

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ»  
(МИИГАиК)



На правах рукописи

МЕЛЬНИКОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ

**Разработка и исследование  
инфракрасных приборов ориентации по Земле  
на основе матричных фотоприемных устройств**

Специальность 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Научный руководитель:

Соломатин Владимир Алексеевич,  
доктор технических наук, профессор

МОСКВА – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....                                                                                                                             | 4  |
| ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ С<br>ПОМОЩЬЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ .....                                              | 11 |
| 1.1 Принципы ориентации по Земле с помощью построителей местной<br>вертикали.....                                                          | 11 |
| 1.2 Спектральные характеристики излучения Земли.....                                                                                       | 20 |
| 1.3 Приемники излучения инфракрасного диапазона в составе построителей<br>местной вертикали .....                                          | 24 |
| 1.4 Режимы работы построителей местной вертикали в системе ориентации<br>космического аппарата .....                                       | 26 |
| Выводы по Главе 1 .....                                                                                                                    | 29 |
| ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРА<br>ОРИЕНТАЦИИ ПО ЗЕМЛЕ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ<br>НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ФОТОМАТРИЦ .....        | 32 |
| 2.1 Введение в создание методики расчета и проектирования.....                                                                             | 32 |
| 2.2 Этап 1. Анализ требований к построителям местной вертикали .....                                                                       | 33 |
| 2.3 Этап 2. Выбор конфигурации оптической системы построителя местной<br>вертикали.....                                                    | 37 |
| 2.4 Широкоугольные объективы в структуре построителей местной вертикали                                                                    | 38 |
| 2.4.1 Объектив типа «рыбий глаз» .....                                                                                                     | 39 |
| 2.4.2 Панорамные зеркально-линзовые объективы .....                                                                                        | 41 |
| 2.5 Выбор и расчет оптической схемы инфракрасных объективов с<br>ортогональными оптическими каналами для построителей местной вертикали... | 46 |
| 2.6 Этап 3. Разработка алгоритма обработки информации для построителя<br>местной вертикали .....                                           | 51 |
| 2.6.1 Алгоритм работы построителя местной вертикали<br>в режиме поиска Земли.....                                                          | 53 |
| 2.6.2 Алгоритм работы построителя местной вертикали в режиме измерений ..                                                                  | 56 |
| 2.7 Этап 4. Точностной расчет построителя местной вертикали .....                                                                          | 62 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.7.1 Составляющие суммарной погрешности построителя местной вертикали .....                                                              | 62  |
| 2.7.2 Составляющие методической погрешности построителя местной вертикали и способы их компенсации .....                                  | 63  |
| 2.7.3 Алгоритм компенсации систематических методических погрешностей построителя местной вертикали .....                                  | 70  |
| 2.7.4 Оценка точности построителя местной вертикали.....                                                                                  | 75  |
| Выводы по главе 2.....                                                                                                                    | 81  |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОСТРОИТЕЛЯ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ .....                                     | 84  |
| 3.1 Разработка макета построителя местной вертикали .....                                                                                 | 84  |
| 3.1.1 Этап 1. Выявление основных характеристик макета .....                                                                               | 84  |
| 3.1.2 Этап 2. Выбор конфигурации, расчет параметров оптической схемы макета.....                                                          | 85  |
| 3.1.3 Этап 3. Разработка алгоритма и программного обеспечения вычисления угла отклонения от местной вертикали .....                       | 88  |
| 3.1.4 Этап 4. Точностной расчет макета .....                                                                                              | 89  |
| 3.2 Этап 5. Лабораторные испытания макета .....                                                                                           | 90  |
| Выводы по главе 3.....                                                                                                                    | 94  |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                          | 96  |
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....                                                                                             | 98  |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                                                                    | 99  |
| СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА .....                                                                                                    | 108 |
| Приложение А Текст программы моделирования изображения Земли на фотоматрице, написанный на языке программирования Python.....             | 110 |
| Приложение Б Текст программы EV вычисления смещения энергетического центра изображения, написанный на языке программирования Python ..... | 114 |
| Приложение В Текст программы BV смещения центра изображения по положению границ, написанный на языке программирования Python .....        | 118 |
| Приложение Г Схема хода лучей через объектив макета построителя местной вертикали, полученная в программе Zemax .....                     | 123 |
| Приложение Д Акт об использовании результатов диссертационной работы.....                                                                 | 124 |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

На околоземной орбите располагается наибольшее количество эксплуатируемых спутников. Они используются для обеспечения навигации, связи, прогнозирования погоды и изучения климата, мониторинга природных ресурсов, производства геодезических измерений, а также получения спутниковых снимков высокого разрешения.

Для наведения, ориентации и навигации космических аппаратов (КА) на всех этапах полета используются оптико-электронные приборы (ОЭП). Приборы, предназначенные для автономного определения направления местной вертикали – линии, соединяющей центр масс КА с центром масс планеты, получили название построителей местной вертикали (ПМВ).

Данные устройства находят применения в КА как на солнечно-синхронных орбитах (спутники серии «Метеор-М» [1], АИСТ-2Д [2], «Гонец» и другие), так и на геостационарных («Электро», «Радуга-1М»).

Необходимость поддержания имеющихся и создания новых группировок КА приводит к возрастанию требований к таким параметрам приборов ориентации как ресурс, точность, габариты.

Традиционно применяются ПМВ с оптико-механическим сканированием инфракрасного (ИК) горизонта Земли. В приборах данного типа энергия излучения планеты фокусируется оптической системой (ОС) на одноэлементном приемнике излучения.

Недостатком такого решения является применение механического привода, что приводит к снижению надежности, долговечности, а также увеличивает габариты и массу прибора. Наличие подвижных элементов в условиях вакуума требует специальных смазок. Для обеспечения визирования ИК горизонта Земли на КА с разной высотой полета возникает необходимость конструктивных изменений ОС ПМВ. Проблемой для ПМВ с механическим сканированием является попадание помех, например, излучения от Солнца и Луны, в ОС, что

вызывает искажение сигналов и не позволяет использовать показания прибора. Для исключения влияния излучения Солнца в конструкцию прибора вводят дополнительный оптический канал солнечной защиты [3].

В результате развития многоэлементных неохлаждаемых приемников излучения, чувствительных в длинноволновой ИК области спектра [4], появились новые технологические возможности для создания приборов ориентации по Земле без оптико-механического сканирования. Преимуществом такого решения может стать повышение точности приборов до уровня единиц угловых минут за счет осреднения информации, получаемой со всего горизонта или больших сегментов Земли, а не с отдельных точек пересечений как в приборах с оптико-механическим сканированием, снижение габаритов и массы, повышение помехозащищенности за счет проведения пространственной селекции помеховых источников – Солнца, Луны, а также элементов конструкции аппарата. Поэтому создание нового типа приборов ориентации представляется актуальной задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Значительный вклад в теорию создания приборов ориентации заложили отечественные и зарубежные ученые: Федосеев В.И., Колосов М.П. [3], Ивандиков Я.М. [5], Гандлевский Ю.М. [6], Михайлов Е.Н. [15], Рабовский А.Е. [7], Гебгарт А. Я. [8], Зензинов С.Ю. [9], Шаталова Н.А. [9, 10], Пирогов М.Г. [8, 11], Цыцулин А.К. [12, 13], Vertat I. [53], Zannoni, M. [54] и другие [59, 56].

Отечественными специалистами Пироговым М.Г и другими [8] разработана схема прибора с использованием широкоугольных объективов, к недостаткам которых следует отнести снижение качества на краях изображения, особенно на низких высотах полета, влияние фонового излучения на точность определения угла отклонения, необходимость алгоритмического исключения части участков матрицы из-за попадания элементов конструкции КА в угловое поле. Для проведения периодической калибровки фоновой засветки матрицы используется подвижный затвор, что усложняет конструкцию и снижает её надежность. В

представленных примерах ПМВ укомплектованы зарубежными образцами приемников излучения.

Принимая во внимание преимущества приборов ориентации по Земле на основе многоэлементных приемников излучения, а также потребность в использовании данного вида устройств для КА с различными требованиями, в первую очередь – разной рабочей высотой полета, **целесообразным** представляется разработка и проектирование данного вида приборов в совокупности с разработкой методического, математического, алгоритмического, технического и программного обеспечения (ПО).

Методики расчета и проектирования приборов без оптико-механического сканирования, обеспечивающих требуемые в настоящее время точностные характеристики ориентации КА, не представлены в известной литературе.

### **Цель и задача диссертации**

**Целью** диссертационной работы является разработка научных основ расчета и проектирования ИК ОЭП ориентации по Земле на базе неохлаждаемых матричных фотоприемных устройств (фотоматриц), обеспечивающих повышение точности, помехоустойчивости и расширение функциональных возможностей систем ориентации КА.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ принципов построения местной вертикали, определить перспективные схемотехнические решения прибора.
2. Обосновать выбор ОС и рабочего спектрального диапазона для построения изображения необходимой конфигурации на чувствительном слое приемника излучения.
3. Разработать алгоритм обработки информации с матрицы приемника и вычисления значений углов отклонения оси прибора от местной вертикали. Провести оценку предельной погрешности прибора с учетом предложенных решений.

4. Разработать алгоритм компенсации методической погрешности при вычислении угла отклонения от направления на местную вертикаль и оценить его эффективность.
5. Разработать методику расчета и проектирования приборов ориентации по Земле на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц.
6. Разработать и исследовать конструкцию ПМВ с ортогональными оптическими каналами на базе многоэлементной неохлаждаемой фотоматрицы.

**Научная новизна** исследования состоит в следующем.

1. Разработанная методика расчета и проектирования приборов ориентации по Земле на основе фотоматриц **отличается** от существующих использованием предложенных оригинальных ОС, обеспечивает повышение точности за счет оценки влияния методических погрешностей путем моделирования изображения на чувствительном слое матрицы и использования разработанного алгоритма компенсации систематической методической погрешности.
2. **Впервые** разработан алгоритм компенсации систематической методической погрешности измерения угла отклонения от местной вертикали Земли, основанный на определении параметров аппроксимирующих кривых, характеризующих несферичность и широтно-сезонные вариации яркости Земли.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в получении научных результатов, позволяющих разработать комплекс оригинальных конструктивных и алгоритмических решений, исследовать, и учесть влияние основных факторов, формирующих погрешность измерения угла отклонения от местной вертикали при создании принципиально новых схем приборов ориентации по Земле.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- Разработанная методика расчета и проектирования обеспечивает создание приборов ориентации по Земле на основе матричных фотоприемных устройств, и позволяет достичь величины предельной погрешности определения угла отклонения от местной вертикали не превышающей  $3'$ , что превосходит

точностные характеристики существующих приборов с оптико-механическим сканированием и статического типа.

– Предложенные ОС ПМВ с фотоматрицами обеспечивают необходимое качество изображения ИК горизонта Земли, универсальность применения на различных высотах полета, упрощение расположения прибора на корпусе КА.

– Предложенный алгоритм компенсации влияния несферичности и широтно-сезонных вариаций яркости Земли на основе гармонического анализа Фурье применим для всех видов приборов ориентации по Земле и позволяет обеспечить повышение точности определения угла отклонения от местной вертикали.

### **Методология и методы исследования**

В исследовании применяются: информационный поиск, сбор и анализ научно-технической информации, математическое моделирование системы ОЭП как линейного фильтра сигнала, Фурье-анализ с использованием графо-аналитических методов описания преобразований сигналов, физическое моделирование макетного образца и эксперимент с применением имитатора ИК-излучения Земли.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Применение разработанной методики расчета и проектирования позволяет осуществлять разработку ИК приборов ориентации по Земле на основе микроболометрической матрицы (МБМ) и повысить эффективность ориентации по критериям точности и помехоустойчивости.
2. Перспективным техническим решением ПМВ является использование ИК многоэлементной матрицы, на которой создается изображение двух пар диаметрально расположенных зон горизонта Земли, развернутых на  $90^\circ$  относительно друг друга в азимутальной плоскости (системы с ортогональными оптическими каналами).
3. Применение панорамного зеркально-линзового объектива в составе прибора ориентации по Земле обеспечивает работу в широком диапазоне высот полета КА.
4. Влияние на точностные характеристики прибора ориентации систематических составляющих погрешности может быть скомпенсировано

определением параметров аппроксимирующих кривых, характеризующих несферичность и широтно-сезонные вариации яркости Земли, при алгоритмической обработке выходных сигналов на основе гармонического анализа Фурье.

Представленные в диссертации результаты исследования будут **востребованы** при разработке и модернизации ОЭП ориентации, применяемых в КА различных серий, в том числе – «Метеор-М», «Ионосфера-М», «ЯМАЛ», «Кондор-ФКА» навигационной системы «ГЛОНАСС», позволят повысить ресурс, помехозащищенность и надежность приборов ориентации, уменьшить их габариты для применения в составе малых КА.

**Достоверность и обоснованность** полученных научных результатов и выводов подтверждается результатами экспериментального исследования макета прибора ориентации на имитаторе излучения Земли.

Испытания макета прибора с ортогональными оптическими каналами на основе внеосевых параболических зеркал подтвердили работоспособность данного способа построения местной вертикали и показали, что применение разработанной методики расчета и проектирования позволяет осуществлять разработку и определять технический облик ИК приборов ориентации по Земле на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц.

Эффективность предложенного алгоритма компенсации влияния несферичности и широтно-сезонных вариаций яркости Земли была экспериментально подтверждена сравнением показаний ПМВ с расчетной ориентацией по измерениям звездных датчиков и аппаратуры спутниковой навигации во время летных испытаний КА «Ионосфера-М» № 3, 4 (акт об использовании результатов АО «Корпорация «ВНИИЭМ» от 18.09.2020).

### **Личный вклад автора**

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертации получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Автор создал методику расчета и проектирования объекта исследования. Автором разработана конструкция макета прибора ориентации по Земле, разработано ПО для обработки

изображения, выполнена экспериментальная проверка научных результатов исследования.

### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на различных научно-технических мероприятиях: «Всероссийский инженерный конкурс (ВИК)» (2021 г. Москва), Акселератор в сфере пространственных данных, МИИГАиК (2022 г. Москва) (представленная работа отмечена дипломом лучшей работы конкурса), 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (21-24 ноября 2023, Москва), VIII Восточный экономический форум (2023, Владивосток), III конгресс молодых ученых (28-30 ноября 2023, федеральная территория Сириус), Конкурс на лучшую научно-техническую работу среди молодых специалистов 2023 г., АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (2023 г., Москва), Международная конференция «Пространственные данные: наука и технологии» (28-29 мая 2024, Москва), Международная конференция «Пространственные данные: наука и технологии» (28-29 мая 2025, Москва).

### **Структура и объем научно-квалификационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 125 страниц, работа содержит 16 таблиц, 47 рисунков, списка иллюстративного материала и 5 приложений.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Диссертация на тему «Разработка и исследование инфракрасных приборов ориентации по Земле на основе матричных фотоприемных устройств» полностью соответствует п.5 паспорта научной специальности 2.2.6 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» [14]: Разработка приборов и комплексов дистанционного зондирования Земли и объектов космического пространства в оптическом диапазоне спектра, в том числе мультиспектральной и гиперспектральной аппаратуры, приборов ориентации и навигации космических летательных аппаратов».

- с оптико-механическим сканированием;
- статического типа.

В рамках разработки прибора ориентации по Земле статического типа на основе фотоматрицы целесообразно рассмотреть представленные в литературе [3, 5] образцы ПМВ с точки зрения не только конструктивного исполнения, но и как основу для алгоритмов определения угла отклонения от местной вертикали. К двум основным классам приборов ориентации по Земле с оптико-механическим сканированием можно отнести ПМВ радиационно-балансного типа (с круговым сканированием) и с радиальным (либо линейным) сканированием ИК горизонта Земли.

Принцип действия приборов радиационно-балансного типа основан на сравнении освещенностей, создаваемых противоположными участками визируемого горизонта. Данный подход находит применение в ОЭП, где положение детектируемого объекта определяется на основе положение энергетического центра кадра.

Общие принципы определения местной вертикали с радиальным (линейным) сканированием базируются на измерении угла между направлением на край диска планеты — горизонт, определяемый как граница космос-планета, и осями аппарата в различных точках горизонта. Для планеты, имеющей правильную сферическую форму, направление местной вертикали будет биссектрисой двухгранных углов визирования двух пар диаметрально противоположных точек горизонта.

Угловой размер радиуса ИК горизонта, обуславливаемый тепловым излучением атмосферы Земли определяется по формуле (1):

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{R + h_a}{R + H}\right), \quad (1)$$

где  $H$  — высота полета,  $R$  — радиус Земли,  $h_a$  — высота слоя атмосферы, принимаемого за границу теплового излучения.

Угол отклонения приборной оси  $Z$  от направления на местную вертикаль Земли определяется в двух перпендикулярных плоскостях по осям крена и тангажа. Характеристика выходного управляющего сигнала  $U$  — от угла отклонения  $\Delta\alpha$  представлена на Рисунок 2 [3]. Ступенчатая характеристика

соответствует датчикам наличия Земли, линейная – более точным измерителям угла отклонения. Статическая характеристика ПМВ имеет линейную зону  $\Delta\varphi$  порядка  $1-2^\circ$  и зону насыщения.

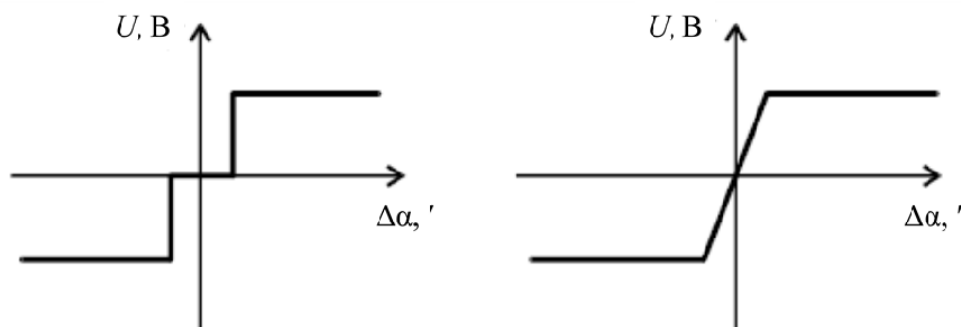


Рисунок 2 – Варианты характеристик управляющих сигналов ПМВ [3]

В ПМВ с оптико-механическим сканированием организуется пересечение мгновенным угловым полем горизонта Земли, в следствие чего формируется сигнальный импульс. Момент пересечения границы «космос-Земля» определяется фронтом импульса приемника излучения, реагирующего на изменение потока на чувствительной площадке, при достижении определенного уровня – порога. В зависимости от траектории сканирования осуществляется от двух и более пересечений горизонта Земли и по длительностям достижения сигналами пороговых значений для противоположных участков определяется угол отклонения от местной вертикали (Рисунок 3) [3].

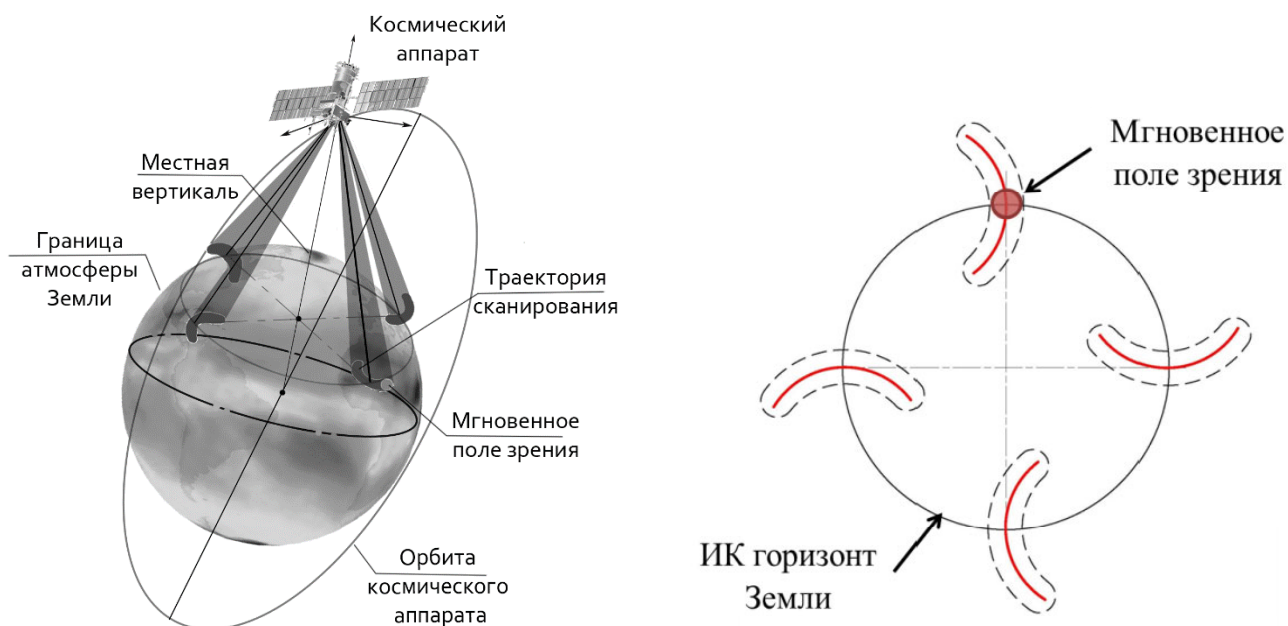


Рисунок 3 – Схема оптико-механического сканирования ПМВ [20]

Примерами приборов такого типа могут служить системы типа MiDES (Servo Corporation of America), Earth Sensor (SSBV), STD16 (SODERN) в которых используются пироэлектрические приемники.

Из отечественных приборов ориентации по Земле с применением оптико-механическим сканированием можно отметить разработки НПО «Геофизика» [9] и АО «Корпорация «ВНИИЭМ» [7, 15, 17, 18].

Данные приборы характеризуются суммарной погрешностью определения угла отклонения оси прибора от местной вертикали порядка  $\Delta_{\text{сум}} \approx \pm 8'$  (без учета погрешности из-за несферичности Земли) [6] и массой 1,6–3 кг.

Недостатком такого решения является необходимость вращательного [15] или колебательного привода [17], обеспечивающего сканирование, что снижает надежность, а также увеличивает габариты и массу устройства.

Проблемой для ПМВ с механическим сканированием является попадание помех, например, излучения от Солнца или бликов от конструкции КА на одноэлементный приемник, что вызывает значительное искажение сигналов и не позволяет использовать показания прибора для ориентации КА. Для детектирования подобных эффектов в конструкцию прибора вводят дополнительный оптический канал солнечной защиты.

Впервые статические варианты ПМВ были разработаны зарубежными производителями в начале 2000-х годов на базе многоэлементных приемников ИК-диапазона — линейных или крестообразных. К системам такого типа можно отнести MAI-SES (Maryland Aerospace), IRES-C (SELEX), STS02 (SODERN) в которых применялись термпарные матрицы и другие [53, 54].

Французская компания Sodern (дочерняя компания EADS), известный производитель как звездных датчиков, так и датчиков горизонта, разработала ПМВ без подвижных частей — STS02 [55]. Данный прибор является более компактным и легким, чем ПМВ, которые используют приводы вращения или колебания зеркала.

В статических ПМВ данного типа одноэлементный датчик и вращающееся зеркало заменены четырьмя линейками ИК-датчиков. Принципиально схема сканирования построена так: на линейках термопарных датчиков (термопарных матрицах) через объектив строится изображение ИК горизонта Земли в диапазоне 14–16 мкм (Рисунок 4).

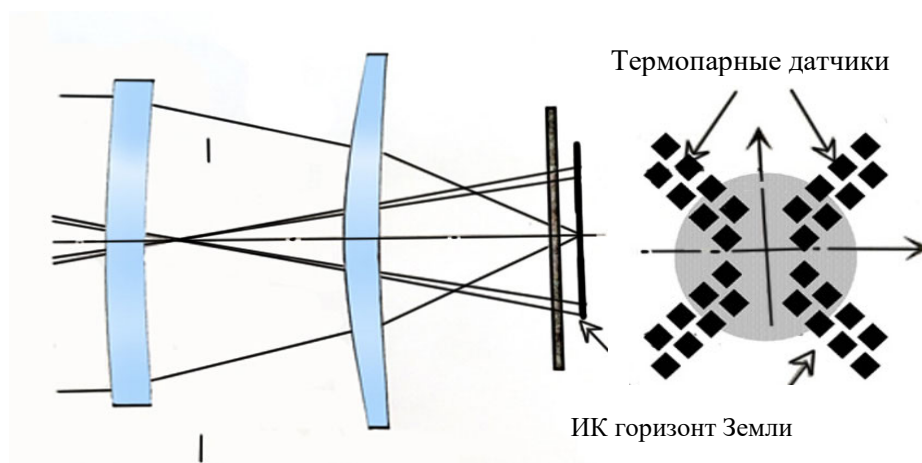


Рисунок 4 – Оптическая схема прибора STS02 [55]

Матрица состоит из 32 пикселей (элементов), которые расположены в виде двухступенчатых линеек по 16 пикселей рядом друг с другом. Пиксели разнесены так, что линейки смещены на половину длины пикселя относительно друг друга, в связи с чем всегда есть один пиксель, поле которого полностью находится на границе космос-Земля.

Поэлементный опрос каждой из линеек позволяет получить энергетический градиент (фронт), соответствующий яркостной картине на горизонте, и следуя алгоритму определить его угловое положение. Затем, проведя сравнение полученных угловых положений горизонта по четырем направлениям, можно оценить отклонение КА от местной вертикали по двум осям.

В датчиках Земли разработанных для низких и средних эллиптических орбит применяются четыре отдельных германиевых объектива с угловым полем  $22^\circ$  для проецирования ИК-изображения горизонта на четыре отдельные матрицы детекторов.

Предельная погрешность прибора составляет порядка  $5'$  для низкой эллиптической орбиты.

Для спутника на геостационарной орбите ИК-изображение всей Земли проецируется на детектор с помощью объектива с угловым полем  $40^\circ$ . Чтобы максимизировать динамический диапазон датчика Земли (т. е. соотношение между самой высокой и самой низкой высотой спутника, где датчик Земли все еще может видеть край Земли), необходимо минимизировать слепую зону в центре четырех детекторов.

К недостаткам данного решения можно отнести необходимость создания различных конфигураций прибора в зависимости от параметров орбиты полета КА. Поскольку характеристики элементов отдельных линеек могут значительно отличаться, разработчикам пришлось создать специализированный приемник, с крестовой структурой чувствительных элементов на единой подложке. Однако, и в таком случае каждый оптический канал будет иметь отличные от остальных каналов характеристики пропускания и качества изображения, что приводит к дополнительной инструментальной погрешности определения угла отклонения от местной вертикали.

С появлением малых КА формата CubeSat, в котором каждый сегмент аппарата имеет габариты  $100 \times 100 \times 100$  мм, важной задачей стала миниатюризация приборов ориентации, в том числе ПМВ. Исследованиям в данном направлении посвящены работы по разработке методов определения угла отклонения от местной вертикали с применением одноэлементных термопарных датчиков [53, 56, 58].

Спутник Pico Solar Test-2 (PSSCT-2) был создан Aerospace Corporation и запущен с Atlantis во время финальной миссии шаттла США в 2011 году. В систему контроля ориентации этого аппарата был включен один из первых ИК ПМВ, спроектированных для аппаратов типа CubeSat. Этот ПМВ состоит из девяти датчиков горизонта, которые были установлены с разными углами наклона к ориентируемой оси (Рисунок 5). Это необходимо для визирования как ИК-горизонта, так и всего диска Земли [58].

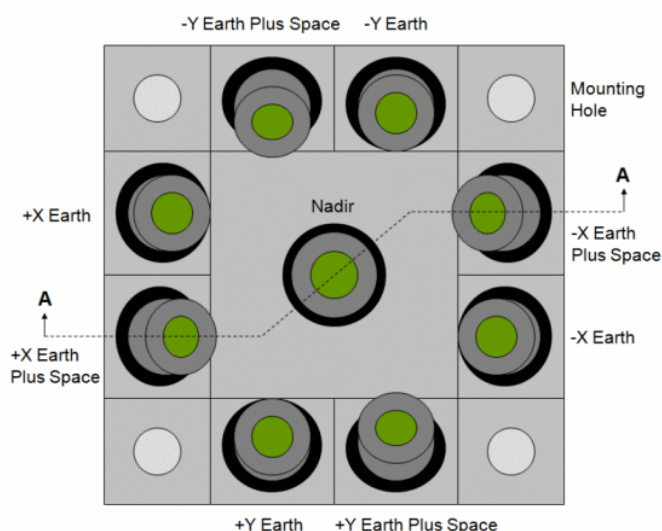


Рисунок 5 – Схема расположения датчиков ПМБ PSSCT-2 [58]

При данной схеме построения прибора «засечки» на границе «космос-Земля» формируются одноэлементными датчиками термопарами, угловые поля которых направлены в глубину Земли и на горизонт.

Путем сравнения сигнала от излучения Земли с сигналом с горизонта определяется угол отклонения по двум осям (тангаж и крен) с точностью до  $0,5^\circ$ . Данная величина говорит о том, что в алгоритме обработки информации с ПМБ не использовались поправки для компенсации яркостной неравномерности Земли.

Первоначальные испытания показали, что при длительном нахождении в вакуумных камерах в некоторых датчиках происходит разгерметизация. Это приводит к искажению информации о сигнале с датчиков из-за уменьшения теплообмена внутри его корпуса. Несмотря на то, что были выбраны датчики, которые прошли наземные испытания, в космосе имели место утечки. Поэтому датчики Aerospace Corporation в дальнейшем стали изготавливать в невакуумированном корпусе для обеспечения стабильности их поведения в условиях вакуума.

На спутниках MicroMAS-1 (запущен в 2014 г.) и MicroMAS-2 (2017 г.) система ПМБ состоит из двух ортогонально установленных модулей: один в направлении  $-X$  (противоположном движению спутника) и один в направлении  $+Y$ . Каждый модуль состоит из 4 датчиков горизонта Земли (ДГЗ): один грубый датчик с угловым порядком  $60^\circ$  и 3 точных датчика с угловым  $10^\circ$  каждый [56].

Оси трех точных ДГЗ имеют различные углы наклона и при штатной работе используются как датчики наличия Земли, горизонта и космоса. Этот метод используется для компенсации тепловых вариаций Земли из-за сезонных и погодных факторов. Грубые ДГЗ используются в режиме поиска и для приведения точных ДГЗ в необходимое положение относительно Земли, горизонта и космоса.

Сигналы от датчиков Земли и космоса в спектральном диапазоне 14–16 мкм используются в качестве «горячих» и «холодных» эталонов для нормализации показаний датчика горизонта и обеспечения возможности точного определения границы горизонта. Использование более узкого углового поля для точных датчиков также уменьшает влияние солнечных помех. Благодаря геометрии орбиты, грубый датчик горизонта, обращенный по оси  $+Y$ , не подвержен в штатном режиме влиянию солнечных помех.

Погрешность определения угла отклонения с применением представленного метода составила  $\pm 28,8'$  на основании моделирования при условии, что сигналы датчиков, направления визирования ДГЗ и сведения о положении КА известны с высокой точностью. Погрешность определения угла отклонения квадратично увеличивается от погрешности монтажа ДГЗ, так смещение оси визирования на  $12'$  на обоих модулях приводит к дополнительной погрешности определения угла отклонения в  $18'$ .

Из отечественных разработок статических ПМВ можно отметить прибор НПО «Геофизика» (Рисунок 6).

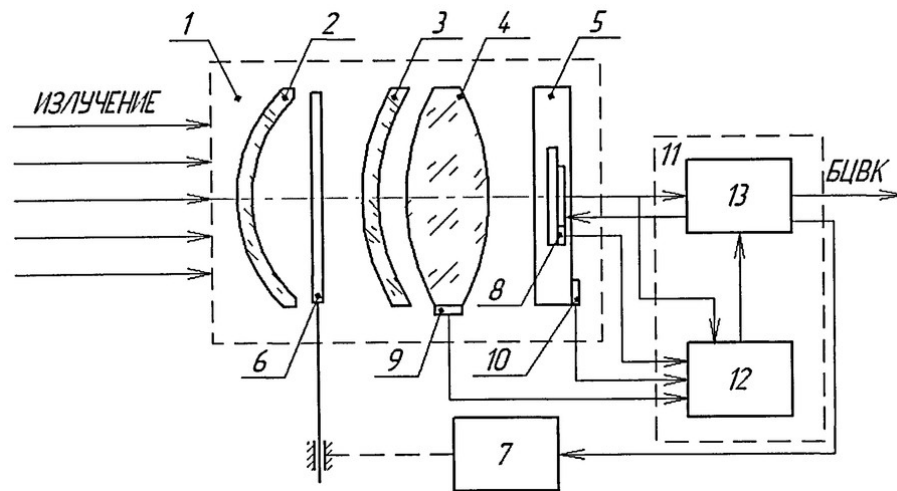


Рисунок 6 – Структурная схема статического ПМВ: :

1 – оптический блок (объектив); 2–4 – оптические элементы;  
 5 – микроболометрическая матрица; 6 – калибровочное устройство видеосигнала;  
 7 – привод; 8 – система термостабилизации; 9–10 – устройство температурной компенсации; 11 – модуль вычислителя; 12 – аналого-цифровой преобразователь;  
 13 – вычислительное устройство [10]

С помощью объектива типа «рыбий глаз» с угловым полем порядка  $180^\circ$  осуществляется построение всего диска Земли на чувствительной поверхности МБМ. Далее через аналого-цифровой преобразователь, сигнал в виде цифрового кода поступает в специализированный вычислитель, в котором осуществляется обработка в соответствии с заданными алгоритмами, в результате которых на выходе блока формируется массив данных о наличии Земли в угловом поле зрения прибора, её угловых координатах и помехах, передаваемый в бортовой цифровой вычислительный комплекс [10].

Влияние неравномерности чувствительности элементов пикселей и мощности фонового излучения от элементов конструкции МБМ и прибора снижается за счет использования термодатчиков 8, 9 и 10. Калибровка осуществляется приводом 7 с помощью управления шторкой 6, установленной на входе прибора.

Данный прибор обеспечивает измерение угловых координат направления на центр Земли в угловом поле  $140 \times 172^\circ$ , обладает погрешностью измерения от  $3,5'$  в диапазоне высот полета КА от 10 000 до 40 000 км и  $5'$  в диапазоне высот от 500 до 10 000 км [8].

В связи с большим угловым полем объектива ( $\sim 180^\circ$ ), которое превышает угловой размер Земли, к недостаткам данного способа следует отнести снижение качества изображения на краях широкоугольного объектива, особенно на низких высотах полета КА, влияние фонового излучения на точность определения угла отклонения, необходимость алгоритмического исключения части участков матрицы из-за попадания элементов конструкции КА. Кроме того, наличие подвижного элемента для проведения периодической калибровки фоновой засветки МБМ усложняет конструкцию и снижает её надежность. В настоящее время существующие ПМВ статического типа укомплектованы зарубежными матричными приемниками.

## **1.2 Спектральные характеристики излучения Земли**

Излучение Земли оставляет резкий контраст с излучением космоса практически во всех областях оптического спектра. Поэтому ОЭП, использующие градиент Земля-космос могут быть построены для УФ, видимого или ИК-излучения.

Выбор спектрального диапазона для визирования излучения Земли существенно влияет на конструкцию ПМВ, его элементы и эксплуатационные характеристики.

Система Земля-атмосфера излучает в космос энергию, эквивалентную поглощенной. Однако для отдельных участков этой системы поглощенная и излученная энергия могут иметь различные значения, так называемые «окна» прозрачности и «полосы» поглощения, которые принадлежат парам воды, углекислому газу озону (Рисунок 7) [3, 5, 19].

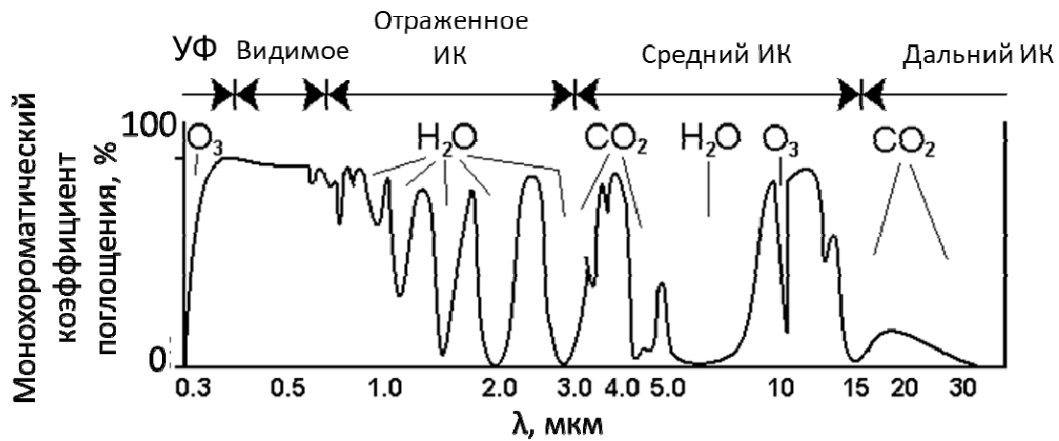


Рисунок 7 – Зависимость монохроматического коэффициента поглощения атмосферы Земли и некоторых ее компонентов от длины волны [19]

### **Ультрафиолетовый (УФ) диапазон излучения Земли**

Известен метод, в котором для определения положения центра Земли по изображению лимба в кадре необходимо выделить точки, которые находятся на с одинаковой яркостью (изофоты) [20].

Яркость участков лимба определяется степенью освещенности Солнцем, и соответственно высота точек для различных частей лимба также будет отличаться при движении КА по орбите. Данный фактор имеет периодический характер и может быть учтен. Дополнительную случайную погрешность определения положения точек вносит быстро меняющаяся по времени величина отражения от облачного слоя и земной поверхности. В связи с этим могут использоваться максимальные значения градиента яркости в радиальном направлении.

В настоящее время не существует ПМВ, работающих в УФ спектре излучения Земли. Это связано, прежде всего, с труднореализуемой схемой данного метода и недостаточным освоением приемников данного спектрального диапазона. На теневой стороне (когда диск планеты виден частично освещенным) эти построители непригодны.

### **Видимый диапазон излучения Земли**

Приборы ориентации по Земле видимого диапазона работают исключительно по освещенной Солнцем наблюдаемой поверхности Земли, что приводит к потере ориентира на различных участках витка вращения КА [5], в

связи с чем преимущество приборов видимого диапазона практически отсутствует.

В настоящее время построение ориентации КА на основе анализа изображения Земли в видимом спектре находит отражение в теоретических исследованиях [21, 22]. Отдельно рассматривается [57] построение приборов ориентации одновременно по Земле и звездам на основе приемников с зарядовой связью в видимой области спектра. Реализация подобного способа ориентации может быть достигнута за счет построения с помощью особой зеркально-линзовой системы на чувствительном слое матрицы в центральной зоне изображения области небесной сферы со звездными скоплениями, в угловых зонах — изображение сегментов Земли. Возможность получения данного изображения ограничена геостационарной орбитой движения КА, и способ не применим для большинства спутников.

На малом КА RAPIS-1 [59] был реализован трехосный способ ориентации по Земле, основанный на детектирование горизонта Земли и распознавании визируемых с помощью широкопольной камеры участков. Однако данный способ требует своевременной тонкой подстройки и калибровки, чтобы обеспечить непосредственно фиксацию поверхности планеты, и чувствителен к наличию в кадре облаков и других атмосферных явлений. При этом погрешность определения угла отклонения составляет единицы градусов [60].

### **ИК диапазон излучения Земли**

ИК излучение Земли и атмосферы изменяется по спектру и зенитному углу в соответствии с распределениями температуры и поглощениями атмосферными газами. Отсюда следует, что ИК ПМВ должен быть чувствительным в спектральном диапазоне, имеющем по возможности наименьшие вариации яркости видимой поверхности.

Вариации излучения при сканировании по диску Земли могут быть рассчитаны исходя из рассмотренных моделей атмосферы, каждая из которых определяет возможное состояние атмосферы для различных широт, сезонов и метеорологических условий.

Интенсивно поглощает ИК радиацию в рассматриваемом интервале длин волн водяной пар. Наиболее сильные полосы поглощения приходятся на длины волн 2,68 и 6,3 мкм (Рисунок 8). Центр поглощения углекислого газа приходится на 4,3 и 15 мкм. Озон имеет несколько полос поглощения, в атмосфере достаточно отчетливо наблюдается узкая, но интенсивная полоса с центром на длине 9,6 мкм [19].

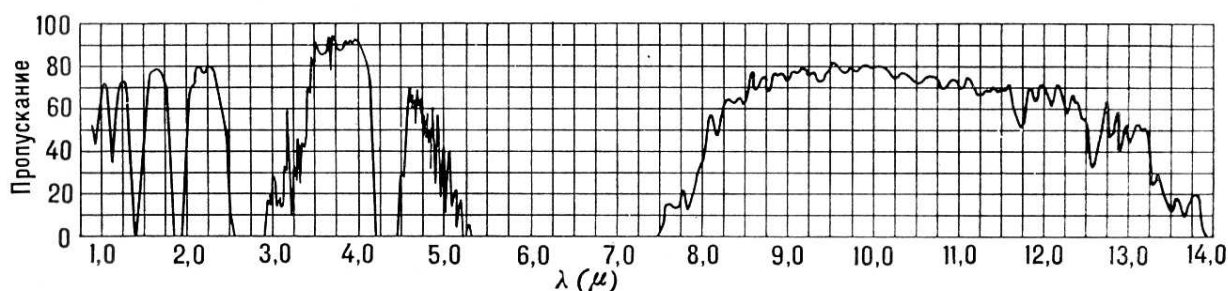


Рисунок 8 – Кривая пропускания атмосферы в области 0,6 — 14 мкм [19]

Участки, где основную долю уходящей радиации составляет излучение нижних слоев и поверхности Земли, называют «окнами прозрачности». Самым важным для энергетического баланса Земли является окно прозрачности в диапазоне 8 — 14 мкм. Средняя энергетическая яркость излучения Земли в данном диапазоне составляет  $3,3 \text{ мВт/см}^2 \text{ ср}$ . Интенсивность излучения изменяется в широких пределах со среднеквадратическим отклонением (СКО) яркости составляет  $0,8 \text{ мВт/см}^2 \text{ ср}$  и закон распределения близок к равномерному. Это объясняется тем, что в данном случае через земную атмосферу наблюдается как земная и водная поверхность на различных широтах, так и разнообразная облачность.

В интервале 14 — 16 мкм неопределенности в регистрации горизонта низки, за счет того, что вариации излучения невелики по сравнению с коротковолновыми участками. Расчеты показывают, что вариации содержания  $\text{CO}_2$  очень слабо отражаются на величине интенсивности излучения в интервале 14 — 16 мкм. Необходимо отметить, что излучение в данном спектральном интервале очень слабо зависят от зенитного угла направления наблюдений.

Однако использование этого спектрального диапазона сопряжено с трудностями приборной реализации. Так как сужение спектрального диапазона

приводит к уменьшению общего количества энергии, поступающей на вход прибора (средняя энергетическая яркость излучения  $\text{CO}_2$   $0,4 \text{ мВт/см}^2 \text{ ср}$ ), для ИК ПМВ используется интегральное излучения в диапазоне  $7 — 20 \text{ мкм}$ . Широкий диапазон характеризуется значительными флуктуациями интенсивности излучения до  $1,38 \text{ мВт/см}^2 \text{ ср}$ , но и высокой энергетической интенсивностью (средняя величина яркости достигает  $6 \text{ мВт/см}^2 \text{ ср}$ ).

На основании проведенного анализа можно сказать, что наиболее информативным и стабильным диапазоном работы ПМВ является ИК область спектра. Данную область также условно можно разбить на три поддиапазона, в соответствии с их энергетическими характеристиками: широкий диапазон ( $6–20 \text{ мкм}$ ), окно пропускания атмосферы ( $8–14 \text{ мкм}$ ) и спектр поглощения  $\text{CO}_2$  ( $14–16 \text{ мкм}$ ). Каждый из поддиапазонов обладает своими преимуществами и работа прибора в них будет отдельно рассмотрена в Главе 2 с точки зрения технической реализации и компенсации методических погрешностей характерных для ИК ПМВ.

### **1.3 Приемники излучения инфракрасного диапазона в составе строителей местной вертикали**

В качестве приемников ИК излучения в существующих ПМВ с секущим сканированием используются отечественные пироприемники типа МГ-32 или ФПУ-74 [23]. В таблице 1 сравнительных характеристик приемников излучения представлены параметры пироприемника ФПУ-74.

Данные одноэлементные приемники [24] показали надежное функционирование в составе многих поколений ИК ПМВ, однако их ключевыми недостатками является необходимость модуляции падающего излучения для его регистрации и невозможность селекции помеховых сигналов.

Термопарные датчики являются одноэлементными приемниками ИК излучения, но в отличие от пироэлектрических не требуют модуляции [62]. Датчики генерируют низкое термоэлектрическое напряжение, пропорциональное

регистрируемому ИК излучению. Данный тип приемников излучения сопоставим по характеристикам с пироэлектрическими. В настоящее время данный класс датчиков представлен исключительно зарубежными разработками.

Таблица 1 – Характеристики инфракрасных приемников излучения

| Характеристики приемника излучения                                | Пироэлектрический датчик ФПУ-74, НЗПП «Восток» [23] | Термопарный датчик Heinmann HMS Z11 [63] | Термопарная матрица Heinmann НТРА 80×64 [63] | Микро болометрическая матрица Астрон [26] |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Спектральный диапазон, мкм                                        | 6–20                                                | 5–14                                     | 8–14                                         | 8–14                                      |
| Формат матрицы                                                    | 1x1                                                 | 1x1                                      | 80x64                                        | 640 × 480                                 |
| Шаг ячеек, мм                                                     | 1                                                   | 0,6                                      | $110 \cdot 10^{-3}$                          | $17 \cdot 10^{-3}$                        |
| Минимальная разрешаемая разность температур NETD, мК              | 70                                                  | 70                                       | 50                                           | 50                                        |
| Обнаружительная способность $D^*$ , $\text{см}/\text{ВтГц}^{1/2}$ | $3 \cdot 10^8$                                      | $3 \cdot 10^7$                           | $0,8 \cdot 10^8$                             | $5 \cdot 10^8$                            |
| Частота кадров, Гц                                                | 125                                                 | 125                                      | 50                                           | 25                                        |

Наиболее перспективными в отношении полноты и точности получаемой информации о положении ИК горизонта Земли являются матричные многоэлементные приемники излучения, поскольку чувствительность отдельных элементов матрицы не уступает одноэлементным приемникам, при этом не требуется модуляция и организация оптико-механического сканирования. К преимуществам данных приемников необходимо отнести и возможность сохранения в памяти прибора энергетической картины визируемого участка Земли, что позволяет производить ее последующую обработку и осреднение, а также селекцию помех.

Неохлаждаемые матричные приемники излучения находят применения в основном в тепловизорах. По принципу действия их можно разделить на термопарные и многоэлементные фотоприемные устройства на основе МБМ.

Структура термопарной матрицы представляет собой множество полупроводниковых термопар, расположенных на тонкой мембране и имеющих общее характерное строение. Если поглотитель, расположенный на мембране, подвергается воздействию ИК излучения происходит нагрев мембраны, вследствие чего создается напряжение за счет эффекта Зеебека [25].

Наличие ряда пикселей позволяет осуществлять регистрацию ИК горизонта Земли с более высокой точностью, чем при применении отдельных одноэлементных приемников за счет получения более полной информации о яркостном градиенте «космос-Земля».

Характеристики ИК термопарных матриц представлены в таблице 1 серийным образцом НТРА 80×64 компании Heinmann Sensors [63].

Наибольшим форматом среди неохлаждаемых многоэлементных приемников ИК излучения являются МБМ, выпуск которых активно осваивается электронной промышленностью России [26].

При фокусировке теплового изображения на плоскость матрицы сопротивление микроболометров уменьшается и на каждом из них возникает электрический сигнал, пропорциональный энергетической яркости излучения в данной точке. На подложке под болометром для увеличения поглощения ИК-излучения наносится зеркало, зазор между ним и болометром составляет четверть длины волны середины рабочего спектрального диапазона. В качестве терморезистивного материала в неохлаждаемых МБМ преимущественно используются оксиды ванадия и аморфный кремний [27].

#### **1.4 Режимы работы построителей местной вертикали в системе ориентации космического аппарата**

Основными режимами ориентации КА являются: успокоение, поиск ориентиров, переходы из одной базовой системы координат в другую и обратно, стабилизация, повороты на заданные углы, угловые маневры [28].

Первый этап построения ориентации, который называется успокоением, направлен на гашение угловой скорости вращения КА при отстыковке аппарата от ракетоносителя после вывода на орбиту.

На втором этапе происходит последовательное нахождение Солнца для обеспечения питания аппарата и начала построения базовой системы координат. Поскольку угловое поле ОЭП ориентации ограничено, а сами они установлены неподвижно на корпусе КА, последующий поиск Земли осуществляется путем поворота всего аппарата. Вращение прекращается, когда нужный ориентир попадает в угловое поле прибора.

Скорость вращения аппарата должна быть согласована с частотой опроса матрицы приемника ПМВ, чтобы избежать пропуска сигнала от ориентира. Значения поисковой скорости вращения составляют порядка  $0,25^\circ/\text{с}$  для больших КА и  $2^\circ/\text{с}$  для малых КА. Вращение продолжается до появления сигнала наличия Земли. После чего скорость вращения может быть снижена для более стабильного наведения на ориентир в определенном ПМВ направлении со скоростью  $0,1^\circ/\text{с}$  для больших КА и  $0,8^\circ/\text{с}$  для малых [29].

Третий этап завершается построением базовой системы координат КА и переходом к режиму стабилизации (поддержанию заданной ориентации).

Для каждого выделенного режима работы необходимо определить цели, возможности их практической реализации с использованием оптико-механических, электронных или программных средств, а также разработать методы обработки сигналов.

Для ПМВ зона наблюдения при измерении определяется угловым полем объектива (Рисунок 9). Поскольку для точного определения угла отклонения от местной вертикали требуется наличие Земли в зоне близкой к оптической оси, при ПМВ разделяют на два основных режима — **режим поиска** и **режим измерения**.

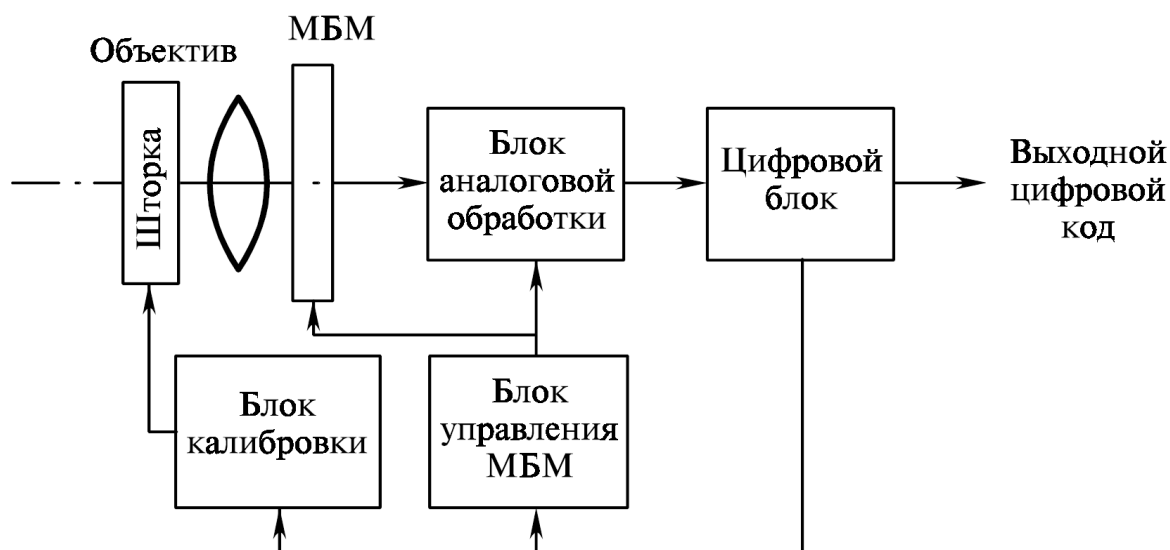


Рисунок 9 – Функциональная схема прибора ориентации по Земле [3]

Поскольку параметры отдельных элементов (пикселей) матрицы приемника неоднородны, а также потому, что матрицы чувствительны к нагреву со стороны конструктивных элементов, при обработке информации могут возникать искажения сигнала, ведущие к возрастанию погрешности ПМВ. С целью учета и компенсации факторов, связанных с дискретностью структуры приемника, проводится процедура **калибровки**.

Для этой цели в ряде конструкций модуля приемника предусмотрены подвижный механический затвор. В рамках калибровки производится съемка при закрытом затворе («темновой кадр»), результаты которой сохраняются в оперативное запоминающее устройство. Далее определяются координаты дефектных пикселей, сигнал которых отклоняются от нормы, которые записываются в специальный массив. В последующих режимах работы прибора сигналы этих пикселей алгоритмически исключаются из обработки.

Поскольку частое применение калибровочных затворов в составе ПМВ ведет к снижению его надежности, актуальной задачей является калибровка матрицы по однородному фону в наземных условиях. Данная процедура включает определение функции передачи для каждого пикселя и занесение в память вычислителя калибровочного коэффициента. Для этой цели могут быть применены методы калибровки на основе изменения температуры наблюдаемой сцены, например, с помощью чёрного тела [30].

В цифровом блоке выполняются основные функции по обработке сигналов и выделению из них полезной информации [3]:

- поиск и обнаружение сигнала Земли;
- **селекция** на фоне помех (Солнца, Луны и др.);
- измерение угловых координат центра Земли;
- парирование различных сбойных ситуаций, вызванных запредельными и нештатными ситуациями;
- вспомогательные функции (телеметрирование данных, диагностика, технологические режимы).

Возвращаясь к рассмотренным режимам КА следует отметить специфические условия эксплуатации низкоорбитальных (порядка 200 км) высокодинамичных [31, 37, 38] КА - повороты на заданные углы и угловые маневры, обеспечивающих высокоточную и качественную съемку Земли, которые налагают дополнительные требования на ПМВ.

Наиболее точные приборы системы ориентации КА – звездные датчики определяют ориентацию с погрешностью порядка 3–4", что значительно превосходит точность ПМВ. Такие датчики выдают информацию об ориентации не чаще 1 раза в секунду. Однако, функционирование звездного датчика нарушается, если скорость вращения КА превышает несколько градусов в секунду. Кроме того, желательно, чтобы звездный датчик был как можно менее подвержен солнечной засветке [32].

Следовательно, для обеспечения ориентации подобных КА является целесообразным использование ПМВ, обладающего большим угловым полем для работы на низких высотах и сохранения наличия Земли при разворотах КА.

### Выводы по Главе 1

В результате анализа принципов построения местной вертикали и схемотехнических решений существующих ОЭП ориентации КА по Земле установлено:

- 1) Использование излучения ИК области спектра в ПМВ обеспечивает работу вне зависимости от освещенности Земного диска Солнцем, позволяет описать и промоделировать энергетические характеристики для нескольких однородных диапазонов. При этом, поскольку интенсивность излучения изменяется в зависимости от широты визируемого участка Земли, сезона и погодных явлений необходим расчет и методика компенсации погрешностей характерных для ИК ПМВ.
- 2) Преимуществом использования МБМ в качестве приемника ПМВ может стать повышение помехозащищенности за счет проведения пространственной селекции помеховых источников – Солнца, Луны, элементов конструкции аппарата, а также повышение точности за счет осреднения информации с участков горизонта Земли по формату матрицы.
- 3) Существующие приборы с оптико-механическим сканированием характеризуются величиной предельной погрешность определения угла отклонения от местной вертикали порядка  $8'$ , ПМВ статического типа на основе фотоматрицы –  $5'$ .
- 4) Существующие разработки ПМВ в современной отечественной космической промышленности имеют следующие недостатки:
  - наличие подвижного элемента калибровочного затвора усложняет конструкцию и снижает её надежность;
  - широкопольные объективы подвержены значительному влиянию фонового излучения на точность определения угла отклонения, необходимость алгоритмического исключения части участков матрицы из-за попадания элементов конструкции КА;
  - отечественные приборы данного типа укомплектованы зарубежными приемниками излучения.
- 5) Методы расчета и проектирования приборов статического типа на основе многоэлементных фотоматриц, обеспечивающих требуемые в настоящее время точностные характеристики ориентации КА, не представлены в известной литературе.

Учитывая вышеизложенное, а также потребность в использовании данного вида устройств для КА с различными требованиями, в первую очередь – разной рабочей высотой полета, целесообразным представляется разработка методики расчета и проектирования приборов ориентации по Земле на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИБОРА ОРИЕНТАЦИИ ПО ЗЕМЛЕ НА БАЗЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ ФОТОМАТРИЦ

### 2.1 Введение в создание методики расчета и проектирования

Разработанная методика расчета и проектирования ПМВ служит достижению основной цели – обеспечения заданной точности построения местной вертикали. Реализация данной цели предполагает последовательное решение задач, представленных на рисунке 10.



Рисунок 10 – Этапы методики проектирования ПМВ

**Решение задачи анализа требований к ПМВ** основывается на выявлении частных требований к характеристикам КА и формировании взаимосвязей с требованиями к характеристикам ПМВ, входящего в систему ориентации. В результате решения этой задачи определяются требуемые характеристики ОС ПМВ и погрешности измерения угла отклонения от местной вертикали.

**Решение задачи выбора конфигурации ОС ПМВ** заключается в обоснованном выборе оптических компонентов и приемника излучения для

обеспечения требований, установленных на этапе анализа требований к характеристикам прибора.

**Решение задачи разработки алгоритма обработки информации** базируется на разработанных способах построения местной вертикали для предложенных конфигураций прибора [33]. На основе разработанного алгоритма создается ПО, выполняющее обработку информации с приемника излучения.

**Решение задачи точностного расчета ПМВ** достигается определением пределов погрешности измерений прибора, с целью подтвердить соответствие представленным ранее требованиям к ПМВ [34].

**Разработка алгоритма компенсации систематической методической погрешности**, базируется на разработанной модели геометрических и энергетических характеристик Земли, а также разработанном способе компенсации на основе анализа Фурье выходных сигналов ПМВ [16].

**Решение задачи эмпирической проверки адекватности созданной методики** включает расчет и проектирование макетного образца, предварительный расчет точности, разработку алгоритма и ПО определения угла отклонения от местной вертикали и проведение лабораторных испытаний.

## **2.2 Этап 1. Анализ требований к строителям местной вертикали**

При рассмотрении требований, предъявляемым к ПМВ системой ориентации КА, можно выделить следующие основные группы [1, 2, 28]:

- 1) Требования к погрешности ориентации;
- 2) Требования к скорости построения ориентации, к функционированию на заданном диапазоне высоте и типах орбит КА, а также при осуществлении поворотов и маневрах;
- 3) Требования к размещению на корпусе КА, надежности, сроку службы, энергопотреблению, габаритам и массе.

Первая группа относится к функциональным требованиям и определяется в первую очередь необходимой точностью ориентации для эксплуатации целевой нагрузки КА.

Рассмотренные в разд. 1.1 принципы построения местной вертикали обеспечивают ориентацию КА по двум осям – крена и тангажа. Ориентация осей КА по третьей оси – рысканью, на практике обеспечивается другими датчиками.

Основным ограничением для достижения при помощи ПМВ, работающих по ИК излучению Земли, величин погрешности определения угла отклонения КА от направления на центр Земли порядка нескольких угловых секунд [32], сопоставимых с другими ОЭП – звездными датчиками является значительная составляющая методической погрешности, связанная с неоднородностью излучения ориентира. При этом неоднородность излучения Земли оказывает большее влияние, чем ниже расположена орбита КА за счет возрастания числа визируемых ПМВ участков со случайными вариациями неоднородности излучения, связанных с погодными явлениями, визируемых ПМВ.

На основании вышесказанного, для обеспечения первой группы требований необходима разработка алгоритма компенсации методической погрешности. Подтверждение эффективности разработанного алгоритма возможно обеспечить с помощью создания модели излучения Земли.

В рамках исследования требования данной (первой) группы при выполнении расчетов определяются предельной погрешностью ПМВ, заявленной для существующих ПМВ [3] в соответствии с высотой полета КА.

Вторая группа требований определяется назначением и возможностями КА.

Ключевым параметром, определяющим соответствие заданным требованиям второй группы, являются величины поля обзора и углового поля ПМВ. Угловой размер Земли, как ориентира, зависит от высоты полета КА и варьируется в широком диапазоне от  $153^\circ$  для низких орбит (250 км), до  $16^\circ$  для геостационарных (40 000 км) (Рисунок 11).

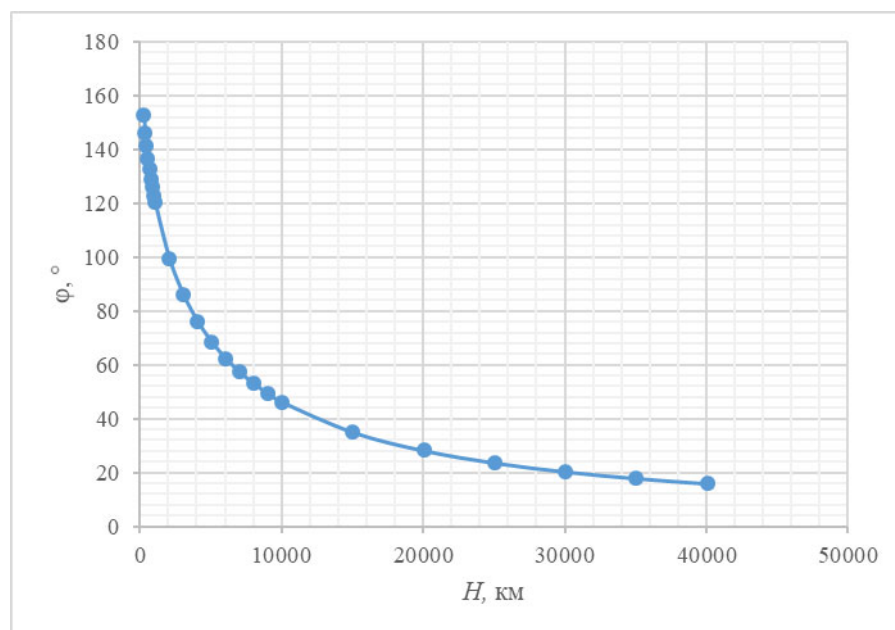


Рисунок 11 – Зависимость величины углового размера Земли  $2\varphi$  от высоты орбиты

С возрастанием высоты орбиты КА влияние погрешностей за счет вариаций энергетической яркости Земли снижается, упрощается реализация ОС ПМВ за счет снижения величины углового размера объекта.

Для энергетической привязки изображения обычно используют как нулевой уровень величину сигнала от фона-космоса, который также занимает определенную зону в угловом поле прибора. Необходимость осуществления КА поворотов и маневров, также требует расширения поля обзора или применения комплекса нескольких ПМВ. Высокая скорость построения ориентации обеспечивается скоростью поиска ориентира, что также взаимосвязано с углом визирования горизонта, постоянной времени электронного тракта и параметрами ПО.

Поскольку именно для построения ориентации на низких орбитах Земли требуется обеспечение широкого поля обзора и компенсации методической погрешности ПМВ, в качестве исходных данных для дальнейших исследований рассматриваются характеристики, аналогичные для существующих КА, представленные в Таблица 2.

Таблица 2 – Основные технические характеристики низкоорбитальных КА

| Характеристики         | КА<br>«Аист-2Д»<br>[2] | КА<br>«Канопус-В» №1<br>[35] | КА<br>«Ионосфера»<br>[36] | КА<br>«Метеор-М» №2<br>[1] |
|------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Высота орбиты, км      | 490                    | 510±10                       | 820                       | 825                        |
| Точность ориентации, ' | 10                     | 5                            | 6                         | 10                         |
| Угол разворота, °      | -                      | ±40                          | -                         | -                          |

В рамках диссертационного исследования принято решение о разработке ПМВ в соответствии с требованиями, предъявляемыми КА с орбитой на высотах (800±50 км), с целью обеспечения погрешности ориентации не более 10' **(Ошибка! Неверная ссылка закладки.)**.

Таблица 3 – Основные требования к ПМВ при разработке методики расчета и проектирования

| Требования к ПМВ |                                |             | Параметры прибора              |
|------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|
| 1                | Точность ориентации, '         | не более 10 | предельная погрешность ПМВ     |
| 2                | диапазон высот полета КА, км   | 800±50      | угол визирования, угловое поле |
|                  | скорости построения ориентации | -           |                                |
| 3                | Размещению на корпусе КА       | -           |                                |

Третья группа требований относится к конструктивным требованиям и требованиям надежности.

Соответствие требованиям данной группы обеспечивается оптимальным выбором конфигурации ПМВ и конструктивными решениями при проектировании.

В рамках диссертационного исследования соответствие требованиям данной группы будет обеспечиваться расположением ПМВ на корпусе КА и выбором конфигурации ОС ПМВ. Требования к надежности, сроку службы, энергопотреблению и габаритным размерам не рассматриваются.

## 2.3 Этап 2. Выбор конфигурации оптической системы построителя местной вертикали

При создании методики расчета и проектирования ПМВ были проанализированы различные варианты конфигурации ОС построителей местной вертикали (см. разд. 1.1 и 1.3).

При проектировании статических ПМВ можно выделить два основных подхода к разработке конфигурации ОС: использование **широкопольных объективов** и использование **ортогональных узкопольных оптических каналов**. Выбор подхода в существующих ПМВ определяется применяемыми в составе прибора приемниками излучения.

В первом случае большое ( $\sim 180^\circ$ ) угловое поле позволяет регистрировать угловое направление на центр Земли путем определения на чувствительном слое МБМ координат положения центра изображения диска Земли. При этом обеспечивается работа в широком диапазоне различных высотах КА и при осуществлении программных разворотов КА. Оптические системы ПМВ данной конфигурации рассматриваются в разд. 2.4.

Во втором случае поле обзора формируется четырьмя ортогональными оптическими каналами, направленными на горизонт диска Земли. Угловое отклонение от направления на местную вертикаль Земли определяется положением границы космос-Земля относительно центра поля обзора. Использование отдельных угловых полей обеспечивает упрощенное расположение ПМВ на корпусе КА. Оптические системы ПМВ данной конфигурации рассматриваются в разд. 2.3.

В рамках данного исследования по результатам анализа приемников излучения ИК диапазона (см. разд. 1.3) для выполнения конкретных расчетов принято решение использовать МБМ в качестве приемника излучения ПМВ, как устройство, обеспечивающее высокую энергетическую чувствительность и обладающее наибольшим форматом матрицы элементов наименьшего размера, что позволяет определять с меньшей погрешностью положение границ горизонта

или энергетического центра Земли, без учета величины разрешения объектива ОС. Характеристики матрицы приведены в Таблица 4.

Таблица 4 – Параметры микроболометрической матрицы [26]

|                                              |                                   |
|----------------------------------------------|-----------------------------------|
| Тип и марка детектора                        | Микроболометр на VOx АСТРОН-64017 |
| Калибровка                                   | без шторки                        |
| Разрешение детектора                         | 640 × 480                         |
| Шаг матрицы детектора, мкм                   | 17                                |
| Спектральный диапазон, мкм                   | 8–14                              |
| Полная частота кадров модуля, Гц             | 25                                |
| Мощность, Вт                                 | ~ 1,2                             |
| Температурная чувствительность детектора, мК | 50                                |
| Диапазон рабочих температур, °С              | -40 ... +60                       |

## 2.4 Широкоугольные объективы в структуре строителей местной вертикали

Для данной конфигурации ПМВ необходимо построить на чувствительном слое МБМ изображение диска Земли на фоне космоса, то есть обеспечить круговой обзор пространства.

Величина углового поля ОС  $\omega$  может быть представлена как функция:

$$\omega = f(H, h_a, \Delta\varphi) \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi$  – величина линейной зоны измерений.

С учетом выбранных в разделе 2.2 требований к высоте полета КА,  $H = 800 \pm 50$  км, а также принимая во внимание диапазон высоты слоя атмосферы для в диапазоне  $h_a = 40 \pm 20$  км [5] максимальный радиус видимого диска Земли  $\varphi$  по формуле (1) равен  $64,55^\circ$

Для обеспечения измерения угла отклонения в линейной зоне  $\Delta\varphi$  (от  $\pm 1^\circ$  и более), необходимо расширение углового поля в соответствии с формулой (3):

$$2\omega = 2\varphi + \Delta\varphi \quad (3)$$

Размещение ПМВ с широкоугольным объективом и круговым обзором пространства предметов сопряжено с попаданием в угловое поле элементов конструкции КА (антенн, солнечных батарей и др.). Обеспечить работу прибора в данном случае возможно путем создания алгоритмов оценки влияния, попадающих в угловое поле изделия элементов конструкции КА, на точностные характеристики, и последующего исключения зон МБМ подвергшихся помеховому излучению.

В целях реализации иного преимущества широкоугольной конфигурации ПМВ рассмотренного в разд.2.3, а именно работы в широком диапазоне высот, требование к угловому полю объектива ОС определяется максимальным угловым размером Земли на минимальной высоте орбиты КА. Минимально низкую околоземную орбиту можно принять равной  $H_{min}=250$  км [38]. Используя формулу (1) можно определить радиус видимого диска Земли  $\varphi = 76,25^\circ$ .

Величина углового поля для широкоугольного объектива по формуле (3) при  $\Delta\varphi = \pm 5^\circ$  составит  $2\omega = 162,5^\circ$ .

Дальнейшее увеличение углового поля определяется обеспечением более широкой зоны поиска ориентира.

Круговой, как и панорамный обзор, предусматривает обзор предметов по азимуту в  $360^\circ$ . Обзор может быть сформирован по двум форматам: цилиндрическому и сферическому.

#### **2.4.1 Объектив типа «рыбий глаз»**

Сферический формат предусматривает поле обзора ОС порядка  $180^\circ$ , изображение которого в виде круга формируется широкопольными линзовыми объективами, среди которых наиболее известны объективы типа «рыбий глаз» (fish-eye).

В литературе представлен ряд работ, посвященных разработке ОС для ПМВ на основе объектива типа «рыбий глаз» [8, 39, 40]. Для данного типа объективов характерны следующие недостатки: неустраняемая отрицательная дисторсия,

которую можно корректировать при цифровой пост-обработке с потерями в разрешении на краях; жёсткие допуски на изготовление, сборку и юстировку [41].

Результат данного направления разработки представлен в виде трехлинзового объектива с асферической поверхностью на рисунке 12.

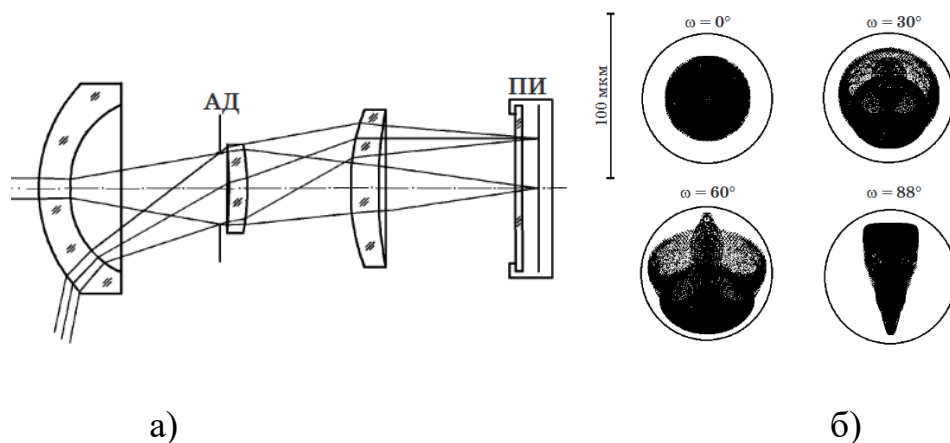


Рисунок 12 – а) Оптическая схема ИК объектива для ПМВ и б) диаграмма пятен рассеяния [39]

Оптические характеристики трехлинзового объектива типа «рыбий глаз» для ПМВ представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Оптические характеристики трехлинзового объектива [42]

| Параметр                                                  | Значение    |
|-----------------------------------------------------------|-------------|
| Фокусное расстояние $f'$ , мм                             | 4.9         |
| Относительное отверстие $2a/f'$                           | 1:2         |
| Угловое поле $2\omega$                                    | $176^\circ$ |
| Спектральный диапазон $\lambda$ , мкм                     | 8–14        |
| Дисторсия (отклонение от зависимости $y' = f'\omega$ ), % | 2           |

Однако, использование данной схемы объектива в целях построения изображения для ПМВ базируется на следующих допущениях [42]:

- наличие дисторсии, требует проведения паспортизации и учета;
- при работе ПМВ на низких орбитах (порядка нескольких сотен километров) имеется сильное размытие изображения края Земли, составляющего угловую величину порядка градуса и более, вызванного собственным излучением атмосферы;

– при отклонении от телецентрического хода лучей на краю поля даже на угол  $15^\circ$ , дефокусировка матрицы на 10–15 мкм в этом случае практически не влияет на точность определения энергетического центра Земли в данных ПМВ.

### 2.4.2 Панорамные зеркально-линзовые объективы

При цилиндрическом формате поле обзора по азимуту составляет  $360^\circ$ , а по вертикали в пределах десятков градусов. Изображение получается в виде кольца, ширина которого зависит от конструкции объектива. Отличительной чертой данных панорамных компонентов является построение мнимого изображения, которое проецируется на матрицу передающими объективами.

Примером таких систем являются объективы кругового обзора с выпуклыми головными зеркальными компонентами с асферическими поверхностями ВФГУП «НПК «Государственный Оптический институт им .С.И. Вавилова» (Рисунок 13) [42]. Для сравнения с ними по техническим характеристикам рассматривался линзовый сверхширокоугольный объектив модель GRIM (Рисунок 13 а) типа «рыбий глаз».

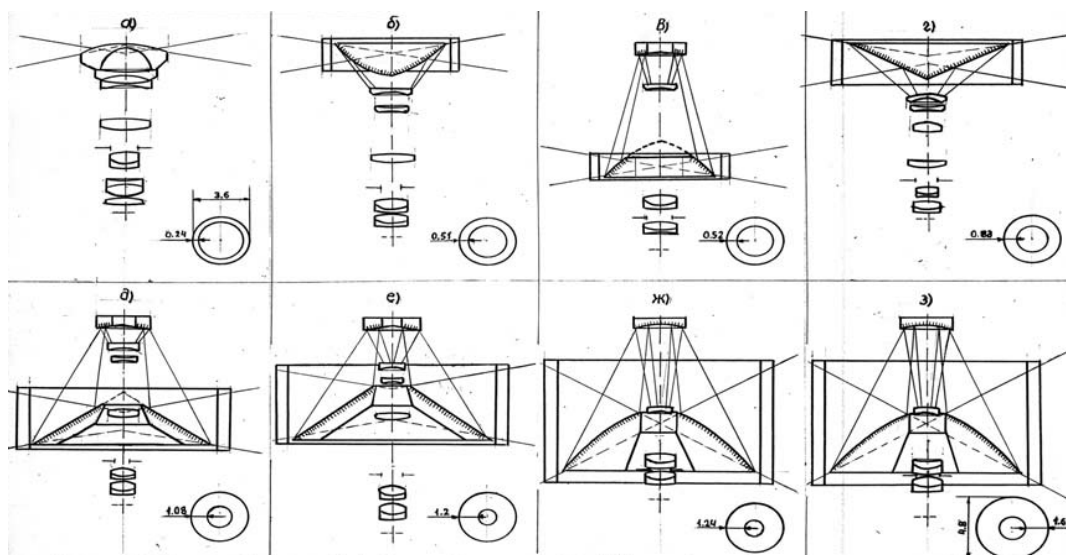


Рисунок 13 – Схемы оптических систем для панорамного обзора и картина кольцевых изображений на матрицах [42]

Визуальное разрешение изображения, тем выше, чем шире кольцевое изображение. По этому критерию ОС с головными насадками, содержащие

конические отражатели (Рисунок 13 г, д, е) или состоящие из зеркального выпуклого гиперboloида на входе и последующего вогнутого зеркального эллипсоида (Рисунок 13 ж, з), позволяют получить лучшее по качеству изображение, чем объективы типа «рыбий глаз».

Однако, представленные ОС имеют существенные недостатки, связанные со значительным сжатием изображения от наружного кольца к внутреннему и изменяющимся по угловому полю. Снизить данные искажения возможно путем применения зеркал с гиперboloидальными поверхностями (Рисунок 13 б, в, ж, з), которые, в свою очередь, определяются высокой сложностью изготовления.

Альтернативой представленным в разд.2.4.1 схемам объективов может стать схема с панорамно-линзовым зеркальным компонентом (ПЗЛК) или панорамной кольцевой линзой (panoram annular lens – PAL). Объектив представляет собой моноконструкцию, ограниченную четырьмя поверхностями: первая поверхность – сферическая преломляющая, вторая и третья поверхности – сферические отражающие, четвертая – плоская преломляющая (рисунок 14). Изображение, создаваемое PAL-объективом, находится внутри стекла, поэтому необходим дополнительный передающий объектив, переносящий физическое изображение в плоскость вне объектива, где можно установить МБМ [45].

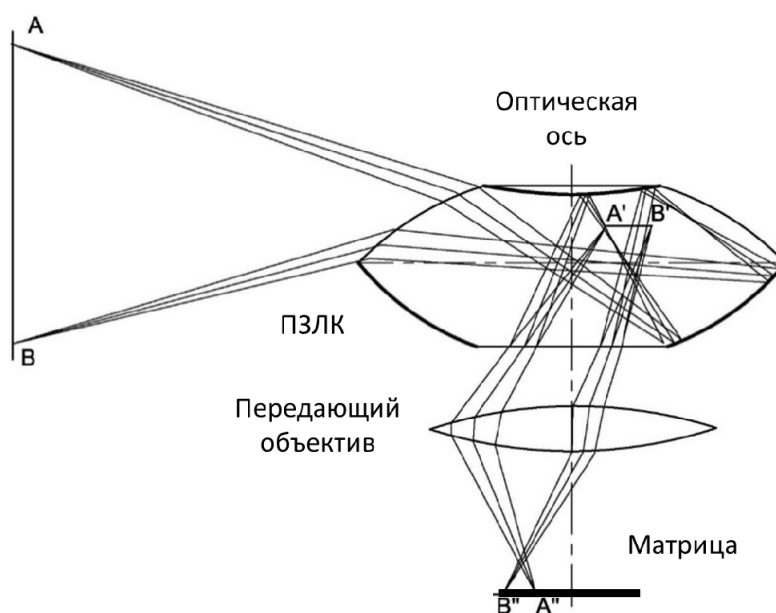


Рисунок 14 – Схема PAL-линзы с передающим объективом [46]

Объектив для прибора ориентации на основе PAL был успешно применен в системе дистанционного зондирования для оптических исследований атмосферы Земли – SEASIS (The SEDS Earth Atmosphere and Space Imaging System), установленной на микро-спутнике SEDSAT-1 [61].

PAL-объективы создают кольцевое изображение, соответствующее цилиндрической проекции пространства (рисунок 15). Ширина кольца соответствует углу  $\alpha$ , слепое пятно – углу  $2\beta$ .

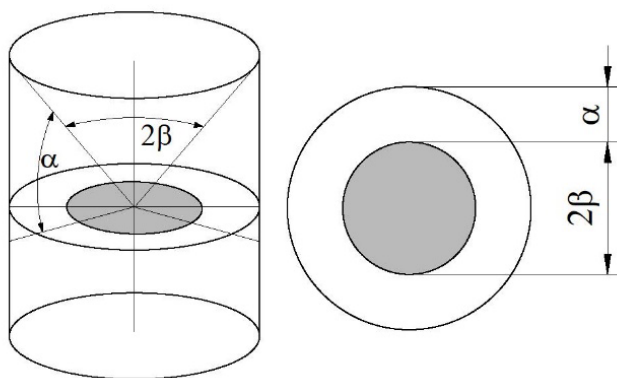


Рисунок 15 – Цилиндрическая проекция пространства [48]

Применение кольцевого панорамного объектива позволяет получать цилиндрическую проекцию всего горизонта Земли (угол по азимуту  $360^\circ$ ) с меньшим коэффициентом анаморфозы и более низкой сложностью изготовления, чем в объективах с коническими и гиперболоидальными зеркалами.

В случае обычной линзы квадратные элементы, имеющие в пространстве предметов соотношение сторон 1:1 преобразуются в изображение, состоящее из сегментов, которые имеют разные пропорции изображения (Рисунок 16 а). В отличие от этого полярного изображения, созданного обычной линзой, PAL отображает ту же равномерную сетку квадратов как элементы с постоянными пропорциями (Рисунок 16 б).

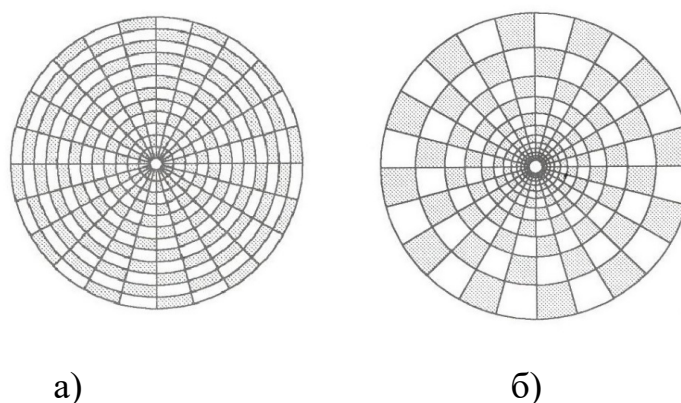


Рисунок 16 – Полярное изображение на матрице МБМ [64]

Площадь полярного сегмента равна произведению радиальной высоты на длину дуги сегмента, а соотношение сторон для сегмента полярного типа задаются их отношением [64].

В [43] представлена схема ОС для КА с высотой полета равной 650 км. Размер углового поля определялся с целью обеспечения построения на матрице приемника участка «космос-Земля» угловой величиной порядка  $10^\circ$ , с запасом для учета aberrаций ОС, а также допуска на точность запуска КА и эллиптичность орбиты [6]. При указанных параметрах и угловой размер Земли составляет  $2\varphi = 130^\circ$ , следовательно, величина углового поля объектива должна составить  $2\omega = 140^\circ$ , а  $2\beta = 120^\circ$ .

Для проведения расчетов в качестве приемника излучения была принята МБМ, разработанная в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова со следующими характеристиками [27]:

- область спектральной чувствительности 8–14 мкм;
- формат 320 x 240;
- шаг элементов матрицы приемников  $x = 51$  мкм;
- температурное разрешение  $\Delta\tau_{NETD} = 0,1$  К.

Расчетная точность ПМВ при использовании предлагаемого технического решения характеризуется предельной погрешностью не более  $5,7'$  в диапазоне углов рассогласования  $\pm 3^\circ$  при высоте полета КА до 1000 км, что сопоставимо с ПМВ секущего типа с оптико-механическим сканированием [43].

Для ИК диапазона была предложена [46] новая конструкция компонента, в которой уменьшены радиусы кривизны и увеличена толщина линзы по краю (рисунок 17), с целью улучшения равномерности освещённости по полю и уменьшения расхожимость излучения после компонента. Аберрации PAL компонента компенсируются при разработке передающей ОС.

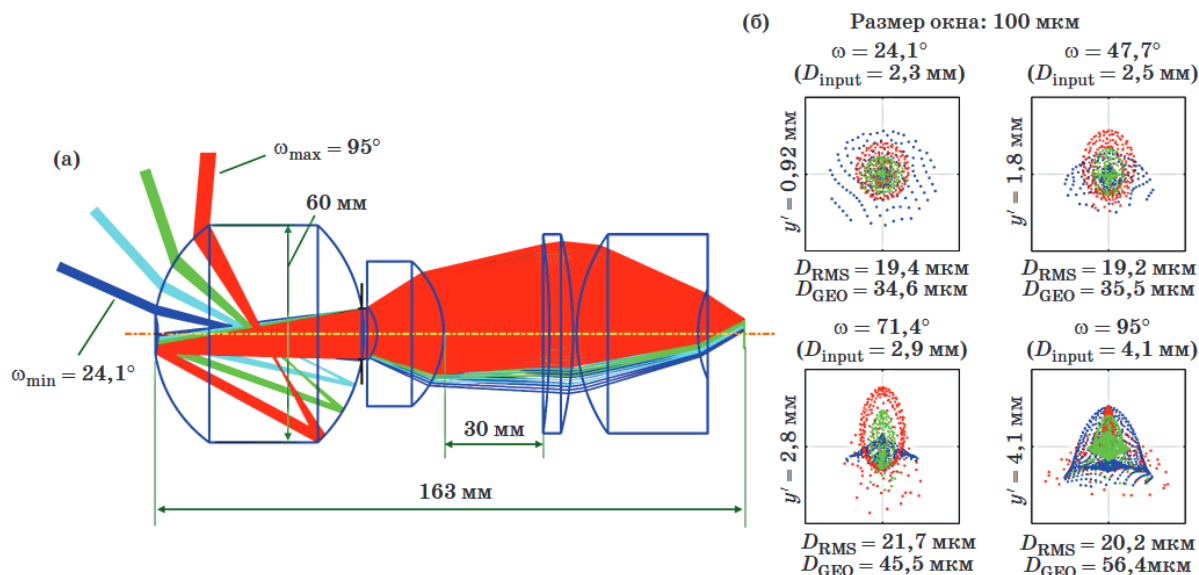


Рисунок 17 – Схема панорамной оптической системы на основе PAL для среднего ИК диапазона: а) трассировка лучей, б) кружки рассеяния [46].

Параметры объектива представлены в таблице 6. Данная схема может быть взята за основу при разработке ИК ПМВ.

Таблица 6 – Параметры панорамной ОС [46]

| $D_{\text{comp}}, \text{мм}$ | $\lambda_1\text{--}\lambda_2$ | $\omega, ^\circ$ |     | $f', \text{мм}$ | $2y', \text{мм}$ |     | $D_{\text{input}}: f'$ |        | $D_{\text{RMS}}, \text{мкм}$ |     | $D_{\text{RMS(norm)}}, \text{мкм}$ |     |
|------------------------------|-------------------------------|------------------|-----|-----------------|------------------|-----|------------------------|--------|------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
|                              |                               | min              | max |                 | min              | max | min                    | max    | min                          | max | min                                | max |
| 60                           | 8–14 мкм                      | 24,2             | 95  | –2,17           | 1,8              | 8,2 | 1:0,94                 | 1:0,53 | 19                           | 22  | 23                                 | 27  |

В соответствии с этапом 2 методики расчета и проектирования примем конфигурацию широкоугольного объектива на основе PAL, которая определит следующие параметры ПМВ (Таблица 7) для проведения точностного расчета.

Таблица 7 – Параметры ПМВ с панорамным объективом

| Параметр                                       | Значение |
|------------------------------------------------|----------|
| Угловое поле объектива $2\omega$ , °           | 190      |
| Угловой размер элемента приемника $\theta$ , ' | 24       |
| Рабочая высота полета $H$ , км                 | 250–2000 |
| Размер кружка рассеяния $r_{rms}$ , мкм        | 22       |

## 2.5 Выбор и расчет оптической схемы инфракрасных объективов с ортогональными оптическими каналами для построителей местной вертикали

В разд. 1.1 были рассмотрены схемы существующих ПМВ, поле обзора которых сформировано несколькими оптическими каналами, направленными на горизонт диска Земли. Однако, в известной литературе применение МБМ в составе данных приборов распространения не получило.

В [18] была описана конструкция однокоординатного датчика вертикальной плоскости, в котором ИК излучение двух противоположных участков горизонта Земли направляется двугранной зеркальной призмой на линзовый объектив, фокусирующий его на чувствительной поверхности матрицы.

Расчетная точность ПМВ при использовании предлагаемых технических решений характеризуется предельной погрешностью не более  $6'$  в диапазоне углов рассогласования  $\pm 2^\circ$ .

Применение данной конфигурации ПМВ обеспечивает следующие преимущества:

- Использование отдельных угловых полей упрощает расположение ПМВ на корпусе КА;
- Малые величины (до  $10^\circ$ ) угловых полей оптических каналов позволяют применять простые однокомпонентные объективы;
- Построение изображения на одном приемнике излучения обеспечивает единую чувствительность элементов для всех оптических каналов;

- Использование зеркальных объективов обеспечивает большее пропускание энергии, чем многолинзовые германиевые объективы;
- Использование зеркальных объективов, позволяет проводить юстировку ОС в видимой области спектра.

К недостаткам подобных систем можно отнести:

- Различие оптических характеристик (коэффициент пропускания, разрешающая способность) отдельных каналов;
- Малый диапазон рабочих высот прибора и зона поиска ориентира.

Для реализации ПМВ разработана ОС [48], содержащая 4 внеосевые параболы (на рисунке 18 показаны только 2 параболы из 4-х). Для повышения помехоустойчивости прибора лучи, не попадающие на матрицу, экранируются двумя экранами: внешним и внутренним.

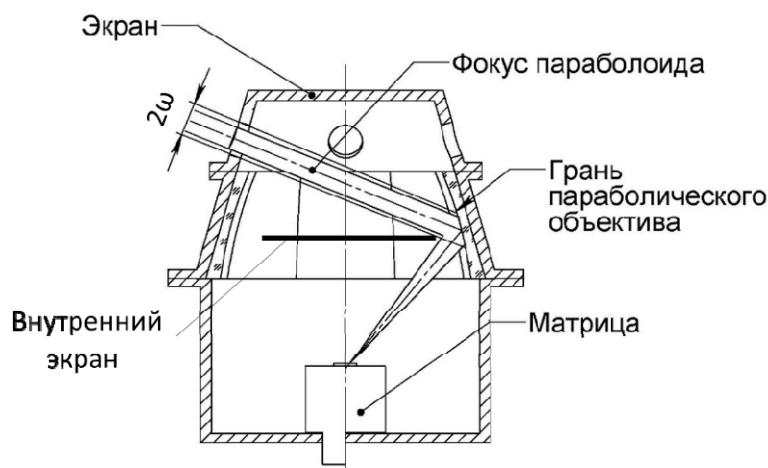


Рисунок 18 – Конструкция ПМВ с четырьмя ортогональными оптическими каналами

ИК излучение от участков горизонта проходит через точку фокуса объектива и фокусируется на чувствительной площадке матрицы. Экраны, установленные перед объективом и перед матрицей, защищают матрицу от прямого излучения Земли и ограничивают поле обзора прибора у горизонта углом  $2\omega = \pm 3^\circ$ .

Параболический объектив «выворачивает» изображение диска Земли на чувствительной площадке, т.е. в центре находится космос, а горизонт и Земля – у краев чувствительной площадки. Поэтому для определения угла отклонения

целесообразно измерять расстояние (число пикселей) от центра площадки до изображения горизонта, либо произвести алгоритмическую инверсию уровня сигнала.

Изображение горизонта показано на рисунке 19 а) для параболического объектива с фокальным параметром 80 мм при отсутствии отклонения оси прибора от вертикали. На рисунке 19 б) показано изображение ИК горизонта, сформированное 4-мя гранями объектива при отклонении на  $2^\circ$  по оси  $Y$  (крена). При этом отклонение по оси  $X$  (ось тангажа) равно нулю.

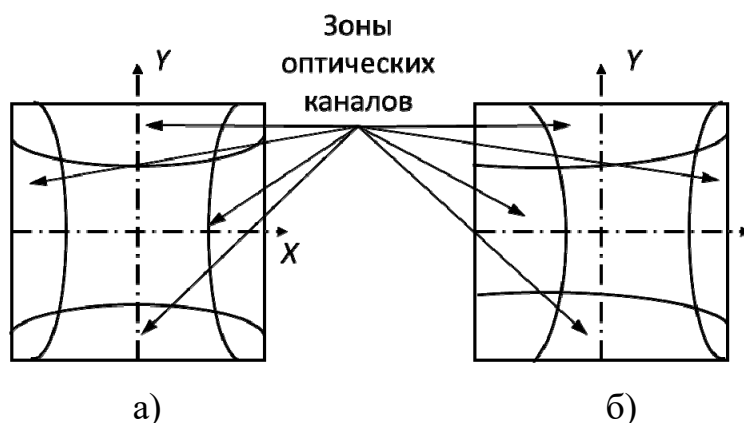


Рисунок 19 – Изображение горизонта на чувствительной площадке

Подбирая конструктивные параметры объектива: фокальный параметр параболического зеркала, угол наклона оси параболы к оси прибора, смещение оси параболоида от фокуса объектива и смещение всего параболоида относительно оси прибора, можно обеспечить оптимальное расположение изображения ИК горизонта на площадке матрицы.

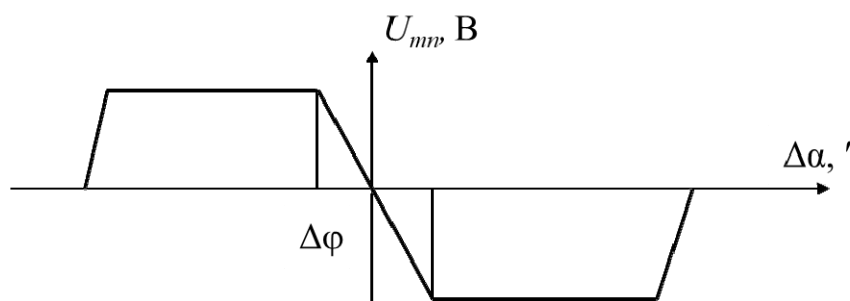


Рисунок 20 – Характеристика преобразования прибора

В результате характеристика преобразования прибора имеет вид, показанный на рисунке 20; максимальный уровень и знак сигнала  $U_{mn}$  по строке  $m$

или столбцу  $n$  сохраняется в пределах линейной зоны до углов отклонения  $\Delta\varphi$ , пока одно поле засвечено Землей, а второе – космосом.

Луч (вектор  $A$ ) от ИК горизонта Земли (рисунок 21) направляется на поверхность грани объектива, в качестве которой используется сегмент параболоида вращения, полученный по формуле (4)

$$X^2 + Y^2 = 2p \cdot Z \quad (4)$$

Вектор проходит через точку фокуса параболоида  $F$ , отражается от поверхности с нормалью  $N$  и направляется параллельно оси параболоида. Грань располагается так, чтобы вектор  $P$  составлял угол  $\varphi$  (угол визирования горизонта) с осью прибора  $Z'$ , которая проходит через фокус параболоида под углом  $\beta$  к его оси. Чувствительный элемент располагается на фокальной плоскости в точке пересечения отраженного луча с осью прибора.

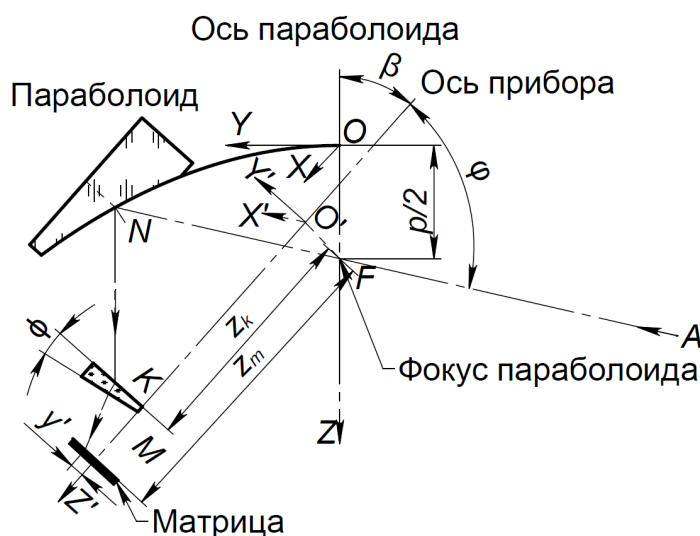


Рисунок 21 – Схема хода луча в объективе с параболлическим зеркалом

Недостатком описываемой схемы является то, что пучок лучей, отражающийся от поверхности параболоида параллельно его оси, падает на поверхность матрицы под углом  $\beta$ ; поэтому будучи сфокусирован для одного угла визирования  $\varphi$ , для других углов теряет фокусировку; величина кружка рассеяния достигает  $1^\circ$ . Для исключения этого недостатка в ОС введен дополнительный германиевый клин с углом при вершине  $\varphi$ . Передняя грань клина перпендикулярна оси прибора, а задняя – перпендикулярна главному лучу пучка, преломленному передней гранью. Матрица установлена в фокальной плоскости главного пучка.

Для определенной высоты полета (угла визирования горизонта  $\varphi$ ) можно подобрать угол  $\beta$  наклона оси параболоида к оси прибора и задний фокальный отрезок  $M$  такие, чтобы изображение горизонта фокусировалось на середине соответствующего сектора матрицы, что обеспечивает максимальную величину линейного участка выходной характеристики.

Расчет производился на основе выбора фокального параметра  $p$ , угла  $\beta$  наклона оси параболоида к оси прибора и величины заднего отрезка  $M$  (расстояние от фокуса параболоида до поверхности матрицы) для требований к высоте полета и размеру приемника, заданных в разделе 2.3.

Результаты расчета позволяют сделать вывод, что изменение фокального параметра  $p$  параболического объектива изменяет крутизну  $K$  характеристики преобразования, т.е. величину смещения изображения горизонта (в миллиметрах или в числе пикселей матрицы) при отклонении оси прибора на градус, и линейную зону характеристики преобразования  $\Delta\varphi$ , в пределах которой перемещение изображения горизонта линейно зависит от угла отклонения оси прибора от вертикали.

Параметры объектива, полученные в результате расчета: линейная зона  $\Delta\varphi$ , азимутальный угол  $\gamma_{max}$ , определяющий азимутальное поле обзора одного из параболоидов, крутизна  $K$  характеристики преобразования в пределах линейной зоны приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры параболических объективов

| $p$ , мм | $\Delta\varphi$ , ° | $\gamma_{max}$ , ° | $K$ , мм/° |
|----------|---------------------|--------------------|------------|
| 80       | $\pm 1,75$          | $\pm 5$            | 1,43       |
| 60       | $\pm 2,29$          | $\pm 6$            | 1,09       |
| 40       | $\pm 3,5$           | $\pm 8$            | 0,705      |

В таблице 9 приведены положения центра пучка  $\Delta Y_0$  и среднеквадратической погрешности измерения углов отклонения  $\sigma_y$  для нескольких конструкций прибора и углов отклонения (величина СКО  $\sigma_x$  по оси  $X$ , расположенной вдоль горизонта, не влияет на погрешность определения угла  $\Delta\alpha$ ).

Таблица 9 – Результаты расчета углов отклонения от вертикали для разных параметров параболоида

| Параметр параболоида $p$ , мм | Угол отклонения $\Delta\alpha$ , ° | Смещение центра пучка, $\Delta Y_0$ , мм | СКО центра пучка $\sigma_y$ , мм | СКО определения угла отклонения $\sigma_{\alpha}'$ |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------|
| 80                            | 1                                  | 1,415                                    | 0,18                             | 7,6                                                |
|                               | 2                                  | 2,83                                     | 0,19                             | 8,1                                                |
| 60                            | 1                                  | 1,1                                      | 0,16                             | 3,3                                                |
|                               | 2                                  | 2,2                                      | 0,2                              | 3,9                                                |
|                               | 3                                  | 3,3                                      | 0,24                             | 5                                                  |
| 40                            | 1                                  | 0,7                                      | 0,136                            | 11,7                                               |
|                               | 2                                  | 1,4                                      | 0,145                            | 12                                                 |
|                               | 3                                  | 2,1                                      | 0,152                            | 13                                                 |
|                               | 4                                  | 2,8                                      | 0,163                            | 14                                                 |

Из результатов расчетов углов отклонения с тремя вариантами приборов можно сделать вывод:

- Величина зоны линейности наибольшая для прибора с параболоидом с  $p = 40$  мм и равна  $\pm 4^\circ$ .
- Угловая величина СКО измеряемых углов отклонения наименьшая для прибора с параболоидом с  $p = 60$  мм, что обеспечивает наилучшую инструментальную точность.
- Конструктивно размеры прибора прямо пропорциональны величине фокального параметра параболоида.
- Азимутальная величина поля обзора находится в пределах  $\pm (5^\circ - 8^\circ)$  вдоль горизонта.

## 2.6 Этап 3. Разработка алгоритма обработки информации для построителя местной вертикали

**Решение задачи разработки алгоритма обработки информации** базируется на разработанных способах построения местной вертикали для предложенных конфигураций прибора. На основе разработанного алгоритма создается ПО, выполняющее обработку изображений с приемника излучения.

Алгоритм преобразования сигналов с МПИ предназначен для предварительной обработки кадра, коррекции сигналов и вычисления выходной информации – углов отклонения по крену и тангажу КА.

Алгоритм обработки информации определяется режимами работы ПМВ. В разделе 1.4. для выделены следующие необходимые функциональные режимы: **готовности, калибровки, поиска, селекции и измерений** [8].

После подачи бортового питания прибор переходит в **режим готовности**. В Цель данного режима последовательно выполнить инициализацию, проверку микроконтроллера и других функциональных узлов, провести включение и калибровку матрицы.

В режиме калибровки в результате обработки каждого кадра решаются следующие задачи [43]:

1) При закрытом затворе фиксируется кадр изображения, содержащий  $n \times m$  пикселей; замеры сигналов  $U_{nm}$  преобразуются в цифровую форму

2) Определяется функция передачи для каждого пикселя и в память вычислителя заносится калибровочный коэффициент  $K_{nm}$ .

3) Сигналы от пикселей с недостаточной чувствительностью (слепые пятна) или таких, шум которых превышает допустимое значение заменяются на среднюю величину от окружающих пикселей.

Для обеспечения функционирования ПМВ необходимо на этапе компоновки КА определить зоны попадания элементов конструкции (например, антенны или солнечные батареи) в угловом поле ПМВ. В зависимости от объема «зоны теней» производится оценка влияния на размер зону поиска и измерений, а также точностные характеристики прибора [43]. После чего разрабатывается алгоритмы и ПО, для выполнения следующей задачи:

4) Исключаются (приводятся к уровню окружающего фона) сигналы от помеховых источников излучения в соответствии с «картой теней».

Задачи 1)–4) алгоритма работы прибора в режимах готовности и калибровки являются универсальными для всех типов ПМВ независимо от конфигурации ОС.

## 2.6.1 Алгоритм работы построителя местной вертикали в режиме поиска Земли

В **режиме поиска** происходит совместное вращение КА вдоль выбранного направления (обычно на Солнце, определенного солнечными датчиками с целью разворота батарей питания) до попадания ориентира в угловое поле прибора, с последующим первоначальным грубым определением направлением на местную вертикаль. На данном этапе решаются следующие задачи 5) и 6):

5) При опросе матрицы выявляется наличие ориентира в угловом поле и электронным устройством ПМВ в бортовую вычислительную машину выдается сигнал Наличие Земли (НЗ).

6) Определяется сигнал направления, который выдается в бортовой вычислительный модуль, для обеспечения разворота КА по осям крена и тангажа с целью введения ориентира в линейную зону измерений.

Сигнал НЗ в угловом поле может быть выдан на основании снятия с матрицы сигнала, превышающего пороговое значение, занесенное в память прибора, либо по наличию в кадре матрицы необходимой величины контраста между соседними элементами массива. Если один или несколько источников излучения идентифицированы как «возможная Земля», прибор переводится в режим селекции.

В **режиме селекции** по ряду признаков — энергии, площади, по соотношению площадь/радиус определяется, что обнаруженный источник излучения является рабочим ориентиром, на основании чего выдается соответствующий сигнал НЗ [3, 8].

В ИК ПМВ в качестве помехи выступает Солнце и Луна. Для исключения влияния Луны на результаты поиска выбирается пороговый уровень сигнала НЗ, исходя из условия несрабатывания по полной Луне. Учитывая, что для околоземных орбит угловой размер Земли на порядок превышает угловой размер Солнца и Луны эффективной является селекция по угловому размеру [3].

При сканировании элементов матрицы в ПМВ с широкоугольной конфигурацией объектива поле обзора почти сопоставимо с полусферой, и при учете углового размер Земли для высоты  $H=800$  км (разд. 2.2)  $\varphi=64,55^\circ$  обеспечивает надежный поиск ориентира. Построение изображения Земли на матрице с помощью PAL объектива и сигналы столбцов матрицы представлены на рисунке 22.

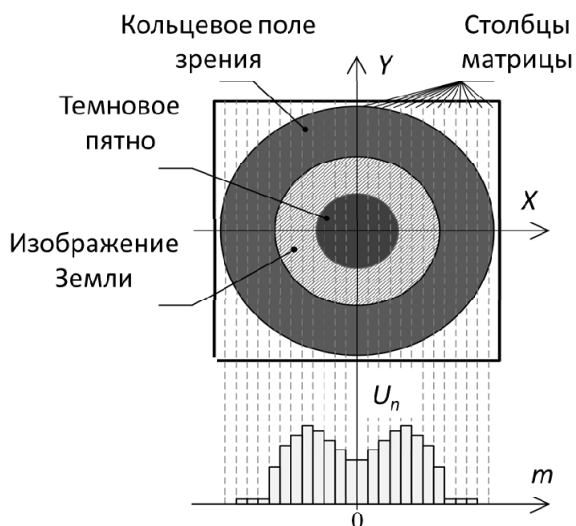


Рисунок 22 – Схема построения изображения Земли на матрице

Сигналы с элементов фотоприемной матрицы объединяют в столбцы и строки. Направление на ориентир определяется путем расчета смещения энергетического центра изображения методом весовых коэффициентов (формулы 5, 6) [33]:

$$\Delta\alpha_x = \theta \frac{\sum_{-M/2}^{M/2} U_m \cdot m}{\sum_{-M/2}^{M/2} U_m}, \quad (5)$$

$$\Delta\alpha_y = \theta \frac{\sum_{-N/2}^{N/2} U_n \cdot n}{\sum_{-N/2}^{N/2} U_n}, \quad (6)$$

где  $\theta$  – угловой размер элементов приемника,  $U_n$ ,  $U_m$  – сигналы строк и столбцов с порядковыми номерами  $n = N/2, \dots, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, \dots, -N/2$ ,  $m = M/2, \dots, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, \dots, -M/2$  соответственно, в матрице формата  $N \times M$ .

Угловой размер элементов приемника можно определить по формуле:

$$\theta = \frac{N}{2\omega} \quad (7)$$

Знак величины смещения  $\Delta\alpha_x$ ,  $\Delta\alpha_y$  определяет сигнал направления, который выдается в бортовой вычислительный модуль, для обеспечения разворота последовательно в направлении  $X$  или  $Y$ , в соответствии с осями КА.

Когда величины  $\Delta\alpha_x$  и  $\Delta\alpha_y$  находятся в линейной зоне выполняется переход в режим измерений.

Для ПМВ с ортогональной конфигурацией оптических каналов, угловые поля отдельных каналов размещены так, что поле обзора обеспечивает построение изображения горизонта Земли и космоса в линейной зоне измерений для рассчитанной высоты полета КА. При этом в режиме поиска исключается ситуация нахождения Земли внутри центральной «слепой» зоны объектива.

Поскольку каждому каналу соответствует своя зона матрицы (рисунок 23), то можно представить поисковый режим как поиск отдельными датчиками горизонта [29]. В связи с этим для упрощения функционирования в режиме поиска целесообразно выдавать сигнал НЗ для каждой зоны отдельно.

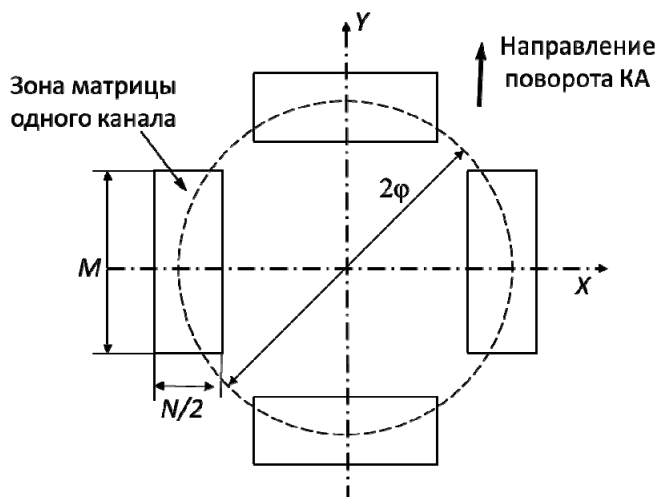


Рисунок 23 – Схема поиска многопольного ПМВ

Как и в предыдущем варианте прибора, сигнал НЗ может быть сформирован на основании снятия с одной из зон матрицы сигнала, превышающего пороговое значение, занесенное в память прибора, либо по наличию в кадре матрицы необходимой величины контраста между соседними элементами массива.

Направление вращения определяется только номером задействованной зоны матрицы: от оси КА в сторону, куда направлена траектория сканирования этого КА.

Выполнение задачи 6 для данной схемы может быть выполнено по следующему алгоритму:

6.1) Поворот в указанном направлении продолжается до появления сигнала НЗ от противоположной зоны независимо от наличия или отсутствия сигнала НЗ от исходной зоны.

6.2) При появлении сигнала НЗ от одной из зон, расположенных по перекрестной оси, вращение продолжается одновременно по двум направлениям, т. е. под углом  $45^\circ$ . Вращение прекращается при появлении сигнала от зоны противоположного направления на той же оси.

6.3) При появлении сигналов НЗ от всех четырех зон происходит переход в измерительный режим.

6.4) Обратный переход из точного режима слежения в режим поиска происходит при пропадании сигнала НЗ от одной из зон матрицы.

Работа ПМВ в режиме поиска по пунктам 6.1–6.3 в режиме поиска была математически промоделирована для произвольного начального положения центра Земли относительно оси КА по тангажу и крену. Время поиска для любых начальных условий не превышало 20 мин, что соответствует требуемому среднему времени для перехода в режим измерения.

## **2.6.2 Алгоритм работы построителя местной вертикали в режиме измерений**

Алгоритм расчета угла отклонения для ПМВ базируется на двух основных подходах:

- определение координат положения центра изображения диска Земли, характерен для широкопольных приборов [3, 8];
- определение положения границы космос-Земля, характерен для приборов с несколькими оптическими каналами [3, 18].

Второй алгоритм можно отнести к контурному типу определения координат центров изображений. В исследовании [47] проведено сравнение данных алгоритмов, в котором алгоритм определения по энергетическому центру тяжести оказался точнее контурных алгоритмов, а также требующим меньших вычислительных мощностей. Главной причиной меньшей точности контурных алгоритмов является дискретность определения контура.

Однако, данное утверждение нельзя полностью отнести к применению в работе ПМВ с ортогональными оптическими каналами, так как каждый объектив обладает своим качеством изготовления, юстировки и пропускания, что при построении изображений каждым из них на матрицу приемника создается различающаяся по энергетике картина для каждой из зон. Принимая во внимание также случайные вариации яркости излучения Земли для компенсации различия сигналов между зонами целесообразно ввести предварительное приведение яркости изображения к единому уровню по всей матрице, либо нахождения границы космос-Земля отдельно для каждой из зон.

При определении угла отклонения от местной вертикали по энергетическому центру тяжести решаются следующие задачи 7), 8):

7) определяются координаты положения центра изображения диска Земли на матрице приемника;

8) определяется угловое отклонение от вертикали по двум осям и передается в бортовой вычислительный модуль.

При отклонении оптической оси системы от направления на вертикаль изображение Земли смещается относительно начала координат (рисунок 24).

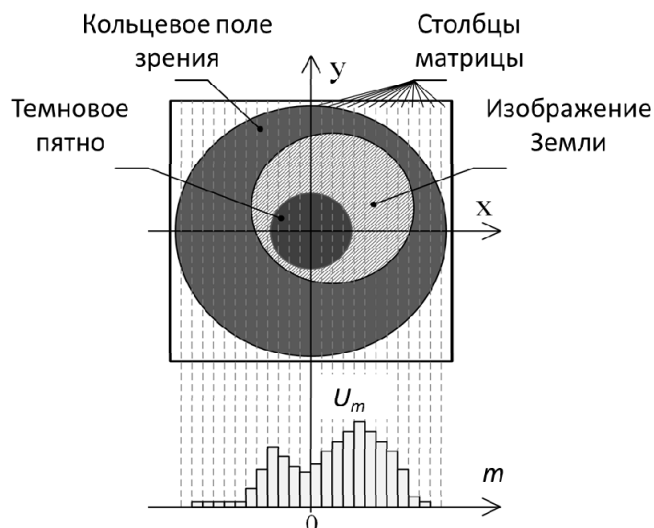


Рисунок 24 – Уровни сигналов на матрице широкопольного ПМВ при отклонении от местной вертикали [33]

Угол отклонения оси прибора от местной вертикали также как и в режиме поиска Земли может быть определено по положению энергетического центра изображения (по алгоритму центриды) по рассмотренным в разделе 2.6.1 формулам (5) и (6).

Алгоритм определения угла отклонения от местной вертикали по положению изображения границы горизонта Земли включает решение задач 7), 8), 9) [43]:

7) Производится поэлементный опрос строк и столбцов матрица фотоприемного устройства;

8) Для каждого из направлений опроса (вдоль строк  $i$  или столбцов  $j$ ) находятся координаты  $(m; n)$  пикселей, уровень сигнала которых равен соответственно  $U_{п1} = 1/3 U_{\max}$  и  $U_{п2} = 2/3 U_{\max}$ , где  $U_{\max}$  – максимальный сигнал от пикселя в строке.

На рисунке 25 представлено кольцевое изображение горизонта Земли, для каждой строки  $n$  определяются координаты столбцов  $m_1, m_3$ , соответствующих первому порогу  $U_{п1}$ ,  $m_2, m_4$  – второму порогу  $U_{п2}$ ;

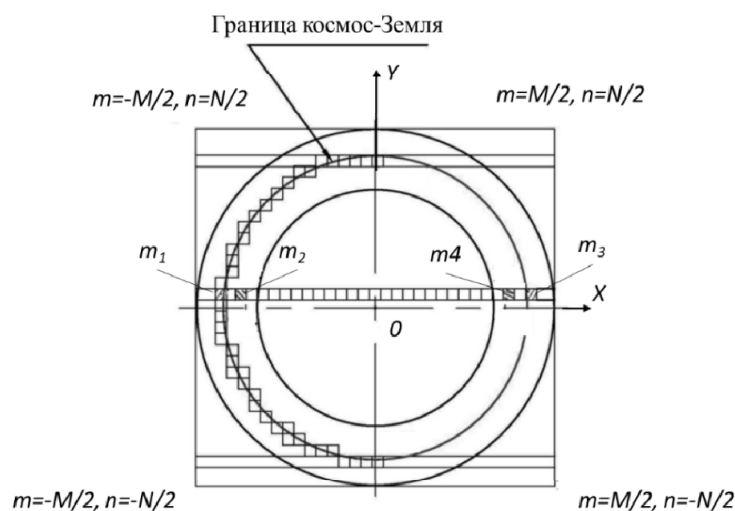


Рисунок 25 – Определение положения горизонта на матрице

9) Определяется величина отклонения от направления на местную вертикаль с учетом яркостной коррекции.

Поскольку сигнал для выбранного рабочего спектрального диапазона величина яркости ИК горизонта может меняться в 4 раз в зависимости от яркости Земли [6] необходимо введение поправки с целью определения положения горизонта относительно единого уровня яркости. Крутизна участка сигналов, зависящая от градиента освещенности, для последовательности опрашиваемых столбцов МБМ позволяет вычислить величину яркостной поправки  $P = f(U)$  (Рисунок 26).

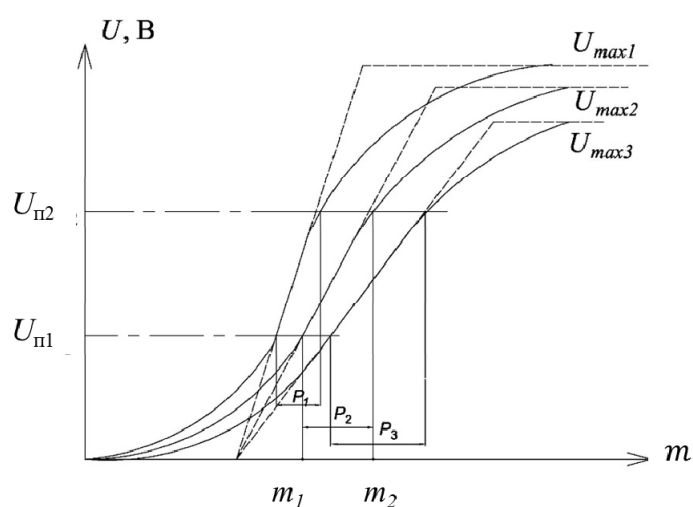


Рисунок 26 – Определение яркостной поправки по градиенту освещенности матрицы приемника

Поскольку градиент освещенности сигнала каждой строки приемника близок к линейному, а величина порога  $U_{п2}=2 \cdot U_{п1}$ , то величина поправки определяется как разность между номерами столбцов  $m_{n1}$ ,  $m_{n2}$  и  $m_{n3}$ ,  $m_{n4}$  с сигналами, соответствующими пороговым  $U_{п1}$  и  $U_{п2}$  строки  $n$  соответственно для противоположных зон матрицы:

$$P_1 = m_{n2} - m_{n1} \quad (8)$$

$$P_2 = m_{n4} - m_{n3} \quad (9)$$

С введением поправки, определяемой по градиенту освещенности изображения в направлении, перпендикулярном линии Земного горизонта в точке визирования, определяется угловое отклонение от направления на местную вертикаль Земли столбцов, соответствующих положению горизонта относительно центра фотоприемного устройства, по формуле (10):

$$\Delta\alpha_x = \frac{\theta}{N} \sum_{n=-N/2}^{n=N/2} (m_{n3} - P_2) - (m_{n1} - P_1) \quad (10)$$

где  $\theta$  – угловой размер элементов приемника.

Аналогично определяется угловое отклонение  $\Delta\alpha_y$  от направления на местную вертикаль вдоль оси  $Y$  при опросе в направлении строк.

Для конфигурации ПМВ с ортогональными оптическими каналами целесообразно проводить вычисления по этапам алгоритма 8 и 9 для каждой зоны отдельно (Рисунок 27). Таким образом компенсируется различия в оптических характеристиках отдельных каналов и случайные вариации яркости горизонта Земли. Так как конфигурация рассмотренная в разделе 2.5 предполагает построения в центре матрицы участка космоса, а по краям – горизонта Земли, то поэлементный опрос согласно этапу 7 алгоритма производится относительно центра матрицы.

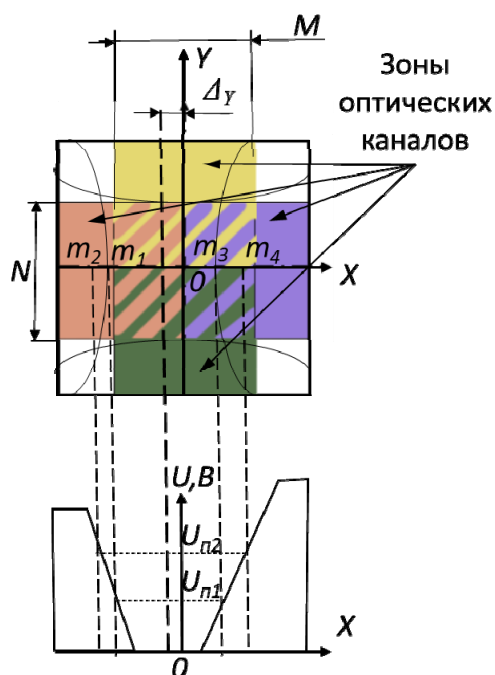


Рисунок 27 – Определение положения горизонта на матрице ПМВ с несколькими оптическими каналами

Задача 9) алгоритма в режиме измерений может выполняться без введения яркостной поправки с целью высвобождения вычислительных мощностей прибора. Тогда положения противоположных участков горизонта  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  может быть определено с помощью линейной интерполяции как среднее между двумя столбцами с пороговыми сигналами  $U_{п1}$ ,  $U_{п2}$ . Линейная интерполяция позволяет определить координату изображения в плоскости многоэлементного приемника излучения с предельной погрешностью до 1/10 от углового размера пикселя [44].

Угловое отклонение от направления на местную вертикаль Земли определяется как положение границ горизонта относительно центра фотоприемного устройства, по формулам:

$$\Delta\alpha_x = \frac{\theta}{N} \sum_{-N/2}^{N/2} \left( m_{n3} + \frac{m_{n4} - m_{n3}}{2} \right) - \left( m_{n1} + \frac{m_{n2} - m_{n1}}{2} \right) \quad (11)$$

$$\Delta\alpha_y = \frac{\theta}{M} \sum_{-M/2}^{M/2} \left( n_{m3} + \frac{n_{m4} - n_{m3}}{2} \right) - \left( n_{m1} + \frac{n_{m2} - n_{m1}}{2} \right) \quad (12)$$

Эффективность рассмотренных алгоритмов будет оценена при расчете точности на этапе 4 и при проведении эксперимента на этапе 5 (Глава 3).

## 2.7 Этап 4. Точностной расчет построителя местной вертикали

В данном разделе решаются следующие задачи:

- Определяются составляющие суммарной погрешности определения угла отклонения и их взаимосвязь с параметрами ПМВ;
- Рассматриваются составляющие методической погрешности ПМВ для ИК-диапазона, способы их компенсации;
- Производятся точностной расчеты для рассмотренной в разделе 2.4.2 конфигурации ПМВ;

### 2.7.1 Составляющие суммарной погрешности построителя местной вертикали

Погрешность определения угла отклонения оси прибора от направления на местную вертикаль Земли зависит от многих факторов и может быть представлена некоторой суммарной погрешностью [5, 6, 49]:

$$\Delta_{\text{сум}} = \Delta_{\text{ю}} + \Delta_{\text{а}} + \Delta_{\text{я}} + \Delta_{\text{г}} + \sqrt{(3\sigma_{\text{ш}})^2 + (3\sigma_{\text{м}})^2 + 3\sigma_{\text{в}}^2} \quad (13)$$

Инструментальная погрешность ПМВ определяется шумовой среднеквадратической погрешностью приемника излучения  $\sigma_{\text{ш}} = f(\Delta\tau_{\text{NETD}})$  и предельной погрешностью юстировки ОС  $\Delta_{\text{ю}}$ .

Источниками методической погрешности приборов ПМВ является предельная систематическая погрешность алгоритма вычисления угла отклонения  $\Delta_{\text{а}}$  и отличие Земли от идеальной равнояркой сферы. Рассматриваются следующие составляющие методической погрешности:

- предельная систематическая погрешность за счет несферичности планеты  $\Delta_{\text{г}} = f(H, I)$  носит чисто геометрический характер и определяется высотой полёта  $H$  и наклонением орбиты  $I$  КА;
- предельная систематическая погрешность за счет широтных и сезонных вариаций яркости  $L$  ИК-горизонта Земли  $\Delta_{\text{я}} = f(L(\lambda), 2\omega)$ ;

- среднеквадратическая случайная погрешность за счет метеорологических (погодных) вариации яркости  $L$  ИК-горизонта Земли  $\sigma_m = f(H, L(\lambda), 2\omega)$ ;
- среднеквадратическая случайная погрешность за счет вариаций высоты излучающего слоя атмосферы  $\sigma_v = f(H, L(\lambda), 2\omega)$ .

Поскольку случайные погрешности определяются множеством мелких факторов, не коррелированных друг с другом и их распределение можно считать нормальным. При этом, закон распределения вариаций высоты атмосферы близок к равномерному, т.е. предельная погрешность равна  $\sqrt{3}\sigma_g$ .

## **2.7.2 Составляющие методической погрешности построителя местной вертикали и способы их компенсации**

### **Погрешность за счет несферичности планеты**

Для расчетов форма планеты аппроксимируются эллипсоидом, в соответствии с которым принимаются величины радиусов по осям. Так для эллипсоида GRS80 со средним радиусом  $R=6371$  км, минимальным радиус (полярный) составляет  $R_p=6357$  км, максимальный радиус (экваториальный) –  $R_e=6378$  км [6].

Величину меридиональной составляющей погрешности из-за несферичности  $\Delta_{гм}$  может быть определена путем расчета визируемого радиуса Земли для конкретной широты подспутниковой точки  $Ш_0$  (Рисунок 28).

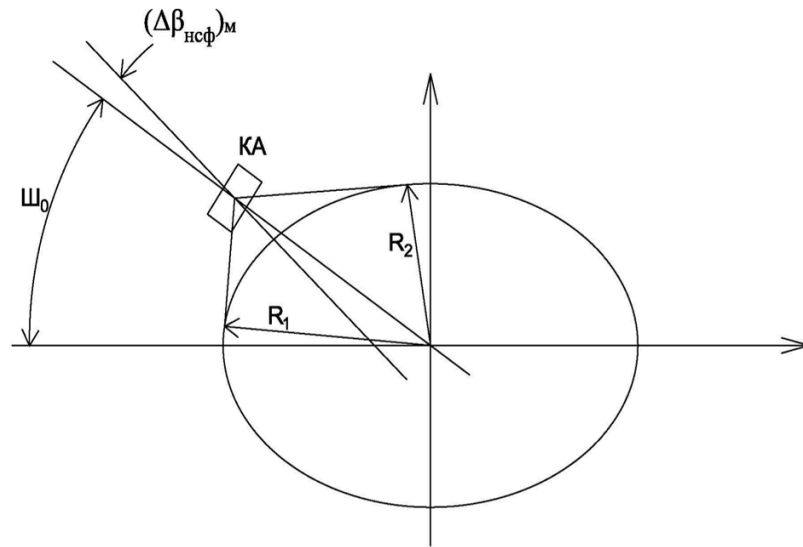


Рисунок 28 – К расчету погрешности из-за несферичности Земли [50]

Для этого определяются широты двух противолежащих точек визирования  $\text{Ш}_1$  и  $\text{Ш}_2$  и радиусы Земли  $R_1$  и  $R_2$ , в зависимости от угла визирования на край горизонта  $\varphi_0$ :

$$\text{Ш}_1 = \text{Ш}_0 - (90^\circ - \varphi_0); \quad (14)$$

$$\text{Ш}_2 = \text{Ш}_0 + (90^\circ - \varphi_0), \quad (15)$$

$$R_1 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \text{Ш}_1}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \text{Ш}_1}{R_{\text{II}}}\right)^2}}; \quad (16)$$

$$R_2 = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\cos \text{Ш}_2}{R_3}\right)^2 + \left(\frac{\sin \text{Ш}_2}{R_{\text{II}}}\right)^2}}. \quad (17)$$

Меридиональная составляющая погрешности за счет несферичности Земли определяется по формуле [6]:

$$\Delta_{\text{ГМ}} = 0,5 \left[ \text{arctg}\left(\frac{R_1 - R}{L}\right) - \text{arctg}\left(\frac{R_2 - R}{L}\right) \right] \quad (18)$$

где  $L$  – длина луча наклонного визирования на горизонт равна:

$$L = \sqrt{H(2R + H)} \quad (19)$$

Для разложения погрешности  $\Delta_{\text{ГМ}}$  на креновую и тангажную составляющие обратимся к рисунку 29.



Рисунок 29 – К расчету погрешности из-за несферичности Земли [52]

Из прямоугольного сферического треугольника  $ABC$  (угол  $C$  равен  $90^\circ$ ) для орбитального угла  $\Omega$ , измеренного в плоскости орбиты от ее восходящего узла (точка  $A$ ), и угла наклона орбиты  $I$ , угол  $B$  между направлением вдоль меридиана и вдоль плоскости орбиты равен:

$$B = \arctg \left( \frac{\cos(I)}{\sin(I) \cdot \cos(\Omega)} \right) \quad (20)$$

Составляющие погрешности  $\Delta_{\text{ГМ}}$  по тангажу и крену КА равны:

$$\Delta_{\text{ГМТ}} = \Delta_{\text{ГМ}} \cdot \cos(B); \quad (21)$$

$$\Delta_{\text{ГМК}} = \Delta_{\text{ГМ}} \cdot \sin(B). \quad (22)$$

### **Погрешность за счет широтных и сезонных вариаций энергетической яркости**

Энергетическая яркость ИК-горизонта Земли в спектральном диапазоне 6–20 мкм может варьироваться от  $L_{\min}=2$  мВт/см<sup>2</sup>·ср (зимняя Антарктида) до  $L_{\max}=10$  мВт/ см<sup>2</sup>·ср (сухие субтропики летом) [6, 19]. На основе анализа данных, полученных во время летных испытаний «Метеор-М» №2, построена зависимость энергетической яркости Земли от широты (Рисунок 30). Максимальный градиент энергетической яркости в пределах угла визирования возникает летом в южном полушарии при широте подспутниковой точки  $45^\circ$ . В этом случае абсолютные энергетические яркости для двух противоположащих участков горизонта равны  $L_1=4$  мВт/см<sup>2</sup>·ср;  $L_2=8,75$  мВт/см<sup>2</sup>·ср [6, 51].

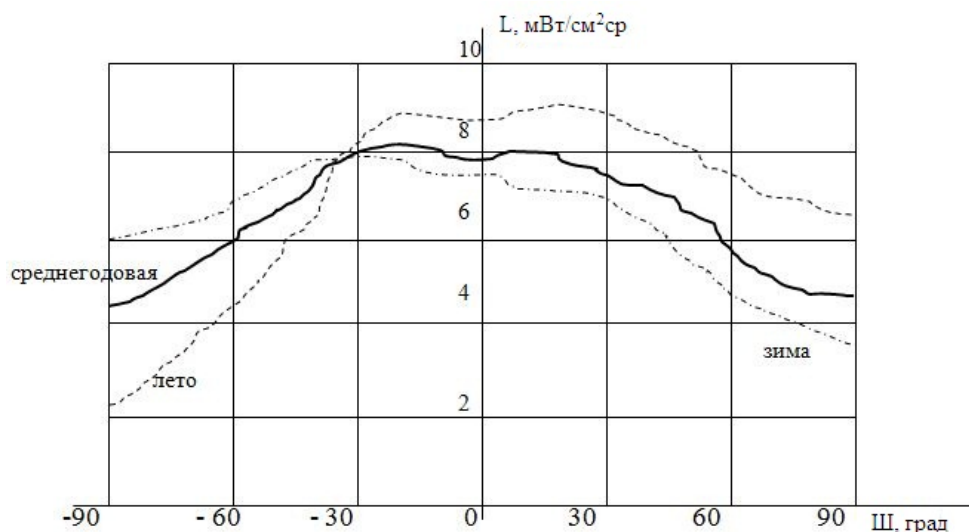


Рисунок 30 – Широтно-сезонные вариации энергетической яркости излучения Земли [6]

Аналогичную форму имеет и широтное распределение энергетических яркостей для спектрального диапазона 8–14 мкм по данным со спутника «Космос-65» [19]. Для широт  $-60^{\circ} \dots -30^{\circ}$  имеет место градиент энергетической яркости от 2,5 до 4,1 мВт/см<sup>2</sup>·ср, при  $L_{\text{ср}} = 3,3$  мВт/см<sup>2</sup>·ср.

В спектральных интервалах 7–8 и 16–22 мкм энергетические яркости изменяются от  $0,7 \cdot 10^{-3}$  до  $1,1 \cdot 10^{-3}$  мВт/см<sup>2</sup>·мкм на тех же широтах, а в длинах волн 14–16 и 22–26 мкм почти не зависят от широты и заключены в пределах  $0,5$ – $0,7 \cdot 10^{-3}$  мВт/см<sup>2</sup>·мкм.

Форма зависимости энергетической яркости ИК-горизонта от угла визирования показана на рисунке 31.

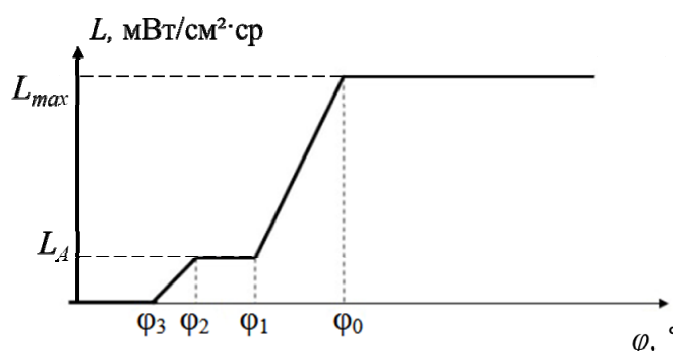


Рисунок 31 – Профиль энергетической яркости ИК-горизонта [6]

Энергетическая яркость ИК-горизонта в диапазоне углов визирования  $(\varphi_0 - \varphi_1)$  (Рисунок 31) определяется в основном окном прозрачности атмосферы (8

– 14 мкм); оно существенно варьируется по мощности и высоте излучающего слоя. Энергетическая яркость  $L_1$  в диапазоне углов ( $\varphi_1 - \varphi_3$ ) определяется слоем  $\text{CO}_2$ , который окутывает всю Землю на высоте порядка 60 км и меняется очень незначительно как по величине, так и по высоте излучающего слоя [6, 51].

В исследованиях, с помощью имитационной аппаратуры, используются модель энергетической яркости А (Рисунок 32 а) или модель В, в которой энергетическая яркость внутри Земли изменяется линейно (Рисунок 32 б).

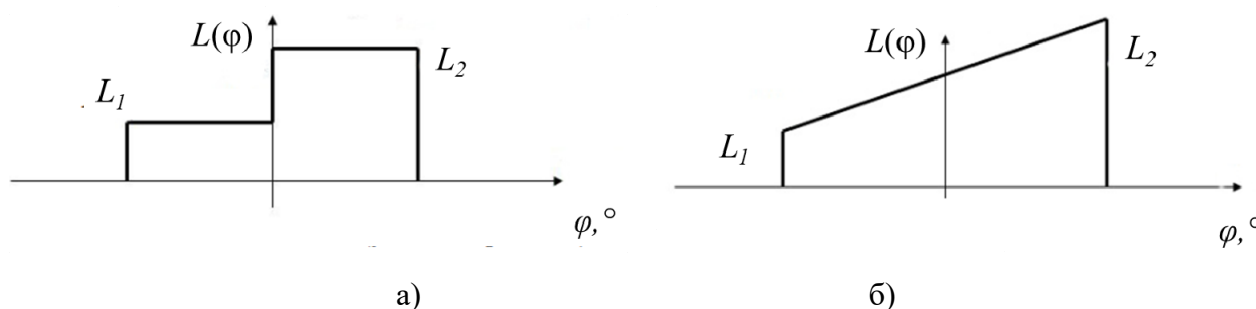


Рисунок 32 – Модели энергетической яркости Земли а) А, б) В [6]

Рассмотренные методические погрешности относятся к систематическим и повторяются в течение каждого витка КА по орбите, а сезонные составляющие сохраняют свое влияние на продолжительном отрезке времени. Величины погрешностей могут быть промоделированы или зафиксированы в полете на протяжении витка, после чего учтены в алгоритме определения угла отклонения. Разработке методики их компенсации посвящен раздел 2.7.3.

### **Случайная составляющая методической погрешности определения угла отклонения за счет метеорологических вариаций энергетической яркости**

Случайные составляющие погрешности ПМВ определяются средним квадратическим отклонением энергетической яркости относительно математического ожидания, изменяющегося в соответствии с широтно-сезонным ходом. Распределение СКО энергетической яркости по спектру для разных широтных зон с учетом весовой функции, определяемой площадью этих зон, приведено в работах [19, 50].

Наибольшая вариация имеет место в окне прозрачности 8–14 мкм, так как в этих длинах волн излучение относительно теплой земной поверхности и нижних слоев атмосферы заменяется излучением более холодной верхней границы облаков. При этом энергетическая яркость Земли изменяется от 0,2 мВт/см<sup>2</sup> мкм в приполярных районах до 0,7 мВт/см<sup>2</sup> мкм в районе экватора.

Наименьшее СКО яркости имеет место для полосы излучения CO<sub>2</sub> (около 0,1 мВт/см<sup>2</sup> мкм для всего земного шара).

Для оценки случайной погодной погрешности предположим, что внутри диска Земли вблизи горизонта, при углах визирования  $\varphi_a = \varphi_0 - d\varphi$  (Рисунок 33), возникает скачок энергетической яркости  $L_A$ , связанный с изменением погодных условий.

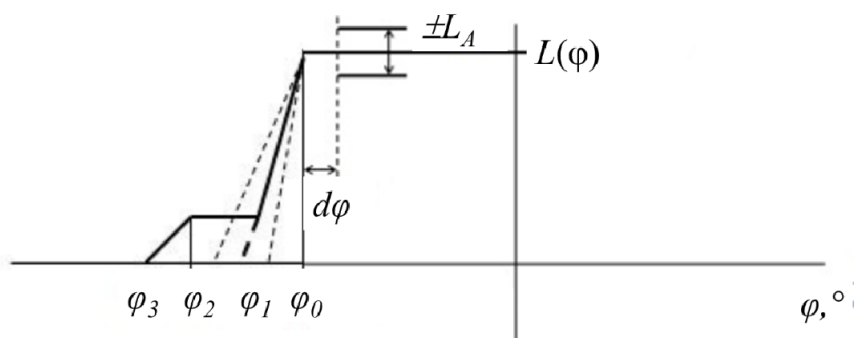


Рисунок 33 – Модель С случайных погодных вариаций энергетической яркости и высоты атмосферы [6]

Расстояние по поверхности Земли с резкой сменой метеоситуации определяется радиусом корреляции облачного покрова  $R_x \approx 700$  км для диапазона 8–14 мкм составляет 700 км (средний размер облачности) [50]. При этом случайные вариации определяются колебаниями облачности и влажности в тропосфере; соответственно наибольшее СКО энергетической яркости имеет место в экваториальной зоне ( $L_A = 0,6$  мВт/см<sup>2</sup>ср), а минимальное в субарктической зоне ( $L_A = 0,25$  мВт/см<sup>2</sup>ср). При высоте полета 800 км угловой размер участка неоднородности  $d\varphi = 5,6^\circ$ .

### Погрешность за счёт случайных вариаций высоты атмосферы

Погрешность из-за случайных вариаций высоты атмосферы представлена на модели  $C$  (Рисунок 33) смещением участка ее визирования  $\varphi_1$ . Высота излучающего слоя атмосферы для спектрального диапазона 6 – 20 мкм составляет  $40 \pm 20$  км, причём закон распределения вероятностей случаен и близок к равномерному. Для такого закона СКО от среднего значения высоты составляет  $\sigma_v \approx 11,8$  км.

Поскольку в диапазоне окна пропускания атмосферы 8–14 мкм основная энергия излучения Земли приходится на тропосферу, то и высота излучающего слоя варьируется в пределах  $10 \pm 8$  км, т. е.  $\sigma_v \approx 4,4$  км.

Разброс высоты для слоя  $CO_2$  пренебрежимо мал ( $< \pm 0,5$  км).

Проведенная оценка влияния вариаций ИК горизонта для рассмотренных ранее поддиапазонов показывает:

- Наиболее равномерным с точки зрения вариаций характеристик является спектр поглощения  $CO_2$ , соответствующий ему диапазон 14–16 мкм обладает наименьшим из рассмотренных средним уровнем энергетической яркости  $L_{cp} = 0,3 \cdot 10^{-3}$  мВт/см<sup>2</sup>мкм [5];
- Область окна прозрачности атмосферы и широкий диапазон (6–20 мкм) имеют схожие характеристики, однако работа в спектре 8–14 мкм позволяет снизить влияние высотной погрешности при определении положения горизонта Земли, которое не поддается компенсации по методике параграфа 2.2.4.

На основе чего для построения модели излучения Земли принимается спектральный диапазон  $\lambda = 8\text{--}14$  мкм.

### **2.7.3 Алгоритм компенсации систематических методических погрешностей построителя местной вертикали**

В разделе 2.7.1 показано, что существенной частью методической погрешности являются систематические погрешности: за счет несферичности Земли, из-за сезонных и широтных вариаций излучения Земли.

Для существующих приборов ориентации с оптико-механическим сканированием компенсация яркостной погрешности осуществляется по алгоритму аналогичному представленному в разделе 2.6.2 [6]. Для каждого значения измеренной яркости в память прибора заносится предварительно рассчитанная величина поправки, которая позволяет привести разницу в крутизне яркостной характеристики для каждого из пересечений ИК горизонта к одному уровню. При этом погрешность за счет несферичности Земли компенсируется уже на этапе обработки управляющих сигналов прибора в бортовой вычислительной машине на основе информации о параметрах орбиты КА. Таким образом, для компенсации требуется пересчет величины поправки в зависимости как от параметров ПМВ, так и КА.

Компенсации данных погрешностей возможна на основе алгоритма аппроксимации выходных сигналов ПМВ, получаемых при сканировании ИК горизонта с использованием параметров Фурье, полученных при математической обработке выходных сигналов ПМВ по крену и тангажу [16].

На рисунке 34 приведены выходные сигналы по тангажу  $T(t)$  и крену  $K(t)$  для прибора, установленного на КА серии «Метеор-М». Приведен также гармонический сигнал о высоте КА относительно плоскости экватора  $H(t)$ , формируемый в бортовом компьютере и позволяющий производить географическую привязку сигналов. Отрицательная полуволна соответствует южному полушарию, а положительная – северному.

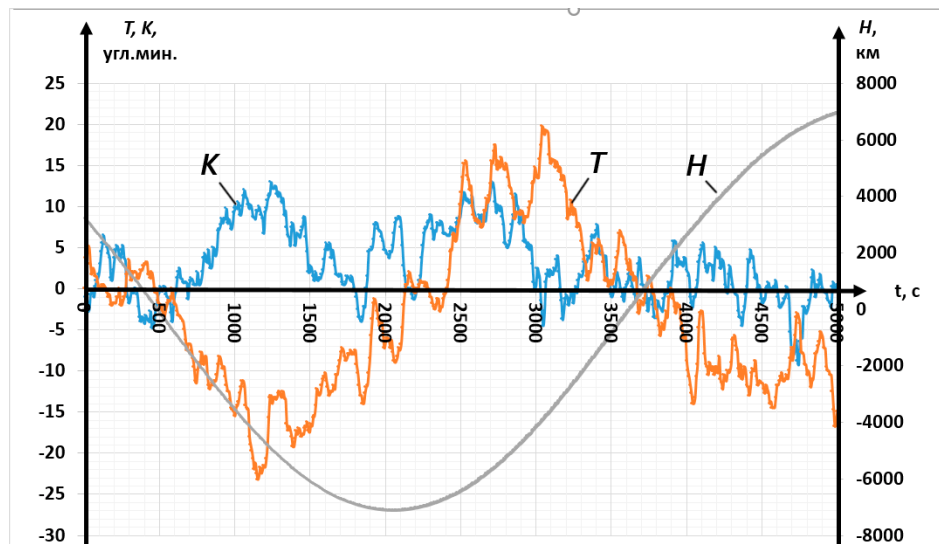


Рисунок 34 – Телеметрия выходных сигналов прибора по каналам тангажа  $T$ , крена  $K$  и высота  $H$  КА относительно плоскости экватора [16]

Поскольку данный КА с высокой точностью ориентируется по сигналам звездного датчика, предельная погрешность измерений которого составляет единицы угловых секунд, приведенные на рисунке 34 выходные сигналы прибора по тангажу и крену, полученные в телеметрическом режиме, могут использоваться для оценки погрешности ПМВ.

На графике заметна широтная зависимость тангажного сигнала, связанная с несферичностью Земли и с сезонной систематической вариацией яркости ИК горизонта, имеющая частоту второй гармоники относительно частоты обращения КА. Широтная зависимость сигнала по оси крена не столь заметна.

Поскольку систематическая методическая погрешность носит выраженный периодический характер, адекватно осуществить ее компенсацию с использованием аппроксимирующей периодической кривой (Рисунок 35 а).

Как видно из рассмотрения рисунка 35 б, уточненные сигналы практически не содержат систематической погрешности; среднеквадратическое значение остаточной случайной погрешности уменьшается в 2 – 3 раза.

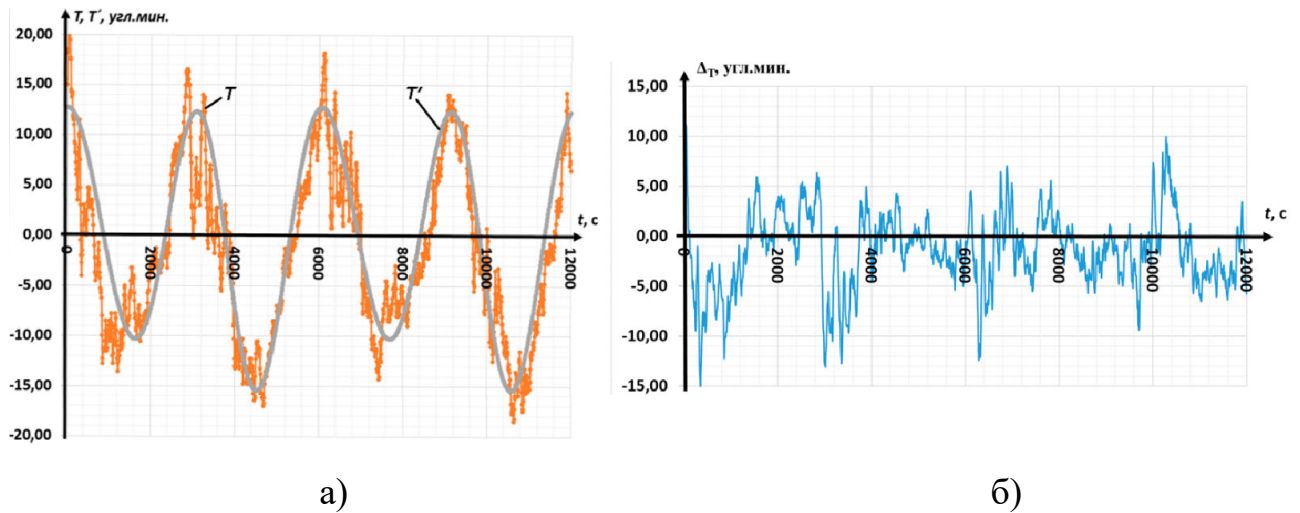


Рисунок 35 – Графики сигналов углов отклонения при вращении КА  
 а) функция тангажа  $T$  и аппроксимирующая кривая  $T'$ ,  
 б) результирующая функция тангажа  $\Delta T$  [16]

Таким образом, аппроксимация реальных функций  $K(t)$  и  $T(t)$  может быть выполнена по алгоритму, включающей следующие этапы.

- 1) Для реального КА выбирается точка, фиксирующая определенный момент времени на орбите, например, прохождение восходящего узла орбиты или момент пересечения Солнцем углового поля солнечного датчика, совпадающего с одной из осей КА. Этот момент принимается за нулевой,  $t = 0$ .
- 2) По телеметрической информации, начиная с выбранного момента начала обработки ( $t = 0$ ) в течение промежутка времени, равного периоду обращения КА  $T_o$ , запоминаются для текущих моментов времени  $t$  значения выходных сигналов  $K(t)$  и  $T(t)$ .
- 3) По формулам 23–25 подсчитываются значения  $A_o$  и  $B_o$ , а также значения коэффициентов Фурье  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$  и  $d_n$  по формулам 26–29 для предыдущего витка орбиты и нескольких частот  $n \cdot \Omega$  (оптимальная величина  $n$  от 2 до 4):

$$A_o = \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} K(t) dt \quad (23)$$

$$B_o = \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} T(t) dt \quad (24)$$

$$\Omega = 2\pi / T_0 \quad (25)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} K(t) \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t) dt \quad (26)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} K(t) \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) dt \quad (27)$$

$$c_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} T(t) \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t) dt \quad (28)$$

$$d_n = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} T(t) \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) dt \quad (29)$$

Рассчитанные параметры могут использоваться в течении длительного времени (от двух недель до месяца), обеспечивая построение аппроксимирующих кривых, характеризующих несферичность и широтно-сезонные вариации яркости Земли.

4) Для текущих моментов времени  $t$  по формулам (30) и (31) рассчитываются значения  $K'(t)$  и  $T'(t)$  аппроксимирующих кривых

$$K'(t) = A_0 + a_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t) + b_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \Omega \cdot t) + \\ + b_2 \cdot \sin(2\Omega \cdot t) + \dots + a_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t) + b_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) \quad (30)$$

$$T'(t) = B_0 + c_1 \cdot \cos(\Omega \cdot t) + d_1 \cdot \sin(\Omega \cdot t) + c_2 \cdot \cos(2 \cdot \Omega \cdot t) + \\ + d_2 \cdot \sin(2\Omega \cdot t) + \dots + c_n \cdot \cos(n \cdot \Omega \cdot t) + d_n \cdot \sin(n \cdot \Omega \cdot t) \quad (31)$$

и определяются значения:

$$\Delta_K = K(t) - K'(t), \quad (32)$$

$$\Delta_T = T(t) - T'(t), \quad (33)$$

которые могут использоваться в качестве выходных сигналов прибора для управления КА по крену и тангажу.

Полученные по формулам 23–33 значения параметров запоминаются и используются для расчета аппроксимирующих кривых  $K'(t)$  и  $T'(t)$  и выходных сигналов на последующих витках орбиты, причем орбитальное время отсчитывается для каждого витка от того же момента начала ( $t = 0$ ).

Рассчитанные для некоторого момента времени параметры Фурье, используемые для построения аппроксимирующей кривой, могут в дальнейшем

использоваться на протяжении длительного периода времени, пока не изменится сезонная картина энергетической яркости поверхности Земли. Запомненные значения этих параметров могут использоваться для коррекции систематических погрешностей других однотипных приборов при работе на аналогичной орбите и для такого же сезона. Необходимо помнить, что при использовании аппроксимирующей кривой она должна быть правильно фазирована в параметрах орбиты, например, привязана к моменту прямого восхождения орбиты.

Алгоритм был опробован с использованием телеметрической информации прибора, установленного на КА серии «Метеор-М». Результат эксперимента показал, что использование предложенного алгоритма позволит скомпенсировать систематическую составляющую методической погрешности и довести остаточную величину среднеквадратической погрешности  $\sigma_{\text{ост}}$  приборов до  $2,5'$ .

Тогда результирующая суммарная погрешность ПМВ  $\Delta_{\text{ост}}$  определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{ост}} = \Delta_{\text{ю}} + \Delta_{\text{а}} + \sqrt{(3\sigma_{\text{ш}})^2 + (3\sigma_{\text{м}})^2 + 3\sigma_{\text{в}}^2} \quad (34)$$

На основе расчета и экспериментальных результатов [16] остаточная погрешность ПМВ  $\Delta_{\text{ост}} \approx 3\sigma_{\text{ост}}$  составляет  $7,5'$ . Данная величина соответствует требованиям, поставленным в этапе 1 методики проектирования.

Предложенный алгоритм компенсации влияния несферичности и вариаций яркости ИК излучения Земли на погрешность определения угла отклонения от местной вертикали обеспечил повышение точности определения угла отклонения от местной вертикали при эксплуатации КА «Ионосфера-М» № 3, 4, что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации АО «Корпорация «ВНИИЭМ» от 18.09.2025 (Приложение Д). Эффективность компенсации была экспериментально подтверждена сравнением показаний построителя местной вертикали с расчетной ориентацией по измерениям звездных датчиков и аппаратуры спутниковый навигации во время летных испытаний КА «Ионосфера-М» № 3, 4.

В приборах статического типа систематические погрешности могут быть компенсированы аналогичным способом.

#### 2.7.4 Оценка точности построителя местной вертикали

В соответствии с этапом 4 методики расчета и проектирования прибора ориентации по Земле необходима оценка точности ПМВ.

Для расчета примем параметры ПМВ с панорамным РAL объективом (разд. 2.4.2) полученные по итогам этапов 1 и 2 представленные в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры ПМВ с панорамным объективом

| Параметры ПМВ |                                                     | Значения параметров |
|---------------|-----------------------------------------------------|---------------------|
| 1.            | Рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda$ , мкм | 8–14                |
| 2.            | Угловое поле объектива $2\omega$ , °                | 190                 |
| 3.            | Рабочая высота полета $H$ , км                      | 250-2000            |
| 4.            | Шаг матрицы детектора $a$ , мкм                     | 17                  |
| 5.            | Угловой размер элемента приемника $\theta$ , '      | 24                  |
| 6.            | Фокусное отверстие объектива $f'$ , мм              | -2,17               |
| 7.            | Относительное отверстие $D/f'$                      | 1:0,53              |
| 8.            | Размер кружка рассеяния $r_{rms}$ , мкм             | 22                  |

**Юстировка** оптической части прибора обеспечивается прецизионной имитационной аппаратурой и может быть паспортизована с **погрешностью**  $\Delta_{ю} = \pm 1'$ .

Значение **шумовой погрешности** излучения определяется соотношением и величина крутизны фронта при последовательном считывании сигналов по определенной строке или столбцу  $k$ :

$$\sigma_{ш} = \frac{\Phi_{ср.ш}}{k}, \quad (35)$$

где  $\Phi_{ср.ш}$  – шумовая составляющая потока, приходящего на МБМ,  $k$  – величина крутизны фронта.

Поток излучения приходящий на матрицу определяется как:

$$\Phi = \Omega \cdot A_{\text{вх.зр.}} \cdot k_{\text{вин}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} \cdot \tau_{\text{ос}} \cdot S_{\lambda} d\lambda, \quad (36)$$

где  $\Omega$  – телесный угол, соответствующий угловому полю прибора,  $A_{\text{вх.зр.}}$  – площадь входного зрачка,  $k_{\text{вин}}$  – коэффициент виньетирования,  $L_{\lambda}$  – спектральная энергетическая яркость излучения Земли,  $\tau_{\text{ос}}$  – пропускание оптического канала,  $S_{\lambda}$  – спектральная характеристика приемника излучения.

Шумовая составляющая потока:

$$\Phi_{\text{ср.ш}} = \frac{\Phi_{\text{ср}}}{\eta} \quad (37)$$

Представим отношение сигнал/шум как отношение величины потока излучения от Земли на площадке приемника  $\Phi$  к минимальной разрешаемой величине потока  $\Phi_{\text{ш}}$  при работе по абсолютно черному телу с температурой  $T_1 = 300\text{K}$ . Тогда соотношение  $\eta$  общего потока и шумовой составляющей может быть записано как:

$$\eta = \frac{T_2^4}{4T_1^3 \cdot \Delta\tau_{\text{NETD}}}, \quad (38)$$

Представим величину  $k$  как отношение потока излучения  $\Phi_{\text{ср}}$  от Земли средней энергетической яркости выбранного диапазона  $L_{\text{ср}}=3,3 \text{ мВт/см}^2\text{ср}$  к величине перехода «космос-Земля» с учетом углового размера атмосферы Земли угол  $d\theta$  и кружка рассеяния ОС, которые в сумме составляют величину порядка  $1^\circ$ :

$$k = \frac{\Phi_{\text{ср}}}{d\theta} \quad (39)$$

Тогда по формулам 35–39 среднеквадратическое значение шумовой погрешности будет составлять  $\sigma_{\text{ш}} = 0,2'$ .

С целью оценки влияния на погрешность определения угла отклонения предложенного алгоритма и его оптимизации используется имитационное моделирование [52, 65]. Для этого смоделированы изображения ИК горизонта на

чувствительном слое фотоматрицы (рисунок 36) на основе модели представленной в разделе 2.7.1.

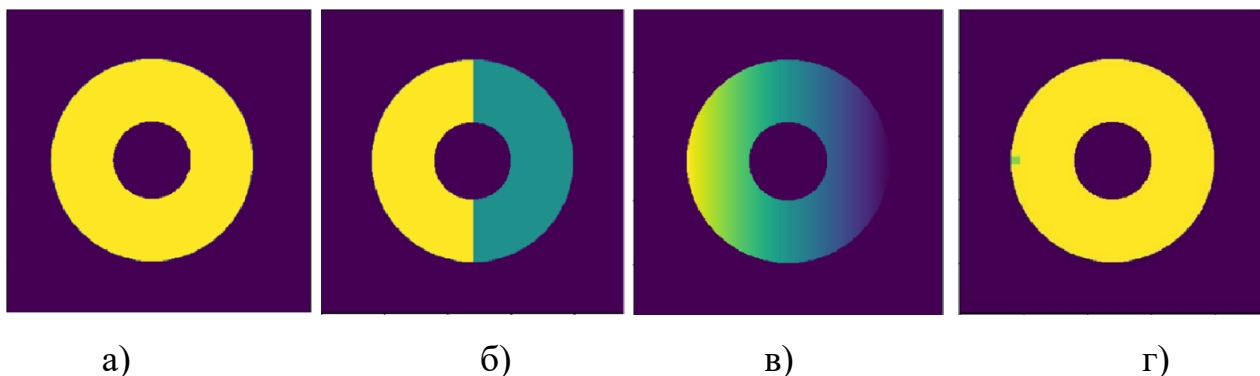


Рисунок 36 – Изображения Земли на МБМ  
а) по профилю атмосферы, б) по модели А, в) по модели В, г) по модели С

Производится сопоставление углового поля прибора и размера матрицы МБМ  $N \times M$ . Тогда углу визирования космоса и каждого излучающего слоя атмосферы  $\varphi$  соответствует своя зона на матрице  $x_n = f(N, 2\omega, \varphi_n)$ :

$$x_n = \varphi_n \cdot \frac{N}{\omega}, \quad (40)$$

где углы визирования определяются на основе высоты слоя атмосферы  $h_n$  в соответствии с формулой:

$$\varphi_n = \arcsin \frac{h_n}{(H + R)} \quad (41)$$

Предположим, что каждый пиксель собирает энергию в пределах кружка рассеяния объектива, причем в пределах кружка чувствительность матрицы постоянна.

При сканировании производится «свёртка» профиля ИК-горизонта кружком рассеяния объектива прибора. Поэтому сигнал рассчитывается как произведение построенной функции профиля яркости  $L(x)$  ИК-горизонта на функцию чувствительности (гауссиан)  $G\left(\frac{r_{rms}}{a}\right)$  углового поля для каждой строки матрицы:

$$U_n = L_n(x) * G\left(\frac{r_{rms}}{a}\right) \quad (42)$$

Путем последовательной обработки смоделированных по программе на языке программирования Python (Приложение А) кадров отображающих

смещение изображения Земли для углов отклонения местной вертикали в диапазоне от  $-240'$  до  $240'$  выявлены оптимальные параметры алгоритма обработки изображения, полученного с помощью широкопольного объектива.

Алгоритмы представленные в разд.2.6.2 стали основой разработанного ПО на языке программирования Python (Приложение Б, В) обеспечивающего нахождение энергетического центра (программа EV) изображения и границ горизонта (программа BV).

Алгоритм определения энергетического центра тяжести изображения EV предполагает нахождение смещения изображения вдоль оси X в соответствии с формулами (5) и (6) в разд.2.6.1.

Результаты обработки кадров показали, что применения программы EV позволяет вычислить угол отклонения с среднеквадратической погрешностью алгоритма не более  $0,25'$ .

Второй вариант BV предполагает нахождение границы изображения по пороговой схеме для правой (от  $N$  до  $N/2$ ) и левой зоны (от 0 до  $N/2$ ) по формулам (11) и (12). Величины порогов вычисляются для каждой опрашиваемой строки каждой зоны как величины сигналов  $U_{п1}=0,333 \cdot U_{max}$  и  $U_{п2}=0,667 \cdot U_{max}$ . С целью минимизации вычислительных мощностей расчет производился с несколькими вариантами величины шага опрашиваемых строк.

Результаты обработки кадров показали, что среднеквадратическая погрешность алгоритма для линейной зоны от  $+60'$  до  $-60'$  составила не более  $0,5'$ .

Представленный выше эксперимент позволяет заключить, что предложенные алгоритмы позволяют определить угол отклонения от местной вертикали за счет вычисления смещения изображения Земли на фотоматрице.

Поскольку погрешность за счет несферичности Земли не зависит от параметров прибора, можно воспользоваться результатами представленными в таблице 11.

Таблица 11 – Погрешность за счет несферичности Земли [52]

| Орбитальный угол $\Omega$ , ° | Меридиональная составляющая $\Delta_{ГМ}$ , ' | Тангажная составляющая $\Delta_{ГМТ}$ , ' | Креновая составляющая $\Delta_{ГМК}$ , ' |
|-------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| 0                             | 0                                             | 0                                         | 0                                        |
| 15                            | 4,39                                          | 4,33                                      | 0,71                                     |
| 30                            | 7,62                                          | 7,49                                      | 1,37                                     |
| 45                            | 8,86                                          | 8,64                                      | 1,94                                     |
| 60                            | 7,84                                          | 7,47                                      | 2,37                                     |
| 75                            | 5,05                                          | 4,31                                      | 2,64                                     |
| 90                            | 2,73                                          | 0                                         | 2,73                                     |

Для КА с высотой орбиты 800 км и наклоном  $74,5^\circ$  максимальное значение определяется тангажной составляющей  $\Delta_{Г} = \pm 8,64'$  при орбитальном угле  $\Omega = 45^\circ$ .

Расчет величины **систематической методической погрешности за счет широтных вариаций энергетической яркости** излучения Земли предлагается моделирование ее вариаций  $L_n(x, \lambda)$ . Для статического ПМВ может быть выполнено расчетом и построением градиента сигнала в пределах матрицы фотоприемного устройства (рисунок 36 б, в) на основе моделей рассмотренных в разделе 2.7.2.

Энергетическая яркость излучения ИК-горизонта  $L_n$  определяется в относительных единицах, где  $L_1$  соответствует минимальной яркости  $L_{min} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  мВт/см<sup>2</sup>мкм выбранного спектрального диапазона  $\lambda = 8\text{--}14$  мкм, а  $L_{max}$  изменяется от  $L_{min}$  до  $1,6 \cdot L_{min}$ . Яркость участка высоких слоев атмосферы ( $0,7 \cdot 10^{-3}$  мВт/см<sup>2</sup>мкм) принимаем  $L_a = 0,3 \cdot L_{min}$ .

Систематическая методическая погрешность для программы EV за счет вариаций энергетической яркости Земли для модели А составила более  $3^\circ$ , для модели В при ее максимальном градиенте составила не менее  $2^\circ$ .

В связи с чем для программы EV целесообразно определять порог срабатывания на основании минимального и максимального значения яркости пикселей кадра и приводить к единому уровню величины его превышающие.

Для программы BV необходимо устанавливать оптимальные пороги срабатывания для каждой половины матрицы и опрашиваемой вдоль строки оси определения угла отклонения для снижения влияния указанных выше источников погрешностей.

Применение ПО на основе алгоритма оптимизированного по результатам обработки изображений, представленных на рисунке 36 позволяет оценить величину погрешности (Таблица 12).

Таблица 12 – Результаты обработки сгенерированных изображений

| $L_1$ , о.е. | $L_2$ , о.е. | Погрешность широтного хода $\Delta_{\alpha}'$    |          |                                             |          |
|--------------|--------------|--------------------------------------------------|----------|---------------------------------------------|----------|
|              |              | Алгоритм на основе поиска энергетического центра |          | Алгоритм на основе поиска границы горизонта |          |
|              |              | Модель A                                         | Модель B | Модель A                                    | Модель B |
| 2,5          | 4            | до оптимизации                                   |          |                                             |          |
|              |              | 390                                              | 240      | 1                                           | 1        |
|              |              | после оптимизации                                |          |                                             |          |
|              |              | 1                                                | 1        | 1                                           | 1        |

**Случайная погрешность за счет вариаций яркости Земли** по модели С (рисунок 33) может быть определена путем моделирования изображения (рисунок 36 г) данного участка с энергетической яркостью  $L_s = L_{cp} \pm L_A$  и последующей обработкой с целью определения угла отклонения. ПО на основе алгоритма поиска энергетического центра изображения позволяет определить угол отклонения от местной вертикали с погрешностью порядка  $3\sigma_m \leq 1,8'$ . При оптимальном выборе величины порога в алгоритме поиска границ горизонта Земли наличие на изображении участков с вариациями яркости излучения не оказывает влияния на погрешность определения угла отклонения ( $3\sigma_m \approx 0'$ ).

С учетом параметров ПМВ **при предельном отклонении высоты излучающей атмосферы**  $\sigma_b \approx 4,4$  км пропорциональное смещение изображения горизонта на фотоматрице сопоставимо с величиной пикселя и с учетом осреднения по матрице не оказывает влияния на погрешность определения угла отклонения ( $\sigma_b \approx 0'$ ).

Расчетная погрешность ПМВ по формуле (13) при использовании предлагаемых технических решений характеризуется предельной суммарной

погрешностью  $13'$ , что превышает заданные в этапе 1 методики проектирование требования к предельной погрешности (Таблица 13). С компенсацией систематических погрешностей по формуле (34) данная величина не превышает  $3'$ , что соответствует требованиям, поставленным в этапе 1 методики проектирования.

Таблица 13. – Суммарная погрешность ПМВ с оптико-механическим сканированием и ПМВ статического типа с панорамным объективом

| Составляющая суммарной погрешности, не более                                                               | ПМВ с оптико-механическим сканированием [6], ' | ПМВ с ПЗЛК, ' |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------|
| Погрешность юстировки, $\Delta_{\text{ю}}$                                                                 | 1                                              | 1             |
| Случайная инструментальная погрешность шума приемника излучения, $\sigma_{\text{ш}}$                       | 0,2                                            | 0,2           |
| Максимальная методическая погрешность за счет несферичности Земли (для $H = 800$ км), $\Delta_{\text{г}}$  | 9                                              | 9             |
| Методическая погрешность за счет систематической вариаций яркости Земли, $\Delta_{\text{я}}$               | 1,4                                            | 1             |
| Методическая погрешность алгоритма, $\Delta_{\text{а}}$                                                    | -                                              | 1             |
| Случайная методическая погрешность за счет погодных вариаций яркости Земли, $\sigma_{\text{м}}$            | 1,8                                            | $\sim 0$      |
| Случайная методическая погрешность за счет вариаций высоты излучающего слоя атмосферы, $\sigma_{\text{в}}$ | 3,4                                            | $\sim 0$      |
| Суммарная погрешность, $\Delta_{\text{сум}}$                                                               | 18                                             | 12,5          |
| Суммарная погрешность с учетом компенсации методической погрешности, $\Delta_{\text{ост}}$                 | 7,5                                            | 3             |

## Выводы по главе 2

Разработанная методика расчета и проектирования ИК приборов ориентации по Земле, построенных на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц, реализована на примере ПМВ с МБМ в соответствии со следующими этапами:

На этапе 1 определены требования к параметрам ПМВ на основе требований к системе ориентации КА к точности ( $\Delta_{\text{сум}}$  не более  $10'$ ) и высоте полета ( $H = 800$  км).

На этапе 2 рассмотрены различные конфигурации объективов для ИК ПМВ. Для дальнейшего расчета выбрана схема объектива с ПЗЛК, обеспечивающим

работу ПМВ в широком диапазоне высот от 250 км до 2000 км. Представлен расчет объектива с ортогональными оптическими каналами, который лег в основу разработанного в главе 3 макета.

На этапе 3 рассмотрены два варианта алгоритма определения угла отклонения от местной вертикали на основе определения энергетического центра изображения Земли на МБМ и положения границ горизонта Земли на изображении. На основе данных алгоритмов реализованы ПО для дальнейшей оценки точности.

На этапе 4 проведен точностной расчет ПМВ с параметрами, определенными на этапах 1–3, в том числе путем обработки сгенерированных изображений программами для определения угла отклонения по алгоритмам, разработанным на этапе 3 методики проектирования.

Предельная суммарная погрешность разработанного прибора  $\Delta_{\text{ост}}$  составила не более 3' с учетом компенсации систематической составляющей методической погрешности, что удовлетворяет заявленным на этапе 1 требованиям и меньше чем для существующих приборов с оптико-механическим сканированием [6] и статического типа [8].

По результатам расчета и проектирования расчета можно заключить:

Предложенный алгоритм определения угла отклонения от местной вертикали по энергетическому центру тяжести изображения при использовании широкопольного объектива отличается меньшей погрешностью, чем алгоритм на основе определения положения границ горизонта Земли, но требует оптимального выбора порога срабатывания на основании минимального и максимального значения яркости пикселей кадра и приведения к единому уровню величин сигналов его превышающие.

Применение разработанной методики расчета и проектирования позволяет осуществлять разработку и определить технический облик ИК приборов ориентации по Земле на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц.

Разработанный алгоритм компенсации систематических методических погрешностей ИК ПМВ на основе гармонического анализа Фурье позволяет повысить точность ориентации.

### **ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОСТРОИТЕЛЯ МЕСТНОЙ ВЕРТИКАЛИ**

#### **3.1 Разработка макета построителя местной вертикали**

Эмпирическая проверка адекватности теоретических изысканий созданной методики проектирования ИК ПМВ проводится на примере создания макета однокоординатного статического прибора ориентации по Земле. Данная проверка основана на подтверждении работоспособности макета с помощью лабораторного имитационного оборудования.

Проверка работоспособности созданного макета была представлена решением задач в соответствии с методикой проектирования представленной в Главе 2.

##### **3.1.1 Этап 1. Выявление основных характеристик макета**

Решение задачи **этапа 1** разработанной методики расчета и проектирования базируется на определении основных технических характеристик макета согласно требованиям технического задания на разработку.

В соответствии с требованиями к системе ориентации КА, сформулированными в разд. 2.2. в части точности ориентации и диапазоне рабочий высот полета, а также параметрами современных МБМ, приведенными в разд. 2.3 могут быть выделены параметры макета ПМВ, приведенные в таблице 14.



С помощью плоских зеркал, развернутых на угол визирования горизонта Земли  $\varphi$ , полученное изображение перенаправляется на чувствительный слой матричного приемника (рисунок 38).

Параболические и плоские зеркала закрепляются в специальных оправках с помощью клея. Конструкция оправы обеспечивает возможность поворота каждого из плоских зеркал вдоль оси  $Y$ . Оправы устанавливаются на планшайбу с помощью уголковых держателей, также обеспечивающих наклон вдоль оси  $Y$  каждого из оптических каналов.

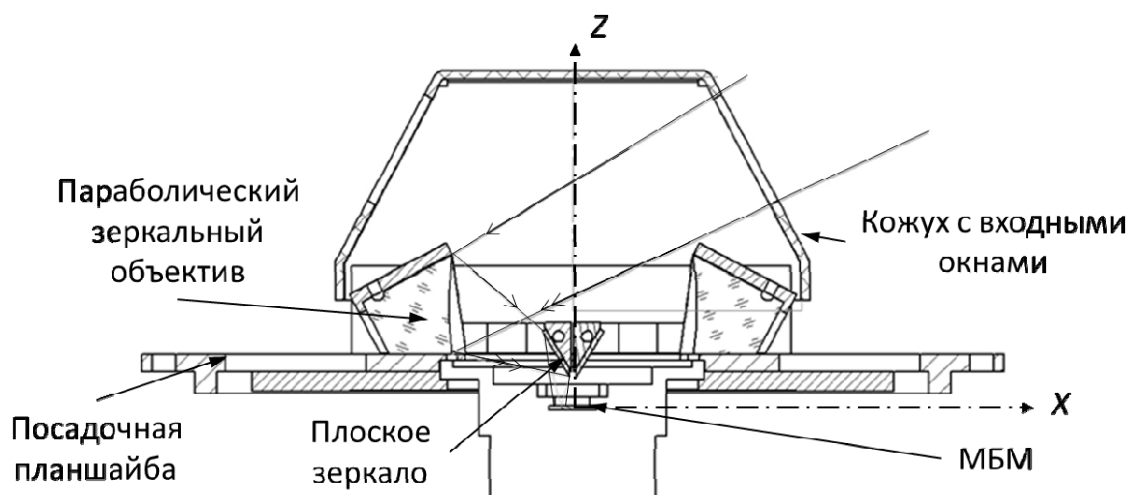


Рисунок 38 – Схема оптического блока макетного образца

В программе Zemax проведен расчет трассировки лучей ОС макета. Результаты приведены в Приложении Г.

Для настройки системы под конкретные высоты полета предварительно оптический блок юстируется с помощью коллиматора в видимом свете подвижками и разворотом параболических и плоских зеркал с целью получить световое пятно от двух объективов на полупрозрачной мишени, устанавливаемой на планшайбу в плоскости изображения, в координатах  $\frac{1}{4} y'$  и  $\frac{3}{4} y'$ , где  $2y'$  – линейный размер чувствительной площадки фотоматрицы (рис 39).

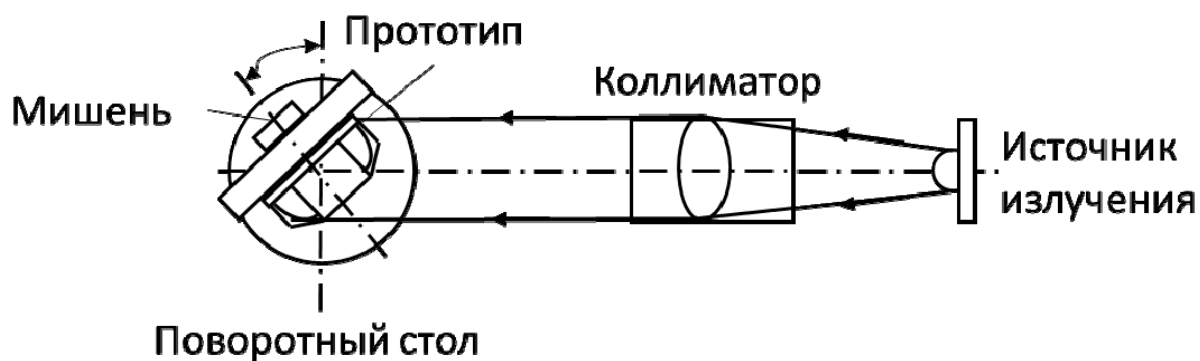


Рисунок 39 – Схема осуществления юстировки ОС макетного образца

Далее на место мишени на планшайбу устанавливается МБМ и с помощью жгутов соединяется с персональным компьютером и в реальном времени передает изображение. Позиционированием МБМ в азимутальном направлении обеспечивается симметричное расположение изображений от каждого из каналов относительно оси  $Y$ .



Рисунок 40 – Макетный образец построителя местной вертикали

В данном разделе выполнены задачи этапа 2 методики, в результате чего определены следующие параметры макета (таблица 15).

Таблица 15 – Оптические параметры объектива макета ПМВ

| Параметр объектива                              | Значение | Параметр ПМВ                                          | Значение    |
|-------------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------|-------------|
| Угловое поле канала объектива $2\omega, ^\circ$ | 10,3     | Диапазон рабочих высот $H$ , км                       | $800\pm 50$ |
| Относительное отверстие $D/f''$                 | 1:1,5    | Угловой размер элемента приемника $\theta, '$         | 1,95        |
| Размер кружка рассеяния $r_{rms}$ , МКМ         | 22       | Предельная суммарная погрешность $\Delta$ не более, ' | 10          |

### 3.1.3 Этап 3. Разработка алгоритма и программного обеспечения вычисления угла отклонения от местной вертикали

Для решения задач **этапа 3** методики проектирования ПМВ обратимся к разд.2.6.2, где представлено два алгоритма определения угла отклонения от местной вертикали – на основе определения смещения энергетического центра изображения и по взаимному положению изображений горизонта Земли.

Для конфигурации однокоординатного макета ПМВ формулы алгоритма определения угла отклонения упрощаются, так как вычисления ведутся только для одного направления – оси  $X$  (рис 41).

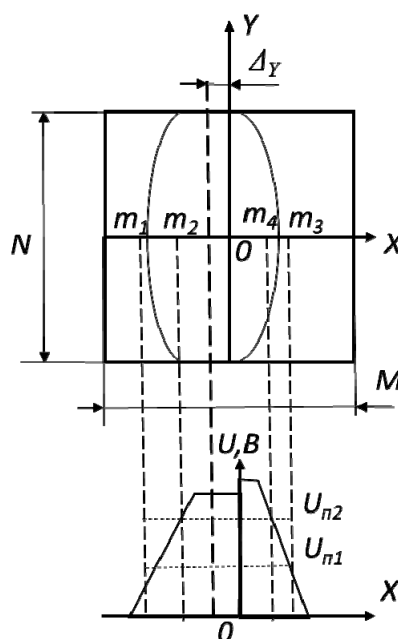


Рисунок 41 – Схема построения изображения горизонта Земли на МБМ макета

Контурный алгоритм предполагает нахождение положения горизонта относительно центра приемного устройства, определяемого по градиенту освещенности изображения для каждого из зон. Поскольку на матрице строится изображение от двух отдельных оптических каналов, она разделяется на две равные зоны по оси  $X$ .

В кадре для каждой опрашиваемой строки внутри зоны изображения находится наибольшее  $U_{max}$  и наименьшие  $U_{min}$  значения сигналов и определяются значения пороговых сигналов  $U_{п1} = 0,333 \cdot U_{max}$  и  $U_{п2} = 0,667 \cdot U_{max}$ .

В кадре с МБМ размерностью  $M \times N$ , (где  $N$  – количество строк в кадре,  $M$  – количество столбцов) отсчитываются от края матрицы номера столбцов (строк)  $m_1, m_2, m_3, m_4$  соответствующих пороговым значениям для каждой строки противоположащих зон МБМ.

Принимая участок между двумя порогами линейным, углы визирования на противоположные участки горизонта могут быть определены по формулам (11), (12). Угловое отклонение от направления на местную вертикаль Земли определяется по формуле (13).

#### **3.1.4 Этап 4. Точностной расчет макета**

С целью оценки методических погрешностей при определении угла отклонения на основе моделей представленных в разделе 2.7.1 смоделированы изображения ИК горизонта на чувствительном слое фотоматрицы (Рисунок 42). Для параметров макета полученных на предыдущем этапе получены следующие величины (таблица 16).

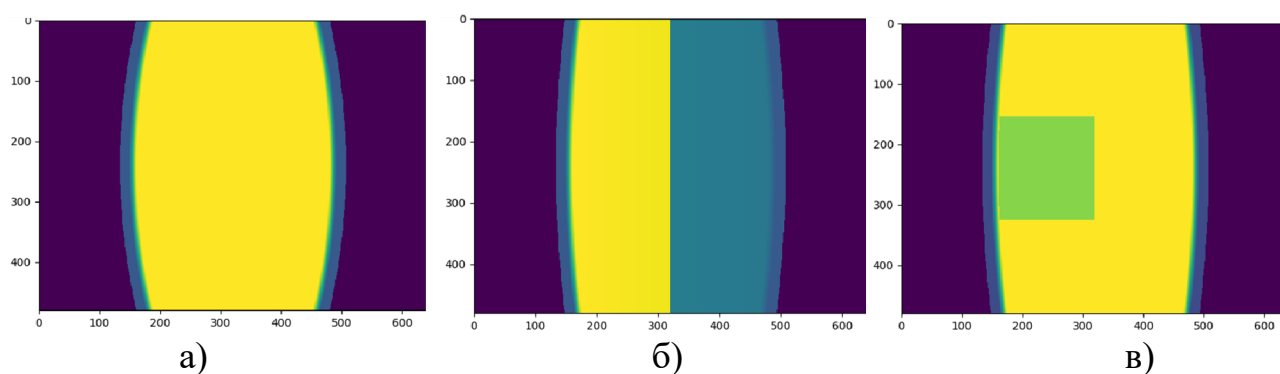


Рисунок 42 – Изображения Земли на МБМ  
а) по профилю атмосферы, б) по моделям А и В, в) по модели С

В сравнении с результатами для ПМВ с широкопольным объективом (таблица 13) влияние яркостных вариаций снижается для меньшего участка визирования горизонта Земли, при этом возрастает влияние погрешности за счет вариаций высоты излучающего слоя атмосферы.

Таблица 16 – Суммарная погрешность макета ПМВ

| Составляющая суммарной погрешности, не более                                                               | Значение, '            |                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------|
| Погрешность юстировки, $\Delta_{\text{ю}}$                                                                 | 1                      |                   |
| Случайная инструментальная погрешность шума приемника излучения, $\sigma_{\text{ш}}$                       | 0,6                    |                   |
| Максимальная методическая погрешность за счет несферичности Земли (для $H = 800$ км), $\Delta_{\text{г}}$  | 9                      |                   |
| Методическая погрешность за счет систематической вариаций яркости Земли (модель В), $\Delta_{\text{я}}$    | Алгоритм поиска        |                   |
|                                                                                                            | энергетического центра | границы горизонта |
|                                                                                                            | 0,5                    | 1                 |
| Методическая погрешность алгоритма, $\Delta_{\text{а}}$                                                    | 1                      | 1                 |
| Случайная методическая погрешность за счет погодных вариаций яркости Земли, $\sigma_{\text{м}}$            | $\sim 0$               |                   |
| Случайная методическая погрешность за счет вариаций высоты излучающего слоя атмосферы, $\sigma_{\text{в}}$ | $\sim 0,3$             |                   |
| Суммарная погрешность, $\Delta_{\text{сум}}$                                                               | 12,7                   |                   |
| Суммарная погрешность с учетом компенсации методической погрешности, $\Delta_{\text{ост}}$                 | 3                      |                   |

### 3.2 Этап 5. Лабораторные испытания макета

Проводимые на этапе 5 разработанной методики расчета и проектирования ПМВ лабораторные испытания макета осуществляется для эмпирической проверки адекватности теоретических результатов решения задач на этапах 1–4.

Цель данного этапа подтвердить эффективность способа построения местной вертикали, заложенного в разработанный ПМВ, алгоритма в качестве основы ПО. Критерием эффективности является соответствие результатов определения угла отклонения осей макета, с реальным изменением наклона относительно ориентира (имитатора).

Лабораторные испытания осуществлялись с помощью контрольно-проверочной аппаратуры, который представляет собой имитатор излучения Земли с посадочной планшайбой для установки макета. Схема проведения лабораторных испытаний (Рисунок 43) включает имитатор, рабочее место оператора, в составе которого имеется персональный компьютер с установленным специальным ПО для отображения и запоминания кадров с МБМ, а также ПО вычисления угла отклонения.

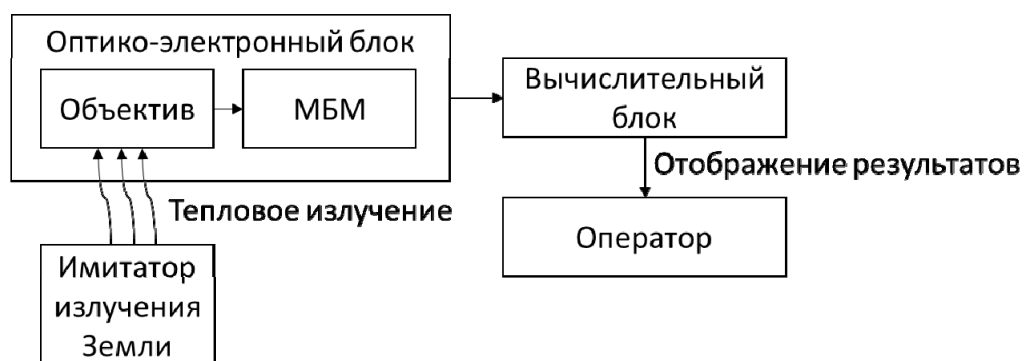


Рисунок 43 – Схема проведения лабораторных испытаний

Имитатор представляет собой сферическое зеркало, с расположенным у основания нагревательным элементом, конструкция обеспечивает угловой размер Земли для выбранной высоты полета и контраст между горячим горизонтом и холодным фоном (космосом), соответствующий реальным значениям. Структурная схема имитатора приведена на рисунке 44.

В данном исследовании с помощью имитатора физически осуществлялся наклон макета ПМВ относительно оси имитатора на различные углы с точностью до  $1'$  и производился дальнейший анализ полученных изображений с целью оценки точностных характеристик макета прибора и создания оптимального алгоритма обработки изображения.

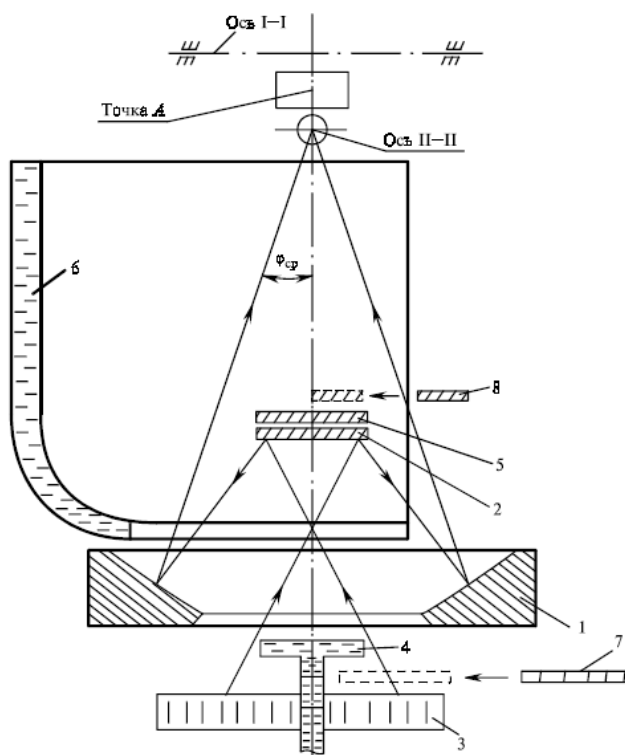


Рисунок 44 – Структурная схема имитатора Земля–атмосфера–космос:  
 1 — зеркальный параболический тор; 2 — плоское зеркало; 3 — нижнее «черное тело»; 4 — охлаждаемый фон; 5 — верхнее «черное тело»; 6 — охлаждаемый фон; 7, 8 — переключаемые излучатели [3]

На имитаторе Земли сделаны с помощью прототипа снимки для следующих угловых положений прибора:  $0^\circ$ ,  $\pm 1'$ ,  $\pm 2'$ ,  $\pm 3'$ ,  $\pm 5'$ ,  $\pm 10'$ ,  $\pm 20'$ ,  $\pm 30'$ ,  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ ,  $\pm 3^\circ$ .

Для трех возможных контрастов «Земля-фон» соответствующих средней 6 мВт/см<sup>2</sup>·ср (ток нагревателя имитатора  $I_1 = 58$  мА  $I_2 = 30$  мА), минимальной ( $I=65$  мА) — 2,5 мВт/см<sup>2</sup>·ср и максимальной (имитатора  $I_1=65$  мА  $I_2=19$  мА) — 9 мВт/см<sup>2</sup>·ср яркости Земли  $L_{max}$ .

Поскольку в имеющемся микроболометрическом модуле осуществлялась автоматическая калибровка сигналов с матрицы с помощью оптико-механического затвора для трех контрастов были получены сопоставимые по крутизне зависимости углов наклона имитатора и вычисляемых углов отклонения.

Одно из изображений, полученное с помощью макета представлено на рисунке 45.

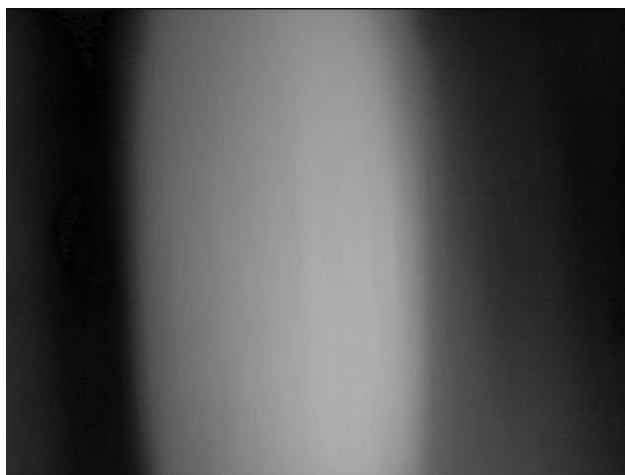


Рисунок 45 – Изображение с микроболометрической матрицы макета

Зависимости рассчитанного с помощью ПО угла отклонения  $\alpha$  от угла наклона имитатора для варианта настроек имитатора с минимальной яркостью Земли и применяемого ПО приведены на рисунке 46.

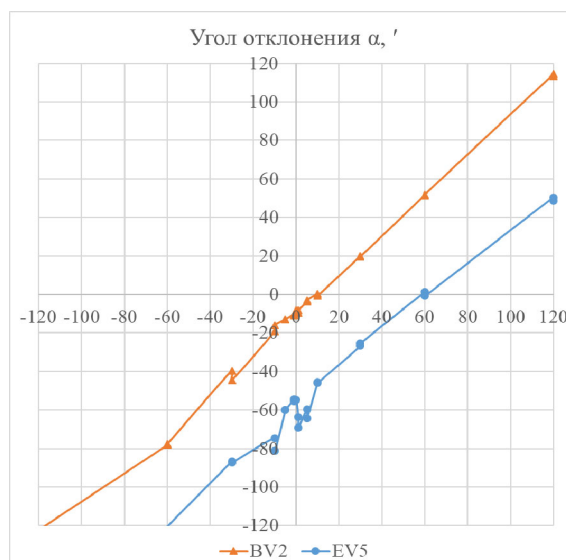


Рисунок 46 – Характеристика вычисления угла отклонения по положению энергетического центра (EV5) и по границам изображения (BV2) от угла наклона имитатора

Смещение по шкале ординат говорит о асимметрии положения центра изображения каждого из каналов, соответствующего углу визирования горизонта  $\varphi$ . Данное отклонение можно определить в ходе испытаний для нулевого наклона имитатора и занести в память ПМВ для последующей компенсации при расчетах. Результаты компенсации и расчет угла  $\alpha$  для частоты опроса строк с шагом в 1, 50 и 100 строк представлены на рисунке 47.

Как видно из графика с уменьшением частоты опроса погрешность определения угла отклонения изменяется незначительно, однако, при работе по реальной Земле низкая частота опроса ( $<10$ ) может привести к возрастанию погрешности при нахождении у горизонта Луны, Солнца.

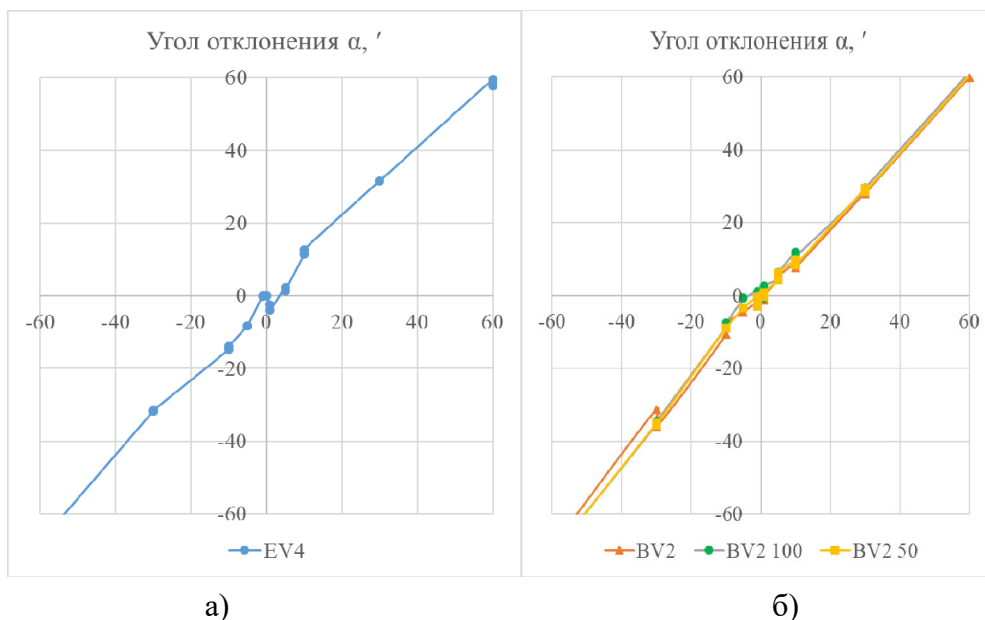


Рисунок 47 – Результаты обработки полученных на имитаторе кадров с макета:  
 а) по положению энергетического центра (EV4),  
 б) по границам изображения (BV2) с шагом обработки по строкам 1, 50, 100

Для предложенных алгоритмов линейная зона измерений составляет порядка  $\Delta\varphi = \pm 60'$ , при угловом поле каждого канала  $10^\circ$ . В пределах линейной зоны измерений, среднеквадратическая погрешность определения угла отклонения  $\Delta\alpha$  составляет не более  $0,3'$ .

### Выводы по главе 3

- 1) Разработана и реализована конструкция макета ПМВ на основе схемы с ортогональными оптическими каналами при заданных технических параметрах.
- 2) По результатам лабораторных испытаний макета ПМВ предельная суммарная погрешность ПМВ составила  $\Delta_{\text{ост}}$  не более  $3'$  с учетом компенсации систематической составляющей методической погрешности по разработанной методике, что удовлетворяет заявленным требованиям и соответствует расчетному значению.

- 3) Проведена отработка алгоритма обработки информации как основы ПО и подтверждена эффективность разработанного алгоритма.
- 4) Результаты испытаний показали, что характеристика преобразования ПМВ линейна в диапазоне углов  $\pm 1^\circ$ , среднеквадратическая погрешность определения угла отклонения  $\Delta\alpha$  составляет не более  $0,3'$ .
- 5) В результате проведенного экспериментального исследования макета подтверждена возможность создания перспективного ПМВ на базе МБМ с ортогональными оптическими каналами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итогом** исследования является разработка научных основ расчета и проектирования нового типа ИК приборов ориентации КА на базе многоэлементных фотоматриц, обеспечивающих повышение эффективности ПМВ по показателям точности, надежности и функциональных возможностей.

### **Основные результаты исследования:**

- Выполнен анализ принципов и схемотехнических решений построения местной вертикали, выявлены преимущества и недостатки существующих приборов ориентации по Земле, что позволило сформировать научную базу для разработки и проектирования ПМВ.
- Предложена оптическая схема прибора ориентации по Земле с ПЗЛК, обеспечивающая работу ПМВ в широком диапазоне высот, а также схема с ортогональными оптическими каналами на основе внеосевых параболических зеркал, позволяющая упростить расположение прибора на корпусе КА. Выбран рабочий спектральный диапазон и приемник излучения, обеспечивающие оптимальное соотношение величины полезного сигнала и влияние вариаций яркости Земли на точностные характеристики прибора.
- Разработан алгоритм и на его основе создано ПО для обработки изображения с фотоматрицы и вычисления угла отклонения от направления на местную вертикаль. Проведена оптимизация алгоритма на основе исследования, моделирования и оценки влияния основных факторов, формирующих погрешность измерения угла отклонения.
- Разработан алгоритм компенсации методической погрешности, связанной с влиянием несферичности и широтно-сезонных вариаций яркости Земли, применимый для всех видов приборов ориентации по Земле и обеспечивающий повышение точности определения угла отклонения.
- Разработана методика расчета и проектирования приборов ориентации по Земле на базе многоэлементных неохлаждаемых фотоматриц, обеспечивающая

снижение погрешности определения угла отклонения от местной вертикали до величин не более  $3'$  за счет оценки и учета влияния методических погрешностей.

— Разработан и изготовлен макет ПМВ, построенный по схеме с ортогональными оптическими каналами на базе многоэлементной неохлаждаемой фотоматрицы, испытания которого подтвердили положения, выносимые на защиту.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования.**

Результаты диссертации могут быть использованы на отечественных предприятиях оптического приборостроения для решения следующих задач:

1. Применение разработанной методики расчёта и проектирования для определения технического облика ПМВ.
2. Использование предложенного алгоритма компенсации влияния несферичности и широтно-сезонных вариаций яркости Земли для существующих ПМВ.
3. Внедрение в практику точностного расчета на основе обработки генерируемых по моделям излучения Земли изображений для приборов с фотоматрицей.

**Перспективы дальнейших исследований** связаны с разработкой отечественных приборов ориентации по Земле с матричными фотоприемными устройствами. При проведении таких разработок, исследования должны быть продолжены в направлении расчетно-конструкторских решений, которые могут приниматься с учетом рекомендаций диссертации.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

|      |                                                     |
|------|-----------------------------------------------------|
| ДГЗ  | – датчик горизонта Земли                            |
| ИК   | – инфракрасный                                      |
| КА   | – космический аппарат                               |
| МБМ  | – микроболометрическая матрица                      |
| НЗ   | – наличие Земли                                     |
| ОС   | – оптическая система                                |
| ОЭП  | – оптико-электронный прибор                         |
| ПЗЛК | – панорамный зеркально-линзовый компонент           |
| ПМВ  | – построитель местной вертикали                     |
| ПО   | – программное обеспечение                           |
| СКО  | – среднеквадратическое отклонение                   |
| УФ   | – ультрафиолетовый                                  |
| PAL  | – panoram annular lens (панорамная кольцевая линза) |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макриденко Л.А. Космический аппарат «Метеор-М» № 2 / Л.А. Макриденко, С.Н. Волков, А.В. Горбунов, Р.С. Салихов, В.П. Ходненко // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – № 5 (Т. 166). – С. 36–48.
2. Кирилин, А. Н. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов. – Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
3. Федосеев В. И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие / В. И. Федосеев, М. П. Колосов. – Москва: Логос, 2007. – С. 176–180.
4. Якушенков Ю. Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом / Ю. Г. Якушенков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79).
5. Ивандиков Я. М. Оптические приборы наведения и ориентации космических аппаратов / Я. М. Ивандиков. – Москва: Машиностроение, 1979. – 208 с.
6. Гандлевский Ю. М. Оценка точности инфракрасных построителей местной вертикали по результатам летных испытаний / Ю. М. Гандлевский, Е. Н. Михайлов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – № 4. – С. 31–38.
7. Мельников А. В. Методика проектирования оптической части сканирующих построителей местной вертикали / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2016. – Т. 155, № 6. – С. 34–38.
8. Пирогов М. Г. Прибор ориентации по Земле для инфракрасного диапазона спектра на основе микроболометрической матрицы / М. Г. Пирогов, В. И.

Варламов, В. В. Гордякин [и др.] // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 11. – С. 22–28.

9. Патент № 155920. Российская Федерация, МПК F16C 32/00. Оптико-электронный прибор ориентации по Земле: № 2015109816/28: заявл. 20.03.2015 : опубл. 20.10.2015 / С. Ю. Зензинов, Н. А. Шаталова, В. М. Румянцев. – 10 с.

10. Патент № 132887. Российская Федерация, МПК G01C 21/24. Прибор ориентации по Земле на основе микроболометрической матрицы: № 2013115232/28: заявл. 05.04.2013: опубл. 27.09.2013 / В. В. Гордякин, Н. М. Стрижова, Н. А. Шаталова. – 7 с.

11. Пирогов М. Г. Стенд для проверки статических широкоугольных приборов ориентации по Земле, работающих в инфракрасном спектральном диапазоне / М. Г. Пирогов, В. И. Варламов, В. В. Гордякин [и др.] // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 11. – С. 22–28.

12. Цыцулин А. К. Теория и практика космического телевидения / А. К. Цыцулин; под ред. А. А. Умбиталиева, А. К. Цыцулина. – Санкт-Петербург: НИИ телевидения, 2017. – 368 с.

13. Бобровский А. И. Облик оптико-электронного комплекса для перспективных космических аппаратов системы орбитального обслуживания / А. И. Бобровский, А. А. Каменев, А. Ю. Онуфрей [и др.] // Радиолокационное исследование природных сред: Материалы XXXIII Всероссийского симпозиума, посвященного 100-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора Ключева Николая Фомича, Санкт-Петербург, 19–20 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 2024. – С. 238–244.

14. Паспорт научной специальности 2.2.6 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» [Электронный ресурс] / Московский государственный университет геодезии и картографии. – Москва, 2023. – 2 с. – URL: [https://www.mii.gai.ru/science/postgraduate/passports/2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы\\_2023.pdf](https://www.mii.gai.ru/science/postgraduate/passports/2.2.6.Оптические_и_оптико-электронные_приборы_и_комплексы_2023.pdf) (дата обращения: 26.12.2025).

15. Мельников А. В. Разработка малогабаритного прибора ориентации космических аппаратов по Земле / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, Д. В. Останина, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 180, № 1. – С. 18–25.
16. Мельников А. В. Методика компенсации систематической погрешности инфракрасных построителей местной вертикали для космических аппаратов дистанционного зондирования Земли / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, В. В. Некрасов, А. Е. Рабовский // Приборы. – 2024. – № 6 (288). – С. 8–14.
17. Мельников А. В. Нутационный датчик ориентации по Земле / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 185, № 6. – С. 3–10.
18. Мельников А. В. Перспективные направления разработки устройств ориентации космических аппаратов по солнечному излучению и инфракрасному горизонту Земли / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 177, № 4. – С. 21–25.
19. Андрианов Ю. Г. Инфракрасные спектры излучения Земли в космос / Ю. Г. Андрианов, И. И. Караваев, Ю. П. Сафронов, В. И. Тулупов. – Москва: Советское Радио, 1973. – 112 с.
20. Тучин М. С. Определение геовертикали по наблюдению лимба Земли / М. С. Тучин // Механика, управление и информатика. – 2011. – № 2. – С. 100–110.
21. Жуков, Б. С. Возможности навигационных измерений по лимбу Земли в видимом и ближнем ИК диапазоне / Б. С. Жуков, С. Б. Жуков, А. А. Форш // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 61–76.
22. Ломака И. А. Построитель местной вертикали для космического аппарата нанокласса / И. А. Ломака, Е. В. Устюгов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2016. – Т. 59, № 6. – С. 466–470.

23. Иванов С. Д. Тепловые приемники неохлаждаемых многомерных тепловизионных матриц. Ч. I. Теплоизолированные элементы / С. Д. Иванов, Э. Г. Косцов // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 79–88.
24. ГОСТ Р 59605 – 2021 Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Термины и определения. – М.: Российский институт стандартизации, 2021 – 42 с.
25. Форг Б. Инфракрасные термодарные матрицы с улучшенным пространственным разрешением, чувствительностью и качеством изображения / Б. Форг, Ф. Германн // Фотоника. – 2014. – № 1. – С. 98–103.
26. Кульчицкий Н. А. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона - современное состояние и тенденции развития / Н. А. Кульчицкий, А. В. Наумов, В. В. Старцев // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – Т. 20, № 10. – С. 613–624.
27. Демьяненко М. А. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники инфракрасного диапазона / М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, И. В. Марчишин, Б. И. Фомин, В. Н. Овсяк // Вестник Научного центра. – 2016. – № 2. – С. 130–135.
28. Васильев В. Н. Системы ориентации космических аппаратов / В. Н. Васильев. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – 310 с.
29. Мельников А. В. Режим поиска для прибора ориентации по Земле, состоящего из четырех датчиков горизонта / А. В. Мельников, Е. Н. Михайлов, А. Е. Рабовский // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2022. – Т. 189, № 4. – С. 28–32.
30. Бабкин П. С. Применение двухточечного метода калибровки для тепловизионных матриц фирмы Ulis / П. С. Бабкин, Ю. Н. Павлов, А. Н. Перов // Радиостроение. – 2015. – № 6. – С. 13–26.
31. Некрасов В. В. Методика оценки структурных характеристик системы управления электромеханическим блоком двигателя-маховика для организации эффективного управления высокодинамичных космических аппаратов

- дистанционного зондирования Земли / В. В. Некрасов, Л. А. Макриденко // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2022. – Т. 186, № 1. – С. 20–29.
32. Прохоров М. Е. Ориентация и навигация в космосе - новые методы и перспективы / М. Е. Прохоров, А. И. Захаров // Физика космоса: тр. 40 Междунар. студ. науч. конф., Екатеринбург, 31 янв.-4 февр. 2011 г. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2011. – С. 170–195.
33. Патент № 2798264. Российская Федерация, МПК G06T 3/20, G01C 21/24. Способ построения местной вертикали: № 2022131373: заявл. 01.12.2022: опубл. 20.06.2023 / Соломатин В. А., Торшина И. П., Откупман Д. Г., Мельников А. В. – 10 с.
34. ГОСТ Р 59159 – 2020 Ракетно-космическая техника. Метрологическое обеспечение разработки. Основные положения. – М.: Стандартиформ, 2021 — 12 с.
35. Макриденко Л. А. КА «Канопус-В» № 1 – первый российский малый космический аппарат высокодетаального дистанционного зондирования Земли нового поколения / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2017. – Т. 156, № 1. – С. 10–20.
36. Макриденко Л. А. Космический комплекс «Ионозонд» / Л. А. Макриденко, С. Н. Волков, А. В. Горбунов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 170, № 3. – С. 40–48.
37. Волоцуев В. В. Космический аппарат дистанционного зондирования Земли с длительным сроком существования на сверхнизких орбитах / В. В. Волоцуев // Актуальные проблемы создания космических систем ДЗЗ: материалы Одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф. – Москва: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2023. – С. 71–72.
38. Мельников А. В. Построение концептуальной модели и формулирование научной задачи по разработке методики навигации и управления низкоорбитальными высокодинамичными космическими аппаратами / А. В. Мельников, В. В. Некрасов // Авиация и космонавтика: тезисы докладов 22-й

Международной конференции, Москва, 20–24 ноября 2023 года. – Москва: Издательство МАИ, 2024. – С. 217.

39. Гебгарт А. Я. Оптические системы некоторых широкоугольных ИК объективов / А. Я. Гебгарт, Е. А. Шатова, В. В. Медведев // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80, № 2. – С. 48–51.

40. Колосов М. П. Оптические системы современных статических приборов ориентации космических аппаратов / М. П. Колосов, А. Я. Гебгарт // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 12. – С. 3–10.

41. Откупман Д. Г. Синтез панорамного объектива тепловизионной системы среднего ИК-диапазона спектра / Д. Г. Откупман, Л. Н. Тимашова // Контенант. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 63–74.

42. Беляков Г. Ф. Панорамные системы кругового обзора / Г. Ф. Беляков, А. А. Багдасаров, М. А. Ган // Прикладная оптика – 2010: тр. междунар. конф. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 231–232.

43. Мельников А. В. Построитель местной вертикали с панорамным зеркально-линзовым объективом / А. В. Мельников, В. А. Соломатин, А. Е. Рабовский // Фотоника. – 2017. – № 6 (66). – С. 86–96.

44. Соломатин В. А. Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками излучения / В. А. Соломатин. – Москва: Машиностроение, 1992. – 128 с.

45. Куртов А. В. Панорамный объектив «Сакура» / А. В. Куртов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2000. – № 3. – С. 129–140.

46. Соломатин В. А. Разработка методики синтеза панорамных оптических систем на основе зеркально-линзовых компонентов / В. А. Соломатин, Н. А. Путилин, И. П. Торшина, А. Н. Путилин // Оптический журнал. – 2024. – Т. 91, № 12. – С. 70–83.

47. Старосотников Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н. О. Старосотников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. – 2018. – № 1. – С. 79–86.

48. Мельников А.В. Разработка статического прибора ориентации космического аппарата по инфракрасному горизонту Земли с ортогональными оптическими каналами / А.В. Мельников, Е.Н. Михайлов, А.Е. Рабовский // Приборы. – 2025. – № 11 (305). – С. 16–21.
49. Якушенков Ю. Г. Проектирование оптико-электронных приборов: учебник для вузов / Ю. Б. Парвулюсов, С. А. Родионов, В. П. Солдатов [и др.]; под ред. Ю. Г. Якушенкова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Логос, 2000. — 486 с.
50. Гандлевский Ю. М. Оценка пространственного распределения неоднородностей излучения и влияния несферичности поверхности Земли по результатам летных испытаний КА «Метеор-М» № 2-2 / Гандлевский Ю. М. [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2019. – Т. 173, № 6. – С. 17–22.
51. Рабовский А. Е. Физические параметры излучения небесных тел и оптико-электронные устройства для определения ориентации КЛА / А. Е. Рабовский // Исследование космического пространства. – 1972. – Т. 3.
52. Денисов А. В. Моделирование оптико-электронных систем космического назначения / А. В. Денисов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2015. – Т. 58, № 11. – С. 882–889.
53. Vertat I. Earth's thermal radiation sensors for attitude determination systems of small satellites / I. Vertat // Contrib. Astron. Obs. Skalnat'e Pleso. – 2017. – Vol. 47. – P. 157–164.
54. Modenini D. Attitude Sensor from Ellipsoid Observations: A Numerical and Experimental Validation / D. Modenini, A. Locarini, M. Zannoni // Sensors. – 2020. – Vol. 20, no. 2. – P. 433. – DOI: 10.3390/s20020433.
55. Van Herwaarden A. W. Low-cost satellite attitude control sensors based on integrated infrared detector arrays / A. W. van Herwaarden // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2001. – Vol. 50, no. 6. – P. 1524–1529. – DOI: 10.1109/19.982939.

56. Cahoy K. Attitude Determination for Small Satellites with Infrared Earth Horizon Sensors / K. Cahoy, A. Marinan, T. Nguyen // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2018. – Vol. 55, no. 6. – P. 1466–1475.
57. Kühl Christopher T. F. Combined earth- /star sensor for attitude and orbit determination of geostationary satellites : Dissertation / Christopher T. F. Kühl ; Betreuer: Klaus H. Well. – Stuttgart : Universität Stuttgart, 2005. – XVI, 196 p.
58. Janson, S. Attitude control on the picosatellite solar cell testbed-2 / S. Janson, B. Hardy, A. Chin, D. Rumsey, D. Ehrlich, and D. Hinkley // 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, UT, USA, 2012.
59. Kikuya Y. Attitude Determination Algorithm Using Earth Sensor Images and Image Recognition / Y. Kikuya, Y. Iwasaki, Y. Yatsu, S. Matunaga // *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*. – 2021. – Vol. 64, no. 2. – P. 82–90.
60. Saadat A. Attitude Determination with Self-Inspection Cameras Repurposed as Earth Horizon Sensors / A. Saadat // *Proceedings of the Small Satellite Conference*. – Logan, UT : Utah State University, 2022. – 8 p.
61. Bankston C. D. A satellite-based imaging system for attitude determination and remote sensing / C. D. Bankston, J. A. Gilbert // *Proceedings of the SEM Spring Conference and Exhibits*, Grand Rapids, Michigan, June 12–15, 1995. – P. 17–25.
62. Neumann N. P12 – Comparison of Pyroelectric and Thermopile Detectors / N. Neumann, V. Banta // *Proceedings IRS 2013*. – Nürnberg, 2013. – P. 139–143.
63. Boston Electronics. Thermopiles for temperature measurement and gas detection : product catalog [Электронный ресурс] / Boston Electronics. – Brookline, MA, [2021]. – 29 p. – URL: <https://www.boselec.com/wp-content/uploads/Resources/Heimann-Thermopiles-12-06-21.pdf> (дата обращения: 30.01.2026).
64. Lehner D. L. Characterization of the panoramic annular lens / D. L. Lehner, A. G. Richter, D. R. Matthys, J. A. Gilbert // *Experimental Mechanics*. – 1996. – Vol. 36, no. 4. – P. 333–338.

65. Braun B. Image processing based horizon sensor for estimating the orientation of sounding rockets, launch vehicles and spacecraft / B. Braun, J. Barf // CEAS Space Journal. – 2022. – Vol. 14, No. 3. – P. 509–533.

## СПИСОК ИЛЛЮСТРАТИВНОГО МАТЕРИАЛА

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Рисунок 1 – Геометрическая схема определения местной вертикали [5].....                                                                                                        | 11 |
| Рисунок 2 – Варианты характеристик управляющих сигналов ПМВ [3].....                                                                                                           | 13 |
| Рисунок 3 – Схема оптико-механического сканирования ПМВ [20].....                                                                                                              | 13 |
| Рисунок 4 – Оптическая схема прибора STS02 [55] .....                                                                                                                          | 15 |
| Рисунок 5 – Схема расположения датчиков ПМВ PSSCT-2 [58] .....                                                                                                                 | 17 |
| Рисунок 6 – Структурная схема ПМВ на основе микроболометрической матрицы [10] .....                                                                                            | 19 |
| Рисунок 7 – Зависимость монохроматического коэффициента поглощения атмосферы Земли и некоторых ее компонентов от длины волны [19].....                                         | 21 |
| Рисунок 8 – Кривая пропускания атмосферы в области 0,6 — 14 мкм [19].....                                                                                                      | 23 |
| Рисунок 9 – Функциональная схема прибора ориентации по Земле [3].....                                                                                                          | 28 |
| Рисунок 10 – Этапы методики проектирования ПМВ.....                                                                                                                            | 32 |
| Рисунок 11 – Зависимость величины углового размера Земли $2\varphi$ от высоты орбиты.....                                                                                      | 35 |
| Рисунок 12 – а) Оптическая схема ИК объектива для ПМВ и б) диаграмма пятен рассеяния [39] .....                                                                                | 40 |
| Рисунок 13 – Схемы оптических систем для панорамного обзора и картина кольцевых изображений на матрицах [42].....                                                              | 41 |
| Рисунок 14 – Схема PAL-линзы с передающим объективом [46].....                                                                                                                 | 42 |
| Рисунок 15 – Цилиндрическая проекция пространства [48].....                                                                                                                    | 43 |
| Рисунок 16 – Полярное изображение на матрице МБМ [64].....                                                                                                                     | 44 |
| Рисунок 17 – Схема панорамной оптической системы на основе PAL для среднего ИК диапазона. (а) Трассировка лучей, (б) кружки рассеяния. Размер окон графика 100 мкм [46]....    | 45 |
| Рисунок 18 – Конструкция ПМВ с четырьмя ортогональными оптическими каналами .....                                                                                              | 47 |
| Рисунок 19 – Изображение горизонта на чувствительной площадке .....                                                                                                            | 48 |
| Рисунок 20 – Характеристика преобразования прибора .....                                                                                                                       | 48 |
| Рисунок 21 – Схема хода луча в объективе с параболическим зеркалом.....                                                                                                        | 49 |
| Рисунок 22 – Схема построения изображения Земли на матрице.....                                                                                                                | 54 |
| Рисунок 23 – Схема поиска многопольного ПМВ .....                                                                                                                              | 55 |
| Рисунок 24 – Уровни сигналов на матрице широкопольного ПМВ при отклонении от местной вертикали [33].....                                                                       | 58 |
| Рисунок 25 – Определение положения горизонта на матрице .....                                                                                                                  | 59 |
| Рисунок 26 – Определение яркостной поправки по градиенту освещенности матрицы приемника .....                                                                                  | 59 |
| Рисунок 27 – Определение положения горизонта на матрице ПМВ с несколькими оптическими каналами.....                                                                            | 61 |
| Рисунок 28 – К расчету погрешности из-за несферичности Земли [50] .....                                                                                                        | 64 |
| Рисунок 29 – К расчету погрешности из-за несферичности Земли [52].....                                                                                                         | 65 |
| Рисунок 30 – Широтно-сезонные вариации энергетической яркости излучения Земли [6].....                                                                                         | 66 |
| Рисунок 31 – Профиль энергетической яркости ИК-горизонта [6].....                                                                                                              | 66 |
| Рисунок 32 – Модели энергетической яркости Земли а) $A$ , б) $B$ [6].....                                                                                                      | 67 |
| Рисунок 33 – Модель $C$ случайных погодных вариаций энергетической яркости и высоты атмосферы [6] .....                                                                        | 68 |
| Рисунок 34 – Телеметрия выходных сигналов прибора по каналам тангажа $T$ , крена $K$ и высота $H$ КА относительно плоскости экватора [16] .....                                | 71 |
| Рисунок 35 – Графики сигналов углов отклонения при вращении КА а) функция тангажа $T$ и аппроксимирующая кривая $T'$ , б) результирующая функция тангажа $\Delta T$ [16] ..... | 72 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Рисунок 36 – Изображения Земли на МБМ а) по профилю атмосферы, б) по модели А, в) по модели В, г) по модели С .....                                                                                                                                             | 77 |
| Рисунок 37 – Параметры внеосевого параболического объектива .....                                                                                                                                                                                               | 85 |
| Рисунок 38 – Схема оптического блока макетного образца .....                                                                                                                                                                                                    | 86 |
| Рисунок 39 – Схема осуществления юстировки ОС макетного образца .....                                                                                                                                                                                           | 87 |
| Рисунок 40 – Макетный образец строителя местной вертикали .....                                                                                                                                                                                                 | 87 |
| Рисунок 41 – Схема построения изображения горизонта Земли на МБМ макета .....                                                                                                                                                                                   | 88 |
| Рисунок 42 – Изображения Земли на МБМ а) по профилю атмосферы, б) по моделям А и В, в) по модели С .....                                                                                                                                                        | 90 |
| Рисунок 43 – Схема проведения лабораторных испытаний .....                                                                                                                                                                                                      | 91 |
| Рисунок 44 – Структурная схема имитатора Земля–атмосфера–космос: 1 — зеркальный параболический тор; 2 — плоское зеркало; 3 — нижнее «черное тело»; 4 — охлаждаемый фон; 5 — верхнее «черное тело»; 6 — охлаждаемый фон; 7, 8 — переключаемые излучатели [3].... | 92 |
| Рисунок 45 – Изображение с микроболометрической матрицы макета .....                                                                                                                                                                                            | 93 |
| Рисунок 46 – Характеристика вычисления угла отклонения по положению энергетического центра (EV5) и по границам изображения (BV2) от угла наклона имитатора .....                                                                                                | 93 |
| Рисунок 47 – Результаты обработки полученных на имитаторе кадров с макета: а) по положению энергетического центра (EV4), б) по границам изображения (BV2) с шагом обработки по строкам 1, 50, 100 .....                                                         | 94 |
| Таблица 1 – Характеристики инфракрасных приемников излучения .....                                                                                                                                                                                              | 25 |
| Таблица 2 – Основные технические характеристики низкоорбитальных КА .....                                                                                                                                                                                       | 36 |
| Таблица 3 – Основные требования к ПМВ при разработке методики расчета и проектирования .....                                                                                                                                                                    | 36 |
| Таблица 4 – Параметры микроболометрической матрицы [26] .....                                                                                                                                                                                                   | 38 |
| Таблица 5 – Оптические характеристики трехлинзового объектива [42] .....                                                                                                                                                                                        | 40 |
| Таблица 6 – Параметры панорамной ОС [46] .....                                                                                                                                                                                                                  | 45 |
| Таблица 7 – Параметры ПМВ с панорамным объективом .....                                                                                                                                                                                                         | 46 |
| Таблица 8 – Параметры параболических объективов .....                                                                                                                                                                                                           | 50 |
| Таблица 9 – Результаты расчета углов отклонения от вертикали для разных параметров параболоида .....                                                                                                                                                            | 51 |
| Таблица 10 – Параметры ПМВ с панорамным объективом .....                                                                                                                                                                                                        | 75 |
| Таблица 11 – Погрешность за счет несферичности Земли [52] .....                                                                                                                                                                                                 | 79 |
| Таблица 12 – Результаты обработки сгенерированных изображений .....                                                                                                                                                                                             | 80 |
| Таблица 13. – Суммарная погрешность ПМВ с оптико-механическим сканированием и ПМВ статического типа с панорамным объективом .....                                                                                                                               | 81 |
| Таблица 14 – Требования к параметрам макета ПМВ .....                                                                                                                                                                                                           | 85 |
| Таблица 15 – Оптические параметры объектива макета ПМВ .....                                                                                                                                                                                                    | 88 |
| Таблица 16 – Суммарная погрешность макета ПМВ .....                                                                                                                                                                                                             | 90 |

## Приложение А

### Текст программы моделирования изображения Земли на фотоматрице, написанный на языке программирования Python

```

from pathlib import Path #служебные библиотеки
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.ndimage import gaussian_filter1d
import pandas as pd
from PIL import Image

# Исходные данные
N = int(500 / 2)
x = 17 # размер пикселя
H = 800 # высота полета
R = 6371
hco = 60
ha = 50
rms = 20
la = 8 - 14
La = 1
Lmax = 4
L1 = Lmax
L2 = L1
w0 = math.radians(24.2)#половина темнового поле
w = math.radians(95) # половина углового поля
dr = 17 # переменная интегрирования (пиксель)

# Вычисление
T = math.sqrt(rms ** 2 - dr ** 2) # чувствительность в пределах кружка рассеяния

```

$\text{delta} = N / w$  # размер матрицы к угловому полю

$\text{PHI0} = \text{math.asin}((R) / (R + H))$

$\text{PHIT} = w0$

$\text{PHI1} = \text{PHI0} + \text{math.asin}((h_a) / (R + H))$

$\text{PHI2} = \text{PHI1} + \text{math.asin}((h_{co}) / (R + H))$

#  $\text{PHI3} = \text{math.asin}((R+h_g)/(R+H))$

$\text{PHI4} = w$

$\text{PHI0} = \text{int}(\text{delta} * \text{PHI0})$

$\text{PHIT} = \text{int}(\text{delta} * \text{PHIT})$

$\text{PHI1} = \text{int}(\text{delta} * \text{PHI1})$

$\text{PHI2} = \text{int}(\text{delta} * \text{PHI2})$

$\text{PHI4} = \text{int}(\text{delta} * \text{PHI4})$

$\text{print}(\text{"PHI0="}, \text{PHI0}, \text{"PHI1="}, \text{PHI1}, \text{"PHI2="}, \text{PHI2}, \text{"PHI4="}, \text{PHI4})$

$\text{row} = []$

$\text{line} = []$

$\text{def circle}(m, x):$

$\text{if } x > 0:$

$\text{if } m < \text{PHI2}:$

$L = L_a$

$\text{if } m \text{ in range}(0, \text{PHI1}):$

$L = L_2 + (m - \text{PHI0}) / (\text{PHI1} - \text{PHI0}) * (L_a - L_2)$

$\text{if } m \text{ in range}(0, \text{PHI0}):$

$L = L_1$

$\text{if } m \text{ in range}(0, \text{PHIT}):$

$L = 0$

```

else:
    L = 0
else:
    if m < PHI2:
        L=La
        if m in range(0, PHI1):
            L = La + (m - PHI1) / (PHI0 - PHI1)*(L1-La)
            if m in range(0, PHI0):
                L = L1
                if m in range (0, PHIT):
                    L=0
        else:
            L = 0
    return(L)

inclination = [-240, -120, -60, -30, -10, -5, -3, -1, 0, 1, 3, 5, 10, 30, 60, 120,240]
print("PHI0=", PHI0, 'PHIT=', PHIT,"PHI4=", PHI4 )

offset = []
for k in range (len(inclination)):
    x0 = inclination[k]*math.pi/(60*180)*delta
    print('k=', k, x0)
    offset.append(x0)
#print ('inclination=', inclination, 'offset=', offset)

arr = []
npa = []
x0 = 0
y0 = 0
result = []
myself = Path(__file__).resolve()

```

```

path_b = str(myself.parents[0]) + '\\ДАННЫЕ/'
for n in range (len(offset)):
    x0 = offset[n]
    npa = []
    arr = []
    print ('in inclination[n]=', inclination[n], 'offset[n]=', x0)
    for y in range(-N, N+1):
        line=[]
        for x in range(-N, N+1):
            r = int(math.sqrt((x+x0)**2+(y+y0)**2))
            L = int(circle(r, x))
            line.append(L)
# Гауссово сглаживание
    sigma = rms/x
    smoothed_line = gaussian_filter1d(line, sigma=sigma)
    row.append (x+N)
    arr.append(line)
npa = np.asarray(arr, dtype=np.float32)

np.savetxt(path_b + str(inclination[n])+'_PAL.txt', npa)

int_array = npa.astype(int)
plt.imshow(npa, interpolation='nearest')
plt.show()

```

## Приложение Б

### Текст программы EV вычисления смещения энергетического центра изображения, написанный на языке программирования Python

```
import cv2 # OpenCV
import numpy as np # для математических вычислений
import matplotlib.pyplot as plt # для вывода изображения
from PIL import Image, ImageDraw, ImageFont
from statistics import mean
import glob
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy import loadtxt
import csv
from sys import argv
import shutil
from pathlib import Path
import os
from os.path import sep
import pandas as pd

programm_name = str(__file__.split(sep)[-1])
programm_name = programm_name.replace('.py', '')
print('programm_name=', programm_name)

# Указываем путь к директории
myself = Path(__file__).resolve()
path_b = str(myself.parents[1]) + '\Результат/'
print ('path_b=', path_b)
test = os.listdir (path_b)
```

```

print(test)
for item in test:
    if item.endswith(".txt"):
        os.remove(os.path.join(path_b, item))
path_a = str(myself.parents[1]) + '\ДАННЫЕ/'
print ('path_a=', path_a)
for file in os.listdir (path_a):
    if file.endswith(".png") or file.endswith(".txt"):
        #print(file)
        shutil.copyfile(path_a+file, path_b+file)
#Начало
files = glob.glob("*.txt")
print (files)#список всех файлов txt в директории с программой
results = [] #пустой список значений отклонений
inclinations = [] #пустой список значений наклонов имитатора
TETA = 23 #угловой размер пикселя
for k in range (len(files)):
    name = files[k]
    print ("name=", name)
    inclinations.append( float(name.split("_")[0]))#добавить в названии файлов все что
до "_"
    #открыть текстовый файл как NumPy массив сигналов матрицы
    img = np.loadtxt(name)
    print (img)
    size = img.shape # Картеж разрешения изображения (размер массива)
    size = [*size,]#распаковываем кортеж () как список []
    print ('size=', size)
    #print ('img=',img)
    ending = int(img.shape[1])-1
    row = int(size[0])-1 # диапазон от 0 до row строк для обработки

```

```

column = int(img.shape[1]) # диапазон от 0 до column столбцов для обработки
print ('row=', row)
middleline = int(size[1]/2)#средний столбец матрицы
print('middleline=',middleline)
plt.imshow(img, interpolation='nearest')
plt.show()
#приводим к одному уровню энергий
img = np.loadtxt(name)
minc1 = img.min()
maxc1 = img.max()
thresh = 0.35* img.max()
print ('thresh=', thresh)
img[img > thresh] = img.max()
plt.imshow(img, interpolation='nearest')
plt.show()
X = []
x = 0
S = np.sum(img, axis=0)#суммирование элементов по столбцам n от 0 до -N/2
M = int(len(S)/2)
print('S=', S,'sumS=', sum(S), 'M/2=', M)#вывод суммы отдельного столбца,
суммы всех столбцов
for m in range (-M, M):
    x = S[m+M]*(m) #придаем весовые коэффициенты
    #print('m=', m,'x=',x)
    X.append (x)
print('m=', m,'x=',x)
Dx = sum(X)/sum(S)*TETA
print('sum(X)=', sum(X),'Dx2=',Dx)
results.append (Dx)
print ('result=', results)

```

```
# Создание таблицы
df = pd.DataFrame({
    'X (row)': inclinations,
    'Y (line)': results,
})
# Печать таблицы в консоль
print(df.to_string(index=False))
# Экспорт в Excel
excel_filename = programm_name + ".xlsx"
df.to_excel(excel_filename, index=False)
```

## Приложение В

**Текст программы BV смещения центра изображения по положению границ,  
написанный на языке программирования Python**

```
import cv2 # OpenCV
import numpy as np # для математических вычислений
import matplotlib.pyplot as plt # для вывода изображения
from PIL import Image, ImageDraw, ImageFont
from statistics import mean
import glob
import matplotlib.pyplot as plt
from numpy import loadtxt
import csv
from sys import argv
import shutil
from pathlib import Path
import os
from os.path import sep
import pandas as pd

programm_name = str(__file__.split(sep)[-1])
programm_name = programm_name.replace('.py', '')
print('programm_name=', programm_name)

# Указываем путь к директории
myself = Path(__file__).resolve()
path_b = str(myself.parents[1]) + '\Результат/'
print ('path_b=', path_b)
test = os.listdir (path_b)
```

```
print(test)
```

```
path_a = str(myself.parents[1])+ '\\Данные/'
```

```
print ('path_a=', path_a)
```

```
for file in os.listdir (path_a):
```

```
    if file.endswith(".png") or file.endswith(".txt"):
```

```
        #print(file)
```

```
        shutil.copyfile(path_a+file, path_b+file)
```

```
#Поиск в строке "с" элемента с сигналом, равным порогам
```

```
def thresh(c, i):
```

```
    h=0
```

```
    if i == 1:
```

```
        #print('max(c)=',max(c))
```

```
        if max(c)>0:
```

```
            minc = min(c)
```

```
            maxc = max(c)
```

```
            thresh = minc + 0.5*(maxc-minc) # порог 1
```

```
        else:
```

```
            thresh = 0
```

```
    else:
```

```
        if max(c)>0:
```

```
            minc = min(c)
```

```
            maxc = max(c)
```

```
            thresh = minc + 0.6*(maxc-minc)
```

```
        else:
```

```
            thresh = 0
```

```
    #print('thresh=',thresh)
```

```
t = min(c, key=lambda x: abs(x-thresh))#Поиск ближайшего значения сигнала по
минимальному отклонению x от заданного
```

```
#пересчет для нахождения номера столбца
```

```
if thresh == 0:
```

```
    h = 0
```

```
else:
```

```
    for l in range(len(c)):
```

```
        if c[l] >= thresh:
```

```
            h = l
```

```
            break
```

```
        else:
```

```
            l += 1
```

```
    #print ('minc=', minc,'maxc=', maxc)
```

```
    return h
```

```
#Вычисления
```

```
files = glob.glob("*.txt")
```

```
print (files)#список всех файлов txt в директории с программой
```

```
results = [] #пустой список значений отклонений
```

```
inclinations = [] #пустой список значений наклонов имитатора
```

```
TETA = 35 #пересчет пикселей в угловые минуты
```

```
for k in range (len(files)):
```

```
    name = files[k]
```

```
    print ("name=", name)
```

```
    inclinations.append( float(name.split("_")[0]))#добавить в названии файлов все что
до "_"
```

```
    #открыть текстовый файл как NumPy массив
```

```
    img = loadtxt(name)
```

```
    ('img=', img)
```

```
    size = img.shape # Картеж разрешения изображения (размер массива)
```

```

size = [*size,]#распаковываем кортеж () как список []
middleline = int(img.shape[1]/2)#средний столбец матрицы
ending = int(img.shape[1])-1
row = int(img.shape[0]) # диапазон от 0 до row строк для обработки
w1,w2,w0,w3 = [],[],[],[] #пустые списки для значений границ горизонта, центра
и отклонения

#print('img 480=', img[0,479])

def borderline(row, mid): #поиск пороговых столбцов
    b1, b2 = [row], [row]#первая координата порогового пикселя-номер строки

    #print('row=', row,'ending=', ending,'middleline=', middleline)
    c = img[row, 0: ending:1]#строка левой зоны кадра- от к края к центру с шагом
1
    #print('c1=',c.shape, 'c1=', c[239])
    #print('c1=',c)
    m1 = thresh (c, 1) #ищем номер первого порогового пикселя по строке справа
    m2 = thresh (c, 2)
    horizon_1 = m1+(m2-m1)/2#вводим поправку
    #print('row=', row,'m1=',m1,'m2=',m2)
    c = img[row, ending:0:-1]#строка правой зоны кадра от края к центру с шагом
-1
    #print('c2=',c.shape, 'c2=', c[ 239])
    #print('c2=',c)
    m3 = thresh (c, 1) #ищем номер первого порогового пикселя по строке справа
    m4 = thresh (c, 2)
    #print('row=', row,'m3=',m3,'m4=',m4)
    horizon_2 = m3 + (m4-m3)/2
    z = [row]#первая координата столбца-направления на местную вертикаль
    dim = (horizon_2-horizon_1)/2#отклонение от направления на местную
вертикаль в пикселях

```

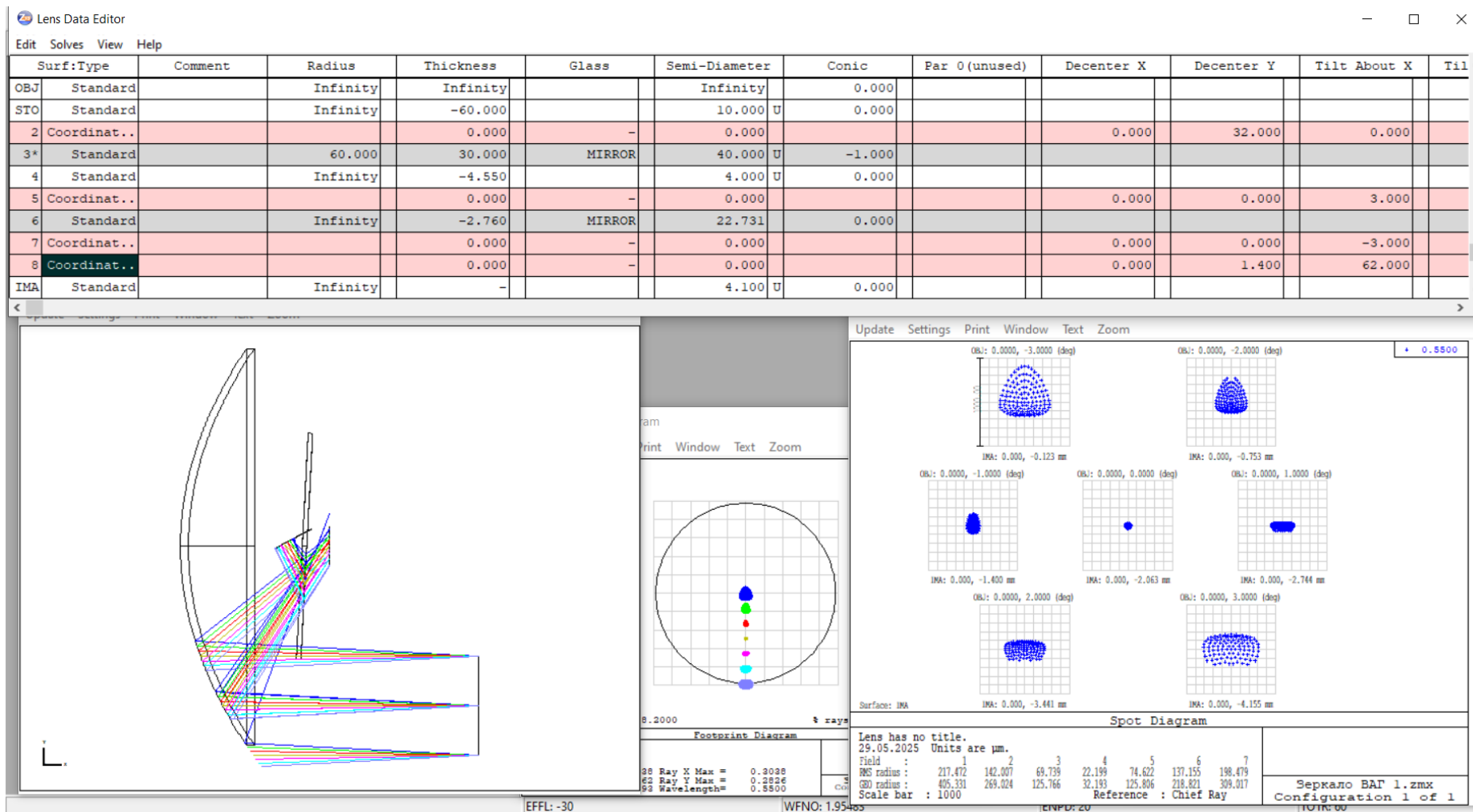
```

if horizon_1 < 0:
    print('ALARM b1<0', n)
    horizon_1 = 0
if horizon_2 > ending:
    print('ALARM b2>end', n)
    horizon_2 = ending
return dim
step = 1
for n in range (0,row,step): #опрос пикселей в диапазоне от step до row с шагом
step
    #print('n=',n)
    #Запускаем поиск границ
    dim = borderline(n, middleline)
    #print ('dim',n, dim)
    w3.append (dim)
print ('step 2')
#print ('dimentions', w3)
cent_avg = round(mean(w3), 3) #осреднение по всем строкам
results.append ( cent_avg*TETA)
print ('step 3')
# Создание таблицы
df = pd.DataFrame( {
    'X (row)': inclinations,
    'Y (line)': results,
})
# Печать таблицы в консоль
print(df.to_string(index=False))
# Экспорт в Excel
excel_filename = programm_name + ".xlsx"
df.to_excel(excel_filename, index=False)

```

## Приложение Г

### Схема хода лучей через объектив макета построителя местной вертикали, полученная в программе Zemax

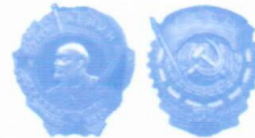


## Приложение Д

### Акт об использовании результатов диссертационной работы



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. НОСИФЬЯНА»  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



Хороший тупик, д. 4, стр. 1, Москва, 107078  
Тел.: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10; Факс: (495) 624-86-65, (495) 366-26-38  
e-mail: info@vniiem.ru; http://www.vniiem.ru  
ОКПО 04657139; ОГРН 5117746071097; ИНН/КПП 7701944514/770101001

№ \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по  
космическим комплексам

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

А.Б. Желубенкова



09 2025 г.

А К Т

об использовании результатов  
кандидатской диссертационной работы

Мельникова Александра Викторовича

Комиссия в составе:

председатель – главный конструктор оптико-электронных приборов  
ориентации, к.т.н., Михайлов Евгений Николаевич,

члены комиссии: заместитель главного конструктора по системам  
ориентации, к.т.н., Беленький Арон Давыдович и начальник отдела  
создания средств ориентации Умов Роман Дмитриевич  
составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы  
Мельникова Александра Викторовича «Разработка и исследование  
инфракрасных приборов ориентации по Земле на основе матричных  
фотоприемных устройств», реализованы путем внедрения в

171987

ОКР "Ионозонд-2025" (Госконтракт №016-0229/16/260 от 28.11.2016г.) при создании программного обеспечения контроллера системы ориентации космических аппаратов «Ионосфера-М», созданных АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Разработанный в диссертационной работе алгоритм на основе анализа Фурье позволяет определить систематическую составляющую методической погрешности, связанную с несферичностью и широтно-сезонными вариациями яркости излучения Земли, для всех типов построителей местной вертикали.

Эффективность предложенного алгоритма была экспериментально подтверждена сравнением показаний построителя местной вертикали с расчетной ориентацией по измерениям звездных датчиков и аппаратуры спутниковой навигации во время летных испытаний КА «Ионосфера-М» № 3, 4.

Использование указанных результатов позволило:

повысить точность ориентации КА серии «Ионосфера-М», путем алгоритмической компенсации систематической методической погрешности построителей местной вертикали Земли, связанной с несферичностью.

#### ПРЕДСЕДАТЕЛЬ КОМИССИИ

Главный конструктор оптико-электронных приборов ориентации, к.т.н.



Е. Н. Михайлов

#### ЧЛЕНЫ КОМИССИИ:

Заместитель главного конструктора по системам ориентации, к.т.н.



А. Д. Беленький

Начальник отдела создания средств ориентации



Р. Д. Умов.