выборки X_l для оценивания АКМ первой из сигнала. Соответствующий закон распределения $P_l = N(K_l)$ – это первый из элементов нашего будущего списка. После этого приравняем $R = 1$ и берем второй сегмент выборки для анализа: $X_2 = \{X_l + 1, \dots, X_{2L}\}$. Следуя выражению для решающей статистики МИР, определим для него удельную величину информационного рассогласования [2]:

$$\rho(X_2, X_r) = \rho(X_2) \quad (3)$$

относительно первой (при равенстве $r = 1$). Полученный результат сопоставляется с порогом по ВИР в роли допустимой величины рассогласований между разными реализациями одних и тех же фонем устной речи:

$$\rho(X_2, X_r) \leq \rho_0 \quad (4)$$

При нарушении данного неравенства в нашем начальном списке фонем появится второй элемент, и вслед за этим приравняем число выявленных фонем $R = 2$. В противном случае принимается решение об объединении выборок X_l и X_2 в один речевой образ P_1 : в качестве или одной удвоенной длительности $L_r = 2L$, если выборки смежные, или двух разных реализаций первой фонемы, если выборки не стыкуются. Равенство $R=1$ в обоих случаях сохраняется.

Нетрудно понять, что в форме условия (3) реализуется проверка гипотез об однород-

ности выборок, а понятие фонемы определяется здесь как кластер однородных по критерию МИР. Это типичная формулировка информационного $(R+1)$ -элемента.

Фонетический анализ речи (ФАР). Коль скоро во многих работах показано, что фонетический разбор аналогичен регрессионному анализу, приемлема формула:

$$\rho_{x,r} = \frac{1}{F+1} \sum_{f=0}^F \left| \frac{1 + \sum_{m=1}^p a_r(m) \exp\left(-\frac{\pi j f}{F}\right)}{1 + \sum_{m=1}^p a_r(x) \exp\left(-\frac{\pi j f}{F}\right)} \right|^2 - 1 \leq 0 \quad (5)$$

Здесь $\{a_x(m)\}$, $\{a_r(m)\}$, – два вектора авторегрессионных коэффициентов: входного сигнала и r -го эталона, оба одного порядка $p > 1$. Сопоставляя модели, предложенные авторами настоящей публикации и известную, можно сделать вывод об взаимной пополняемости: первая удобна для

спектрального и корреляционного анализа, а вторая – для анализа регрессионного. Предложенная авторами модель амплитудно-частотно-фазовой модуляции полезна для разработки экзотичного детектора. В её основе лежит преобразование модулированного сигнала нелинейностью. Нелинейность рассматривается, как последовательно установленное нелинейное звено (диод) и линейный фильтр. Аппроксимируем вольт-амперную характеристику диода квадратичным полиномом:

$$i_o = a_0 + a_1 U = a_2 U^2$$

Так как операция детектирования нелинейная, то a_0 и $a_1 U$ можно не учитывать, тогда

$$i = a_2 U^2 \quad (6)$$

Подаем на детектор модулированный сигнал:

$$U_{AM}(t) = \underbrace{U_0 \cos 2\pi v_t t}_a + \underbrace{\frac{m U_0}{2} \cos[2\pi(v_t^n - v_t)t]}_b + \underbrace{\frac{m U_0}{2} \cos(\omega_0 + v_t)t}_c \quad (7)$$

Подставим (4.5) в (4.4) и получим:

$$i_o = a_2 (a + b + c)^2 = a_2 a^2 + a_2 b^2 + a_2 c^2 + a_2 2ab + a_2 2ac + a_2 2bc.$$

Составляющие $a_2 a^2$, $a_2 b^2$, $a_2 c^2$ отфильтруются фильтром низких частот. В результате подстановки и преобразования получим составляющие:

$$a_2 m U_0^2, \quad \frac{m^2 U_0^2}{4}$$

В квадратичном детекторе кроме полезного продукта v_t есть вредная составляющая $2v_t$. Это приводит к искажению сигнала на выходе детектора по отношению к

модулирующему. Количественной мерой искажений является коэффициент нелинейных искажений:

$$k_{н.л.} = \frac{J_{2\Omega}}{J_{\Omega}} = \frac{m}{4}$$

При $m = 100\%$ $k_{н.л.} = 25\%$ – это очень большие нелинейные искажения. В реальной аппаратуре они составляют доли процента.

Пусть на входе АМ сигнал $[U_c(t) = U_{AM}(t)]$, тогда

$$\begin{aligned}
U_{\text{вых}}(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) U_{on}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m \cos(\omega_0 t + \varphi_0) U_{on} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) dt = \\
&= \frac{U_{on} U_m}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi v_t t + 2\varphi_0) \right] dt = \frac{U_{on} U_m}{2}
\end{aligned}
\tag{8}$$

Так как U_{on} практически постоянно на интервале T , то мы получим модулирующий сигнал без искажений.

Детектирование ЧМ сигнала

$$U_{\text{ЧМ}} = U_0 \cos \left[\omega_0 t + \Delta\omega \int S(t) dt \right].$$

Поскольку модулирующий сигнал стоит под знаком интеграла, то прямого метода детектирования ЧМ сигнала нет.

Существует два варианта детектирования ЧМ:

- ЧМ $\rightarrow$ ФМ – детектирование ФМ (фазовый детектор);
- ЧМ $\rightarrow$ АМ – детектирование АМ (амплитудный детектор) – используется чаще.

Для преобразования ЧМ в АМ используется устройство, у которого $U_{\text{вых}} = f(v_{\text{вх}})$.

Таким образом при автоматизированном стегоанализе полезно провести детектирование подозрительного сообщения. Это значительно упростит решение задачи обнаружения стего.

3. Анализ алгоритмов звуковой стеганографии.

Основной направленностью проведенных исследований были поиски методов:

- синтез нового более криптоустойчивого стегоалгоритма;
- разработка метода стегоанализа.

3.1. Известные методы и алгоритмы стеганографии.

Широкополосное кодирование. В сигнал добавляется модулированный сообщением шум с амплитудой чуть выше предела маскирования. Преимуществом данной схемы является эффективность работы и высокая пропускная способность, недостатком – вносимые в сигнал слышимые искажения. Напомним суть алгоритма. При сокрытии одного бита в последовательности коэффи-

циентов выходная последовательность вычисляется следующим образом:

$$x'_i = \begin{cases} x_i + \omega_i | x_i | \alpha_i & s_i = 1 \\ x_i - \omega_i | x_i | \alpha_i & s_i = 0 \end{cases} \quad \text{где } \omega_i \in -1, +1$$

– случайная двоичная последовательность, α_i – порог слышимости i -той подполосы, s_i – скрываемый бит.

Для вычисления порога слышимости может быть использована психоакустическая модель, содержащаяся в формате кодирования MP3, или любая другая. Таким образом, метод позволяет управлять психоакустическим характером вносимых в сигнал искажений.

Фазовое кодирование. В данном методе используется тот факт, что человеческое ухо воспринимает не значения фазы, а только их разность. Это особенно важно, если контейнер – музыкальное произведение. Напомним алгоритм. Сигнал разбивается на участки, значения фазы на первом участке используются для кодирования скрываемого сообщения, значения фаз остальных участков таким образом, чтобы разность фаз между участками осталась неизменной. Для кодирования одного бита скрываемого сообщения используется определенная последовательность изменений фаз, различная для кодирования 0 и для кодирования 1. Для извлечения скрытого сообщения используется следующая функция обнаружения:

$q = \sum r_i (v_i - \phi_i)^2 - r_i (u_i - \phi_i)^2$, где r_i , ϕ_i – амплитуда и фаза i -го полученного сигнала.

$u = \{\alpha_0, \beta_1, \alpha_2, \beta_2\}$ – ожидаемая последовательность фаз при кодировании бита 1.

$v = \{\beta_0, \alpha_1, \beta_2, \alpha_3\}$ – ожидаемая последовательность фаз при кодировании бита 0.

α_i и β_i - ближайшие к ϕ_i значения фаз, соответствующие 1 и 0.

Если $q > 0$, бит скрытого сообщения принимается равным 1, иначе равным 0.

Эхо-кодирование использует неравномерные промежутки между эхо-сигналами для кодирования последовательности значений. При наложении ряда ограничений соблюдается условие незаметности для человеческого восприятия.

Замена шума. В данном методе используется тот факт, что человеческое ухо воспринимает не столько форму, сколько энергию шума. При сокрытии одного бита в последовательности коэффициентов, выходная последовательность вычисляется следующим образом:

$$x'_i = \begin{cases} p_i / x_i / & \text{при кодировании 1} \\ -p_i / x_i / & \text{при кодировании 0} \end{cases},$$

где p - случайная двоичная последовательность, $p_i \in -1, +1$.

При извлечении скрытого бита, как и в случае широкополосного кодирования, используется функция корреляции принятых коэффициентов и исходной случайной последовательности.

В целом методы сокрытия данных в не-сжатом звуковом потоке имеют ряд серьезных недостатков:

- возможную заметность при прослушивании;
- ограниченную пропускную способность;
- сложность реализации.

Вносимые в сигнал неестественные искажения в сигнал, такие как белый шум определенной амплитуды, дискретные фазы сигнала и т.д., могут быть с высокой вероятностью обнаружены специфическими методами обнаружения. Анализ показывает, что в методы стеганографии, применяемые для сокрытия сообщений в изображениях в основном, неизвестны. Тем не менее, их применение для сокрытия данных в звуковых файлах допустимо и разумно. Далее приводятся результаты численных экспериментов, проведенных при участии авторов.

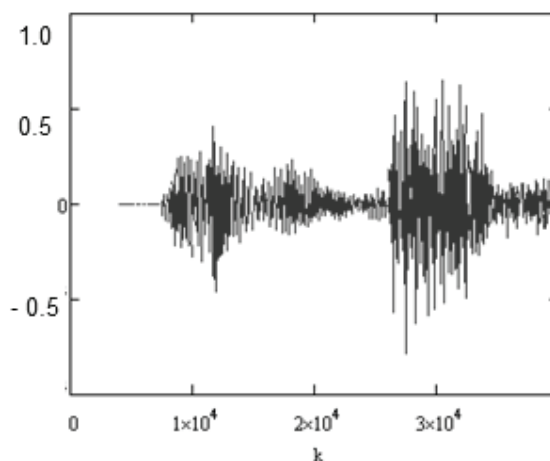


Рисунок 4.

Осциллограмма сигнала в незаполненном контейнере. k – автоматное время

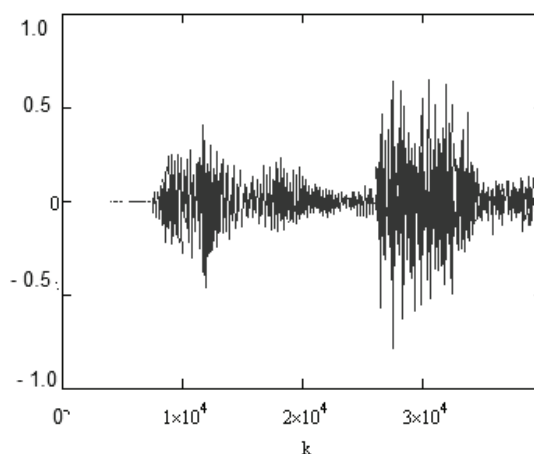


Рисунок 5.

Осциллограмма сигнала со стего, k – автоматное время

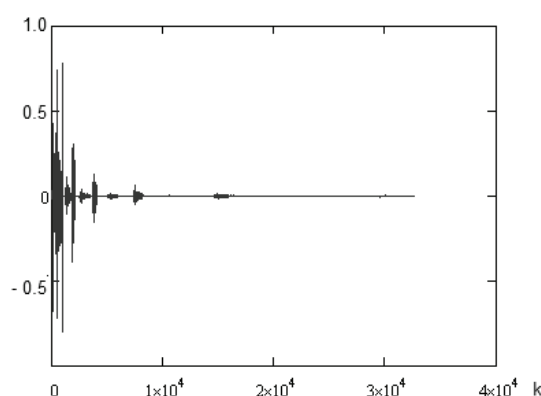


Рисунок 6.

Осциллограмма сигнала со стего (первого канала звукового файла), k – автоматное время

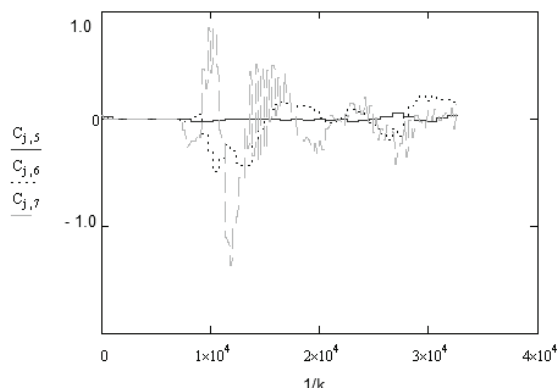


Рисунок 7.

Графики семейства коэффициентов вейвлет-спектра Добеши WAV файла БЕЗ стего (первого канала звукового файла). $C_{j,x}$ – коэффициенты, x – номер семейств коэффициентов вейвлет-спектра Добеши (меняя это значение можно проследить за всеми семействами коэффициентов)

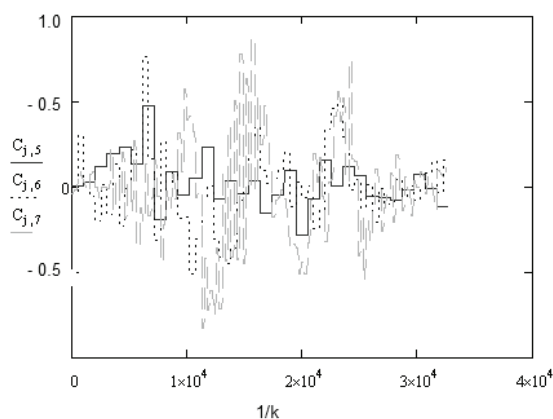


Рисунок 8.

Графики семейства коэффициентов вейвлет-спектра Добеши WAV файла со стего (второго канала звукового файла). $C_{j,x}$ – коэффициенты, x – номер семейств коэффициентов вейвлет-спектра Добеши (меняя это значение можно проследить за всеми семействами коэффициентов)

3.2. Основные результаты численных экспериментов.

Приведенные выше алгоритмы сокрытия данных в звуковых контейнерах хорошо изучены. Авторы настоящей публикации провели исследования модификации наиболее простых алгоритмов сокрытия данных в изображениях в случае использова-

ния звуковых файлов. Ниже приведены основные результаты спектрального анализа звуковых файлов, содержащих контейнеры со стегосообщением с помощью вейвлет-преобразования. Для экспериментов выбраны простейший метод LSB и метод «заплаток».

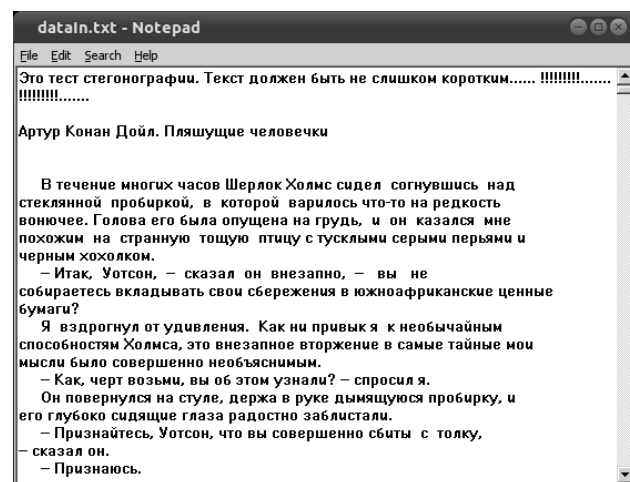


Рисунок 9.

Исходное стегосообщение

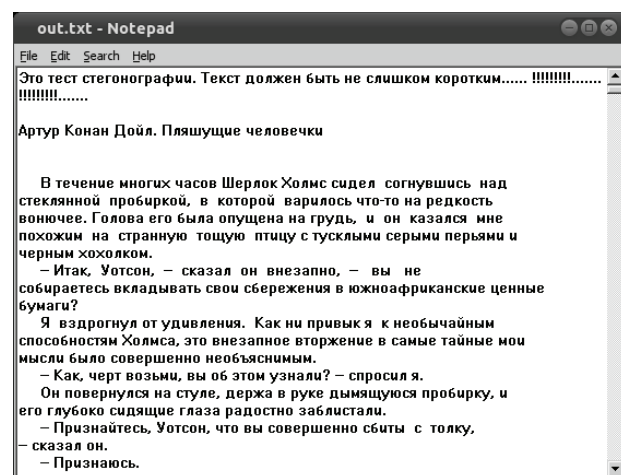


Рисунок 10.

Восстановленное стегосообщение

В начале рассмотрим метод LSB. Сигнал в пустом контейнере приведен на рис. 4.

Для проведения численных экспериментов контейнер был заполнен стего методом LSB. Осциллограмма сигнала со стего приведена на рис. 5.

После восстановления стего по известному ключу проведен вейвлет – анализ пусто-

$$\text{Data} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Рисунок 11.
Стего

го контейнера и контейнера со стегсообщением.

Графики семейства коэффициентов вейвлет-спектра Добеши WAV файла БЕЗ стего (первого и второго канала звукового файла) приведены на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

Таким образом, вейвлет - анализ позволяет заметить разницу между пустым контейнером в виде звукового файла и тем же контейнером, но уже со стегосообщением, то есть решить задачу обнаружения.

Тексты стегосообщений (исходного и восстановленного) приведены на рис. 9 и рис. 10.

Продолжение описания основных результатов исследований стеганографической записи данных в звуковом контейнере методом Patchwork.

Порядок численного эксперимента. В произвольно выбранном контейнере в виде сэмпла звукового файла управляемого объема записывалось произвольно выбранное стего методом «Patchwork» («заплаток»). Восстанавливалось стего по известному ключу. Заносился гауссов шум в контейнер, содержащий стегосообщение с помощью функции `norm(*)`. Оценивалось влияние шума на восстановленное стего с помощью графиков. Стего приведено на рис. 11.

График зависимости числа ошибок y от уровня шума приведен на рис. 12.

Данные при малом уровне шума были успешно восстановлены. Зависимость числа ошибок от уровня шума продемонстри-

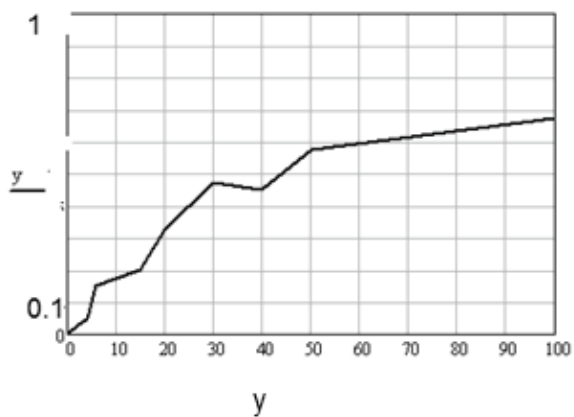


Рисунок 12.

График зависимости числа ошибок y от уровня шума

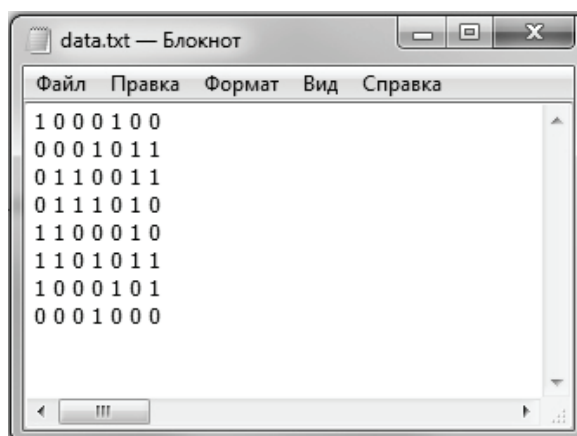


Рисунок 13.

Исходные данные

Key.txt — Блокнот						
Файл Правка Формат Вид Справка						
7	8	0	0	0	0	0
10	4	0	0	0	0	0
83	59	8	91	67	154	39
14	97	20	302	48	114	62
55	80	47	203	39	205	97
114	95	108	72	119	33	10
46	63	1	65	45	98	202
94	11	9	37	2	50	43
68	60	37	83	8	7	70
59	8	91	67	154	39	13

Рисунок 14.

Восстановленные данные

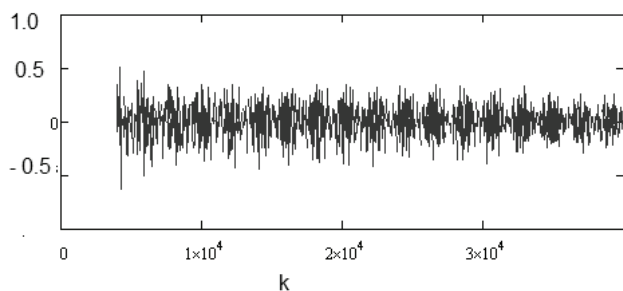


Рисунок 15.

**Осциллограмма сигнала в пустом контейнере.
 k – автоматное время**

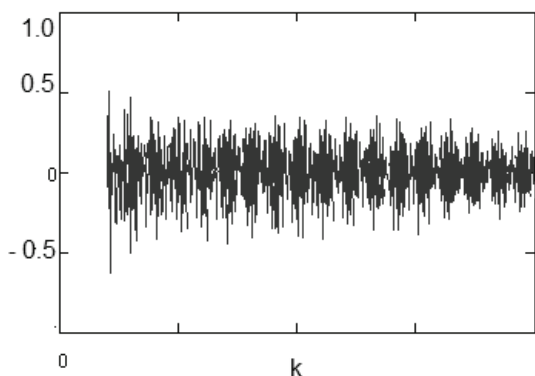


Рисунок 16.

**Осциллограмма сигнала со стегосообщением.
 k – автоматное время**

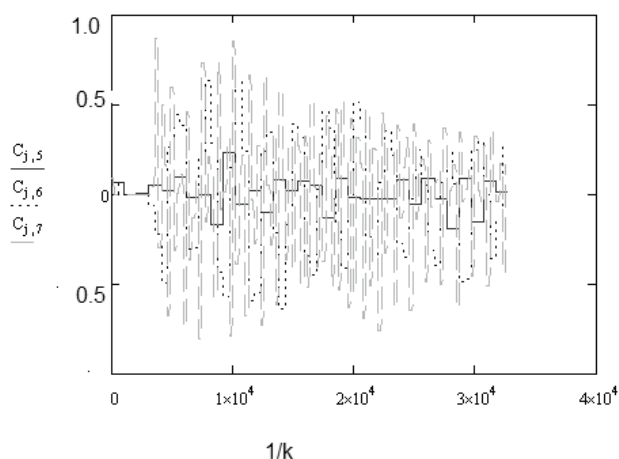


Рисунок 17.

Семейство коэффициентов вейвлет-спектра Добеши $C_{j,x}$ WAV файла со стего (первого канала звукового файла), X - номер семейств коэффициентов вейвлет-спектра Добеши

ровала, что с увеличением уровня шума возрастает количество ошибок. Далее приводятся исходное и восстановленное стего.

Исследование метода корреляционного анализа звуковых файлов с помощью вейвлет-преобразования. Скрытие и извлечение данных из контейнера. WAV – программа позволяет определить количество возможной скрытой информации в контейнере и позволяет подобрать оптимальное ее количество, а так же произвести ее извлечение из контейнера. Алгоритм ограничен тем, что для каждого бита шифруемой информации берется 10000 пар байтов звука.

Последовательность для записи данных берется из файла, стего записывается методом Patchwork, на основе ключа, который формируется в зависимости от звука и от выбора числа блоков, а так же псевдослучайных чисел, выбирающих пары байтов звука. На выходе алгоритма кодирования получаем ключ шифрования и контейнер с зашифрованными данными. На выходе алгоритма декодирования получаем, с использованием ключа, зашифрованные данные. Осциллограмма пустого контейнера приведена на рис. 15.

Графики семейства коэффициентов вейвлет-спектра Добеши WAV файла со стего (первого канала звукового файла) приведены на рис. 17.

Пример стегоанализа корреляционным методом.

Как видно выше, стеганоанализ корреляционным методом приносит свои плоды по крайней мере в случае применения стеганографического метода LSB и выявляет различия между аудио контейнером без скрытого в нем сообщения и аудио файлом со стегосообщением внутри.

4. Теоретические аспекты стегоанализа звуковых файлов

Вероятностные характеристики обнаружения скрытых сообщений. Задачей стегоанализа режиме обнаружения является выдача решений о наличии или отсутствии скрытого сообщения в подозрительном сигнале. Будем считать, что в стегосиг-

стеме присутствуют случайные сигналы, то есть заранее неизвестно, присутствует ли в перехваченном сигнале скрытое сообщение. Принимаем также что перехваченный контейнер – реализация случайного сигнала, поскольку сам факт его появления непредсказуем. Пусть $s(t)$ – реализация случайного сигнала $s(t) = c(t) + \text{Псл}(t) = \{s(t) = c(t) + \Pi(t)\}$. Такая реализация $s(t)$ изображенная на рис. 21, представляет собой в простейшем случае некоторую композицию полезного сигнала $c(t)$ и реализации сигнала случайного, так что: $s(t) = c(t) + \Pi(t)$.

Ошибки экспертизы. Средний и условный риск. Стегоанализ возможно производить субъективными и объективными методами. Возможно использовать и метод экспертных оценок, когда сигнал анализируется «на слух» обучаемым анализатором, накапливающим опыт экспертов. Рассмотрим теоретические аспекты стегоанализа звуковых сигналов. Решения экспертизы всегда сопровождаются ошибками. Это особенно характерно для анализа «на слух». Программно-аппаратные средства, которыми располагает экспертиза, могут также вырабатывать ошибочные посылки, связанные с естественным несовершенством названных средств, т. е. наличием методических ошибок, носящих случайный характер.

По аналогии с определениями, выработанными в теории обнаружения, далее рассматриваются следующие понятия:

- «ошибка ложной тревоги»;
- «ошибка необнаружения» скрытого сообщения в подозрительном файле.

Будем обозначать далее событие принятия решения об обнаружении скрытого сообщения в подозрительном сигнале как «ДА», а событие, связанное с необнаружением скрытого сообщения – как «НЕТ». Вводим далее следующие обозначения:

- $P(\text{ДА}/o) - P(\text{лт})$ – вероятность ложной тревоги;
- $P(\text{НЕТ}/\alpha) - P(\text{но})$ – вероятность необнаружения.

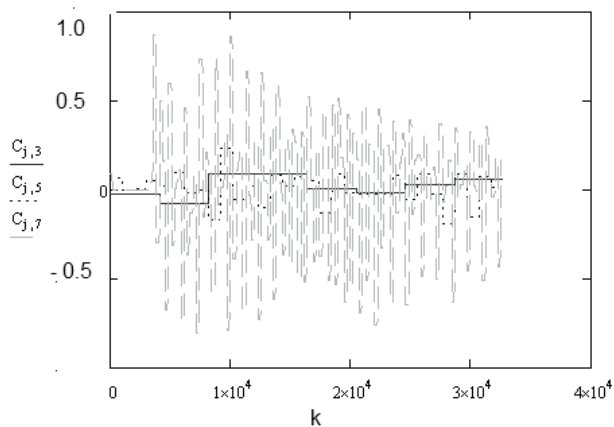


Рисунок 18.

Графики семейства коэффициентов вейвлет-спектра Добеши WAV файла без стего (первого канала звукового файла).

$C_{j,x}$ – семейство, X – номер семейств коэффициентов вейвлет-спектра Добеши

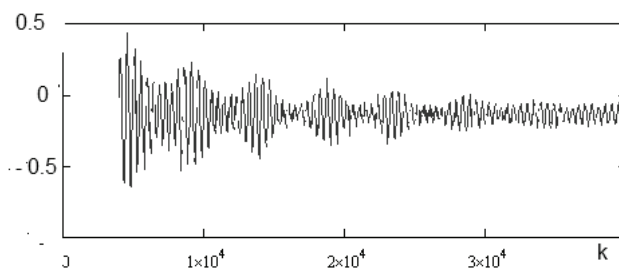


Рисунок 19.

График функции взаимной корреляции между сигналом – контейнером и сигналом со стего.
 k – автоматное время

События, связанные с принятием решения о наличии, либо отсутствии скрытого сообщения в подозрительном файле образуют полную группу, так что:

$$P(\text{НЕТ}/\alpha) + P(\text{ДА}/\alpha) = 1,$$

$$P(\text{НЕТ}/o) + P(\text{ДА}/o) = 1$$

Тогда вероятность обнаружения $P(\text{обн})$ определяется зависимостью

$$P(\text{обн}) = P(\text{ДА}/\alpha) = 1 - P(\text{НЕТ}/\alpha) = 1 - P(\text{но}),$$

$$P(\text{пно}) = P(\text{НЕТ}/o) = 1 - P(\text{ДА}/o) = 1 - P(\text{лт})$$

Величина $P(\text{обн})$ – вероятность заключения экспертизы о наличии в подозрительной реализации скрытого сообщения при условии, что скрытое сообщение действительно в ней присутствует. Как показали

численные эксперименты, применение простейших алгоритмов стеганографии приводит к появлению подозрительных шумов. Применение специальных стегоалгоритмов при сокрытии в звуковых файлах вызывает появление фальшивых звуков. Таким образом, экспертиза «на слух» вполне приемлема. Величина $P(\text{пно})$ – вероятность заключения экспертизы об отсутствии скрытого сообщения в подозрительной реализации, при условии, что его действительно там нет – вероятность правильного необнаружения. Таким образом, можно считать, что чем больше значение $P(\text{но})$ (или чем меньше $P(\text{обн})$), тем выше качество средств сокрытия сообщений. С учетом вышеперечисленного можно записать выражение для безусловных вероятностей:

$$P(\alpha_{\text{лт}}) = P(\alpha) P(\text{лт}); P(\alpha_{\text{но}}) = P(\alpha) P(\text{но}), \\ P(\alpha_{\text{обн}}) = P(\alpha) P(\text{обн}); P(\alpha_{\text{пно}}) = P(\alpha) P(\text{пно})$$

Вышеперечисленные вероятности в среднем могут быть вычислены опытным путем через частоты принятия экспертизой правильных и ошибочных решений в процессе анализа множества подозрительных реализаций, содержащих (либо нет) сообщение, зашифрованное одним и тем же методом.

Известны автоматизированные методы и средства фонетической экспертизы [4], например, когнитрон (рис. 22).

Структура когнитрона позволяет заключить, что анализу возможно подвергнуть и речевые сигналы, и музыкальные сигналы. Применение когнитрона существенно снижает криптоустойчивость звукового стегосообщения. Более того, становится возможным проведение стегоанализа в реальном масштабе времени. При этом автоматизируется процесс накопления экспертных оценок.

В когнитроне N различных нейро-экранов первого уровня нейросетей отражают наши способности «одновременного» мысленного обзора классов образов и быстрой дифференциации вариантов развития ситуации в процессе принятия решений. Каждый

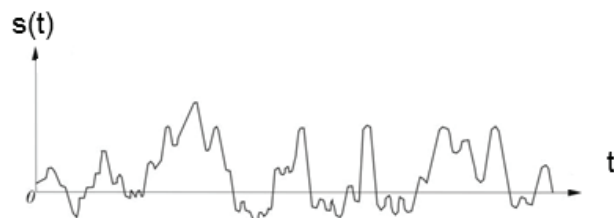


Рисунок 20.
Осциллограмма случайного сигнала

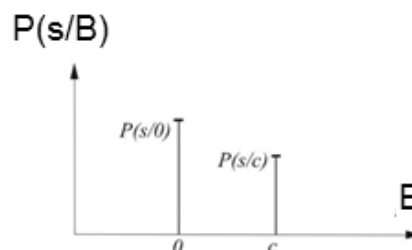


Рисунок 21.
Отсчеты условных вероятностей (функции обнаружения)

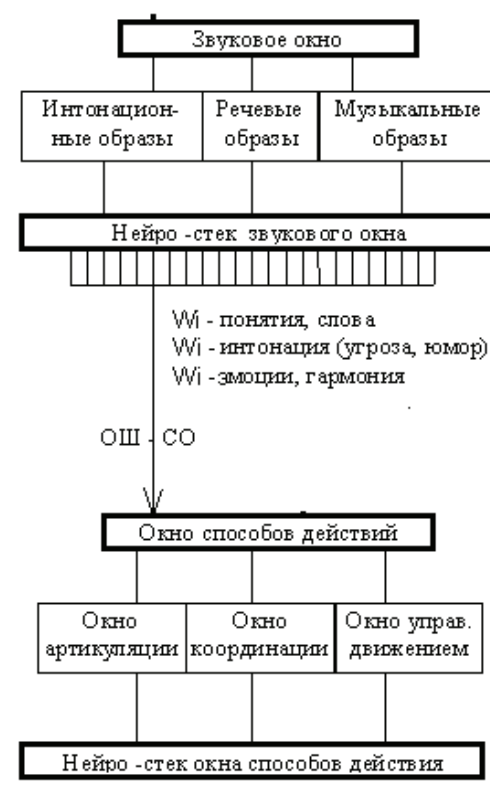


Рисунок 22.
Структура фонетического когнитрона

нейрон воспринимает дендритами некоторое количество точечных возбуждений x_k в соответствии с амплитудой, частотой или временной фазой микровибраций и формирует суммарное возбуждение Y_j , например как это предусматривается в очень упрощенной модели нейрона-персептроне:

$$Y_j = F\left(\sum_{k=1}^N a_{k,j}x_k\right)$$

или:

$$Y_j = F\left(\sum_{k=1}^N a_{k,j}x_k + \sum_{s=1}^M d_{s,j}\right),$$

где: F - некоторая пороговая функция типа «скачок» восприятия «мощности» образа $a_{k,j}$ и $d_{s,j}$ - настраиваемые в процессе обучения коэффициенты-параметры проводимости дендритов по прямым входам $a_{k,j}$ и входам для обратных связей $d_{s,j}$, которые, например, устанавливаются максимальными ($a_{k,j} \leq 1$), при восприятии граничных точек образа и минимальными ($a_{k,j} \geq 0$) для остальных (фоновых) точек с последующей подстройкой порогов $d_{s,j}$, что обеспечивает максимизацию (минимизацию) одного из суммарных возбуждений Y_j при распознавании того или иного образа. При коэффициенте сжатия $N:1$ общее число уровней (m) нейросети воспринимающей и распознающей образы с нейро-экрана размером $S = P \times P$ точек приближенно определяется как:

$$m = \log_N S,$$

где: S , P и N формируются как целые степени небольших простых чисел, например как $N = 2h$ или $N = 3h$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований, основные результаты которых приведены в настоящей публикации можно утверждать следующее:

– предложена и вынесена на обсуждение

модель речевого сообщения, применяемая для построения методов стегоанализов звуковых контейнеров со стего;

– показаны достоинства и недостатки алгоритмов записи стего в звуковые файлы, не приведенные в доступных публикациях;

– предложена простая методика стегоанализа, правильность которой доказана, поскольку строится на теории обнаружения;

– выбрана аппаратная реализация метода автоматизированного обнаружения стего в звуке.

Список литературы:

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. Для вузов по спец. «Радиотехника». — М: Высш. шк. 1983. — 536 с.
2. Голубинский А.Н, Гущина А.А. Анализ и синтез гласных звуков на основе математической модели в виде импульса колебания с амплитудно-частотной модуляцией со сложным несущим сигналом // наука и современность: сборник материалов Международной научно-практической конференции. — Новосибирск, 2012. — С. 23–28.
3. Черанёв М.А. Анализ математических моделей речевого тракта / М. А. Черанёв, Б. Г. Петров // Молодой ученый. — 2013. — №6. — С. 181-184.
4. Савченко А.В., Савченко А.В. Метод фонетического декодирования слов в информационной метрике Кульбака – Лейблера для систем автоматического распознавания речи с повышенным быстродействием. // Информационно-управляющие системы. // № 2 (63) / 2013 (БАК РФ: 01.01.09; 05.13.01; 05.13.17; 05.13.18; 05.25.05).
5. Pereira F.C.N., Warren D.H.D. Definite clause grammars for language analysis - a survey of the formalism and a comparison with augmented «transition networks» // Artificial Intelligence. – 1980. Vol. 13, pp. 231-278.
6. Потапова Р.К., Пономарь М.О. // Сборник: XVIII сессия Российского акустического общества, Акустика речи. медицинская и биологическая акустика // 2006/ с. 78 – 80.

50 ЛЕТ ОТДЕЛУ ДИЗАЙНА КРАСНОГОРСКОГО ЗАВОДА ИМЕНИ С.А. ЗВЕРЕВА

РУНГЕ В.Ф., ТИТОВ Е.И.

E-mail: djek-p@yandex.ru

Дизайн на Красногорском заводе начинался в годы реформ, предложенных А.С. Косыгиным. 28 апреля 1962 года он, как 1-й зам. председателя Совета Министров СССР, подписал Постановление «Об улучшении качества продукции машиностроения и товаров культурно-бытового назначения путём внедрения методов художественного конструирования».

Был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт технической эстетики; вышли директивные документы по Министерству оборонной промышленности. Владимир Федорович Рунге стал первым, кто был зачислен на должность художника-конструктора в ЦКБ завода. Приказом от 16 августа 1965 года он же был назначен начальником создаваемой «с нуля» службы художественного конструирования, которой руководил до избрания в 1987 году секретарём правления Союза дизайнеров СССР. Первыми сотрудниками этого бюро стали Владислав Шаблевич, начавший художественно отрабатывать форму аппаратуры в 1963 году, и Сергей Васильевич Шевяков, замечательно изображавший конструктивно-компоновочные решения приборов в перспективе. Вскоре пришли ещё двое сотрудников, учившихся на вечернем отделении МВХПУ (б. Строгановское): Олег Ершов (графический факультет) и Николай Фролин (факультет промышленного искусства).

Заводом были установлены контакты с факультетом искусства Строгановки (декан – А.Е. Короткевич) и подписан договор о творческом содружестве между предприятием и вузом, и это взаимодействие продолжается и по ныне. Первым результатом содружества стали проекты дальномерных фотоаппаратов, выгодно отличавшихся от предшествующей модели «Зоркий-4». Оригинальный дизайн одного из них – «Зоркого-10» – был отмечен Золотой медалью Лейпцигской ярмарки. Одновременно вёлся целенаправленный подбор и подготовка выпускников факультета для работы на заводе.

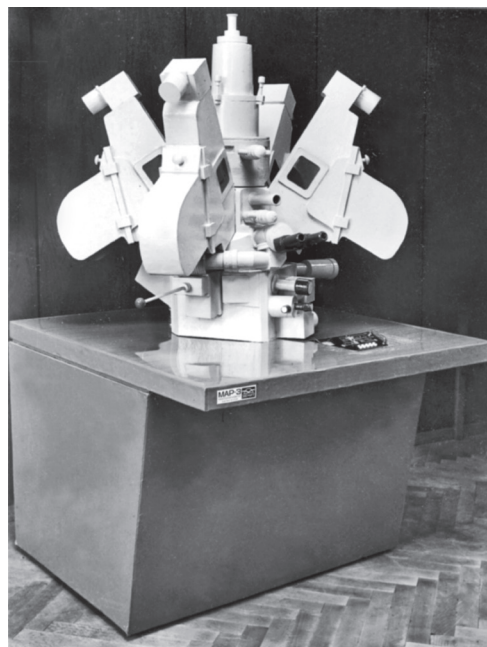
1965-1968 – напряжённые, многому научившие годы постижения новой профессии, годы становления службы дизайна завода. Художники-конструкторы, используя методические советы ВНИИ технической эстетики, вникали в суть заводских технологий и преодолевали недоверие конструкторов, убеждая их в необходимости творческого содружества при разработке продукции. К концу 1968 года служба дизайна (сначала бюро, а с 1967 – сектор художественного конструирования) была укомплектована восемью дипломированными художниками-конструкторами и графиками: в 1967 году пришли выпускники Строгановки Евгений Жердев и Альберт Смирнов, в 1968 году – Раиса Латыш и Анатолий Сивоплясов. Также в штате были техники, чертёжники и модельщики. Удалось создать и оснастить оборудованием макетную мастерскую. Диапазон разработок – от фото- киноаппаратуры массового и аппаратуры специализированного назначения (медицина, космос и пр.) до высокоточного научного и технологического оборудования (электронные микроскопы, рентгеновские микроанализаторы - ведущий дизайнер В.Рунге установки для регистрации быстротекущих процессов - ведущий дизайнер Е. Жердев и пр.). Одновременно начали разрабатывать сопроводительную и рекламную документацию, упаковку, задумываться о графическом фирменном стиле предприятия.

Ещё в 1957 году на заводе был начат серийный выпуск панорамного фотоаппарата «ФТ-2», разработанного Ф.В. Токаревым, конструктором стрелкового оружия.

Прибор в форме прямоугольной «коробочки» был снабжён объективом, который механически производил разворот проецируемого изображения по горизонтали на пленку, расположенную по дуге. Угол панорамирования (охвата) по горизонтали – 120°. Благодаря модернизации на смену «коробочке» пришёл фотоаппарат «Горизонт» (1966) с пластикой формы и цветофактурным решением, аналогичными традиционным для фотоаппаратов того времени (дизайнеры В. Рунге и В. Шаблевич).

В конце 1960-х были созданы оригинальные образцы зеркальных фотоаппаратов. «Зенит-7» – поиск нового варианта решения на основе традиционного формообразования «зеркалки». «Зенит-Д» – первая отечественная «зеркалка» с автоматической обработкой выдержки затвора и необычной для этого вида фотоаппаратов формой, которая была обусловлена не только эстетическими поисками. Большое влияние на форму и объём оказала необходимость размещения в корпусе элементов электронной схемы и механизмов автоматики, имевших в то время относительно большие габариты.

Но были и проблемы, которые не способствовали творческой деятельности. Это, прежде всего, жёсткие условия «режимного предприятия», когда даже посещение специализированных выставок, ВНИИТЭ для консультаций, не говоря уж о возможности хотя бы эпизодической творческой работы вне стен завода, были практически неразрешимой проблемой. Проблема стала известна директору ВНИИТЭ Ю.Б. Соловьёву. По его инициативе в конце 1970 года Учёный совет института, наделённый широкими полномочиями по дизайну в стране, заслушал творческие отчёты художественно-конструкторских подразделений ведущих предприятий оптико-механической промышленности (ОМП). Совет положительно оценил деятельность дизайнеров, высказал критические замечания и дал конкретные рекомендации. Руководство Министерства, завода и других предприятий отнеслись к ним с пониманием. Был проведен ряд



Микроанализатор



Комплект фотоаппарата «Горизонт»

мероприятий, что во многом способствовало тому, что в начале 1970-х годов ОМП стала одной из наиболее благополучных отраслей по дизайну в стране. Об этом можно прочесть в «Технической эстетике» и др. изданиях ВНИИТЭ, книгах по отечественному дизайну.

Полноценному вписыванию службы дизайна в большой коллектив заводчан способствовала выставка-отчёт службы дизайна, на которой были продемонстрированы не только достижения в области промышленного дизайна, но и личные увлечения дизайнеров. Заводская газета от 29 декабря 1972 г. писала о большом внимании, интересе и восхищении многочисленных посетителей, работников завода, экспозицией, показавшей две стороны творчества. Основная работа – художественное конструирование широкой гаммы изделий, футляров, упаковки от начальных эскизов, макетов в бумаге и пластине до готовых образцов (в сопровождении свидетельств о патентной защите, дипломов отечественных и зарубежных выставок). Пространная газетная заметка о выставке заканчивалась одним из многочисленных отзывов: «Поздравляем! Вы долго молчали, но сумели сказать убедительно!».

Особо стоит сказать об участии дизайнеров в создании новой экспозиции музея боевой и трудовой славы завода в 1978–1980-м годах. Первая экспозиция музея 1965 года размещалась в Доме культуры, в небольшой комнате площадью 28 кв. м. Под новую экспозицию была отведена площадь в 4 раза больше. Руководителем группы по разработке художественно-конструкторского проекта экспозиции и его реализации был назначен В. Рунге. Вместе с дизайнерами О. Ершовым, Г. Федоренко и др. при тесном взаимодействии с методистом Т. Панормовой, ветеранами и другими заинтересованными лицами разрабатывалась концепция, создавался тематико-экспозиционный план, предложения по дизайну музея. Был использован опыт аналогичных музеев страны.

Новая экспозиция была открыта осенью 1980 года. Очень быстро она стала культурно-исторической достопримечательностью города. Её посещали многие делегации из других регионов, зарубежные гости. Министерство культуры РСФСР в 1982 году присвоило заводскому музею почётное звание «народный».

Семидесятые годы памятни доработкой дизайна серийной продукции на Знак качества. Первыми изделиями завода, проходившими аттестацию на Знак качества, были сменные объективы для фотоаппаратов типа «Зенит» (ведущий дизайнер Н. Фролин). Они имели высокие технические показатели и пользовались заслуженным спросом у покупателей. Однако им были присущи существенные эксплуатационные и композиционные недостатки. После тщательного анализа, изучения отечественных и зарубежных аналогов было найдено новое художественно-конструкторское решение всей серии объективов в едином стиле. Одновременно с объективами перерабатывались футляры, упаковка и рекламно-сопроводительная документация.

При аттестации серийной продукции на Знак качества были необходимы положительные экспертные заключения ВНИИТЭ, а их, как правило, не выдавали без существенной доработки изделия. Удалось убедить руководство ЦКБ в обязательном порядке оценивать потребительские свойства и эстетический уровень изделий, не дожидаясь конечного этапа – запуска в серию. Дизайнеры стали тесно сотрудничать с ВНИИТЭ, начиная со стадии ТЗ и эскизов, что позволяло переломить косность конструкторов, добиться освоения новых технологий, применения новых материалов и декоративно-отделочных покрытий. Более того, специалисты ВНИИТЭ стали участвовать в новых разработках завода.

В эти же годы для Института Ленина (Мавзолея) был разработан и изготовлен целый комплект техники (ведущий дизайнер – А. Сивоплясов). Комплекс подобной техники был создан для съёмки движущихся кораблей, дельфинов и других объектов. Аппараты комплекса работали над поверхностью воды, под водой и на грани сред (воздух – вода). Для нас, дизайнеров, это были очень поучительные сложные разработки, в которых участвовал практически весь коллектив. Работали в тесном контакте с замечательными людьми – конструкторами,

испытателями, учёными, моряками и другими специалистами. Эта работа произвела большое впечатление на заказчиков, руководство ЦКБ и завода, полнее раскрыв им возможности дизайна, профессионализм и мастерство художников-конструкторов.

Много нового было внесено в зеркальный фотоаппарат «Зенит-16» (конструктор А. Падалко, дизайнеры В. Шаблевич и В. Рунге). При создании фотоаппарата разработчики отказались от традиционного горизонтального членения камеры на три части. Разработчики ввели разделение формообразующих объёмов на несущий (внутренний металлический) и ограждающие (наружные пластмассовые) элементы, а также крышку на горизонтальной петле. Оригинальное объёмно-пластическое решение было подчеркнуто сочетанием гладкой и фактурированной поверхностей сочленяемых частей камеры. При новом подходе к конструкции камеры целостность композиционного решения достигалась проще и убедительнее, технологические показатели стали выше за счёт облегчения доступа к механизму и узлам при сборке и ремонте. Фотоаппарат был защищён свидетельством на промышленный образец, получил высокую оценку дизайнерского решения в стране и за рубежом. Схему его формообразования использовали легендарный пионер американского дизайна Рэймонд Лоуи и его коллеги при проектировании «зеркалки» для Красногорского завода при посредничестве ВНИИТЭ.

Совместными усилиями заводских дизайнеров-графиков (прежде всего, О. Ершова) и специалистов ВНИИТЭ создавался графический фирменный стиль предприятия. Самым трудным было найти его основу – новый товарный знак. Им стало сочетание логотипа (слова-символа) «Зенит» и марки – стилизованного изображения оптической детали. Выбор логотипа «Зенит» связан с наименованием самой популярной марки из семейства фотоаппаратов завода. В целях преемственности символики использовали прежнюю марку – изображение призмы Дове с ходом светового луча в ней. Правда, ввели стилизацию графики, изменение пропорций, разнотолщинность линий. Прежняя марка была известна потребителям уже с конца 1940-х годов. Комбинация на базе двух известных, ставших традиционными и узнаваемыми элементов, создала новый оригинальный товарный знак, защищённый патентными документами. Примечательно, что под наименованием «Зенит», заслужившим признание, доверие и известность во всём мире, поставляли за рубеж изделия других изготовителей. Среди них были фотоаппараты Киевского «Арсенала» и Ленинградского ЛОМО, детский оптический микроскоп Уральского ОМЗа (Свердловск), а также часы и пр.

Фактически в 1970-е годы был заложен практический и, самое главное, теоретический фундамент того, что со временем стало дизайн-концепцией, дизайн-программой оптико-механической и оптико-электронной продукции предприятия, включавшей в себя образно-стилевую, структурный, эргономический и др. блоки. Всё больше внимания уделялось учёту «человеческого фактора», особенно при создании сложной техники, эксплуатируемой в экстремальных условиях космоса и под водой, предназначенной для оборонных целей.

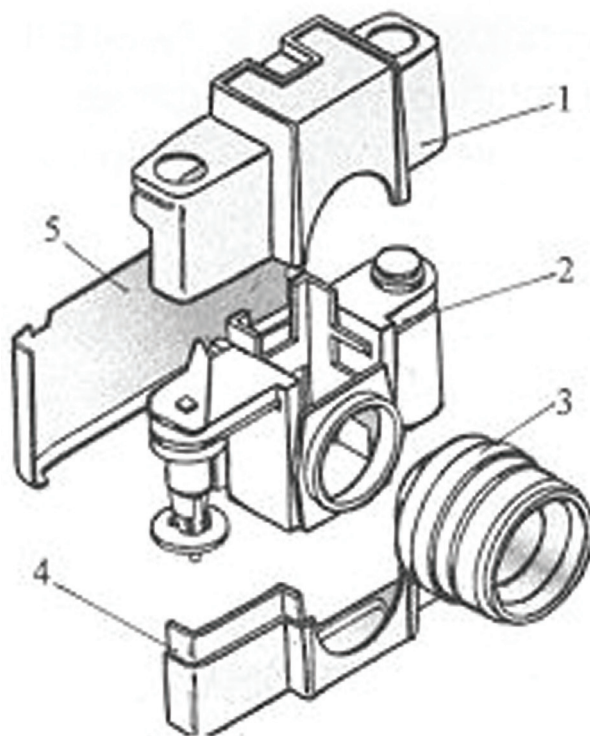


Схема фотоаппарата «Зенит-16»



*Конокамера «Кварц-8XL»
и фотоаппарат «Зенит-16» с объективами*

Лётчик-космонавт, дважды Герой Советского Союза Г.М. Гречко, поддерживая выдвижение творческого коллектива красногорцев на соискание Государственной премии РФ в области литературы и искусства, писал в 2001 году: «Изделия завода, связанные с космонавтикой, органично сочетают в себе удобство в эксплуатации, элегантность форм и качественность изготовления. Ю.А. Гагарин, А.А. Леонов, Ю.П. Артюхов и др. успешно использовали зеркальные фотоаппараты «Зенит», кинокамеру «Конвас». Более высокими показателями обладали кинокамеры, специально созданные для космоса. «КЗ» отличалась, пользуясь операторским жаргоном, улучшенной «держабельностью» и «хватабельностью». Оригинальную компоновку и форму имела «К2» (ведущий дизайнер Е. Жердев), готовившаяся к лунной одиссее. В этих изделиях наглядно проявились талант и мастерство заводских дизайнеров и конструкторов. В конце XX века в связи с переориентацией с ранее «закрытой» тематики на коммерческие экспортные заказы вклад дизайнеров в отработку эргономических и эстетических показателей продукции для космических программ приобретает ещё большую весомость и значимость».

Расширились связи с ВНИИТЭ, где для завода проводились исследования по анализу потребительского уровня и дизайнерских особенностей отечественной и зарубежной фототехники. Там же проводилась независимая экспертиза новых разработок, выдавались рекомендации. Проект кинокамеры «Кварц 8XL» (дизайнеры В. Рунге, В. Шаблевич, Н. Щербакова) успешно прошел экспертизу института, что позволило переубедить конструкторов и внедрить оригинальное патентоспособное художественно-конструкторское решение. Камера была признана лучшей в своём классе, отмечена медалями ВДНХ и дипломами зарубежных выставок.

Особое внимание на протяжении всех 50 лет в отделе художественного конструирования уделялось концептуальному (перспективному) дизайнерскому проектированию, в том числе с привлечением студентов МВХПУ (б. Строгановское). При консультативном участии заводских специалистов, их помощи в макетировании выполнялись курсовые и дипломные работы. Функционально и эксплуатационно-обоснованные, оригинальные по формообразованию проекты были предложены по научным приборам и фототехнике. Ряд проектов был использован в реальных разработках. Десяток совместных проектов высокого уровня были защищены по заявкам завода и училища свидетельствами на промышленные образцы. Совместная работа с заводчанами позволяла студентам глубже усвоить методику проектирования, ознакомиться с особенностями технологических процессов высокоточного производства и в будущем успеш-

нее входить в специальность. В период с 1965 года по настоящее время около 50-ти студентов и выпускников Строгановки взаимодействовали тем или иным образом с заводом (от полугодовой стажировки до многолетней работы в коллективе дизайнеров).

Яркими, хотя и напряжёнными в организационно-творческом плане, событиями были выставки завода. Дизайнеры участвовали в разработках планов-концепций, проектов оформления, полностью сами оформляли экспозиции выставок на ВДНХ СССР. Главные из них: «Хозяйственная реформа в действии» (1972), «Опыт Красногорского механического завода по повышению эффективности производства и улучшению качества продукции» (1977), «Славен трудом человек» (раздел Красногорского района – 1986). Наиболее значимой для дизайнеров была выставка в Доме оптики «Роль дизайна в решении народно-хозяйственных и отраслевых задач» (1986). Ей предшествовала стоящая особняком выставка-отчёт «Дизайн на Красногорском механическом заводе» в Центре технической эстетики ВНИИТЭ на Пушкинской площади. Эта выставка была резонансной. Многочисленные публикации в газетах «Известия», «Советская культура», «Торговля», «Ленинское знамя», «Вечерняя Москва» и других свидетельствуют не только о профессионализме и зрелости службы дизайна КМЗ, но и о её высоком авторитете в стране. Со старожилами вместе активно трудились дизайнеры нового «призыва»: Елены Рыбникова и Сурова, Надежда Щербакова, Михаил Шитиков, Татьяна Лобутева, Георгий Федоренко и др.

В это время фототехника с маркой Зенит прочно укрепилась на международном рынке. До начала перестройки в стране завод, через Внешнеторговую фирму «Техноинторг» поставлял фототехнику в более чем в 70 стран мира. под наименованием «Зенит». Учитывая популярность бренда «Зенит», «Техноинторг» поставлял за рубеж изделия и других изготовителей под этим брендом. Среди них были фотоаппараты Киевского «Арсенала» и Ленинградского ЛОМО, детский оптический микроскоп Уральского ОМЗа, Свердловск, а также часы и пр.

Несомненные успехи художников-конструкторов КМЗ и предприятия в целом стали причиной принятия Министерством решения о создании на базе отдела дизайна Красногорского завода Художественно-экспертного совета (Совет по дизайну) отрасли. Зам. министра И.П. Корницкий своим приказом от 27 сентября 1985 года назначил В. Рунге, кандидата искусствоведения по технической эстетике, председателем Совета, утвердил положение о Совете. Совет вёл многогранную активную деятельность в отрасли, оказавшую большое положительное влияние на развитие дизайна на предприятиях Ленинграда, Киева, Минска, Загорска, Лыткарино, Вологды и других городов.

Основные функции Совета были определены следующим образом:

- художественно-конструкторский анализ современных отечественных и зарубежных образцов любительской фотокинотехники и определение на его основе прогрессивных тенденций формообразования, выдача их в виде рекомендаций предприятиям отрасли для учёта в работах;

- рассмотрение эскизных и технических художественно-конструкторских проектов, а также опытных образцов всех новых моделей любительской фотокинотехники; оценка их уровня и разработка рекомендаций по повышению этого уровня.

Только за один 1986 год были проведены семь заседаний Совета на различных предприятиях отрасли. Члены Совета имели возможность не только оценить работу своих коллег и уровень их разработок, но и смогли ознакомиться с особенностями технологии производства различных предприятий. Одним из плодотворных направлений работы Совета было проведение проектных многодневных семинаров по художественному конструированию (с 1987 года в содружестве с Союзом дизайнеров СССР). Регулярно дважды в год собирались и совместно трудились по две недели дизайнеры отрасли, приглашались студенты и преподаватели ведущих художественно-промышленных вузов, другие специалисты. Весной – на базе

отдыха «Маковза» под Минском (куратор А. Цеханович, гл. дизайнер БелОМО и инициатор проведения семинаров), осенью – в пансионате «Дубки» под Ленинградом (куратор В. Цепов, гл. дизайнер ЛОМО).

Семинары, ставшие со временем легендарными, являлись творческой мастерской, где выполнялись конкретные и концептуальные проекты, и одновременно школой по обмену опытом, повышению квалификации профессионалов, приобщению к дизайнерскому мастерству студенческой молодёжи. Со временем семинары вышли за рамки отрасли и стали Всесоюзными.

С сентября 1987 года службу дизайна возглавил Титов Евгений Иванович. Служба дизайна переезжает за территорию предприятия. Генеральный директор А.И. Гоев, придавая огромное значение дизайну продукции как одной из главных составляющих ее конкурентоспособности, идет дальше и предлагает создать студию промышленного дизайна, разместив ее на единых площадях с отделом маркетинга. К сожалению, этот проект был отложен до лучших времен. Так начиналась новая эра в деятельности службы дизайна. Служба дизайна просуществовала вне заводской территории до 1996 г.

Одна из разработок, выполненных службой дизайна в 1988 году был проект фотоаппарата «Зенит 2000». Два макета этой модели (дизайнеры Е. Рыбникова, В. Шаблевич) были выполнены в нетрадиционном стиле и получили высокие оценки, а работа Е. Рыбниковой была отмечена дипломом на международной выставке дизайна в Германии.

В этом же году перед дизайнерами была поставлена задача по подготовке комплекта фотокинотехники со специальным набором кофров, сумок и чехлов для кинооператора трансарктической экспедиции «СССР- Северный полюс-Канада» В. Леденева. Это был первый опыт прямого взаимодействия проектировщиков непосредственно с потребителем в практике создания изделий культурно-бытового назначения. Проведенная работа позволила кинооператору В. Леденеву выполнить свою миссию кинооператора трансарктической экспедиции. Изобразительный материал, снятый с помощью аппаратуры с маркой «Зенит», составил основу отчета группы Шпаро на телевидении и в прессе. Дизайнерская разработка чехлов и футляров, учитывавшая эргономические особенности эксплуатации в столь специфических условиях, прошла испытания «на отлично».

Службой маркетинга завода этот опыт в дальнейшем был использован при оснащении экспедиции на Южный полюс (экспедиция «Метелица»), а так же в Гималаи и на Памир, в кругосветной экспедиции на яхте «Апостол Андрей», в кругосветных путешествиях Ф. Конюхова на яхте, его восхождении на семь высочайших вершин мира и др. Во многих телевизионных передачах «Клуб кинопутешественников» операторы, пользовавшиеся техникой с маркой «Зенит», выражали благодарность в адрес завода за ее исключительную надежность и качество.

К сожалению, в 90-е годы перестройка в стране завершилась глубоким экономическим и политическим кризисом в стране. В одночасье исчез «Техноинторг», а с ним разрушилась выстроенная им за рубежом обширная дилерская сеть. Художественно-экспертный совет также ушел в прошлое. Завод получил право на самостоятельную внешнеэкономическую деятельность. Любопытно, что среди зарубежных заказчиков новой продукции завода, с которыми работал отдел дизайна, были бизнесмены- выходцы из бывшего СССР.

Еще раз с благодарностью следует отметить участие Генерального директора завода А.И. Гоева в судьбе службы дизайна. Он активно поддерживал практику личных контактов дизайнера и конструктора с заказчиками при разработке товаров культурно-бытового назначения. Солидный опыт по отработке потребительских свойств изделий дизайнеры приобрели при разработке ночных наблюдательных приборов для заказчика из США, биноклей ЛДБ 7х40 (вед. дизайнер Е. Сурова) - для Канады, фотоаппаратов «Горизонт» (дизайнеры Е. Жердев, Е. Титов) для Австрии. Что это давало дизайнеру и конструктору? Четкость постановки задачи, понимание условий и требований рынка и чувство высокой ответственности за результаты разработки.



Бинокль ЛДБ 7х40



Фотоаппарат «Горизонт-202»

А.И. Гоев постоянно интересовался работой дизайнеров, нацеливал на поисковые работы. Практика концептуального подхода к разработке и реализации дизайна конверсионных изделий, упаковки и рекламы получила мощный импульс и стала органичной частью работы всех подразделений завода, обеспечившая ему успех в этот нелегкий период. В отделе укрепились традиции коллективного подхода к поиску решения творческой задачи. При коллективном обсуждении и поиске концепции решения стоящих задач была естественной творческая, непринужденная обстановка, позволяющая применить способности каждого участника.

Благодаря этому в творческий процесс создания и внедрения дизайна новых изделий вовлекались конструктора и технологи, работая над проектом как единая команда. Специалисты завода внесли огромный вклад в поиск и внедрение новых конструкторских решений, отделочных материалов, технологий, реализацию в производстве деталей внешнего вида изделий со сложнейшими формообразующими поверхностями и фактурами.

1987 год является началом применения Системы автоматизированного проектирования дизайна (САПР - дизайн) изделий. У истоков этой работы, при внедрении модели фотоаппарата «Зенит 212» (модернизация «Зенит 12»), стояли дизайнер М. Павлович, программист КБ САПР И. Нагайцева, конструктор А. Карасев, и оператор станка МАХО А. Соколов. Конструктор

Анатолий Иванович Карасев вспоминает: «Получение виртуальной компьютерной модели дизайна фотоаппарата, разработка рабочих компьютерных программ по изготовлению деталей внешнего вида с их последующим материальным воплощением было для нас совершенно новым явлением. Работа велась при четком взаимопонимании и взаимной поддержке. Мы увидели результаты своей работы дизайна на макетах исполненных из металла. Следом были изготовлены и «боевые» формы деталей внешнего вида для отливки из пластмассы».

В этот период в мире начала развиваться цифровая фототехника. Отсутствие доступа разработчиков к элементной базе потребовало от завода, вышедшего самостоятельно на внешний рынок, искать новые пути. Одним из таких



Фотоаппарат «Зенит-212»

путей стало использование конверсионных технологий. Так родилась новая тематика - ночные наблюдательные приборы. Использование САПР-дизайна при создании первых ночных наблюдательных приборов «НВ-400», «НВ-комфорт» показало впечатляюще широкие возможности этого инструмента: стало возможным создание изделий, новых товаров, деталей их внешнего вида, содержащих немыслимые сочетания сложнейших поверхностей. Существенно сократились сроки проектирования, освоения и представления новой продукции потребителю.

С этого момента задача внедрения САПР и 3D -печати в работе службы дизайна становится одной из главных. В 1999 году линейка зеркальных фотоаппаратов пополняется камерами с более выраженной биоморфической пластикой: “Зенит 312” и “Зенит 412” (дизайнер Е. Рыбникова, программист Ф. Бирюков). В 2000 году на этих технологиях разработана совершенно новая полуавтоматическая зеркальная камера “Зенит КМ” с ламельным затвором (дизайнер Е. Рыбникова, конструктор В. Эфроимсон, программист Ф. Бирюков), признанная лучшей работой года в номинации “Изделие года” на Всероссийской выставке-конкурсе “Дизайн 2000”.

К 2001-2002 годам у каждого дизайнера, художника-графика службы было свое рабочее место САПР-графика (2D-графика) с широким комплектом графических программ и другого программного обеспечения. Большой вклад в дело внедрения программных продуктов для художественного проектирования в службе внесла дизайнер по архитектурным и офисным интерьерам Е. Бакалина.

В 2004 году в службе дизайна создаются первые рабочие места - САПР дизайн (3D-моделирование) как проектный инструмент промышленного дизайна в структуре КБ САПР-дизайн (руководитель И. Нагайцева). Следует отметить и выразить глубокую благодарность специалистам завода А. Бельскому, Д. Коппу, Ф. Бирюкову за организационную, методическую и практическую помощь как в деле создания виртуальных моделей изделий с утвержденным дизайном, так и в освоении САПР работниками службы дизайна Научно-технического центра завода.

Так начиналась эпоха применения этого направления информационных технологий на заводе.

В 90-е годы проводились многочисленные ярмарки-выставки в Москве и различных городах страны. Начиная с 2000 года дизайнеры завода ежегодно участвовали в профессиональных выставках, смотрах и ма-



*Ночные наблюдательные приборы «НВ-400»
и НВ-комфорт»*



Фотоаппарат «Зенит-412»



Перфоратор лазерный ПЛТ-01

стер-классах, проводимых Международной общественной ассоциацией “Союз дизайнеров” (МОА СД), Союзом Дизайнеров России (СД России), СД г. Москвы, ВНИИТЭ и др. Служба дизайна завода демонстрировала высокий профессионализм в создании новых видов товаров с креативными, в ряде случаев новаторскими решениями в формообразовании, используя весь арсенал доступных в стране технологий. Такими работами следует считать линейки ночных наблюдательных приборов, биноклей со стабилизацией поля зрения и биноклей с лазерной дальнометрией, ночных охотничьих прицелов, спортивных и специальных прицелов и др. (дизайнеры Е. Жердев, Е. Рыбникова, Е. Сурова, Е. Титов и др). В разработках отдела также был комплекс медицинской техники, в том числе КФГ-офорт-2, Деструктор «ДМИ-0,5-01», «Амулет-201», перфоратор лазерный ПЛТ-01, медицинское кресло и др. (дизайнеры Е. Сурова, Е. Рыбникова, Е.Титов). Работы дизайнеров завода

отмечены дипломами лауреатов ежегодных Всероссийских выставок-конкурсов «Дизайн», высшей наградой выставки – «Виктория».

Успехи службы дизайна КМЗ в области промышленного дизайна были замечены дизайнерским сообществом России. МОА СД и СД России выдвинули в 2000 году творческий коллектив дизайнеров завода на соискание Государственной премии. Указом Президента Российской Федерации от 10 июня 2002 г. за высокий уровень дизайнерских разработок творческому коллективу «Красногорского завода им. С.А. Зверева» была присуждена Государственная премия Российской Федерации в области литературы и искусства 2001г. (номинация «Дизайн»).

Немного о специалистах службы дизайна, талант, мастерство и душа которых вложены в каждое изделие предприятия.

Лидером в среде промышленных дизайнеров службы была Елена Рыбникова. Ее работы всегда отличались новизной и разнообразием. Талантливый и очень трудолюбивый дизайнер, она отличалась сосредоточенностью и упорством. Являясь начальником бюро промышленного дизайна, не навязывала собственных решений. За ее плечами больше десятка оригинальных реализованных работ, получивших признание и высокие оценки, как от потребителей, так и коллег по цеху. Это фотоаппараты Зенит 312, 412, КМ, ночные наблюдательные приборы Зенит NV-комфорт, NV 300, NV 202 и др, цифровая техника ЛИСД ЦФР.

То же можно сказать и о Елене Суровой - трудолюбивый, ответственный и отзывчивый специалист, отличающаяся высоким чувством долга, взаимопомощи и коллективизма, успевающая оказать помощь своим товарищам по профессии, реализовавшая большое количество проектов в области медицинской техники, биноклей и прицелов.

Дизайнер Евгений Жердев - ему присуще все сказанное выше о его товарищах по работе. Обладая выдержкой, он незаметным образом оказывал положительное влияние на творческий коллектив дизайнеров, товарищей по профессии. Как теоретик и философ в области дизайна Е. Жердев (доктор искусствоведения с 2002 г.) безусловно оказал большое влияние на разработки и внедрение идей биоморфизма в дизайн оптико-электронных изделий.

В области графики круг тематических задач у службы дизайна значительно расширился после акционирования завода. Одним из первых проектов в конце 80-х годов стала задача, связанная

с разработкой корпоративного стиля, адаптированного к новым условиям. Появились новые требования, связанные с размещением логотипа предприятия на различных видах носителей рекламы. В связи с этим необходимо было провести рестайлинг фирменного графического стиля, с которым команда О. Ершова (Т. Лобутева, Г.Федоренко и Л. Федоренко, А. Курочкин др.) успешно справилась.

Стали изменяться требования и к другим графическим работам, таким привычным как упаковка и сопроводительная документация изделий (описания и паспорта). В круг основных задач бригады графиков вошли новые: рекламно-оформительские плакаты, презентации, наружная и внутренняя реклама, специальные оформительские работы, производственные и офисные интерьеры и прочее.

Возвращение службы дизайна на территорию завода совпало, к сожалению, со значительным сокращением численности бригады графиков. В тоже время, количество графических работ, как по видам, так и по объемам, постоянно увеличивалось. Поэтому часть графических работ взяли на себя промышленные дизайнеры Е. Сурова и Н. Щербакова. Без использования современного инструментария (САПР-графики) с таким объемом работ было бы немыслимо справиться. Пришедшие в службу молодые специалисты О. Станкова, Е. Баранова, Е. Баев и др., работая с многообразием ставящихся перед ними задач, очень быстро превратились в классных специалистов, а выпускнику “Строгановки” Е. Барановой через год была доверена бригада графиков.

Яркие странички в биографии службы оставили дизайнеры Д. Бабий, Е.Еремеева, Н. Дерюженкова, высококлассный специалист оформитель-график Ю. Сальников, Л. Кондратова и др.

Важнейшей составляющей в проектной работе всех подразделений службы дизайна безусловно является упаковка изделий, футляры, чехлы, ремни и прочие аксессуары (в дальнейшем - упаковка). Являясь составной частью, упаковка должна соответствовать и поддерживать дизайн изделия, обрамлять его.

Поэтому с 1985 года специалисты конструкторского бюро (КБ) упаковки являются неотъемлемой частью творческого коллектива службы.

В КБ упаковки работали первоклассные специалисты: В.Морозов, Н.Салий, О.Полынова, Г.Панкратова, Н.Лунькова, Р.Курдынко и др. Сегодня на смену им пришла молодежь - В.Чугринова и С.Яковлева, которые, имея специализированное образование, быстро адаптировались к сложившимся традициям и увлеченно, творчески работают в коллективе службы, создавая новые виды упаковки.

Работа дизайнеров по созданию новых изделий неразрывно связана с патентованием и регистрацией. На счету дизайнеров завода около 150 свидетельств и патентов на промышленные образцы. Участие в десятках специализированных выставок по дизайну, в т.ч. за рубежом (Бельгия, Германия, Индия, Франция, Югославия, США, Италия, Южная Корея и др.) обязывало принимать меры по защите интеллектуальной собственности завода. В связи с этим необходимо отметить важный вклад патентной службы завода в нашу работу. Профессионализм ее работников является важной составляющей на завершающих этапах проектирования и внедрения дизайн-проектов.

Служба дизайна постоянно участвует в различных дизайнерских форумах, мастер-классах, которые проводятся в рамках Российских общественных организаций по дизайну. На тринадцатой Всероссийской выставке-конкурсе «ДИЗАЙН-2005» – главном профессиональном дизайнерском смотре страны, служба дизайна завода была удостоена Российского национального приза в области дизайна «ВИКТОРИЯ» в номинации «Дизайнерская фирма года». Это событие особенно приятно в связи с тем, что в 2005 году служба дизайна отметила 40-летие со дня своего создания.

В настоящее время служба дизайна пополнилась новыми кадрами, за счет выпускников Строгановки в том числе. Новым руководителем отдела дизайна и рекламных разработок в 2009

году стал Александр Геннадьевич Синельников - специалист, выпускник МВТУ им. Баумана и Национального института дизайна, прошедший школу в службе дизайна. Под его руководством отдел активно продолжает работать над дизайном перспективных оптико-электронных изделий и фотооптики, новых образцов медицинской техники и другой аппаратуры, совершенствовать стиль и качество графических работ, участвовать в профессиональных выставках и конференциях. В 2013 году был положительно принят доклад А.Синельникова на научно-практической конференции «Инновационный потенциал промышленного дизайна России» в рамках Московского Дня Дизайнера в Манеже.

В заключение хочется добавить, что накопленный опыт, традиции, мастерство, профессионализм службы дизайна, достигнутые в тесном контакте с ВНИИТЭ, МОА СД, Российской Академии Художеств, МГХПА им. С.Г.Строганова и другими должны быть сохранены, активно использоваться и совершенствоваться не только в рамках нашего предприятия и Холдинга «Швабе», но и в рамках дорожной карты правительства о развитии инжиниринговых фирм и дизайна. Это может внести неоценимый вклад в дело успешного внедрения в производство инновационной техники, да и в целом в развитие инфраструктуры: инжиниринг, дизайн, производство и потребитель.

Список литературы:

1. Жердев Е.В. Метафора в дизайне: Учебное пособие. Изд.2-ое, перераб. и доп. М.: Архитектура С, 2010.
2. Мазурова Л.А. Красногорский завод им С.А. Зверева. От истоков до дня сегодняшнего. - М.: Спец-Адрес, 2007.
3. Научно-технический центр. Этапы становления и развития. К 60-летию ЦКБ-НТЦ. - М.: Спец-Адрес, 2009.
4. Рунге В.Ф. История дизайна, науки и техники : Учеб. пособие. Книга вторая .- М.: Архитектура-С, 2007.
5. Очерки истории становления государственной системы дизайна. Том 2 / ВНИИТЭ. - М., 2011
6. Титов Е.И. История бренда «Зенит» и его будущее: Научно-технич. журнал «Контенант». - Том 14, номер 2, 2015

ПАМЯТИ ТОМАЛЯ ВЛАДИМИРА СТЕПАНОВИЧА



Открытое акционерное общество «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», Общественная научно-техническая академия «Контенант» с глубоким прискорбием извещают, что 15 октября 2015 года на 60-м году жизни скоропостижно скончался директор открытого акционерного общества «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», кандидат технических наук, доцент, член Президиума Общественной научно-технической академии «Контенант»

ТОМАЛЬ ВЛАДИМИР СТЕПАНОВИЧ

Имя Владимира Степановича широко известно среди предприятий оптического станкостроения и в международном научном сообществе.

В.С. Томаль проработал на предприятии более 37 лет, являлся одним из основоположников в области оптического станкостроения Республики Беларусь.

Им проделана большая организаторская работа по созданию и освоению современного оптико-механического оборудования, прогрессивных технологий, вакуумного оборудования и приборов, внедренных в промышленность во всех странах СНГ и за рубежом.

За весь период трудовой и научной деятельности им было написано 83 научные работы, в том числе 2 монографии, которые публиковались в США, ФРГ, Литве, России, Украине, Беларуси. В.С. Томаль являлся научным руководителем двух научно-технических программ.

Его энергия, эрудиция и трудолюбие, чуткое и внимательное отношение к людям, личная скромность снискали ему заслуженный авторитет среди работников родственных предприятий и организаций Министерства промышленности Республики Беларусь и стран СНГ.

Друзья и коллеги по работе выражают глубокое соболезнование его семье и близким по поводу кончины дорогого нам Владимира Степановича. Светлая память о Владимире Степановиче останется в наших сердцах.

К ЮБИЛЕЮ



Мирумянц Сурен Осипович

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, научный консультант ОАО «НПО ГИПО» Мирумянц Сурен Осипович родился 1 ноября 1925 года в г. Самарканде Узбекской ССР. В 1955 году окончил Узбекский (Самаркандский) государственный университет по специальности «физика».

Свою трудовую деятельность начал в 1944 году. С июля 1956 года работает в Государственном оптическом институте им.С.И.Вавилова, а с июля 1959 года - в Государственном институте прикладной оптики, пройдя трудовой путь от старшего инженера до директора института (1963-1986 гг.), 1986 - 1996 гг. - начальник научного отдела молекулярной спектроскопии и атмосферной оптики, 1996 - 2008 гг. - ученый секретарь, с 2008 года по настоящее время - научный консультант.

Мирумянц Сурен Осипович - основатель Казанской школы молекулярной спектроскопии и атмосферной оптики. Он автор и соавтор 245 научных работ, в том числе 5 монографий, является автором 26 изобретений. Как ученый-наставник он воспитал 10 кандидатов наук, из которых 5 стали впоследствии докторами наук, а 4 - академиками отраслевых академий наук.

За 23 года работы директором института раскрылись выдающиеся организаторские способности Мирумянца С.О., в полной мере проявились его компетентность и ответственность, умение работать с людьми, коллегами и подчиненными. Под его руководством и непосредственном личном участии в институте созданы и получили дальнейшее развитие приоритетные основные направления по созданию инфракрасных тепловизионных приборов для сухопутных войск, авиации и космоса. Выполненные разработки сделали институт одним из крупных научных центров страны и Республики Татарстан в области оптики, оптико-электронного приборостроения и оптических технологий.

За этот период Советской Армией и Военно-Морским Флотом было принято на вооружение 55 комплексов, в создании которых коллектив под руководством Мирумянца С.О. принимал непосредственное участие.

Мирумянц С.О. всегда уделяет внимание молодежи, ее воспитанию на лучших традициях старшего поколения. Его практические советы и конкретное участие в сложных ситуациях помогли многим молодым специалистам обрести уверенность в своих силах и впоследствии твердо идти по избранному пути.

Многогранная научная и общественная деятельность Сурена Осиповича по достоинству оценена государством: он награжден орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Красного Знамени и 11 медалями. Ему присвоены почетные звания «Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан», «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Почетный машиностроитель». Его труд многократно поощрен на уровне министерств и ведомств Республики Татарстан, г. Казани, Советского района, родного предприятия. Он избран членом - корреспондентом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова.

Сурен Осипович пользуется огромным заслуженным уважением и авторитетом в коллективе предприятия, у руководства и специалистов предприятий - разработчиков и изготовителей средств вооружения и военной техники, оптико-электронных приборов, в научном сообществе города Казани и Республики Татарстан.