

Расчет и конструирование оптико-механической системы зрительной трубы Ньютона с ортоскопическим окуляром

Р.Г. Калинин, Д.Т. Валиев, Агапов Н.А.
kalininrostislav@gmail.com|rubinfo@tpu.ru|anikolja@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Работа посвящена расчету и проектированию оптико-механической системы зрительной трубы Ньютона с ортоскопическим окуляром. Для расчета и анализа оптической системы использовалось отечественное прикладное программное обеспечение (ПО) «ОПТИКА». 3D – моделирование осуществлялось с использованием CAD системы «Solidworks».

Ключевые слова: зрительная труба Ньютона, ПО «ОПТИКА», расчет оптических систем

1. Введение

Оптические приборы и системы представлены практически во всех областях научной и технической деятельности. Так, например, для наблюдения за удалёнными объектами используются телескопические системы различной конструкции. Телескопические системы позволяют не только наблюдать за удалёнными объектами, но и измерять различные параметры наблюдаемого объекта. Чаще всего телескопические системы применяются в астрономии, как в профессиональной, так и в любительской.

Современные телескопы являются сложными оптическими системами. Проектирование таких систем представляет собой достаточно трудоемкий процесс, который включает в себя как этапы теоретического исследования, так и практические этапы [1, 5]. Как правило, зеркальная оптика рассчитывается совместно с линзовыми или зеркальными устройствами меньшего размера корректорами поля, редукторами фокусного расстояния, адаптивными системами и т.д. [7]. При этом проектировщик должен учитывать множество факторов, в том числе технологические возможности производства разрабатываемых оптических систем, стоимость используемых материалов и возможность их поставки и др. [3, 6]. Кроме того, специалисты, способные квалифицированно разработать оптические системы для решения задач, поставленных перед оптико-электронным прибором, должны обладать фундаментальными знаниями по общеобразовательным и техническим дисциплинам, а также в совершенстве знать основы оптики и оптические системы приборов.

Работа посвящена расчету и проектированию несущей оптико-механической системы зрительной трубы Ньютона с ортоскопическим окуляром. Авторы ставили целью продемонстрировать возможности разработанного в Томском политехническом университете прикладного программного обеспечения ПО «Оптика», позволяющего решать комплексную поддержку работы оптика-разработчика, начиная с этапа синтеза исходной оптической схемы или поиска аналога, включая автоматизированную оптимизацию и анализ оптических систем.

2. Расчёт оптической системы зрительной трубы Ньютона

В общем виде зрительная труба Ньютона представляет собой трубу, установленную на монтировке, снабжённой осями для наведения на объект наблюдения и слежения за ним. Основными элементами данного вида зрительных труб являются объектив и окуляр (рис. 1). В зависимости от типа оптической схемы большинство телескопов делятся на линзовые (рефракторы), зеркальные (рефлекторы) и зеркально-линзовые.

На сегодняшний день существует несколько типов оптических систем зеркальных телескопов, среди которых рефлекторы с системой Ньютона получили наибольшее распространение среди любительских телескопов, что обусловлено относительной простотой конструкции и высоким соотношением цена/качество изображения в сравнении с другими системами телескопов.

В конструкцию зрительной трубы входят следующие основные элементы:

- Труба (тубус);
- Главное зеркало – объектив;
- Диагональное зеркало;
- Окуляр;
- Узел диоптрийной подстройки окуляра;
- Монтировка + штатив (тренога).

Одной из главных задач при проектировании оптических приборов и систем является расчёт и анализ оптической системы прибора. Для данного прибора была разработана оптическая схема зрительной трубы Ньютона с ортоскопическим окуляром, с учётом следующих начальных условий (Таблица 1-3):

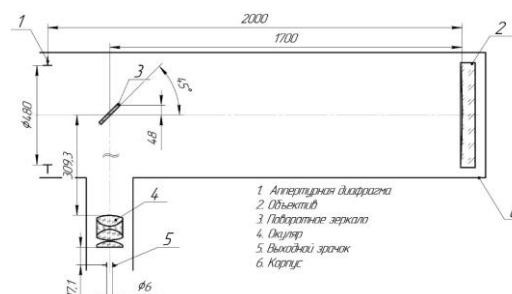


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема зрительной трубы Ньютона

Таблица 1 – Исходные данные

Объектив	Зеркало - параболоид
Положение входного зрачка (апертурной диафрагмы)	В фокальной плоскости параболоида
Окуляр	Ортоскопический с задним фокусным расстоянием $f' = 25$ мм
Поле зрения окуляра, $2 \cdot \omega'$	40°
Линейное перемещение окуляра для диоптрийной настройки	от -5 мм до +5 мм
Расположение объекта наблюдения	В бесконечности
Нормальное увеличение телескопа, Γ_n	80

Таблица 2 – Объектив, главное зеркало

Уравнение параболы	$y^2 = -8000z$
Фокусное расстояние f' , мм	-2000
Диаметр зеркала D , мм	506
Световой диаметр, мм	498
Тип зеркального покрытия и способ нанесения	ИИ. 41И
Толщина по оси d , мм	63,3

Таблица 3 – Ортоскопический окуляр

№	r	d	n_e	Стекло
1	32,21	10,54	1,518291	К8
		3,0		
2	-15,996	10,54	1,518291	К8
		3,0		
3	15,996	10,54	1,518291	К8
		3,0		
4	-32,21	1,0	1	
		1,0		
5	22,28	5,84	1,606258	ТК13
		5,84		
6	∞			

Расчёт оптической системы производился в ПО «ОПТИКА». Прикладное ПО позволяет моделировать, анализировать, производить расчет оптических систем. Интуитивно понятный интерфейс ПО «Оптика» разработан таким образом, чтобы максимально облегчить работу пользователя с данной программой.

Пакет «ОПТИКА» позволяет рассчитать:

- Гауссовы характеристики;
- Ход пучка лучей через систему;
- Кардинальные элементы оптической системы;
- Волновые aberrации и aberrации третьего порядка;
- Конструктивные параметр.

А также произвести:

- Оптимизацию системы;
- Асферизацию последней поверхности ОС.

Типы поверхностей:

- Поверхности второго порядка с осевой симметрией;
- Поверхности второго порядка с двумя плоскостями симметрии;
- Поверхности второго порядка с зональной ошибкой;
- Поверхности высшего порядка;
- Конические поверхности;
- Цилиндрические поверхности;
- Торoidalные поверхности;
- Плоские дифракционные решетки;
- Диафрагмы и экраны круглые, прямоугольные, полуплоскости.

Результаты расчёта оптической системы зрительной трубы Ньютона приведены в таблицах 4-5.

Расчет aberrаций показал, что полевые aberrации объектива для поля зрения $2\omega = 0,5^\circ$ очень малы, так например, астигматическая разность составляет порядка $2 \cdot 10^{-8}$. Результаты расчета полевых aberrаций объектива приведены в таблице 6. Aberrации окуляра представлены на рисунках 2-4. Для окуляра наибольшее влияние на качество изображения оказывают сферические aberrации. Максимальное значение продольной и поперечной сферической aberrации равны соответственно: $\delta_{s'l} = -0,4$, $\delta_{h'l} = 0,04$.

Таблица 4 – Рассчитанные гауссовы характеристики

S_F , мм	S'_F , мм	$\phi_{св}$, мм	D , мм	$\delta s'_{xp}$, мм
9,3	17,1	22,8	25	0,06

Таблица 5 – Оптические характеристики системы

Характеристика	значение
Нормальное увеличение	80
Угловое поле зрения 2ω , угл. град.	0,5
Диаметр выходного зрачка, мм	6
Угловое разрешение, угл. сек.	0,9
Удаление выходного зрачка от последней поверхности, мм	17,1

Aberrации объектива для поля зрения $2\omega = 0,5^\circ$

Таблица 6 – полевые aberrации объектива

Параметр	значение
Меридиональный астигматизм, $\delta_{s'm}$	-0,02
Сагиттальный астигматизм,	-0,021
Средний астигматизм, $\delta_{s'l}$	0,021
Астигматическая разность, Δ	$2 \cdot 10^{-8}$
Дисторсия V , %	$-5 \cdot 10^{-4}$

Aberrации окуляра для поля зрения $2\omega = 40^\circ$

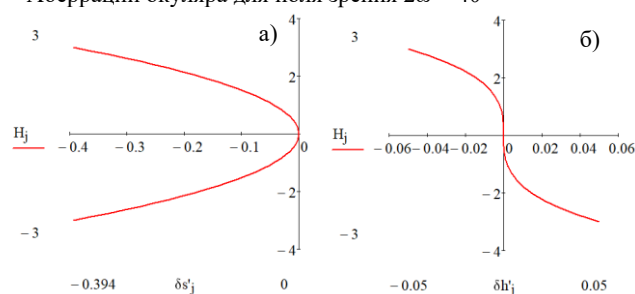


Рис. 2. Сферическая aberrация: а) продольная, б) поперечная

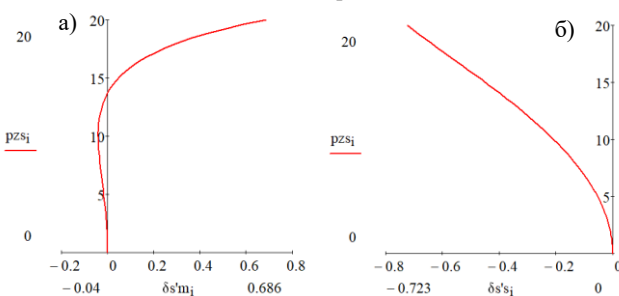


Рис. 3. Астигматизм: а) меридиональный, б) сагиттальный

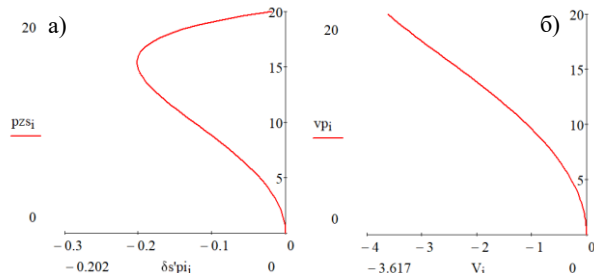


Рис. 4. Полевые aberrации: а) средний астигматизм, б) дисторсия

3. Разработка несущей механической системы зрительной трубы Ньютона

Фокусное расстояние главного зеркала $f' = -2000$ мм, диаметр главного зеркала $D = 506$ мм. Таким образом, телескоп имеет сравнительно ощутимые параметры массы и габаритов. Следовательно, наиболее целесообразно для данного телескопа использовать монтировку Добсона, что обеспечит простоту и низкую стоимость несущей конструкции (рис. 5).

Вращение вокруг вертикальной оси осуществляется поворотом всего корпуса монтировки за рукоятку, расположенную на трубе телескопа. Скорость вращения вокруг вертикальной оси регулируется путем изменения величины момента затяжки болта (гайки).

Для регулировки угла наклона используются 4 подшипниковые опоры, на которые опирается тубус телескопа. Регулировка угла наклона по горизонту осуществляется за счет вращения тубуса телескопа вокруг оси подшипников качения. Фиксация телескопа в заданном положении осуществляется с помощью рукояток.



Рис. 5. Монтировка зрительной трубы Ньютона

Объектив зрительной трубы Ньютона представлен главным зеркалом параболической формы. Для крепления зеркал, участвующих в построении изображения и находящихся в основном пучке системы обязательными, являются следующие требования:

- статической определенности элементов, участвующих в построении изображения;
- компенсации воздействия температуры;
- возможностью регулировки замыкающих усилий.

В работе для обеспечения статической определенности конструкции (опора «на три точки») использовано крепление с помощью Z-образных лапок (Рис. 6). Так как планки жесткие то эластичность крепления обеспечивается специальными прокладками, устанавливаемыми между планками и зеркалом. Усилие прижима необходимой величины обеспечивается за счет подбора толщины прокладок.



Рис. 6. Узел объектива

Ортокосмический окуляр состоит из трех склеенных линз и одной удаленной линзы [8] (Рис. 7). Для данного окуляра применено крепление резьбовым кольцом. Данное крепление является разъёмным. Таким образом, данный тип крепления позволяет заменять части окуляра в случае их поломки или

растрескивания. Однако, в отличие от крепления завальцовкой оно является жестким, что несколько ограничивает допустимый температурный режим работы окуляра [2, 4]. Посадочное отверстие 1,25" (31,75 мм).

Постоянство взаимного положения всех оптических элементов обеспечивается тубусом. В нижнем конце трубы крепится главное зеркало (объектив). Верхний конец трубы несет диагональное зеркало и узел окуляра.



Рис. 7. Узел окуляра.

Тубус зрительной трубы Ньютона выполнен в виде сплошной трубы (Рис. 8) благодаря чему обеспечивается защита оптических элементов от пыли, мелких частиц и т.д. Однако зачастую для объективов большого диаметра в качестве меры снижения общей массы трубы возможно применение конструкции каркасного типа.



Рис. 8. Труба зрительной трубы Ньютона

Анализ массо-габаритных характеристик показал, что общий вес трубы составляет ≈ 80 кг. Большая масса телескопа в первую очередь обусловлена массой узла объектива (≈ 56 кг).

Таким образом, данный тип зрительной трубы целесообразно использовать в стационарных условиях. При этом наиболее удобно осуществлять транспортировку телескопа в разобранном виде, что возможно накладывает ряд дополнительных операций, связанных с последующей настройкой и сборкой зрительной трубы.

4. Заключение

Данная работа посвящена расчету и проектированию зрительной трубы Ньютона с ортокосмическим окуляром. В ходе работы продемонстрированы некоторые возможности прикладного ПО «ОПТИКА», а именно расчет и проектирование последовательных компонентов с возможностью изменения направления хода луча. При разработке несущей механической системы использовались только типовые соединения деталей, что обеспечивает простоту конструкции, а также возможности по автоматизации процесса производства. В качестве CAD системы при разработке несущей механической системы использовалось ПО Solidworks.

Достоинства зеркальных телескопических систем:

- в силу сравнительно большой апертуры превосходят работу для наблюдений тусклых объектов далекого космоса – галактик, туманностей, звездных скоплений;
- дают яркие изображения с малыми искажениями, отсутствует хроматическая аберрация.

Однако такие системы имеют и недостатки:

- центральное экранирование и растяжки вторичного зеркала снижают контраст деталей изображения;
- требуется периодическая подстройка положений зеркал (юстировка или коллимация), склонная утрачиваться при транспортировке и эксплуатации.

5. Литература

- [1] Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. М. Логос, 2000, с. 581.
- [2] Латыев, С. М. Конструирование точных (оптических) приборов: Москва: «Лань», 2015.
- [3] Мальцев М.Д. Расчет допусков на оптические детали. М., Машиностроение, 1974, с. 168.
- [4] Панов В. А. Справочник конструктора оптико-механических приборов, Под ред. В. А. Панова. — 3-е изд., перераб. и доп. — Ленинград: «Машиностроение», 1980. — 742 с.: ил. — Библиогр.: с. 728-732.
- [5] Русинов М. М. Вычислительная оптика. Справочник под общ. ред. М. М. Русинова. Изд. 3-е. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009.
- [6] Сокольский М.Н. Допуски и качество оптического изображения. Л. «Машиностроение», 1989, с. 221.
- [7] Терещихин В.Ю. Современные оптические телескопы. М. Физматлит, 2005, с. 80.
- [8] Турыгин, И. А. Прикладная оптика. Геометрическая оптика и методы расчета оптических схем: учебное пособие, Москва: «Машиностроение», 1965, с. 362.

Об авторах

Калинин Ростислав Георгиевич, студент, отделения материаловедения Томского политехнического университета. E-mail kalininrostislav@gmail.com.

Валиев Дамир Талгатович, к.ф.-м.н., доцент отделения материаловедения Томского политехнического университета. E-mail rubinfc@tpu.ru.

Агапов Николай Афанасьевич, д. т. н, профессор отделения материаловедения Томского политехнического университета. E-mail anikolja@tpu.ru.