



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Учредитель и издатель — Общественная академия «Контентант»  
Издается с 2002 г.*

## СОДЕРЖАНИЕ

**Лунин Е.В., Семенов О.Б.**

Разработка нового поплавкового интегрирующего гироскопа уменьшенных габаритов с малым энергопотреблением с увеличенной скоростью наведения для авиационных носителей .....

3

**Абрамов В.А., Ефимов Б.Н., Левичев Е. П.**

Выбор пьезоэлектрической керамики для конструирования малогабаритного пьезодвигателя .....

7

**Власенко С.А., Бездидько С.Н.**

Исследование по созданию двухспектрального тепловизионного объектива на диапазон спектра излучения 3-5 мкм, 8-12 мкм ..

13

**Жубаев К.Г., Лосев Р.П., Сауткин В.А.**

Разработка и исследование метода полуавтоматического обнаружения и измерения координат космических объектов со слабым блеском .....

22

**Модель С.С., Эборовский А.А.**

Компактный тактико-разведывательный комплекс на базе лазерного дальномера .....

28

**Анучин Р.Н., Калашников С.Д., Кочешков М.А.,****Балин Д.С.**

Проектирование процессорного модуля блока управления аппаратурой среднего пространственного разрешения для космического аппарата «Обзор-О» .....

36

**Курбатов С.И., Никулин А.В., Ворона Ю.В., Сеник Б.Н.**

Оптимизация выбора материала для изготовления прецизионных крупногабаритных зеркал .....

43

**Воевода А.Н., Кречмер Г.А., Петренко В.Н**

Разработка защитных стекол прибора управления оптико-электронной системы для перспективного самолета .....

47

**Воеводский А.И., Тышкунов Н.В.**

Обработка гиперспектральных данных .....

55

**Грубенко А.Д., Архипов С.А.**

Обзор перспективного гиперспектрометра. Основные характеристики оптикомеханической системы и её конструктивные особенности .....

64



## СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

<b>Сметанин А.С., Шишов Г.И.</b>	
Конструирование и проектирование опорно-поворотных плат- форм для обзорно-прицельных комплексов противовоздуш- ной обороны .....	70
<b>Ворона Ю.В., Сеник Б.Н.</b>	
Современные тенденции в метрологии измерения выходных параметров объективов .....	75
<b>Калашников С.Д., Кочешков М.А., Анучин Р.Н.,</b> <b>Комиссаров А.В.</b>	
Оптимизация и рационализация схемотических решений для модулей системы оптико-механической .....	81
<b>Ремень Б.А., Токан М.И., Байков А.В.</b>	
Проектирование технологической среды, включая элементы програмно-реализованного функционального обеспечения , для комплекса алгоритмов планирования работы оптико- электронных средств в сложных астроклиматических услови- ях .....	89
<b>Никулин А.В., Сеник Б.Н.</b>	
Эксцентрический объектив для оптико-электронного комплекса дистанционного зондирования земли .....	98
<b>Кочешков М.А., Балин Д.С.</b>	
Разработка электронных блоков системы управления аппаратуры среднего разрешения для космического аппарата «Обзор-О»	103
<b>Ефимов Б.Н., Мирохин Е.А.</b>	
Разработка конструкции малогабаритного пьезоэлектрического двигателя для привода цифрового аэрофотоаппарата АК-113	114
<b>Сигачёв И.С., Таболин Д.Б.</b>	
Разработка системы стабилизации и наведение гировстабилиза- тора, предназначенного для установки в преспективный самолет-штурмовик, на основе анализа существующих гиро- стабилизаторов и гиростабилизаторов, используемых в анало- гичных авиационных изделиях в РФ и за рубежом .....	119

**«РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ  
РАЗРАБОТОК В ИНТЕРЕСАХ ВОЙСК  
ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОЙ ОБОРОНЫ»**

---

---

**РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОПЛАВКОВОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО  
ГИРОСКОПА УМЕНЬШЕННЫХ ГАБАРИТОВ С МАЛЫМ  
ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ С УВЕЛИЧЕННОЙ СКОРОСТЬЮ  
НАВЕДЕНИЯ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ**

ЛУНИН Е.В. - оператор научной роты войск ВКО,  
СЕМЕНОВ О.Б. - начальник отдела НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*На примере конкретной технической задачи рассмотрен способ уменьшения габаритов прибора, его энергопотребления и увеличения скорости наведения. Проведен анализ характеристик авиационных моментных двигателей. Предложен тип моментного двигателя гироскопа с целью реализации необходимых требований; эскизный проект поплавкового интегрирующего гироскопа, моментного двигателя, технологической оснастки для его изготовления и технологического приспособления для проверки двигателя.*

Применение поплавкового интегрирующего гироскопа обосновано его малой постоянной времени, интегрированием входного сигнала и устойчивостью к ударным, вибрационным и другим возмущающим воздействиям [1].

За основу взят поплавковый интегрирующий гироскоп, применяющийся в изделиях "Тепловизионная прицельная подсистема "Зарево" и "Оптико-электронная прицельная система "Шквал" производства ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" (ОАО КМЗ).

Проблема уменьшения габаритных параметров гироскопа, его энергопотребления и увеличения скорости наведения главной оси может быть решена заменой моментного двигателя прибора.

В данном гироскопе в качестве моментного двигателя применяется асинхронный ферромагнитный двигатель с медным покрытием (АДФМ). Для достижения требуемых характеристик прибора предлагается заменить данный двигатель на двигатель постоянного тока на постоянных магнитах.

Технические характеристики типов этих двига-

**Таблица 1.**  
**Сравнительная характеристика двигателя АДФМ**  
**и двигателя постоянного тока на постоянных магнитах**

Двигатель типа АДФМ	Двигатель постоянного тока на постоянных магнитах
Ток потребления при максимальном моменте – 2А в каждой фазе	Питание постоянным током не более 1А
Скорости наведения гироскопа (при использовании гиromотора ГМА-4) до 10,4°/с	Скорость наведения гиростабилизатора не менее 20°/с
Большие габариты, электромагнитная постоянная времени, момент инерции ротора при малом КПД	Малые габариты, момент инерции ротора, меньшая электромагнитная постоянная времени по сравнению с АДФМ

телей при использовании гиromотора ГМА-4 производства ОАО "Мичуринский завод "Прогресс" в гироскопе сведены в табл.1.

Из сравнительного анализа видно, что применение двигателя постоянного тока на постоянных магнитах снижет энергопотребление прибора в 3 раза, увеличивает скорость наведения минимум в 2 раза по сравнению с АДФМ. Также двигатель постоянного тока имеет меньшие габариты, что удовлетворяет цели поставленной задачи.

Предлагается эскизный проект двигателя постоянного тока на постоянных магнитах, статор и ротор которого изображены на рисунках 1 и 2, соответственно.

Магниты статора предложено выполнить из редкоземельного сплава КС37. Магниты на основе

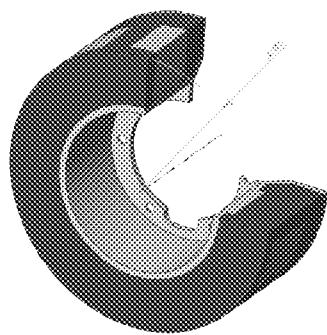
сплава КС 37 имеют достаточно большой рабочий температурный диапазон от минус 60°C до плюс 160°C, высокую коэрцитивную силу по намагниченности 1300 кА/м и высокую коэрцитивную силу по индукции 540 кА/м [2].

В результате расчета данного двигателя были получены значения индукции в рабочем зазоре, врачающий момент, действующий на подвижные катушки ротора [3] соответственно:

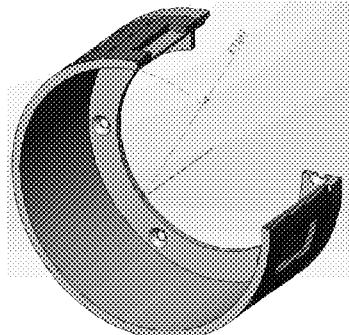
$$B = 0,25 \text{ тл}; \\ M_{\text{вр}} = 1657 \text{ гсм.}$$

Вращающий момент обеспечивает скорость наведения гироскопа 24°/с.

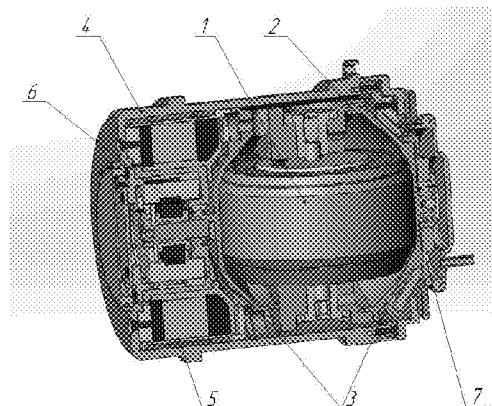
Полученные расчетные данные удовлетворяют техническому заданию на гиростабилизатор.



**Рисунок 1.**  
**Статор момента двигателя**



**Рисунок 2.**  
**Ротор момента двигателя**



**Рисунок 3.**  
**Поплавковый интегрирующий гироскоп**

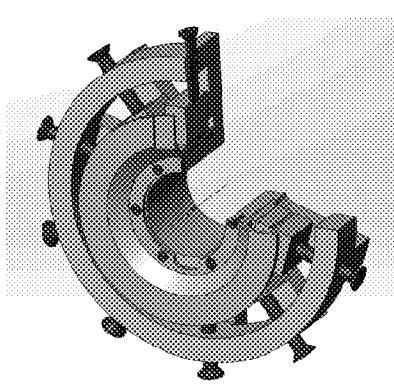


Рисунок 4.

Технологическая оснастка для склейки магнитов и обоймы момента двигателя

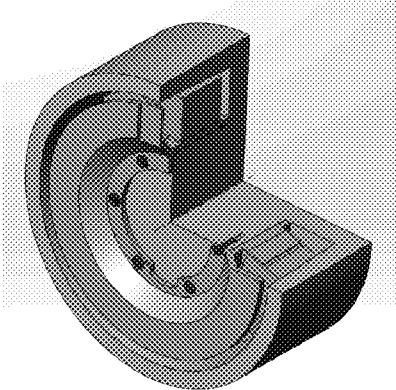


Рисунок 5.

Технологическая оснастка для заливки статора моментного двигателя компаундом горячего отвержения

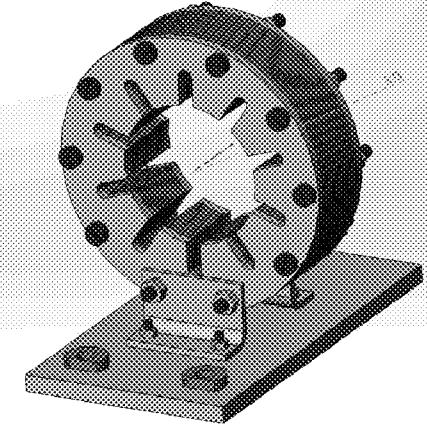


Рисунок 6.

Индуктор для намагничивания статора момента двигателя гироскопа

Предлагается эскизный проект поплавкового интегрирующего гироскопа в компоновке с новым моментным двигателем, который представлен на рис. 3.

Поплавковый интегрирующий гироскоп состоит из: ротора 1, установленного в рамку-поплавок 2, ось вращения которого установлена в подшипниках 3, расположенных в корпусе прибора 4. Зазор между корпусом прибора и поплавком заполнен жидкостью с большой вязкостью. Указанная система образует жидкостный подвес. Для компенсации температурного расширения жидкости служит сильфон 7. На оси вращения поплавка расположены датчик угла 6 и датчик момента 5.

Для приклеивания магнитов к обойме и заливки статора момента двигателя компаундом горячего отвержения предлагается использовать технологическую оснастку, эскиз которой представлен на рис. 4 и рис. 5, соответственно.

Применение оснастки данной конструкции обеспечивает склейку и фиксацию магнитов на необходимой точности.

Применение компаунда горячего отвержения исключает повреждения магнитов при последующей обработке статора момента двигателя.

Для намагничивания постоянного магнита предлагается использовать установку импульсного намагничивания - индуктор, конструкция которого показана на рис. 6 (проводы не показаны).

Намагничивание магнитов момента двигателя

производится при собранном статоре двигателя с использованием магнитопровода.

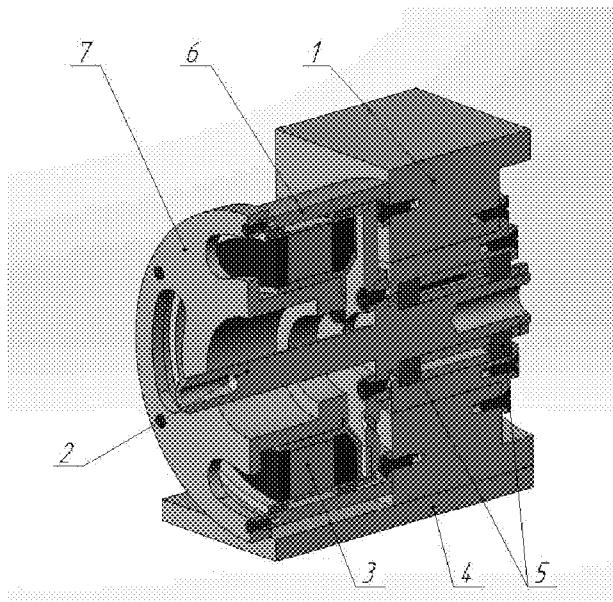
Для экспериментальной проверки значения индукции в рабочем зазоре и врачающего момента двигателя предложено разработать приспособление, эскизный проект которого представлен на рис. 7.

Внутри корпуса 1, расположенного на основании 4 в подшипниковой опоре 5 расположена ось 2 приспособления. С помощью переходного фланца к оси приспособления крепится ротор момента двигателя 3. Статор момента двигателя 3 расположен на фланце 7, который жестко закреплен на корпусе приспособления с помощью магнитопровода 6. Конструкция приспособления обеспечивает рабочее положение момента двигателя.

Бобовидные отверстия во фланце 7 открывают доступ к зазору между статором и ротором момента двигателя для измерения магнитной индукции в воздушном зазоре.

В результате проделанной работы спроектирован моментный двигатель поплавкового интегрирующего гироскопа, а также технологические приспособления для его изготовления и испытания, разработан эскизный проект нового поплавкового интегрирующего гироскопа.

Разработанный двигатель обеспечивает скорость наведения гироскопа  $24^\circ/\text{с}$ , снижает энергопотребление до 1А постоянного тока и уменьшает габариты изделия. Также применение двигателя



*Рисунок 7.  
Приспособление для проверки моментного  
двигателя гироскопа*

постоянного тока на постоянных магнитах обусловлено сравнительно низкой стоимостью изготовления по сравнению с асинхронным двигателем ферромагнитным с медным покрытием.

Расчетные технические характеристики разрабатываемого двигателя удовлетворяют требованиям технического задания на гиростабилизатор.

*Список литературы:*

1. Расчет и проектирование гироскопических стабилизаторов - *Д.С. Пельпор, Ю.А. Колосов, Е.Р. Рахтейенко*, Москва "Машиностроение", 1972 г.
2. Материалы в приборостроении и автоматике. Справочник. Второе издание, переработанное и дополненное. Под ред. д-ра техн. Наук проф. Ю. М. Пятинина. Москва "Машиностроение" 1982 г.
3. Детали и узлы авиационных приборов и их расчет. Издание второе, переработанное и дополненное. *Б.А. Асс, Н.М. Жукова, Е.Ф. Антипов* под ред. "Машиностроение", Москва, 1966 г.

# ВЫБОР ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЬЕЗОДВИГАТЕЛЯ

АБРАМОВ В.А. - оператор научной роты войск ВКО,  
ЕФИМОВ Б.Н. - оператор научной роты войск ВКО,  
ЛЕВИЧЕВ Е. П. - ведущий инженер-электрик сектора НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эвереева"

Пьезодвигатель - двигатель, в котором рабочим элементом является пьезоэлектрическая керамика, благодаря которой он способен преобразовать электрическую энергию в механическую с очень большим КПД. Это позволяет получать уникальные приборы, в которых электрические колебания прямо преобразуются во вращательное движение ротора, при этом крутящий момент, развиваемый на валу такого двигателя столь велик, что исключает необходимость применения какого-либо механического редуктора для повышения крутящего момента.

## ВВЕДЕНИЕ

Параметры пьезоэлектрического двигателя напрямую зависят от параметров используемой пьезоэлектрической керамики. Российские производители пьезокерамики ОАО "НИИ "ЭЛПА", ООО "Аврора-ЭЛМА" и APC International Ltd (дистрибутор - группа компаний "Симметрон") предлагают широкий спектр пьезокерамики для различных применений. Целью анализа пьезокерамики был подбор пьезокерамики наиболее подходящей для конструирования малогабаритного пьезодвигателя для приводов цифрового аэрофотоаппарата АК-113.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОБОЗНАЧЕНИЯ

В данной работе было проведено сравнение известных пьезоматериалов, подходящих для конструирования мощных актюаторов. Сравнение проводилось по известным параметрам, приведенным в табл. 1. Наиболее решающим параметром для миниатюрного пьезодвигателя являются пьезоэлектрические модули и механическая добротность пьезоматериала, влияющие на минимальное перемещение создаваемое пластиной анализируемого пьезоматериала. А также не маловажны габариты актюаторов.

Пьезоэлектрический модуль  $d_{ij}$  - это величина генерируемого заряда (поляризации) на единицу механического давления, приложенного к пьезоэлектрическому материалу или - это величина механической деформации пьезоэлектрического материала на единицу напряженности приложенного электрического поля.

$d_{33}$  - наведенная поляризация в направлении 3 (параллельно оси поляризации) на единицу механического давления, приложенного в направлении 3 или величина деформации в направлении 3 на единицу напряженности электрического поля, приложенного в направлении 3 (рис. 1).

$d_{31}$  - наведенная поляризация в направлении 3 (параллельно оси поляризации) на единицу механического давления, приложенного в направлении 1 (перпендикулярно оси поляризации) или величина деформации в направлении 1 на единицу напряженности электрического поля, приложенного в направлении 3 (рис. 2).

$d_{15}$  - наведенная поляризация в направлении 1 (перпендикулярно оси поляризации) на единицу сдвигового механического давления, приложенного в направлении 2 (перпендикулярно оси

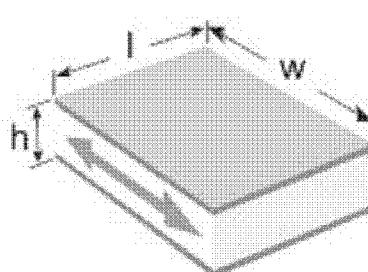
*Таблица 1.*  
Основные параметры пьезоматериала

<b>Условные обозначения</b>	
$T_k$	Температура точки Кюри;
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 \epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	Относительная диэлектрическая проницаемость;
$\operatorname{tg} \delta$	Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях при $E=25$ кВ/м;
$\operatorname{tg} \delta_c$	Тангенс угла диэлектрических потерь в сильных полях при $E=300$ кВ/м;
$Q_m$	Механическая добротность;
$c$	Скорость звука;
$\sigma_p$	Планарный коэффициент Пуассона;
<b>Коэффициент электромеханической связи:</b>	
$k_p$	Планарной моды;
$k_{15}$	Сдвиговой моды;
$k_{33}$	Моды растяжения-сжатия по толщине;
$d_{31}, d_{33}, d_{15}$	Пьезоэлектрические модули;
$g_{31}, g_{33}$	Электрические константы по напряжению (чувствительность в режиме приема);
<b>Относительное отклонение частоты(ООЧ) в интервале температур -60...+85°C</b>	
$T_{\text{раб}}$	Рекомендуемая повышенная температура;
$\rho_v$	Удельное объемное электрическое сопротивление;
$\rho$	Плотность.

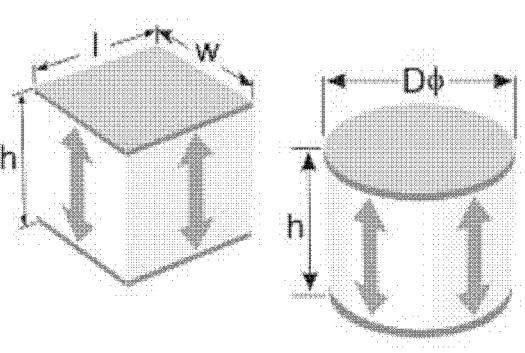
поляризации) или величина частичной деформации в направлении 2 на единицу напряженности электрического поля, приложенного в направлении 1 (рис. 3).

Механическая добротность  $Q_m$  - количественная характеристика резонансных свойств колебательных систем, указывающая во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе

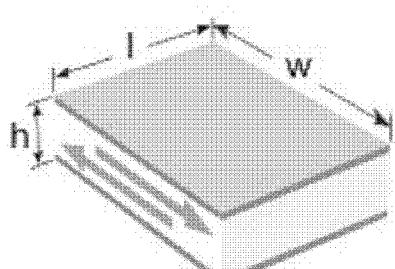
Тонкий бруск,  $l > 4w$ ,  $w > h$



*Рисунок 2.*  
Растяжение - сжатие по длине



*Рисунок 1.*  
Растяжение - сжатие по длине



*Рисунок 3.*  
Сдвиг по толщине

превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте много ниже резонансной при одинаковой амплитуде возбуждающей силы.

Перемещение пластины находится по формуле (1), взятой из источника [1]:

$$\Delta x = Us \times |d_{jj}| \quad (1)$$

где  $\Delta x$  - изменение толщины пластины, (м)

$Us$  - приложенное напряжение, (В).

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Параметры анализируемых материалов, приведенные в табл. 2, взяты с сайтов производителей [2,3,4]. Кроме того представленные материалы сравниваются с многослойным пьезоактоатором АПМ-2-7-М (рис. 4), обладающего значительным минимальным шагом  $\Delta x = 14 \pm 15\%$  мкм



Рисунок 4.

Конструкторское исполнение АПМ-2-Н-М

(табл. 3) и подходящего для использования в оптико-механических устройствах.

Рассчитаем минимальное перемещение, создаваемое пьезопластиной для всех материалов указанных в табл. 2, используя среду Mathcad 15. Подаваемое напряжение примем равным 400 Вольт.

Таблица 2.  
Таблица основных параметров анализируемых материалов

Параметры	Единица измерения	Материал						
		ЦТС 842/840	ЦТС 844/841	ЦТС 23	ЦТБС 7	ЦТБС 8	ЦТС 43	ЦТС 48
T <sub>k</sub>	°C	325	320	280	210	290	280	210
ε <sup>T</sup> <sub>33</sub> /ε <sub>0</sub>	-	1375/1250	1500/1350	1000	1620	1400	1400	2200
ε <sup>T</sup> <sub>11</sub> /ε <sub>0</sub>	-	-	-	1200	2250	-	-	-
tg δ	10 <sup>-2</sup>	0,45/0,4	0,4/0,35	0,7	1,0	0,4	0,6	0,8
tg δ <sub>c</sub>	10 <sup>-2</sup>	-	-	3,0	3,5	1	1,7	2
Q <sub>m</sub>	-	600/500	1500/1400	300	350	1120	1100	450
c	10 <sup>3</sup> м/с	3	3	3,3	3,1	3,2	3,2	3,2
σ <sub>p</sub>	-	-	-	0,33	0,28	-	0,33	0,37
k <sub>p</sub>	-	0,65/0,69	0,68/0,6	0,5	0,56	0,56	0,52	0,58
k <sub>15</sub>	-	0,7	0,67	0,6	0,66	-	-	-
k <sub>33</sub>	-	0,48/0,72	0,48/0,86	0,65	0,68	0,68	0,64	0,65
d <sub>31</sub>	-10 <sup>-12</sup> Кл/Н	125	109	120	140	140	125	-180
d <sub>33</sub>	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	300/290	300/300	240	330	315	280	420
d <sub>15</sub>	10 <sup>-12</sup> Кл/Н	480	450	365	575	-	-	-
g <sub>31</sub>	-10 <sup>-3</sup> В*м/Н	11	10,5	13,6	9,8	11,3	10,1	9,3
g <sub>33</sub>	10 <sup>-3</sup> В*м/Н	26,3/26,5	24,5/25,5	27,1	23	25,4	22,6	21,6
T <sub>раб</sub>	°C	162	160	150	150	200	200	120
ρ <sub>v</sub>	При 100°C, 10 <sup>8</sup> , Ом*м	-	-	5	5	5	5	5
ρ	10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	7,6/7,6	7,7/7,6	7,6	7,3	7,6	7,5	7,5

*Таблица 3.*  
*Таблица основных параметров многослойного пьезоактиоатора АПМ-2-Н-М*

Параметр	Тип актиоатора			
	АПМ-2-7-М	АПМ-2-11-М	АПМ-2-15-М	АПМ-2-22-М
Масса, г, не более	6,5	9,6	12,7	18,8
Кол-во элементов, N *	7	11	15	22
L, мм	20	31	41	61
Максимальное перемещение, мкм	14±15%	22±15%	30±15%	44±15%
Статическая ёмкость, мкФ	3,0±20%	6,0±20%	7,0±20%	10,0±20%
Сопротивление изоляции, МОм, не менее	5,0	2,0	1,5	1,0
Тангенс угла диэлектрических потерь, отн. ед., не более	0,04	0,04	0,04	0,04

## ЦТС 842/840

$$d_{31} := -125 \cdot 10^{-12} \quad d_{33} := 300 \cdot 10^{-12} \quad d_{15} := 480 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 5 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.2 \times 10^{-7} \quad \Delta x_{15} := U \cdot |d_{15}| = 1.92 \times 10^{-7}$$

## ЦТС 844/841

$$d_{31} := -109 \cdot 10^{-12} \quad d_{33} := 300 \cdot 10^{-12} \quad d_{15} := 450 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 5 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.2 \times 10^{-7} \quad \Delta x_{15} := U \cdot |d_{15}| = 1.92 \times 10^{-7}$$

## ЦТС 23

$$d_{31} := -120 \cdot 10^{-12} \quad d_{33} := 240 \cdot 10^{-12} \quad d_{15} := 365 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 4.8 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 9.6 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{15} := U \cdot |d_{15}| = 1.46 \times 10^{-7}$$

## ЦТБС 8

$$d_{31} := -140 \cdot 10^{-12} \quad d_{33} := 315 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 5.6 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.26 \times 10^{-7}$$

## ЦТБС 7

$$d_{31} := -140 \cdot 10^{-12} \quad d_{33} := 330 \cdot 10^{-12} \quad d_{15} := 575 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 5.6 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.32 \times 10^{-7} \quad \Delta x_{15} := U \cdot |d_{15}| = 2.3 \times 10^{-7}$$

## ЦТС 43

$$d_{31} := -125 \times 10^{-12} \quad d_{33} := 280 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 5.6 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.68 \times 10^{-7}$$

## ЦТС 48

$$d_{31} := 180 \times 10^{-12} \quad d_{33} := 420 \cdot 10^{-12} \quad U := 400$$

$$\Delta x_{31} := U \cdot |d_{31}| = 7.2 \times 10^{-8} \quad \Delta x_{33} := U \cdot |d_{33}| = 1.68 \times 10^{-7}$$

Продольные перемещения пластин выражаются показателями  $\Delta x_{31}$  и  $\Delta x_{33}$ , но нужно перевести значения из метров в микрометры, для этого умножим на 106. Получим следующие значения: ЦТС 842/840:  $\Delta x_{31}=0,05$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,12$  (мкм);

ЦТС 844/841:  $\Delta x_{31}=0,05$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,12$  (мкм); ЦТС 23:  $\Delta x_{31}=0,048$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,096$  (мкм); ЦТБС 8:  $\Delta x_{31}=0,056$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,126$  (мкм); ЦТБС 7:  $\Delta x_{31}=0,056$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,132$  (мкм); ЦТС 43:  $\Delta x_{31}=0,056$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,168$  (мкм); ЦТС 48:  $\Delta x_{31}=0,072$  (мкм),  $\Delta x_{33}=0,168$  (мкм).

Примем количество пластин  $n=10$  и определим максимально возможное перемещение, для этого умножим перемещение пластины  $\Delta x_{31}$   $\Delta x_{33}$  на  $n=10$ , с учетом погрешности (15%):

ЦТС 842/840:  $\Delta x_{31}=0,5 \pm 15\% \approx 0,6$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,2 \pm 15\% \approx 1,4$  (мкм);

ЦТС 844/841:  $\Delta x_{31}=0,5 \pm 15\% \approx 0,6$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,2 \pm 15\% \approx 1,4$  (мкм);

ЦТС 23:  $\Delta x_{31}=0,48 \pm 15\% \approx 0,6$  (мкм),

$\Delta x_{33}=0,96 \pm 15\% \approx 1,1$  (мкм);

ЦТБС 8:  $\Delta x_{31}=0,56 \pm 15\% \approx 0,65$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,26 \pm 15\% \approx 1,5$  (мкм);

ЦТБС 7:  $\Delta x_{31}=0,56 \pm 15\% \approx 0,65$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,32 \pm 15\% \approx 1,55$  (мкм);

ЦТС 43:  $\Delta x_{31}=0,56 \pm 15\% \approx 0,65$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,68 \pm 15\% \approx 2$  (мкм);

ЦТС 48:  $\Delta x_{31}=0,72 \pm 15\% \approx 0,85$  (мкм),  $\Delta x_{33}=1,68 \pm 15\% \approx 2$  (мкм).

Как видно из диаграммы (рис. 5) по максимальному перемещению (шагу) многослойный пьезоактуатор АПМ-2-7-М во много раз превосходит

показатели всех остальных многослойных пьезоматериалов. При этом его длина составляет всего 20 мм, что позволяет уменьшить габариты конструируемого пьезодвигателя. АПМ-2-7-М обладает такими параметрами благодаря специальному пьезокерамическому материалу ЦТС-46 с низкой температурой спекания.

Но есть некоторые особенности эксплуатации данного актиоатора, которые необходимо учитывать при проектировании пьезодвигателя:

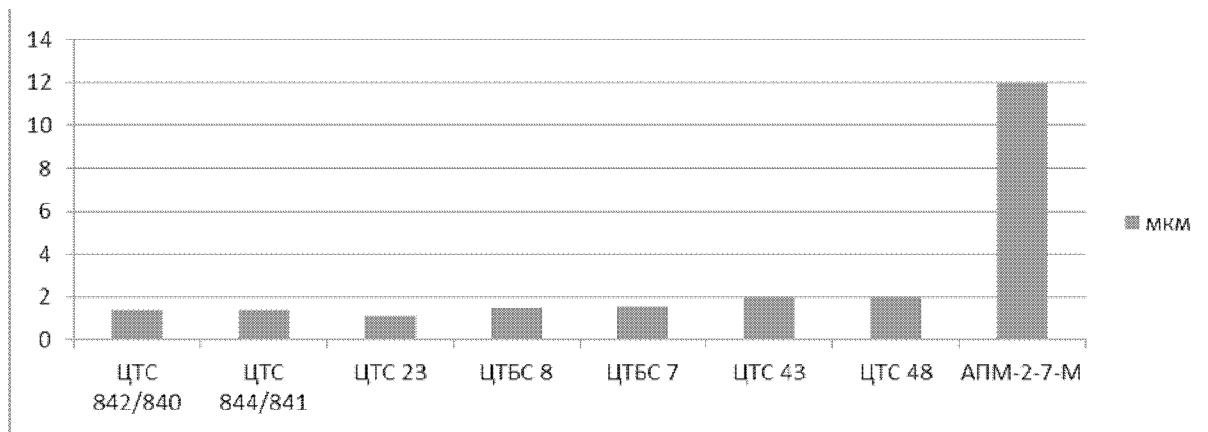
- Актиоаторы рекомендуется жестко устанавливать на базовую поверхность при помощи kleевого соединения. При установке следует избегать усилий растяжения, изгиба и скручивания. Центр оси перемещения должен совпадать с центром оси механической нагрузки.

- При установке актиоатора в конструктивное гнездо между его боковыми поверхностями и конструктивными стенками, соприкасающимися с боковыми поверхностями актиоатора, рекомендуется устанавливать прокладку из фторопластовой ленты (типа фторопласт-3).

- При подключении актиоаторов строго соблюдать полярность включения. При подаче на положительный вывод минус 25 В актиоатор выходит из строя. Выводы актиоатора рекомендуется шунтировать диодом, включенным во встречном направлении.

- Расчетное значение блокирующего усилия актиоаторов  $\geq 1200$  Н.

- Актиоаторы имеют низкое значение прочности на растяжение, которое может привести к его расслоению и выходу из строя. Актиоаторы рекомендуется использовать в условиях пред-



*Рисунок 5.  
Диаграмма сравнения максимального шага пьезоактюаторов*

варительного поджатия силой не менее 350 Н.

- В процессе любой операции рекомендуется закорачивать актюаторы, так как любые механические нагрузки приводят к образованию на их электродах заряда.

Чтобы рассчитать скорость перемещения  $V$  рабочего тела малогабаритного пьезодвигателя, рабочим элементом которого является пьезоактюаторы АПМ-2-7-М, примем частоту  $V = 200 \text{ Гц}$  при напряжении  $U=100 \text{ В}$  пьезопластина АПМ-2-7-М дает перемещение  $\Delta_x = 14 \pm 15\% \text{ мкм}$ .

$$V = \Delta_x \times V = 14 \times 200 = 280 \text{ (мкм)} \quad (2)$$

Скорость перемещения рабочего тела пьезодвигателя  $V=2800 \text{ мкм/с} = 2,8 \text{ мм/с}$ , что вполне приемлемо для точной наводки приводов цифрового аэрофотоаппарата. Но при увеличении амплитуды напряжения  $U$  можно добиться и более значительного перемещения, так при  $U=400 \text{ В}$  пьезопластина АПМ-2-7-М дает перемещение  $\Delta_x=56 \pm 15\% \text{ мкм}$ . Тогда скорость перемещения пьезодвигателя  $V=11200 \text{ мкм/с} = 11,2 \text{ мм/с}$ , что уже больше требуемой скорости перемещения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа в качестве рабочего тела для малогабаритного пьезодвигателя для приводов цифрового аэрофотоаппарата был выбран многослойный актюатор АПМ-2-7-М. Он обладает компактными габаритами и достаточным максимальным перемещением. Для регулирования скорости перемещения рабочего тела конструируемого пьезодвигателя будет использоваться блок регулирования управляющего импульса. Который в зависимости от задачи будет задавать требуемую частоту и амплитуду управляющего напряжения.

### Список литературы:

1. Смирнов А.Б. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами - СПб.: Государственный политехнический университет, 2003.
2. <http://www.elpapiezo.ru/> - сайт компании ОАО "ЭЛПА".
3. <http://www.symmetron.ru/> - сайт группы компаний "Симметрон".
4. <http://www.avrora-elma.ru/> - сайт компании ООО "Аврора-ЭЛМА".

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПО СОЗДАНИЮ ДВУХСПЕКТРАЛЬНОГО ТЕПЛОВИЗИОННОГО ОБЪЕКТИВА НА ДИАПАЗОН СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ 3-5 мкм, 8-12 мкм

ВЛАСЕНКО С.А. - оператор научной роты войск ВКО,

БЕЗДИДЬКО С.Н. - доктор технических наук

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

В статье описан анализ используемых спектральных диапазонов и рассмотрены значения относительной ширины при различном объединении отдельных диапазонов. Проведено исследование по поиску оптических материалов, включая кристаллические и поликристаллические материалы, прозрачных в широкой области спектра 3-12 мкм и определена номенклатура материалов с требуемыми оптическими и эксплуатационными характеристиками. Описан выбор оптимальных комбинаций материалов, обеспечивающих разработку линзовых и зеркально-линзовых объективов с одновременной aberrационной коррекцией в двух спектральных диапазонах.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития комплексов наблюдения и управления требует создания оптико-электронной аппаратуры, обеспечивающей максимальную информативность в различных условиях, днем и ночью. Решение этой проблемы возможно лишь на основе оптико-электронных приборов, работающих в различных диапазонах спектра оптического излучения одновременно и объединением нескольких оптических трактов в единой комплексированной оптической схеме. Интегрирование оптико-электронной аппаратуры обеспечивает повышение эффективности в сложных эксплуатационных условиях за счет совместного использования информации, получаемой от различных каналов комплексированной оптической системы. При этом эффективность оптико-электронной аппаратуры оказывается существенно выше эффективности каждого из каналов в отдельности.

Ключевой проблемой при разработке интегрированных оптико-электронных приборов является

создание общей оптической системы, обеспечивающей объединение информационных оптических трактов в единой комплексированной оптической схеме, и ее представление оператору в виде интегрированного изображения на общий дисплей. Необходимо отметить, что у нас в стране до настоящего времени проблема создания интегрированных оптических систем не решена, а в небольшом количестве существующих интегрированных изделий оптико-электронной, аппаратуры объединяются каналы, работающие в близких спектральных областях (тепловизор и дальномер на лазере СО<sub>2</sub>, визуальный и телевизионный каналы) [3].

Указанное обстоятельство определяется тем, что не разработана в полной мере концепция построения общей оптической системы, обеспечивающей интегрирование отдельных информационных каналов, работающих в различных областях спектра [5].

Целью данной статьи является поиск и выработка рекомендаций по созданию элементной базы на

новых оптических материалах, прозрачных в широкой области спектра 3-14 мкм и обеспечивающих оптимальное построение комплексированных оптических систем с учетом оптомеханических, технологических и эксплуатационных ограничений.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Выбор и оптимизация рабочих спектральных диапазонов оптико-электронной аппаратуры практически всегда является самым сложным вопросом ее создания. Это обусловлено отсутствием необходимой для надежного выбора априорной информации, а ошибка, как правило, не может быть устранена при отработке в ходе и по результатам натурных испытаний.

Анализ современных тенденций развития оптико-электронной аппаратуры показывает, что практическое использование нашли четыре спектральных диапазона:

- видимый 0.4 -0.7 мкм;
- ближний ИК 0.6-1.1 мкм;
- тепловизионный 1 (средний ИК) 3-5 мкм;
- тепловизионный 2 ( дальний ИК) 8-12 мкм.

Для оценки сложности построения оптических схем в заданном спектральном диапазоне полезно ввести понятие относительной ширины спектрального диапазона в виде

$$\Delta\lambda_o = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\lambda_{cp}},$$

$$\text{где } \lambda_{cp} = (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})/2.$$

Относительная ширина указанных выше четырех спектральных диапазонов равна

- видимый - 0.55
- ближний ИК - 0.59
- тепловизионный 1 - 0.5
- тепловизионный 2 - 0.4

При объединении отдельных спектральных диапазонов величина относительной ширины интегрированного спектрального диапазона значительно увеличивается, что наряду с другими факторами приводит к значительному усложнению разработки оптических каналов интегрированных оптико-электронных приборов. Так, при объединении средней и дальней ИК-областей спектра относительная ширина интегрированного тепловизионного диапазона будет равна 1.2, что более чем в два раза увеличивает ее ширину по сравнению с любым отдельным спектральным диапазоном. В табл. 1 приведены значения относительной ширины интегрированных спектральных диапазонов при различном объединении отдельных диапазонов [4].

*Таблица 1.  
Относительная ширина интегрированных спектральных диапазонов*

Спектральный диапазон, мкм	0.4-0.7	0.6-1.1	3-5	8-12
Относительная ширина спектрального диапазона	0.55	0.59	0.5	0.4
	0.93		1.2	
	1.7		-----	
	-----	1.57		-----
	-----	1.81		
	1.87			

**Оптические материалы, прозрачные в широкой области спектра 3-12 мкм**

**Таблица 2.**  
**Оптических материалов, включая кристаллические и поликристаллические**  
**материалы, прозрачных в широкой области спектра 3-12 мкм**

№	Материал	Тип материала	Источник данных
1	KI	оптический кристалл	Интернет
2	KCl	оптический кристалл	<a href="http://www.crystran.co.uk/optical-materials">http://www.crystran.co.uk/optical-materials</a>
3	KBr	оптический кристалл	Интернет
4	Ge	синтетический моноцисталл (полупроводник)	Интернет
5	CsI	оптический кристалл	<a href="http://www.crystran.co.uk/optical-materials">http://www.crystran.co.uk/optical-materials</a>
6	AgCl	оптический кристалл	Интернет
7	CsBr	оптический кристалл	Интернет
8	ZnS(multispectral)	оптический поликристалл	Интернет
9	ZnSe	оптический поликристалл	<a href="http://www.crystran.co.uk/optical-materials">http://www.crystran.co.uk/optical-materials</a>
10	NaF	оптический кристалл	Интернет
11	CdSe		Infrared.agf
12	GaAs	синтетический моноцисталл (полупроводник)	Infrared.agf (Amtir Spec Sheet)
13	NaCl	оптический кристалл	Интернет
14	KRS-5	оптический кристалл	<a href="http://www.crystran.co.uk/optical-materials">http://www.crystran.co.uk/optical-materials</a>
15	KRS-6	оптический кристалл	<a href="http://www.crystran.co.uk">http://www.crystran.co.uk</a>
16	Silicon	синтетический моноцисталл (полупроводник)	Infrared.agf (Handbook of Optics Vol.II)
17	ИКС-25	оптическое бескислородное стекло	Интернет ( <a href="http://glassbank.ifmo.ru">http://glassbank.ifmo.ru</a> )
18	ИКС-28	оптическое бескислородное стекло	Интернет ( <a href="http://glassbank.ifmo.ru">http://glassbank.ifmo.ru</a> )

На этом этапе было проведение исследование по поиску оптических материалов, включая кристаллические и поликристаллические материалы, прозрачных в широкой области спектра 3-12 мкм и определена номенклатура материалов с требуемыми оптическими и эксплуатационными характеристиками.

В результате проведенного исследования было отобрано 18 ИК-материалов [1]. Список материалов с указанием источника данных по каждому материалу представлен в табл. 2.

Для аппроксимации исходных данных  $n(\lambda)$  в среде Zemax для каждого материала использовалась одна из приведенных ниже дисперсионных формул:

а) дисперсионная формула Шотта (Schott)

$$n^2 = \alpha_0 + \alpha_1 \lambda^2 + \alpha_2 \lambda^{-2} + \alpha_3 \lambda^{-4} + \alpha_4 \lambda^{-6} + \alpha_5 \lambda^{-8} \quad (1)$$

б) дисперсионная формула Зельмейера (Sellmeier 1)

$$n^2 - 1 = \frac{K_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1} + \frac{K_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2} + \frac{K_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3} \quad (2)$$

в) дисперсионная формула Герцбергера (Herzberger)

$$n = A + BL + CL^2 + D\lambda^2 + E\lambda^4 + F\lambda^6$$

$$L = \frac{1}{\lambda^2 - 0.028} \quad (3)$$

Выбор дисперсионной формулы был обусловлен

минимизацией величин среднеквадратической ошибки и максимальной ошибки между исходными данными и новыми данными, рассчитанными с использованием полученных в результате подгонки числовых коэффициентов для используемой формулы [2].

Рассчитанные показатели преломления для основной ( $\lambda_0 = 8 \text{ мкм}$ ) и крайних длин волн ( $\lambda_1 = 3 \text{ мкм}$ ,  $\lambda_2 = 12 \text{ мкм}$ ), а также коэффициенты дисперсии и коэффициенты относительной дисперсии для каждого материала приведены в табл. 3.

Коэффициент дисперсии рассчитан по формуле:

$$\nu = \frac{n(8) - 1}{n(3) - n(12)}, \quad (4)$$

где  $n(8)$  - показатель преломления для основной длины волны  $\lambda_0 = 8 \text{ мкм}$ ;

$n(3)$  - показатель преломления для меньшей длины волны  $\lambda_1 = 3 \text{ мкм}$ ;

$n(12)$  - показатель преломления для большей длины волны  $\lambda_2 = 12 \text{ мкм}$ .

Коэффициент относительной дисперсии рассчитан по формуле:

$$\gamma = \frac{n(3) - n(8)}{n(3) - n(12)} \quad (5)$$

Карта стекол сформированного каталога, представленная на рис. 1, наглядно показывает, что большинство материалов имеют небольшой коэффициент дисперсии (показатель преломления в пределах рассматриваемого спектрального диапазона сильно изменяется) и только для двух материалов коэффициент дисперсии максимален - Si и CsI. При этом Si, так же как и Ge, имеет высокий показатель преломления, поэтому эти два материала представляют наибольший интерес. Германий к тому же обладает высокой механической прочностью, высокой химической устойчивостью и хорошими оптическими свойствами, в связи с чем его можно отнести к уникальным материалам.

Хорошо известно, что ахроматизация тонкой двухлинзовой оптической системы будет достигнута, если оптические силы будут определены решением системы:

$$\begin{cases} \varphi_1 + \varphi_2 = 1 \\ \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

где  $\varphi_i$  - оптические силы линз;

$\nu_i$  - коэффициенты дисперсии.

Таблица 3.

Коэффициенты дисперсии и коэффициенты относительной дисперсии для каждого материала

материал	$n(3)$	$n(8)$	$n(12)$	коэф. дисперсии	относит. дисп. (3-8)
KI	1,6281433	1,6229526	1,6168888	55,3514239	0,4612111
KCl	1,4736778	1,4631490	1,4479775	18,0211515	0,4096762
KBr	1,5366044	1,5301912	1,5216270	35,3994151	0,4281918
Ge	4,0450940	4,0052688	4,0023573	70,3205629	0,9318735
CsI	1,7440377	1,7406203	1,7374817	112,9683191	0,5212630
AgCl	2,0022982	1,9884667	1,9702626	30,8552579	0,4317540
CsBr	1,6689532	1,6647287	1,6597388	72,1402045	0,4584672
ZnS(m)	2,2576756	2,2233987	2,1709286	14,1030664	0,3951364
ZnSe	2,4375683	2,4173131	2,3929945	31,7969996	0,4544194
NaF	1,3135487	1,2685453	1,1931751	2,2309319	0,3738644
CdSe	2,4555482	2,4368783	2,4199697	40,3861405	0,5247523
GaAs	3,3168132	3,2877029	3,2662483	45,2429037	0,5757017
NaCl	1,5243596	1,5066229	1,4801138	11,4501919	0,4008674
KRS-5	2,3857059	2,3745399	2,3662329	70,5869614	0,5734093
KRS-6	2,1992807	2,1838356	2,1672564	36,9667908	0,4822931
Silicon	3,4319425	3,4185907	3,4173480	165,7193258	0,9148515
ИКС-25	2,7916770	2,7728691	2,7612591	58,2837441	0,6183168
ИКС-28	2,7142391	2,6938520	2,6786275	47,5646138	0,5724848

Выражения для оптических сил при этом имеют вид:

$$\varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} \quad \varphi_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} \quad (7)$$

Вторичный спектр рассчитывается по формуле:

$$\Delta s'_\lambda = f' \cdot \delta = f' \cdot \left( \frac{\varphi_1}{\nu_1} \gamma_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} \gamma_2 \right), \quad (8)$$

где  $\delta$  - коэффициент вторичного спектра;

$\gamma_i$  - относительные дисперсии.

$$\delta = \frac{\varphi_1}{\nu_1} \cdot \gamma_1 + \frac{\varphi_2}{\nu_2} \cdot \gamma_2 \quad (9)$$

Из (7) и (9) следует

$$\delta = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\nu_1 - \nu_2} \quad (10)$$

Таким образом, вторичный спектр будет исправлен для пар стекол с равными частными дисперсиями. При этом, как видно из формул (7), для уменьшения оптических сил компонентов системы необходимо выбирать материалы с как можно большей разностью  $\nu_1 - \nu_2$ .

На рис. 2 представлена диаграмма  $\gamma - \nu$  распределения материалов каталога.

Такая диаграмма довольно удобна для предварительного анализа пар материалов. Например, пара ИКС28-GaAs скорее всего будет иметь небольшой вторичный спектр, но при этом силы линз будут довольно большими, что приведет к резкому возрастанию сферической аберрации и аберраций высших порядков. В то время как пара CsI-CdSe позволит получить небольшой вторичный спектр при малых значениях оптических сил линз. Согласно диаграмме, был отсортирован список материалов по значению коэффициента вторичного спектра.

Полученные комбинации материалов и проведенные расчеты позволяют дать оценку качества работы двухспектрального объектива с той или иной парой материалов.

### ОБЪЕКТИВ С ФОКУСНЫМ РАССТОЯНИЕМ $F' = 100$ мм

Рассмотрим перспективную с точки зрения получения малых сил оптических элементов и, следовательно, небольших аберраций высших порядков пару материалов Si - NaF (в соответствии с рис. 1). Из табл. 3 мы видим, что указанных

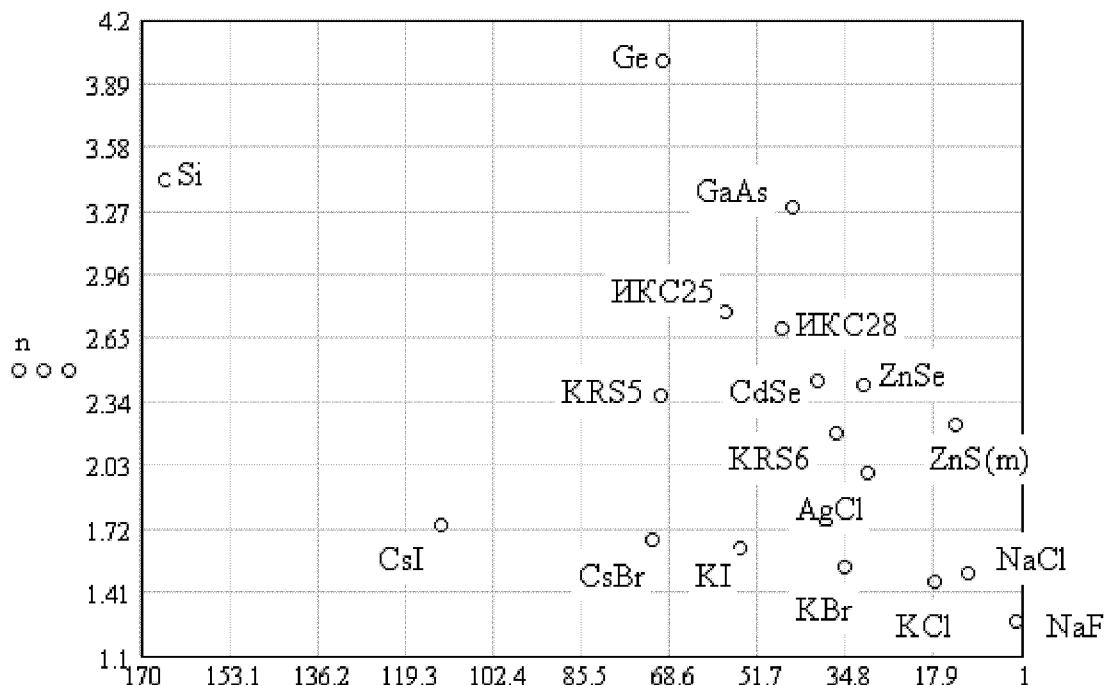


Рисунок 1.  
Карта стекол.

Выбор оптимальных комбинаций материалов, обеспечивающих разработку линзовых и зеркально-линзовых объективов с одновременной аберрационной коррекцией в двух спектральных диапазонах 3-5 и 8-12 мкм

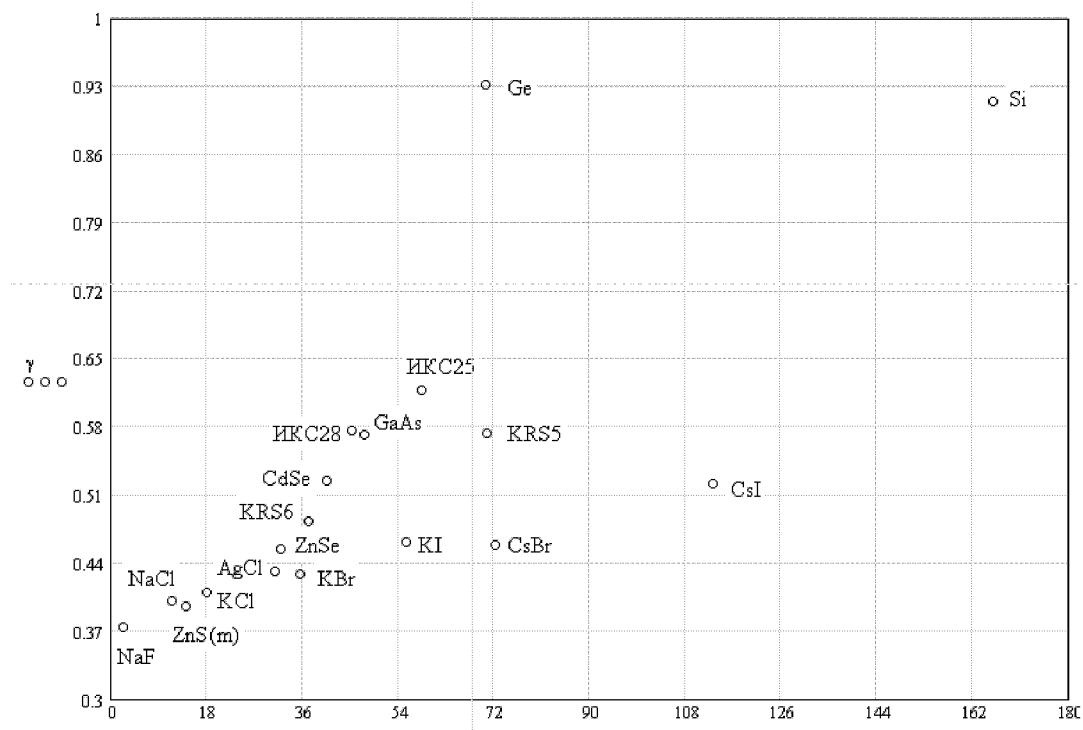
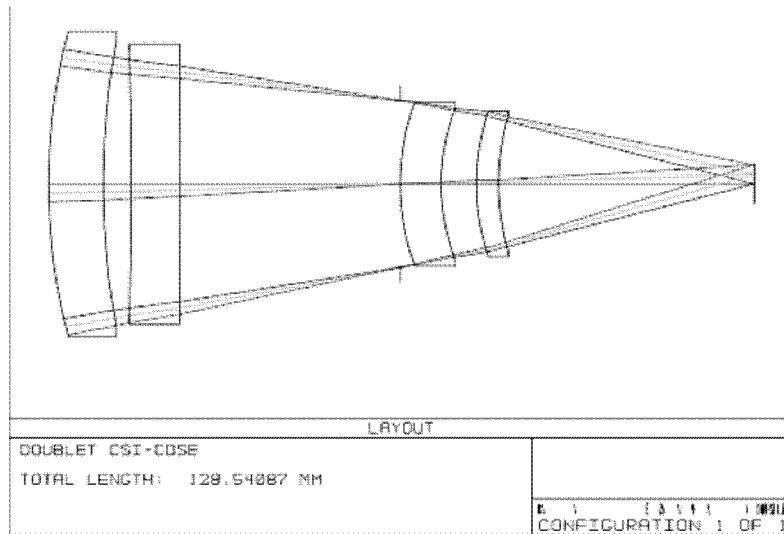


Рисунок 2.  
Диаграмма  $\gamma - \nu$

Таблица 4.  
Сортировка пар материалов по значению модуля коэффициента вторичного спектра

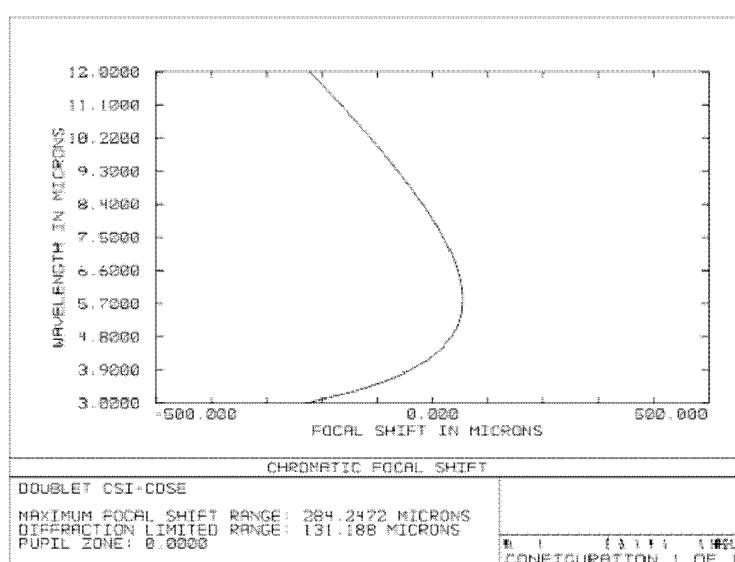
1	материалы	оптич. сила 1-го комп-та	оптич. сила 2-го комп-та	сумма модулей	коэф. вторич. спектр
2	KRS5 - ИКС28	3,066019270771500	-2,066019270771500	5,132038541543000	4,015663459098690E-05
3	CsI - CdSe	1,556419513425850	-0,556419513425848	2,112839026851700	-4,807378432698530E-05
4	GaAs - KRS5	-1,785148386084990	2,785148386084990	4,570296772169980	-9,045118296109600E-05
5	CsBr - ZnSe	1,788162459547180	-0,788162459547184	2,576324919094360	1,003341209512810E-04
6	KI - CsBr	-3,296929373179130	4,296929373179130	7,593858746358260	-1,634365273675550E-04
7	Ge - Si	-0,737122377296572	1,737122377296570	2,474244754593140	-1,784299867477750E-04
8	KI - ZnSe	2,349937455274590	-1,349937455274590	3,699874910649180	2,883407343562300E-04
9	CsI - KRS6	1,486395361078550	-0,486395361078548	1,972790722157100	5,127515310767880E-04
10	AgCl - CsBr	-0,747373084890947	1,747373084890950	2,494746169781900	6,470445573980890E-04
11	CsBr - KRS6	2,050986722963430	-1,050986722963430	3,101973445926860	-6,773837820580960E-04
12	CsI - ИКС28	1,727246469933560	-0,727246469933562	2,454492939887120	-7,831635801832880E-04
13	KBr - AgCl	7,790094739680230	-6,790094739680230	14,580189479360500	-7,839077398114760E-04
14	CsI - GaAs	1,668034347708110	-0,668034347708113	2,336068695416220	-8,038149294245700E-04
15	CsI - ZnSe	1,391727026194270	-0,391727026194271	1,783454052388540	8,234879069570780E-04
16	KBr - CsBr	-0,963490868816226	1,963490868816230	2,926981737632460	8,240269328562920E-04
17	KCl - CsBr	-0,332990887700862	1,332990887700860	1,665981775401720	9,015494044213840E-04
18	CsBr - NaCl	1,188666823575520	-0,188666823575515	1,37733647151040	9,490820240825330E-04
19	KI - CsI	-0,960680434234853	1,960680434234850	2,921360868489700	1,042261992624680E-03
20	KCl - KBr	-1,036993793787310	2,036993793787310	3,073987587574620	1,065445917162910E-03
21	CsI - AgCl	1,375765529248100	-0,375765529248105	1,751531058496200	1,090070187274880E-03
22	CsBr - ZnS	1,243000720946990	-0,243000720946990	1,486001441893980	1,091211628851830E-03
23	CsBr - ZnS(F)	1,241589103150980	-0,241589103150980	1,483178206301960	1,101641298865060E-03
24	KBr - NaCl	1,478102851369310	-0,478102851369309	1,956205702738620	1,140930533396180E-03
25	KI - KRS6	3,010744005546680	-2,010744005546680	5,021488011093360	-1,146718560295900E-03
26	KCl - CsI	-0,189801886201817	1,189801886201820	1,379603772403640	1,175251487965400E-03
27	CsI - NaCl	1,112789628963920	-0,112789628963920	1,225579257927840	1,185951743995520E-03



**Рисунок 3.**  
*Оптическая схема двухспектрального объектива с использованием пары оптических материалов Кремний - Натрий фтор*

#### Конструктивные параметры построенного объектива

Surf OBJ	Type STANDARD	Radius Infinity	Thickness Infinity	Glass	Diameter
1		110.0803	10	SI	55.71076
2		145.251	5		52.29913
3		-1200	9	NAF	51.25947
4		-4552.837	40		47.92609
STO		Infinity	0		30.49195
6		42.89357	7.5	NAF	29.95231
7		38.98877	6.4		27.8081
8		41.6676	4	SI	26.58994
9		43.78037	46.64087		24.67811
IMA		Infinity			7.322111



**Рисунок 4.**  
*Хроматическая aberrация положения*

материалов наибольшая разница коэффициентов дисперсии: 2.23 и 165.7, что дает возможность наиболее просто исправить хроматическую aberrацию положения в широкой области спектра от 3 мкм до 12 мкм. Используя указанную пару материалов для синтеза оптической схемы, получаем оптическую схему объектива с исправленной хроматической aberrацией положения (в соответствии с рис. 3).

Анализ хроматической aberrации положения показывает (в соответствии с рис. 4), что, действительно, хроматизм положения исправлен, однако величина вторичного спектра принимает неприемлемое значение - 0.28 мм.

Рассмотрим пару материалов CsBr-ZnSe. Используя методику построения предварительного решения, нами было получено следующее предварительное решение с устраниенным хроматизмом положения и значительно уменьшенным вторичным спектром.

Ниже приведены опто-технические характеристики построенной схемы 1.

Анализ хроматической aberrации положения показывает (в соответствии с рис. 6), что хроматизм положения предварительной схемы исправлен, а величина вторичного спектра принимает приемлемое значение - 0.024 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

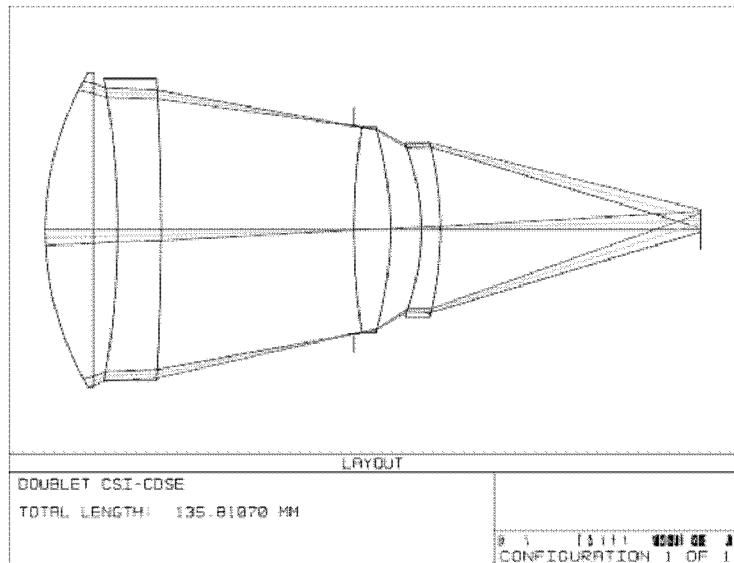
Создание современной отечественной тепловизионной техники является одним из наиболее важных аспектов обеспечения безопасности страны и существенного повышения эффективности решения задач различных отраслей экономики.

Одной из проблем в части создания тепловизоров II и III поколения на субматричных и матричных фотоприемных устройствах является создание светосильного объектива на диапазон спектра излучения 3-5 мкм и 8-12 мкм.

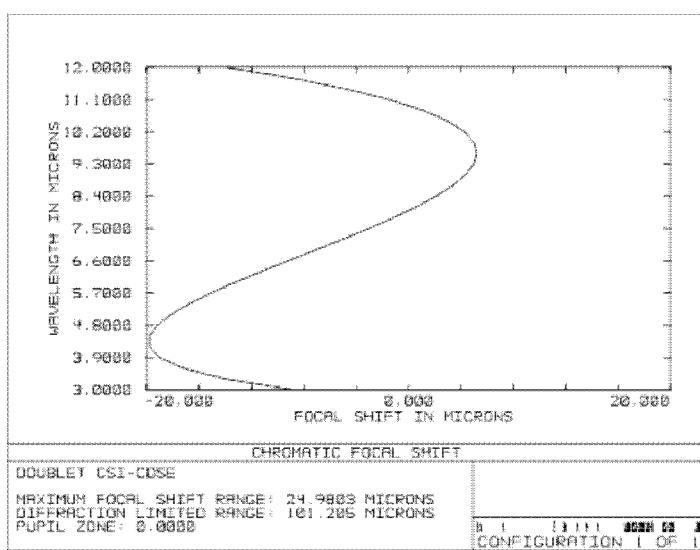
В статье показано, что при объединении отдельных спектральных диапазонов величина относительной ширины спектрального диапазона характеризует сложность разработки многоспектральной оптической системы. Так, при объединении средней и дальней ИК-областей спектра относительная ширина интегрированного тепловизионного диапазона будет равна 1.2, что более чем в два раза увеличивает ее ширину по сравнению с любым отдельным спектральным диапазоном. Наряду с другими факторами это приводит не только к значительному усложнению разработки оптических каналов двухспектральных оптико-электронных приборов, но и к необходимости проведения исследований по созданию специальных методов проектирования двухспектральных объективов.

*Конструктивные параметры схемы 1*

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Diameter
OBJ	STANDARD		Infinity	Infinity		0
1	STANDARD		61.5	10	CSBR	63.64432
2	STANDARD		Infinity	5		63.07864
3	STANDARD		-167	9	ZNSE	61.15594
4	STANDARD		-500	40		59.97344
STO	STANDARD		Infinity	0		42.03423
6	STANDARD		139	7.5	CSBR	41.61391
7	STANDARD		-72	6.4		40.7709
8	STANDARD		-47	4	ZNSE	34.59483
9	STANDARD		-69	53.9107		35.17668
IMA	STANDARD		Infinity			8.129052



**Рисунок 5.**



*Рисунок 6.*

### *Список литературы:*

1. <http://www.crystran.co.uk/optical-materials>
  2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов, -5-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2004/- 472 е.: ил.
  3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Иракрасные системы "смотрящего" типа. М.: Логос, 2004. - 444 е.: ил.
  4. Тарасов В.В.: Якушенков Ю.Г. Тенденции

развития тепловизионных систем - второго и третьего поколений и некоторые особенности их моделирования.-М.: Центральный научно-исследовательский институт "Циклон"-МИИГАиК, 2004.

5. Родионов С.А. Основы оптики: СПб.: ИТМО, 2002. 43 .

6. Абдеев; С.П. Анализ и синтез оптико-электронных приборов; С-Петербург. 2000.44;

7. Зверев. В.А., Точилина Т.В. Основы оптотехники. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2005. - 125 с.

# РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СО СЛАБЫМ БЛЕСКОМ

ЖУБАЕВ К.Г. - оператор научной роты войск ВКО,  
ЛОСЕВ Р.П. - оператор научной роты войск ВКО,  
САУТКИН В.А. - кандидат технических наук

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*Предложен эффективный метод обнаружения космических объектов в видеосюжетах оптико-электронных средств спутниковой астрономии. Представлен аналитический обзор известных методов обнаружения объектов, рассмотрены их преимущества и недостатки. Разработан метод на серии кадров звездного неба. Рассмотрена аппаратно-программная реализация метода в виде разрабатываемой программы (визуальное обнаружение и измерение координат) ВОИК. Сформулирован ожидаемый положительный эффект от внедрения разработанного метода.*

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач при создании аппаратно-программных средств обработки и анализа является наблюдение (космический объект) КО со слабым блеском в реальном масштабе времени. Выделение малоразмерных и точечных объектов при низком отношении сигнал/шум приводит к наличию большого количества точечных сложных помех в кадре видеосюжете, повышая вероятность ложной тревоги и пропуска цели. В этом случае традиционные методы обнаружения объектов, основанные на отношении правдоподобия, адаптивные корреляционные методы сопоставления [1], методы накопления сигнала при сопровождении [2], спектральные методы не обеспечивают эффективного решения проблемы. Для решения задачи взят метод на основе многокадровой обработки путем суммирования последовательности кадров со смещением, равным априорной скорости.

Отметим ряд особенностей, усложняющих решение задачи обнаружения и оценки параметров КО по сравнению с классическими задачами технического зрения:

- требование обеспечения высокой вычислительной эффективности метода, связанное с необходимостью обработки в реальном масштабе времени

последовательности изображений при ограниченных аппаратных ресурсах;

- возможность работы метода в замкнутом контуре обнаружения;
- постоянное повышение требований к обнаружению малоразмерных КО и "космического мусора".

Актуальность работы заключается в необходимости повышения обнаружительных возможностей (оптико-электронных систем) ОЭС при обнаружении малых КО и "космического мусора".

Целью является разработка и исследование метода полуавтоматического обнаружения и измерения координат КО со слабым блеском.

Рассматриваемый подход может использоваться в таких областях как спутниковая астрономия, обнаружение "космического мусора". Метод также может использоваться в ОЭП при выявлении малоразмерных объектов в других областях техники.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе решается задача разработки новых методов обнаружения слабых оптических сигналов от КО.

Для обнаружений КО на изображениях с рав-

номерным фоном ночного неба применяются корреляционные методы [3] как в пространственной области, так и в частотной области с использованием различных ортогональных преобразований (Фурье, Уолша, Адамара) [4].

Методы, разработанные для обнаружения и сопровождения объектов [5], наиболее эффективны при наличии неподвижного фона с перемещающимся по нему объектом. Положение объекта на изображении определяется координатами пикселя, соответствующего центру описанного вокруг изображения объекта прямоугольника, относительно координат известных звезд. В случае космических объектов фон представляет собой практически постоянную или плавно меняющуюся функцию яркости, скорость перемещения которых значительно меньше скорости выделяемого объекта. Для оценки параметров модели фона с целью его последующей компенсации используются методы линейного предсказания [6], так и адаптивной пространственной фильтрации [7]. Результаты сравнительного анализа показывают, что адаптивный метод вполне удовлетворительно работает при отношении сигнал/шум более 2,5.

В инженерной практике широкое распространение получил полуклассический подход к решению задачи оптимального обнаружения. Он предполагает частичную заданность структуры обнаружителя [8].

На изображениях, полученных в сложных условиях (недостаточная или излишняя освещенность, погодные явления - дождь, снег, туман), КО могут практически не видны на фоне ночного неба, что затрудняет их идентификацию как в автоматическом режиме, так и полуавтоматическом и ручном режимах. В таких случаях необходимо предварительно повысить контрастность изображения одним из известных методов [9]. Выбор конкретного метода повышения контрастности и параметров обработки изображения зависит от статистических характеристик изображения космических объектов.

Предложенный метод, позволяющий улучшить результаты выделения КО на изображении, основан на выполнении суммирования последовательности  $N$  видеосюжетов со смещением, равным априорной скорости.

Данное преобразование заключается в суммировании (усреднении) последовательных кадров по  $N$  штук. Способ применяется для "выделения" малозаметных объектов. Суммирование разных кадров усредняет качество снимков.

Суммирование последовательности кадров производится на момент среднего кадра накапливающей последовательности  $T_0$ . Величины  $\Delta X_i, \Delta Y_i$  смещения изображения вдоль осей  $X, Y$  каждого кадра последовательности зависят от разности моментов времени со средним кадром  $T_0 - T_i$  и скоростей движения объекта в поле зрения телескопа  $V_x, V_y$ . Преимущество накопления кадров по сравнению с использованием обычного видеоряда с частотой 25 кадров/с заключается в повышении отношения сигнал/шум. Это приводит к увеличению вероятности обнаружения КО наблюдателем, а также к повышению точности вычислений прямоугольных координат объекта в системе матрицы.

Реализация предложенного метода в ВОИК осуществляется на операционной системе Debian из семейства Unix-подобная (GNU/Linux, GNU/Hurd, BSD), написаной в Code::Blocks (свободная кроссплатформенная среда разработки). Code::Blocks использует библиотеку wxWidgets. ВОИК написан на языке программирования C++. Рабочее окно ВОИК показано рис. 1.

ВОИК предназначен для реализации режима визуально обнаружения объектов вне режима реального времени. Работа в режиме визуального обнаружения заключается в интерактивном анализе совокупности телевизионных кадров, полученных в ходе выполнения отдельной (боевой задачи) БЗ по автоматическому обнаружению и измерению заданного известного КО, в том случае, если автоматическое обнаружение КО не состоялось.

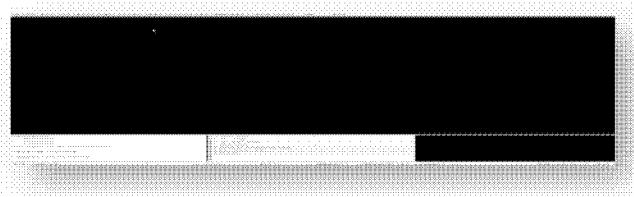
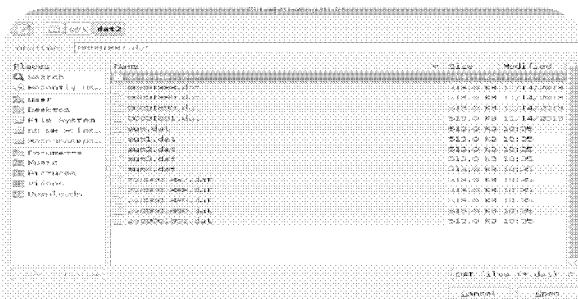


Рисунок 1.  
Рабочее окно ВОИК



*Рисунок 2.*

Приведенный краткий обзор методов поиска КО на изображении позволяет сделать следующие выводы. Существующие методы предназначены для эффективного решения задачи в конкретной постановке с рядом ограничительных условий. Рассмотренные методы эффективны при наличии равномерного фона, на котором расположены достаточно контрастные объекты. Вместе с тем, методы поиска подвижных объектов должны работать в условия реального фона, который возможно компенсировать за счет анализа суммирования соседних кадров видеопотока. Данный метод выбран для последующего математического моделирования.



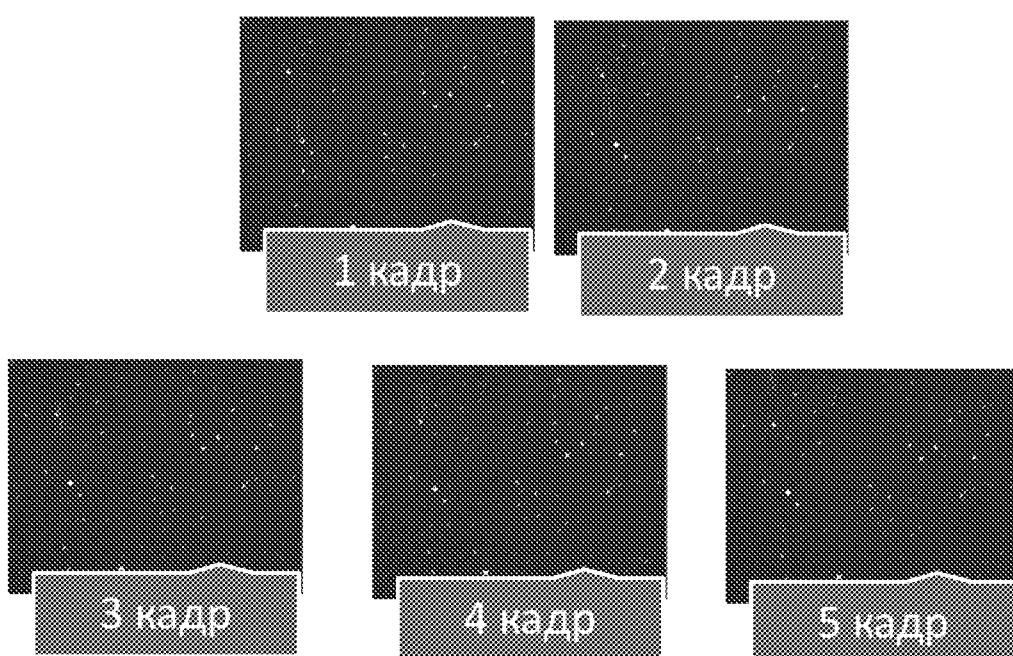
*Рисунок 3.*  
*Кадры суммирования*

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

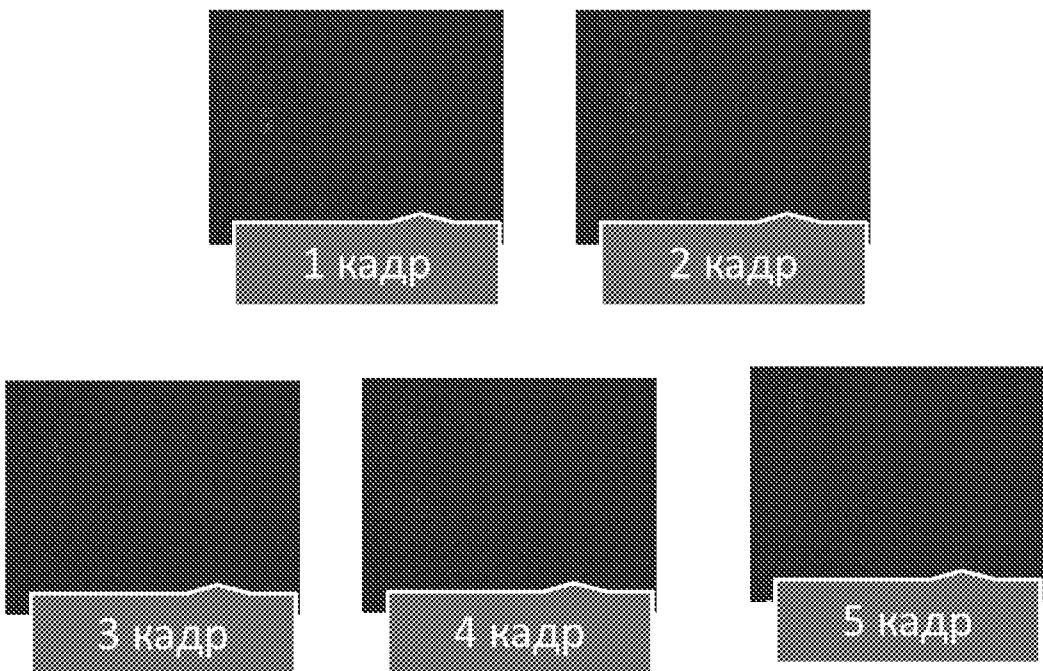
### Структурная схема метода:

- получение серии кадров звездного неба с КО со "слабым блеском";
  - обнаружение звезд;
  - "закрашивание" звезд;
  - сохранение кадров с "закрашенными" звездами;
  - суммирование кадров с "закрашенными" звездами со смещением;
  - сохранение суммирования кадров с "закрашенными" звездами со смещением.

На рис. 2 показан выбор 5 кадров с расширением dat.



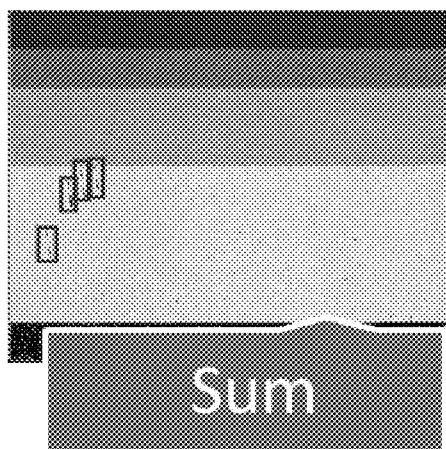
*Рисунок 4.*  
*Серия кадров*



*Рисунок 5.  
Серия кадров с "закрашенными" звездами*

На данной серии кадров содержатся снимки звездного неба. Далее программа "закрашивает" звезды и сохраняет полученные кадры с приставкой zv в названии. Полученные кадры суммируются в один кадр Sum, которые показаны на рис. 3.

На выбранной серии кадров (1-5) присутствует КО со слабым блеском с большой априорной скоростью, который показан в прямоугольнике на рис. 4.



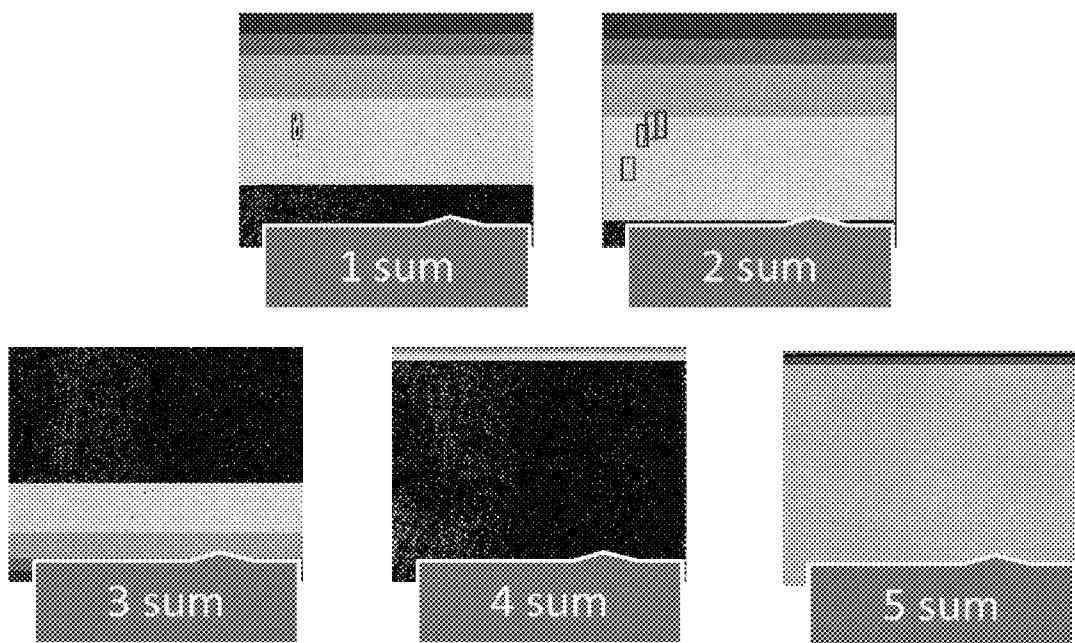
*Рисунок 6.  
Результат суммирования Sum*

На следующей серии показаны те же кадры с "закрашенными" звездами на рис. 5.

Результат суммирования показан на рис. 6.

На рис. 6 показано суммирование 5 кадров. Как видно из рис. 6, в предложенном методе не реализовано смещение по априорной скорости объекта (то есть должно происходить наложение КО один на другой, а не в разброс, как показано на рис. 6). Данная проблема была решена путем реализации цикла суммирования при разных смещениях по оси X и Y. Для каждого КО определено смещение. Учесть априорное смещение невозможно, поскольку неизвестны начальные координаты КО и его скорость, поэтому у каждого цикла применяется своя априорная скорость объекта. Например, для данной серии кадров подходит первый результат суммирования, а другие результаты не подходят, как показано на рис. 7.

Решение об обнаружении КО принимается оператором. На данной серии результат суммирования превышает установленный порог (3 из 5), то есть из пяти sum обнаружено на четырех. Порог-это количество снимков, при котором программа может обнаружить КО. Для обнаружения задан порог 3 из 5.



*Рисунок 7.  
Результат суммирования с разным смещением*

На рис. 8 показано применение метода для другой серии кадров с меньшей априорной скоростью КО со "слабым блеском".

Для данной серии кадров подошёл результат 2Sum, КО с меньшей скоростью сложнее обнаружить. На данной серии результат суммирования не превышает установленный порог, то есть из пяти sum обнаружение КО произошло на одном.

Для решения этой проблемы необходимо дополнить метод функциями ввода смещения априорной скорости КО.

**Вывод:** Разработан метод обнаружения КО в цифровых изображениях, способный обрабатывать серию кадров в реальном времени. Метод заключается в:

- получение серии кадров звездного неба с КО со "слабым блеском";
- обнаружение звезд;
- "закрашивание" звезд;
- сохранение кадров с "закрашенными" звездами;
- суммирование кадров с "закрашенными" звездами со смещением;
- сохранение суммирования кадров с "закрашенными" звездами со смещением.

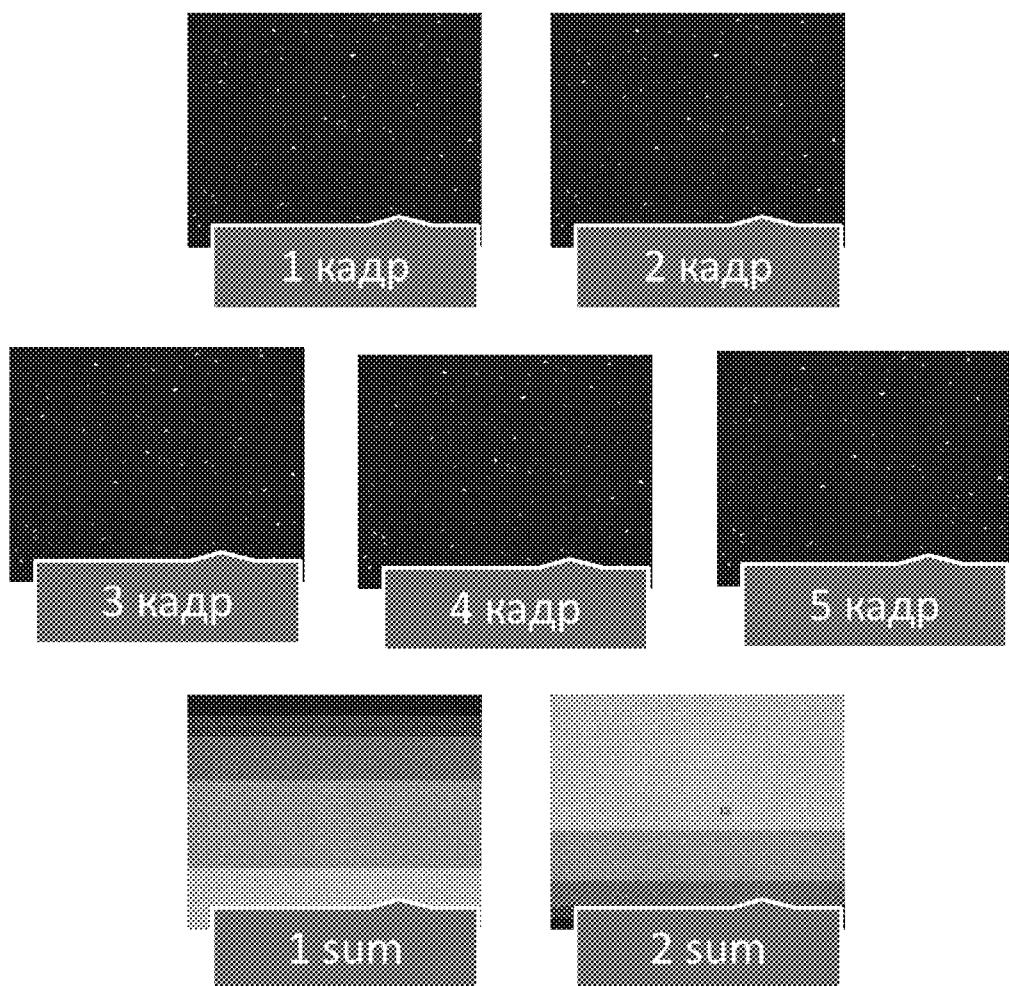
По сравнению с существующими методами обнаружения, предлагаемый метод позволяет обеспечить повышение вероятности обнаружения КО на серии кадров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методы предназначены для эффективного решения задачи обнаружения КО в конкретной постановке с рядом ограничительных условий. Вместе с тем, требуется применение новых методов обнаружения малоразмерных КО и элементов "космического мусора". В статье разработан метод повышения обнаружительных способностей ОЭС за счет:

- работы метода в полуавтоматическом режиме;
- возможность работы метода в замкнутом контуре обнаружения;
- высокой вычислительной эффективности метода.

Проведено математическое моделирование метода в программе ВОИК. Метод может быть внедрен в существующих и перспективных ОЭС при решении задач обнаружения КО со "слабым блеском" в том числе малоразмерных КО и "космического мусора".



*Рисунок 8.  
Метод на другой серии кадров*

*Список литературы:*

1. Фисенко В.Т., Можейко В.И., Фисенко Т.Ю. Автоматическое сопровождение объектов в компьютерных системах обработки изображений // Оптический журнал, 2007, том 74, номер 11.
2. Blackman S, Popoli R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House Norwood MA, 1999. Р. 1230.
3. Вилесов Л.Д. Обнаружение-измерение параметров объектов на изображении. // Информационно-управляющие системы. - 2004.
4. Виттих В.А., Сергеев В.В., Сойфер В.А. Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований - М.: Наука, 1982. - 214 с.
5. Алпатов Б.А., Бабаян П.В., Балашов О.Е., Степашкин А.И. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / - М.: Радиотехника, 2008.
6. Джайн А.К. Успехи в области математических моделей для обработки изображений // ТИИЭР. - 1981. - Т. 69. - № 5. С. 9-39.
7. Муравьев В.С., Муравьев С.И. Адаптивный алгоритм выделения и обнаружения воздушных объектов на изображениях // Информационно-управляющие системы. - 2011. - № 5. - С. 8-14.
8. Стрелков А.И. Оптическая локация. Теоретические основы приема и обработки оптических сигналов. Харьков, 2010. - 312с.
9. Сергеев М.Б., Соловьев Н.В., Стадник А.И. Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеонформации // Информационно-управляющие системы. - 2007. - № 1. - С. 2-7.

# КОМПАКТНЫЙ ТАКТИКО-РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

МОДЕЛЬ С.С. - оператор научной роты войск ВКО,  
ЗБОРОВСКИЙ А.А. - и.о. начальника отдела НТИЦ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*Разработан лазерный дальномер, являющийся основой для создания современного компактного тактико-разведывательного комплекса. Предложены пути совершенствования прибора путем модернизации передающего канала и использования телевизионного приемного канала. Разработана функциональная схема модернизированного дальномера, предусмотрена возможность подключения модуля распознавания.*

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерные дальномеры (ЛД) предназначены для определения расстояния от наблюдателя до объекта с помощью использования лазерного излучения. Дальномеры бывают различных типов (импульсные, фазовые, частотно-фазовые) и применяются в различных областях народного хозяйства и военной техники. В случае определения больших расстояний (сотни метров и километры) наибольшее распространение получили импульсные лазерные дальномеры. Сегодня наиболее активно развиваются системы, использующие в качестве источника излучения полупроводниковые лазеры. Хотя такие системы обладают меньшей мощностью, чем твердотельные импульсные дальномеры, они гораздо удобнее в эксплуатации, дешевле и компактнее. Использование частотных лазеров позволяет повысить точность определения расстояния за счет усреднения серии измерений (метод накопления) и приблизиться к дальности действия, обеспечиваемой более мощными твердотельными ЛД. Малая инерционность активной среды позволяет избежать использования дополнительных оптических каналов стартового сигнала.

Такие дальномеры часто используются как отдельно, так и как часть более сложных систем.

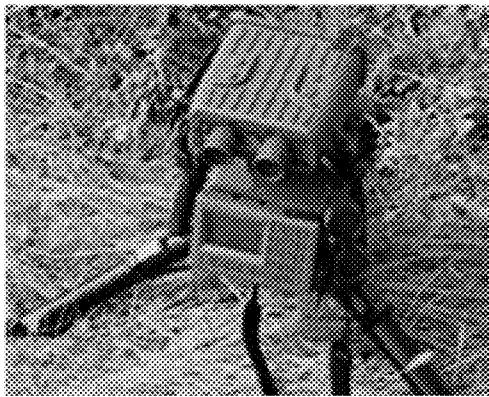
## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Создание тактико-разведывательных комплексов является перспективным направлением развития современных систем вооружения. Такие системы предназначены для полевого наблюдения объектов, определения расстояния до них, их скорости и глобальных координат. Также, важной задачей является идентификация наблюдаемых объектов и слежение за ними.

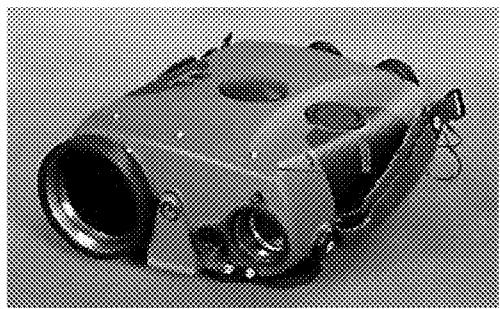
Ряд зарубежных компаний производят системы такого типа. Так, HALEM 2 (Carl Zeiss) является дальномерным модулем, который, при подключении к дополнительной базовой системе превращается в комплекс, позволяющий определять местоположение и отслеживать перемещения нескольких целей.

Данный прибор позволяет определять расстояние до 40 км при хороших условиях. Однако, низкая частота повторения импульса не позволяет производить достоверные измерения скорости объектов. Также, недостатком HALEM 2 является большой вес (2.5 кг) и габариты (210x180x85 мм).

Та же компания предлагает портативный комплекс NESTOR, предназначенный для наблюдения за целями и наведения на них. Система включает



*Рисунок 1.  
Внешний вид лазерного дальномера HALEM 2*



*Рисунок 3.  
Внешний вид системы целеуказания OPUS-H*

в себя лазерный дальномер, ИК-канал для ночных наблюдений, цифровой магнитный компас, GPS-модуль и канал прямого дневного наблюдения. Преимуществом системы является возможность удаленного управления и передачи изображений и данных. Система работает на расстояниях около 10 км, однако, как и HALEM 2, обладает большой массой (4 кг) и габаритами. Система также не предназначена для оперативного измерения скорости объектов наблюдения [1].

Система OPUS-Н включает ИК-канал более высокого качества, в нем использована микро болометрическая матрица с разрешением 640x480 пикселей, работает система для расстояний порядка 20 км. Преимуществом системы является вы-

сокая надежность и возможность получения достоверных данных в любых погодных условиях. Однако, сравнительно большие масса (2.9 кг) и габариты системы снижают удобство ее эксплуатации.

Целью работы является создание лазерного дальномера, как базы для реализации отечественного портативного тактико-разведывательного комплекса.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

### 1. Методы измерений и моделирование

В общем случае задача определения расстояния между активным дальномером и целью сводится к измерению соответствующего интервала времени между зондирующими сигналом и сигналом, отраженным от цели. Различают несколько методов измерения дальности в зависимости от того, какой характер модуляции лазерного излучения используется в дальномере, в том числе импульсный, фазовый или фазово-импульсный, а также частотно-фазовый. Подробнее рассмотрим наиболее распространённые методы импульсного и фазового дальномерирования.

Сущность метода импульсного дальномерирования состоит в том, что к объекту посыпается зондирующий импульс, который одновременно запускает временной счетчик в дальномере. Когда отраженный объектом импульс приходит к дальномеру, то он останавливает работу счетчика. По временному интервалу перед оператором на дисплее автоматически высвечивается расстояние до объекта.

Используется следующее соотношение:



*Рисунок 2.  
Внешний вид лазерного дальномера NESTOR*

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

где  $L$  - расстояние до объекта,  $c$  - скорость света,  $t$  - время прохождения импульса до цели и обратно,  $n$  - показатель преломления среды (воздуха).

При фазовом методе дальномерирования лазерное излучение модулируется по синусоидальному закону. Отраженный от объекта сигнал приходит на приемное устройство с фазовым сдвигом, зависящим от расстояния [2].

Оценка дальности действия лазерных дальномеров осуществляется при следующих условиях: размер объекта мал по сравнению с расстоянием и объект переизлучает энергию подобно точечному источнику:

$$D = \left( \frac{P_{\text{пер}} d_0^2 \tau_1 \tau_2 k_r \rho_\lambda}{4 P_{\text{пп}}} e^{-2k(\lambda)D} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где  $D$  - дальность;  $P_{\text{пер}}$  - мощность передатчика, Вт;  $d_0$  - диаметр входного зрачка;  $\tau_1, \tau_2$  - коэффициенты пропускания приемного и передающего каналов;  $P_{\text{пп}}$  - пороговая принимаемая мощность при отношении сигнал/шум = 1;  $k_r$  - коэффициент пространственного распределения отраженного сигнала (ламбертов отражатель,  $k_r = 1$ );  $\rho_\lambda$  - коэффициент отражения от объекта,  $K(\lambda)$  - показатель ослабления в атмосфере.

Однако эта формула годится только для быстрой приближенной оценки дальности действия дальномера. Наличие множества случайных факторов усложняет расчет дальномеров, поэтому наиболее оптимально использовать вероятностные методики расчета.

При использовании импульсных дальномеров погрешность в определении расстояния до объекта определяется в общем виде следующей зависимостью:

$$dD = \frac{\delta D}{\delta t} dt + \frac{\delta D}{\delta n} dn, \quad (3)$$

Флуктуации показателя преломления воздуха и

условия распространения излучения оказывают существенное влияние на точность измерения дальности. Однако, для учета этих факторов необходимы дополнительные данные о давлении, влажности и турбулентности в атмосфере. В данной работе мы ограничимся рассмотрением только погрешности в определении временного интервала.

Скорость объекта можно измерить путем деления разности двух последовательных измерений дальности на интервал времени между ними.

Погрешность определения временного интервала можно оценить по следующей формуле [4]:

$$\sigma_\tau^2 = \frac{3\tau^2}{\pi^2 \cdot SNR} \quad (4)$$

где  $\tau$  - длительность импульса,  $SNR$  - отношение сигнал/шум.

В качестве источника излучения в импульсных дальномерах часто используются импульсные твердотельные лазеры с модуляцией добротности. Преимуществом таких лазеров является большая энергия импульса, позволяющая выполнять измерения больших расстояний. Однако, малая частота повторения импульсов при использовании твердотельных импульсных источников излучения ограничивает точность таких устройств. Этот фактор, вместе с неустранимой погрешностью определения временного интервала делают погрешность при измерении продольной скорости объекта недопустимо большой (табл. 1).

В случае использования частотного лазера лазерный импульс приближенно представляет собой комб-гребенку. При приеме такого импульса пороговое устройство срабатывает многократно и появляется возможность усреднения величины временного интервала за счет накопления сигнала. Однако, мощность таких лазеров значительно ниже, чем у твердотельных лазеров с модуляцией добротности, что снижает эффективную дальность работы дальномера.

На основании приведенных выше зависимостей проведено моделирование и сделана оценка необходимой мощности лазера для обеспечения достаточной дальности действия дальномера, а также получена зависимость точности определения расстояния от длительности импульса и отношения

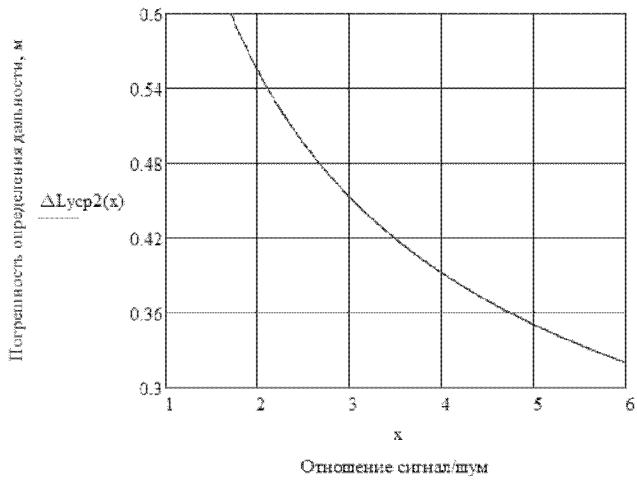


Рисунок 4.

Зависимость погрешности определения расстояния от отношения сигнал/шум

сигнал/шум. В качестве источника выбран полупроводниковый лазер с длиной волны 1.55 мкм, усреднение проводилось по формуле:

$$\sigma_{\text{up}}^2 = \frac{\sigma_r^2}{N} \quad (5)$$

где  $N$  - количество импульсов в гребенке, по которым проводится усреднение [4]. На рисунках 4, 5 приведены зависимости погрешности определения расстояния и скорости при  $N=1000$ , длительности импульса 50 нс и интервале между пачками измерений 1 с от отношения сигнал/шум.

В табл. 1 приведены для сравнения численные значения погрешностей для методов единичного отсчета и накопления для тех же параметров.

Необходимо заметить, что данные значения получены при использовании доверительного интервала в  $3\sigma$ . Фактическая дальность действия дальномера выше, однако при больших расстояниях погрешность измерений повышается.

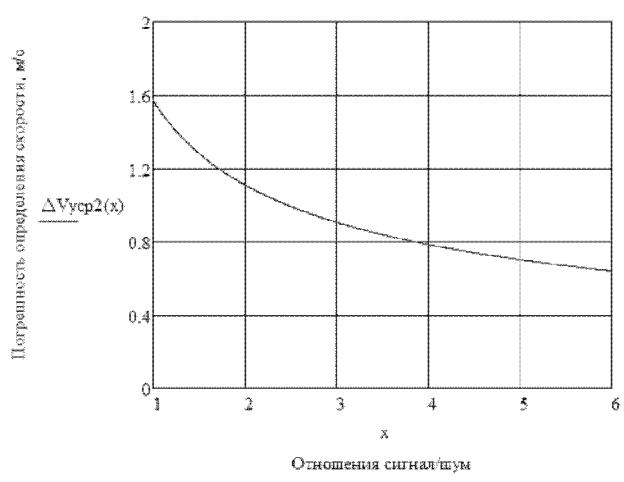


Рисунок 5.

Зависимость погрешности определения скорости от отношения сигнал/шум

номера выше, однако при больших расстояниях погрешность измерений повышается.

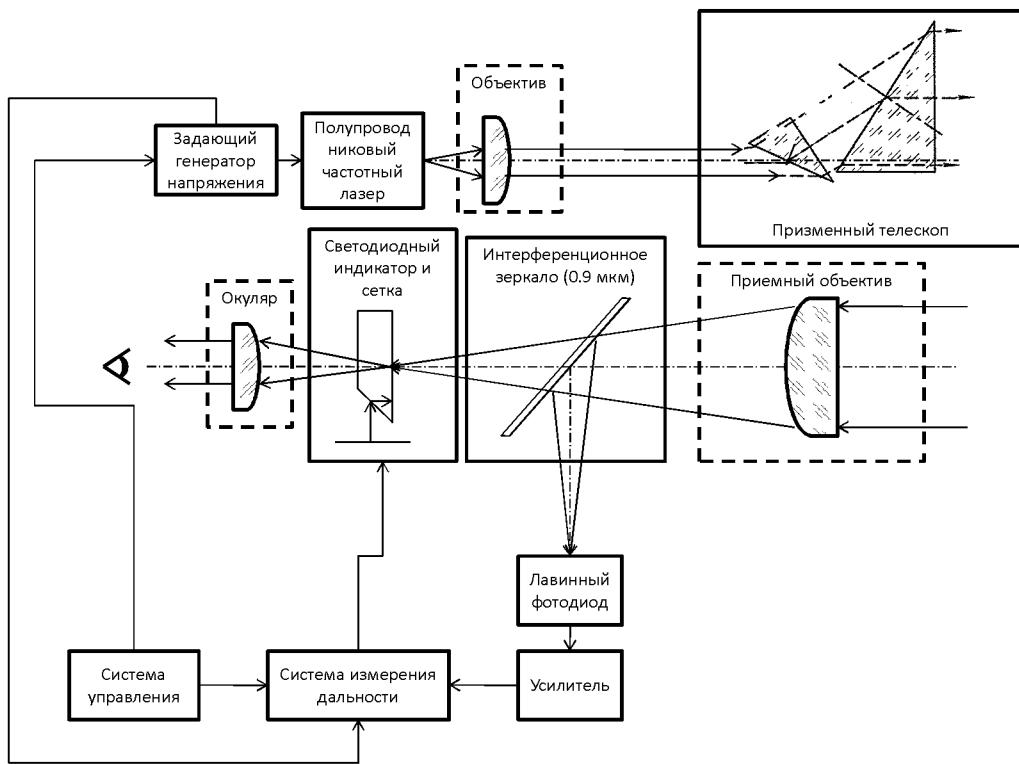
## 2. Функциональная схема лазерного дальномера

Ниже приведена функциональная схема дальномера, разрабатываемого на ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" (рис. 6).

Функционирование дальномера осуществляется следующим образом. Дальномер с помощью оптического визира (их оптические оси параллельны) наводится на цель. С помощью системы управления подготавливается к измерению система измерения дальности и цифровой индикатор, а затем запускается квантовый передатчик, состоящий из полупроводникового частотного лазера и задающего генератора напряжения.

Таблица 1.  
Сравнение погрешностей измерения для различных методов приема сигнала

	Отношение сигнал/шум	Однократный отсчет	Метод накопления
Погрешность измерения дальности, м	0.5	35.062	1.109
	3	14.314	0.453
	4	12.396	0.392
Погрешность измерения скорости, м/с	0.5	70.124	2.217
	3	28.628	0.905
	4	24.792	0.784



**Рисунок 6.**  
*Функциональная схема лазерного импульсного дальномера ЛДМ*

Полупроводниковый частотный лазер генерирует серию импульсов, которые через передающую оптическую систему направляются в сторону цели. Эта система предназначена для уменьшения угла расходимости полупроводникового лазера. Для снижения вероятности приема ложного сигнала, отраженного от какого-либо местного предмета, находящегося на одном направлении с целью, дальномер обладает узконаправленным пучком. Запуск системы измерения дальности производится сигналом от задающего генератора напряжения.

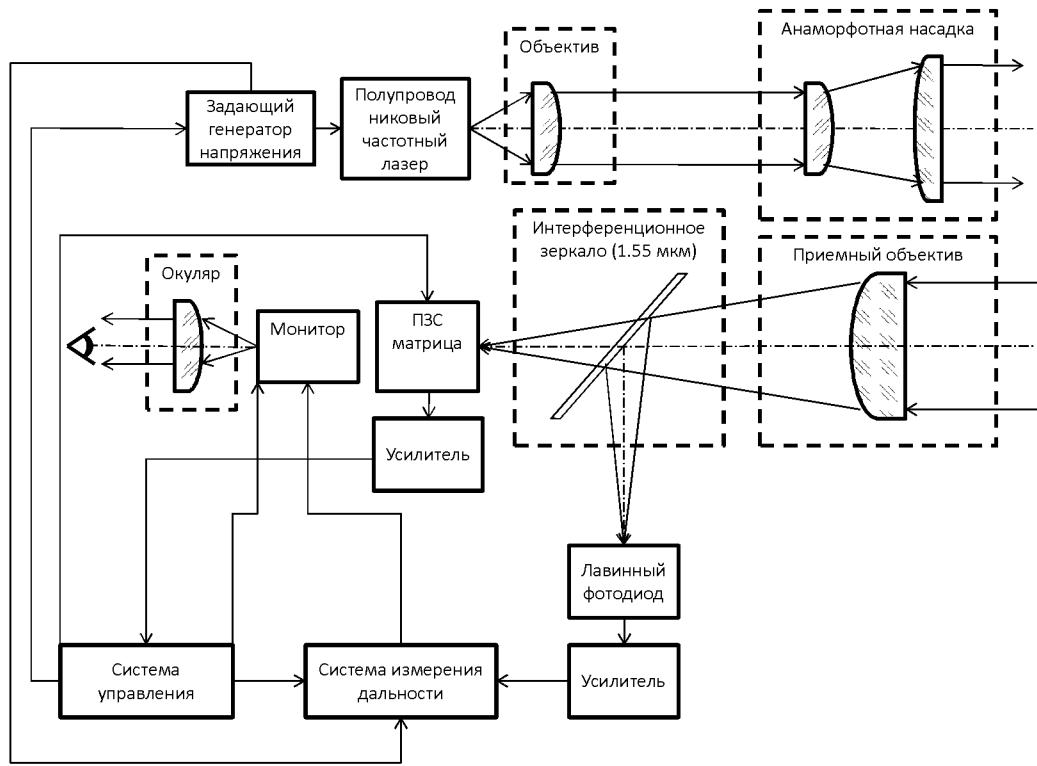
Система измерения дальности, основу которой составляет электронный счетчик интервалов времени, работает следующим образом: сначала запуск, затем счет времени, прекращающейся при остановке. Остановка работы электронного счетчика осуществляется отраженным от цели импульсом, который, пройдя через приемную оптическую систему, фокусируется на приемник излучения, состоящий из лавинного фотодиода и усилителя. Далее сигнал поступает на систему измерения дальности. Результат измерения дальности отображается на индикаторе и проецируется на сетку, расположенную в фокусе окуляра. Затем таким же образом осуществляется следующее измерение

дальности. Скорость вычисляется описанным выше образом.

Тип приемника обусловлен выбором рабочей длины волны излучения полупроводникового лазера. Увеличение чувствительности приемника позволяет увеличить дальность действия лазерного дальномера. Как показывает проведенный расчет, в случае использования частотного лазера и усреднения значения временной задержки по группе импульсов, отношение сигнал/шум для каждого отдельного импульса может быть снижено до значений менее 1 (для метода однократного отсчета достаточная точность измерений достигается при значениях отношения сигнал/шум 5-6). Для пачки импульсов это значение вырастет в  $\sqrt{N}$  раз, как показывает формула 5.

Для защиты ЛФД от возможных помех, а также для обеспечения безопасности глаза наблюдателя, лазерная компонента отводится в канал приемника с помощью интерферционного зеркала, осуществляющего спектральную селекцию входного сигнала.

Описанная выше схема лазерного дальномера имеет весомый недостаток. Количество информа-



**Рисунок 7.**  
**Функциональная схема лазерного импульсного дальномера ЛДМТ**

ции, выводимой на светодиодный индикатор, ограничено его небольшой (4 символа) разрядностью. Поэтому в случае измерения собственных координат и координат объекта с помощью спутниковых систем определения местоположения информация может выводиться только на внешний монитор. Это не всегда удобно в полевых условиях. Этот недостаток может быть устранен в случае применения в дальномере телевизионного канала с микро дисплеем. Функциональная схема такого устройства показана на рис. 7.

Использование телевизионного канала с монитором позволяет выводить все необходимые данные о цели: дальность, скорость, азимут, навигационные координаты. Также, при подключении блока распознавания, появляется возможность распознавать цели и выполнять слежение за ними в пределах поля зрения. Использование матричного фотоприемника позволяет определять поперечную скорость цели, а применение источника излучения с длиной волны 1.55 повышает дальность действия прибора, как будет показано ниже.

### 3. Модернизация передающего канала лазерного дальномера

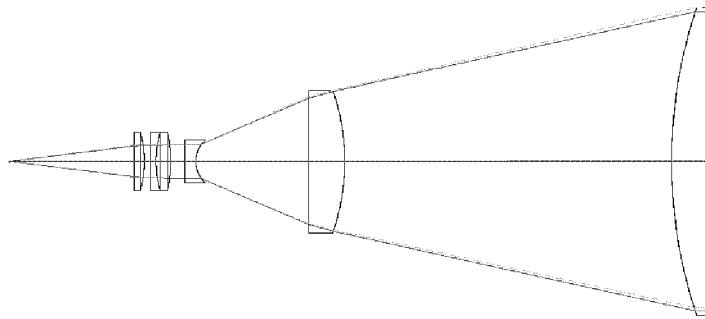
Как показано на рис. 5, в состав передающего

канала лазерного дальномера входит призменный телескоп, служащий для уменьшения расходимости излучения от полупроводникового лазера в одном из сечений [5]. Телескоп обеспечивает расходимость 1 мрад, однако, такой вариант передающего канала снижает эффективность использования лазерного излучения за счет высокого отражения от грани призмы при большой кратности телескопа, что ограничивает возможности по снижению расходимости. Потери энергии в призменном телескопе снижают эффективную дальность действия дальномера.

Для получения расходимости  $\Phi = 1$  мрад, с учетом того, что максимальный размер светоизлучающей площадки  $\Delta x = 0.2$  мм, рассчитаем необходимое фокусное расстояние:

$$f = \frac{\Delta x}{\Phi} = \frac{0.2}{10^{-3}} = 200 \text{ мм} \quad (6)$$

Так как по другой координате размер излучающей площадки полупроводникового лазера мал, то оптимально использовать цилиндрический телескоп для уменьшения расходимости по одной из координат. Модель передающего канала, спроектированная в среде ZEMAX, представлена на рис. 8.



*Рисунок 8.  
Модель передающего канала лазерного дальномера  
с цилиндрической афокальной системой*

Разработаны цилиндрические телескопические системы, обеспечивающие расходимость в 1 и 0.5 мрад. Хотя такие системы увеличивают габариты дальномера, они обеспечивают большую эффективность передачи излучения, что увеличивает эффективную дальность действия дальномера. Кроме того, они потенциально могут использоваться как дополнительные насадки при необходимости, хотя при реализации такого варианта возникают конструктивные сложности, связанные с обеспечением необходимой точности позиционирования.

#### **4. Использование источника излучения с длиной волны 1.55 мкм**

Ранее в лазерном дальномере, разрабатываемом на ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", в качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны 0.9 мкм. Данная длина волны является безопасной для глаз. Полупроводниковый лазер на этой длине волны, используемый в лазерном дальномере позволяет измерять расстояния, согласно формуле (2), около 2,2 км.

Рассмотрим известную модель пропускания атмосферы [3]. Спектральный коэффициент ослабления атмосферы:

$$k(S_{\text{м.д.в.}}, \lambda) = \frac{3.91}{S_{\text{м.д.в.}}} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^{-0.58(S_{\text{м.д.в.}})^{\frac{11}{3}}} \quad (7)$$

где  $S_{\text{м.д.в.}}$  - метеорологическая дальность видности, км;  $\lambda$  - длина волны излучения, мкм. График

этой зависимости приведен на рис. 9.

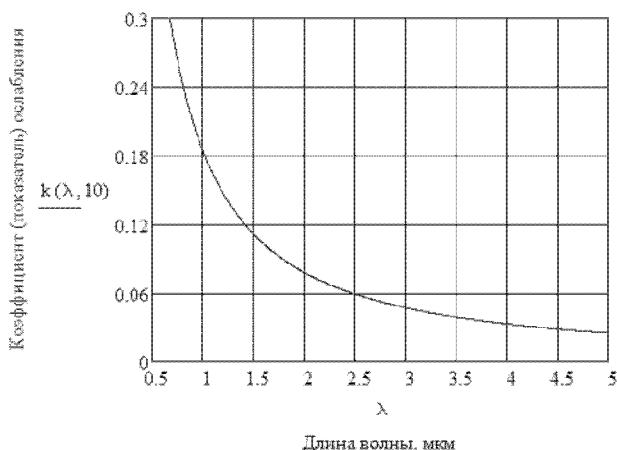
Как видно на графике, коэффициент ослабления убывает с длиной волны, поэтому для повышения эффективности передачи излучения оправдано использование полупроводникового лазера с большей длиной волны.

Использование источника с длиной волны 1.55 мкм при той же средней мощности импульса (около 100 Вт) позволяет увеличить эффективную дальность действия дальномера. По той же формуле (2) для длины волны 1.55 мкм  $D=2.7$  км, что на 23% больше, чем при использовании длины волны 0.9 мкм.

Таким образом, замена источника излучения значительно улучшает характеристики прибора.

#### **Заключение**

Предложены модификации разрабатываемого ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева"



*Рисунок 9.  
Коэффициент ослабления атмосферы*

**Таблица 2.**  
**Характеристики модернизированного и базового лазерного дальномера**

Наименование	ЛДМ	ЛДМТ
Дальность действия, м	2200	2700
Тип индикатора	ЖК-индикатор	LED-микрорадиодисплей
Вывод на индикатор результата измерения дальности	+	+
Вывод на индикатор результата измерения скорости	+	+
Вывод на индикатор результата измерения азимута	+	+
Вывод на индикатор результата измерения координат дальномера и цели	-	+
Возможность автоматического распознавания типа цели	-	+
Возможность измерения поперечной скорости цели	-	+
Рабочая длина волны, мкм	0.9	1.55
Расходимость лазерного луча, мрад	1.2x0.3	1x0.26

портативного лазерного дальномера. Использование источника излучения с длиной волны 1.55 мкм позволяет повысить эффективную дальность действия дальномера на 23%. Афокальная цилиндрическая насадка позволяет повысить энергетическую эффективность передающего канала, что увеличивает эффективную дальность действия дальномера. Кроме того, она потенциально может использоваться как дополнительная насадка при необходимости. Применение телевизионного приемного канала делает возможным создание на базе лазерного дальномера компактного тактико-разведывательного комплекса с модулем распознавания. Комплекс позволит обнаруживать, распознавать и получать координаты целей в автоматическом и ручном режимах. Такая система значительно-

но повысит эффективность разведки и целеуказания. В табл. 2 показано сравнение базового и модернизированного лазерного дальномера.

*Список литературы:*

1. Gmbh, Carl Zeiss Optronics. [www.zeiss.com/optronics](http://www.zeiss.com/optronics). [В Интернете] 2014 г.
2. Дальнометрия. Laser-portal.ru. [В Интернете] 25.12.2013 г. [http://laser-portal.ru/content\\_145](http://laser-portal.ru/content_145).
3. Байбордин Ю.В. Справочник по лазерной технике. Киев : "Техника", 1978.
4. Батраков А.С. Лазерные измерительные системы. Москва : Радио и связь, 1981.
5. Эборовский А.А., Иванов Б.Б. Коллимирующая оптическая система для полупроводникового лазера. RU 2481605 Россия.

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОРНОГО МОДУЛЯ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРОЙ СРЕДНЕГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ОБЗОР-О"**

**АНУЧИН Р.Н. - оператор научной роты войск ВКО,  
КАЛАШНИКОВ С.Д. - оператор научной роты войск ВКО,  
КОЧЕШКОВ М.А. - оператор научной роты войск ВКО,  
БАЛИН Д.С. - начальник сектора НТИ**

**ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"**

*Современные тенденции в построении космических аппаратов таковы, что их производство делают модульным, размеры модулей уменьшают, а сами аппараты (модули) делают узкоспециализированными. Данная тенденция, а так же каждодневный прогресс в изготовлении электронных компонентов микросхем, увеличение скорости их работы, производительности и уменьшения габаритов ведет к пересмотру используемых еще "вчера" схемотехнических решений аппаратуры управления космическими аппаратами. Данная статья описывает проектирование нового электронного блока управления аппаратурой среднего пространственного разрешения. В частности это касается процессорного модуля для управления системой оптико-механической космического аппарата дистанционного зондирования Земли "Обзор-О".*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Еще недавно для дистанционного зондирования земли использовались фотографические способы, но революция в области компьютерной техники, космонавтики и дистанционного зондирования Земли позволило уйти от этого способа и всех связанных с ним недостатков. Появились принципиально новые съемочные системы с высокими показателями. Но вместе с тем новые технологии в проектировании и изготовлении космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли поставили перед разработчиками ряд новых задач. В том числе это касается и разработки принципиально новых блоков управления аппаратурой космических аппаратов.

На данный момент Россия обладает всего 5 действующими космическими аппаратами для дистанционного зондирования Земли, что в свою очередь недостаточно для оперативного получения и в полном объеме информации различными ведомствами и службами. Вместе с постоянным улуч-

шением характеристик космических аппаратов идет разработка концепции оперативной и глобальной съемки земной поверхности с высоким разрешением с помощью группировок малых спутников.

В соответствии с Федеральной космической программой России на период до 2020 г. предполагается существенное увеличение группировки отечественных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, обеспечивающих получение материалов съемки с различным пространственным разрешением. В эту программу входит и создание группировки из четырех оптико-электронных космических аппаратов "Обзор-О" предназначенный для оперативной мультиспектральной съемки России, прилегающих территорий соседних государств и отдельных районов Земли. На первом этапе (2015-2017 гг.) планируется запустить два космических аппарата, на втором (2018-2019 гг.) - еще два. Система "Обзор-О" будет служить для обеспечения данными космической съемки МЧС России,

Минсельхоза России, РАН, Росреестра, других министерств и ведомств, а также регионов России. На космических аппаратах "Обзор-О" № 1 и № 2 планируется установить опытные образцы гиперспектральной аппаратуры. Согласно техническим требованиям к системе "Обзор-О" она должна состоять из четырех спутников, способных вести съемку в восьми спектральных диапазонах, в том числе в видимом и инфракрасном. Разрешение камер в видимом диапазоне будет составлять пять метров, в инфракрасном - не хуже двадцати метров. При этом на первом этапе создания системы, когда на орбите будут работать два аппарата, "Обзор-О" должен обеспечить съемку всей территории России не более чем за 30 суток; когда к работе приступят все четыре спутника - не более чем за 7 суток.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Согласно государственной программы "Космическая деятельность России на 2013-2020 годы"

планируется разработка, производство и вывод на орбиту группировки из 4-х оптико-электронных космических аппаратов "Обзор-О".

Разработка нового космического аппарата предполагает использование уже имеющихся решений, так и разработку новых. В вопросе разработки блока управления аппаратурой среднего пространственного разрешения было принято решение о создании нового блока с улучшенными характеристиками по сравнению с предшественниками. Была поставлена задача: разработать процессорный модуль блока управления аппаратурой среднего разрешения в соответствии с табл. 1.

К разрабатываемому процессорному модулю предъявлялись следующие конструктивные требования:

- Внешняя шина адреса микроконтроллера 1986ВЕ3Т, 64 линии дискретного ввода/вывода, линии внешнего прерывания и линии портов общего назначения микроконтроллера должны быть выведены на внешний межплатный разъем;

**Таблица 1.**  
*Основные тактико-технические характеристики процессорного модуля*

№ п/п	Наименование параметра	Количественная характеристика	Примечание
1	Тип микроконтроллера (МК)	1986ВЕ3Т	ф. «Миландр»
2	Максимальная тактовая частота, МГц	80	
3	ПЗУ, Мбайт	8	Тип памяти «MRAM»
4	ОЗУ, Мбайт	8	
5	Количество дискретных линий ввода/вывода	64	Уровни 3,3 В, совместимость по входам с ТТЛ уровнями
6	Линии портов общего назначения МК 1986ВЕ3Т	$\geq 8$	Уточняется на этапе разработки КД
7	Количество линий внешнего прерывания	4	
8	Количество аналоговых линий ввода	6	
9	Количество каналов обмена по RS-485	4	4 канала с гальванической развязкой в дуплексном режиме
10	Количество каналов обмена по ГОСТ Р 52070-2003	2	Скорость передачи 1 Мбит
11	Часы реального времени	+	Часовой кварц 32 кГц
12	Номинальное напряжение питания, В	$3,3 \pm 0,3$	
13	Максимальная потребляемая мощность, Вт	$\approx 3$	Уточняется на этапе разработки КД
14	Габаритные размеры модуля, мм	$90,17 \times 95,89$	
15	Масса модуля, кг	0,2 кг	Уточняется на этапе разработки КД
16	Температура эксплуатации	$-35 \div 50^\circ \text{C}$	

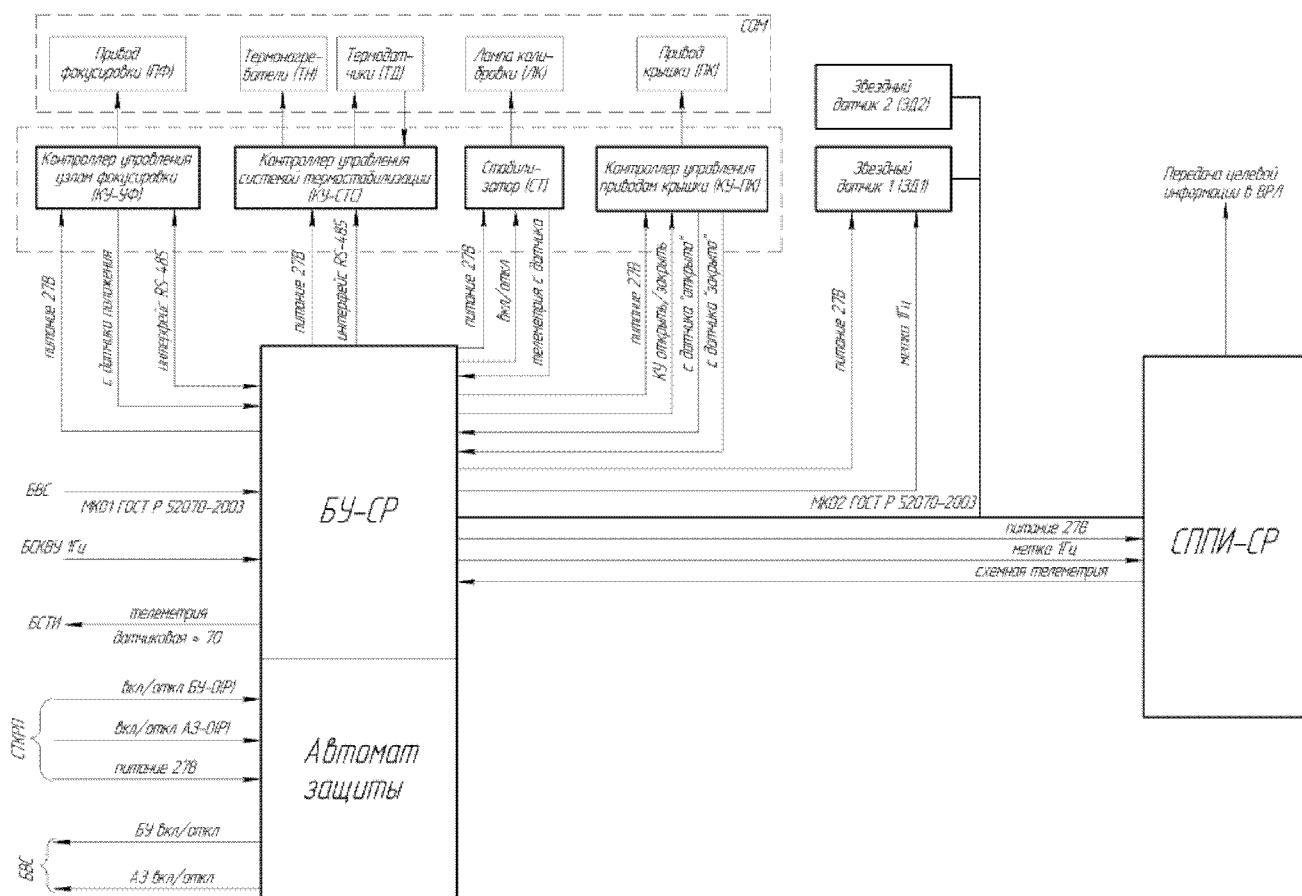
- Каналы RS-485, каналы обмена ГОСТ Р 52070-2003 (MIL-STD-1553В), аналоговые линии ввода на АЦП должны быть выведены на внешний разъем с возможностью подстыковки на кабель.

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ**

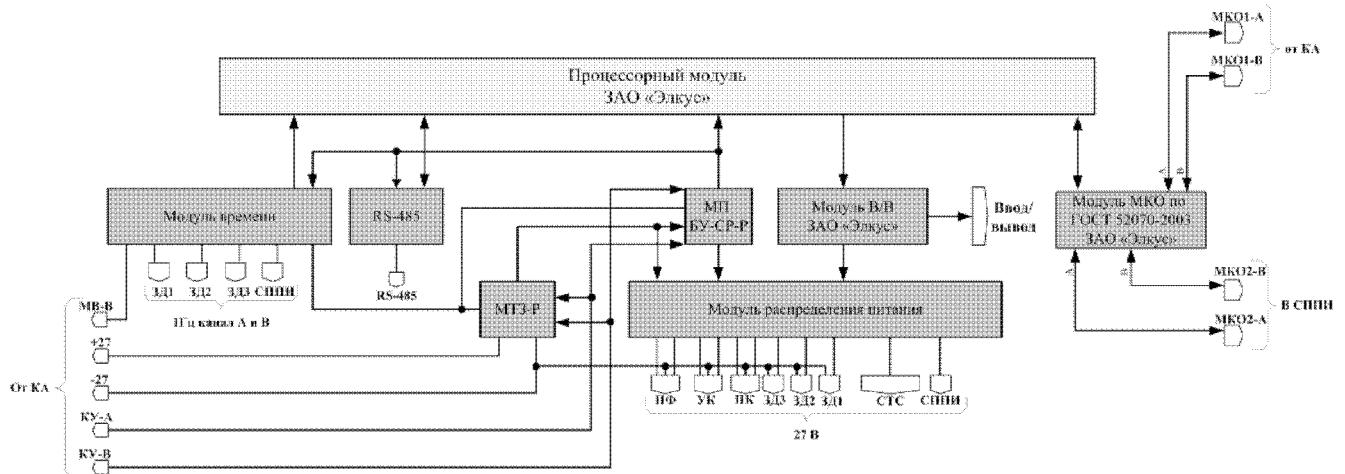
Изначально был изучен эскизный проект на широкозахватную многоспектральную аппаратуру среднего пространственного разрешения (ШМАСР). Согласно проекта система управления аппаратурой среднего пространственного разрешения (СУ-СР) должна была включать в себя блок управления (БУ-СР), систему приема и преобразования информации (СППИ-СР), контроллер управления узлом фокусировки (КУ-УФ), контроллер управления системой термостабилизацией (КУ-СТС), контроллер управления лампой калибровки (СТ), контроллер управления приводом крышки (КУ-ПК) и интерфейс обмена со звездными датчиками

(ЗД). Так же предусматривались интерфейсы для взаимодействия с системой трансляции команд и распределения питания (СТКРП), бортовой вычислительной системой (БВС), бортовой системой телеметрических измерений (БСТИ) и бортовым синхронизирующим координатно-временным устройством (БСКВУ). Функциональная схема СУ-СР представлена на рис. 1.

В наибольшей степени в работе над проектом был интересен БУ-СР, его состав и задачи. Он предназначен для приема напряжения питания от СТКРП и распределения питания в оконечные устройства, для командно-информационного обмена по мультиплексным каналам с БВС, ЭД, СППИ, а также БУ-СР осуществляет информационный обмен с контроллерами оптико-механической системы. БУ-СР производит прием сигнала синхронизации 1 Гц от БСКВУ, размножает его и транслирует в оконечные устройства. На рис. 2 представлена функциональная схема БУ-СР.



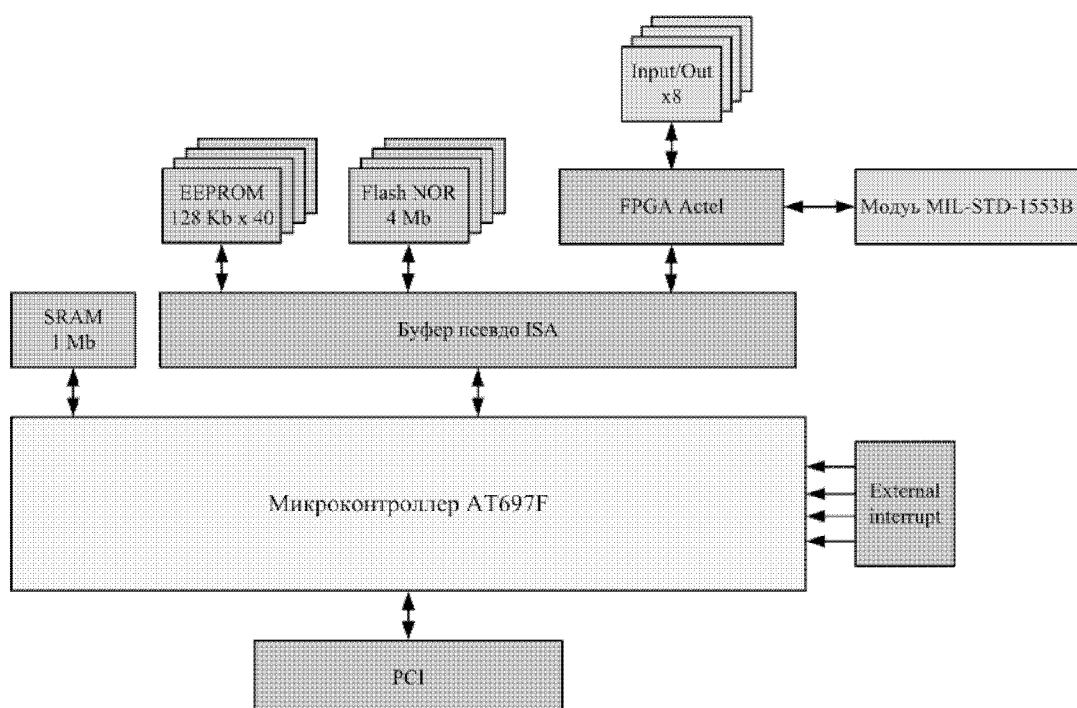
*Рисунок 1.*



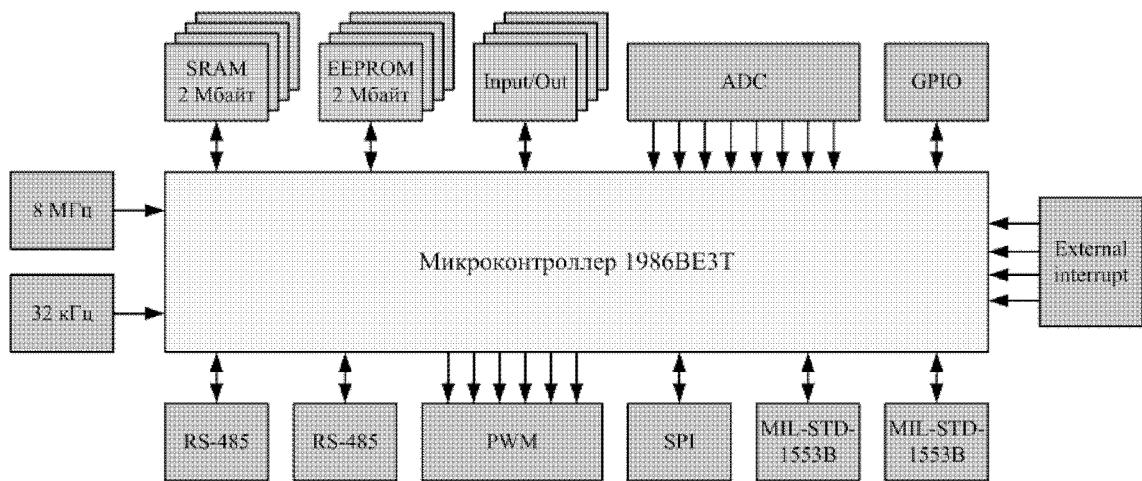
*Рисунок 2.  
Функциональная схема БУ-СР*

Данная функциональная схема была сделана с учетом возможностей процессорного модуля производства ЗАО "Элкус", чья функциональная схема представлена на рис. 3. Данный процессорный модуль практически не обладает никакими внешними интерфейсами, что приводит к появлению дополнительных модулей в БУ-СР таких, как Модуль В/В, RS-485, Модуль МКО по ГОСТ Р 52070-2003.

Проектируя процессорный модуль для блока управления, вносились изменения в имеющуюся функциональную схему с целью улучшения тактико-технических характеристик, а именно повышение надежности системы, уменьшения количества элементов электрической схемы и уменьшения габаритных размеров БУ-СР. Функциональная схема процессорного модуля включила в себя элементы ОЗУ и ПЗУ, порты ввода/вывода,



*Рисунок 3.  
Функциональная схема процессорного модуля ЗАО «Элкус»*

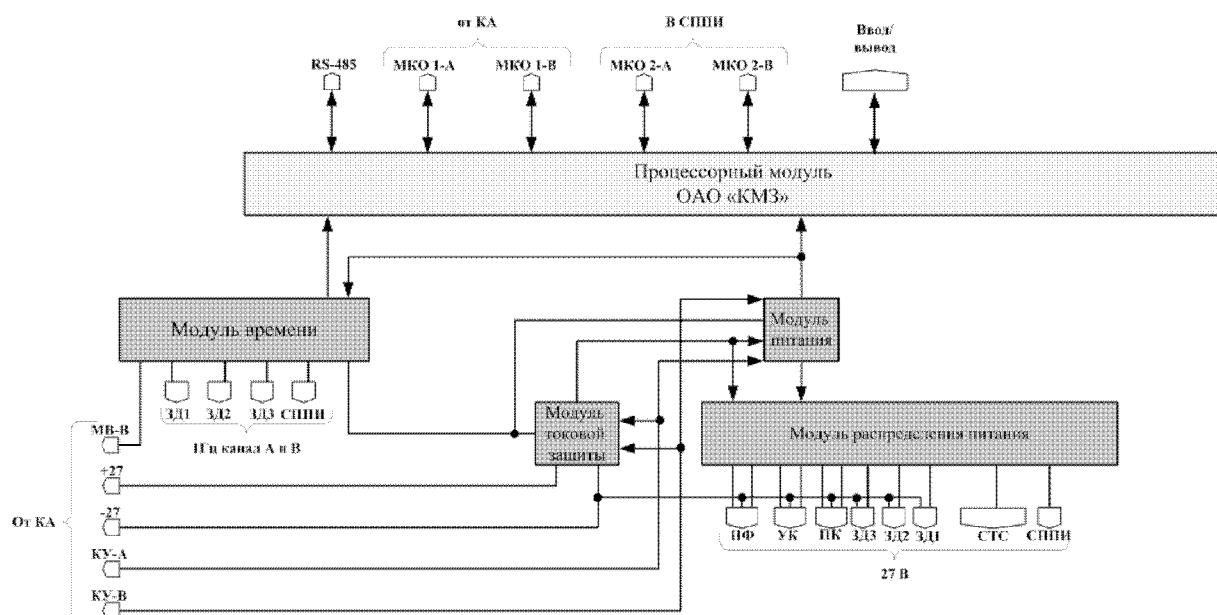


*Рисунок 4.  
Функциональная схема вновь разрабатываемого процессорного модуля*

АЦП, ШИМ, интерфейсы RS-485 и ГОСТ Р 52070-2003, SPI и линии ввода-вывода общего назначения, а так же внешние осцилляторы. Функциональная схема вновь разрабатываемого процессорного модуля представлена на рис. 4.

Использование новой функциональной схемы позволяет повысить надежность системы, сократить количество различных модулей, а именно модуль мультиплексированного канала обмена по ГОСТ Р 52070-2003, модуль приёмопередачи по каналу RS-485, модуль внешнего ввода/вывода.

Новый модуль проектируется в качестве универсального модуля для различных систем, создаваемых в будущем. В качестве микропроцессора при проектировании процессорного модуля был выбран современный 32-разрядный микроконтроллер управления пультом авиационных комплексов и радиостанций 1986ВЕ3Т производства российской компании ЗАО "Миландр". Процессор построен на высокопроизводительном ядре Cortex M-0 и способен работать на скорости до 100МГц, обладает возможностью широкого подключения периферии за счет наличия большого множества



*Рисунок 5.  
Функциональная схема БУ-СР на новом процессорном модуле*

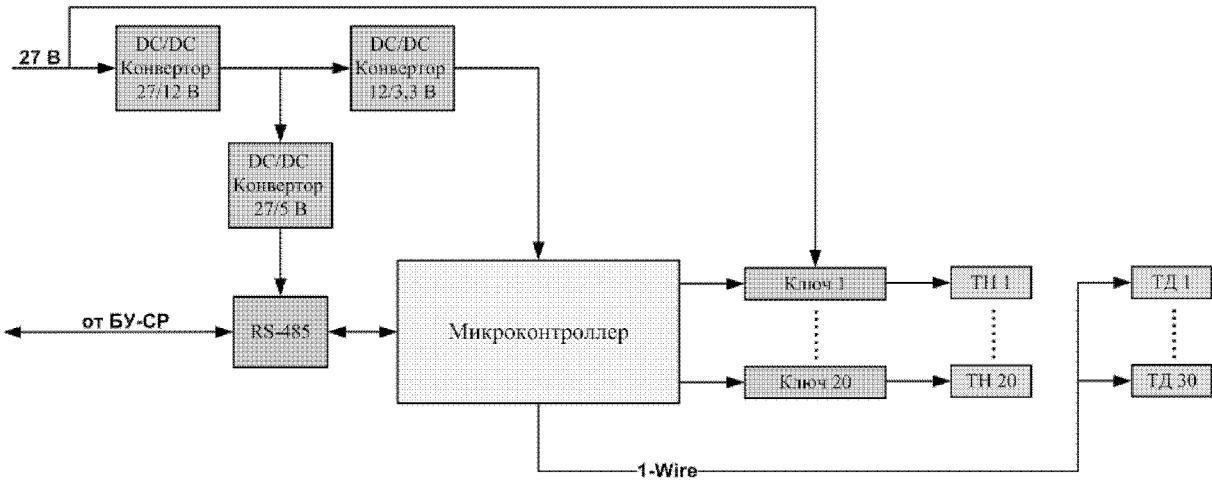


Рисунок 6 а.

*Модуль управления системой термостабилизации на микроконтроллере*

контроллеров. Так же стоит отметить, что процессор питается от 3,3 В, что положительно сказывается на энергопотреблении всего модуля.

Так же были сделаны отступления от поставленной задачи в области работы с памятью. В процессорном модуле используется современная сверхбыстрая ПЗУ типа MRAM со временем доступа 35 ns. Объема памяти в 8 Мб должно быть достаточно для выполнения любой программы, которая соответствует целям использования разрабатываемого модуля. Так же был увеличен объем оперативной памяти до 8 Мб. Выбору типа памяти так же было уделено особое внимание, ею стала SRAM - память со скоростью доступа 10 ns.

Итогом разработки нового процессорного модуля стала разработка новой функциональной схемы БУ-СР, представленная на рис. 5.

Кроме того, что сократилось количество модулей в БУ-СР, а как следствие его масса-габаритные параметры, данный процессорный модуль за счет своей универсальности позволил в процессе разработки СУ-СР кардинально пересмотреть реализацию управления системой оптико-механической. Ранее на предложенной функциональной схеме СУ-СР (рис. 1) каждый элемент системы оптико-механической через контроллер получал команды от БУ-СР. Такая реализация предполагает наличие дополнительных процессорных модулей для каждого элемента системы, а так же наличие отдельного для каждого модуля канала связи с БУ-СР. Создание нового процессорного модуля для БУ-СР позволяет создать отдельный блок управления системой оптико-механической (БУ-СОМ), который включил бы в себя процессор-

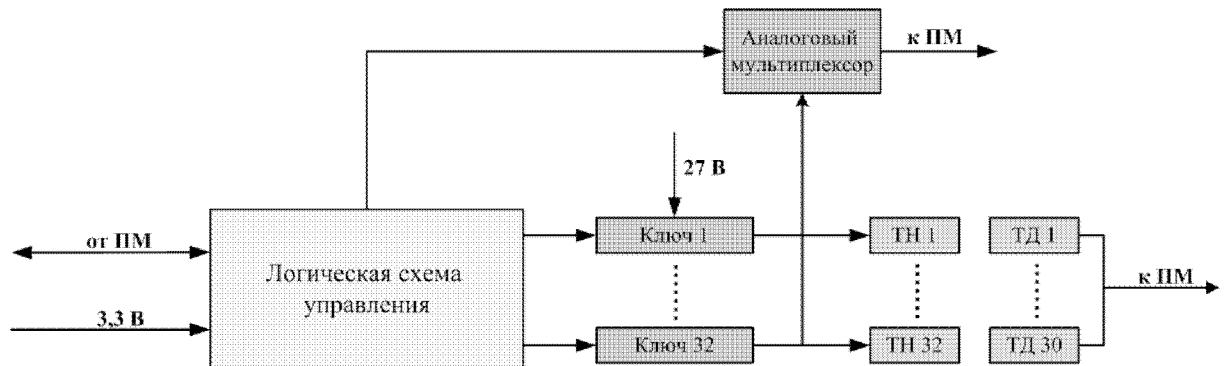


Рисунок 6 б.

*Модуль управления системой термостабилизации на логических элементах*



*Рисунок 7.  
Функциональная схема управления системой оптико-механической*

ный модуль и 4 модуля управления оконечными устройствами, построенных с применением логических элементов. Такая схема заметно упрощает производство модуля, его макетирование и дальнейшее применение. Пример преобразования модулей управления оконечными устройствами системы оптико-механической представлены на примере изменения модуля управления системой терmostабилизации, управляемый микроконтроллером в модуль, построенный на логических элементах. Их функциональные схемы изображены на рис. 6.

Функциональная схема БУ-СОМ представлена на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании процессорного модуля для блока управления аппаратурой среднего разрешения удалось создать универсальный процессорный модуль. Данный модуль возможно использовать непосредственно в самом БУ-СР, улучшив его характеристики, а так же на его основе представляется возможным создание различных систем управления аппаратурой космического аппарата, таких как блок управления системой оптико-механической или блок запоминающих устройств с подключением внешних носителей информации практически неограниченного объема.

## Список литературы:

1. Дворкин Б.А., Дудкин С.А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли //Геоматика. -2013. - №2. - С. 16-36.
2. Седельников В.П., Лукашевич Е.Л. Использование орбитальных группировок КА ДЗЗ в интересах картографии России //Геоматика. -2013. - №2. - С. 66-69.
3. Эскизный проект широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего пространственного разрешения, книга 2 часть 1 "Управление и контроль АСР"- ОАО "Красногорский завод им.С.А.Зверева".
4. Спецификация на микроконтроллер 1986ВЕ3Т, ЗАО "ПКК Миландр" ТСКЯ.431296.009СП Версия 2.10.0. от 24.04.13г.
5. Алямкин Д.И., Анучин А.С., Дроздов А.В., Козаченко В.Ф., Тарасов А.С., Козаченко В.Ф. Встраиваемые высокопроизводительные цифровые системы управления - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - 270 с.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.2 Пер. с англ. 4-е изд. перераб. И доп. - М.: Мир, 1993. - 371 е., ил.
7. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.3 Пер. с англ. 4-е изд. перераб. И доп. - М.: Мир, 1993. - 367 е., ил.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗЕРКАЛ

КУРБАТОВ С.И. - оператор научной роты войск ВКО,  
НИКУЛИН А.В. - оператор научной роты войск ВКО,  
ВОРОНА Ю.В. - оператор научной роты войск ВКО,  
СЕНИК Б.Н. - доктор технических наук, профессор

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

В статье рассмотрены основные материалы, применяемые для изготовления прецизационных крупногабаритных зеркал. Проведен сравнительный анализ ситалла СО-115М, являющегося одним из широко используемых материалов для изготовления прецизационных крупногабаритных зеркал, и карбида кремния, который является одним из перспективных материалов для изготовления зеркал. Описаны методы получения карбида кремния и его основные свойства.

## ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение дальнего космоса, поверхности Земли осуществляют оптико-электронные приборы космического базирования, основу которых составляют оптические телескопы различных конструкций, но абсолютно все телескопы имеют один общий, ключевой элемент - зеркало. Этот элемент определяет основные выходные оптические характеристики оптико-электронных приборов и комплексов.

Поэтому в настоящее время проблемы, связанные с разработкой, созданием и исследованием крупногабаритных облегченных зеркал [1], простых и технологичных в изготовлении, имеющих приемлемые весовые и жесткостные характеристики, являются одними из актуальных в современной науке и технике, их решению уделяется большое внимание.

За последние 15 лет требования к зеркалам претерпели серьезные изменения: расширились рабочие спектральные диапазоны, ужесточились требования к качеству оптических поверхностей зеркал, наряду с перечисленными требованиями, добавились требования по массогабаритным параметрам.

В целом требования к зеркалам зависят от их назначения. Однако есть требование общее: зеркало, изготовленное в соответствии с чертежом, в процессе эксплуатации должно сохранять высокую геометрическую стабильность в условиях значительных температур и инерционных перегру-

зок, а также сохранять высокое качество отражающей поверхности.

Выбор материала зеркал является ключевой задачей при создании оптических объектов нового поколения [2].

Материал для зеркал должен отвечать следующим требованиям:

1. Обеспечивать сохранение формы отражающей поверхности при изменении температуры. Количественная оценка качества материала с учетом теплофизических свойств характеризуется коэффициентом Максутова:

$$\Psi = (E/\rho) \cdot (\lambda/C\alpha), \quad (1)$$

где  $E$  - модуль упругости;  $\lambda$  - теплопроводность;  $\rho$  - плотность материала;  $C$  - теплоемкость;  $\alpha$  - коэффициент линейного расширения.

Чем больше коэффициент  $\Psi$ , тем меньше термические деформации детали и тем выгоднее применять рассматриваемый материал.

2. Обладать максимальной жесткостью, т.е. способностью противостоять деформациям прогиба под действием сил тяжести и внешних нагрузок.

3. Иметь минимальную плотность  $\rho$ , что особенно важно для зеркал приборов, устанавливаемых на космических аппаратах.

4. Материал должен быть стабилен во времени.

5. Материал должен легко поддаваться шлифованию и полированию.

## МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗЕРКАЛ

В табл. 1 представлены характеристики материалов, применяемых для изготовления зеркал.

Из таблицы видно, что карбид кремния и ситалл являются наиболее приоритетными материалами для изготовления зеркал по совокупности физико-технических характеристик.

До 1996 года лидером на мировом рынке среди материалов, применяемых для изготовления зеркал, была стеклокерамика Zerodur производства немецкой фирмы "SCHOTT".

После на мировой рынок вышел российский материал для изготовления зеркал [3], как для телескопов наземного базирования, так и для космических телескопов - ситалл СО-115М, отличительными качествами которого являются высокая надежность и эффективность. Кроме того, стоимость его значительно ниже стоимости материала Zerodur.

Ситалл СО-115М имеет уникальное свойство - низкий, близкий к нулю коэффициент термического расширения, позволяющий сохранить стабильную форму рабочей поверхности изготовленных зеркальных оптических элементов независимо от изменения температуры окружающей среды.

Наиболее приоритетным материалом для изготовления зеркал является карбид кремния.

Карбид кремния (SiC) признан в мире как вы-

сокоперспективный материал для разработки зеркальных подложек и всех конструкционных элементов телескопов, благодаря его многим привлекательным свойствам, таким как:

- высокая удельная жесткость (высокая жесткость и низкая плотность);
- малая тепловая чувствительность (низкий коэффициент термического расширения и высокая теплопроводность);
- очень прочный и жесткий материал, позволяющий иметь малые механические допуски в микронном диапазоне, которые нужно достигнуть, и хорошие характеристики для фигурирования и полирования зеркал.

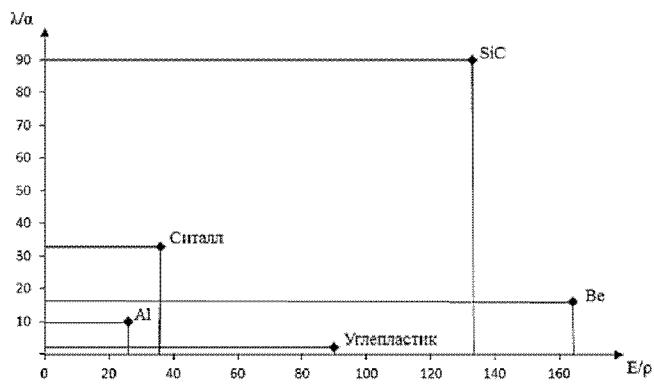
Очень высокие характеристики SiC по сравнению с другими материалами, обычно используемыми для зеркал, иллюстрируются на рис. 1.

SiC намного превосходит другие материалы - кандидаты для зеркал благодаря своей несравненной термопрочности, связанной с удельной жесткостью.

Сочетание очень низкого коэффициента термического расширения сравнимого с инваром, с очень высокой теплопроводностью, сравнимой с бериллием, дает возможность конструировать сборки, выполненные только из SiC, которые почти не чувствительны к вариациям температуры и температурному градиенту. Его очень высокая жесткость, сравнивая с бериллием, в сочетании с отно-

**Таблица 1.**  
*Характеристики материалов, применяемых для изготовления зеркал*

Характеристики	Карбид кремния	Бериллий	Ситалл (СО-115М)	Алюминий	Углепластик
Плотность, $\rho$ , $\text{г}/\text{см}^3$	3,14	1,85	2,53	2,73	1,5
Модуль упругости, $E$ , ГПа	420	300	91	71	135
$KTP, \alpha, 10^{-6} \text{K}^{-1}$	2	11,4	0,05	24	1,015
Теплопроводность, $\lambda$ , $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$	180	180	1,6	237	2,3
Теплоемкость, $C$ , $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	680	1880	821	900	1400
Термостабильность, $\lambda / \alpha$	90	16	33	10	2,2
Жесткость, $E/\rho$	133	164	36	26	90
Электропроводность	+	+	-	+	-
Экология	+	Опасен	+	+	+
Размерная стабильность	+	+	+	Старение	Летучий остаток



**Рисунок 1.**  
Показатель качества материалов  
 $\lambda/\alpha$ - термостабильность,  $E/\rho$  - удельная жесткость)

сительно низкой плотностью, сравнимой с алюминием, позволяет, с другой стороны, делать конструкции из очень легких элементов.

В технологии карбидокремниевой керамики обычно используют горячее прессование и реакционное спекание.

Метод горячего прессования позволяет получать материалы с плотностью близкой к теоретической и с высокими механическими свойствами. Прессование проводят обычно в прессформах из графита или нитрида бора при давлениях 10-50 МПа и температурах 1700-2000°C. Высокая стабильность кристаллических решеток тугоплавких неметаллических соединений, связанная с наличием жестких направленных ковалентных связей, определяет низкую концентрацию и подвижность дефектов решетки, заторможенность в ней диффузионных процессов. Это затрудняет протекание процесса диффузионно-вязкого течения, ответственного за массоперенос и уплотнение при твердофазном спекании. Учитывая это, перед прессованием в керамику вводят активирующие спекание добавки или проводят физическое активирование (используют ультрадисперсные порошки, обрабатывают их взрывом для увеличения дефектности, удаляют с поверхности влагу и оксидные слои и т.д.).

Метод горячего прессования позволяет получать только изделия довольно простой формы и относительно небольших размеров. Получать изделия сложной формы с высокой плотностью можно методом горячего изостатического прессования. Материалы, полученные методами обычного и изостатического горячего прессования, близки по

своим свойствам. Путем проведения горячего изостатического прессования при высоких давлениях газовой среды (1000 МПа), препятствующих диссоциации тугоплавких неметаллических соединений, удается повысить температуру процесса до уровня, при котором обеспечивается их пластическая деформация.

Для получения изделий из карбида кремния также широко используется метод реакционного спекания, который позволяет проводить процесс при более низких температурах и получать изделия сложной формы. Для получения так называемого "самосвязанного" карбида кремния проводят спекание прессовок из SiC и углерода в присутствии кремния. При этом происходит образование вторичного SiC и перекристаллизация SiC через кремниевый расплав. В итоге образуются беспористые материалы, содержащие 5-15% свободного кремния в карбидокремниевой матрице. Методом реакционного спекания получают также керамику из SiC, сформованную литьем под давлением. При этом шихту на основе кремния и других веществ смешивают с расплавленным легкоплавким органическим связующим (парафином) до получения шликерной массы, из которой затем отливают под давлением заготовку. Затем изделие помещают в науглероживающую среду, в которой сначала производят отгонку легкоплавкого связующего, а затем сквозное насыщение заготовки углеродом при температуре 1100°C. В результате реакционного спекания образуются частицы карбида кремния, которые постепенно заполняют исходные поры. Затем следует спекание при температуре 1300°C. Реакционное спекание является экономичным процессом благодаря применению недорогого термического оборудования, температура спекания снижается с обычно применяемой 1600-2000°C до 1100-1300°C.

Кроме описанных способов получения технической керамики из SiC, используются и другие. Методом испарения SiC и его последующей сублимации при 2100-2300°C без использования связок и активирующих добавок получают так называемый рекристаллизационный карбид кремния.

Последнее десятилетие интерес к зеркалам из карбида кремния очень велик во всем мире, т.к.

альтернативы в ряде случаев нет. Это подтверждается следующей информацией.

За последние 10 лет крупногабаритные облегченные зеркала из карбида кремния вошли в состав десятков телескопов космического и наземного базирования США, Японии, ЕС, Канады и др. Ниже приводится далеко не полный перечень этих телескопов.

1. Космическая обсерватория Гершеля Европейского космического агентства (ESA) оснащена телескопом с облегченным зеркалом из карбида кремния диаметром 3,5 м (рис. 2).

2. Японский космический инфракрасный телескоп для космологии и астрофизики (SPICA) выполнен целиком из карбида кремния.

3. Сверхбольшие телескопы (СБТ). Самый перспективный из них, несомненно, проект ОБТ ЕЮО (ошеломляюще большой телескоп Европейской Южной Обсерватории), который, как предполагают, будет иметь апертуру 100 метров в диаметре. Зеркала собираются из гексагональных карбидокремниевых сегментов с облегченной конструкцией диаметром описанной окружности 1000-1200 мм.

4. Инфракрасный телескоп на астрономическом спутнике ASTRO-F оснащен зеркалами из карбида кремния ( $\varnothing$ 160 и  $\varnothing$ 700 мм).

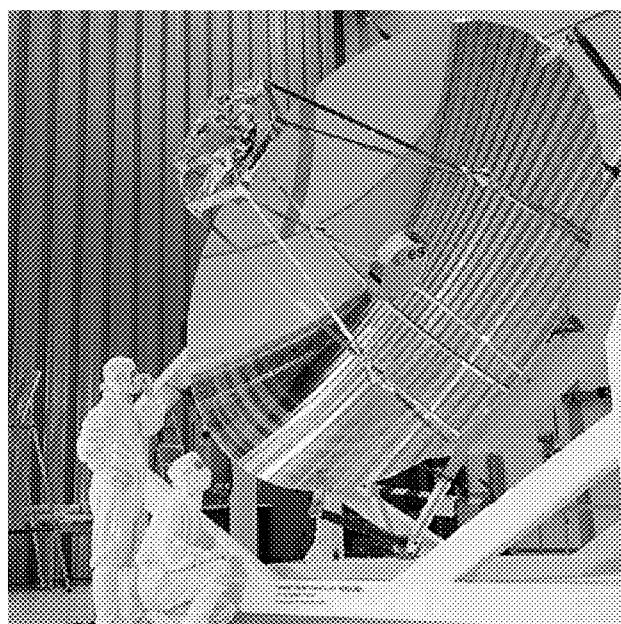


Рисунок 2.

Зеркало телескопа Гершеля из карбида кремния

5. Карбид кремния используется для вторичных зеркал 8-ми метрового телескопа (VLT) ESO.

6. Институт астрофизики Херцберга и AMEC Dynamic Structures Ltd и группы некоторых других канадских университетов сейчас находятся на начальных этапах конструирования нового 20-25 метрового наземного оптического телескопа, называемого Большим оптическим телескопом (БОТ). Зеркало будет собираться из карбидокремниевых облегченных сегментов (340 шт.).

7. Европейское космическое агентство (ESA) в рамках международной миссии Rosetta готовит к запуску в космос телескоп с узкоугловой камерой OSIRIS, целиком выполненной из карбида кремния.

8. Главное зеркало телескопа SOFIA, установленного на модифицированном самолете Боинг 747SP, в соответствии с программой Исследовательского центра AMEC НАСА имеет диаметр 2,7 м и изготовлено из карбида кремния.

Необходимо обратить внимание на то, что основные компоненты телескопов полностью выполнены из карбида кремния: и зеркала, и несущая конструкция, что в конечном итоге позволяет создать современную размерно-стабильную несущую конструкцию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения высококачественных изображений в широком диапазоне рабочих температур и термических воздействий зеркало должно обладать высокой удельной жесткостью, теплопроводностью, низким температурным коэффициентом линейного расширения и высокой степенью отражения в требуемом интервале длин волн.

Использование карбида кремния в качестве основного материала при создании зеркал космического назначения имеет бесспорные преимущества практически перед всеми, известными в настоящее время, материалами.

### Список литературы:

1. Архипов С.А. Проектирование крупногабаритных высокоточных облегченных зеркал: Аналитический обзор №5593. - НТЦ "Информтехника", 2004. - 106 с.
2. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика - Спб.: Политехника, 2004. - 679 с.
3. Максутов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики - 2-е изд. - М: Наука, 1984. - 272 с.

# РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНЫХ СТЕКОЛ ПРИБОРА УПРАВЛЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО САМОЛЕТА

ВОЕВОДА А.Н. - оператор научной роты войск ВКО,  
КРЕЧМЕР Г.А. - оператор научной роты войск ВКО,  
ПЕТРЕНКО В.Н - заместитель начальника отдела НТЦ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В статье рассмотрены проблемы проектирования и конструирования защитных стекол прибора управления оптико-электронной системы для перспективного самолета. Предложен вариант функциональной схемы прибора управления и различные варианты схемы компоновки его защитных стекол и интеграции их в фюзеляж самолета. Также приведен обзорный анализ материалов для защитных стекол и выбран материал для их применения.*

## ВВЕДЕНИЕ

При широком перевооружении и модернизации Российской армии остро встает вопрос о создании современного оружия и оснащения обзорно-прицельных комплексов для войск ВВС.

Необходимость создания и совершенствования оптико-электронных систем является одной из приоритетных задач.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОБОЗНАЧЕНИЯ

Необходимость создания оптико-электронных систем продиктована актуальностью этой задачи, в частности тем, что существующие аналоги устарели и для вооружения самолетов требуются более современные, компактные и модернизированные системы.

Современный боевой многофункциональный самолет не может обойтись без оптико-электронной системы, которая работает всепогодно и круглосуточно в пассивном скрытом режиме без демаскирующего излучения, обеспечивая экипаж всей необходимой информацией для ведения боевых операций.

Современные оптико-электронные системы - это многофункциональные системы круглосуточного применения, в которых используются, как правило, три информационных канала. Первый - телевизионный канал дневного действия, построенный на приборах с зарядовой связью (ПЭС-матрицах). Второй - тепловизионный канал ночного действия, работающий в ИК-диапазоне (3-5 или

8-12 мкм). Третий канал условно представлен лазерным дальномером-целеуказателем и пеленгатором лазерного пятна, работающим длине волны 1,06 и 1,57 мкм.

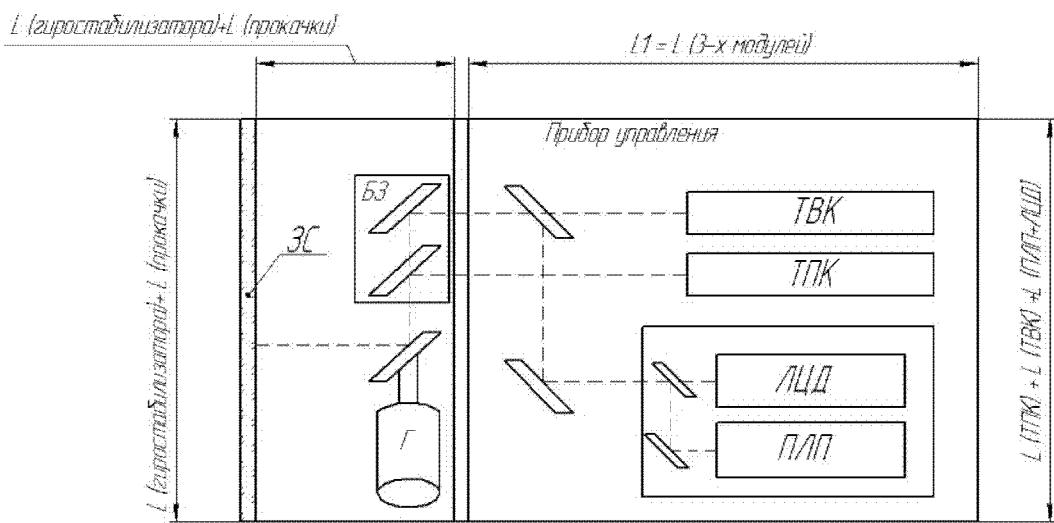
Основная цель работы - разработка эскизного проекта возможности создания оптико-электронной системы; проработка методов и расчетов составных частей; определения габаритов составных частей и корпуса прибора управления; проработка их компоновки; минимизация прибора управления.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Одной из основных составляющих системы является прибор управления. На основе известных данных и технического задания была разработана функциональная схема встраиваемого прибора управления, которая представлена на рис. 1.

На данном рисунке изображено схематичное расположение телевизионного и тепловизионного канала (ТВК и ТПК), соединенных в одном корпусе лазерного целеуказателя-дальномера (ЛЦД) и пеленгатора лазерного пятна (ПЛП), гиростабилизатора (Г), блока зеркал (БЗ) и защитных стекол (ЗС) прибора управления.

Одной из составляющих прибора управления являются защитные стекла. Они предохраняют оптико-электронную прицельную систему от попадания в нее пыли, грязи, атмосферной влаги и механических повреждений. Защитные стекла прибора управления должны иметь высокие механи-



*Рисунок 1.  
Функциональная схема прибора управления  
оптико-электронной прицельной системы*

ческие и оптические свойства. Они должны обладать высокой твердостью для предотвращения появления на них царапин и других повреждений, которые могут быть вызваны полетом. Допустимое количество механических повреждений определяется допустимым количеством вредного рассеянного света, который создаётся этими дефектами. Защитные стёкла должны иметь высокий коэффициент пропускания в видимом (0,4-0,9 мкм) и инфракрасном (3-5 или 8-12 мкм) диапазонах длин волн. Также защитные стекла должны быть просты в плане технологического изготовления и удовлетворять экономическим соображениям.

Рассмотрим материалы для разработки защитных стекол прибора управления. В табл. 1 и табл. 2 приведены сравнительные характеристики рассматриваемых материалов (наиболее значимыми из которых являются флюорит, лейкосапфир, селенид цинка и клиртран).

### ФЛЮОРИТ

Материал  $\text{CaF}_2$  нашел широкое применение в оптических компонентах мощных лазеров, благодаря своей спектральной характеристике, низкому коэффициенту поглощения и показателю преломления.

*Таблица 1.  
Сравнительные оптические характеристики материалов  
для защитных стекол прибора управления*

	Флюорит ( $\text{CaF}_2$ )	Селенид цинка ( $\text{ZnSe}$ )	Фторид Лития ( $\text{LiF}$ )	Лейкосапфир ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Фторид бария ( $\text{BaF}_2$ )	Фторид Магния ( $\text{MgF}_2$ )	Клиртран ( $\text{ZnS}$ )
Диапазон пропускания (мкм) ( $L=1,06$ мкм)	0,13-10,00	0,50-20,00	0,12-8,50	0,17-5,50	0,15-12,00	0,12-7,00	0,37-14,00
Потери на отражение	5,4%	29,1%	5,3%	14,0%	6,5%	5,7%	24,0%
Коэффициент поглощения ( $\text{см}^{-1}$ ) ( $L=3-4$ мкм)	$7,8 \times 10^{-4}$ (2,7)	$30 \times 10^{-4}$	—	$3 \times 10^{-3}$ (2,7)	$3,2 \times 10^{-4}$ (6)	$4 \times 10^{-4}$ (2,7)	$6 \times 10^{-4}$

**Таблица 2.**  
**Сравнительные технические характеристики материалов**  
**для защитных стекол прибора управления**

	Флюорит (CaF <sub>2</sub> )	Селенид цинка (ZnSe)	Фторид лития (LiF)	Лейкосапфир (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Фторид бария (BaF <sub>2</sub> )	Фторид магния (MgF <sub>2</sub> )	Клеритран (ZnS)
Плотность (г/см <sup>3</sup> )	3,18	5,27	2,64	3,97	4,89	3,18	4,09
Температура плавления (°C)	1360	1525	870	2040	1386	1255	1827
Коэффициент теплопроводности (Вт/(м*K))	9,71	—	—	27,21 (при 300 K)	11,72	21,00	27,20
Твердость по Кнутпу (кг/мм <sup>2</sup> )	15,83 (нагрузка 50 г)	120,00 (нагрузка 50 г)	11,30 (нагрузка 500 г)	50,00 (нагрузка 50 г)	8,20 (нагрузка 50 г)	—	160,00 (нагрузка 50 г)
Удельная теплоемкость (Дж/(кг*K))	854	339	1562	419	410	1003	—
Модуль Юнга (ГПа)	75,8	67,2	64,8	335,0	53,1	138,0	74,5
Модуль сдвига (ГПа)	33,77	—	55,14	148,10	25,40	54,66	—
Модуль объемной деформации (Гпа)	82,71	40,00	62,03	240,00	56,40	101,32	—
Предел упругости (МПа)	36,54	55,10	11,20	275,00	26,90	49,60	68,90
Коэффициент Пуассона	0,26	0,28	0,33	0,25	0,34	0,28	0,28
Молекулярный вес	78,08	144,33	25,94	101,96	175,36	62,32	97,43
Цена (d25мм x 3мм)	3765 руб	—	—	2780 руб	—	—	11225 руб

Из-за невысокого показателя преломления изделия из CaF<sub>2</sub> могут использоваться без просветляющих покрытий.

Одно из преимуществ CaF<sub>2</sub> по сравнению с другими фторидами BaF<sub>2</sub>, LiF и MgF<sub>2</sub> - это малая растворимость в воде при комнатных температурах. При нормальных условиях эксплуатации (влажности и температуре) полированные поверхности CaF<sub>2</sub> остаются стабильными в течение нескольких лет. Кристаллический CaF<sub>2</sub> выращивается в вакууме методом Стокбаргера.

Материал CaF<sub>2</sub> инфракрасного ИК качества выращивается из кристаллов флюорита, доступного в большом количестве в природных месторождениях. CaF<sub>2</sub> ИК качества используется в види-

мом и ИК диапазонах и имеет невысокую цену. CaF<sub>2</sub> ИК поставляется в двух видах: монокристаллический и поликристаллический, последний - более дешевый.

CaF<sub>2</sub> имеет еще лучшую прозрачность в УФ диапазоне, например, пропускание полированной пластины из CaF<sub>2</sub> толщиной 3мм на длине волны (190-200) нм >85%.

### ЛЕЙКОСАПФИР

Оптический сапфир используется для изготовления плоскопараллельных пластин (окон), линз, труб, стежней и неволоконных световодов.

Монокристаллический сапфир (оптический лейкосапфир) обладает уникальной комбинацией превос-

ходных оптических, физических и химических свойств. Самый твердый из оксидов, кристалл сапфира сохраняет свои качества при высоких температурах, имеет хорошие теплофизические свойства и превосходную прозрачность. Он химически устойчив ко многим кислотам и щелочам при температурах вплоть до 1000°C, а также к HF ниже 300°C. Эти свойства обуславливают широкое применение лейкосапфира в агрессивных средах, когда требуется оптическая прозрачность в диапазоне от видимого до ближнего ИК спектра.

В настоящее время большинство кристаллов выращивают из расплава. Наиболее подходящие для выращивания из расплава вещества плавятся без разложения, не имеют полиморфных переходов и характеризуются низкой химической активностью. Кристаллизация из расплава применяется в наиболее распространенных способах выращивания монокристаллов сапфира, это метод горизонтально направленной кристаллизации (ГНК) и метод Степанова.

Метод Степанова используется для выращивания монокристаллических сапфировых деталей различной конфигурации, в том числе сапфировых стержней, труб и лент.

В методе ГНК удачно сочетаются элементы направленной кристаллизации и зонной плавки. Если при обычном способе выращивания из расплава плавится вся шихта, то в методе ГНК создается локальная расплавленная зона между затравочным кристаллом и поликристаллическим агрегатом (шихтой). Кристалл растет при медленном перемещении этой зоны вдоль контейнера с шихтой, имеющей форму лодочки. Способ горизонтально направленной кристаллизации обеспечивает получение монокристаллов с малым разбросом размеров поперечного сечения и позволяет выращивать сапфир любой кристаллографической ориентации в виде пластин рекордных размеров, недостижимых при использовании других ростовых методов.

Сапфировые изделия применяются во многих отраслях в качестве оптических деталей (окон, пластин, линз, световодов), высокотемпературных подложек, деталей точной механики, колб ламп высокого давления, а также в медицинской технике, например, для изготовления костных протезов.

Сапфировая оптика, в том числе сапфировые плоскопараллельные пластины (окна), пользуется

высоким спросом на оптическом рынке в связи с переходом на многоканальные системы наблюдения в видимом и ближнем ИК диапазоне.

## КЛИРТРАН

Оптический материал - кристаллический сульфид цинка ( $ZnS$ ) имеет хорошее пропускания в спектральном диапазоне (0.4 - 13.5) мкм и используется для производства инфракрасной ИК оптики ( $ZnS$  окна и  $ZnS$  линзы), работающей в диапазоне (8 - 13) мкм. Кроме того,  $ZnS$  материал используется в оптических системах инфракрасного диапазона, юстировка которых, как правило, выполняется в видимом диапазоне. CVD- $ZnS$  (Chemical Vapor Deposition  $ZnS$ ) сульфид цинка выращивается путем осаждения из паров цинка и газа  $H_2S$  на графитовую подложку. По своей структуре CVD- $ZnS$  (сульфид цинка) - поликристаллический материал, размер микрокристаллов является управляемым параметром, которыйарьируется в процессе производства с целью получения максимальной прочности. Для улучшения пропускания CVD- $ZnS$  сульфида цинка в среднем ИК спектральном диапазоне материал обрабатывается методом горячего прессования.

Обычно изготавливает из  $ZnS$  сульфида цинка ИК оптику: заготовки, окна, защитные окна - пластины, обтекатели, клинья, линзы и мениски для инфракрасного диапазона спектра.

## ФТОРИД БАРИЯ

Фторид бария ( $BaF_2$ ) выращивается вакуумным методом Стокбаргера. С использованием алмазных паст фторид бария ( $BaF_2$ ) полируется более быстро, чем фторид кальция ( $CaF_2$ ), но менее просто с точки зрения получения оптической поверхности, свободной от ласин. Фторид бария менее устойчив к влажности, чем  $CaF_2$ . Явное водное разъедание происходит при 500°C, но в сухой среде материал может использоваться вплоть до 800°C. Фторид бария ( $BaF_2$ ) является относительно жестким материалом, но при этом имеет высокую чувствительность к тепловым ударам.

Относительно недорогая стоимость фторида бария( $BaF_2$ ) позволяет использовать этот материал как альтернативу селениду цинка ( $ZnSe$ ) и германию ( $Ge$ ) в CO и CO<sub>2</sub> лазерах небольшой мощности.

Фторид бария ( $\text{BaF}_2$ ) разделяют по уровню пропускания, наличию и размерам пузырей и включений на три категории: фторид бария инфракрасный (ФБИ), фторид бария для видимого диапазона (ФБВ) и фторид бария ультрафиолетовый (ФБУ).

### ФТОРИД МАГНИЯ

Изделия из  $\text{MgF}_2$  (фтористый магний, фторид магния) используются в спектральном диапазоне: 0.11 мкм - 7.5 мкм.  $\text{MgF}_2$  (фтористый магний) - износостойкий твердый материал, устойчивый к тепловым и механическим нагрузкам. Из фтористого магния изготавливают оптические компоненты для УФ, видимого и ИК-диапазонов, когда требуется высокая износостойчивость и долговечность. Воздействие излучения на материал не приводит к появлению в нем центров окраски. Раскалывание материала достигается при значительной механической нагрузке и, когда это происходит, является почти идеальным.

$\text{MgF}_2$  (фтористый магний) встречается в природных месторождениях и известен как минерал Селлайт (Sellait). Фтористый магний - положительный двулучепреломляющий кристалл, выращивается в вакууме методом Стокбаргера с кристаллической затравкой вдоль оси С. Максимальные размеры изделий из  $\text{MgF}_2$ : диаметр до 100 мм и толщина до 30 мм.

### ФТОРИД ЛИТИЯ

Кристаллический  $\text{LiF}$  (фторид лития) необходимо использовать с осторожностью в условиях повышенной влажности и высокой плотности излучения. Кристаллический  $\text{LiF}$  (фтористый литий) разрушается во влажной атмосфере при температуре 400° С и размягчается при температуре 600° С. Материал  $\text{LiF}$  (фтористый литий) чувствителен к тепловым нагрузкам. Воздействие излучения вызывает появление у фтористого лития центров окраски. Хотя оптические характеристики кристаллического  $\text{LiF}$  (фтористый литий) являются привлекательными, структура материала не совершенна и его раскалывание затруднительно. Кристаллический  $\text{LiF}$  (фтористый литий) выращивается в вакууме методом Стокбаргера, предельный диаметр изделий до 115 мм. Улучшенная структура кристаллического  $\text{LiF}$  (фтористый литий), необходимая, в частности, при производстве плас-

тин монохроматоров, достигается выращиванием по методу Кирополоса. Раскалывание кристалла, как правило, происходит по плоскости (100), в редких случаях - по плоскости (110).  $\text{LiF}$  фтористый литий) - пластичный материал и может быть изогнут в виде сферической поверхности.

### СЕЛЕНИД ЦИНКА

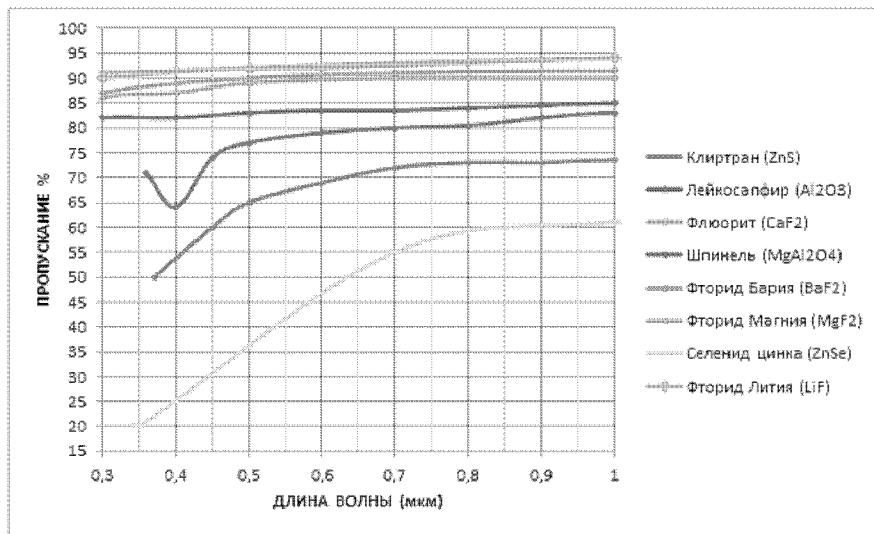
Селенид цинка (CVD-ZnSe) используется для изготовления оптических изделий (окон, линз, призм, зеркал и обтекателей), работающих в видимом и ИК спектральном диапазоне (0.5-22.0) мкм в оптических системах специального назначения и лазерной  $\text{CO}_2$  оптике. CVD ZnSe имеет высокие значения коэффициента пропускания, прочности, твердости, оптическую однородность, широкую область прозрачности, эрозионную и термическую стойкость.

Поликристаллический CVD-ZnSe (селенид цинка) получают в реакторах - установках, использующих процессы химического осаждения вещества из газовой фазы. Аббревиатура CVD означает Chemical Vapour Deposition. CVD-ZnSe осаждается на графитовую подложку, исходные реагенты пары цинка и газ селеноводород  $\text{H}_2\text{Se}$ . CVD метод позволяет получить поликристаллический ZnSe с низким содержанием примесей и структурных дефектов. Размер зерна поликристаллического CVD ZnSe может быть от 20 до 150 мкм, этот фактор зависит от параметров проведения процесса (температуры, давления и концентраций реагентов) и изменяется по длине реактора.

Анализируя характеристики материалов, в первую очередь следует рассматривать зависимость пропускания от длины волны. Для телевизионного канала оптико-электронной системы видимый диапазон длин волн составляет 0,4-0,9 мкм.

Для тепловизионного канала оптико-электронной системы, исходя из конструктивных соображений, диапазон ИК длин волн должен составлять от 3 до 5 мкм. Следует выбирать материал, демонстрирующий высокий показатель пропускания на обоих участках.

Из числа рассмотренных материалов стоит отметить лейкосапфир, наиболее подходящий материал для изготовления защитных стекол прибора управления. Фторид бария, фторид лития и



*Рисунок 2.  
График зависимости пропускания материалов ЗС ПУ длина волны (0,4-0,9 мкм)*

Фторид магния - легко растворимы в воде при комнатных температурах (порядка 0,17 г на 100 г воды). Селенид цинка и клиртран имеют низкое пропускание в видимом диапазоне. Фторид Кальция имеет низкую твердость, что не допустимо для материала защитных стекол пульта управления. Лейкосапфир имеет допустимые показатели пропускания на длинах волн от 3 до 5 (наименьший показатель пропускания 60%) и высокую твердость, как материал для защитных стекол.

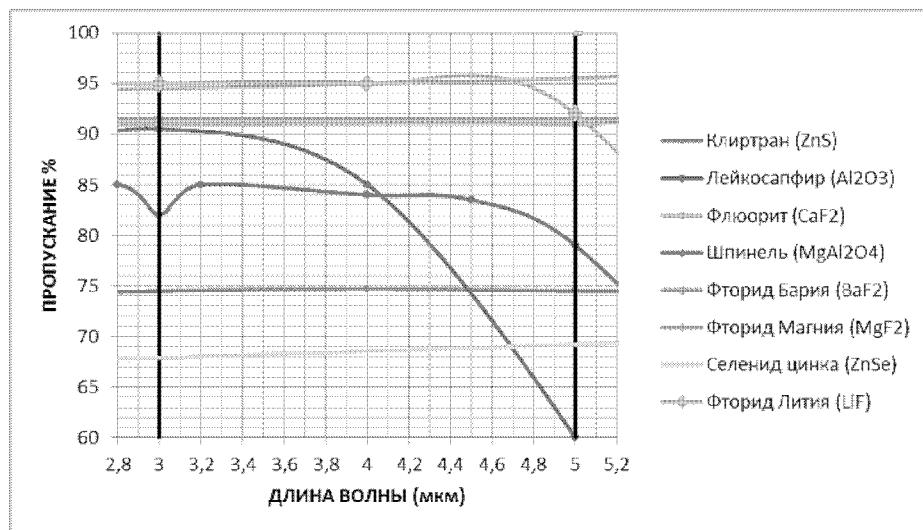
Также были рассмотрены такие материалы, как пластмассы, в том числе поликарбонат, плексиглас, плексима, CR-39, RAV, трайвекс, ПММА, зеонекс, полистирен, NAS, Optores, Aptron F, полиолефин. Данные материалы имеют высокую твердость и удобны в технологическом изготовлении, однако они имеют узкий диапазон длин волн, на котором показатель пропускания больше 80% (около 0,3-2,7 мкм).

Существуют несколько вариантов установки прибора управления с защитными стёклами. Первый - прибор управления с защитными стёклами встроен в фюзеляж самолёта и закрыт дополнительными световыми люками, закреплёнными в носовой части самолёта. Достоинствами такого варианта является исключение негативного влияния аэродинамических воздействий (вибрация, тепловое воздействие), которые могут передаваться на каналы технического зрения, а также повышение эксплуатационных свойств объекта в части замены только наруж-

ных световых люков при механическом повреждении. Очевидным недостатком такого варианта является увеличение потерь на поглощении светового потока минимум в два раза. Второй вариант - прибор управления с защитными стёклами встроен в фюзеляж самолета, при этом защитные стёкла выходят наружу. Главным достоинством этого варианта является снижение потерь на поглощении, а недостатками - повышение негативных влияний аэродинамических воздействий и снижение эксплуатационных свойств объекта. Третий вариант, являющийся достаточно перспективным, - прибор управления и колпак с защитными стёклами конструктивно совместно не закреплены. Прибор управления встраивается в носовую часть фюзеляжа, а колпак с защитными стёклами закреплён снаружи. Преимуществом данного варианта является совокупность достоинств предыдущих вариаций. К недостаткам можно отнести конструктивную сложность обеспечения пыле и влагозащищённости корпуса прибора управления.

В ходе работы были рассмотрены варианты различных компоновок защитных стекол прибора управления для интеграции его в фюзеляж самолета.

Для исключения вероятного появления эффекта "Нарцисса" (переотражения охлаждаемой полости матрицы) защитные стекла должны располагаться таким образом, чтобы не образовывать перпендикуляр с направлением излучения.



*Рисунок 3.  
График зависимости пропускания материалов ЗС ПУ длина волны (3-5 мкм)*

Рассмотрим различные варианты компоновки защитных стекол прибора управления.

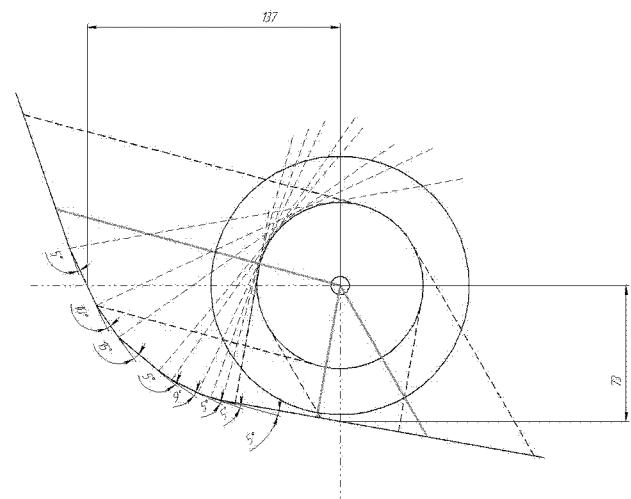
1. На рис. 4 изображен вариант компоновки с использованием плоскопараллельных пластин. Защитные стекла разделяются на десять частей. Достоинством данной системы является простота в технологии изготовления пластин. Недостатки данной системы - большое количество пластин, что ведет за собой увеличение количества стыков. Так как каждый шов будет испытывать напряжения, то понизится надёжность системы.

2. На рис. 5 изображен вариант компоновки с использованием одних лишь дугообразных цилиндрических составляющих с центром окружности, находящимся в зоне исключения падения перпендикуляра. Защитные стекла разделяются на три равные части для упрощения технологии производства. Достоинством данной системы является компактность (защитные стекла расположены близко к элементам прибора управления) и малые габариты. Недостатки данной системы - трудность в изготовлении дугообразных цилиндрических полос с большими диаметрами и снижение аэродинамических характеристик из-за возможности возникновения завихрений.

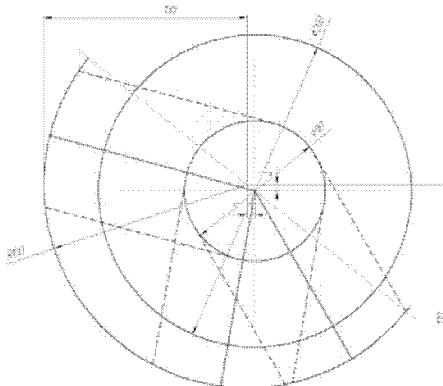
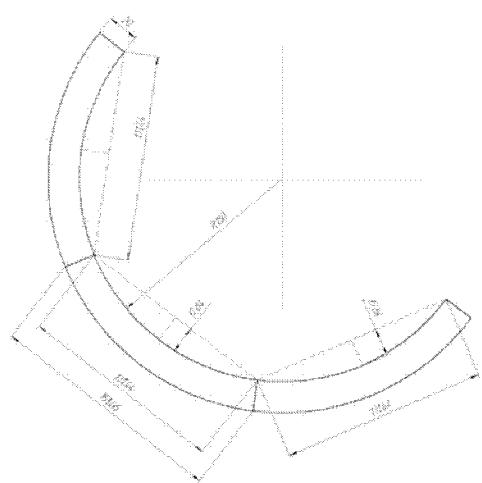
3. На рис. 6 изображен вариант компоновки с использованием двух плоскопараллельных пластин и одной дугообразной составляющей с цен-

тром окружности, находящимся в зоне исключения падения перпендикуляра. Достоинствами данной системы является схожесть с исходным контуром фюзеляжа, который определяет аэродинамические свойства и низкое количество пластин. Недостаток данной системы - увеличение габаритов прибора управления за счёт того, что защитные стекла расположены на почтительном расстоянии от элементов конструкции.

4. Аналогом компоновки защитных стёкол прибора управления можно считать колпак системы наведения EOTS (Electro-Optical Targeting System), разработанный компанией Lockheed-Martin



*Рисунок 4.  
Пример компоновки защитных стекол прибора управления*



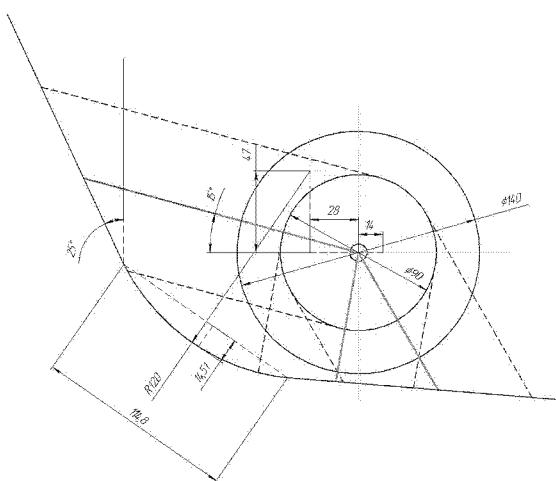
*Рисунок 5.*

и изображённый на рис. 7. Такая сложная мозаичная структура позволяет получить большие углы прокачки линии визирования и избежать вероятного проявления эффекта "Нарцисса".

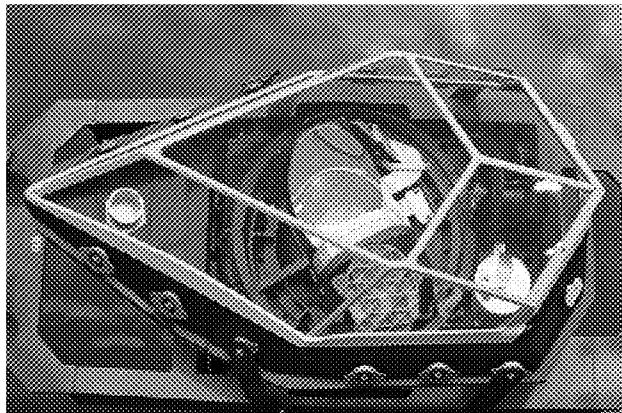
Одним из направлений улучшающих характеристики защитных стёкол следует заметить разработку покрытий, снижающих заметность самолёта и не ухудшающих оптических свойств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор варианта компоновки защитных стёкол прибора управления напрямую зависит от возможностей технологии изготовления составных компонентов и от непосредственного определения положения прибора управления с колпаком защитных стёкол в самолете. Наиболее подходящим



*Рисунок 6.*



*Рисунок 7.*

материалом для изготовления защитных стекол является лейкосапфир, объединяющий в себе высокие механические и оптические свойства.

### *Список литературы:*

1. Барский А.Г. Оптико-электронные прицельные системы слежения и прицеливания - М.: Логос, 2013. - 248 с.
  2. Бутиков Е.И. Оптика - СПб: Невский Диалект, 2003. - 480 с.
  3. Кузнецов С.М., Окатов М.А. Справочник технолога-оптика - СПб: Машиностроение, 1983. - 414с.
  4. Кругер М.Я., Панов В.А. Справочник конструктора оптико-механических приборов - СПб: Машиностроение, 1968. - 760 с.

# ОБРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

ВОЕВОДСКИЙ А.И. - оператор научной роты войск ВКО,  
ТЫШКУНОВ Н.В. - начальник отдела НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*В настоящее время широкому применению гиперспектральных изображений для аэрокосмического мониторинга и сигнатурной разведки препятствуют отсутствие достаточного количества спутников и воздушных носителей, оборудованных гиперспектрометрами с требуемыми характеристиками, а также сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами.*

*Важным этапом в процессе исследования объекта, его идентификации и получении правдоподобной информации о нём является выработка методик предварительной и тематической обработки, алгоритмов радиометрической, атмосферной и геометрической коррекции получаемых гиперспектральных данных.*

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное зондирование (ДЗ) определяют как процесс или метод получения информации об объекте, участке поверхности или явлении путем анализа данных, собранных без контакта с изучаемым объектом. Суть метода заключается в интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства. С помощью дистанционного зондирования изучают физические и химические свойства объектов, решаются сложные задачи обнаружения малоразмерных объектов, идентификации объектов исследуемой поверхности, определения их состояния и динамики.

Методы ДЗ основаны на использовании сенсоров, которые размещаются на космических аппаратах, авиационных носителях и регистрируют электромагнитное излучение в широком диапазоне электромагнитного спектра.

Одним из наиболее перспективных направлений ДЗ является применение гиперспектральных ме-

тодов и технологий, основной отличительной особенностью которых является возможность одновременного анализа пространственного распределения и спектральных характеристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений.

Схемотехническое решение гиперспектрометра предполагает:

1) получение "одномерного" изображения местности;

2) разложение на дисперсионном устройстве в спектр "одномерного" изображения местности, проекцию спектра изображения местности на матричный ФПЗС-приемник и его регистрацию с частотой кадров, пропорциональной скорости полета и уровню пространственного разрешения.

При этом получается "гиперкуб" данных, состоящий из строк и столбцов, формирующих матрицу пространственного распределения яркостей, совместно с третьей координатой, являющейся длиной волны регистрируемого излучения.

График зависимости спектральной отражательной способности объекта от длины волны называ-

ется кривой спектральной отражательной способности. Этот график позволяет изучить спектральные характеристики объекта и имеет большое значение при выборе спектрального диапазона, в котором будет проводиться сбор данных ДЗ для определенной исследовательской задачи. Вид этого графика и является той самой сигнатурой, позволяющей определить материал, идентифицировать цель.

Применение гиперспектральной аппаратуры позволяет решать большой диапазон задач:

- проведения исследований в интересах наук о Земле (океанологии, наук об атмосфере, геологии, геофизики, геохимии, горных науках и др.);
- исследования и рационального использования природных ресурсов;
- охраны окружающей среды;
- предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций (природные катастрофы и техногенные аварии);
- метеорологии и климатологии;
- лесного и сельского хозяйства;
- градостроительства, транспорта, энергетики;
- создания карт, кадастров различных объектов, формирования геоинформационной продукции;
- техническая разведка;
- поиск, обнаружение, идентификацию, захват и отслеживание целей.

## ЭТАПЫ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Создание собственно гиперспектральной аппаратуры не является окончанием в постановке задачи по исследованию объекта, к его идентификации и получению максимально правдоподобной информации о нём. Не менее важным звеном в этой цепочке является выработка методики обработки полученных данных. При этом после получения выполняется следующая последовательность процедур:

1. Радиометрическая и спектральная коррекция.
2. Геометрическая коррекция.
3. Атмосферная коррекция.
4. Тематическая обработка.

### 1. Радиометрическая коррекция

Выделяют следующие причины появления радиометрических искажений:

- неоднородность отклика детекторов и их различных элементов;
- неисправность элементов детектора;
- потеря данных при их передаче, архивировании или извлечении из архива;
- узкий динамический диапазон;
- непостоянство параметров съемки от снимка к снимку.

Для устранения радиометрических искажений проводят ряд следующих процедур:

1. Радиометрическая коррекция видеинформации с использованием массивов коэффициентов коррекции.

2. Коррекция сигналов с дефектных элементов.

3. Расчет спектральной плотности энергетической яркости на входном зрачке гиперспектрометра для области спектральной чувствительности.

1.1. Радиометрическая коррекция видеинформации с использованием массивов коэффициентов коррекции

Относительная радиометрическая коррекция гиперспектрального изображения (ГСИ) компенсирует поэлементную неоднородность чувствительности аппаратуры и должна выполняться с использованием массивов коэффициентов коррекции (КК) для установленной на режим съемки конфигурации параметров по формуле:

$$N_{\text{корр}}(i,j,k) = a(i,j) \cdot [N_0(i,j,k) - b(i,j) - c(i,j)],$$

где  $i$  - номер строки в кадре ГСИ;

$j$  - номер столбца в кадре ГСИ;

$k$  - номер кадра ГСИ;

$N_{\text{корр}}(i,j,k)$  - значение сигнала с  $(i,j)$ -ого элемента  $k$ -ого кадра после радиометрической коррекции, ур. АЦП;

$N_0(i,j,k)$  - значение сигнала с  $(i,j)$ -ого элемента  $k$ -ого кадра до радиометрической коррекции, ур. АЦП;

$a(i,j)$  - массив коэффициентов коррекции неоднородности чувствительности гиперспектрометра (ККЧ);

$b(i,j)$  - массив коэффициентов коррекции темнового сигнала (ККТС);

$c(i,j)$  - массив коэффициентов коррекции смещения поэлементных градуировочных характеристик (ККСГХ).

Значение сигнала в кадре  $N_0(i,j,k)$  зависит от заданных параметров съемки (коэффициентов бинирования по строке/столбцу, частоты кадров, коэффициентов усиления и др.) и каждой конфигурации параметров съемки соответствует свой комплект поэлементных массивов коэффициентов коррекции. Массивы КК для штатных комплексов параметров режима съемки заносят в радиометрический формуляр.

### 1.2. Коррекция сигналов с дефектных элементов.

Дефектные элементы выявляются в процессе радиометрической калибровки аппаратуры при равномерной засветке поля изображения. Значения выходных сигналов с дефектных элементов имеют нелинейную зависимость от входных сигналов и могут зависеть от иных факторов (температура, значения соседних пикселей). Составляется карта номеров дефектных элементов ФПЗС и включается в формуляр радиометрических параметров.

Наиболее распространенные процедуры коррекции видеинформации с дефектных элементов - это интерполяция методом "ближайшего соседа", линейная, билинейная, либо бикубическая интерполяции.

Т.к. каждый кадр получаемой видеинформации содержит спектр изображения ограниченного щелью участка визируемой поверхности, а каждый столбец кадра является спектром визуемого объекта, интерполяция сигналов должна выпол-

няться в направлении спектра (в пределах однотипного участка поверхности).

Для замещения сигнала на элементе рекомендуется использовать линейную интерполяцию с соседних элементов по столбцу.

### 1.3. Расчет спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на входном зрачке гиперспектрометра для области спектральной чувствительности.

Абсолютизация полученных данных - расчёт СПЭЯ на входном зрачке гиперспектрометра выполняется с использованием градуировочных характеристик, соответствующих установленной конфигурации параметров режима съемки.

Градуировочная характеристика ( $\Gamma_X$ ) - зависимость выходного сигнала гиперспектрометра  $N_{\text{корр}}$  от спектральной плотности энергетической яркости на входном зрачке  $L$  - определяется при наземной калибровке аппаратуры и заносится в формуляр радиометрических параметров.  $\Gamma_X$  каналов аппроксимированы полиномами первого порядка вида:

$$N_{\text{корр}} = A \cdot L + D,$$

где  $N_{\text{корр}}$  - расчетное (с коррекцией) значение сигнала на элементе изображения, ур. АЦП;

$A$  - крутизна абсолютной градуировочной характеристики, ур. АЦП  $\times \frac{\text{ср} \times \text{м}^2 \times \text{мкм}}{\text{Вт}}$ ;

$D$  - смещение градуировочной характеристики, ур. АЦП.

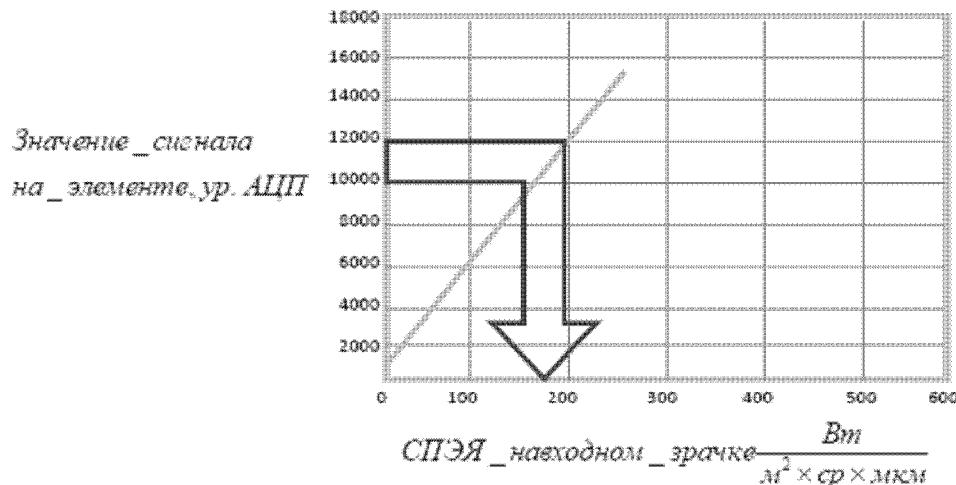


Рисунок 1.  
Градуировочные характеристики канала

## 2. Геометрическая коррекция

Для извлечения из цифровых снимков максимального количества полезной информации, необходимо устраниить присутствующие в них пространственные искажения, которые определяются ракурсом съемки, движением сканирующего устройства параметрами орбиты, для случая спутниковых систем, положением носителя в пространстве, вращением Земли и формой её поверхности.

Часть искажений относится к разряду систематических. Их можно учесть, тщательно смоделировав движения сенсора и спутника относительно Земли. Другая часть - это случайные ошибки, для исправления которых необходима геометрическая привязка снимка к заданной системе координат. Если систематические ошибки возможно учесть предварительно, то случайные устраняются уже в процессе обработки полученных гиперспектральных снимков.

Случайные ошибки вызваны вариацией высоты и ориентации носителя.

Изменение ориентации платформы приводит к существенному изменению видимого положения объекта съёмки из-за большого "плеча" датчиков, установленных на космических и летательных аппаратах. Ориентация определяется тремя углами вращения платформы - тангажа, крена и рысканья.

Для контроля и управления ориентацией спутника используются различные схемы, в том числе с датчиками горизонта и гироскопами. Фактичес-

кие значения углов вращения записываются вместе с данными цифрового снимка и в дальнейшем используются для проведения геометрической коррекции.

В случае применения в качестве носителя воздушного судна, ориентация гиперспектрометра существенно зависит от ветра и турбулентности воздушного потока. Сильные помехи и искажения вносимые вибрацией и нестабильностью полета могут быть значительно уменьшены использованием гиростабилизированной платформы.

Другим методом учета и исправления геометрических искажений возникающих вследствие эволюций авиационного носителя является использование панхроматической цифровой видеокамеры. На получаемые с помощью камеры изображения наносятся коррекционные линии двух типов: искаженные линии контуров и опорные линии, определяющие истинное положение линейного объекта. [1]

Анализируя полученные линии формируется массив смещений. Геометрическая коррекция гиперспектрального изображения заключается лишь в смещении его строк относительно друг друга согласно вычисленной для них величине смещения, с заполнением фоновыми пикселями полей, образующихся с левого или правого краев каждой строки (рис. 5).

Таким образом, можно выделить следующие процедуры устранения геометрических искажений:

- создание априорной модели искажений, вноси-

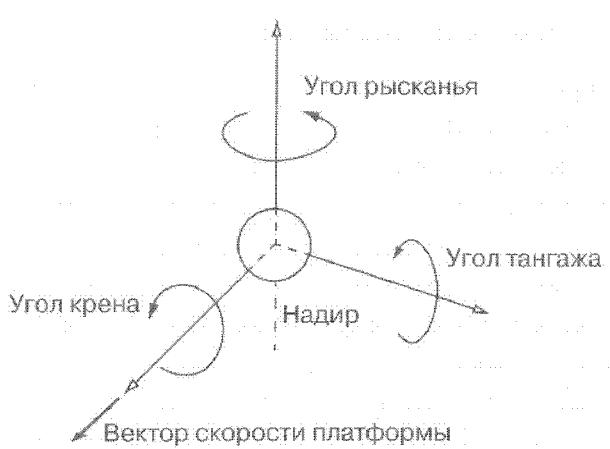


Рисунок 2.

Определение трёх осей ориентации датчика

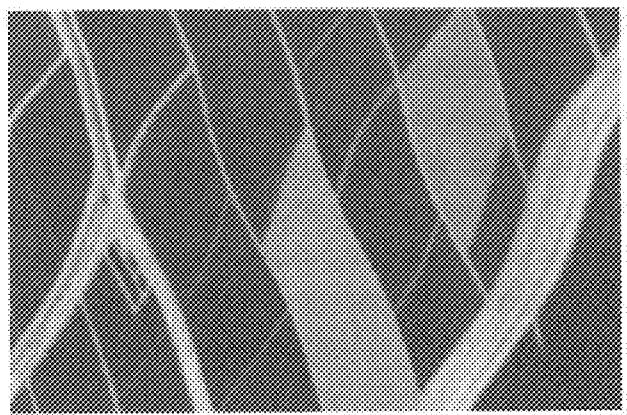
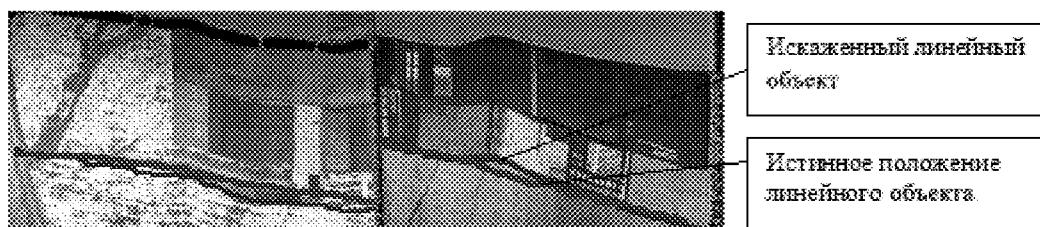


Рисунок 3.

Характерные искажения на снимках,  
в результате непрерывных изменений  
ориентации платформы во времени



*Рисунок 4.  
Изображение с нанесенными опорными линиями*

мых аппаратурой, для устранения системных искажений;

- геометрическая коррекция с использованием данных о положении и ориентации носителя, регистрируемых датчиками углов поворота (крана, тангажа, рысканья);

- проведение стереосъемки для выявления рельефа поверхности Земли;

- геометрическое трансформирование по наземным точкам.

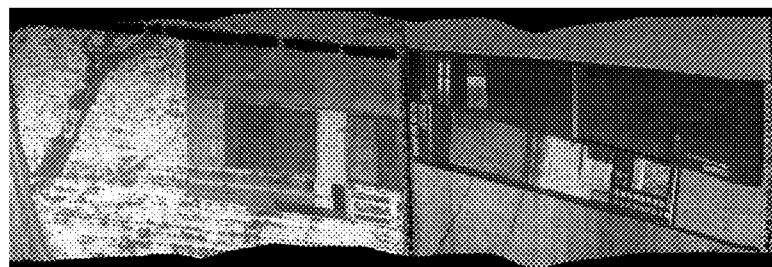
### **3. Атмосферная коррекция**

Основным источником электромагнитного излучения является Солнце. Прежде чем солнеч-

ное излучение достигнет Земли, оно должно пройти через атмосферу. Выделяют три основных типа взаимодействия излучения с атмосферой: поглощение, перенос и рассеяние. Излучение, прошедшее через атмосферу, затем отражается или поглощается земной поверхностью (рис. 6).

При распространении электромагнитного излучения через атмосферу оно частично поглощается молекулами различных газов. Наибольшей способностью к поглощению солнечного излучения обладают озон ( $O_3$ ), пары воды ( $H_2O$ ) и углекислый газ ( $CO_2$ ).

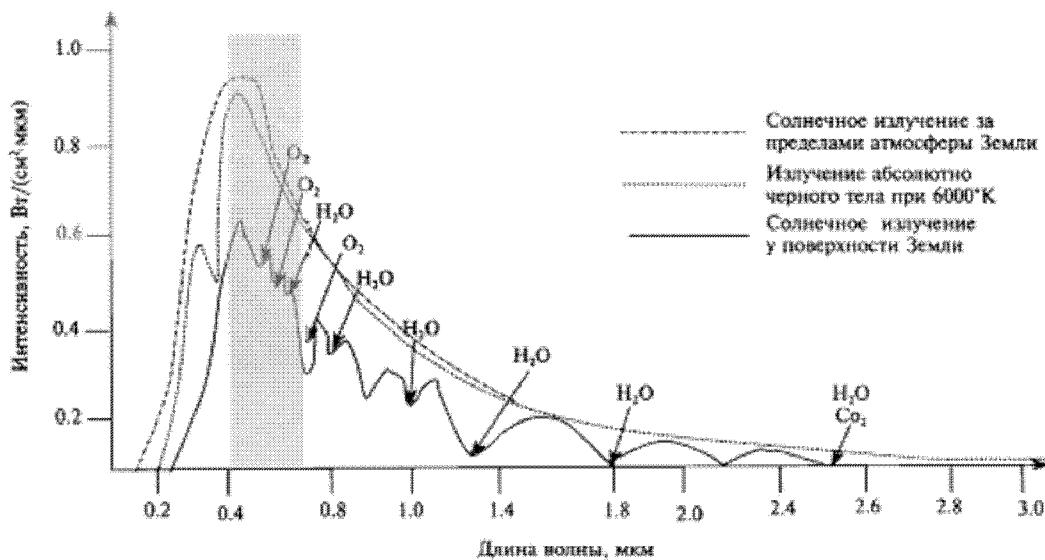
Спектр солнечного излучения до и после его



*Рисунок 5.  
Скорректированное изображение*



*Рисунок 6.  
Взаимодействие излучения с атмосферой*



*Рисунок 7.  
Спектр солнечного излучения*

прохождения через атмосферу Земли показаны на рис. 7.

Из рисунка видно, что кривая интенсивности солнечного излучения до его прохождения через атмосферу хорошо соответствует кривой интенсивности излучения абсолютно черного тела при температуре 6000 К. Сравнивая первую кривую с кривой, полученной вблизи поверхности Земли, можно выделить области относительно низких значений, соответствующие окнам поглощения различных атмосферных газов.

Помимо поглощения излучения атмосферой происходит его рассеяние из-за взаимодействия с молекулами газов и присутствующих взвешенных

частиц. Величина рассеяния зависит от длины волны электромагнитного излучения, количества частиц и концентрации атмосферных газов, а также длины пути распространения излучения через атмосферу.

Типы рассеяния в атмосфере:

- Релеевское (молекулы азота ( $N_2$ ) и кислорода ( $O_2$ ));
- Ми (аэрозоли);
- Неселективное ( капли воды и частицы пыли);

Т.о. данные гиперспектральной съемки включают информацию не только о поверхности, но и о состоянии атмосферы. Устранение влияния атмосферы - важный шаг предварительной обработки

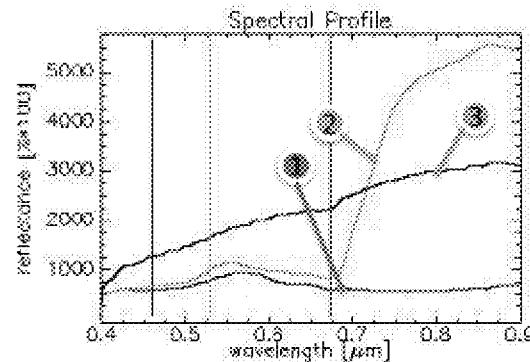
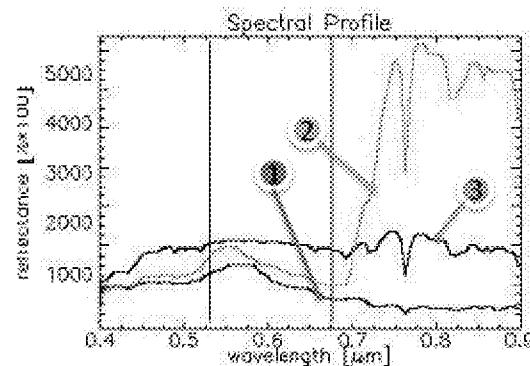


*Рисунок 8.  
Обобщённая схема расчета внеатмосферной СПЭЯ*

*до атмосферной коррекции*



*после атмосферной коррекции*



*Рисунок 9.*

*Спектральные характеристики до и после атмосферной коррекции:  
1- Водная поверхность; 2 - зеленая растительность; 3 - сухая растительность*

ГСИ, которая состоит из двух этапов: расчет модели атмосферы для фактических условий съемки и непосредственно атмосферная коррекция видеинформации ("вычитание атмосферы").

Для решения этой задачи существуют алгоритмы, позволяющий рассчитывать оптическую модель атмосферы по географическим координатам полученных снимков, высоте района съемки над уровнем моря, времени съемки, углам визирования, данным анализа метеополей на дату съемки (рис. 8). Результатом работы алгоритма являются параметры атмосферы (СПЭЯ дымки, спектральное пропускание и др.), полученные для данного режима съемки.

В модуле атмосферной коррекции выполняется расчет СПЭЯ на уровне подстилающей поверхности в абсолютных и относительных единицах с использованием полученных характеристик атмосферы.

На рис. 9 представлены спектральные сигнатуры нескольких природных образований до и после атмосферной коррекции. Исходные спектры имеют схожие особенности, вызванные поглощением водяных паров и атмосферных газов. Очевидно,

что истинные отражательные характеристики поверхностей искажены. После атмосферной коррекции эти искажения практически полностью устранены.

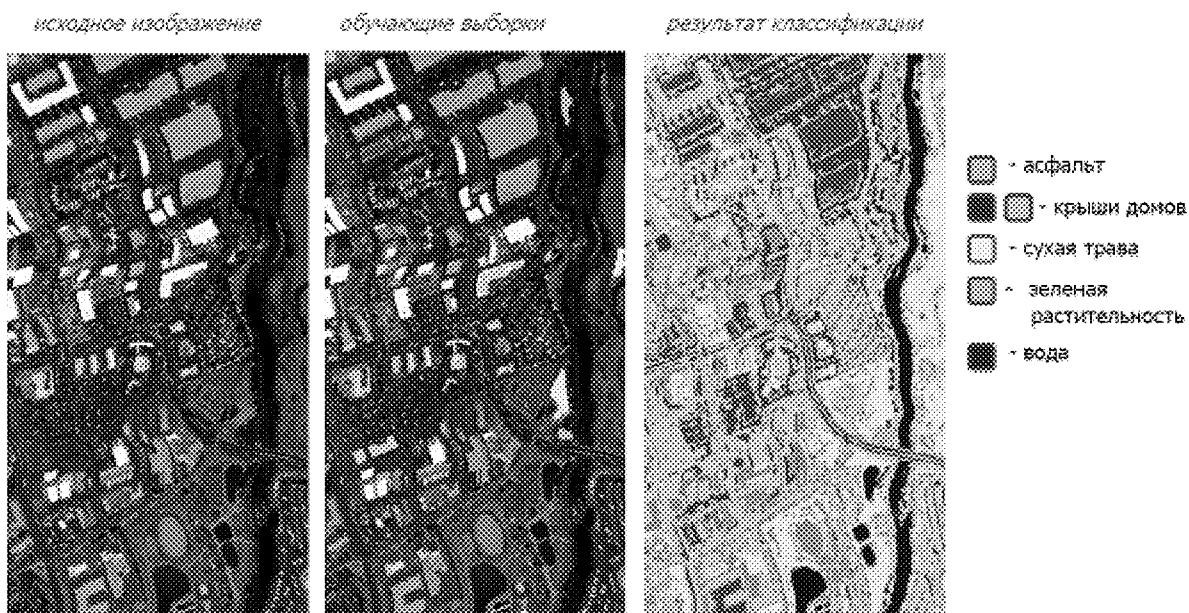
#### 4. Тематическая обработка

Тематическая обработка, заключается в:

- классификации изображений на основе различных подходов;
- определения наиболее информативных спектральных каналов, для решения конкретных задач;
- выявлении изменений в изображениях для анализа динамических свойств исследуемых объектов, процессов и явлений.

Цель классификации состоит в замене визуального анализа снимка автоматизированной процедурой идентификации объектов, в процессе такой идентификации каждый пиксел цифрового снимка относят на основании спектральной характеристики к одному из классов пространственных объектов.

Результаты классификации можно использовать для создания тематических карт и статистических отчетов для территорий различного типа, выявление новых образований, определения и идентификации целевых объектов. Среди множества мето-



*Рисунок 10.  
Классификация с обучением*

дов классификации выделяют два основных: неконтролируемая классификация и классификация с обучением.

Спектральный анализ основан на сравнении криевых спектральной отражательной способности, полученных в ходе съемки, с таковыми уже известных материалов.

Необходимым инструментом анализа являются:

1) спектральные библиотеки - базы данных, содержащие информацию об отражательной способности материалов на различных длинах волн;

2) эталонные области на самом изображении.

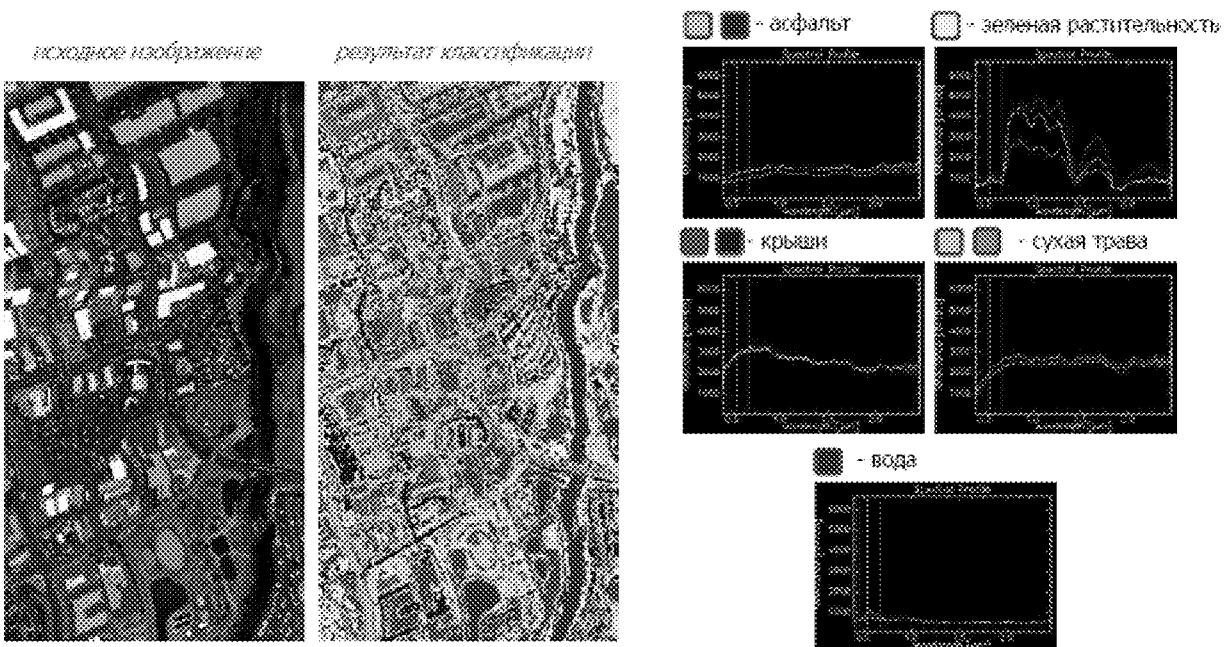
Для классификации с обучением используют эталонные области, которые выбираются в соответствии с их принадлежностью к определенному информационному классу. При выборе этих областей опираются на знание территории и расположенных на ней объектов, тем самым контролируется разделение всех объектов на определенные классы. На рис. 10 изображено создание эталонных областей.

Значения пикселов эталонных областей в различных спектральных диапазонах используются в качестве обучающих выборок для настройки программы распознавания. После этого каждый пикセル гиперспектрального снимка относится к тому или иному классу на основании последовательного сравнения со всеми созданными эталонами.

При неконтролируемой классификации порядок действий противоположный: сначала, на основании только той информации, которая представлена в данных, выделяются спектральные классы, и лишь потом они сопоставляются с реальными пространственными объектами. Группирование данных на первом этапе осуществляется с помощью программ кластерного анализа, при этом указывается, на какое количество групп (кластеров) можно разделить весь набор исходных данных. Помимо этого указываются критерии разделения различных кластеров и возможный разброс значений внутри каждого из них. Процедура разделения на кластеры является итерационной. На каждом этапе существует возможность объединять или разделять определенные кластеры. Таким образом, несмотря на свое название, неконтролируемая классификация не является полностью автоматической. Существует несколько алгоритмов неконтролируемой классификации: IsoData, K-means, Cluster и т.д.

Существуют алгоритмы сочетающие элементы классификации с обучением и неконтролируемой классификации.

Важным этапом в процессе классификации является оценка точности полученных изображений, которая может выполняться как по данным полевых измерений, так и путем сравнения с соответствующими тематическими картами.



*Рисунок 11.  
Неконтролируемая классификация*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для дальнейшего успешного решения задач сигнатурной разведки необходимо:

- разработать алгоритмы обработки гиперспектральных данных для решения тематических задач;
- развить существующие и разработать новые программные и технические средства обработки гиперспектральных данных;
- создать спектральные эталонные библиотеки природных и антропогенных объектов;
- определить тематически направленные спектральные интервалы для решения задач сигнатурной разведки;
- совершенствовать процедуры устранения влияния атмосферы;
- изучить влияние условий наблюдений на обнаружение и идентификацию объектов;

### Список литературы:

1. Чандр A.M., Гош С.К. Дистанционное зондирование Земли и географические информационные системы. Москва. Техносфера, 2008.
2. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. Москва: Техносфера, 2010.
3. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. Москва: Техносфера, 2006.
4. Козодоров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персеев И.В., Шербаков. Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исследование Земли из космоса, 2012.
5. Журавель Ю.Н., Федосеев А.А. Особенности обработки гиперспектральных данных дистанционного зондирования при решении задач мониторинга окружающей среды
6. Обиралов А.И., Лимонов А.Н., Гаврилова Л.А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование. Москва: "КолосС", 2006.
7. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. Москва: Издательский центр "Академия", 2004.
8. Shaw. Spectral Imaging for Remote Sensing / Shaw, Gary. Lincoln Laboratory Journal, 2003. Volume 14, Number 1, pp. 2 - 28

# ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНОГО ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ЕЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

ГРУБЕНКО А.Д. - оператор научной роты войск ВКО,  
АРХИПОВ С.А. - начальник СКБ-1 НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*В данной работе представлен обзор перспективного гиперспектрометра, его принцип действия, обзор оптической схемы. Представлена классификация оптических деталей, используемых в оптико-механической системе данного оптико-электронного прибора а также их особенности конструкции и основные критерии выбора конструктивных параметров.*

## ВВЕДЕНИЕ

Долгое время в качестве основного инструмента при дистанционном исследовании Земной поверхности применялась панхроматическая или монохроматическая съемка. При панхроматической съемке оптический тракт системы пропускает весь видимый свет, а при монохроматической, как следует из названия, полоса пропускания довольно узкая <100 нм. Панхроматическое изображение несет в себе только пространственную двухмерную информацию. Монохроматическое изображение содержит пространственную информацию в довольно узком спектральном канале. При объединении нескольких монохроматических камер с различными спектральными каналами можно получить мультиспектральное изображение. Если же число спектральных каналов высоко (несколько десятков), то такие приборы называют гиперспектрометры.

В настоящее время бортовые гиперспектрометры приобретают все более важную роль в дистанционном зондировании Земли, обеспечивают получение максимального количества информации о типе и состоянии объектов исследуемой поверхности. Переход от традиционных многозональных измерений к гиперспектральным увеличивает не только количество информации, но и обеспечивает совершенно новый качественный характер получаемых данных. Существует ряд задач в области дистанционно-

го зондирования, которые могут быть решены только с использованием гиперспектральных технологий.

Известно, что гиперспектрометр является прибором, который позволяет осуществлять дистанционную регистрацию отраженных, рассеянных и излученных электромагнитных волн. Идентификация и определение параметров состояния природных и антропогенных объектов при гиперспектральных измерениях базируется на специфических особенностях их спектров, регистрируемых прибором. Указанные особенности определяются различными свойствами зондируемых объектов и условиями наблюдений: химическим составом, макро- и микрорельефом, состоянием атмосферы, высотой Солнца и т.д.

За последние два десятилетия за рубежом создано несколько десятков гиперспектрометров авиационного и космического базирования. Сведения о реально созданных отечественных гиперспектрометрах крайне скучны. В качестве примера можно привести такие приборы как бортовой авиаспектрометр "Сокол" и ГСА для космического аппарата Ресурс-П, созданные на Красногорском механическом заводе. Сожалением можно констатировать некоторое отставание развития гиперспектральных технологий в России от мирового уровня.

Целью настоящей работы является описание

оптической системы перспективного бортового авиаспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением. Решаемой задачей является применение зеркал в оптической системе перспективного гиперспектрометра.

## ОПИСАНИЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРА

Функциональная схема гиперспектрометра типа pushbroom показана на рис. 1.

Как правило, гиперспектрометр включает в себя оптическую систему формирования изображения, спектрорделитель и фотоприемное устройство. В результате проведения гиперспектральной съемки объекта дистанционного зондирования формируется так называемый "гиперкуб" (рис. 2). В плоскости XOY формируется пространственное изображение зондируемого объек-

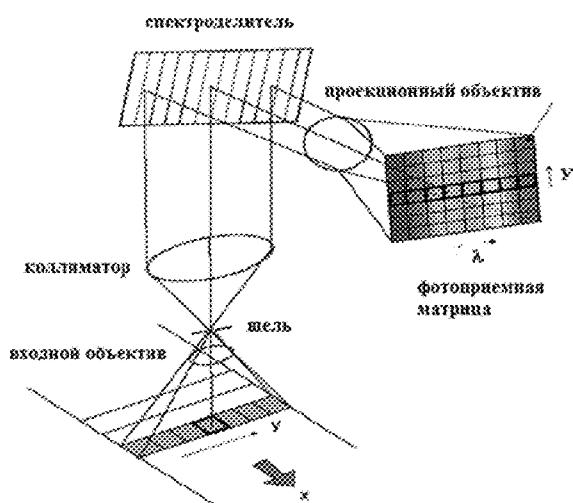


Рисунок 1.  
Функциональная схема гиперспектрометра  
типа pushbroom

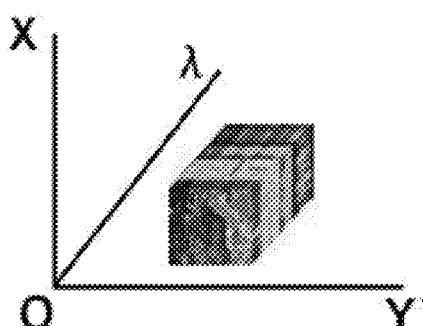


Рисунок 2.  
Гиперкуб данных

та, для каждого пикселя которого существует развертка по длине волны  $\lambda$  (цветовая информация). Кроме трех указанных координат, к ним может добавляться и поляризационная координата. Таким образом, измеряемые гиперспектрометром данные представляют собой значения функций, заданной в многомерном пространстве.

В результате проведения гиперспектральной съемки объекта дистанционного зондирования формируется так называемый "гиперкуб" (рис. 2). В плоскости XOY формируется пространственное изображение зондируемого объекта. Для каждого пикселя которого существует развертка по длине волны  $\lambda$  (цветовая информация). Кроме трех указанных координат, также к ним может добавляться еще поляризационная координата. Таким образом, измеряемые гиперспектрометром данные представляют собой значения функций, заданной в многомерном пространстве

Ниже представлены характеристики разрабатываемого перспективного гиперспектрометра:

Таблица 1.  
Характеристики перспективного гиперспектрометра

Параметр	Значение
Высота полета, м	1000
Пространственное разрешение, м	0,5
Полоса захвата, км	30
Спектральный диапазон, мкм	0,8-2,5
Фокусное расстояние объектива изображающего (ОИ)	определяется форматом и размером элемента дискретизации фотоприемного устройства
Относительное отверстие объектива ОИ	определяется выбранным приемником и компоновкой
Линейное/угловое поле объектива ОИ	
КПД объектива изображающего	Достаточный уровень 0,5
Диспергирующее устройство	Отражательная дифракционная решетка
Тип оптической системы	Зеркальная
Точность привязки шкалы длин волн для всех точек изображения спектра	Требуемый уровень примерно $0,5\Delta\lambda$

## ОПИСАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Выбор оптимальных схемных и схемно-конструктивных решений оптической схемы перспективного гиперспектрометра проводился на основе сравнительного анализа aberrационных, технологических, конструктивных и эксплуатационных параметров оптических систем зарубежных аналогов.

Зеркальный автоколлимационный спектрометр работает следующим образом: излучение от входной щели 1 спектрометра попадает на первое зеркало 2, затем, отразившись от него, последовательно претерпевает отражение на втором зеркале 3 и третьем зеркале 4. После зеркала 4 коллинированный пучок излучения попадает на дисперсионное устройство 5, преломившись на первой грани, отразившись второй грани и вновь преломившись от первой грани которого, раскладывается в спектр и попадает на третье зеркало 4. Отразившись последовательно от третьего зеркала 4, второго зеркала 3 и первого зеркала 2, излучение формирует разложение в спектр изображение входной щели на приемнике изображения. Оптическая схема спектрометра показана на рис. 3.

Использование в оптической схеме зеркальных элементов обусловлено их достоинствами по срав-

нению с призмами и линзами: меньшая масса, простота конструкции, меньшее значение вносимых aberrаций (в том числе отсутствие хроматизма у зеркал с наружным отражением), исключение требований к ряду показателей качества материала зеркал с наружным отражением.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕРКАЛ

Для особо точных зеркал, которые применяются в перспективном гиперспектрометре могут быть сформулированы следующие требования:

- материал и конструкция зеркала должны обеспечивать обработку и контроль рабочих поверхностей с заданной точностью традиционными технологическими приемами и оборудованием;
- конструкция зеркала должна обеспечивать крепление и разгрузку без существенного усложнения оправ и разгрузочных устройств, а также без возрастания массы узла зеркала в целом;
- материал и конструкция зеркала должны обеспечивать однородность тепловых и механических свойств зеркала, сохранность рабочей поверхности в эксплуатации.

Анализ публикаций на тему зеркал позволяет выявить сложившуюся схему их классификации. В основе этой схемы лежат критерии, устанавливающие существенные отличия зеркал друг от друга.

Исходя из данных таблицы следует, что контур рабочей поверхности зеркал 2 и 4 имеют форму прямоугольника с фасками, а контур рабочей поверхности зеркал 1 и 6 - круглый. Это обусловлено формой оптических пучков, которые были экспериментально получены в программе Zemax. Зеркала 2, 3 по форме рабочей поверхности асферические, внеосевые, а зеркало 1 - плоское одностороннее.

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА

Материал зеркала должен удовлетворять следующим требованиям:

- обладать комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих высокую жесткость и низкую температурную расстраиваемость зеркала в переменных условиях эксплуатации;
- быть изотропным и однородным в пределах заготовки зеркала и обеспечивать возможность

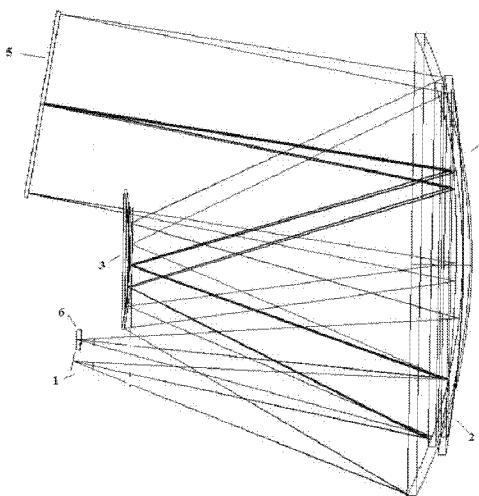


Рисунок 3.

Оптическая схема спектрометра:

- 1 - входная щель; 2 - первое зеркало; 3 - второе зеркало;  
4 - третье зеркало; 5 - дисперсионное устройство  
(отражательная дифракционная решетка);  
6 - приемник излучения (ФПЗС-матрица)

**Таблица 2.**  
**Схема классификации зеркал**

Критерий	Наименование зеркал в соответствии с вариацией признака, указанного в критерии.	
	Группа зеркал	Зеркало
Материал	Металлические	Бериллиевое, алюминиевое и т.п.
	Диэлектрические (стеклянные)	Кварцевое, ситалловое и т.п.
Применение (по типу аппаратуры) зеркала.	Информационные	Эталонное, коллиматорное, сканирующее и т.п.
	Силовые	Лазерное, прожекторное и т.п.
Условия эксплуатации	Наземные	Лабораторное, специальное и т.п.
	Бортовые (установленные на борту ЛА, КА)	Криогенное, термостатируемое
Форма рабочей поверхности	Плоские	Одностороннее, многостороннее
	Сферические	Выпуклое, вогнутое
	Асферические	Внеосевое, осевое
Контур рабочей поверхности	Круглые	Круглое, с центральным отверстием
	Многоугольные	Прямоугольное, шестиугольное и т.п.

получения оптической поверхности с необходимой точностью и шероховатостью (погрешность изготовления  $RMS \sim \lambda / 20 \div \lambda / 40$ , где  $\lambda = 0.63 \text{ мкм}$ );

- обладать высокой временной стабильностью в заданных условиях эксплуатации (температуры воздействия, невесомость, вибрация, ударные воздействия, перегрузки, радиация), изменение RMS не более  $\lambda / 100 \div \lambda / 150$  в условиях космического полета в течении 10 лет и срока хранения до 5 лет;

- технологические процессы изготовления зеркала должны быть экологически безопасны, экономически выгодны.

Основными показателями качества материала, используемого для зеркал, являются: его плотность  $\rho$  (чем она меньше, тем лучше); температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha$  (чем он меньше, тем лучше); модуль упругости  $E$  (чем он больше, тем лучше); теплопроводность  $\lambda$  (чем она больше, тем лучше); удельная теплоемкость  $C$  (чем она меньше, тем лучше). В табл. 1 представлены показатели качества некоторых материалов, используемых для изготовления зеркал.

Исходя из данной таблицы примем для изготовления зеркал оптической схемы материал Ситалл СО-115М.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛЕГЧЕНИЯ ЗЕРКАЛ

Зеркало называется облегченным, если его масса меньше, чем масса сплошного зеркала, при прочих равных условиях:

- равенство размеров зеркальных оптических поверхностей облегченного и сплошного сравниваемых зеркал;

- использование для закрепления и разгрузки облегченного зеркала обычных способов и устройств, не приводящих к увеличению массы и усложнению конструкции сборки зеркала;

- сохранность формы рабочей поверхности облегченного зеркала в условиях эксплуатации под действием термомеханических воздействий не хуже чем у сплошного зеркала.

Количественная степень облегчения принято характеризовать отношением массы облегченного зеркала к массе сплошного зеркала тех же габаритов:

$$K_{\text{обл}} = \frac{M_{\text{обл}}}{M_{\text{сл}}} \cdot 100\% = K_m \cdot 100\% \quad (1)$$

*Таблица 3.*  
*Свойства материалов, применяемых для изготовления зеркал*

Параметр	Материалы						
	SiO <sub>2</sub>	Ситалл CO-115M	Церодур	ULE	SiC	Стекло (K8)	Ве
Плотность ρ, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	2.2	2.5	2.5	2.21	3.05	2.52	1.85
Модуль упругости Е, ГПА	70	92	92	67	390	91	280
Удельная жесткость Е/γ, 10 <sup>6</sup> м	3.2	3.7	3.7	3.1	13		15.1
Теплопровод- ность λ, Вт/(м*К)	1.38	1.2	1.67	1.3	185	1.08	159
ТКЛР α, 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	0.55	0.15	0.05	0.03	2.5	7.1	11.4
Теплоемкость С, Дж/кг К	741	821	419	766	713	710	1820
Коэффициент Пуассона μ		0.22			0.3	0.209	

Показатель характеризует возможности технологических процессов изготовления облегченных структур.

Основной путь получения облегченных зеркал - уменьшение массы зеркала за счет внутренних пустот в нем. Это достигается путем вырезания в теле зеркала полых ячеек. Желательно, чтобы ячейки были одинаковыми и правильными многоугольниками. Отсюда следует что сердцевина зеркала может быть заполнена шестиугольными, треугольными или квадратными ячейками. Обычно для зеркал высокой точности применяют шестиугольную или треугольную структуру облегчения.

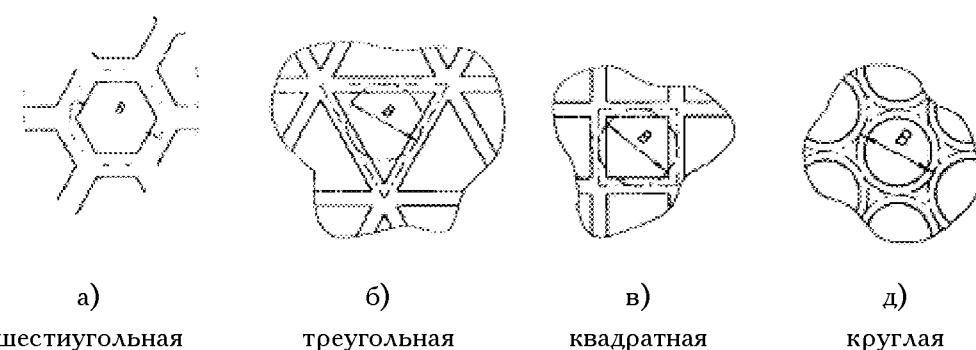
### ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЛЕГЧЕННОГО ЗЕРКАЛА

Задача оптимизации параметров облегченного зеркала может быть сформулирована следующим образом:

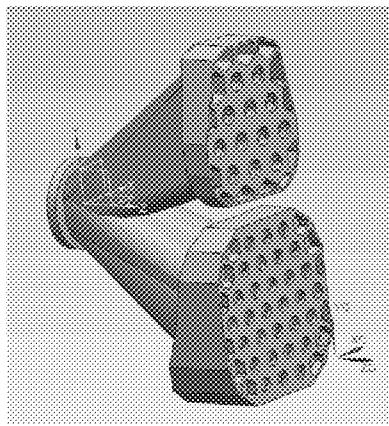
Найти значения переменных  $H$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $B$ , обеспечивающие минимальные величины критериев оптимизации  $K_m$  и  $K_w$ , где

$$K_m = \frac{M_{\text{обл}}}{M_{\text{сл}}} \quad \text{- степень облегчения зеркала;}$$

$$K_w = \frac{W_{\text{обл}}}{W_{\text{сл}}} \quad \text{- степень жесткости;}$$



*Рисунок 4.*  
*Основные структуры облегчения зеркал*



**Рисунок 5.**  
Расположение зеркал в оптической  
схеме гиперспектрометра

$H$  - толщина зеркала;  
 $d$  - толщина ребер;  
 $t$  - толщина пластин, принятая одинаковой для рабочей(зеркальной) и задней пластин;  
 $B$  - размер ячейки, равный диаметру вписанной в ячейку окружности (границами ячеек являются осевые линии ребер);

Толщина зеркала  $H$  обычно выбирается исходя из требований к точности и допустимого веса. Отношение  $H/D$  (где  $D$ -диаметр зеркала) для сплошных зеркал может изменяться от 1/5 до 1/10. В случае облегченного зеркала выгоднее увеличивать толщину зеркала, т.к. при этом жесткость зеркала на изгиб возрастает. При отсутствии дополнительных соображений для высокоточных зеркал целесообразно рекомендовать

$$H/D \sim 1/6 \div 1/8 \quad (2)$$

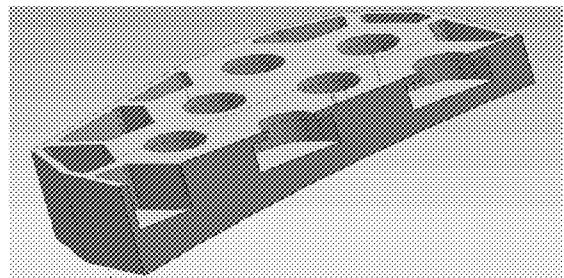
Толщина ребер  $d$  ограничивается прочностью материала зеркала и технологическими возможностями. Предельно достижимая толщина ребра кварцевых и ситалловых зеркал 3-4 мм при габаритах до 1 м. Таким образом:

$$d = d_{\text{технол min}} \quad (3)$$

Соотношение толщины пластин и размера ячейки  $\gamma$

$$\gamma = \frac{t}{B} \quad (4)$$

определяет прогиб лицевой пластины в ячейках при доводке рабочей поверхности под действием полировочного давления. Слишком малая величи-



**Рисунок 6.**  
Геометрия зеркала в разрезе

на  $\gamma$  может привести к эффекту "простегивания", когда форма рабочей поверхности после доводки будет повторять строение ячеистой структуры. Прогибы в центре ячеек под действием полировочного давления должны быть меньше допуска на местные ошибки формы рабочей поверхности, т.к. наличие местных ошибок приводит к падению качества изображения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было принято решение изготавливать зеркала экспериментального гиперспектрометра из ситалла СО115М с шестиугольной геометрией ячейки структуры облегчения. В дальнейшем планируется провести анализ изменения формы рабочей поверхности зеркал в различных положениях при сборке и юстировке экспериментального образца гиперспектрометра.

### Список литературы:

1. Д.В. Воронцов, А.П. Калинин, А.Г. Орлов, А.И. Родионов, И.Б. Шилов, И.Д. Родионов, В.Н. Любимов, А.Ф. Осипов. Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли //Препринт ИПМех РАН №702,2002
2. А.Г. Орлов. Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов // Москва: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2008.
3. У.Г. Рис. Основы дистанционного зондирования //Москва: Техносфера,2006.-336с.
4. Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов: Тезисы докладов. - Красногорск: ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева, 2014. - 124 с.

# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ОБЗОРНО-ПРИЦЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРОТИВОВОЗДУШНОЙ ОБОРОНЫ

СМЕТАНИН А.С. - оператор научной роты войск ВКО,

ШИШОВ Г.И. - начальник отдела НТЦ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В статье рассмотрены проблемы проектирования и конструирования опорно-поворотных платформ для обзорно-прицельных комплексов. Здесь описаны основные виды платформ, условия их эксплуатации и применения, основные требования, предъявляемые при конструировании платформ. Предложен вариант реализации подвижной части платформы на базе бесконтактного моментного двигателя. Также предлагается сформировать методические рекомендации для проектирования обзорно-прицельных приборов для войск противовоздушной обороны.*

При широком перевооружении и модернизации Российской армии остро стоит вопрос о создании современного вооружения и оснащения обзорно-прицельных комплексов для войск Воздушно-космической обороны.

Необходимость создания и совершенствования опорно-поворотных платформ является одной из приоритетных задач при контроле воздушного пространства.

При всех существующих методах решения данной задачи встает необходимость разработки методических материалов по созданию поворотных платформ с различными массогабаритными, динамическими и точностными характеристиками. При этом приходится решать определенные задачи, искать компромиссные решения, так как, например, к бортовым управляемым опорно-поворотным платформам предъявляются наиболее высокие требования по массогабаритным и точностным характеристикам, и показателям надежности. Требования по устойчивости и прочности к повышенной и пониженной температурам окружающей среды, к механическим вибрациям для бортовых ОПП (опорно-поворотная платформа) так-же достаточно высокие. Дополнительно к этим платформам предъявляются требования по стойкости к пони-

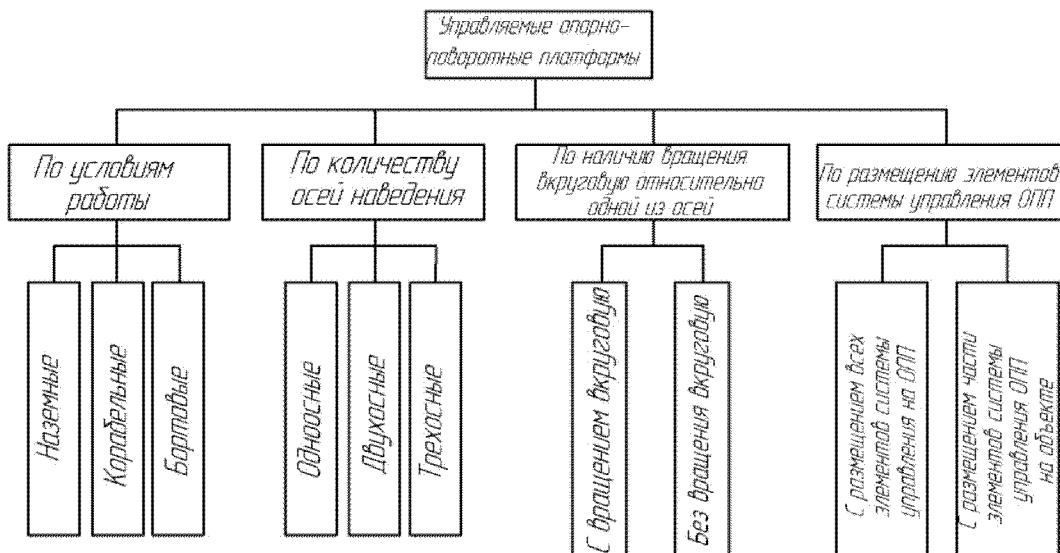
женному атмосферному давлению и к быстрому изменению температуры окружающей среды.

Исходя из выше сказанного основная цель работы - проработка теоретических вопросов создания высокоточной низкопрофильной опорно-поворотной платформы для обзорно-прицельных оптико-электронных приборов. На практике необходимо реализовать один из вариантов конструкции из типоразмерного ряда платформ, а также разработать методические материалы по созданию поворотных платформ с различными массогабаритными параметрами.

Необходимость создания опорно-поворотных платформ продиктована актуальностью этой задачи, в частности тем, что большинство обзорно-прицельных комплексов нуждаются в быстром и точном позиционировании.

Началу выполнения научно-исследовательской работы предшествовало изучение определенных ГОСТов, позволившее выявить основные требования по выполнению опытно-конструкторской работы.

В зависимости от классификации опорно-поворотных платформ [1] в соответствии с рис. 1, выявлены характерные особенности платформ с разным количеством осей наведения, по наличию



*Рисунок 1.  
Классификация опорно-поворотных платформ*

вращения вкруговую относительно одной из осей, а также по размещению элементов системы управления ОПП.

Сравнение научно-технического уровня разработок в области обзорно-прицельных комплексов российского и зарубежного производства показало, что у каждого производителя платформ имеются свои особенности, которые учитываются при использовании устройства в том или ином случае. ОПП различных стран производителей показаны в табл. 1.

Опорно-поворотная платформа является обязательной частью конструкции обзорно-прицельных комплексов, устанавливаемых на летательных аппаратах. Такие приборы, как правило, имеют в своем составе высококачественные камеры технического зрения, смонтированные на специальном поворотном устройстве. Эти камеры наблюдения должны вращаться в вертикальной и горизонтальной плоскости, позволяя им просматривать достаточно большие площади, а также осуществлять

*Таблица 1.  
Опорно-поворотные платформы различных стран производителей*

Канада ( <i>L3 Wescam</i> ) <i>MX - 15</i>	Великобритания <i>VIGISCAN 10</i>	Великобритания <i>Flir D300E</i>

слежение за движущимся объектом. При этом, поворотные устройства, как правило, применяются для расширения углов обзора камер наблюдения, должны работать в широком температурном диапазоне от -50 до +60°C и в условиях постоянных вибрационных и ударных нагрузок.

Конструктивно опорно-поворотная платформа представляет собой в простейшем виде две платформы, одна из которых движется в горизонтальной плоскости, а другая в вертикальной. Рациональный выбор конструкции ОПП позволяет уменьшить потребление энергии и получить минимальные габариты и вес системы, которые определяются в основном выбором кинематических схем механизмов вращения поворотной части. Выбор конструкции ОПП представляет собой сравнительно сложную задачу, сложность выбора обусловлена и тем, что динамические качества и механические характеристики следящей системы и приводов не известны.

Основной задачей при проектировании платформы является выбор устройства для обеспечения подвижности поворотного механизма.

Выбор сделан в пользу бесконтактного моментного двигателя (ДБМ).

Традиционное построение электропривода в виде быстроходного электродвигателя постоянного или переменного тока и понижающего редуктора в настоящее время почти исчерпали возможности повышения точности, быстродействия и надежности оборудования.

С другой стороны, сложился и сравнительно устойчивый конструктивный облик исполнительных электродвигателей малой мощности, применяемых в системах автоматического управления. В подавляющем большинстве случаев эти двигатели имеют корпусную конструкцию, частоту вращения несколько тысяч оборотов в минуту, при этом в очень широко применяемых коллекторных двигателях имеются контактные узлы, а тепло выделяется во вращающемся якоре; все это вместе взятое приводит к существенным ограничениям по эксплуатационным условиям и режимам и значительно снижает наработку двигателей.

Скачка в улучшении качественных показателей можно достичь, используя тихоходные безредукторные (или малоредукторные) привода на базе

бесконтактных моментных двигателей (иногда их называют моментными вентильными двигателями)

Термин "моментный" означает, что электродвигатель спроектирован для режима вращения с малой скоростью, когда можно не учитывать все потери, связанные с быстрым вращением ротора. Однако, термин "моментный" связан не просто с тихоходностями а определяется целенаправленным подходом к проектированию электродвигателя.

Основными параметрами ОПП являются грузоподъемность и крутящие моменты относительно оси вращения и опорной плоскости основания. Опорно-поворотная платформа - это устройство, способное воспринимать осевые и радиальные нагрузки, а также нагрузки от моментов, действующие раздельно или совместно и в любом направлении.

Выбор минимального по мощности привода и повышение его эксплуатационной надежности существенно зависит от конструкции ОПП с закрепленными на его поворотной платформе оптическими модулями и основными механизмами. Для уменьшения влияния на механизм привода инерционных масс конструкция ОПП должна обеспечивать минимальное смещение центра тяжести всей поворотной системы, причем в момент включения привода инерционные силы могут быть значительными, поэтому их следует учитывать при выборе мощности привода. Устранение влияния инерционных сил достигается совмещением центра тяжести вращающихся масс с осью вращения, рациональным размещением на поворотной платформе оптических модулей и основных механизмов.

При реализации поворотной платформы на базе бесконтактных моментных двигателей необходимо подбирать модель двигателя в зависимости от массы платформы, и соответственно, от момента трогания.

Основные тактико-технические характеристики ОПП:

Масса - до 45 кг;

Диаметр описанного цилиндра - до 400 мм;

Платформа должна обеспечивать следующие угловые скорости и ускорения:

- в режиме переброса угловую скорость не менее  $\omega_{\text{н max}} = 35 \text{ град/сек} = 0,61 \text{ (рад/сек)}$  при максимальном ускорении  $\varepsilon_{\text{н max}} = 2 \text{ (рад/сек}^2)$ ;

- в режиме слежения максимальную угловую

скорость не менее  $\omega_{\text{max\_ca}} = 9$  град/сек = 0,16 (рад/сек) при максимальном ускорении  $\varepsilon_{\text{max}} = 2$  (рад/сек<sup>2</sup>);

- в режиме слежения минимальную угловую скорость не менее  $\omega_{\text{min}} = 0,02$  град/сек = 3,5·10<sup>-4</sup> (рад/сек).

Для расчета необходимого момента трогания понадобятся значения следующих величин:

1. Момент инерции и масса двигающихся звеньев.

Подвижный элемент платформы с нагрузкой представим в виде сплошного цилиндра или диска радиусом  $r = 174,5$  мм и массы  $m = 43$  кг. В этом случае момент инерции равен:

$$J = 1/2mr^2 = 0,5 \cdot 43 \cdot 0,1745^2 = 0,659 \text{ кгм}^2 \quad (1)$$

## 2. Статический момент сопротивления.

Статический момент сопротивления на валу нагрузки обусловлен силами трения, его величина зависит от температуры механизма или окружающей среды, (максимальное значение имеет при низких температурах) и определена по изделиям-аналогам.

Момент силы трения уплотнителей платформы.

Силу трения определим по следующей зависимости:

$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg = 0,06 \cdot 36 \cdot 9,8 = 21,168 \text{ Н} \quad (2)$$

$m$  - масса платформы, давящей на уплотнитель, равная 36 кг.

$\mu$  - коэффициент трения между уплотнителем и металлом, равный 0,06.

$R$  - радиус (плечо) уплотнительного кольца в соответствии с рис. 2:

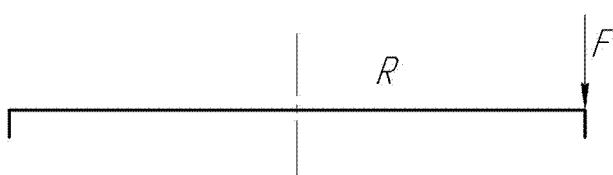


Рисунок 2.  
Схема определения плеча силы

$$R = 170 \text{ мм} = 0,17 \text{ м};$$

$$M_{\text{тр упл}} = 21,168 \cdot 0,17 = 2,399 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Момент силы трения в подшипнике рассчитывается по упрощенному алгоритму:

$$M_{\text{тр подш}} = 0,5\mu\rho d \quad (3)$$

где  $\mu$  - постоянный коэффициент трения;

$\rho$  - нагрузка на подшипник, Н;

$d$  - диаметр отверстия подшипника, мм.

$$d = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м.}$$

$$\rho = mg = 75 \cdot 36 = 2700 \text{ Н} \quad (4)$$

Момент трения в подшипнике при перегрузке 75g:

$$M_{\text{тр подш}} = 0,5 \cdot 0,002 \cdot 2700 \cdot 0,12 = 0,324 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Статический момент сопротивления подвижного элемента платформы с нагрузкой равен сумме моментов трения подшипника и уплотнительных элементов:

$$M = M_{\text{чн}} + M_{\text{тр подш}} = 2,399 + 0,324 = 2,723 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5)$$

## 3. Динамическая ошибка стабилизации.

Динамическая ошибка платформы при угловой стабилизации полей зрения по азимуту должна быть не более 0,2 угл. мин.

## 4. Выбор электродвигателя.

Исключая из рассмотрения величину собственного статического момента сопротивления двигателя  $M_{\text{чн}}$  выражение для вычисления момента двигателя выглядит следующим образом:

$$M_d = k_p \frac{P_d}{\omega_{H \text{ max}}} = (\sigma J_d + k_p^2 J_H) \frac{\varepsilon_{H \text{ max}}}{k_p} + \frac{1}{\eta_p} k_p M_{\text{чн}} \quad (6)$$

Необходимые при расчете значения коэффициентов  $\sigma$  и  $\eta_p$  можно выбрать из следующих рекомендованных величин:  $\sigma = 1,1 \div 1,5$  - наибольшее значение принимается для маломощных асинхронных двигателей с полым ротором;  $\eta_p = 0,7 \div 0,9$  - для редуктора с цилиндрическими зубчатыми при  $P_{\text{ном}} \leq 100$  Вт;  $\eta_p = 0,9 \div 0,94$  - то же, при  $P_{\text{ном}} > 100$  Вт.

В настоящее время этим требованиям в большей степени удовлетворяют бесконтактные моментные двигатели (ДБМ), обладающие наибольшим удельным моментом в единице его массы и электрических потерь в обмотке якоря. При интенсивном использовании этих двигателей номинальный режим не устанавливается, а ограничения по применению определяются только условиями допустимого перегрева и предельными амплитудными значениями токов и напряжений.

Исходные данные для выбора электродвигателя платформы:

- момент инерции нагрузки -  $J_n = 0,659 \text{ кгм}^2 = 6,46 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- собственный момент инерции ротора двигателя -  $J_d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ кгм}^2$ ;
- статический момент сопротивления на входном валу нагрузки равен статическому моменту сопротивления подвижного элемента платформы с нагрузкой  $M_{ch} = 2,723 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- максимальное ускорение вращения нагрузки  $\varepsilon_{n_{max}} = 2 \text{ рад/сек}^2$ ;
- коэффициент передачи редуктора  $k_p = 1$ .

Исходя из габаритных размеров, моментов инерции, напряжения питания, динамических характеристик (угловой скорости, ускорения), массы, для внутреннего подвижного элемента, а также учитывая небольшой запас по значению пускового момента, был выбран в качестве привода двигатель ДБМ 150 - 4- 0,6 - 2.

Дальнейшим этапом стоит конструирование основных узлов и непосредственно самой платформы. При компоновке узлов платформы имеется необходимость создания 3D моделей всех

деталей, и в дальнейшем создания чертежей по готовым моделям.

Также 3D модель необходима при создании макета опорно-поворотной платформы, что является одной из целей данной работы.

Подводя итог, необходимо указать, что еще одной решаемой задачей стоит формирование методических рекомендаций при проектировании обзорно-прицельных оптико-электронных приборов для войск воздушно-космической обороны.

#### Список литературы:

1. Баунин В.Г., Новоселов Б.В. Проблемы проектирования и производства управляемых опорно-поворотных устройств антенн радиосвязи. Известия Тульского государственного университета. Тула, изд-во ТулГУ, 2011, 370 с.
2. Новоселов Б.В., Баунин В.Г. Управляемые опорно-поворотные устройства антенн радиолокационных систем и комплексов радиосвязи. Радиопромышленность, 2008. Вып. 2. С. 22-28.
3. Новоселов Б.В., Баунин В.Г. Управляемые опорно-поворотные устройства антенн комплексов радиосвязи, устанавливаемых на подвижные объекты. Актуал. проблемы защиты и безопасности. Прил. к журналу "Известия Рос. Акад. Ракетных и артиллерийских наук". Т. 4. СПб.: НПО специальных материалов, 2007. С. 298-304.
4. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. М.: Наука, 1978, 320 с.

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В МЕТРОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТИВОВ

ВОРОНА Ю.В. - оператор научной роты войск ВКО,  
СЕНИК Б.Н. - доктор технических наук, профессор

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"

*В статье рассмотрены основные особенности измерения краевого анализа волнового фронта для оптических систем. Описаны принципы работы программных продуктов при построении результатов интерферометрии. Приведён пример расчёта выходных параметров для реальной оптической системы по результатам интерферометрических тестов.*

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие оптико-электронных приборов и комплексов, в том числе космического назначения, сопровождается повышением требований к качеству изображения, даваемого оптическими системами. Для получения требуемого качества изображения необходимо оценивать основные параметры оптического тракта, с необходимой точностью.

Выполнение этих задач невозможно без совершенствования и развития методов и средств контроля и аттестации оптических систем; возможностями этих средств в настоящее время во многом определяется успешное развитие оптико-электронных выходных оптических параметров. В то же время применяемые в производстве средства контроля исследования в этой области нередко по своим возможностям не удовлетворяют указанным требованиям. В целом производство испытывает нехватку современных приборов контроля выходных параметров изделий [1].

В последнее время развиваются новые средства оптических измерений, которые основаны на достижениях компьютерной техники и цифровой обработки изображений. Такие устройства не только оснащаются видеокамерой, которая подключена к компьютеру. В результате

обработки и анализа цифровых изображений выводятся результаты измерений выходных параметров оптических комплексов.

Данная статья посвящена решению указанных проблем путем применения новых метрологических подходов в нетрадиционном сочетании современных достижений в оптике, электронике и информатике. Выполнен анализ их достоинств и недостатков, предложены способы повышения точности и эффективности контроля и исследования, рассмотрены пакеты программ для обеспечения функционирования установок оценки качества изображения оптических систем с новыми возможностями.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РЕШЕНИЯ

Для получения качества изображения, близкого к расчетному, необходимо применение финальной юстировки оптических систем по волновому фронту в рабочем спектральном диапазоне. Такие характеристики качества изображения, как функция передачи модуляции и функция концентрации энергии, являются интегральными, и в общем случае не дают однозначной информации о причинах ухудшения качества изображения. Использование информации о форме и параметрах волнового фронта для раз-

личных точек поля позволяет провести точную диагностику оптической системы, определить место и величину децентрировок оптических элементов и тем самым их устраниТЬ.

Для выполнения указанной процедуры собранный объектив после сборки и предварительной юстировки устанавливается на специальный интерферометрический стенд, на котором происходит его окончательная юстировка (рис. 1). Например, используется классическая схема интерферометра Тваймана-Грина с постоянной рабочей длиной волны.(после вычета инструментальных ошибок). Погрешность измерения волновых aberrаций - не более  $\lambda/30$ [2]. Интерферометр формирует расходящийся волновой фронт, центр которого совмещается с плоскостью изображения объектива. Световой поток проходит через объектив, отражается от плоского зеркала и возвращается обратно в интерферометр, где происходит сложение с эталонным волновым фронтом и регистрация интерференционной картины [3].

Цикл юстировки включает процесс автоматизированного интерферометрического измерения волновых aberrаций, обработки результатов измерений на специализированном ПО, с вычислением необходимых перемещений юстируе-

мых компонентов объектива и непосредственно выполнением этих перемещений. При необходимости данный цикл может повторяться несколько раз. Процесс измерения происходит автоматически, с дистанционным управлением от персонального компьютера. Юстировка компонентов объектива может выполняться вручную или, при необходимости, от специальных приводных механизмов.

На рис. 1 показаны: 1 - лазер, 2 - интерферометр типа Тваймана-Грина, 3 - цифровая камера, 4 - проекционный объектив, 5 - сферическое контрзеркало, 6 - компьютер.

Контролируемый объектив показан на схеме в рабочем, вертикальном положении. Интерферометр и сферическое контрзеркало расположены на подвижных платформах, точное положение которых устанавливается с помощью системы приводов и контролируется с помощью лазерных интерферометрических измерителей.

Данная схема, обеспечивающая возможность синхронного перемещения интерферометра и контрзеркала, позволяет решать многие задачи, в том числе, измерение волновых aberrаций, измерение кривизны поля изображения, измерение дисторсии поля. Для этого используя современные программные продукты, с помощью которых результаты измерений выводятся в автоматическом режиме [5].

Для компенсации ошибок, вызванных паразитными волновыми фронтами, необходимо произвести серию снимков, в каждом снимке интерферограммы вносится фазовый сдвиг. Для этого используем интерферометр со сдвигом фазы. При регистрации в опорный канал вводится фазовая задержка и при изменении фазы от 0 до 360 градусов получают несколько интерферограмм (рис. 2). Исследуют изменение яркости для каждой точки апертуры, определяют фазу изменения яркости и считывают результатирующую информацию о волновом фронте. Однако, интерферометры весьма чувствительны к вибрации, требуют неискаженную ко-герентную опорную волну, а процедура обработки интерферограмм достаточно сложна, и ее затруднительно выполнять в реальном масштабе времени.

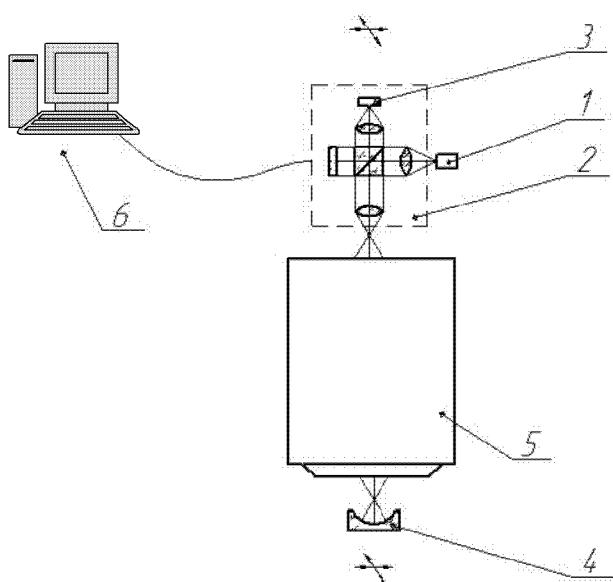
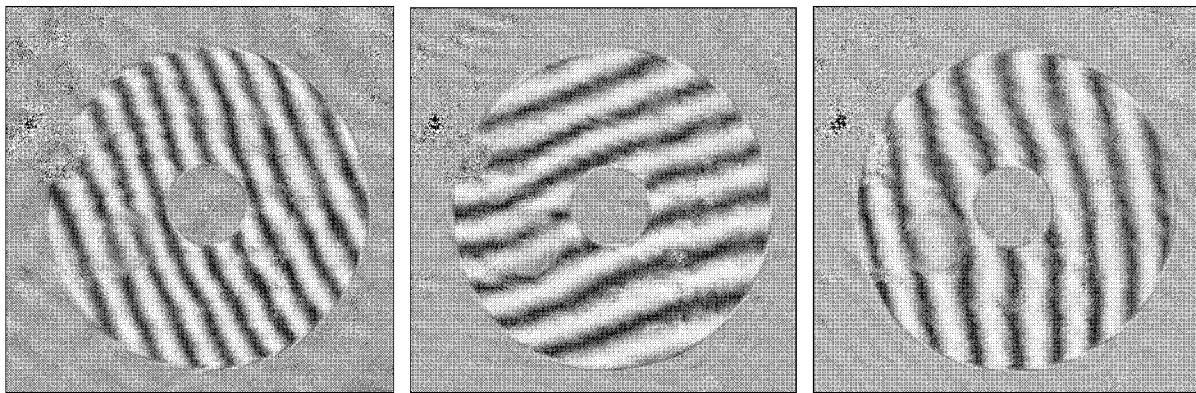


Рисунок 1.  
Схема интерферометрического контроля



*Рисунок 2.  
Серия из трех интерферограмм*

Но имеется одно обстоятельство. Чтобы отделить рябь в самой оптике от ряби атмосферной, нужна программа, которая сможет автоматически складывать и вычитать волновые фронты, усреднять, а также, при необходимости, оперировать с ними. Одним словом - алгоритмы программы должны быть безукоризненны. Чтобы не пропустить рябь, нужно очень высокое разрешение по апертуре - очень хороший цифровой приемник. Современные программные продукты должны сами расставлять референсные точки, причем, не только по черным, но и по белым полосам [5].

### **ФИЗИЧЕСКОЕ МАКЕТИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА**

Предположим, что у нас есть зеркально-линзовая телескопическая система с плавным завалом края [6]. Этот завал края проявляет себя искривлением полос на краях интерферограммы (рис. 3).

S-образная форма полос - кома, не до конца выведенная юстировкой этого телескопа, при обработке мы с помощью программного обеспечения вычтем. Также слева видно, что фокусёр немного вылез в апертуру.

Проанализируем данную интерференционную картинку волнового фронта с помощью следующих программных пакетов. Представленные программы распространяются условно-бесплатно. Для предварительного краевого анализа волнового фронта возможностей представленных программ достаточно.

1. Обсчет в программе OpenFringe. Програм-

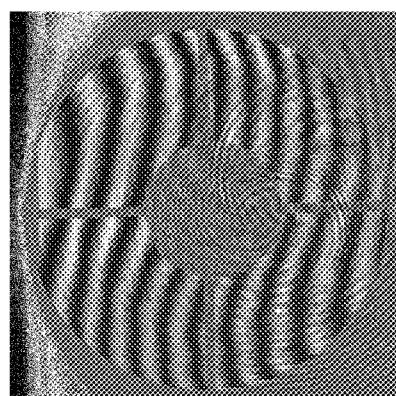
ма сильно прогрессировала за последнее время, ей вполне можно пользоваться (рис. 4).

Программа наглядно выводит 3-Д модель волнового фронта, вид и значения функции рассеивания точки (ФРТ), результат восстановления волнового фронта путем разложения по полиномам Чебнике, число Штреля, а также график восстановления ошибки волнового фронта при данной длине волны.

Кома вычтена, так как её можно отьюстировать, астигматизма практически нет, есть слабая трехлепестковая деформация, скорее всего - от крепления зеркала. Основная ошибка - бугор в центре, или иначе говоря - опущенный край.

2. Обсчет в программе AtmosFringe (рис. 5).

Программа наглядно выводит 3-Д модель волнового фронта, синтетическую интерферограмму, вид и значения ФРТ, график функции передачи модуляции (ФПМ), число Штреля и другие aberrационные характеристики.



*Рисунок 3.  
Тестовая интерферограмма*

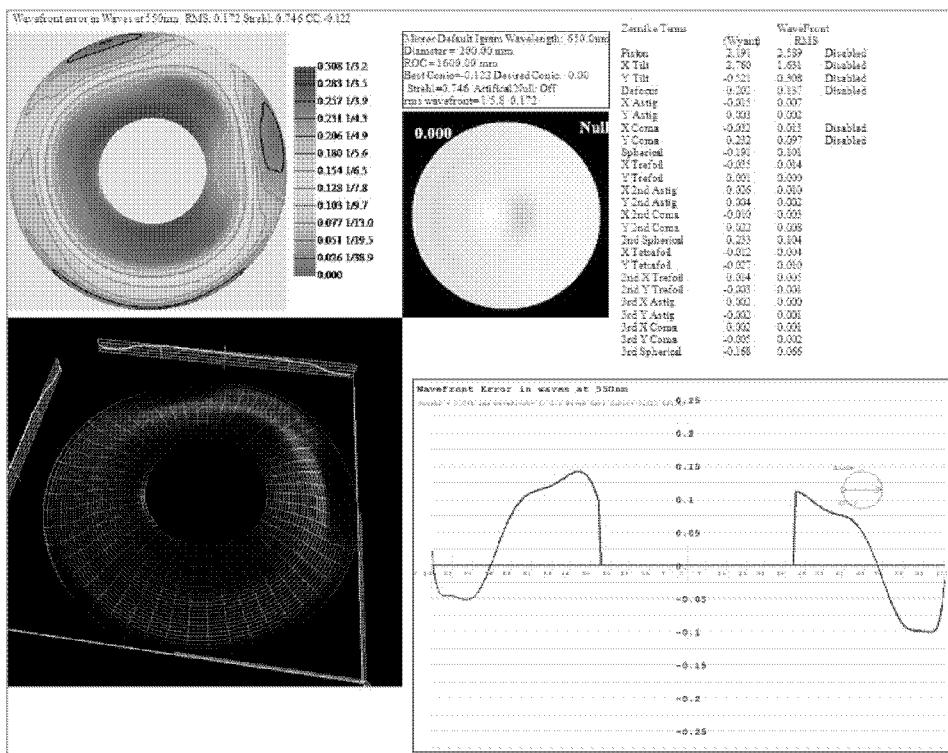


Рисунок 4.  
Обсчет в программе OpenFringe

3. Обсчёт в программе QuickFringe (рис. 6) Особенностью данной программы является возможность ручной корректировки трассировки точек на синтетической интерферограмме.

По количественным результатам, из приведённых выше программ видно, что при относительно большой амплитуде ошибки  $\lambda/4$  мы имеем очень высокий Штрель 0.967. Это получается в тех случаях, когда относительно большая ошибка имеет малую площадь, а следовательно её воздействие на результат невелико. На карте волнового фронта это хорошо видно, ошибка сосредоточена на самом краю.

Всё дело в том, что полный размах волновой aberrации совершенно не даёт представления о том, какую площадь эта ошибка занимает. Поэтому надо учитывать не только размах ошибки, но и её площадь. Традиционно не было возможности определить полную карту волнового фронта в отличие от интерферометрических испытаний с использованием автоматизированных методик определения волнового фронта. поступали следующим образом: задавались некоторым видом волновой aberrации, например, сфе-

рическая aberrация третьего порядка (недо- или переасферизация) и уже для этого вида aberrации определяли какой её размах начинает заметно портить качество изображения.

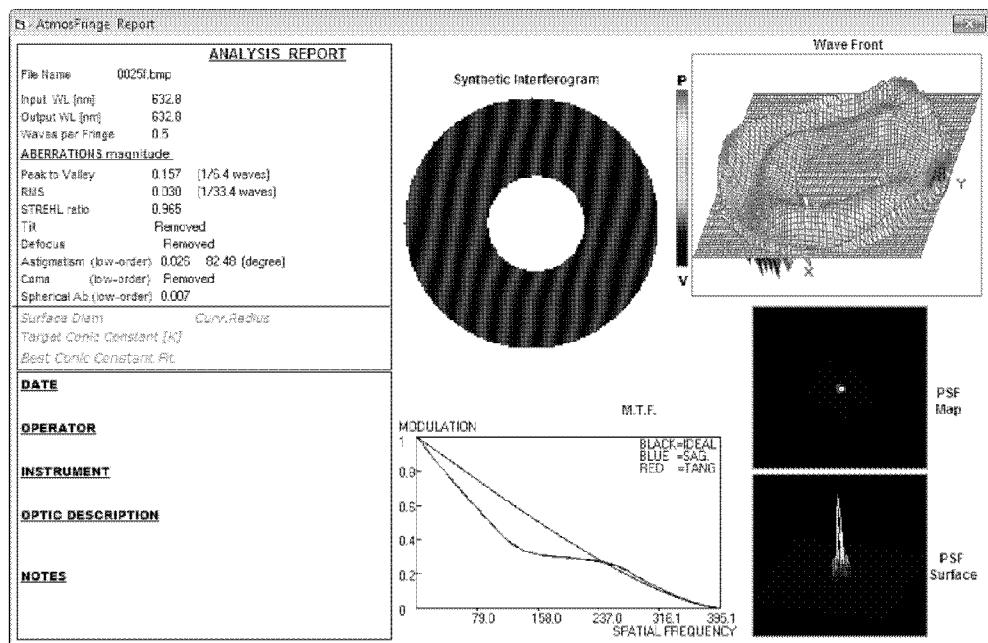
Так что смысл в допуске Максутова прямой, если учесть к ошибке какой формы он относится. Полагаю, Максутов имел именно волновую aberrацию третьего порядка, для которой размаху 0.025 ламбды соответствует Штрель 0.8

Тут надо ещё заметить, что 0.025 ламбды имеются в виду как остаточная волновая aberrация при условии перефокусировки на минимум волновой aberrации.

### ОСНОВНЫЕ ОТЛИЧИЯ В ПРОГРАММНОМ ПРИНЦИПЕ РАСШИФРОВКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Программы используют принцип восстановления волнового фронта путем разложения по полиномам Цернике, состоящий из большого количества членов, отвечающих за различные элементарные aberrации.

Так, за осесимметричные aberrации отвечают достаточно много членов, называемых сферичес-



*Рисунок 5.  
Обсчет в программе AtmosFringe*

кой аберрацией 3-го, 5-го, 7-го и так далее порядков. Стоит учитывать, что круговые полиномы Чебиже ортогональны, т.е. независимы от других и если мы имеем дело с некоей аберрацией, то все, что мы с ней делаем, не оказывает на остальные полиномы (другие аберрации) никакого влияния. И если есть коэффициенты аберрации 5 порядка, то это значит, что эта аберрация физически присутствует в системе.

Чтобы описать наш завал края, нужно так определить коэффициенты при этих членах, чтобы после их сложения получилась именно та форма волнового фронта, которая и дала ту интерферограмму которую мы отсняли.

Если ошибка имеет сложный вид, то может вполне оказаться, что для описания её суммой членов, называемых сферическими аберрациями разных порядков их коэффициенты будут большими, но с разными знаками, и по абсолютной величине больше, чем размах описываемой ими ошибками.

Нет ничего необычного, что, например, зональная ошибка  $\lambda/10$  будет описана суммой сферической аберрации третьего порядка с размахом 0.8 лямбды и пятого порядка - с размахом 0.7 лямбды. Но знаки при третьем и пятом порядке противоположные и после сложения останется та самая 0.1 лямбды соответствующей формы.

Программа при этом честно напишет, что в

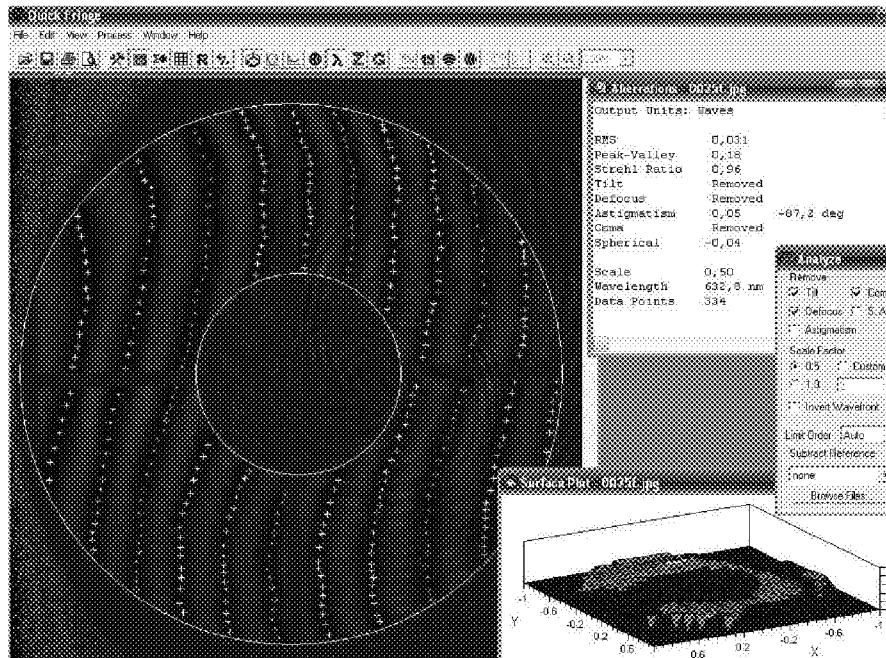
системе с полной аберрацией 0.1 лямбды есть сферическая аберрация третьего порядка 0.8 лямбды, умалчивая о том, что там же есть и сферическая аберрация пятого порядка сравнимой амплитуды, но противоположного знака.

Только так, и никак иначе стоит воспринимать те значения сферической аберрации, не полной, а только третьего порядка, которую указала программа.

В этой ситуации задача юстировки объектива вовсе не заключается в сведении сферической аберрации третьего порядка к нулю, а к выбору такого её значения, чтобы число Штреля оказалось максимальным. При максимальном значении числа Штреля в такой системе сферическая аберрация третьего порядка будет вполне отлична от нуля и вполне возможно, что её значение будет большим.

## ВЫВОД

Для измерений нет принципиальной разницы, каким способом и какой оптической схемой пользоваться. Главная задача - получить когерентный пучок света с постоянной рабочей длиной волны. Также необходимо пользоваться достаточно качественным приёмником, выводящим результаты интерферометрии. Главное требование - однородность освещения по апертуре,



*Рисунок 6.  
Обсчт в программе QuickFringe*

иначе градиент яркости хоть немного, но сместит положение точек, поскольку при неравномерной освещенности склоны смещаются, а минимумы и максимумы (середины полос) остаются примерно на месте. Что влияет на качество интерференционной картины.

При качественной оптике главным критерием является Штрель или ФРТ, а далее надо смотреть на форму волнового фронта и делать соответствующие предположения, какие деформации волнового фронта чем вызваны. То ли это погрешности юстировки или пережатие, то ли это недоконфигурированное зеркало.

Проблема сравнения комплексных Штрелей в том, что практически все программы расчёта оптики и программы анализа интерферограмм их не выдают, ограничиваясь фазовой составляющей. Это вполне понятно - экранирование на интерферограмме какое есть, такое есть, а при разработке не очень часто именно дифракционные эффекты от увеличения экранирования перевешивают сопутствующее aberrационное улучшение, так что гораздо чаще оно управляетяется вычислением энергетических функционалов, прямо или косвенно.

С использованием современных программ для краевого анализа волнового фронта оптических

систем стало возможно протестировать оптическую систему в сборе, в автоколлимации и получить интегральную оценку всей оптики на основе числа Штреля и карты уклонений волнового фронта. Потом ввести полученный волновой фронт в схему для расчета оптики, указать там форму зрачка с учетом всех экранирующих элементов и получить истинные значения для сравнения реальных оптических систем с расчётными данными.

#### *Список литературы:*

1. Витриченко Э.А. Методы исследования астрономической оптики - М.: Наука, 1980. - 152 с.
2. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Методы исследования и контроля качества оптических систем - СПб: НИУ ИТМО, 2012. - 125 с.
3. Optical shop testing. Third Edition. Edited by Daniel Malacara. 2007.
4. Якушев Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов - М.: Логос, 1999.- 480 с.
5. Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. - Новосибирск. Изд-во НГТУ, 2004, 252с
6. <http://www.fidgor.narod.ru/Observers/test.html>

# ОПТИМИЗАЦИЯ И РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ

КАЛАШНИКОВ С.Д. - оператор научной роты войск ВКО,

КОЧЕШКОВ М.А. - оператор научной роты войск ВКО,

АНУЧИН Р.Н. - оператор научной роты войск ВКО,

КОМИССАРОВ А.В. - инженер исследователь НТЦ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*Оптимизация модулей системы оптико-механической необходима для упрощения управления данными модулями, снижения размера плат, на которых будут размещены данные модули, их стоимость и сложность производства.*

*Это позволит создавать универсальные (унифицированные) платы, для оптико-механических систем космических аппаратов дистанционного зондирования земли, что в свою очередь сокращает время разработки схем.*

*Основным предложением по оптимизации является отказ от микроконтроллеров на модулях управления системы оптико-механической.*

## ВВЕДЕНИЕ

Система оптико-механическая (СОМ) включает в себя следующие модули: управления приводом крышки (ПК), управления калибровкой (УК), управления приводом фокусировки (ПФ), управления системой термостабилизации (СТС). Так как данные модули выполняют задачи схожие для разных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), то их унификация позволит сократить время на разработку и производство новых печатных плат.

За счет универсализации снижается сложность производства конечных блоков и упрощается проектирование аппаратуры в целом. Всё это ведёт к уменьшению размера аппаратуры, времени и стоимости производства.

Ряд функций переносятся с модулем СОМ на блок управления аппаратурой среднего разрешения (БУ-СР), это позволяет программировать только один модуль управления, вместо четырёх.

В данной статье представлен подробный план унификации и упрощения модуля СОМ.

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Блок БУ-СР, предназначен для информационного обмена с контроллерами оптико-механической системы. Функциональная схема взаимодействия между БУ-СР и модулями СОМ представлена на рис. 1.

В эскизном проекте основным вычислительным элементом БУ-СР, реализующим командно-информационный обмен со смежными системами и алгоритмы управления, является (модуль на основе) 32-разрядный микроконтроллер серии 1986ВЕ91Т.

БУ-СР принимает от бортовой вычислительной системы (БВС) массив полетного задания в котором указывается определенный код для включения режима контроля и регулирования температуры, сохраняет массив в оперативное запоминающее устройство и затем передает в модуль управления системой термостабилизации (МУ-СТС) по информационному каналу RS-485. Также БУ-СР формирует запрос в МУ-СТС на формирование протокола измерительного цикла, который

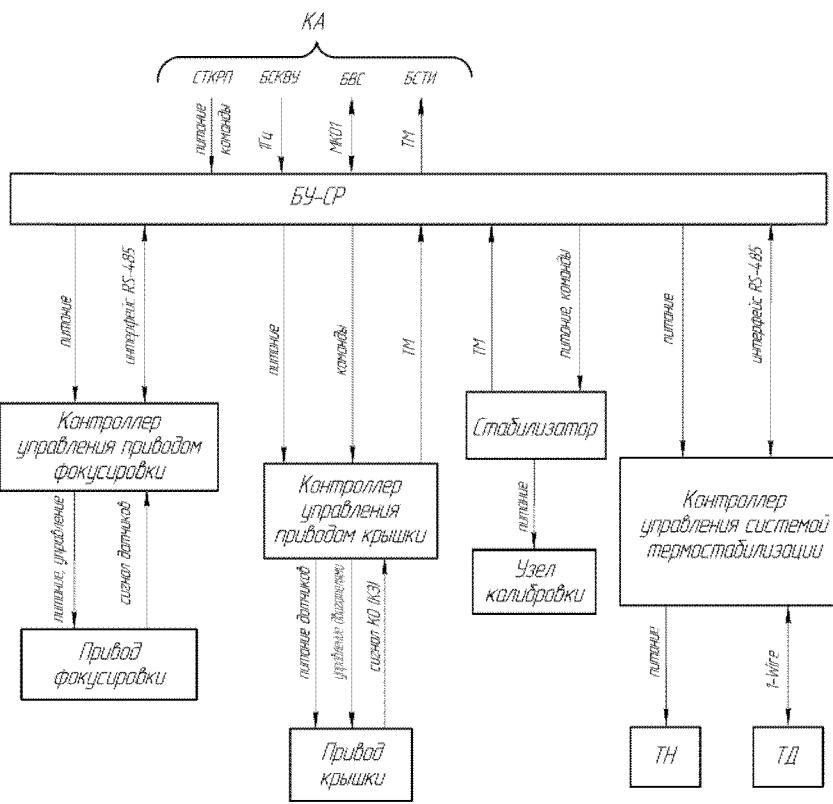


Рисунок 1.  
Функциональная схема связей БУ-СР с модулями СОМ

передается в систему приёма и преобразования информации.

Для осуществления фокусировки БУ-СР выдает исходные параметры в МУ-ПФ по информационному каналу RS-485 и включает напряжение питания. МУ-ПФ принимает информационное сообщение, производит перемещение исполнительного механизма в заданном направлении и на заданную величину, а затем передает в БУ-СР информационное сообщение о том, что команда выполнена.

В режиме калибровки БУ-СР осуществляет выдачу разовых команд управления для коммутации ламп калибровки ЛК1 и ЛК2. В этом режиме может включаться любая из двух ламп или обе одновременно, длительность включения ламп составляет не более 30 с. Контроль включения ламп калибровки осуществляется при помощи датчиков телеметрии, сигналы с которых записываются в определенные ячейки ОЗУ.

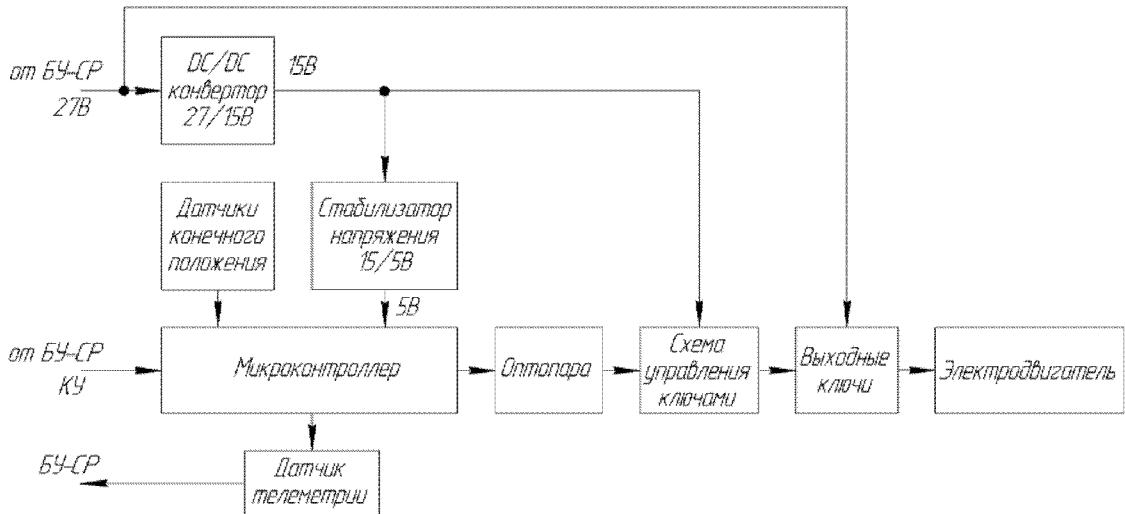
В режиме съемки БУ-СР выдает команду управления на открытие или закрытие крышки бленды и напряжение питания на МУ-ПК, а контроль состояния крышки бленды осуществляется по сигналам, приходящим с датчиков телеметрии.

## МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ КРЫШКИ (МУ-ПК)

Контроллер управления приводом крышки предназначен для управления процессом открытия/закрытия крышки бленды. МУ-ПК обрабатывает управляющие сигналы, приходящие от блока управления аппаратурой среднего разрешения (БУ-СР), формирует управляющие сигналы на электродвигатель, а также принимает сигналы с датчиков конечного положения, обрабатывает их и передает в БУ-СР. Функциональная схема МУ-ПК приведена на рис. 2.

Контроллер управления ПК получает напряжение питания от БУ-СР, команды управления "открыть/закрыть" крышку, затем МУ-ПК передает сигналы в БУ-СР о текущем состоянии положения крышки. Цепи питания, команд управления и телеметрии гальванически развязаны друг с другом и корпусом узла крышки, резервированы и разнесены в отдельные соединители. МУ-ПК питается постоянным током с напряжением величиной от 23 до 32 В.

МУ-ПК состоит из следующих компонентов: преобразователя напряжения 27/15 В, стабилизатора напряжения 15/5 В, микроконтроллера,



**Рисунок 2.**  
Функциональная схема МУ-ПК

датчика телеметрии, датчика конечного положения, оптопары, схемы управления выходными ключами, выходных ключей, электродвигателя.

Принцип работы МУ-ПК: микроконтроллер принимает сигналы от датчиков конечного положения, принимает разовые команды управления от БУ-СР и производит их обработку, а также коммутирует выходные ключи через опторазвязку. Выходные ключи работают в режиме широтно-импульсной модуляции. Информация о положении крышки снимается с датчиков конечного положения, микроконтроллер обрабатывает информацию и передает ее в БУ-СР.

В качестве исполнительного механизма применен моментный электродвигатель типа ДБМ, как хорошо проверенный и зарекомендовавший себя на практике.

Основным компонентом МУ-ПК является 8-разрядный микроконтроллер серии 1886ВЕ6 разработанный фирмой ЗАО "НПК Миландер".

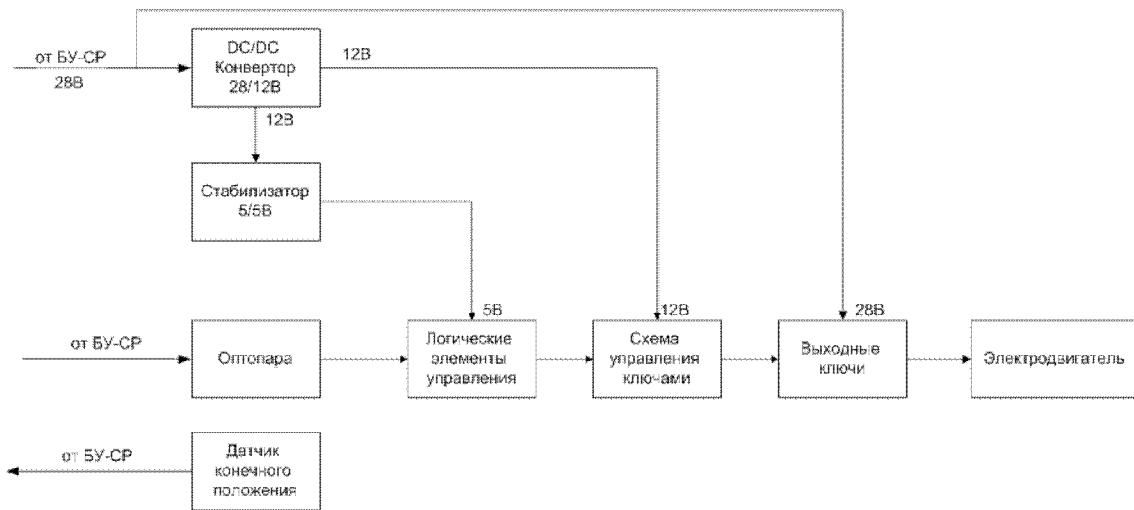
Для оптимизации работы МУ-ПК предлагается отказаться от микроконтроллера. Функцию коммутации выходных ключей будет выполнять цифровой автомат, синтезированный на микросхемах стандартной логики. Управление модулем осуществляется по ШИМ-каналу последовательностью импульсов. Положение крышки отслеживается датчиками Холла, соединенными напрямую с БУ-СР. Функциональная схема обновленного контроллера управления привода крышки представлена на рис. 3.

Вследствие упрощения МУ-ПК отпадает необходимость в программировании микроконтроллера, убираются элементы связи между модулем управления привода крышки и БУ-СР, уменьшается количество элементов на плате. Это уменьшает размеры платы, её энергопотребление, снижает сложность и стоимость производства платы.

## МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ (МУ-СТС)

Модуль управления системой термостабилизации предназначен для измерения и стабилизации температуры СОМ. МУ-СТС принимает команды управления от БУ-СР, после чего опрашивает датчики температуры СОМ в 30 точках измерения, и полученные данные измерений температуры накапливает в памяти. МУ-СТС формирует управляющие сигналы на нагревательные элементы, по результатам измерений формирует протокол измерительного цикла (ПИЦ), а также осуществляет командно-информационный обмен с БУ-СР. Функциональная схема МУ-СТС представлена на рис. 4.

Контроллер управления СТС получает напряжение питания от БУ-СР, командно-информационный обмен с БУ-СР осуществляется по интерфейсу RS-485. Термодатчики имеют цифровой выход и встроенный АЦП, информационный обмен микроконтроллера с датчиками температуры реализован по последовательной двунаправленной



шине интерфейса 1-Wire. Нагреватели (заменить на электронагреватели) получают напряжение питания 27 В и команды включения/отключения. Цепи питания и каналы обмена RS-485 гальванически развязаны между собой и корпусом, резервированы и разнесены в отдельные соединители. МУ-СТС питается постоянным током с напряжением величиной от 23 до 32 В.

МУ-СТС состоит из следующих компонентов: преобразователя напряжения 27/12 В, стабилизаторов напряжения 12/5 В и 12/3,3 В, микроконтроллера, приемопередатчика RS-485, ключей управления термоагревателями, цифровых датчиков температуры.

Контроллер управления СТС работает в следующих режимах: настройка, регулирование температуры, формирование ПИЦ. Принцип работы МУ-СТС осуществляется следующим образом: на контроллер управления поступает напряжение питания от БУ-СР, затем по каналу обмена RS-485 из БУ-СР поступают информационные сообщения, в которых задается режим работы и исходные данные на режим.

1) Проверка исправности нагревателей проводится последовательно для каждого из 20 нагревателей. Номинальный интервал времени между соседними измерениями 60 с, таким образом, микроконтроллер коммутирует нагреватели, а затем снимает информацию с термодатчиков. По результатам обработки значений температур микроконтроллер формирует сообщение: "Нагреватель N

исправен или неисправен". Результаты проверки сохраняются в внутреннем ОЗУ микроконтроллера и затем передаются в БУ-СР.

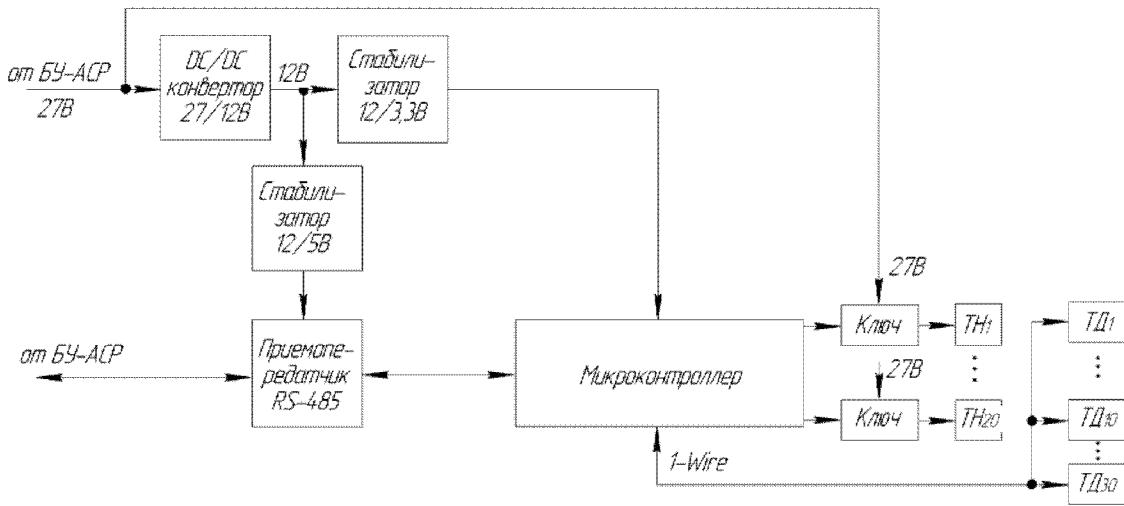
Также прорабатывается возможность одновременного включения всех нагревателей и измерения теплового поля.

2) Режим регулирования температуры задается в полетном задании по результатам анализа целевой информации и ПИЦ. Для режима регулирования задается диапазон рабочих температур, допустимое значение перепадов температур и точность поддержания заданных параметров. Микроконтроллер опрашивает все термодатчики с периодом 60 с и анализирует полученную информацию.

Если температура ниже заданной  $T_{min}$  для одного или нескольких датчиков, тогда микроконтроллер выдает сигнал на включение соответствующего нагревателя. В случае если температура выше  $T_{max}$ , то регулирования нет.

Если перепад температуры между определенными термодатчиками превышает допустимое значение, тогда микроконтроллер выдает сигнал на включение соответствующего нагревателя. Микроконтроллер выполняет одновременно две функции: поддержания номинала и компенсации перепада температуры.

3) Режим формирования ПИЦ предусматривает считывание данных о температуре в 30 точках измерения с периодом опроса 60 с. Микроконтроллер обрабатывает массивы данных о температуре по следующим алгоритмам: расчет средней



**Рисунок 4.**  
Функциональная схема МУ-СТС

температуры, расчет максимального и минимального значения температуры, расчет среднеквадратического отклонения температуры, расчет средней мощности нагревателей за виток, расчет среднеквадратического отклонения мощности. Рассчитанные параметры температурного режима для каждой точки измерения объединяются в протокол измерительного цикла. В ОЗУ микроконтроллера накапливаются и хранятся три последовательно сформированных протокола. Массив ПИЦ передается в информационный канал обмена по интерфейсу RS-485 по запросу БУ-СР.

Основным элементом, реализующим математическую обработку массивов температур и алгоритмов управления, является 32-разрядный микроконтроллер серии 1986ВЕ93У.

Для оптимизации работы МУ-СТС предлагается отказаться от микроконтроллера. Функцию формирования протокола измерительного цикла перенести на БУ-СР, управление нагревателями осуществлять через цифровой интерфейс, разработанный на основе мультиплексоров и дешифраторов.

Дешифратор - это логическое устройство на вход, которого подается двоичный код, а с выхода снимается позиционный десятичный. Мультиплексор - устройство, имеющее несколько сигнальных входов, один или более управляющих входов, и один выход. Мультиплексор позволяет передавать сигнал с одного из входов на выход; при этом выбор желаемого входа осуществляется подачей соответствующей комбинации управляющих сигналов.

Функциональная схема разработанного контроллера управления системой термостабилизации представлена на рис. 5.

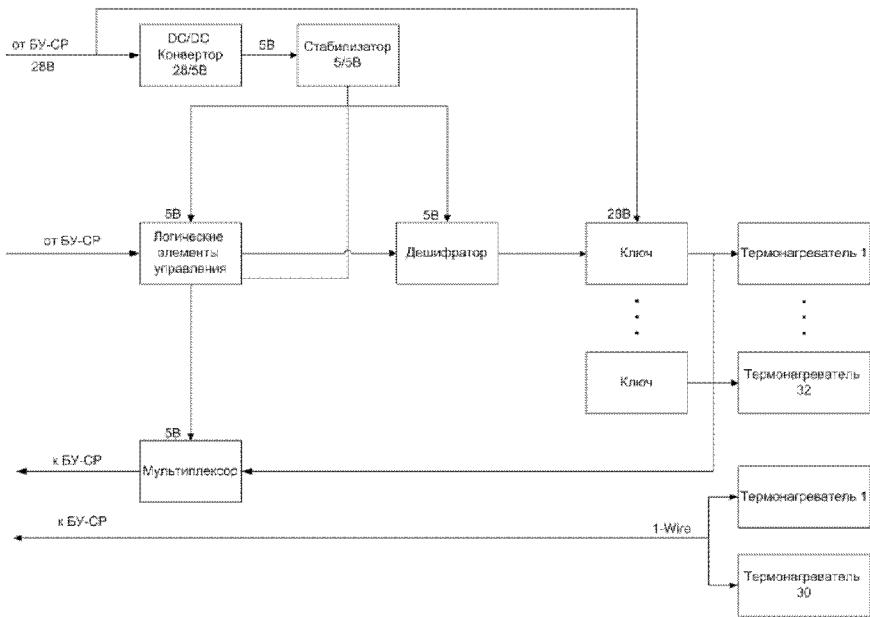
Вследствие изменения отпадает необходимость в программировании микроконтроллера, убираются элементы связи между микроконтроллерами, уменьшается количество элементов на плате. Изменение схемы позволило увеличить количество управляемых нагревателями с 20 до 32. Это уменьшает размеры платы, её энергопотребление, снижает сложность и стоимость производства платы.

### МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ УЗЛОМ КАЛИБРОВКИ (МУ-УК)

Узел калибровки (УК) предназначен для питания лампы КГМ24-100 стабилизированным током. Стабилизатор тока принимает управляющие команды от БУ-СР по которым производится коммутация ламп калибровки, также задается дискретно величина тока стабилизации. УК формирует и передает в БУ-СР квитанции включенных ламп. Функциональная схема узла калибровки представлена на рис. 4.

Цепи питания, команды управления и телеметрии гальванически развязаны друг с другом и с корпусом УК, резервированы и разнесены в отдельные соединители. Стабилизатор тока питается постоянным током с напряжением величиной от 23 до 32В.

Стабилизатор тока состоит из следующих компонентов: преобразователя напряжения 27/±15 В и стабилизатора напряжения ±15/±13,5 В для



*Рисунок 5.  
Функциональная схема оптимизированного МУ-СТС*

питания усилителей напряжения, а также регулирующих элементов для управления током ламп, датчиков тока и опторазвязок для выдачи квитанций в БУ-СР.

Принцип работы УК осуществляется следующим образом: входное напряжение 27В поступает на преобразователь напряжения 27/ $\pm 15$ В, а блок приема разовых команд работает в режиме ожидания команд управления от БУ-СР. При подаче команды "включить/отключить ЛК1, ЛК2" коммутируется соответствующая лампа. В режиме калибровки может включаться любая из двух ламп или обе лампы одновременно. Усилители напряжения в связке с прецизионным датчиком тока обеспечивают стабильность тока не менее 0,2% при всех дестабилизирующих факторах, погрешность установки тока составляет не более 0,5%. Информация о включенных или отключенных лампах передается в БУ-СР через опторазвязку.

Основным элементом, обеспечивающим заданные точностные параметры УК, является прецизионный операционный усилитель 1473УД1Т, разработка ОАО "Интеграл". Предлагаемая микросхема имеет компактный 8-выводный металлокерамический корпус, низкий уровень шумов, температурный дрейф нуля составляет 0,6 мкВ/°C, что полностью удовлетворяет требованиям по стабильности тока.

## МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ФОКУСИРОВКИ (МУ-ПФ)

Контроллер управления приводом фокусировки предназначен для управления приводом фокусировки. МУ-ПФ принимает управляющую информацию от БУ-СР, формирует управляющие сигналы на электродвигатель, а также принимает аналоговый сигнал с датчика линейного перемещения. Функциональная схема МУ-ПФ приведена на рис. 5.

Контроллер управления ПФ получает напряжение питания от БУ-СР, информационный обмен с БУ-СР осуществляется по интерфейсу RS-485. Информация о текущем состоянии МУ-ПФ передается в БУ-СР с датчиков телеметрии. Цепи питания, каналы информационного обмена и телеметрии гальванически развязаны друг с другом и корпусом узла фокусировки, резервированы и разнесены в отдельные соединители. МУ-ПФ питается постоянным током с напряжением величиной от 23 до 32 В.

МУ-ПФ состоит из следующих компонентов: преобразователя напряжения 27/12 В, стабилизатора напряжения 12/5 В, микроконтроллера, датчика телеметрии, аналогового датчика линейного перемещения, оптопары, схемы управления выходными ключами, выходных ключей и электродвигателя.

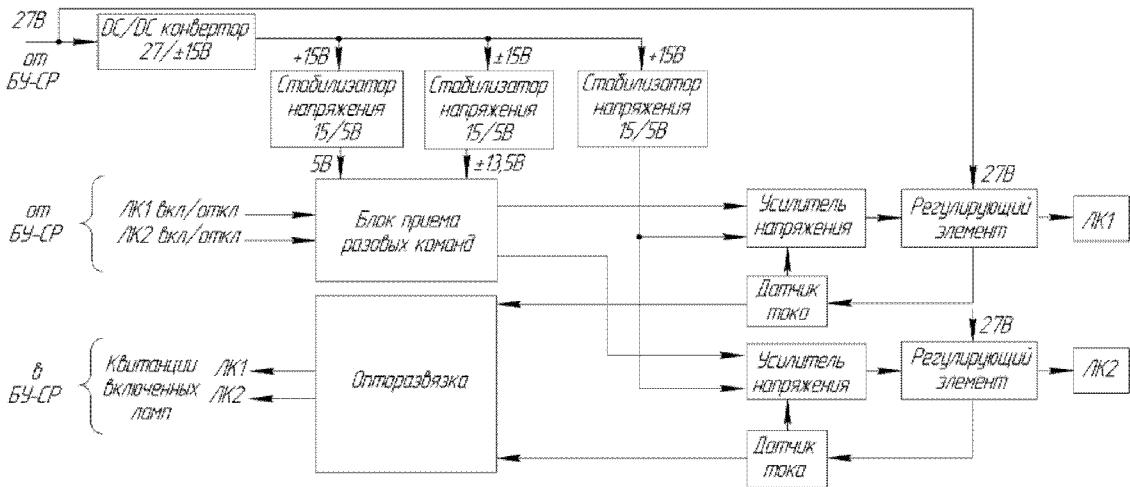


Рисунок 6.  
Функциональная схема узла калибровки

Принцип работы МУ-ПФ: на модуль управления поступает напряжение питания от БУ-СР, затем по каналу обмена RS-485 из БУ-СР поступают информационные сообщения. В сообщениях задается направление движения электродвигателя и величина, на которую необходимо произвести перемещение. Датчик линейного перемещения, имеющий аналоговый интерфейс, осуществляет обратную связь исполнительного механизма с модулем управления. Микроконтроллер осуществляет командно-информационный обмен с БУ-СР и обрабатывает сигналы с датчика линейного перемещения. При достижении исполнительным механизмом заданного перемещения, микроконтроллер выдает сигнал остановки, после чего электродви-

гатель фиксирует заданное положение. Микроконтроллер имеет встроенный АЦП, таким образом, обработка сигнала с датчика линейного перемещения осуществляется без применения внешних компонентов.

Исполнительный механизм выполнен на основе моментного электродвигателя. Моментный электродвигатель имеет вращательное движение. Для преобразования вращательного движения в поступательное необходимо применить шариковинтовую передачу.

Для оптимизации работы МУ-ПФ предлагается отказаться от микроконтроллера. Функции обработки команд с БУ-СР и коммутацию выходных ключей выполнять средствами цифрового

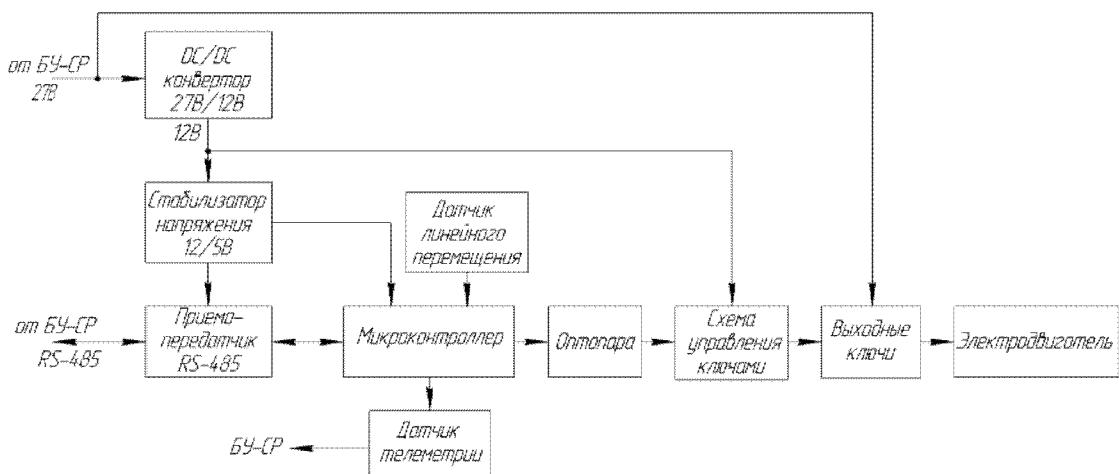


Рисунок 7.  
Функциональная схема МУ-ПФ

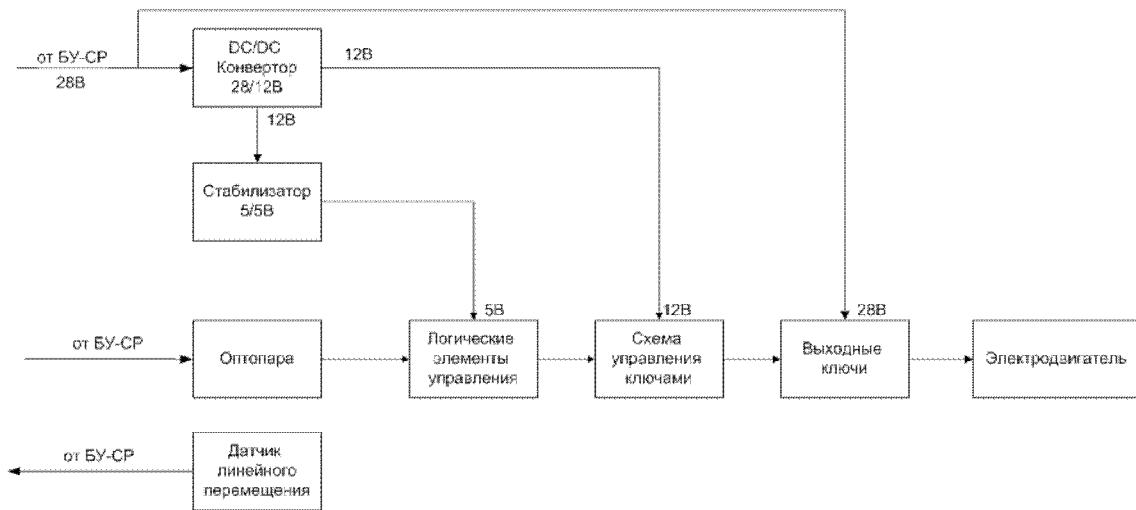


Рисунок 8.

Функциональная схема оптимизированного МУ-ПФ

интерфейса состоящего из логических элементов. Информацию о положении крышки предавать сразу на БУ-СР. Функциональная схема обновлённого контролера управления привода крышки представлена на рис. 8.

Вследствие упрощения МУ-ПК отпадает необходимость в программировании убранного микроконтроллера, убираются элементы связи между контроллером управления привода крышки и блоком управления аппаратурой среднего разрешения, уменьшается количество элементов на плате. Это уменьшает размеры платы, её энергопотребление, снижает сложность и стоимость производства платы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные изменения позволили существенно упростить модули управления СОМ. Отказ от использования избыточных по своим характеристикам, микроконтроллеров и последующая замена позволяет использовать данные модули без привязки к определённому аппарату.

Благодаря замене микроконтроллеров на жёсткую логику пропадает необходимость в программировании модулей СОМ. Все программное обеспечение централизовано находится на микроконтроллере процессорного модуля БУ-СР. Это позволяет оперативно менять ПО на всех модулях.

Замена микроконтроллеров также позволяет отказаться от интерфейсов связи между микроконтроллерами. Это приводит к сильному уменьшению количества элементов на плате, что влечёт за собой уменьшение энергопотребления блока в целом.

Также данные изменения позволяют удешевить процесс производства, вследствие низкой стоимости логических элементов по сравнению с микроконтроллерами и уменьшения общего числа элементов.

## Список литературы:

1. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника 2-е издание перераб. И доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 552 с., ил.
2. Пухальский Г.И., Новосельцева Т.Я. Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах: Справочник.- М.: Радио и связь, 1990. - 304 с., ил.
3. Спецификация на микроконтроллер 1986ВЕ3Т, ЗАО "ПКК Миландр" ТСКЯ.431296.009СП Версия 2.10.0. от 24.04.13г.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том I: Пер. с нем. - М.: ДМК Пресс, 2008. - 832 с.: ил.
5. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. - М.: ДМК Пресс, 2007. - 942 с.: ил.
6. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.1 Пер. с англ. 4-е изд. перераб. И доп. - М.: Мир, 1993. - 413 с., ил.
7. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.2 Пер. с англ. 4-е изд. перераб. И доп. - М.: Мир, 1993. - 371 с., ил.
8. Эскизный проект широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего пространственного разрешения, книга 2, часть 1. "Управление и контроль АСР"- ОАО "Красногорский завод им. С.А.Зверева".

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ, ВКЛЮЧАЯ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОГРАММНО-РЕАЛИЗОВАННОГО ФУНКЦИО- НАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, ДЛЯ КОМПЛЕКСА АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В СЛОЖНЫХ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

РЕМЕНЬ Б.А. - оператор научной роты войск ВКО,  
ТОКАН М.И. - оператор научной роты войск ВКО,  
БАЙКОВ А.В. - ведущий программист отдела НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В данной статье рассматривается задача автоматизации процесса планирования по обслуживанию космических объектов комплексом оптико-электронных средств с учетом текущего состояния ночной облачности и ее динамики.*

*Под обслуживанием, в общем случае, понимаются процедуры поиска и обнаружения космического объекта в зоне ответственности оптико-электронной станции, а также работа с объектом по внешним целеуказаниям - получение по объекту координатной (оценка угловых измерений) и некоординатной (оценка видимого блеска) информации.*

*В настоящем материале также рассматривается частная задача формирования параметров, характеризующих контур облачного покрова для верхней полусфера относительно местной топоцентрической системы координат (как отдельных образований, так и для кромки пригородной области), а также предлагаются некоторые подходы для её решения.*

*Авторами предложен собственный нетривиальный подход к решению поставленной задачи. Приведено описание обобщенной логической блок-схемы, а также соответствующей ей программной реализации для технологического стенда. В заключение рассмотрен вопрос оценки эффективности внедрения предложенного решения и предложения по дальнейшим исследованиям в этой области.*

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом становится все более неконтролируемым процесс разрастания номенклатуры космических объектов (КО) различного класса и назначения (включая крупные обломки и мусор) в околоземном космическом пространстве.

Совершенно очевидно, что для того, чтобы избежать возможных столкновений активно функционирующих космических аппаратов (КА) с космическим мусором или другими КО, необходимо обеспечить полнофункциональный контроль обстановки, т.е. осуществлять непрерывное наблюдение

и сопровождение объектов в рамках ведения соответствующего каталога КО. Решение подобных задач, по вполне понятным причинам, возложено на систему контроля космического пространства (СККП), в состав которой входят радиолокационные комплексы, пассивные и активные оптико-электронные станции (ОЭС), а также средства радиотехнического контроля.

Следует отметить, что из перечисленных выше средств наблюдения, работать по всем основным типам орбит космических объектов (по крайней

мере, по большинству из них) могут лишь измерительные средства пассивного типа, т.е. в основном это оптико-электронные комплексы (ОЭК).

Несмотря на свои несомненные преимущества, ОЭК имеют один, но очень существенный недостаток - сильную зависимость от астроклиматических факторов, т.е. условий наблюдения для заданного спектрального диапазона. Под основным фактором в данном случае понимается интегральная прозрачность атмосферы (способность пропускать направленное излучение в широких участках спектра) вдоль линии визирования ОЭС в рабочем диапазоне спектра отраженного от объекта излучения, а также ряд сопутствующих качественных и количественных характеристик - яркость фона, контрастность и т.д. Соответственно, изменения параметров объекта (получение координатной и некоординатной информации) могут проводиться лишь в областях (относительно линии визирования) не закрытых облачным покровом.

Чтобы свести негативный эффект указанного фактора к минимуму, такие комплексы размещают в местах с наилучшими астроклиматическими условиями, т.е. с наибольшим количеством ясных ночей в году (усредненный показатель за все время метеонаблюдений), а для увеличения вероятности обслуживания КО желательно и необходимо использовать территориально разнесенную группировку ОЭК.

Отметим также, что, как правило, на этапах разработки и проектирования ОЭК (территориальная привязка) в первую очередь учитывается именно количество ясных ночей в году. Следует подчеркнуть, что в последнее время количество ясных ночей в местах дислокации действующих оптико-электронных комплексов (например - горная система Памира, гора Санглок, республика Таджикистан) существенно изменилось (в сторону снижения) и количественная оценка такого показателя стала плохо предсказуемой из-за повышенной нестабильности погодных условий. Чтобы как-то скомпенсировать возникающие проблемы, как минимум, необходимо учитывать состояния облачного покрова в зоне ответственности ОЭК при планировании работы по КО в рамках текущего рабочего сеанса обслуживания.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

По сути, задача подобного учета состоит в составлении для заданного промежутка времени (сеанса обслуживания КО) карты-схемы рабочей зоны ответственности в заданной картографической проекции для соответствующей оптико-электронной станции (ОЭС) с отмеченными на ней установленным образом зоны гарантированного (или условно гарантированного) обслуживания.

Карта-схема составляется в местной топоцентрической системе координат с приведением к верхней полусфере единичного радиуса относительно точки стояния ОЭС. После чего она может быть представлена в формате различных картографических проекций, а именно: цилиндрической, ортографической, стереографической и др.

Имея такую карту-схему, можно предварительно спланировать работу станции таким образом и только по тем КО, которые она сможет обслуживать или, если станция занимается поиском и обнаружением в "фоновом" режиме, направить ее в свободную от облачного покрова область.

Подобное планирование позволит существенно сэкономить ресурс комплекса и повысить эффективность обслуживания КО как по пропускной способности, так и по эффективной продолжительности обслуживания отдельных объектов. В случае сплошной облачности возможно превентивное отключение ОЭС (перевод станции в дежурный режим), что позволит существенно сэкономить моторесурс работы комплекса (за исключением задач обслуживания КО, имеющих высший приоритет).

Так как же составить такую карту-схему? Прежде чем составлять её, сформулируем номенклатуру требований, которым она должна соответствовать:

- рабочее пространство карты-схемы (поверхность верхней половины единичной сферы) должно иметь привязку к заданной местной топоцентрической системе координат (должны быть заданы начало отсчета и расположение осей) и сетку сегментирования установленного формата;
- все сформированные сегменты сетки должны удовлетворять заданным качественным (форма, параметры центра масс ячейки) и количественным

(размеры, взаимные углы и площадь сегментов, а также их количество) показателям;

- необходимо реализовать возможность динамического "управления" форматом сетки применительно к количественным показателям, описывающим совокупность элементарных сегментов, т.е. сохраняющее привязку рабочего точечного объекта (звезды или КО) в рабочем пространстве карты-схемы;

- каждый сегмент сетки имеет, в качестве собственного параметра, коэффициент-признак прозрачности относительно линии визирования с привязкой к центру масс сегмента ( $0$  - плотная облачность;  $1$  - отсутствие облачности;  $0 < k < 1$  - частичная облачность);

- необходимо также иметь возможность определять количество облачности (относительный и абсолютный показатели, характеризующие степень закрытия рабочего пространства облачным покровом);

- наличие возможности проведения анализа динамики изменения состояния облачного покрова на основе сравнения карт-схем, составленных для заданных моментов времени в течение астрономической ночи или, как частная задача, в течение сеанса обслуживания КО;

- к формуляру карты-схемы должен "прилагаться" параметр, характеризующий "время существования" или "интервал достоверности" данных, представленных на карте-схеме данных, т.е. время, в течении которого можно использовать, полученные для границ облачного покрова оценки.

Проще говоря, нужно построить поверхностную координатную сетку установленного формата, "натянутую" на верхнюю полусферу зоны ответственности ОЭС. Для того, чтобы составить кар-

ту-схему рабочей зоны ответственности ОЭС, необходимо решить и проработать следующие задачи:

- определить номенклатуру показателей пригодных для описания состояния облачности, уточнить способ получения первичных измерений для последующей оценки выбранных показателей и установить требования к измерительным средствам;

- разработать алгоритм составления карты-схемы рабочей зоны ответственности ОЭС, используя полученную информацию;

- разработать методику работы с составленной картой-схемой, т.е. рассмотреть область практического применения полученных результатов на командном пункте (КП).

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Далее рассмотрим обобщенную структурную логическую блок-схему алгоритма, т.е. предлагаются решать задачу учета текущего состояния облачности в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

В основном, учет облачности состоит из 4-х основных технологических этапов:

1. Расчет показателя с оценкой степени покрытия облаками рабочей области.

2. Расчет показателя с оценкой динамики изменения облачности.

3. Составление подробной карты-схемы рабочей области для зоны ответственности ОЭС.

4. Подготовка карты-схемы и соответствующих рекомендаций по планированию работы ОЭС с использованием полученных расчетных данных и оценка времени их "существования".

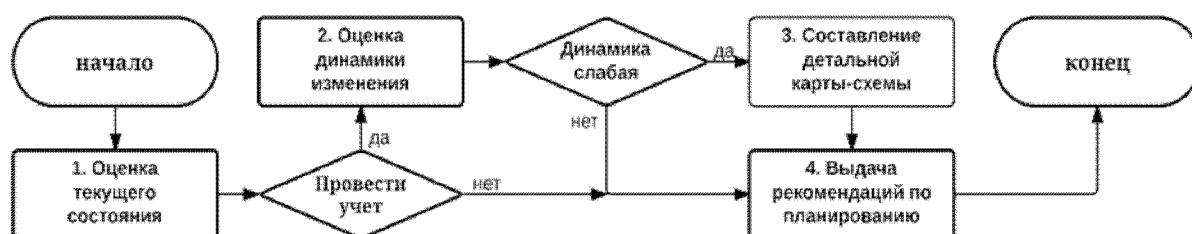


Рисунок 1.

Структурная схема учета текущего состояния облачности

Далее рассмотрим более подробно каждый из технологических этапов:

**На первом этапе** необходимо провести оценку "количество" облачности, чтобы принять решение о целесообразности или даже невозможности работы ОЭС в текущих условиях. По сути, на этом этапе составляется грубая карта-схема в первом приближении.

Так как здесь не нужна большая точность, необходимую информацию можно получить, сделав снимок телевизионной камерой с объективом типа "рыбий глаз", который позволяет сфотографировать всю верхнюю небесную полусферу одним кадром.

Далее составляем карту-схему (подробно процесс составления карты-схемы рассмотрен ниже) и рассчитываем показатель оценки степени покрытия облаками зоны ответственности ОЭС. Если этот показатель не превышает заданного порогового значения, то принимается решение о переходе ко второму этапу обработки.

В противном случае переходим к четвертому этапу, формируя рекомендацию отложить работу станции. Структурная схема этапа представлена на рис. 2.

**На втором этапе** проводится оценка динамики изменения облачного покрова. Это необходимо для того, чтобы понять, как долго составленная карта будет достоверной. Для этого проводим съемку

нескольких кадров той же камерой, что и на предыдущем этапе, с определенными интервалами. По полученным кадрам составляем карты схемы и проводим их сравнение.

В случае сильного их отличия (например, по результатам корреляционной обработки) делается вывод о динамических характеристиках с расчетом соответствующего показателя (например, как функция коэффициента корреляции) и нецелесообразности составлять подробную карту, т.к. сбор информации для подробной карты проводится порядка получаса. За это время картина облачности может существенно измениться. Структурная схема второго этапа представлена на рис. 3.

**На третьем этапе** проводится составление подробной карты-схемы для всей зоны ответственности ОЭС. Входные данные на этом этапе поступают (как один из возможных вариантов) от ОЭС т.н. барьерного типа в режиме идентификации каталогизированных звезд установленной номенклатуры для заданного углового направления и с учетом поля зрения ОЭС.

Обход всей рабочей зоны совершается примерно за  $30 \div 40$  минут. В зависимости от тактико-технических характеристик (ГТХ) ОЭС возможны различные варианты организации предварительного сканирования рабочей зоны ответственности. Одни из возможных вариантов подобного сканирования представлены на рис. 4 в виде ор-

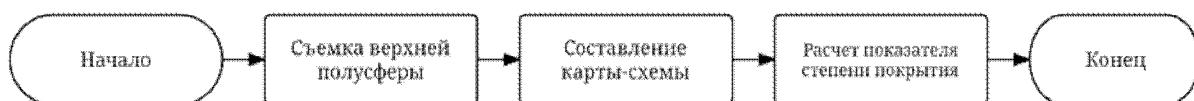


Рисунок 2.  
Структурная схема первого технологического этапа учета облачности

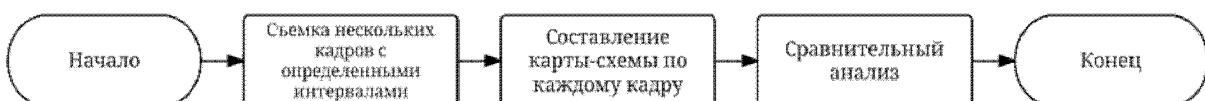
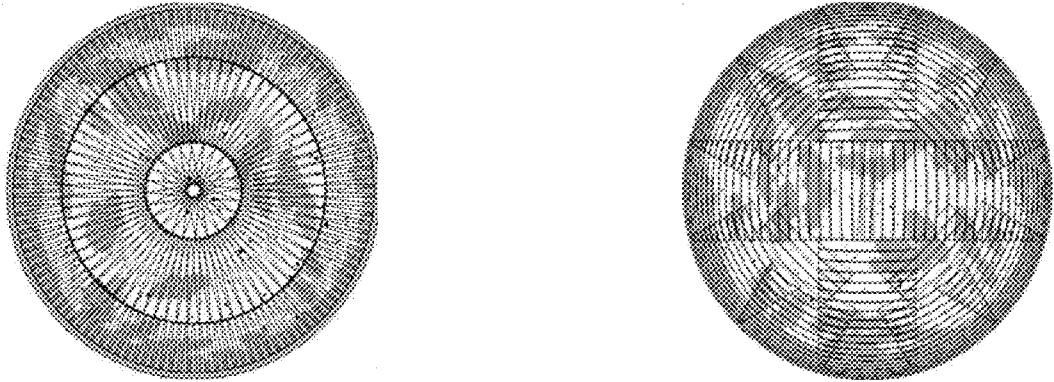


Рисунок 3.  
Структурная схема второго этапа учета облачности



*Рисунок 4.  
Варианты схем сканирования ОЭС барьерного типа*

тографической проекции зоны ответственности.

Слева на рис. 4 представлен круговой обход. Основным недостатком такой схемы является большая площадь перекрытия ( $\approx 45\%$ ), т.е. излишнее дублирование информации, хотя технологически эта схема легко реализуется.

Справа на рис. 4 представлен обход с минимальной площадью перекрытия ( $\approx 20\%$ ), а значит, уменьшается количество замеров, хотя при этом усложняется сама схема обхода и требуется специальный алгоритм управления опорно-поворотным устройством ОЭС.

После сбора и получения информации от ОЭС, составляется подробная карта-схема. Структурная схема этапа представлена на рис. 5.

**Четвертый этап** заключается в формировании упомянутых ранее рекомендаций. В качестве таких могут выступать:

1. Целесообразность работы ОЭС в текущих астроклиматических условиях;
2. Список каталогизированных КО, чьи трассы (эфемериды) принадлежат заданной локальной зоне ответственности и могут быть обслужлены с высокой вероятностью;

3. Области, доступные для выполнения задач поиска и обнаружения КО в зависимости от параметров орбиты (приполярные, геостационарные, эллиптические, низкие, высокие и т.д.).

Рассмотрев структурную схему алгоритма, определим далее основные технологические операции:

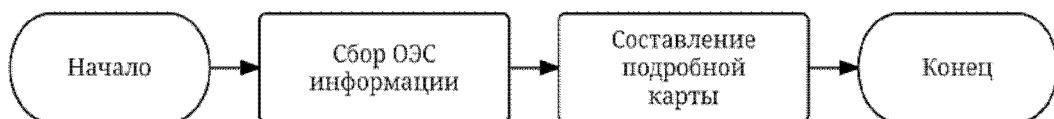
1. Сбор и формирование первичных обобщенных данных о текущем состоянии ночной облачности с использованием телевизионных снимков верхней полусферы (рабочей зоны ответственности ОЭС).

2. Сбор и формирование первичных обобщенных данных общей информации о текущем состоянии облачности непосредственно от измерительных средств как результат сканирования верхней полусферы.

3. Составление карты-схемы доступной рабочей области зоны ответственности ОЭС.

В качестве средства получения информации обобщенного характера может быть использована обзорная телевизионная камера типа "Рыбий глаз" из состава комплекса аппаратуры измерения астроклиматических параметров.

В качестве средства получения подробной информации о характере ночной облачности целесо-



*Рисунок 5.  
Структурная схема третьего технологического этапа учета облачности*

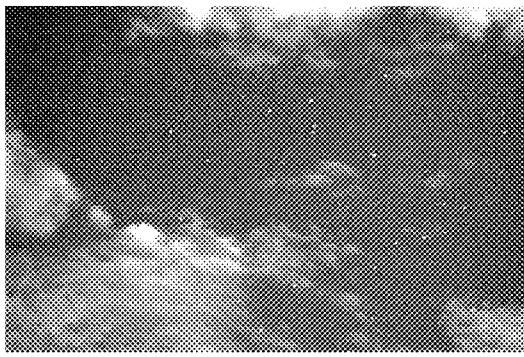


Рисунок 6.1.  
Ночная облачность



Рисунок 6.2.  
Дневная облачность

образно использовать данные от измерительной ОЭС барьерного типа. Такие станции имеют наибольшее "продольное" поле зрения (в угломестной плоскости относительно орбитальной оси опорно-поворотного устройства) и позволяют быстрее собирать необходимую информацию (работа программно-аппаратного комплекса ОЭС в режиме обнаружения и регистрации каталогизированных звезд).

Для составления карты-схемы предлагается использовать специально разработанный программный модуль, предназначенный для преобразования (форматирования) информации, полученной от измерительных средств и составления карты схемы рабочей области применительно к зоне ответственности ОЭС. Этот модуль используется на первых трех этапах работы рассмотренного выше алгоритма учета астроклиматических условий.

Прежде чем приступить к описанию программного модуля, рассмотрим концепцию составления карты-схемы ночной облачности. Чтобы учесть влияние какого-либо фактора, сначала необходимо установить, в чем оно проявляется.

На рис. 6 представлены снимки ночной и дневной облачностей. На снимках видно, что в дневное время облачность проявляется в наличии белых облаков на фоне прозрачного неба, в отличие от ночной, когда различие в контрасте проявляется не так явно. Контраст ночной облачности с небом явно не достаточен, чтобы оконтурить облака.

Поэтому, для определения наличия облаков в ночное время целесообразнее ориентироваться на звезды, точнее на снижение их яркости (в случае полупрозрачной дымки) или полное их отсутствие. Для того чтобы использовать объекты указанного типа в качестве критерия наличия или отсутствия облачности необходимо знать - какие звезды видны с точки наблюдения, а также их каталогизированные параметры (угловые координаты и блеск). Эти данные можно получить из рабочего звездного каталога, который содержит всю необходимую информацию о звездах.

Определившись с критерием, уточним непосредственно принцип оконтуривания. Для этого выделим на небосводе некоторую прямоугольную область (рис. 7).

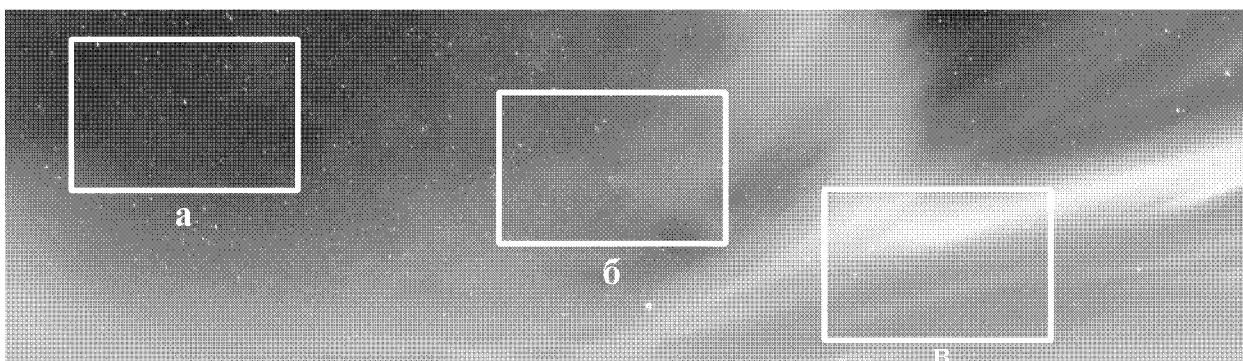


Рисунок 7.  
Снимок ночного неба с облачностью: а - облачность отсутствует,  
б - полупрозрачная дымка, в - плотная облачность

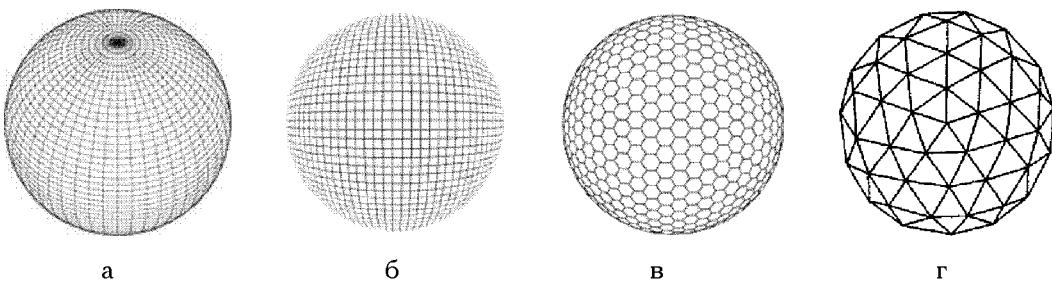


Рисунок 8.

Различные способы разбики сферической поверхности:  
 а - картографическая, б - растровая, в - шестиугольная, г - треугольная

В зависимости от наличия или отсутствия облачности возможны три варианта состояния признака видимости области:

1. Все звезды видны и их яркость соответствует номинальной. Соответственно, в рассматриваемой прямоугольной области облаков или дымки нет (рис. 7а).

2. Не видно ни одной звезды или яркость звезды не соответствует номинальной. Соответственно, область полностью закрыта облаками или дымкой (рис. 7в).

3. Видно не все звезды или не у всех звезд яркость соответствует номинальной. Соответственно, область частично закрыта облаками или полу-прозрачной дымкой (рис. 7б).

Очевидно, что третий случай это комбинация первых двух на областях меньшего размера. Принцип оконтуривания заключается в следующем. Исходная прямоугольная область делится на меньшие по размеру и подобные по форме части. Выделяются открытые и закрытые области. Если какие-то области все еще частично закрыты, то на следующем шаге делятся только они. И так повторяется до достижения порога разбиения, т.е. когда меньшая по размеру область не может дать

достоверной информации о наличии или отсутствии облачности (отсутствие каталогизированных звезд).

В итоге получаем набор областей, полностью открытых или закрытых облаками. Выделяя границу между закрытыми и открытими облаками, далее собираем контур текущей облачности.

Прямоугольная сетка разбиения в рассматриваемом случае весьма эффективна и отвечает всем предъявляемым к ней требованиям:

- возможность локального разбиения;
- сегменты имеют одинаковую форму и размер на одном уровне разбиения;
- отсутствуют перекрытия.

Такую сетку легко строить, но она не подходит для разбиения рабочей области зоны ответственности ОЭС, т.е. верхней небесной полусфера (рис. 8).

Поверхность сферы можно разбивать различными способами: картографической, растровой или шестиугольной разбивками (рис. 9). Но всем вышеуказанным требованиям наиболее удовлетворяет треугольная сетка на основе икосаэдра.

Поясним принцип её построения. Икосаэдр - правильный 20-гранник, каждая грань которого есть равносторонний треугольник (рис. 9, 10).

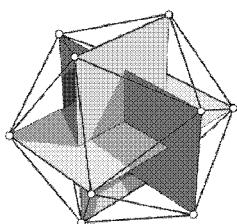


Рисунок 9.  
Принцип построения базового икосаэдра

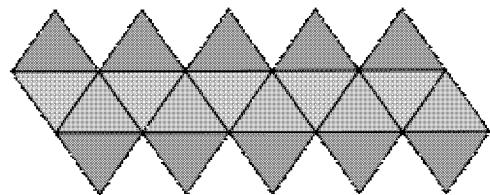
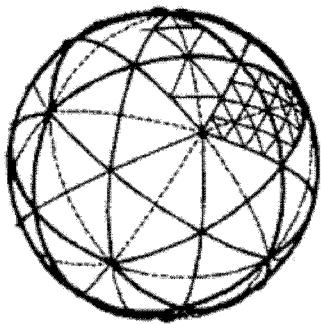
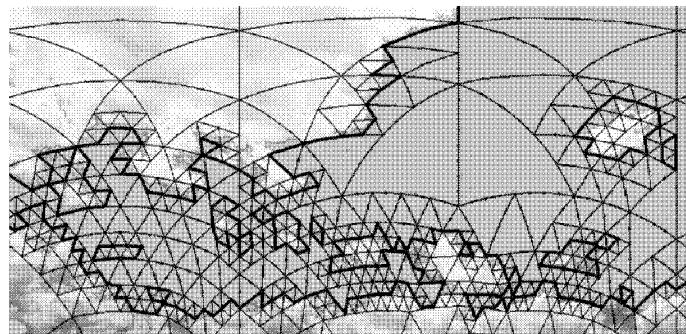


Рисунок 10.  
Развёртка базового икосаэдра



*Рисунок 11.*  
Разбиение рабочей области ОЭС треугольной разбиейкой



*Рисунок 12.*  
Применение оконтуривания дневного облачного покрова с использованием треугольной сетки

Спроектировав ребра икосаэдра на поверхность описывающей его сферы, получим на её поверхности базовую сетку разбиения. Каждый треугольный сегмент может делиться на четыре меньших сегмента, каждый из которых можно также поделить (рис. 11). Механизм деления аналогичен механизму построения фрактала "решето Серпинского". Применяя принцип оконтуривания, описанный ранее, возможно оконтурить облачность на поверхности сферы (рис. 12).

Рассмотрим подробнее алгоритм составления карты-схемы текущего состояния облачного покрова в ночное время (рис. 13).

Составление карты-схемы начинается с привязки сетки сегментирования к местной топоцентрической системе координат (МТСК). В этой системе будут проводиться все расчетные процедуры.

Затем из звездного каталога выбираются звезды с блеском 10-11m, расположенные в зоне ответственности ОЭС на сеанс работы. Их координаты пересчитываются в МТСК. Проводится сканирование всей рабочей области ОЭС, в процессе сканирования формируются списки обнару-

женных и каталогизированных звезд. Далее создается базовая сетка сегментирования.

Относительно каждого сегмента проводится привязка и оценка параметров распределения применительно к каталогизированным звездам, принадлежащих сегменту и, далее, принимается решение о доступности текущего сегмента для наблюдения (оценка прозрачности) или его дальнейшем делении.

После обхода всех сегментов формируются списки закрытых и открытых для наблюдения областей. По границе между этими областями собирается контур облачного покрова. Полученный таким образом контур является ломанной кривой. Для лучшего визуального представления проводится сглаживание контура (например как оценка параметров кривой 2-го порядка или представление рядом Фурье - пакетом гармоник).

Кроме того, процедура сглаживания позволяет получить аналитическое выражение для замкнутого контура облачного покрова как плоской проекции 3-х мерной фигуры 2-го порядка в формате заданной картографической проекции.



*Рисунок 13.*  
Структурная схема алгоритма составления карты-схемы в ночное время

В общем случае, представление данных для описания карты-схемы в виде набора аналитических функций имеет ряд преимуществ перед массивом данных большой размерности, дающих детальное описание ломанной кривой, при последующей обработке и передаче информации на КП.

Кроме того, очевидно, что такой подход (формализация) позволяет достаточно корректно решать задачу прогноза, т.е. оценки динамических параметров для контура облачного покрова с заданной точностью на установленный интервал времени (интервал достоверности).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На следующем этапе исследовательских работ предполагается отладка вычислительной схемы рассмотренного алгоритма применительно к учету состояния ночной облачности с использованием исходных данных от программных модулей-имитаторов входной обстановки различной сложности с последующим переходом на реальные натурные данные, получаемые измерительными средствами ОЭК.

В случае успешной реализации и внедрения ал-

горитма в работу оптико-электронного комплекса "ОКНО" планируется существенно повысить его эффективность, т.е. оптимизация распределения задач по обслуживанию КО в условиях неблагоприятных погодных условий.

Конкретные значения показателей эффективности планирования работы ОЭК будут рассмотрены на этапе моделирования с использованием натурных данных (измерений от ОЭС).

### Список литературы:

1. Дубошин Д.Г. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике М.: Наука Глав. Ред. Физ.-мат. Лит.,1976. - 864 с.
2. Аллен К.У. Астрофизические величины М.: Мир, 1977. - 446с.
3. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики М.: Наука, 1977. -544с.
4. Берляйт А.М. Картография М.:Аспект Пресс, 2002. - 336с.
5. Бордовицына Т.В. Технологии глобального позиционирования (GPS/ГЛОНАСС). Электронное учебное пособие. Томск, Томский государственный университет, 2007

# ЭКСЦЕНТРИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТИВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

НИКУЛИН А.В. - оператор научной роты войск ВКО,  
СЕНИК Б.Н. - доктор технических наук, профессор

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В статье рассмотрены основные критерии выбора оптических схем, основные требования, предъявляемые к размежо - и формостабильным конструкциям, работающим в условиях космоса, факторы, связанные со свойствами материала и конструкцией.*

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих странах уделяют серьёзное внимание созданию космических аппаратов, оснащённых оптико-электронными комплексами (ОЭК), предназначенными для дистанционного зондирования Земли. Основными компонентами оптико-электронных комплексов являются космический телескоп (объектив) и система приёма и преобразования информации. Оптико-электронные комплексы используются для решения широкого спектра оборонных задач, изучения природных ресурсов, сельского хозяйства, метрологии, картографии и ДЗЗ с получением снимков с высоким пространственным разрешением (менее 0,5 м). Основные высоты орбит, на которых работают ОЭК, лежат в пределах 500 - 800 км. Это требует создания космических телескопов с форсированными оптическими параметрами (диаметр входного зрачка, фокусное расстояние, поле зрения) при одновременном ограничении по массогабаритным параметрам. В связи с этим предъявляются особо жёсткие требования в целом к объективу космического телескопа, к конструкции оптической системы, её габаритам, компоновке, минимизации оптических компонентов, сохранению качества изображения в условиях эксплуатации при наличии действия дестабилизирующих факторов космического пространства.

Одно из наиболее актуальных требований к аппаратуре ДЗЗ - обеспечение мультиспектральной съемки в широкой полосе захвата, что реализуется с помощью зеркальных объективов с эксцентрично расположенным полем изображения. За счет использования наклонных пучков лучей в таких системах удается избежать центрального экранирования. Также в таких системах обеспечивается широкое поле зрения. Поскольку в этих системах обычно используются асферические поверхности, причем часто только внеосевые фрагменты, то существуют сложности при сборке и юстировке [1-3].

Основной задачей при проектировании оптической системы является уменьшение ее габаритов и повышение надежности работы, особенно в составе оптико-электронных камер космических систем.

Создание малогабаритной многофункциональной ОЭС стало возможным благодаря новым конструкционным и оптическим материалам, принципиально новым оптическим схемам зеркальных объективов с асферическими поверхностями. Применение таких схем обеспечивает возможность регистрации оптической информации в широком спектральном диапазоне от ультрафиолета до дальнего инфракрасного диапазона. Наиболее актуальной задачей при разработ-

*Таблица 1.*  
*Критерии выбора оптических схем*

Критерий выбора	Параметры, определяющие критерий
Линейное разрешение	Диаметр главного зеркала
Габариты и масса	Оптическая схема
Технологичность и стоимость	Число сложных оптических элементов
Сложность юстировки в процессе эксплуатации	Число оптических элементов, требующих коррекции положения в процессе эксплуатации
Информационность системы	Виньетирование и экранирование поля изображения

ке таких объективов является снижение коэффициента центрального экранирования и, как следствие, повышение значений модуляционной передаточной функции на средних пространственных частотах, являющихся рабочими для приемников с зарядовой связью (ПЗС). Одним из решений этой проблемы являются оптические системы (ОС) с эксцентрично расположенным полем изображения.

Учитывая, что конструкция ОС и ее качество в значительной мере определяют возможности всего ОЭК, его массу, габаритные характеристики и функциональные возможности, конструкторы ОЭК стали предъявлять более жесткие требования к проектируемым ОС, требовать многовариантности решений при построении оптического тракта в целях поиска более оптимальной и интересной его реализации. На выбор схемотехнических и конструктивных решений, наряду с технологией изготовления и контроля прецизионной крупногабаритной асферической оптики в значительной степени влияет наличие отработанной технологии сборки и юстировки ОС.

Специфические проблемы создания космических ОЭС:

- невесомость;
- вакуум;
- перегрузки, вибрации, удары;

- солнечное электромагнитное излучение.

Выбор оптической схемы является одним из ключевых этапов проектирования оптико-электронного комплекса, оказывающим существенное влияние на её технические, массогабаритные и экономические характеристики. Количество факторов, определяющих выбор той или иной схемы, как правило велико. К числу наиболее важных относятся:

- качество изображения, удовлетворяющего поставленным требованиям;
- работоспособность системы в заданных условиях окружающей среды;
- массогабаритные и стоимостные характеристики;
- доступность используемых оптических материалов;
- использование оптических деталей с высокой сложностью технологии изготовления [4].

## ОСНОВНЫЕ ВАРИАНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТИВОВ

### **Схема Ричи-Кретьена**

Достоинства:

- технологичность конструкции;
- значительный опыт создания.

Недостатки:

- наличие длинной бленды ( $l=3D$ );
- ограниченный спектральный диапазон.

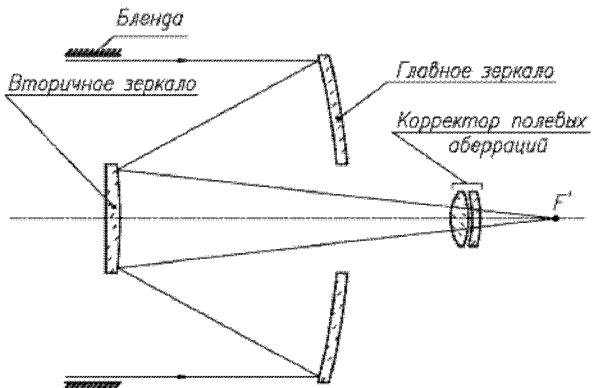


Рисунок 1.

Структурная схема дистанционного флуориметра

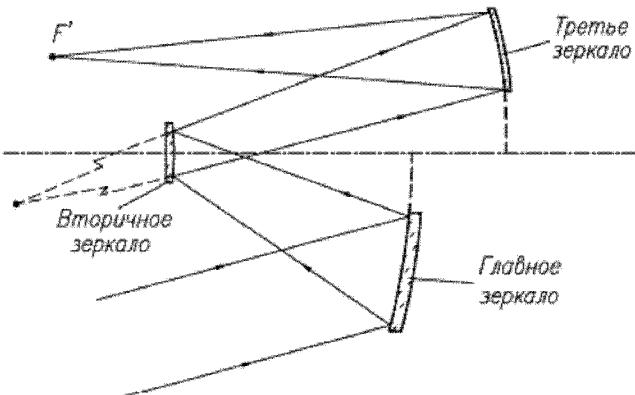


Рисунок 3.

Трехзеркальный триплет

### Применение:

системы высокодетального наблюдения в видимом спектральном диапазоне.

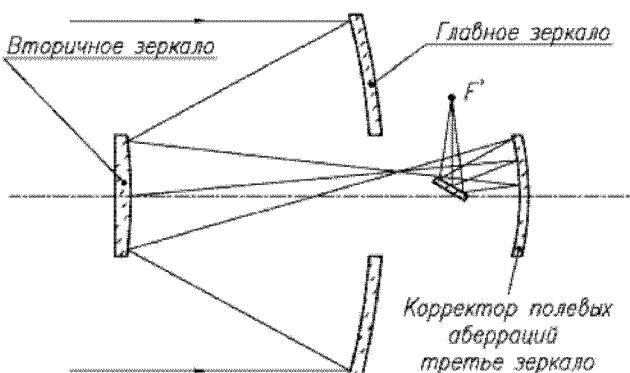


Рисунок 2.  
Схема Корша

### Схема Корша

#### Достоинства:

- отсутствие бленды;
- широкий спектральный диапазон.

#### Недостатки:

- экранирование центральной части поля;
- сложность изготовления асферических зеркал.

#### Применение:

системы высокодетального наблюдения в широком спектральном диапазоне (видимый + ИК).

### Трехзеркальный триплет

#### Достоинства:

- большое угловое поле зрения (до 10°-120°);
- сверхмалая дисторсия (менее 0,1%);
- термонеरасстраиваемость.

#### Недостатки:

- большие габариты оптической схемы;
- сложность изготовления внеосевых зеркал.

#### Применение:

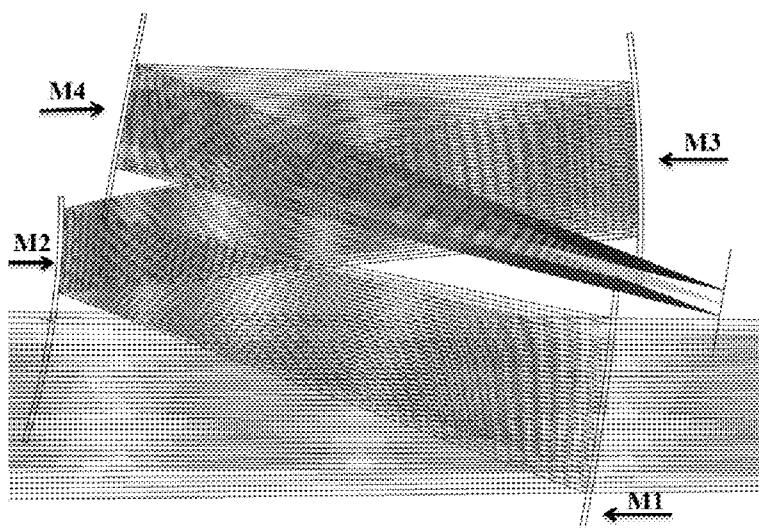
системы высокодетального, многоспектрального наблюдения для топографии [5].

Рассматриваемая оптическая схема представляет собой четырехзеркальную систему, которая состоит из двух сферических и двух асферических зеркал. По сравнению с осевой системой, предлагаемая имеет преимущества, такие как: широкое поле зрения, отсутствие виньетирования и высокое качество изображения.

Внеосевые асферические зеркала позволяют получить низкое искажение в полном поле зрения и получать изображения, которые близки к дифракционному пределу. Применение асферических поверхностей позволяет получать хорошие результаты при меньшем количестве компонентов оптической системы.

Использование приборов с внеосевой оптикой позволяет добиться следующих преимуществ:

- сократить размеры системы;
- сократить массу системы;
- использовать зеркала как клиновидной, так и равнотолщинной конфигурации;
- сократить стоимость системы.



*Рисунок 4.  
Оптическая схема*

Таким образом, возрастаёт эффективность и конкурентоспособность приборов.

За счет использования четырехзеркальной оптической системы, плоскость изображения переносится в зону тыльной части первичного и третичного зеркал и тем самым возникает возможность установить приемники изображения без экранирования световых пучков и увеличения габаритов оптической системы.

Благодаря радиусам кривизны и эксцентричности зеркал, удастся скорректировать пять aberrаций (сферическая, кома, астигматизм, кривизна изображения и дисторсия). Поэтому можно третичное зеркало выполнить сферическим, что существенно повышает технологичность его изготовления.

Таким образом, совокупность указанных выше признаков предлагаемой четырехзеркальной оптической системы без экранирования позволяет решить поставленную задачу.

Структура несущей конструкции должна гарантировать, что изменения стабильности, вызванные вибрацией на этапе запуска, с последующей невесомостью и изменением тепловой среды на орбите останутся в пределах диапазона.

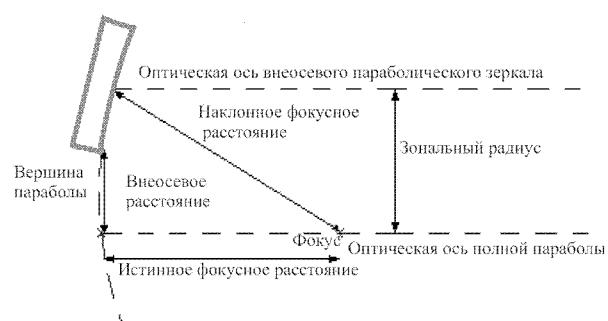
Основные требования, предъявляемые к разме-ро - и формостабильным конструкциям, работаю-щим в условиях космоса:

- высокая точность изготовления, измеряемая отклонениями от геометрически заданных форм долями миллиметра;

- высокая точность форм и размеров в процессе эксплуатации, что должно обеспечиваться долговременной стабильностью термомеханических и тепловых свойств материала и конструкции;
- малая масса при одновременно высоких прочности и жесткости;
- высокий уровень технологичности конструкции;

Факторы, связанные со свойствами материала и конструкцией:

- коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР);
- удельная жесткость;
- удельная прочность;
- коэффициент теплопроводимости;
- силовая схема несущей конструкции и ее вли-



*Рисунок 5.  
Внекосевое параболическое зеркало*

- жение на температурную размеростабильность;
- вид соединения между элементами конструкциями;
  - особенности технологических процессов, применяемых при изготовлении конструкции, потенциально возможные точности изготовления;
  - изготовления физико-механических свойств материала при эксплуатации изделия и возможные пути снижения этого процесса;

Все вышеперечисленные требования и факторы должны соблюдаться при проектировании конструкции объектива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание малогабаритной многофункциональной оптико-электронной аппаратуры дистанционного зондирования в настоящее время актуально для перспективных малых космических аппаратов, предназначенных для детального спектронального исследования Земли. Создание такой аппаратуры стало возможным благодаря новым конструкционным и оптическим материалам, принципиально новым оптическим схемам зеркальных объективов асферическими поверхностями. Для перспективной схемы зеркального объектива высокого разрешения с эксцентрично расположенным полем изображения, состоящего из четырех зеркал, разрабатывается схема юстировки. Это позволит конструктору аппаратуры создавать оптические системы с дифракционным качеством изображения, анализировать многовариантные решения при построении оптического тракта, что, в свою очередь, позволяет найти наиболее оптимальное значение показателя цена/качество аппаратуры с уменьшением массогабаритных характеристик. Применение такой оптико-электронной аппаратуры обеспечивает

возможность регистрации оптической информации в широком спектральном диапазоне от ультрафиолета до дальнего инфракрасного диапазона.

### Список литературы:

1. Токарев А.А. Длиннофокусные объективы с эксцентрично расположенным полем изображения. Известия высших учебных заведений. Сер. Приборостроение, 1988, т. XXXI, № 7, с. 74-79.
2. Архипов С.А., Кравченко С.О., Ли А.В., Морозов С.А. Аппаратура среднего разрешения. Варианты схемных решений оптической системы с общим входным зрачком видимого и ближнего инфракрасного каналов. Сб. материалов IX науч.-техн. конф. "Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли", г. Геленджик, 17-21 сентября 2012 г. Москва: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ-ПРОГРЕСС" - НПП "ОПТЭКС", 2012, с. 146.
3. Архипов С.А., Заварзин В.И., Заварзина В.В., Кравченко С.О., Морозов С.А., Сеник Б.Н. Зеркально-линзовый объектив (варианты). Пат. № 2461030 Российская Федерация, МПК G02B 5/10.
4. Протас О.Ю., Юдин А.Н. Выбор на основе aberrационных, габаритных и стоимостных критериев схемы афокальной мультиспектральной оптической системы // Студенческая научная весна - 2010. / Сборник тезисов.- Москва, МГТУ им. Н.Э Баумана, 2010.
5. Аронов А.М., Данилов В.А., Никифоров В.О., Савицкий А.М., Сокольский М.А. Бф "Оптико-электронные системы для дистанционного зондирования Земли". Третья военно-научная конференция космических войск, Военно-космическая Академия им. А.Ф.Можайского, СПб, 2007 г.

# РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРЫ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ОБЗОР-О"

КОЧЕШКОВ М.А. - оператор научной роты войск ВКО,  
БАЛИН Д.С. - начальник сектора НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В разработке опережающего задела бортовых приборов дистанционного зондирования Земли в части создания опытного образца широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего разрешения, важную роль играет создание электронных блоков системы управления аппаратурой среднего разрешения. В данной статье рассмотрена работа микроконтроллера со смежными устройствами, а так же представлены микросхемы выбранные для последующего макетирование модулей.*

## ВВЕДЕНИЕ

Блок управления аппаратуры среднего разрешения (БУ-СР) предназначен для приема напряжения питания от СТКРП и распределения питания в оконечные устройства, для командно-информационного обмена по мультиплексным каналам с БВС, ЗД, СППИ, а также БУ-СР осуществляя информационный обмен с контроллерами оптико-механической системы. БУ-СР производит прием сигнала синхронизации 1 Гц от БСКВУ, размножает его и транслирует в оконечные устройства [1].

Также БУ-СР выполняет прием и хранение полетного задания на время отработки циклограммы, формирует и реализует циклограммы заданных режимов работы АСР, осуществляет коррекцию программного обеспечения при необходимости, формирует сигналы схемной телеметрии и пакеты ИОК, формирует пакеты служебной информации от ЗД, СТС и от КА (массивы параметров навигации), осуществляет токовую защиту аппаратуры, реализует алгоритм перекрестного резервирования и алгоритм автоматического выхода из нештатных ситуаций. Функциональная схема одного полукомплекта БУ-СР представлена на рис. 1 [1].

Целью работы является разработка, изготовление модуля обмена с оконечными устройствами и модуля RS-485 из состава блока управления съемочной аппаратуры для космического аппарата "Обзор-О".

В решаемые задачи проекта входят: аналитический обзор схемотехнических решений, разработка функциональной схемы модуля с оконечными устройствами (ОУ) и модуля RS-485, выбор электронной компонентной базы для разрабатываемых модулей, разработка схемы электрической принципиальной модуля с ОУ и модуля RS-485.

Для проектирования электронной компонентной базы и схемы электрической принципиальной используется программа Altium Designer- комплексная система автоматизированного проектирования (САПР) радиоэлектронных средств, разработанная австралийской компанией Altium. Altium Designer - это система, позволяющая реализовывать проекты электронных средств на уровне схемы или программного кода с последующей передачей информации проектировщику ПЛИС или печатной платы. Отличительной особенностью программы является проектная структура и сквозная целостность ведения разработки на разных уровнях про-

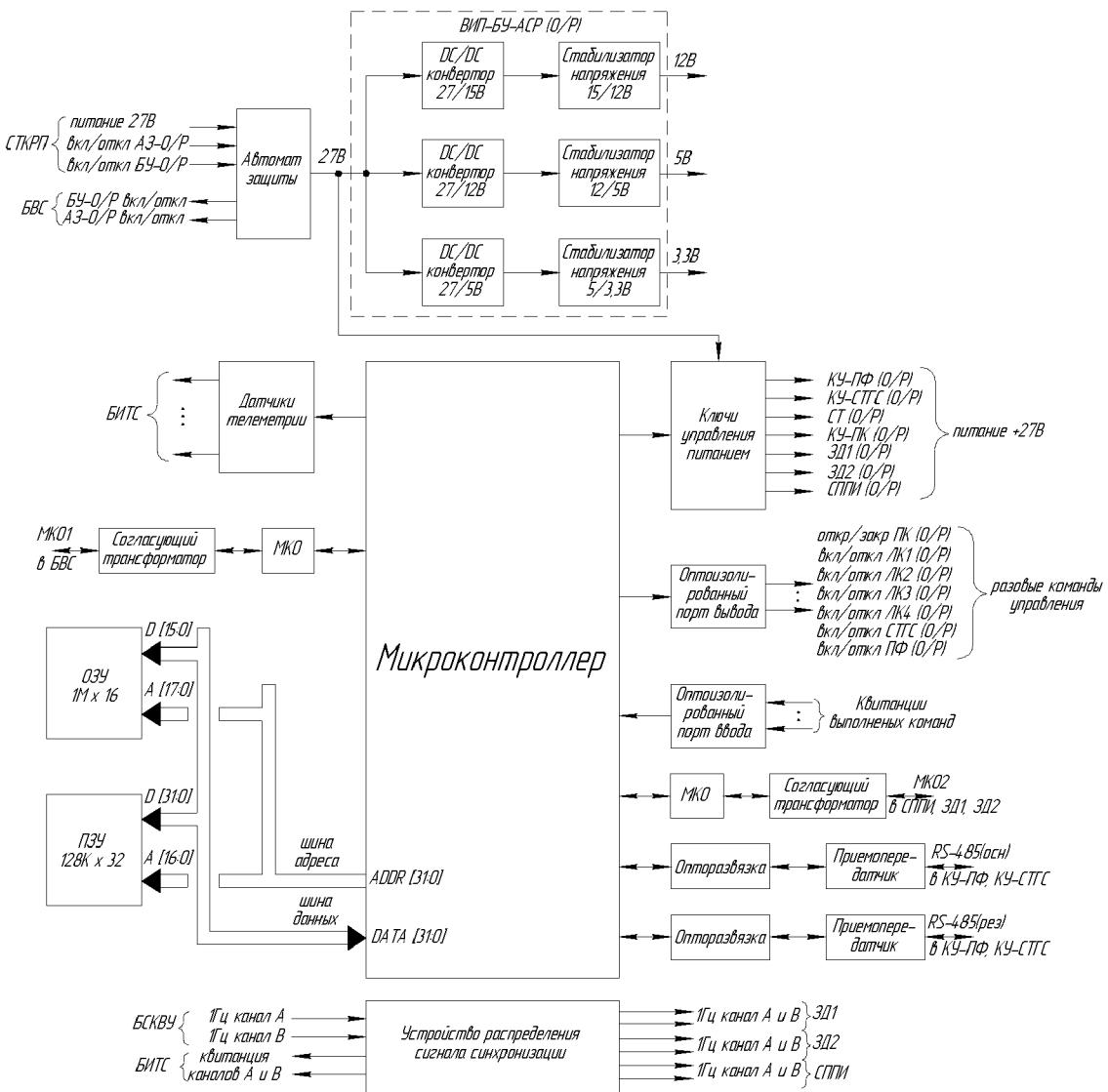


Рисунок 1.  
Функциональная схема БУ-СР

ектирования. Иными словами изменения в разработке на уровне платы могут мгновенно быть переданы на уровень ПЛИС или схемы и так же обратно.

Основные электрические и тактико-технические параметры, необходимые для решения поставленной задачи, а также функциональные особенности блока управления были изучены в эскизном проекте широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего пространственного разрешения.

### РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОРНОГО МОДУЛЯ БУ-СР

Основным вычислительным элементом БУ-СР, реализующим командно-информационный обмен со смежными системами и алгоритмы управления, является 32-х разрядный контроллер управления пультом авиационных комплексов связи и радио-

станций серии 1986ВЕ3Т. Это современный микроконтроллер, разработанный фирмой ЗАО "НПК Миландр". 1986ВЕ3Т- Микроконтроллер для авиационного применения является микроконтроллером со встроенной Flash-памятью программ и построен на базе высокопроизводительного процессорного RISC ядра. Микроконтроллер работает на тактовой частоте до 80 МГц и содержит 128 Кбайт Flash-памяти программ и 48 Кбайт ОЗУ. Периферия включает в себя контроллер USB интерфейса со встроенным аналоговым приемопередатчиком и со скоростью передачи 12 Мбит/с (Full Speed) и 1.5 Мбит/с (Low Speed), стандартные интерфейсы UART и SPI, авиационные интерфейсы по ГОСТ 18977-79 и ГОСТ Р52070-2003, цифровой интерфейс Ethernet со скоростью передачи 10/100 Мбит, интерфейсом MII и со

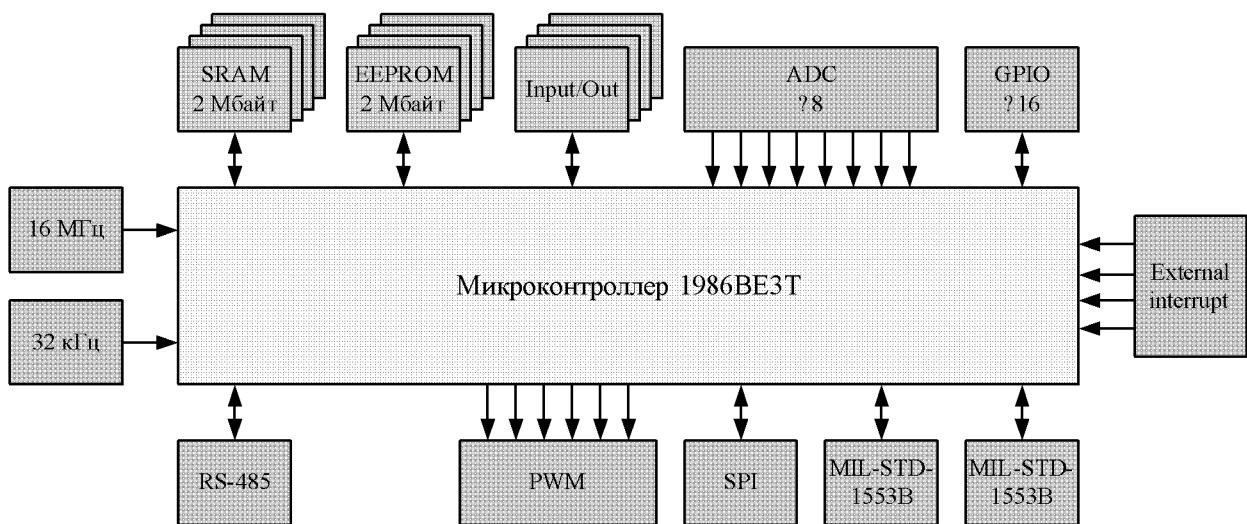


Рисунок 2.  
Функциональная схема процессорного модуля БУ

встроенным аналоговым приемопередатчиком, контроллер внешней системной шины позволяющий работать с внешними микросхемами статического ОЗУ и ПЗУ, NAND Flash памятью и другими периферийными устройствами. Микроконтроллер содержит четыре 32-ти разрядных таймера с 4 каналами схем захвата и ШИМ с функциями формирования "мертвой зоны" и аппаратной блокировки. Так же микроконтроллер содержит системный 24-х разрядный таймер и два сторожевых таймера. Микроконтроллер содержит 12-ти разрядный высокоскоростной (до 512 Квыб/с) АЦП с возможностью оцифровки информации с 8 каналов, встроенного датчика температуры и опорного напряжения. Два 12-ти разрядных ЦАП [2].

Встроенные RC генераторы HSI (8 МГц) и LSI (40 кГц) и внешние генераторы HSE (2...16 МГц) и LSE (32 кГц) и две схемы умножения тактовой частоты PLL для ядра и USB интерфейса позволяют гибко настраивать скорость работы микроконтроллеров.

Архитектура системы памяти за счет матрицы системных шин позволяет минимизировать возможные конфликты при работе системы и повысить общую производительность. Встроенный регулятор для формирования питания внутренний цифровой части формирует напряжения 1,8В и не требует дополнительных внешних элементов. Таким образом, для работы микроконтроллера достаточно одного внешнего напряжения питания в

диапазоне от 3,0 до 3,6В. Так же в микроконтроллерах реализован батарейный домен, работающий от внешней батареи при отсутствии основного питания. В батарейном домене могут быть сохранены специальные флаги, а так же работают часы реального времени. Встроенный детектор напряжения питания может отслеживать уровень внешнего основного питания и уровень напряжения питания на батареи. Аппаратные схемы сброса по просадке питания позволяют исключить сбойную работу микросхемы при выходе уровня напряжения питания за допустимые пределы [2].

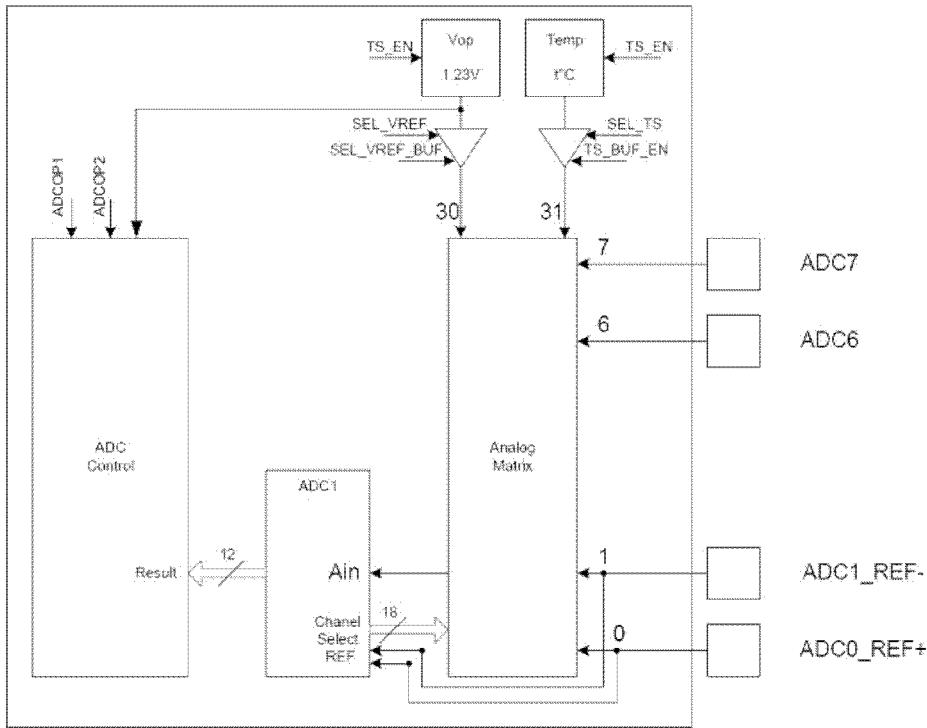
В данной работе рассмотрена работа внешних осцилляторов HSE и LSE, широтно-импульсный модулятор (ШИМ), АЦП, контроллера прерываний, выводов общего назначения (GPIO), а также приемопередатчики интерфейсов RS-485, MIL-STD-1553B и SPI. И проведен выбор электронной компонентной базы указанных модулей.

## ВНЕШНИЕ ОСЦИЛЛЯТОРЫ

Микроконтроллер имеет два встроенных генератора и два внешних осциллятора. А так же специализированный блок формирования тактовой синхронизации микроконтроллера. [2]

### Внешний осциллятор HSE

Осциллятор HSE предназначен для выработки тактовой частоты 2...16 МГц с помощью внешнего резонатора. Осциллятор запускается при появлении питания Ucc и сигнала разрешения HSEON в регистре HS\_CONTROL [1]. Для получения



*Рисунок 2.  
Функциональная схема процессорного модуля БУ*

основной рабочей частоты процессора и периферии через HSE, используется выходная частота со встроенным блоком умножения [2].

#### **Встроенный блок умножения системной тактовой частоты**

Блок умножения позволяет провести умножение входной тактовой частоты на коэффициент от 2 до 16, задаваемых на входе PLLCPUMUL [3:0] в регистре PLL\_CONTROL. Входная частота блока умножителя должна быть в диапазоне 2...16 МГц, выходная до 80 МГц [2].

#### **Внешний осциллятор LSE**

Осциллятор LSE предназначен для выработки тактовой частоты 32 КГц с помощью внешнего резонатора. Осциллятор запускается при появлении питания BDUcc и сигнала разрешения LSEON в регистре BKPR\_REG\_0F. При выходе в нормальный режим работы вырабатывает сигнал LSERDY в регистре BKPR\_REG\_0F. Так же осциллятор может работать в режиме LSEBYP, когда входная тактовая частота с входа OSC\_IN32 проходит напрямую на выход LSE. Выход OSC\_OUT32 находится в этом режиме третьем состоянии. Генератор LSE используется для работы часов реального времени [2].

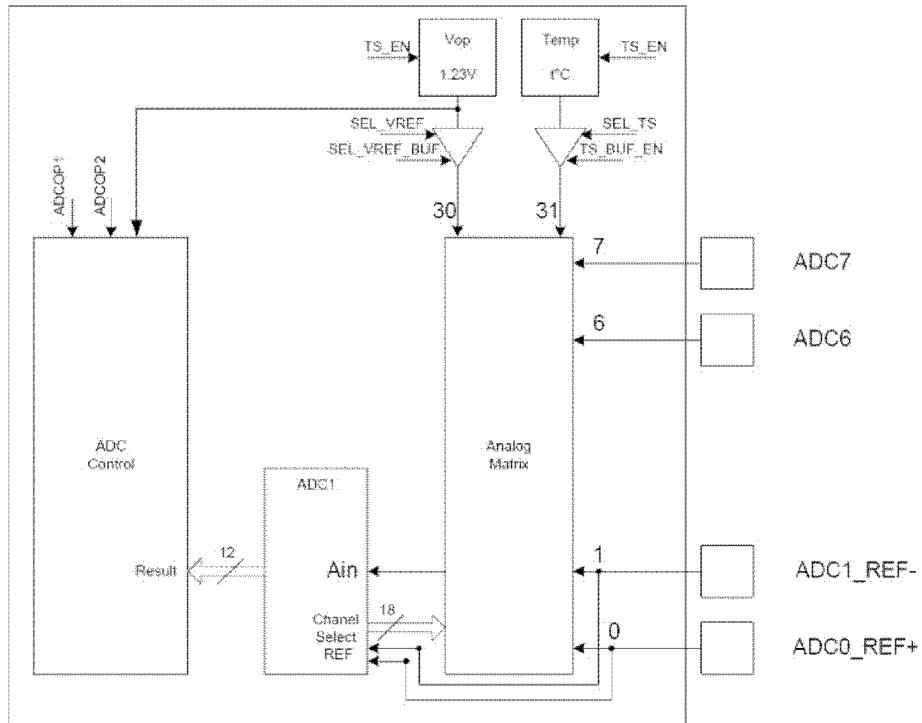
Для реализации внешних осцилляторов используются кварцевые резонаторы Q0,032768-JTX310-12,5-20-T1-AEC-LF и Q16,0-JXG75P2-12-50/50-T2-FU-AEC-LF фирмы "Jauch Quartz GmbH", на 32 кГц и 16 МГц соответственно. Выбранные элементы наиболее подходят для решения поставленной задачи, как по функциональным, так и по электрическим параметрам.

#### **АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**

Для работы с аналоговыми сигналами в микроконтроллере имеется 12-ти разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП). С его помощью оцифровывается сигнал с двух внутренних каналов и 8 внешних выводов [2].

Контроллер АЦП позволяет:

- оцифровать один из 8 внешних каналов;
- оцифровать значение встроенного датчика температуры;
- оцифровать значение встроенного источника опорного напряжения;
- осуществить автоматический опрос заданных каналов;
- выработать прерывание при выходе оцифрованного значения за заданные пределы.



*Рисунок 3.  
Блок АЦП*

Для преобразования необходимо, чтобы выводы, используемые АЦП, были сконфигурированы как аналоговые и были отключены какие либо внутренние подтяжки [2].

Выводы АЦП микроконтроллера соединяются с разъемом HMD2009MXAA0P0 на 9 выводов, фирмы "Hypertronics Corporation".

#### **ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК MIL-STD-1553В (ГОСТ Р 52070-2003)**

В микроконтроллере имеется два независимых контроллера интерфейса по ГОСТ Р 52070-2003 (далее 1553). Каждый из которых, содержит необходимую логику и память для обработки и хранения командных слов и слов данных одного полного сообщения 1553. Каждый контроллер содержит два канала для приёма/передачи сообщений 1553: основной и резервный. В один момент времени может работать только один из каналов основной или резервный, одновременная работа двух каналов не предусмотрена. Для хранения данных используется шестнадцатиразрядная двухпортовая память, в которой данные хранятся в области памяти соответствующей подадресу командного слова [2].

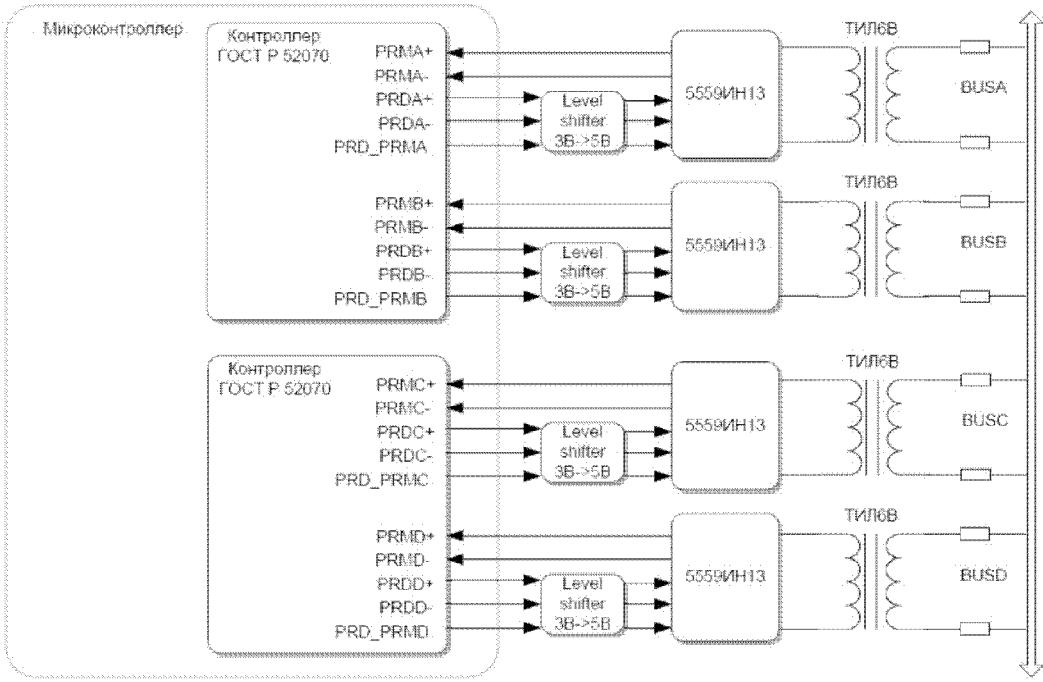
#### **Особенности:**

- Поддержка основных форматов сообщений
- Поддержка режимов работы: контроллера шины, оконечного устройства, монитора
- Скорость передачи данных 1Мбит/с в полу-дуплексном режиме
- Поддержка двух каналов связи: основного и резервного
- Двухпортовая память принимаемых данных 1Кх16
- Возможность формирования прерываний при успешном приёме и при возникновении ошибок нашине.
- Маскирование прерываний.

Контроллер поддерживает три режима работы: контроллера шина (КШ), оконечного устройства (ОУ) и неадресуемого монитора (М).

**Контроллер шины.** В этом режиме контроллер передаёт команды в магистраль, участвует в пересылке слов данных, принимает и контролирует ответную информацию о состоянии ОУ. Помимо этого КШ реализует все команды управления.

**Оконечное устройство.** В этом режиме контроллер осуществляет проверку достоверности ко-



*Рисунок 4.  
Контроллер ГОСТ Р52070-2003*

мандных слов, поступающих к нему от КШ. Командное слово считается достоверным, если не возникло ошибок в магистрали при его приёме, а также, если поле "Адрес ОУ" соответствует коду собственного адреса ОУ или коду 11111 (групповая команда). Если командное слово определено как достоверное, то ОУ посылает в линию ответное слово (ОС) и в зависимости от поля "Приём/Передача" принимает, или передаёт число данных, соответствующее полю "Число СД/Код КУ". Если же происходит приём от КШ команды управления, то ОУ реагирует в соответствии с форматами сообщений команд управления.

**Монитор.** В этом режиме осуществляется прослушивание магистрали и отбор необходимой информации для проведения: технического обслуживания, регистрации эксплуатационных параметров, анализа решаемых задач или обеспечения информацией резервного КШ. Монитор пассивно прослушивает выбранную шину и захватывает весь трафик на шине, но никогда не передаёт информацию на шину.

Сообщения, передаваемые по информационной магистрали, имеют формат, соответствующий форматам основных или групповых сообщений. Любые другие типы сообщений, не соответствующие

ГОСТ Р 52070-2003 не поддерживаются.

Время непрерывной передачи данных в линию не превышает 660 мкс, что соответствует командному слову и 32-м словам данных [2].

В отличие от предложенного в документации на микроконтроллер приемопередатчика 5559ИН13 (см. рис. 4), в работе был использован приемопередатчик HI-2579CLIF, фирмы "HOLT Inc.", имеющий ряд преимуществ. В частности более низкое рабочее напряжение в 3,3 В (у 5559ИН13 - 5В), что позволяет исключить из схемы преобразователь уровня напряжения. А так же в HI-2579CLIF уже имеется встроенный изолирующий трансформатор. Все это позволяет не только уменьшить занимаемое место, но и улучшить помехозащищенность.

Через HI-2579CLIF микроконтроллер присоединяется к разъему NK-1E2-021-325-TH00 на 21 вывод, фирмы "AirBorn".

#### **ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК RS-485. КОНТРОЛЛЕР UART**

Модуль универсального асинхронного приемопередатчика (UART - Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) представляет собой периферийное устройство микроконтроллера [2].

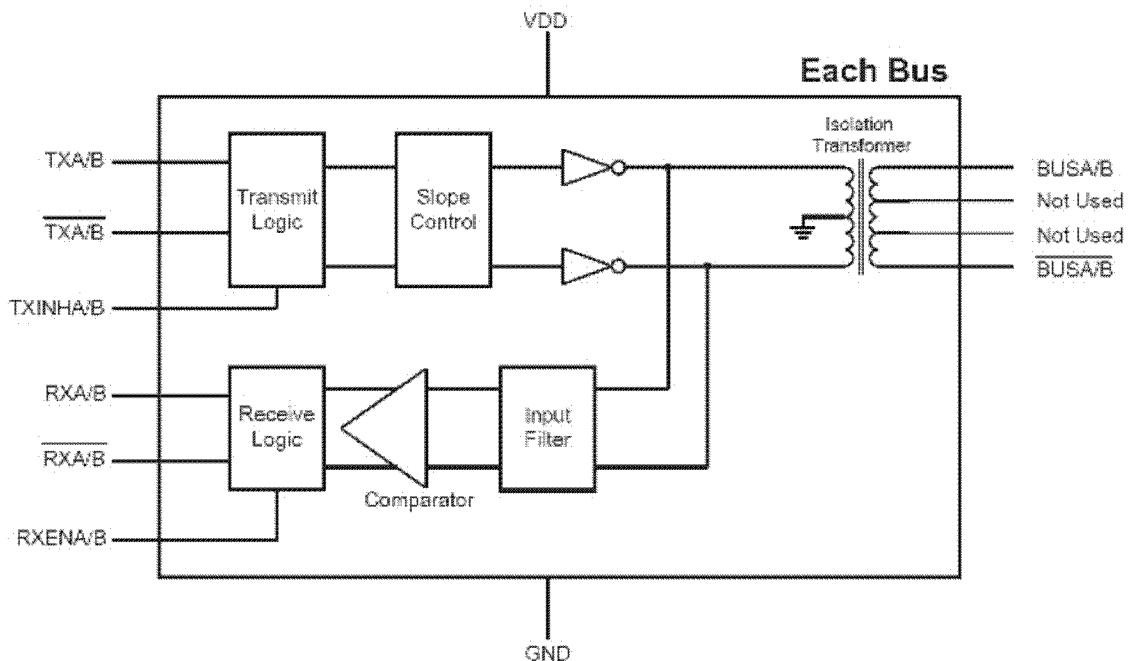


Рисунок 5.  
Блок- схема HI-2579CLIF

В рамках решаемой задачи, модуль UART будет запрограммирован как универсальный асинхронный приемопередатчик. Он содержит независимые буферы приема и передачи типа FIFO (First In First Out - первый вошел, первый вышел), что позволяет снизить интенсивность прерываний центрального процессора.

Модуль выполняет следующие функции:

- преобразование данных, полученных от периферийного устройства, из последовательной в параллельную форму;
- преобразование данных, передаваемых на периферийное устройство, из параллельной в последовательную форму [2].

Режим работы приемопередатчика и скорость обмена данными контролируются регистром управления линией UARTLCR\_H и регистрами делителя скорости передачи данных - целой части (UARTIBRD) и дробной части (UARTFBRD).

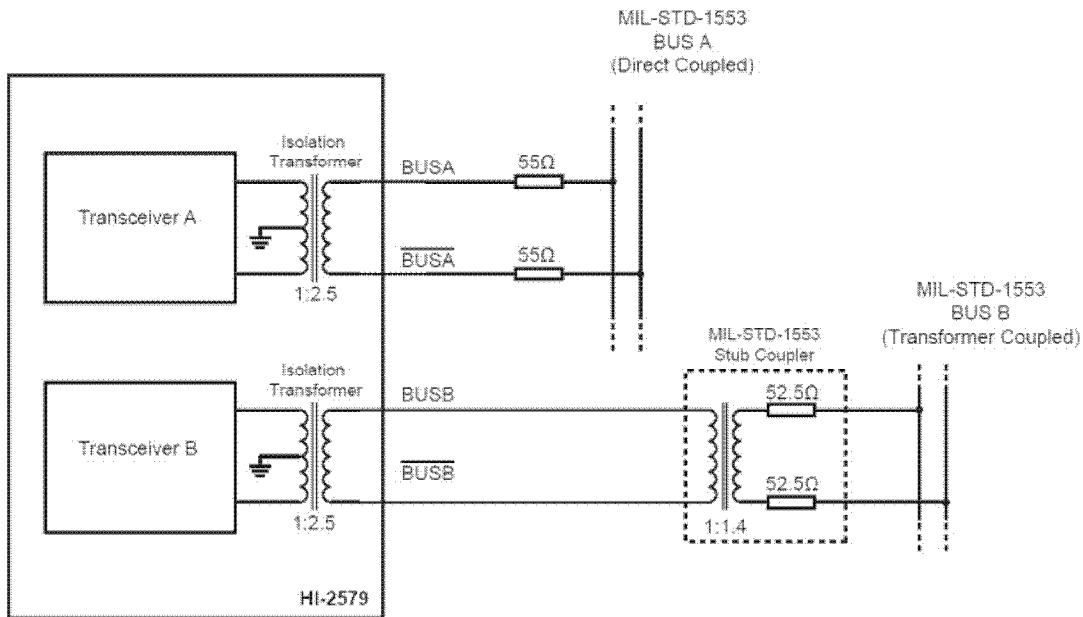
Принятые или передаваемые данные заносятся в 16-элементные буфера FIFO, при этом каждый элемент приемного буфера FIFO кроме байта данных хранит также четыре бита информации о состоянии модема [2].

Для передачи данные заносятся в буфер FIFO передатчика. Если работа приемопередатчика разре-

шена, начинается передача информационного кадра с параметрами, указанными в регистре управления линией UARTLCR\_H. Передача данных продолжается до опустошения буфера FIFO передатчика. После записи элемента в буфер FIFO передатчика сигнал BUSY переходит в высокое состояние. Это состояние сохраняется в течение всего времени передачи данных. В низкое состояние сигнал BUSY переходит только после того, как буфер FIFO передатчика станет пуст, а последний бит данных (включая стоповые биты) будет передан. Сигнал BUSY может находиться в высоком состоянии даже в случае, если приемопередатчик будет переведен из разрешенного состояния в запрещенное [2].

В рамках решаемой задачи, данный модуль используется как универсальный асинхронный приемопередатчик, для соединения с интерфейсом RS-485 ADM2682EBRIZ, фирмы "Analog Devices". Который наиболее подходит для разработки данного блока управления, как по функциональным, так и по электрическим параметрам.

Через ADM2682EBRIZ микроконтроллер при соединяется к разъему NK-1E2-015-325-TH00 на 15 выводов, фирмы "AirBorn".



*Рисунок 6.  
Схема подключения HI-2579CLIF*

### ИНТЕРФЕЙС SPI

Модуль порта синхронной последовательной связи (SSP - Synchronous Serial Port) выполняет функции интерфейса последовательной синхронной связи в режиме ведущего и ведомого устройства и обеспечивает обмен данными с подключенным ведомым или ведущим периферийным устройством в соответствии с одним из протоколов:

- интерфейс SPI фирмы Motorola;
- интерфейс SSI фирмы Texas Instruments;
- интерфейс Microwire фирмы National Semiconductor [2].

Модуль выполняет следующие функции:

- преобразование данных, полученных от периферийного устройства, из последовательной в параллельную форму;
- преобразование данных, передаваемых на периферийное устройство, из параллельной и последовательную форму;
- центральный процессор читает и записывает данные, а также управляющую информацию и информацию о состоянии [2].

В поставленной задаче, модуль SSP выполняет функцию ведущего устройства и обеспечивает обмен данными с ведомыми устройствами по протоколу интерфейса SPI.

Последовательный синхронный интерфейс SPI фирмы Motorola обеспечивает:

- полнодуплексный обмен данными по четырехпроводной линии;
- программное задание фазы и полярности тактового сигнала.

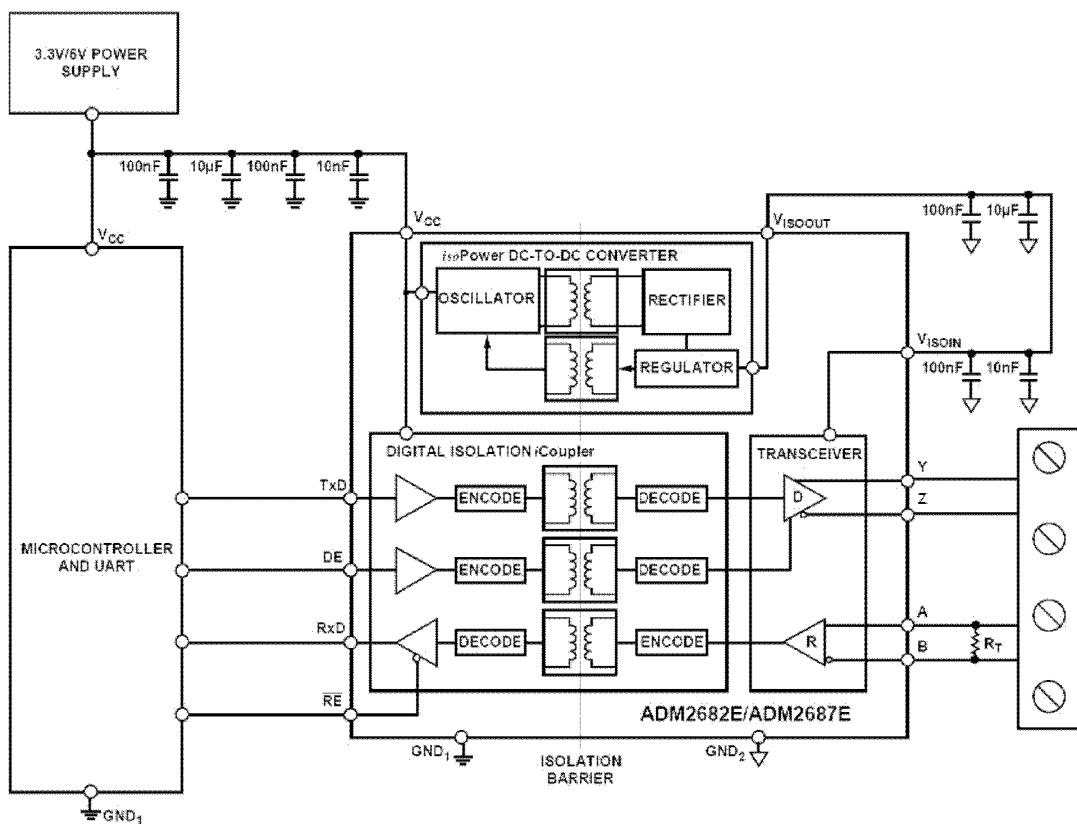
Рис. 8 показывает подключение модуля SSP, сконфигурированного как ведущее устройство, к двум ведомым устройствам, поддерживающим протокол SPI фирмы Motorola. Внешние устройства сконфигурированы как ведомые путем установки в низкий логический уровень сигнала выбора ведомого устройства Slave Select (SS). Ведущее устройство способно передавать данные в адрес ведомых циркулярно по линии SSP\_TXD. Ответная передача данных на входную линию SSP\_RXD ведущего устройства одновременно осуществляется только одним из ведомых по соответствующей линии MISO.

Для обмена данными между процессором и периферийным устройством используется 4-х битный приемопередатчик шины SN74AVC4T774, фирмы "Texas Instruments". SN74AVC4T774 предназначен для асинхронной связи между шинами данных.

### ШИМ, КОНТРОЛЛЕР ПРЕРЫВАНИЙ, GPIO

Указанные модули микроконтроллера выведены на один разъем, поэтому объединим их в один раздел.

В качестве ШИМ в микроконтроллере высту-



*Рисунок 7.*  
Блок-схема *ADM2682EBRIZ*

39327-124

пятают таймеры общего назначения. Все блоки таймеров выполнены на основе 32-битного перезагружаемого счетчика, который синхронизируется с выходом 16-битного предделителя. Перезагружаемое значение хранится в отдельном регистре. Счет может быть прямой, обратный или двунаправленный (сначала прямой до определенного значения, а затем обратный).

Каждый из четырех таймеров микроконтроллера содержит 32-битный счетчик, 16-битный предделитель частоты и 4-канальный блок захвата/сравнения. Их можно синхронизировать системной синхронизацией, внешними сигналами или другими таймерами.

Для включения режима сравнения для определенного канала необходимо в регистре управления каналом TIMx\_CHy\_CTRL записать 0 в поле CAPnPWM. При работе в режиме ШИМ выходной сигнал может формироваться на основании сравнения значения в регистре CCR и основного счетчика CNT или регистров CCR, CCR1 и значения основного счетчика CNT. Полученный сигнал может без изменения выдаваться на выводы

CHxO и nCHxO. Либо с применением схемы DEAD TIME Generator формируются управляющие сигналы с мертвой зоной. У каждого канала есть два выхода - прямой и инверсный. Для каждого выхода формируется как сигнал для выдачи так и сигнал разрешения выдачи, т.е. если выход канала должен всегда выдавать тот или иной уровень, то на выводе разрешения выдачи CHxOE (для прямого) и на CHxNOE (для инверсного) должны формироваться "1". Если канал работает на вход (например режим захвата), то там всегда должен быть "0" для прямого канала. Сигналы OE по тем же принципам, что и просто выходные уровни, но у них есть собственные сигналы разрешения вывода SELOE и nSELOE, в которых можно выбрать постоянный уровень, либо формируемый на основании REF.

Процессор и вложенный векторный контроллер прерываний (NVIC) назначают приоритет и обрабатывают все исключения. Все исключения обрабатываются в режиме Handler. Состояние процессора автоматически сохраняется в стек при возникновении исключения и автоматически восста-

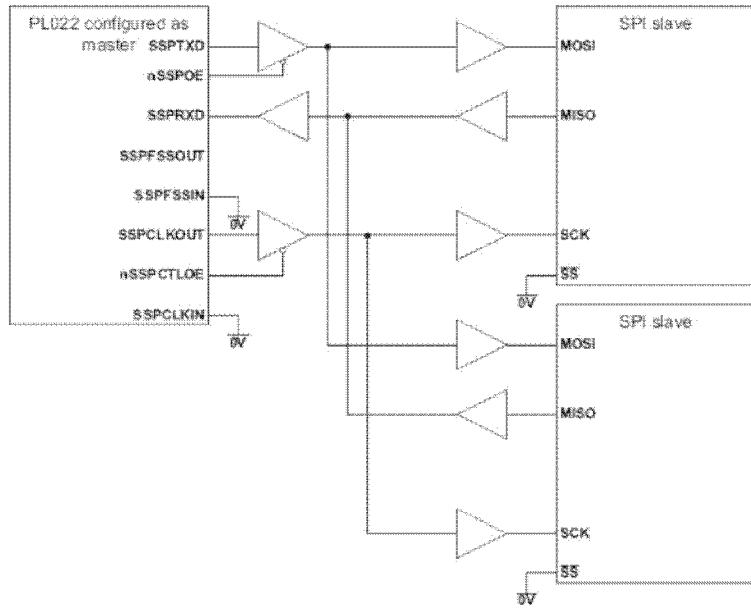


Рисунок 8.

Ведущее устройство SSP подключено к двум ведомым, поддерживающим протокол SPI

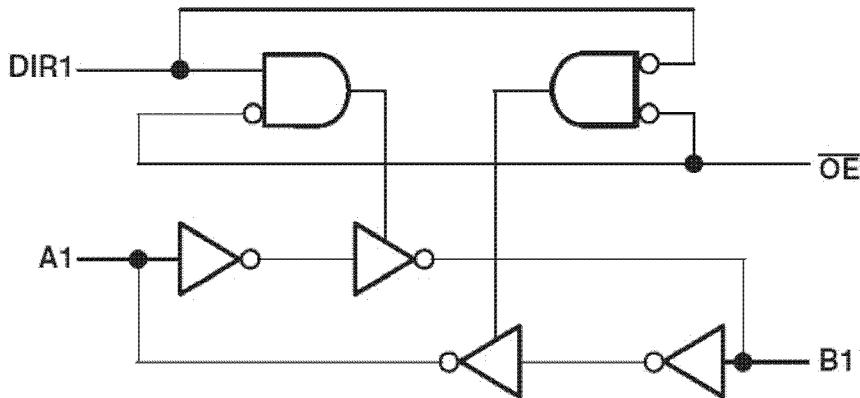


Рисунок 9.  
Логическая схема SN74AVC4T774

навливается из стека по завершению обработки исключения.

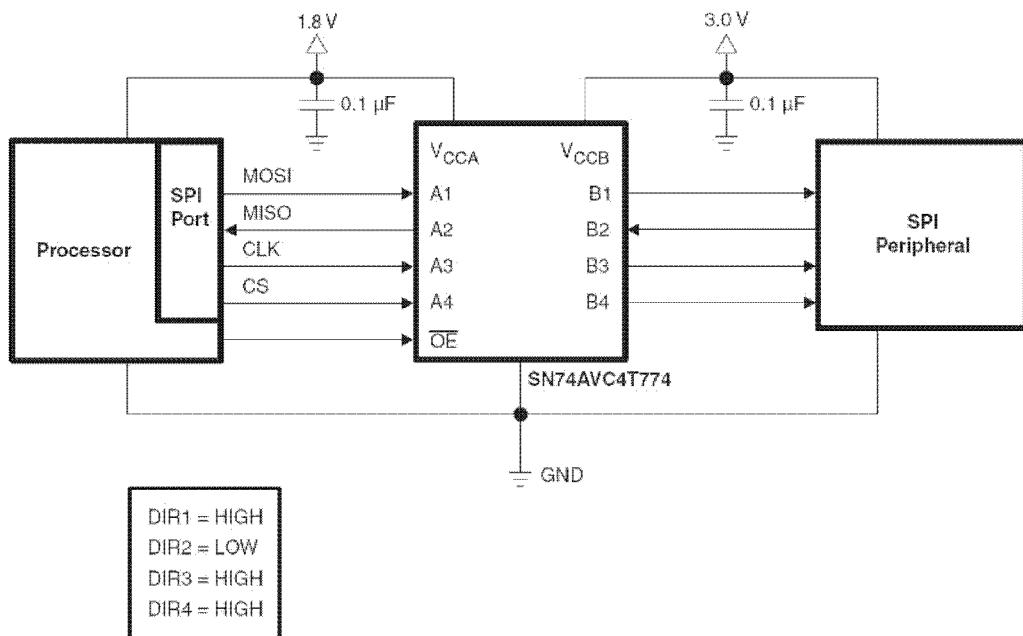
NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller) поддерживает прерывания, у которых может быть переопределён приоритет. NVIC и ядро процессора тесно связаны, что позволяет уменьшить задержки обработки прерываний и повысить эффективность обработки запаздывающих прерываний.

Все регистры NVIC доступны только при использовании словных транзакций. Любая попытка записать полуслово или индивидуальный байт вызывает порчу бит регистра. Регистры NVIC используют режим доступа little-endian. Доступ про-

цессора к ним корректно обрабатывается, несмотря на конфигурацию endian процессора.

В качестве выводов общего назначения (GPIO) в работе будут использоваться все незадействованные в работе подключаемых устройств выводы портов A, B, C, D, E, F, G, H, I. В последующей разработке блока управления эти выводы могут быть использованы, поэтому выведем их на общий разъем.

Перечисленные выше модули микроконтроллера, при составлении электрической принципиальной схемы, были выведены на разъем ESQ-132-14-G-D (64 контакта), серии PC/104+ фирмы "Samtec".



*Рисунок 10.  
Подключение SN74AVC4T774*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение и выбор электронной компонентной базы рассмотренных модулей микроконтроллера являются одной из основных задач при разработке электрической принципиальной схемы блока управления аппаратурой среднего разрешения. Изученная документация и выбранные микросхемы будут использованы в дальнейшем расчете режимов работы процессорного модуля и создания макетного образца.

### Список литературы:

1. Эскизный проект широкозахватной многоспектральной аппаратуры среднего пространственного раз-

решения, книга 2, часть 1. "Управление и контроль АСР"- ОАО "Красногорский завод им.С.А.Зверева".

2. Спецификация на микроконтроллер 1986ВЕ3Т, ЗАО "ПКК Миландр" ТСКЯ.431296.009СП Версия 2.10.0 от 24.04.13г.

- 3. <http://www.hypertronics.com/en/Products>
- 4. [http://int.jauch.de/pages/ru\\_quartz\\_crystal.php5](http://int.jauch.de/pages/ru_quartz_crystal.php5)
- 5. <http://www.airborn.com/products/connectors>
- 6. <http://www.ti.com/lscds/ti/interface/>
- 7. <http://www.holtic.com/>
- 8. <http://www.analog.com/>

# **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ЦИФРОВОГО АЭРОФОТОАППАРАТА АК-113**

**ЕФИМОВ Б.Н. - оператор научной роты войск ВКО,  
МИРОХИН Е.А. - начальник КБ НТИ**

**ОАО "Красногорский завод имени С.А. Зверева"**

*В данной статье рассматривается решение задачи конструирования пьезоэлектрического двигателя для привода цифрового аэрофотоаппарата АК-113. Проведен анализ требований, предъявляемых к приводам аэрофотоаппарата. Предложен вариант принципа действия и конструкции пьезоэлектрического двигателя линейных перемещений.*

## **ВВЕДЕНИЕ**

Приводы аэрофотоаппарата применяют с целью фокусировки путём перемещения объектива относительно матрицы или линз внутри объектива, для регулировки экспозиции путем вращения колеса диафрагмы, а также для изменения масштаба путем вращения линз внутри объектива. Ранее для приводов цифрового аэрофотоаппарата АК-113 использовался малогабаритный электромагнитный двигатель ДПМ-20 габаритами 90x70x72 мм. Замена электромагнитного двигателя пьезоэлектрическим обеспечивает уменьшение габаритов привода, отсутствие потерь мощности, большую точность позиционирования, а также возможность малых перемещений (до десятков микрометров). Кроме того пьезоэлектрические приводы могут полностью изготавливаться из немагнитных материалов, что позволяет применять их в сильных магнитных полях. Искро- и взрывобезопасность пьезоэлектрических двигателей позволяет использовать их в опасных средах. Например некоторые из них могут работать в условиях высоких температур (вплоть до 300 градусов Цельсия), в условиях повышенной радиации.

## **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Аэрофотосъемка происходит в определенных условиях: значительное удаление от объектов съемки, зачастую низкая температура окружаю-

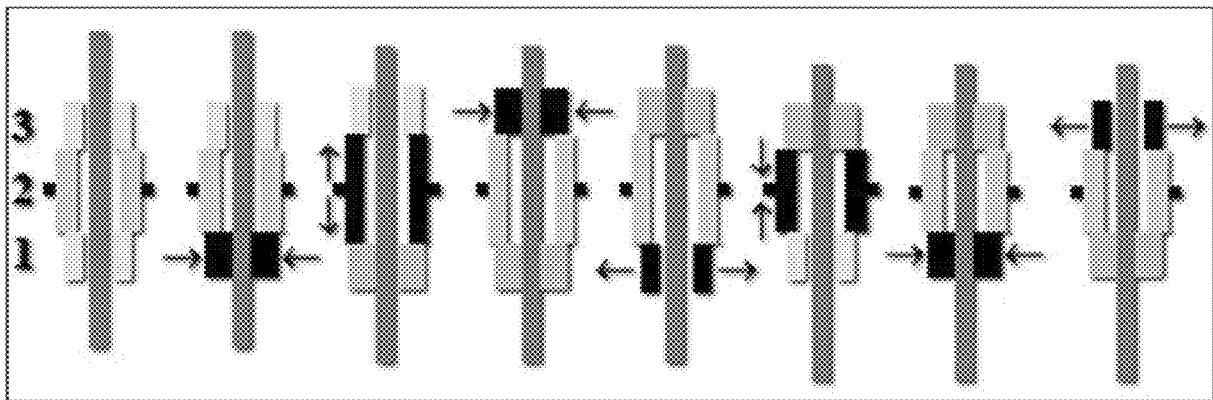
щей среды и высокая влажность (из-за высоты съемки), сильные динамические механические нагрузки (вследствие полёта), быстрая смена объектов съемки - снимаемой территории. Это накладывает отпечаток на особенности аэрофотоаппаратов: большой формат кадра, высокая скорость съемки, наличие амортизирующего механизма или пространственно стабилизированной платформы (например, гироплатформы), большое фокусное расстояние объектива и большая светосила, высокая геометрическая точность объектива, работа в автоматическом режиме по программе, задаваемой с командного пульта. С учетом условий, в которых происходит аэрофотосъемка, к приводам аэрофотоаппарата предъявляются следующие требования:

- способность работать в климатических условиях работы авиационной техники;
- высокая точность позиционирования;
- способность малых перемещений;
- малые габариты и масса.

Этим требованиям в приводах аэрофотоаппарата АК-113 соответствует применение пьезоэлектрических двигателей.

## **РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ**

Для линейных перемещений привода выбран тип пьезоэлектрического двигателя с использованием червячной передачи.

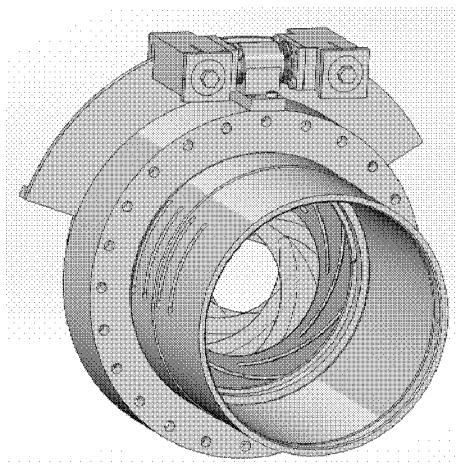


*Рисунок 1.  
Принцип действия пьезоэлектрического двигателя с червячной передачей*

В пьезоэлектрическом двигателе с червячной передачей передвижение вдоль балки происходит за счет последовательного изменения линейных размеров трех пьезоэлектрических элементов в различных направлениях (рис. 1).

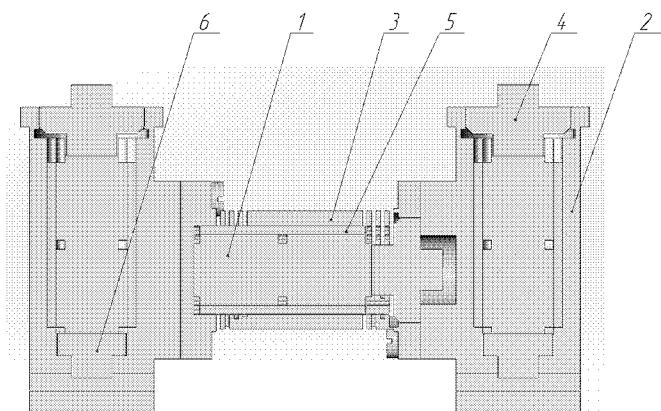
Кроме того, данный тип двигателя может быть использован для изменения экспозиции, установив на колесе диафрагмы специальный бортик, а двигатель установив на корпусе объектива, который передвигая бортик будет осуществлять вращение колеса (рис. 2).

Конструкция пьезоэлектрического двигателя представляет собой три рабочих элемента, установленные в корпусе в условиях предварительного поджатия, последовательно соединенные друг с другом (рис. 3).



*Рисунок 2.  
Установка пьезоэлектрического двигателя на корпусе объектива для вращения колеса диафрагмы*

Два элемента - фиксирующие, устанавливаются поперек перемещаемой поверхности, один - перемещающий, устанавливается параллельно перемещаемой поверхности. Предварительное поджатие обеспечивается винтом, устанавливаемым в корпусе. При установке рабочих элементов в конструктивное гнездо между его боковыми поверхностями и конструктивными стенками, соприкасающимися с боковыми поверхностями элемента, устанавливаются прокладки из фторопластовой ленты (типа фторопласт-3). В корпусах для фиксирующих элементов предусмотрены выступы для опоры перемещаемой балки (бортика). Корпус перемещающего рабочего элемента имеет прорези для возможности растягиваться, а также платформу для консольного



*Рисунок 3.  
Конструкция пьезоэлектрического  
двигателя червячного типа:  
1 - рабочий элемент, 2 - корпус для фиксирующего  
рабочего элемента, 3 - корпус для перемещающего  
рабочего элемента, 4 - винт, создающий предваритель-  
ное напряжение, 5 - прокладка из фторопластовой  
ленты, 6 - толкатель*



*Рисунок 4.  
Габаритные и присоединительные размеры актуатора АПМ-2-7-М*

крепления к корпусу объектива. Габариты пьезоэлектрического двигателя - 62x38x20 мм.

Рабочими элементами пьезоэлектрического двигателя являются многослойные пьезокерамические актуаторы АПМ-2-7-М компании "Элпа" (рис. 4).

Многослойные пьезоэлектрические актуаторы (далее актуаторы) преобразуют электрические сигналы, такие как напряжения или заряды в механические перемещения и/или усилия. Твердотельная конструкция актуаторов обеспечивает их надежную работу в сверхвысоком вакууме и при криогенных температурах.

Актуатор не имеет движущихся деталей и обладает повышенной надежностью на износ. Срок службы актуаторов в номинальном режиме работы составляет несколько миллиардов циклов.

Актуаторы представляют собой многослойную конструкцию, состоящую из чередующихся слоев (толщиной от 50 мкм до 120 мкм) из пьезокерамического материала и внутренних электродов (толщиной до 3-4 мкм), где в качестве материала используется сплав серебро-пallадий с незначительными добавками пьезокерамического материала, обеспечивающего повышенную адгезию - силу сцепления металлического сплава с керамикой.

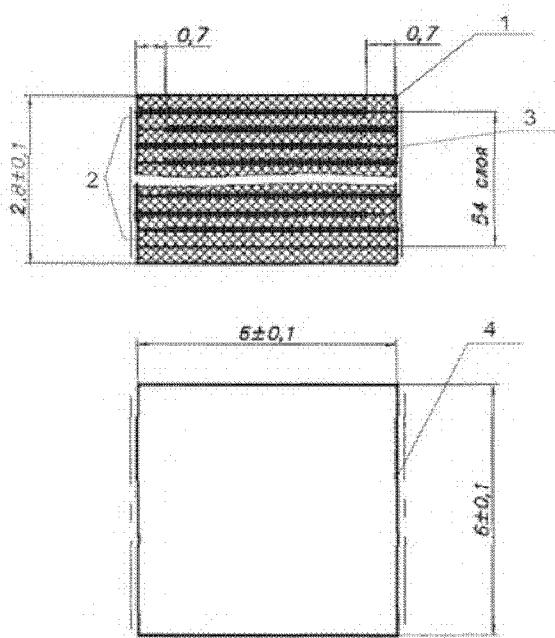
Габариты: сечение и высота актуатора определяются технологическими возможностями оборудования и, как правило, их сечение варьируется в пределах от 2x2 до 20x20 мм, а максимальная высота для моноблочной конструкции составляет около 100 мм.

Соединение слоев между собой осуществляется путем спекания под давлением внутренних металлических электродов каждого слоя, при этом образуется многослойный пьезокерамический блок с плотностью близкой к теоретическому пределу плотности монолитной керамики.

Встречно-штыревая конструкция внутренних электродов обеспечивает соединенные между собой параллельно электроды одной полярности, при этом смежные слои пьезокерамики поляризованы во встречном направлении.

Базовая конструкция многослойного пьезоэлектрического актуатора приведена на рис. 5.

Необходимость введения пассивных слоев вызвана тем, что при температурном обжиге за счет усадки материала блок принимает "подушкообразную" конфигурацию с отклонением от плоскости до 30 мкм. За счет пассивных слоев имеющих толщину по 100 мкм с каждой стороны, применима операция доводочного шлифования, обеспечивающую плоскость и параллельность основных поверхностей актуатора



**Рисунок 5.**

**Базовая конструкция многослойного пьезоэлектрического актуатора:** 1 - неполяризованный пассивный защитный пьезокерамический слой; 2 - пьезокерамические поляризованные слои; 3 - внутренние электроды; 4 - внешние электроды для токоподвода

с точностью до  $\pm 0,01\text{--}0,05$  мм. На боковые грани актуатора нанесены внешние электроды вожженное серебро (толщина слоя до 4-6 мкм) к которому с помощью пайки провода осуществляется электроподвод напряжения. Для обеспечения защиты от внешней окружающей среды конструкция актуатора размещается в защитном корпусе или на ней устанавливается защитная оболочка из термостойкого материала.

В ОАО "Элпа" технологические возможности оборудования допускают изготовление многослойных блочных конструкций с максимальной высотой до 2,8 мм.

Одиночный многослойный блок состоит из 50 поляризованных слоев пьезокерамического материала ЦТС-46 (толщиной 50 мкм), 4 пассивных слоев той же толщины и внутренних электродов - материал сплав серебро-пallадий (толщина слоя до 4 мкм). Для получения актуаторов с требуемыми размерами в пределах от 10 до 70 мм, отдельные блоки склеиваются между собой. В качестве клея при изготовлении составных актуаторов используются клеевые композиции на основе эпоксидных смол, обеспечивающих механическую прочность на растяжение

и сжатие сопоставимую с прочностью на растяжение и сжатие внутренних слоев.

Принципиально технология изготовления многослойных пьезоэлектрических актуаторов близка к технологии изготовления многослойных пьезоэлектрических конденсаторов (применяются другие материалы). Данный метод изготовления обладает уникальным сочетанием пьезоэлектрической и многослойной технологий и позволяет реализовать технологический процесс, близкий к технологии изготовления микроэлектроники, что обеспечивает их массовое производство, снижение производственных затрат и цену на актуаторы.

**Основы механических свойств пьезоэлектрических актуаторов:**

- Сила и жесткость. Максимальные прилагаемые силы (предел сжимающей нагрузки, предел растягивающей нагрузки).

Величины механической прочности ЦТС керамического материала (указанные в литературе) часто путают с практической долгосрочной нагрузкой актуатора. Керамический материал может противостоять давлениям до 250 МПа ( $250 \times 10^6$  Н/м<sup>2</sup>), не разрушаясь. Эта величина никогда не может быть получена в практических применениях. Для многослойных актуаторов (которые представляют собой соединение нескольких материалов) накладываются дополнительные ограничения и максимальная величина сжатия составляет не более 125 МПа. Растягивающие нагрузки предварительно ненагруженных актуаторов ограничиваются до 5-10% от предела сжимающей нагрузки. Для увеличенной растягивающей нагрузки необходимо предварительно нагрузить актуаторы, особенно актуаторы, предназначенных для работы в динамических режимах. Величина предварительной нагрузки 15-30 МПа.

- Жесткость.

Жесткость актуатора обычно выражается в виде константы пружины  $K_t$ , которая описывает деформацию тела в ответ на внешнюю силу.

Жесткость актуатора влияет на перемещение; с ее увеличением соответственно изменяется (уменьшается) величина перемещения под воздействием нагрузки.

Приложение статической нагрузки (создание предварительного механического напряжения) также вызывает уменьшение первоначальной длины актуатора.

Жесткость актуатора с разомкнутыми электродами выше, чем у актуатора с закороченными электродами. Усилители напряжения с низким выходным идентификатором обеспечивают режим питания, близкий к режиму, при котором электроды замкнуты. Механических напряжений, которые могут возникнуть в актуаторах с разомкнутыми электродами следует избегать, т.к. образующееся индуцированное напряжение может повредить актуатор. Рекомендуется все операции по установке и демонтажу актуаторов проводить с закороченными электродами.

Многофакторность зависимости жесткости, а, следовательно, значения развиваемого усилия, не позволяет однозначно определить значение жесткости. Данные о жесткости различных преобразователей нельзя сравнивать без дополнительной информации: условиях измерения с разомкнутыми или замкнутыми электродами, статические или динамические нагрузки. Жесткость конструкции измерителя (опоры и наконечники) развивающего усилия влияет на значение определяемых величин усилия.

Чем жестче конструкция опоры, тем выше развивающее усилие. Для актуатора АПМ (толщина слоя 50 мкм) при напряженности электрического поля 2 кВ/мм при изменении жесткости конструкции от 10 до 100 Н/мкм значение блокирующего усилия изменилось с 1000 до 2500 Н.

Учитывая сложность прямого измерения усилия, за рубежом в научно-технической документации приводятся в основном расчетные соотношения, имеющие точность  $\pm 15\%$ . На рис. 6 приведены результаты прямых измерений развивающего усилия преобразователей и расчетные соотношения, которые показали близкое соответствие расчетных значений и экспериментальных измерений.

Эксплуатационные параметры многослойных актуаторов:

Проведенные исследования и испытания многослойных пьезоэлектрических актуаторов в различных условиях эксплуатации показали что они обладают:

- 1) Стойкостью к внешним воздействующим факторам:
  - в диапазоне рабочих температур от минус 60°C до плюс 85°C.
- 2) Механическим воздействиям - синусоидальная вибрация:
  - синусоидальная вибрация в диапазоне частот 1-200 Гц;
  - амплитуда ускорения 50 м/с<sup>2</sup>.
- 3) Механический удар многократного действия:
  - пиковое ударное ускорение 150 м/с<sup>2</sup>;
  - длительность ударного ускорения 2 - 15 мс;
  - количество ударов 100;
  - частота ударов 60 1/мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к приводам аэрофотаппарата АК-113 был выбран вариант конструкции пьезоэлектрического двигателя, выбраны многослойные пьезокерамические актуаторы, созданы трехмерные модели деталей и сборки пьезоэлектрического двигателя. Дальнейшими задачами являются: разработка чертежей деталей и сборки макета пьезоэлектрического двигателя, выпуск ведомостей покупных изделий, необходимых для создания макета пьезоэлектрического двигателя, а так же разработка методики испытаний макета пьезоэлектрического двигателя.

Список литературы:

1. Лавриненко В.В., Карташев И.А., Вишневский В.С. Пьезоэлектрические двигатели - М.: Энергия, 1980. - 112 с.
2. Никифоров В.Г. Многослойные пьезоэлектрические актуаторы. Теория и практика. - ОАО "НИИ Элпа" Зеленоград, 168 с.
3. Панич А.Е. Пьезокерамические актуаторы. Учебное пособие. - Ростов-на-Дону, 2008, 159 с.
4. Сайт ОАО "НИИ Элпа":  
<http://www.elrapiezo.ru/>

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ  
ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ УСТАНОВКИ В  
ПЕРСПЕКТИВНЫЙ САМОЛЕТ-ШТУРМОВИК, НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
СУЩЕСТВУЮЩИХ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРОВ И  
ГИРОСТАБИЛИЗАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АНАЛОГИЧНЫХ  
АВИАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЯХ В РФ И ЗА РУБЕЖОМ**

СИГАЧЁВ И.С. - оператор научной роты войск ВКО,  
ТАБОЛИН Д.Б. - инженер отдела НТИ

ОАО "Красногорский завод имени С.А. Эверева"

*В данной статье рассматривается разработка математической модели гиростабилизатора для оптико-электронной прицельной системы ОЭПС-39, предназначеннной для установки в перспективный самолет-штурмовик. Описаны назначение, выполняемые задачи и технические характеристики системы стабилизации и наведения. Предложена кинематическая схема гиростабилизатора, представлены уравнения движения гиростабилизатора, структурная схема и передаточная функция. Также приведены результаты исследования модели на устойчивость в среде MatLab.*

Основная цель работы - разработка математической модели системы стабилизации и наведения (ССН) оптико-электронной прицельной системы ОЭПС-39, вывод передаточной функции гиростабилизатора, анализ устойчивости ССН в среде MatLab.

ССН в составе прибора ОЭПС-39 предназначена для стабилизации и наведения в пространстве оптических осей оптико-тепло и телевизионных систем и выдачи углов разворота линии визирования в бортовую центральную вычислительную машину (БЦВМ). Наведение и стабилизация оптических осей осуществляется путем разворота головного зеркала гиростабилизатора относительно корпуса самолета.

ССН должна обеспечивать решение задач при следующих условиях:

- скорость изменения углов:
- 1) курса до  $30^\circ/\text{с}$
- 2) тангажа до  $30^\circ/\text{с}$

3) крена до  $30^\circ/\text{с}$

ССН должна обеспечивать следующие характеристики:

- скорость наведения линии визирования -  $20^\circ/\text{с}$ ;
- диапазон углов наведения:
  - 1) по вертикальной оси - от  $+20^\circ$  до  $-120^\circ$
  - 2) по горизонтальной оси -  $\pm 35^\circ$
- амплитудное значение ошибки стабилизации - не более  $20''$  в диапазоне  $\pm 10^\circ$  и  $30''$  в остальном диапазоне углов наведения

На основе анализа построения существующих изделий, решающих аналогичные задачи, принято решение применить в стабилизаторе поплавковый интегрирующий гироскоп (ПИГ), так как он обладает высокой точностью и мало подвержен вибрационным и ударным возмущающим воздействиям.

В соответствии с конструкцией ПИГ произведен расчет параметров:

- коэффициент демпфирования

$$b = \frac{2\pi r^3 l}{\delta} \eta = \frac{2 \cdot 3,1416 \cdot 3,2741^3 \cdot 3,75}{0,015} \cdot 0,008874 = 489,2323 \text{ (гр} \cdot \text{см} \cdot \text{с}); \quad (1)$$

- передаточный коэффициент ПИГ

$$k = \frac{H}{b} = \frac{4000}{489,2323} = 8,1761 \quad (2)$$

- постоянная времени

$$T = \frac{J_{\text{п.р.}}}{b} = \frac{3,3403}{489,2323} = 0,006828 \text{ (с);} \quad (3)$$

где:

$r$  - радиус поплавка;

$l$  - длина поплавка;

$\eta$  - вязкость жидкости;

$\delta$  - зазор между поплавком и корпусом;

$H$  - кинетический момент гироскопа;

$J_{\text{п.р.}}$  - момент инерции гироскопа относительно оси прецессии;

Рассмотрим кинематическую схему гиростабилизатора. Она представлена на рис. 1.

Гиростабилизатор состоит из гиростабилизированной платформы (ГСП), головного зеркала и арретира. Головное зеркало связано с ГСП кинематической передачей с передаточным отношением 1:2. На ГСП устанавливаются два ПИГ Г1 и Г2 таким образом, что их оси чувствительности параллельны стабилизируемой оси, а равные по величине собственные кинетические моменты направлены в противоположные стороны. Такое расположение ПИГ уменьшает влияние угловой скорости крена на процесс стабилизации. Датчики угла ИД1 и ИД2, установленные на осях чувствительности ПИГ, измеряют углы отклонения ГСП от стабилизируемого направления. Сигналы с датчиков угла гироскопа поступают в электроблок ССН (не указан на схеме), откуда поступают на двигатели разгрузки М3 и М4. Моменты, развивающиеся двигателями, компенсируют возмущающие моменты, действующие по осям наведения. На осях подвеса ГСП расположены двигатели раз-

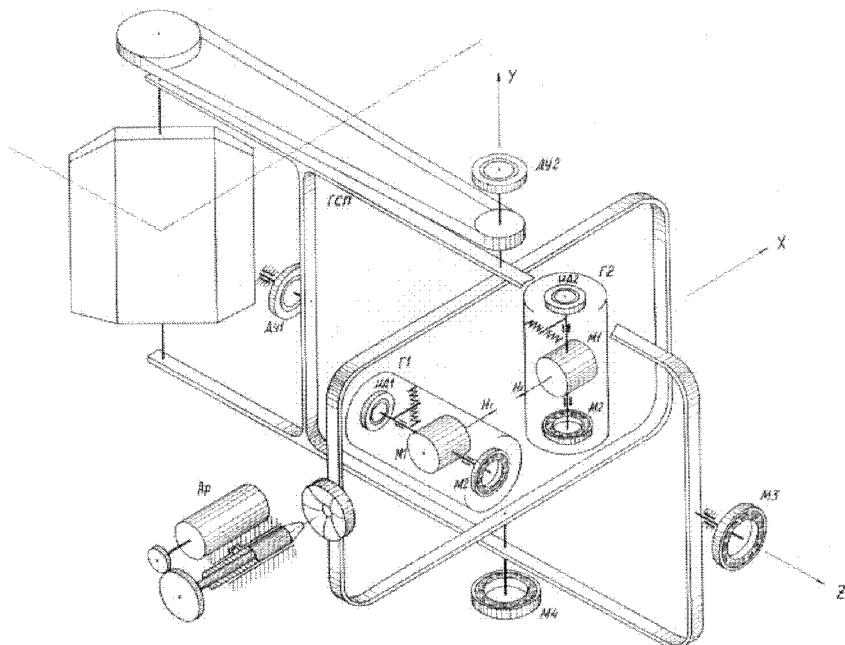


Рисунок 1.  
Кинематическая схема гиростабилизатора

грузки и датчики углов  $\Delta\Upsilon 1$  и  $\Delta\Upsilon 2$ , регистрирующие углы разворота ГСП относительно осей крепления гиростабилизатора в корпусе самолета.

Наведение ГСП в диапазоне скоростей наведения и переброса осуществляется путем подачи электрических сигналов на двигатели наведения M1 и M2, установленные на осях прецессии гироскопов. Момент, развиваемый двигателями наведения, вызывает прецессию гироскопа, при этом разворот гироскопа происходит вместе с ГСП вокруг соответствующей оси.

ССН имеет механический арретир, обеспечивающий механическое стопорение гиростабилизатора при выключении питания. Также ССН имеет контур электрического арретирования линии визирования. Электрическое арретирование обеспечивает приведение ГСП в нулевое положение из любого угла в пределах углов прокачки по сигналам с датчиков углов  $\Delta\Upsilon 1$  и  $\Delta\Upsilon 2$ .

После различных преобразований, исключения нелинейных членов второго порядка малости и выше и при пренебрежении несущественными членами, уравнения движения гиростабилизатора для данной кинематической схемы представлены в виде:

$$\begin{aligned} A_1\alpha_1 - B_2\beta_2 + H_1(\alpha_2 + \beta_1) + K_{p1}W_{p1}\beta_{1\text{отн}} &= M_{\text{вн1}} \\ B_1(\beta_1 + \alpha_2) - H_1\alpha_1 + b\beta_{1\text{отн}} &= m_{\text{вн1}} - M_{\text{упр1}} \\ A_2\alpha_2 + B_1\beta_1 + H_2(\beta_2 + \alpha_1) + K_{p2}W_{p2}\beta_{2\text{отн}} &= M_{\text{вн2}} \\ B_2(\beta_2 - \alpha_1) + H_2\alpha_2 + b\beta_{2\text{отн}} &= m_{\text{вн2}} - M_{\text{упр2}} \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$A_1$  - момент инерции ГСП по наружной оси ее подвеса;

$A_2$  - момент инерции ГСП по внутренней оси ее подвеса;

$B_1$  - момент инерции 1-го гироскопа относитель-

но оси прецессии;

$B_2$  - момент инерции 2-го гироскопа относительно оси прецессии;

$H_1$  - кинетический момент 1-го гироскопа;

$H_2$  - кинетический момент 2-го гироскопа;

$M_{\text{вн1}}, M_{\text{вн2}}$  - возмущающие моменты по осям стабилизации;

$m_{\text{вн1}}, m_{\text{вн2}}$  - возмущающие моменты по осям прецессии;

$\beta_{1\text{отн}}, \beta_{2\text{отн}}$  - углы прецессии;

$b$  - коэффициент демпфирования;

$\alpha_1, \alpha_2$  - углы поворота ГСП относительно осей стабилизации;

$\beta_1, \beta_2$  - углы поворота гироскопов;

$K_{p1}, K_{p2}$  - коэффициенты усиления системы разгрузки;

$W_{p1}, W_{p2}$  - передаточные функции системы разгрузки;

$M_{\text{упр1}}, M_{\text{упр2}}$  - управляющие моменты;

В результате представления уравнений (4) в операторной форме получена передаточная функция гиростабилизатора от  $\alpha$  и  $M_{\text{вн}}$ :

$$W_{\text{rc}}(\rho) = \frac{a}{M_{\text{вн}}} = \frac{B\rho + b}{H[H\rho(T_{\text{rc}}^2\rho^2 + 2\xi_{\text{rc}}T_{\text{rc}}\rho + 1) + K_pW_p(\rho)]}; \quad (5)$$

где:

$T_{\text{rc}} = \frac{\sqrt{AB}}{H}$  - постоянная времени гиростабилизатора ( $T_{\text{rc1}}$  - по каналу тангенса,  $T_{\text{rc2}}$  - по каналу курса);

$\xi_{\text{rc}} = \frac{b}{2H} \sqrt{\frac{A}{B}}$  - относительный коэффициент демпфирования ( $\xi_{\text{rc1}}$  - по каналу тангенса,  $\xi_{\text{rc2}}$  - по каналу курса);

Структурная схема математической модели гиростабилизатора представлена на рис. 2.

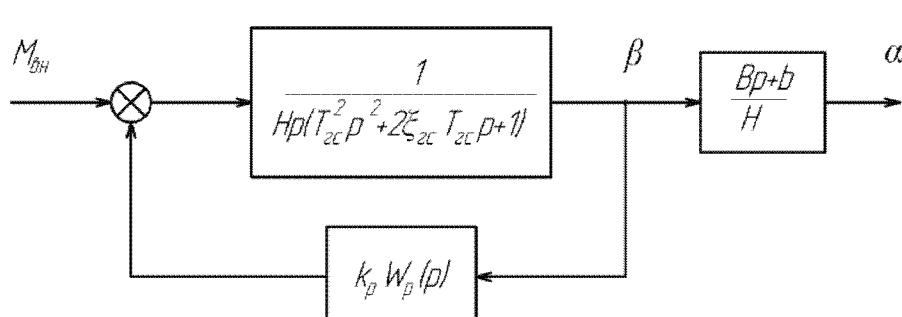


Рисунок 2.

Структурная схема математической модели гиростабилизатора

$$k_p = k_{dv} k_{dy} k_{yc} \quad (6)$$

где:

$k_{dv}$  - крутизна двигателя разгрузки по моменту;  
 $k_{dy}$  - крутизна датчика угла поворота гироскопа;  
 $k_{yc}$  - коэффициент усиления усилителя;

$$W_p(\rho) = W_k(\rho)W_{dv}(\rho) \quad (7)$$

$$W_{dv}(\rho) = \frac{1}{T_{dv}\rho + 1}; \quad (8)$$

где:

$W_k(\rho)$  - передаточная функция корректирующее звено;

$W_{dv}(\rho)$  - передаточная функция двигателя разгрузки;

$T_{dv}$  - постоянная времени двигателя;

$k_{yc}$  и  $W_k(\rho)$  выбираются по виду ЛЧХ, исходя из условий обеспечения запасов устойчивости и точности системы.

В качестве датчика угла поворота гироскопа используется индукционный датчик 15Д-32. Для него

$$k_{dy} = 173 \left( \frac{\text{в}}{\text{рад}} \right).$$

В качестве двигателя разгрузки используются двигатели ДБМ-105 (по тангажу) и ДБМ-85 (по курсу). Для них  $k_{dv1} = 703 \left( \frac{\text{Г}\cdot\text{см}}{\text{в}} \right)$ ,  $k_{dv2} = 100 \left( \frac{\text{Г}\cdot\text{см}}{\text{в}} \right)$ ,  $T_{dv1} = 0,1 \text{ (мс)}$ ,  $T_{dv2} = 0,8 \text{ (мс)}$  соответственно.

В соответствии с конструкцией гиростабилизатора произведен расчет параметров:

$$T_{rc1} = \frac{\sqrt{A_1 B}}{H} = \frac{\sqrt{355 \cdot 3,34}}{4000} = 0,0086 \text{ (с)}$$

$$T_{rc2} = \frac{\sqrt{A_2 B}}{H} = \frac{\sqrt{190,035 \cdot 3,34}}{4000} = 0,0063 \text{ (с)}$$

$$\xi_{rc1} = \frac{b}{2H} \sqrt{\frac{A_1}{B}} = \frac{489}{8000} \sqrt{\frac{355}{3,34}} = 0,6302$$

$$\xi_{rc2} = \frac{b}{2H} \sqrt{\frac{A_2}{B}} = \frac{489}{8000} \sqrt{\frac{190,035}{3,34}} = 0,4601$$

В соответствии с рисунком 3 при размыкании в точке суммирования передаточная функция разомкнутой системы будет иметь вид:

Логарифмические частотные характеристики

$$W_{pas}(\rho) = \frac{1}{H\rho(T_{rc}^2\rho^2 + 2\xi_{rc} T_{rc}\rho + 1)} \cdot \frac{k_{dv} k_{dy} k_{yc}}{T_{dv}\rho + 1} = \\ = \frac{k_{dv} k_{dy} k_{yc}}{HT_{rc}^2 T_{de}\rho^4 + (2\xi_{rc} T_{de} + T_{rc})HT_{rc}\rho^3 + (2\xi_{rc} T_{rc} + T_{dv})H\rho^2 + H\rho}; \quad (9)$$

(ЛЧХ) передаточной функции разомкнутой системы представлены на рис. 3, 4.

Исходя из вида ЛЧХ системы, представленной на рисунках 3, 4, необходимо подобрать корректирующее звено для обеспечения устойчивости системы и запасов по амплитуде и по фазе.

Корректирующее звено будет иметь передаточную функцию:

$$W_k(\rho) = \frac{T_1\rho + 1}{T_2\rho + 1} \cdot \frac{T_3\rho + 1}{T_4\rho + 1} \cdot k; \quad (10)$$

где:

$$T_1 = 0,02 \text{ (с)}$$

$$T_2 = 0,0003 \text{ (с)}$$

$$T_3 = 0,03 \text{ (с)}$$

$$T_4 = 0,6 \text{ (с)}$$

$$k = 3$$

ЛЧХ передаточной функции разомкнутой системы с коррекцией представлены на рис. 5, 6.

Исходя из рис. 5, 6, после ввода корректирующего звена система приобрела устойчивость и запасы по амплитуде и по фазе.

В результате проведенной работы выбрана кинематическая схема гиростабилизатора, получены уравнения движения гиростабилизатора, переда-

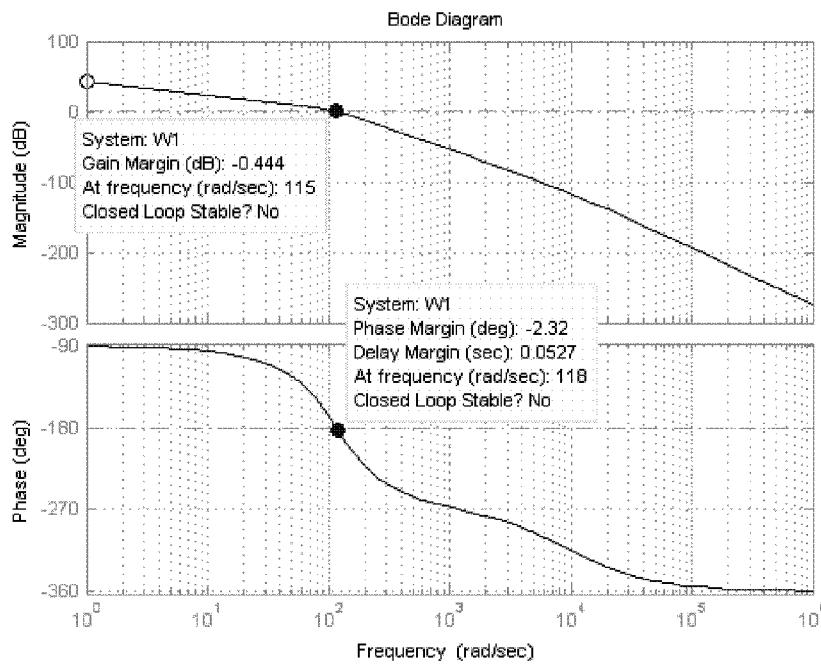


Рисунок 3.  
ЛЧХ передаточной функции разомкнутой системы по тангажу при  $k_{yc} = 50$

точная функция, структурная схема математической модели, проведено исследование модели на устойчивость в среде MatLab, исходя из вида ЛЧХ произведен подбор корректирующего звена. Целями дальнейшей работы являются исследование ССН на соответствие требованиям по ошибке стабилизации, разработка функциональной схемы ССН, разработка материалов для эскизно-техни-

ческого проекта ССН, а также участие в разработке конструкторской документации и процессе настройки и испытаний образцов ССН

#### Список литературы:

- Пельпор Д.С., Колосов Ю.А., Рахтеенко Е.Р. Расчет и проектирование гироскопических стабилизаторов - М., "Машиностроение", 1972.

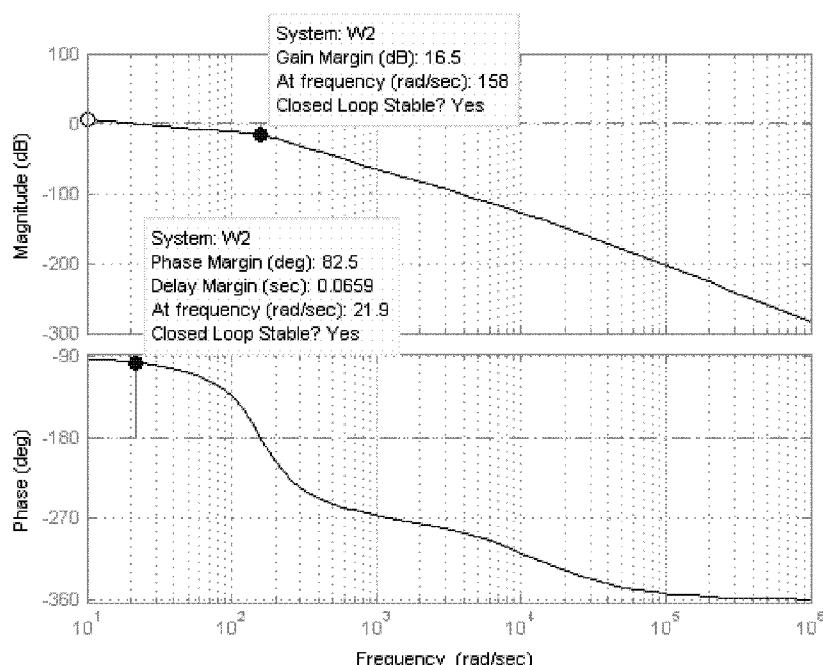
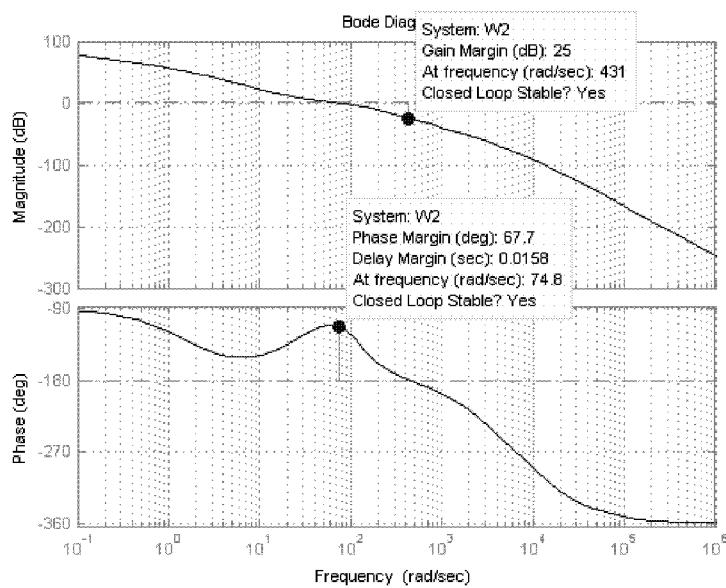
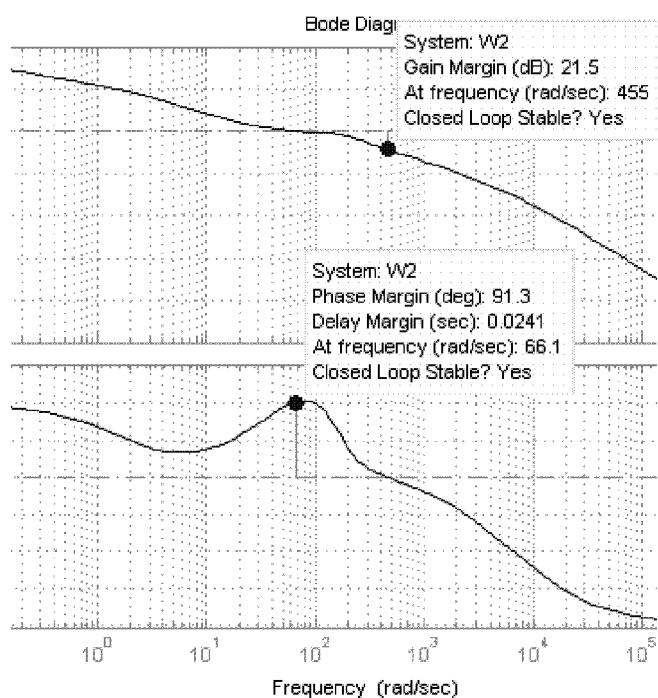


Рисунок 4.  
ЛЧХ передаточной функции разомкнутой системы по курсу при  $k_{yc} = 50$



*Рисунок 5.*  
ЛЧХ передаточной функции разомкнутой системы с коррекцией по тангажу при  $k_{gc} = 50$



*Рисунок 6.*  
ЛЧХ передаточной функции разомкнутой системы с коррекцией по курсу при  $k_{gc} = 50$

2. Ривкин С.С. Теория гиростабилизаторов. ч. II - СПб, "Судостроение", 1964.
3. Пельпор Д.С., Михалёв И.А., Бауман В.А. Гиростабилизаторы. Гиростабилизирующие устройства. Гиростабилизированные системы - М., Высшая школа, 1988.
4. Пельпор Д.С. Теория гиростабилизаторов - М., "Машиностроение", 1965.
5. Соловьевников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования - М., "Машиностроение", 1985.
6. Дьяконов В.П. MATLAB 7.\*: Самоучитель - М., ДМК Пресс, 2008.
7. Дьяконов В.П. Simulink 7: Самоучитель - М., ДМК Пресс, 2008.
8. Анхимюк В.Л., Олейко О.Ф., Михеев Н.Н. Теория автоматического управления - Минск, "Дизайн ПРО", 2000.