

Расширение возможностей оптико-электронных комплексов для дистанционного зондирования Земли

Евгений Сечак, Анатолий Демин

Создание высокоразрешающих оптико-электронных комплексов (ОЭК) дистанционного зондирования поверхности Земли направлено на увеличение физической светосилы оптической системы и увеличение алгоритмической эффективности работы системы приёма и преобразования информации. Увеличение физической светосилы ОЭК возможно за счёт увеличения площади входного зрачка и интегрального коэффициента пропускания оптической системы, что достигается увеличением диаметра входного зрачка и применяемыми оптическими материалами с соответствующим просветляющим покрытием. Проблемы создания крупногабаритных зеркально-линзовых телескопов являются уменьшение поверхностной плотности главного зеркала как основного массогабаритного компонента оптической системы телескопа и массогабаритные ограничения, накладываемые как технологическими трудностями, так и системой доставки аппарата в космос. Учитывая, что как правило отражающая поверхность главного зеркала – это обычные поверхности второго порядка, обладающие симметрией вращения относительно оси, проходящей через его вершину, то решение проблем достигается, в частности, применением технологии облегчённых зеркал позволяющая создавать главные зеркала телескопов, для которых $S^2/V > 7$, где S – площадь зеркала, V – объём зеркала. Обеспечение требуемых параметров ОЭК по разрешающей способности может быть достигнуто, главным образом, за счет использования принципиально новых схем и конструкций телескопов, а также технологий их создания, поскольку необходимо ориентироваться на имеющиеся средства доставки в космос, а именно обеспечение умеренных массогабаритных характеристик ОЭК.

В этой связи ОЭК нового класса может быть создан на базе главного зеркала (ГЗ) выполненного, как сегментированное (например, James Webb Space Telescope).

Применение адаптивной и активной оптики в крупногабаритных ОЭК, позволяют решать задачи по обеспечению контроля формы поверхности сегментированного зеркала, а также позволяют ОЭК быть инвариантными к внешним возмущениям за счет контроля формы поверхности зеркала.

Целью настоящей работы является разработка схемных решений устройств, обеспечивающих контроль состояния главного зеркала телескопа и коррекцию ошибок в процессе эксплуатации в видимом диапазоне длин волн. При разработке схемных решений подсистем юстировки исследованы несколько видов схем контроля для асферических и сферических зеркал и предложена схема контроля главного зеркала в процессе эксплуатации.

Контроль формы поверхности сферического зеркала

Простейшим случаем зеркального объектива является сферическое зеркало. Его ана aberrационной точкой является центр радиуса кривизны сферической поверхности, в который устанавливается точечный источник света. Там же наблюдается его изображение.

Для проведения исследования по методу дифракционной точки был использован автоколлимационный (АК) микроскоп, оснащённый сменными микрообъективами и точечными диафрагмами разных диаметров.

Для выполнения юстировки для начала необходимо установить зеркало на заданном отрезке (рисунок 1). При этом необходимо учитывать рабочее расстояние объектива АК-микроскопа.

Для юстировки сферической поверхности необходимо обеспечить перемещение зеркального сегмента в трёх осях (рисунок 2): вертикальный наклон α , поворот β и смещение по фокусу вдоль оси Z .

Для юстировки составного зеркала необходимо с помощью перемещения сегментов зеркала свести изображения двух точек в поле микроскопа.

После этого необходимо перемещением детали вдоль оси Z обеспечить размер изображения точки близкий к дифракционному размеру кружка Эри, что будет свидетельствовать о правильной настройке отрезка (фокусировки). Далее при помощи наклона α и поворота β производится совмещение двух точек в центре поля зрения микроскопа.

Для обеспечения фазировки необходимо использовать максимально доступное увеличение и минимальный размер точечной диафрагмы. При смене объектива производится фокусировка на изображении точки при помощи перемещения микроскопа вдоль оптической оси и производится совмещение двух дифракционных точек.

Контроль формы поверхности асферического зеркала

В светосильных объективах применение сферических поверхностей недопустимо. Причиной тому является сильная сферическая aberrация. Для её исправления используются асферические поверхности, применение которых существенно усложняет изготовление и юстировку сегментированного объектива. В отличие от сферической поверхности асферическую поверхность необходимо контролировать из фокуса в схеме с применением плоского зеркала (рисунок 3).

Юстировку необходимо проводить в шести осях координат (рисунок 4). В отличие от первого случая, здесь для обеспечения юстировки так же необходимо задействовать сдвиг вдоль горизонтальной оси X , сдвиг вдоль вертикальной оси Y и поворот вокруг геометрической оси γ . Контрольное зеркало также снабжается механизмами перемещения для наклона и поворота.

Для выставления контрольной схемы необходимо установить плоское зеркало вертикально, АК-микроскоп устанавливается в соответствии с отрезками, указанными на схеме. После этого устанавливается первый сегмент зеркала. Крайне важно соблюсти положение сегмента зеркала относительно оптической оси микроскопа. Для этого на задней поверхности сегмента (при изготовлении) указывают направление в сторону оптической оси. Это позволяет настроить угол поворота детали γ . Также задняя поверхность сегмента изготавливается перпендикулярно оси параболоида. Это позволяет использовать автоколлимационную трубу для настройки поворота α и наклона β сегмента.

При установке сегмента зеркала необходимо добиться точного позиционирования по оси X от оптической оси схемы контроля, и в соответствии с фокусными расстояниями, в соответствии с рисунком 3. Когда изображение окажется в поле зрения микроскопа, с большой долей вероятности, что оно будет искажено aberrацией типа «кома». Для устранения aberrации типа «кома» необходимо произвести перемещение сегмента зеркала вдоль оси X в сторону «хвоста» и скорректировать положение фокуса детали по оси Z , выставив необходимый угол β . После устранения комы необходимо устранить aberrацию типа «стигматизм», путем исправления положения сегмента, перемещая его вдоль оси Y и корректируя угол вертикального наклона сегмента α .

В результате юстировки дифракционные точки от двух сегментов соединятся. В этом случае необходимо изменить увеличение микроскопа, и уменьшить диаметр точечной диафрагмы для обеспечения тонкой юстировки и фазировки.

Выбор оптической схемы оптико-электронного комплекса

Применяя сейчас линзовую и зеркально-линзовую оптику в космических комплексах, разработчик должен всегда учитывать, что, прежде всего, резко увеличивается вес оптических систем с одной стороны и резко сужается спектральный диапазон, с другой стороны. Практически вся зарубежная космическая оптика сейчас базируется на зеркальных элементах. Исключения составляют широкоугольные системы, в которых зеркальные элементы применяться не могут.

Преимущества зеркальных систем по сравнению с линзовыми и зеркально-линзовыми системами: широчайший спектральный диапазон от 0,2 мкм до 14 мкм; в несколько раз меньший вес; меньше число оптических поверхностей; увеличенная светосила телескопа позволяет уменьшить выдержку экспозиции, тем самым уменьшить влияние остаточных сдвигов изображения на качество изображения.

В космическом телескопостроении ведущая роль отводится зеркально-линзовым и зеркальным объективам, имеющим, как правило, только один крупногабаритный элемент, диаметр которого равен диаметру входного зрачка – ГЗ. Одним из представителей чисто зеркальных систем, активно используемых в системах ДЗЗ является телескоп, спроектированный по схеме Корша. В ней главная роль в образовании изображения отводится отражающим поверхностям, не вносящим хроматических aberrаций. В связи с этим, чисто зеркальные схемы очень удобны для использования в системах, работающих в широких спектральных диапазонах. Рис. 5 оптическая схема Корша состоит из трех соосных асферических зеркал 1, 2 и 3, а для уменьшения виньетирования в систему вводится дополнительное плоское зеркало 4, которое выносит изображение в сторону.

К достоинствам схемы Корша необходимо отнести действительное изображение выходного зрачка и наличие промежуточного изображения, что позволяет исключить бленду, и уменьшить конструкцию телескопа в размерах. Решаемые задачи оптической системой по схеме Корша – высокодетальное многоспектральное наблюдение в том числе совместно в УФ, ВД и ИК диапазонах спектра излучения. Таким образом, для дальнейшей проработки создания способа контроля ГЗ космического телескопа была выбрана оптическая схема Корша.

Контроль сегментированного зеркала в процессе эксплуатации

Для формирования изображения удаленного объекта необходимо знание амплитуды и фазы световой волны, исходящей от каждой точки объекта наблюдения. Тогда амплитуда (квадрат модуля комплексной функции, описывающей световую волну) излучения, усредненного по поверхности объекта, соответствующей площади проекции элемента разрешения (пикселя) оптической системы на объект. Фаза волны, а точнее – относительная фаза (разность фаз) светового потока от каждых из двух зон (площадок) на поверхности объекта, соответствующих проекции двух соседних элементов приемника на объекте.

Голографические методы регистрации фазы волновых фронтов в нашем случае мало пригодны, так как они предполагают сначала регистрацию бегущей или стоячей волновой картины, образованной опорной и объектной волнами и затем измерение относительной фазы волновых фронтов.

Другим обстоятельством, выгодно отличающим оптические бортовые системы является их «многоканальность». В большинстве систем соседние элементы приемника изображения не зависят друг от друга (при достаточном качестве оптики) и каждый образует независимый канал переноса оптического излучения от одиночной площадки поверхности объекта на одиночный элемент приемника. Таким образом, относительная фаза от элемента к элементу приемника не зависит от излучения в соседнем канале, причём угловая апертура наблюдения в одиночном канале очень мала и сравнима с угловой апертурой наблюдения звездных объектов в звездный интерферометр Майкельсона. Осложняющим обстоятельством является требование по когерентности излучения от объекта наблюдения и излучения опорной волны (или бортового гетеродина). Однако, значительная дистанция от приёмника до объекта, узкая угловая апертура наблюдения и независимость каналов наблюдения позволяют представить оптическую систему как «сумму большого количества, равного числу каналов системы, интерферометров Майкельсона», при условии введения в систему элемента, осуществляющего модуляцию фазы волны. При этом требования высокой когерентности снимаются.

Синтез оптической апертуры возможен двумя путями: «физический» синтез, аналогичный синтезу апертуры в радиофизике и «технический» синтез, то есть конструирование реальной, а не виртуальной, апертуры из отдельных блоков, элементов и систем.

В этих условиях, оптическую систему (каждый канал) можно рассматривать как некую сумму интерферометров Майкельсона, причём выходом каждого из интерферометров может быть либо интерференционная картина с пространственной частотой, на которой передается фазовая информация волны от объекта. Либо интерференционная картина с временной модуляцией, которая несет информацию о фазе объектной волны. Как известно из теории связи, эти представления (пространственное и временное) эквивалентны. На этом основаны современные методы измерения функций передачи контраста (ЧКХ или МПФ) оптических систем, где вместо пространственной модуляции волнового поля на входе системы (миры различных пространственных частот), используется временная модуляция потока сканирующими зрачок с разными скоростями зеркальными барабанами со щелью.

В данном случае, вместо разнесения в пространстве двух апертур интерферометра с получением пространственной интерференционной картины и вычислением по ее шагу фазы волнового поля, используется одна апертура, в которой осуществляется временная интерференция, сдвинув часть объектного волнового фронта по временной частоте (длине волны). В основе этого предложения лежит модификация интерферометра бокового сдвига.

Работа интерферометра основывается на теореме Ван-Циттерта-Цернике, которая утверждает, что некогерентный излучатель создает на расстоянии L в однородной среде квазиоднородное поле с интенсивностью A_0 и функцией пространственной когерентности (ФПК), представляющей собой спектр яркости объекта:

$$M(R, r) = \frac{A_0(R - \frac{r}{2})A_0(R + \frac{r}{2})}{A_0} = e^{-\frac{ikRr}{2}} \iint \theta(\beta) e^{-ik\beta r} d\beta \quad (1)$$

Где k – волновое число, $\theta(\beta)$ – угловое распределение интенсивности в плоскости излучателя (объекта) с условием нормировки $\iint \theta(\beta) d\beta = 1$, $A_0(x, y)$ – поле в плоскости входного (промежуточного зрачка).

Поле на выходе интерферометра равно:

$$A_0(x, y) = \frac{1}{2}(A_0(x, y)e^{ik\alpha x} + A_0(-x, -y)e^{-ik\alpha y}) \quad (2)$$

На выходе интерферометра создается интерференционная картина с интенсивностью:

$$A_1(r) = \frac{A_0}{2}(1 + \mu(2r)\cos(\theta(2r) + 2k\alpha r)) \quad (3)$$

Где μ и θ – модуль и фаза ФПК входного поля, или спектр объекта, $r = (x, y)$, $\alpha = (\alpha_x, \alpha_y)$.

Из ф.(3) изображение может быть восстановлено преобразованием Фурье. Преимуществами такого построения системы заключаются в следующем:

- ОПФ системы (при некогерентном освещении) равна до границы (до дифракционного предела) единицы (как в когерентной системе).
- Глубина резкости неограничена.

Датчик волнового фронта

Наиболее важные этапы технологического процесса контроля крупногабаритных зеркал сопровождаются контролем формы рабочей поверхности. Принципиальная схема оптико-механической системы датчика волнового фронта, для контроля формы поверхности зеркала изображена на рис. 5.

Работа датчика волнового фронта заключается в следующем: Излучение от точечного источника с помощью поворотного зеркала 5 проходит через объектив коллиматора 6 и попадает в систему интерферометра радиально-бокового сдвиг 9, оптическая система которого собрана на единой кварцевой пластине, предотвращающей его разьюстировку в процессе эксплуатации. Поток излучения, волновой фронт которого сохраняет деформации, внесенные формой поверхности контролируемого объекта, делится светоделителем интерферометра на два потока. Один из пучков проходя по схеме в направлении движения часовой стрелки расширяется в телескопической линзе, поворачивает на 90° плоскость поляризации в фазовой пластине. Благодаря этому проходит, не отражаясь через двужеркальный отражатель на фазосдвигающий зеркальный блок и отражается им обратно на светоделитель. Другой пучок, проходя по схеме в направлении движения против часовой стрелки отражается двужеркальным отражателем и сжимается телескопической линзой. Таким образом, второй пучок объединяясь с первым на светоделителе имеет одинаковое с ним направление поляризации и радиальный сдвиг. Боковой сдвиг организуется смещением фазосдвигающего зеркального блока. Таким образом, оба потока выходя по одному пути могут интерферировать в зоне их перекрытия, пройдя через проекционный объектив 7. Интерференционная картина проецируется на ФПУ 8.

Заключение

В ходе проведенных исследований была разработана схемотехническая реализация датчика волнового фронта формы поверхности главного зеркала, интегрированная в оптическую схему оптико-электронного комплекса. Данное схемотехническое решение позволяет производить наблюдение дифракционной картины звезд, а также обеспечивает возможность контроля позиционирования составного зеркала за счет второго канала обработки изображения с учетом регистрации интерферограммы для контроля степени фазирования сегментов зеркала.

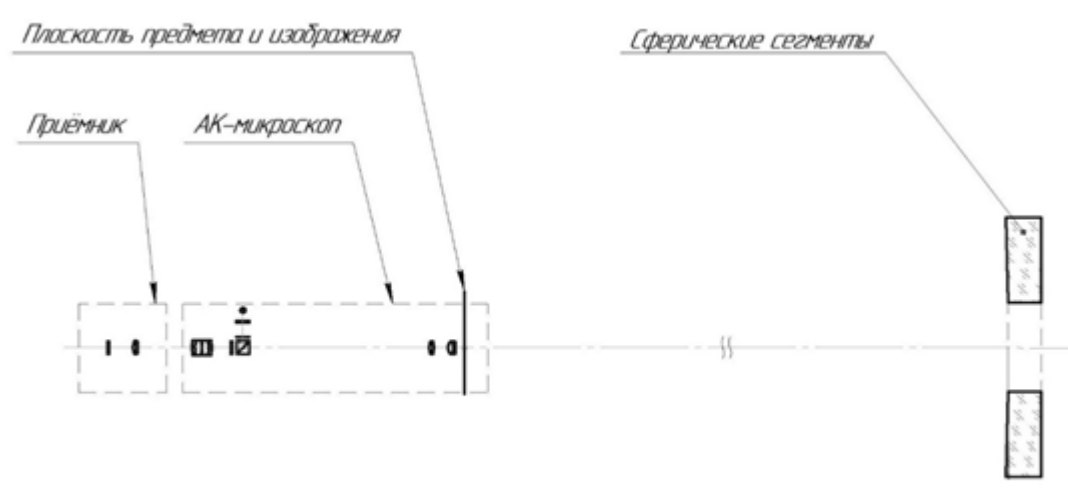


Рисунок 1 – Схема контроля сферического зеркала

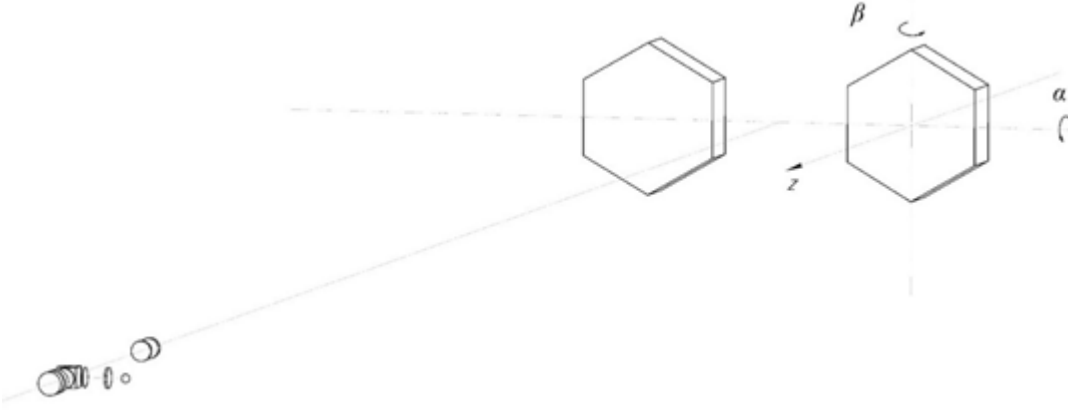


Рисунок 2 – Схема смещения сферического сегмента

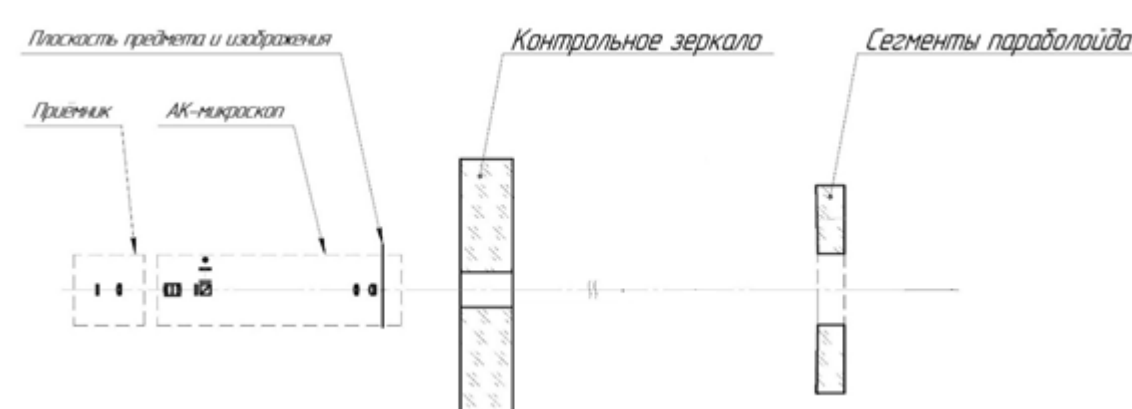


Рисунок 3 – Схема контроля параболического зеркала

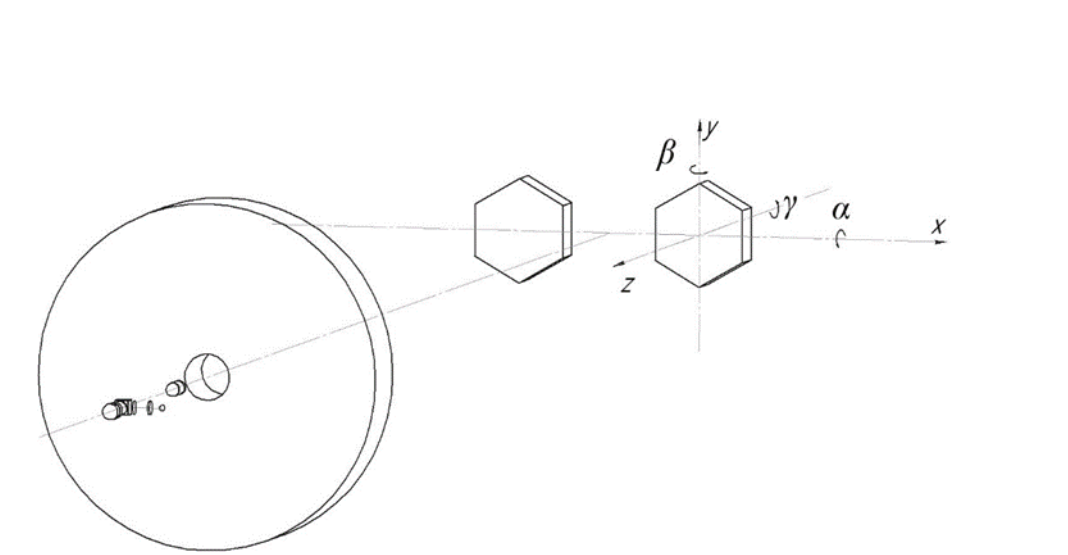


Рисунок 4 – Схема смещения сферического сегмента

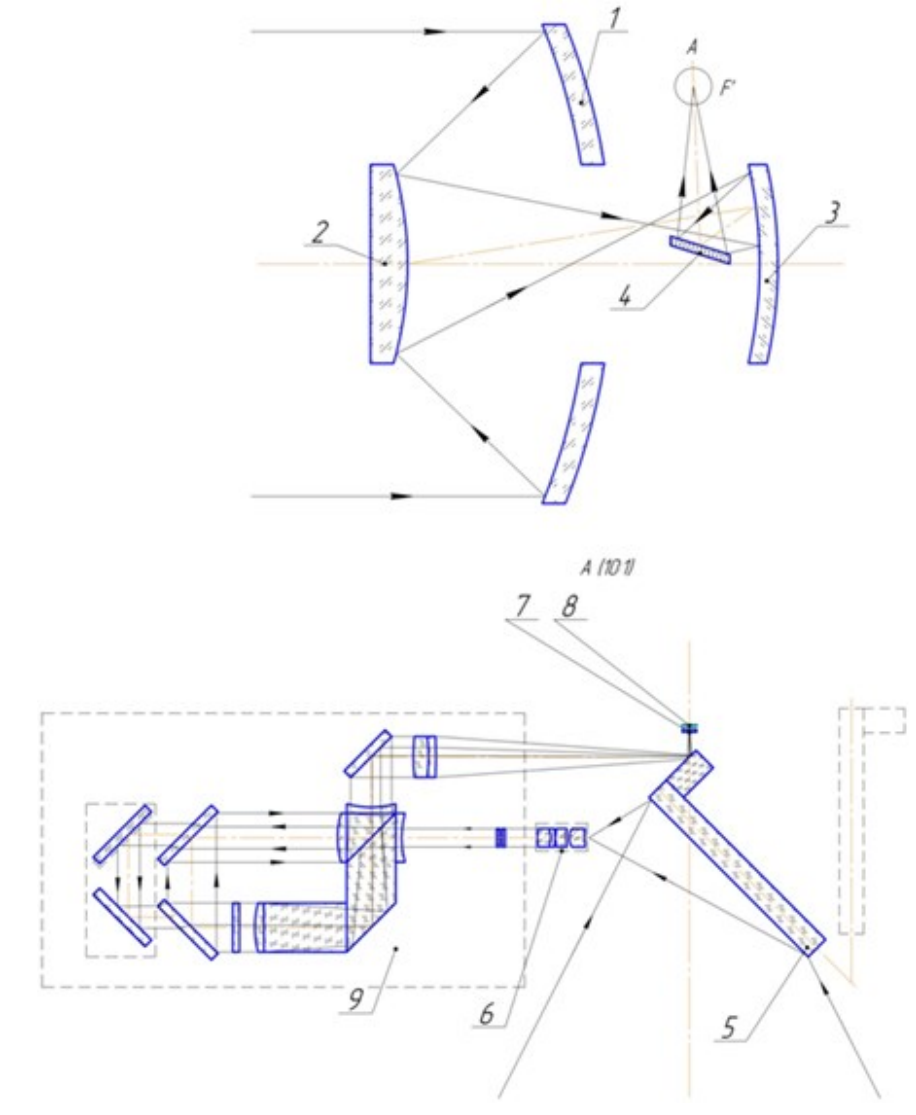


Рисунок 5 – Оптическая схема телескопа с датчиком волнового фронта