

ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБЗОРНОЙ АСТРОНОМИИ – ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕАЛИЗАЦИИ

А.В. Санкович, А.Н. Юдин

santel.optics@gmail.com, fduchun@gmail.com

(495) 468-69-67, (926) 661-59-28

ООО «Сантел-М», Москва

<http://www.rdcn.ru/about/partners/santel-m.shtml>

Рассмотрены практические вопросы разработки и реализации средне- и крупногабаритных зеркально-линзовых объективов высокой и сверхвысокой светосилы. Показаны реализованные конструкции и некоторые результаты их работы, а также продемонстрирован ряд перспективных систем для решения актуальных задач контроля космического пространства в ближайшие годы.

1. Краткий исторический обзор.

Светосильные широкоугольные оптические телескопы – относительно молодое и быстроразвивающееся направление телескопостроения. Необходимость быстро регистрировать объекты в большом поле зрения, достигая высокого и как можно более равномерного качества изображения на приёмнике максимально достижимого формата, возникла ещё на заре эры фотографической астрономии. Однако, в первые десятилетия XX в. задачи обзорной астрофотографии решались сравнительно узким классом инструментов – рефракторами-ахроматами, причём наметилось разделение на длиннофокусные инструменты, предназначенные для долговременных картографических работ (например, «Нормальный астрограф», проект «Карта Неба») и светосильные, предназначенные для регистрации слабых движущихся объектов (астероиды, кометы, метеоры) и проработки предельно слабых протяжённых объектов (туманности, спектры). Типичным представителем второго класса инструментов являлся 13-дюймовый 1:5.3 астрограф Лоуэлловской обсерватории (США), на котором в 1930 г. был открыт Плутон. Инструменты обоих классов находились в использовании до конца фотоэмульсионного периода астрофотографии, а с применением материалов с особым ходом дисперсии в конце XX в. стало возможным создание линзовых инструментов, пригодных и для ПЗС-работ. Однако, несмотря на серьёзные достижения в данной области, рост апертуры и светосилы данных инструментов крайне ограничен как абберрационно (хроматическими aberrациями), так и технологически (труднодоступность и дороговизна осободисперсионных материалов). В настоящее время они находят специализированные применения, такие как камеры спектрографов, малые инструменты и пр. Их рассмотрение лежит за пределами данной работы.

Настоящую революцию произвело изобретение в 1930 г. Б. Шмидтом светосильной зеркально-линзовой камеры, получившей его имя. Обладая предельной простотой проектирования, эта система стала весьма популярной, несмотря на известные технологические трудности изготовления асферики высокого порядка. Эти трудности в некоторой степени компенсировались малым количеством оптических деталей, что упрощало контроль оптики и механику трубы, а также нетребовательности к соблюдению расчётных характеристик преломляющего материала – нанесение рельефа «от контроля», в сборе, не представляет существенных проблем. Камеры Шмидта, построенные в середине – 2-й половине XX в. с некоторыми модернизациями используются и поныне, в том числе как обзорно-поисковые системы с крупноформатными ПЗС-приёмниками (например, Большой Паломарский Шмидт.)

Апертура достигает 1.4 м, типичное относительное крупных инструментов находится в районе 1:2.5, для инструментов умеренного (50-60 см) диаметра достигает 1:1 (Zeiss SBG в телевизионном варианте, камера Хьюита). Космический телескоп «Кеплер», осуществляющий групповую прецизионную фотометрию звезд на большом поле, также построен по системе Шмидта и, в целом, по параметрам, представляет систему обзораемого в работе класса, хотя он и не используется непосредственно для построения изображений.

В 1814 г. У.Ф. Гамильтоном была запатентована зеркально-линзовая система [2], в которой была осуществлена взаимная компенсация апертурных aberrаций слабоположительной входной линзы и зеркала Манжена. А. Зоннефельд в 1937 г. [3] запатентовал систему сверхвысокой светосилы, сочетающую в себе зеркало Манжена с двухлинзовым полноапертурным корректором. Эти системы уже позволили достичь весьма высоких (в последнем случае до 1:0.5!) светосил в широком спектральном диапазоне, но на малом поле зрения – лимитирующими полевыми aberrациями являются хроматизм увеличения и, в случае применения плоских детекторов, кривизна поля. В связи с этим длительное время, примерно до 50-х гг. XX в. они не находили существенного применения.

50-е гг. XX в. охарактеризовались бурным прогрессом в проектировании оптических систем, связанным с применением для их расчёта первых ЭВМ. Был разработан ряд зеркально-линзовых систем, в которых был осуществлён баланс апертурных и полевых aberrаций между полноапертурными и субапертурными компонентами. К сожалению, не представляется возможным проанализировать в данной работе полную историю развития обзораемых систем, как по причине её обширности, так и, в равной степени, непрозрачности материала вследствие преимущественно военного характера работ. Из общедоступных источников упомянем прежде всего патенты [4, 6], принимая во внимание, что, с одной стороны, запатентованность не утверждает абсолютного первенства, а с другой стороны, имеются ссылки на более ранние конструкции близких семейств [7]. Данный вопрос, по мнению авторов, заслуживает самостоятельного исследования.

В то же время, в середине XX в. существенное развитие получили концентрические и близкие к концентрическим системы, использующие принцип, положенный в основу камеры Шмидта – равноправие всех пучков при концентричности главного зеркала относительно центра апертурной диафрагмы. При этом существуют варианты, как следующие этому принципу непосредственно, так и допускающие отклонения от него для достижения лучшего исправления полевых aberrаций высших порядков. Примером второго случая является камера Бэйкера-Нанна, являвшаяся основным средством контроля космического пространства США в фотоэмульсионную эпоху. Камера характеризуется концентричным относительно апертурной диафрагмой главным зеркалом, асферической фокальной поверхностью, полноапертурным трёхлинзовым корректором из двух сортов стекла, с четырьмя асфериками высших порядков на внутренних поверхностях. Столь высокая технологическая сложность – плата за очень высокую – 1:1 – светосилу, в сочетании с чрезвычайно большим полем – 30° в направлении орбитального движения ИСЗ. При работе в качестве обзорного инструмента поле зрения такой камеры ограничено, в основном, центральным экранированием на расположенном внутри трубы фотоприёмном устройстве первичного фокуса.

Созданная в СССР в 60-е годы XX в. камера ВАУ решает схожие с камерами Бэйкера-Нанна задачи. Однако, благодаря меньшей светосиле (1:1.4) её оптическая система гораздо технологичнее. Используются также три полноапертурных элемента, но асферическая поверхность всего одна. Это достигается благодаря взаимной

компенсации сферохроматизма между ахроматизированной пластинкой Шмидта и концентрическим мениском, при участии обоих элементов при исправлении сферической aberrации главного зеркала.

Задачи с меньшими требованиями по светосиле и качеству изображения решаются сферическими камерами Бауэрс-Максутова, (например, камера «ФАС»).

В целом, сопоставляя вышеупомянутые инструменты, следует заметить, что при различных методах переноса коррекции сферической aberrации с главного зеркала на линзовую часть, все они имеют схожую геометрию и близкие возможности. В результате достигаются очень широкие поля зрения, ограниченные главным образом центральным экранированием и aberrациями высших порядков. Это наглядно демонстрирует чрезвычайную плодотворность принципа Шмидта. Однако, следствием этого является криволинейность поля зрения, что накладывает жёсткие ограничения на применяемую светоприёмную аппаратуру. Помимо создания системы с оптически исправленной кривизной поля, следует упомянуть следующие методы адаптации светоприёмной аппаратуры под криволинейное поле зрения:

- волоконно-оптические шайбы,
- мозаика плоских приёмников, огибающая фокальную поверхность, возможно в сочетании с линзами Пиацци-Смита,
- криволинейный приёмник изображения.

Первый метод характеризуется высокими светопотерями и негативным влиянием структуры шайбы на ЧКХ системы, последний метод нереализуем имеющимися в настоящее время технологическими средствами. Создание криволинейной мозаики представляется авторам весьма целесообразным для крупного инструмента высокой светосилы, такого, как камеры ВАУ и Бейкера-Нанна. Это представляется особенно актуальным для задач наблюдения быстролетающих объектов, т.к. подобные задачи подразумевают высокоскоростное считывание во многих параллельных каналах. Однако, подобных мозаики являются уникальными изделиями и требуют больших затрат на разработку и создание. В то же время, имеется ряд отработанных плоских фотоприёмников: производящиеся серийно камеры с ПЗС-матрицами малых размеров (до 90х90 мм); мозаики набираемые из элементов с типичными размерами порядка 30х60 мм. Использование подобных типовых приёмников изображения позволяет существенно сократить время создания оптико-электронного комплекса, в ряде случаев снижая затраты на систему в целом. В связи с этим в данной работе показаны именно плоскопольные системы.

Подчеркнём, что в данной работе рассматриваются собственные практические реализации систем с полноапертурными преломляющими компонентами, в тех областях решений, где это, по мнению авторов, является целесообразным по совокупности aberrационных, массогабаритных, технологических и экономических параметров. Вопрос о принципиальном выборе между системами с полноапертурным или с субапертурным корректором очень обширен и в данной работе не рассматривается.

2. Предпосылки к созданию описываемых реализованных и планируемых к реализации конструкций:

- 1) Ориентация на серийное производство с использованием доступных марок стёкол и сферических поверхностей.
- 2) Создание стабильной в сохранении юстировки системы, требующей минимального обслуживания.

3) Первоначально – разработка с ориентацией на серийные ПЗС-камеры, используемые без модификаций, но с перспективой перехода на крупноформатные мозаичные приёмники.

4) Для достижения наивысшей проникающей способности требуется максимальное использование диапазона чувствительности кремниевых ПЗС. Поэтому спектральный диапазон оптимизации систем лежит в районе от 0.36-0.4 мкм в коротковолновой области, до 0.9-1 мкм в длинноволновой. В коротковолновой области ограничение осуществляется имеющимися стёклами, в длинноволновой требуемое отступление от красной границы кремния диктуется борьбой с негативным влиянием роста глубины поглощения света на ЧКХ системы и зависит от светосилы системы.

5) Разработка и изготовление систем осуществляются по принципу возрастания сложности – сначала реализуются системы невысокой светосилы и умеренного размера, далее осуществляются более светосильные и/или крупногабаритные варианты.

3. Рассматриваемые в работе системы относятся к семействам Гамильтона и Зоннефельда. Выбор определён следующими соображениями:

1) По сравнению с системами семейства Рихтера-Слефогта, а тем более с концентричными системами – минимальные габариты, причём как продольные, так и поперечные. Последнее связано с тем, что полноапертурный корректор в таких системах не является афокальным, а обладает положительной оптической силой. Это позволяет уменьшить габариты главного зеркала Манжена, делая его меньше входного отверстия либо близким к нему даже при значительном невиньетированном поле зрения, в то время как системы с афокальными корректорами и простыми зеркалами имеют типичную прибавку на диаметр главного зеркала порядка линейного поля зрения, а для концентричных систем – порядка его удвоенной величины!

2) В области малых апертур эти системы обеспечивают благоприятный для использования серийных фотоприёмников задний отрезок даже в простых одностекольных конфигурациях.

3) Система Зоннефельда используется в случае особо высоких светосил и широких полей, сохраняя основные преимущества системы Гамильтона, она обеспечивает лучшую коррекцию сферохроматизма и хроматизма увеличения.

4. Реализованные в настоящее время системы (подробно излагались в докладе [8]).

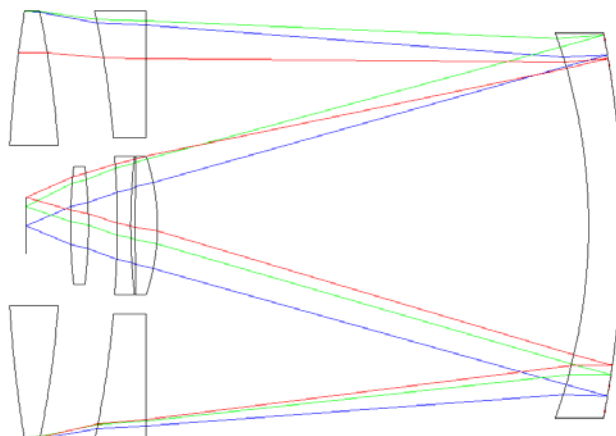
1) Опытный телескоп «Сантел-250А» $D = 250$ мм, 1:3. Изначально предназначался для отработки системы Гамильтона-Ньютона. После успешного изготовления и вступления в строй опытного образца выпускается малыми партиями.

2) Телескоп «Сантел-500А» $D = 500$ мм, 1:2.5. Предназначен для экономичной модернизации камеры ВАУ Звенигородской обсерватории. В 2009 г. вступил в строй, эксплуатируется. Система Гамильтона-Ньютона.

3) Телескоп «Сантел-400А» $D = 400$ мм, 1:2.5. Работает в системе «МАСТЕР», ГАИШ МГУ. По состоянию на 2010 г. построено 8 телескопов для 4-х пунктов, работы продолжаются. Система Гамильтона с фотоприёмником в первичном фокусе. Система отличается наличием внутренней фокусировки перемещением предфокального корректора, что позволяет оптимизировать габариты и жёсткость, а также работать как с различными светофильтрами, так и без них.

5. Планируемые системы:

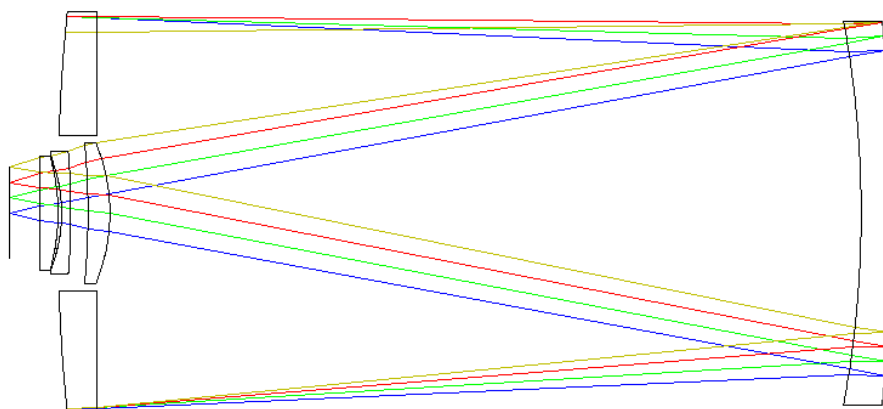
1) Камера Зоннефельда особо высокой светосилы.



Планируется для нужд наблюдения быстролетающих объектов, таких как низкоорбитальные космические аппараты и космический мусор. $D = 400$ мм, 1:1.25. Приёмник – ПЗС-матрица 36×36 мм², диапазон 0.4-0.9 мкм, более 80 % энергии в 7.4×7.4 мкм² пикселе.

2) Крупногабаритная камера Гамильтона для глубоких обзоров неба.

Предназначена для работы с мозаиками ПЗС-матриц до 140×140 мм включительно. Обеспечивает концентрацию энергии не менее 70 % в пикселе 15×15 мкм² в диапазоне 0.43-0.85 мкм. Предфокальный корректор состоит из 3-х различных стёкол.



Также готовится к производству ряд телескопов, аналогичных уже реализованным.

Литература

1. Н.Н. Михельсон, Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.:Наука, 1976г.
2. W.F. Hamilton, English Patent No. 3781.
3. A. Sonnefeld, US Patent No. 2.141.884.
4. L. Canzek, US Patent No. 4.398.809.
5. L. Canzek, US Patent No. 4.482.219.
6. R. Casas, US Patent No. 3.489.487.
7. Фотографические и проекционные объективы, разработанные в ГОИ. Альбом. Сост. Е.Б. Лишневская. Л.:ГОИ, 1963 г.
8. Юдин. А.Н. Светосильные широкоугольные зеркально-линзовые телескопы фирмы «Сантел». // Международная конференция «АСТРОКАЗАНЬ-2009» / Сборник тезисов.– Казань, КГУ, 2009. / Доклад, URL: http://www.rdcn.ru/data/paper/p01e_FullText.pdf.