

Измерение основных параметров центрированных оптических систем

Маслов Артём

Казаков Данила

Б01-104

04.03.2023

Аннотация

В работе определяются фокусные расстояния и оптические силы тонких положительных и отрицательных линз с помощью методов Аббе и Бесселя. Исследуются сложные оптические системы, с помощью метода Аббе определяются фокусные расстояния, с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность определяются положения главных и фокальных плоскостей. В работе наблюдаются и исследуются хроматическая и продольная сферическая абберации на плосковыпуклой линзе, определяется максимальное продольное отклонение хода лучей, вызванное абберацией. Для хроматической абберации определяется число Аббе.

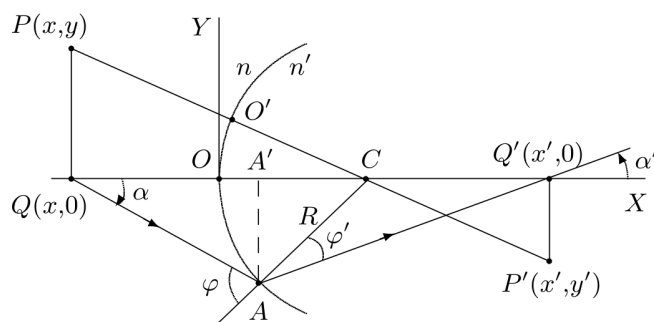
Теория

Центрированными оптическими системами называются отражающие и преломляющие однородные среды, отделённые сферическими поверхностями, центры кривизны которых лежат на одной прямой, называемой *главной оптической осью*.

Пучки света называются *гомоцентрическими*, если выйдя из точки и пройдя оптическую систему, они сходятся в точке.

Оптическая система называется *идеальной*, если пучки гомоцентрические и изображение подобно предмету. Идеальная оптическая система реализуется оптической системой в параксиальном приближении.

Рассмотрим элементарную оптическую ячейку, состоящую из преломляющей сферической поверхности, разделяющей однородные среды с показателями преломления n и n' :



Начало координат поместим в точку O – точку пересечения преломляющей поверхности и главной оптической оси. Расстояние до предмета обозначим как x , расстояние до изображения x' . Расстояния положительны, если направление распространения луча совпадает с направлением отсчёта. Поперечный размер предмета обозначим как y , изображения как y' . Размер будем считать положительным, если предмет находится выше главной оптической оси, отрицательным, если ниже. Радиусы кривизны отсчитываются от поверхности к центру кривизны.

Для элементарной оптической ячейки в параксиальном приближении выполняется соотношение:

$$-\frac{n}{x} + \frac{n'}{x'} = \frac{n' - n}{R}$$

$$x\alpha = x'\alpha'$$

Из полученных соотношений видно, что все лучи выходящие из одной точки главной оптической оси, после преломления на сферической поверхности пересекутся примерно в одной точке на главной оптической оси.

Описание экспериментальной установки

Определение фокусных расстояний собирающих линз методом Аббе:

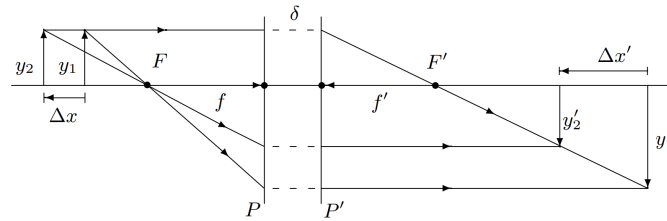


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Рассматривается несколько различных положений источника на оптической оси статичной линзы. Из геометрической оптики следует связь между его сдвигом и изменением продольного увеличения изображения:

Передний фокус $f = \frac{\Delta x}{\Delta(y/y')}$

Задний фокус $f = \frac{\Delta x'}{\Delta(y'/y)}$

Определение фокусных расстояний собирающих линз методом Бесселя:

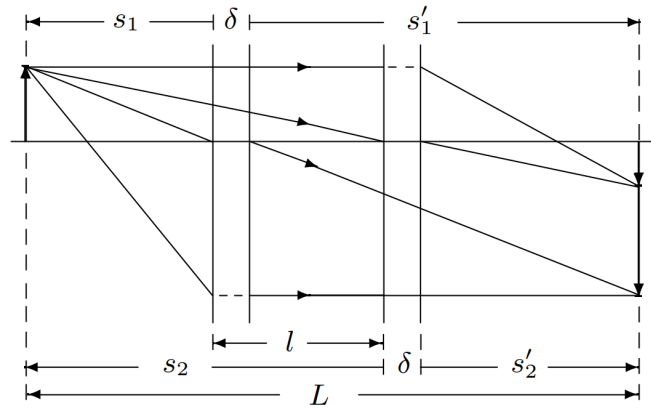


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

В методе Бесселя при постоянном расстоянии от источника до экрана находятся два положения линзы, при которых получается чёткое изображение. Фокусное расстояние определяется по формуле:

$$f = \frac{(L - \delta)^2 - l^2}{4(L - \delta)}$$

В приближении $\delta \ll L$, где δ – толщина линзы фокусное расстояние вычисляется по формуле:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

При этом возникает следующая погрешность приближения:

$$\varepsilon_f = \frac{L^2 + l^2}{L^2 - l^2} \frac{|\delta|}{L}$$

Исследование системы из двух собирающих линз:

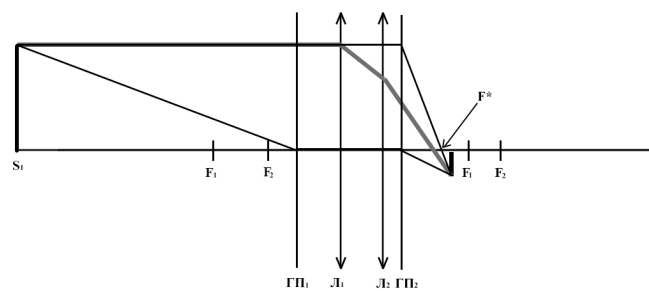


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы в сложной системе:

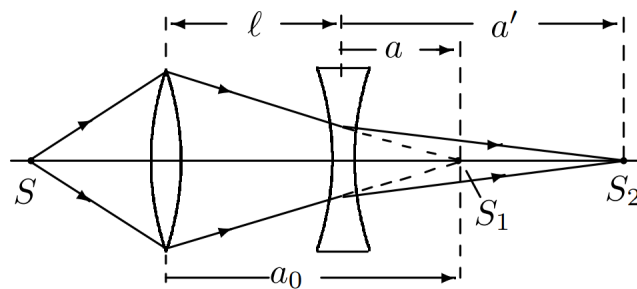


Рис. 4: Схема экспериментальной установки

Фокусное расстояние рассеивающей линзы определяется двумя способами:

1 : С помощью собирающей линзы получают действительное изображение источника. Затем между линзой и изображением ставится рассеивающая линза, таким образом для неё изображение становится мнимым источником и изображение от системы остается действительным. Последнее находится с помощью экрана и из расстояний в системе определяется фокусное расстояние.

2 : Система выглядит так же, только рассеивающая линза располагается так, что изображение от собирающей попадает в её фокальную плоскость. В такой конфигурации лучи после неё уходят параллельным пучком, и чтобы найти такое положение, в конец скамьи ставится зрительная труба, настроенная на бесконечность. Тогда фокусное расстояние линзы есть ни что иное, как расстояние между экраном, на котором фокусируется изображение от одной собирающей линзы и полученным положением рассеивающей.

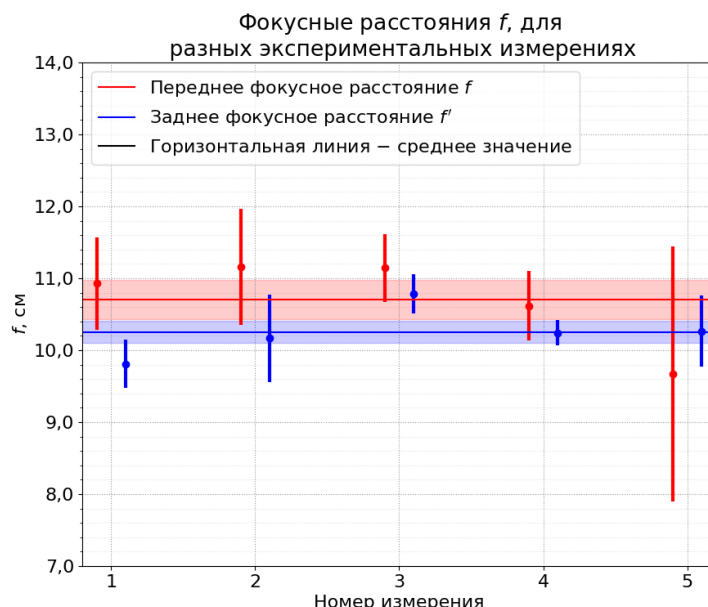
Оборудование

1. Оптическая скамья с набором рейтеров.
2. Собирающие и рассеивающие линзы.
3. Экран.
4. Осветитель с ирисовой диафрагмой и изображением предмета – стрелкой длиной 2 см, расстояние между делениями 2 мм.
5. Зрительная труба.
6. Светофильтры.
7. Кольцевые диафрагмы.
8. Линейка стальная №1: длина 1 м, инструментальная погрешность 0,2 мм, погрешность отсчёта 0,5 мм, итоговая погрешность измерения 0,5 мм.
9. Линейка стальная №2: длина 15 см, инструментальная погрешность 0,1 мм, погрешность отсчёта 0,5 мм, итоговая погрешность измерения 0,5 мм.

Результаты измерений

Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы с помощью метода Аббе

Результаты вычислений фокусных расстояний для разных экспериментальных измерений представлены на рисунке:



Итоговое переднее и заднее фокусные расстояния оценим как среднее:

Переднее фокусное расстояние $f = 10,7 \pm 0,3$

Заднее фокусное расстояние $f' = 10,3 \pm 0,2$.

Случайную погрешность измерения среднего значения оценим по формуле:

$$\sigma_{\text{ср}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{ср}})^2}$$

Для тонкой линзы переднее и заднее фокусные расстояния равны. Толщину линзы оценим как разность фокусных расстояний $\delta \sim 5$ мм. Так как δ малая величина, то итоговое фокусное расстояние оценим как среднее переднего и заднего: $f = 10,5 \pm 0,3$.

Оптическая сила $D = 9,5 \pm 0,2$ дптр.

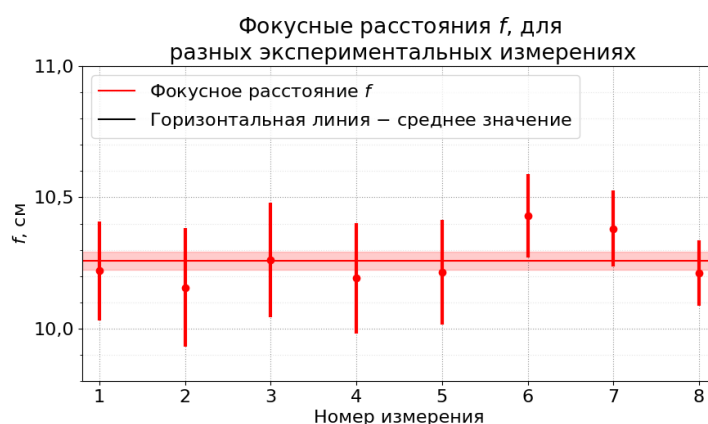
Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы с помощью метода Бесселя

В результате экспериментальных наблюдений было установлено:

1. При небольшом расстоянии $L < 60$ см от предмета до оптической системы чёткость изображения слабо зависит от яркости и размера диафрагмы. При большей яркости предмета изображение лучше различимо, оно более контрастное.

2. При больших расстояниях $L > 60$ см. Изображение неразлично из-за того, что оно слишком маленькое. Фокусировка производилась при слабо открытой диафрагме, при наибольшей яркости. Расстояние устанавливалось так, чтобы изображение имело наименьший размер, то есть его границы были резкими. При небольших расстояниях L было установлено, что чёткое изображение при большой диафрагме и резкое пятно при малой диафрагме наблюдаются при разном положении экрана, но как будет видно при обработке данных из-за большого расстояния L отклонение результатов лежит в пределах погрешности.

Результаты вычислений фокусных расстояний для разных экспериментальных измерений представлены на рисунке:



При вычислениях применялась приближённая формула, где толщина линзы оценивалась как $\delta = 5$ мм.

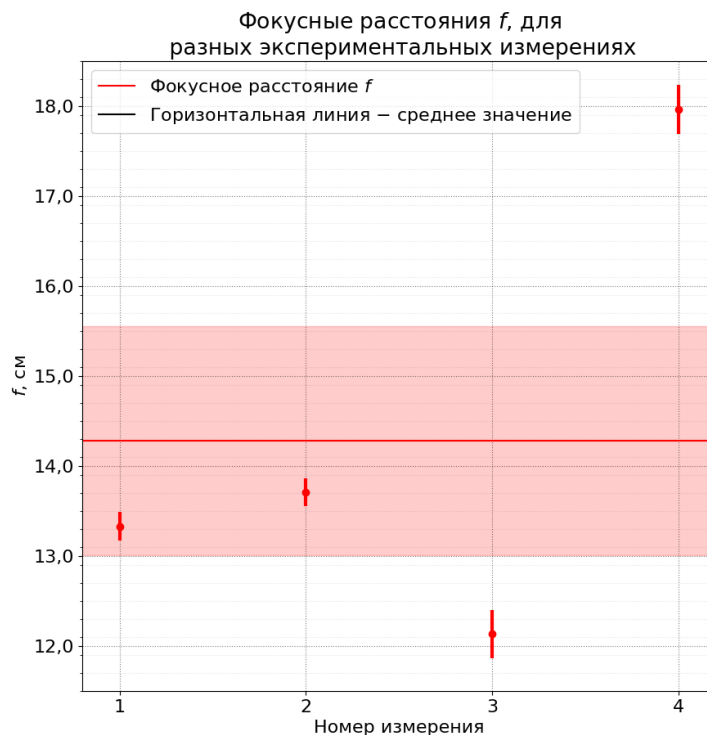
В данном методе предполагалось, что переднее и заднее фокусные расстояния равны. Итоговое среднее значение фокусного расстояния:

$$f = 10,25 \pm 0,03 \text{ см}$$

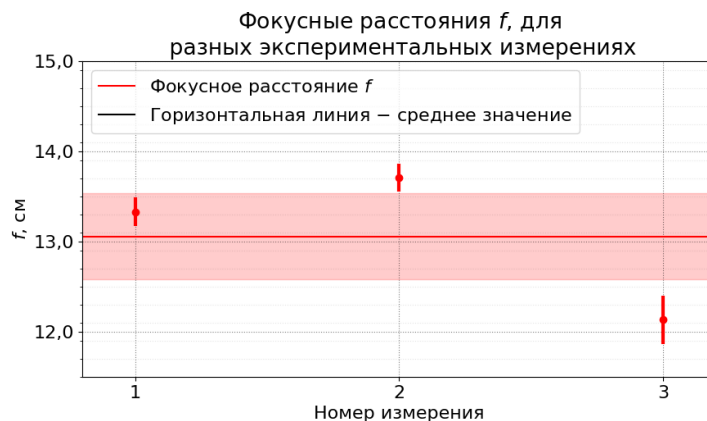
$$\text{Оптическая сила } D = 9,80 \pm 0,03 \text{ дптр.}$$

Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы с помощью метода Бесселя

Результаты вычислений фокусных расстояний для разных экспериментальных измерений представлены на рисунке:



Для более точного определения фокусного расстояния рассеивающей линзы нужно проводить дополнительные измерения. Но так как такой возможности нет, то проанализируем имеющиеся данные. Экспериментальная точка 4 выпадает из общей зависимости, отбросим её.



Итоговое среднее значение фокусного расстояния:

$$f = -13,1 \pm 0,5 \text{ см}$$

$$\text{Оптическая сила } D = -7,6 \pm 0,3 \text{ дптр.}$$

Определение фокусного расстояния тонких положительной и отрицательной линз с помощью оптической трубы

Повторные измерения

С помощью оптической трубы для положительной линзы были измерены фокусные расстояния тонких линзы:

№ Линзы	F(см)	D(дптр)
1	10.3	9.75
2	12.8	7.81
3	7.0	14.29
4	-14.8	-6.76

Таблица 1

F1 F2
4.6 см 3.8 см

Таблица 2: F1 - фокус при конфигурации линз "12 F2 - при "21"

Положительная линза №1:

Передний фокус $f = 9,1 \pm 0,1$ см

Задний фокус $f = 9,4 \pm 0,1$ см.

Положительная линза №2:

Передний фокус $f = 11,4 \pm 0,1$ см

Задний фокус $f = 11,5 \pm 0,1$ см.

Отрицательная линза:

Передний фокус $f = -15,0 \pm 0,1$ см

Задний фокус $f = -14,7 \pm 0,1$ см.

Измеренные фокусные расстояния слабо отличаются, итоговое фокусное расстояние в приближении, что линзы тонкие, оценим как среднее.

Положительная линза №1:

$f = 9,3 \pm 0,1$ см.

Оптическая сила $D = 10,8 \pm 0,1$ дптр.

Положительная линза №2:

$f = 11,5 \pm 0,1$ см.

Оптическая сила $D = 8,7 \pm 0,1$ дптр.

Отрицательная линза:

$f = -14,9 \pm 0,1$ см.

Оптическая сила $D = -6,7 \pm 0,1$ дптр.

Определение фокусного расстояния тонких положительной и отрицательной линз с помощью оптической трубы

Фокусные расстояния линз:

Определение фокусного расстояния системы двух линз методом Аббе: **F = 6.38**

Определение фокусного расстояния системы двух линз с помощью зрительной трубы:

Обсуждение результатов и выводы

В работе были определены фокусные расстояния тонких линз:

Положительная линза №1:

Метод Аббе:

$$f = 10,5 \pm 0,3$$

$$D = 9,5 \pm 0,2 \text{ дптр.}$$

Метод Бесселя:

$$f = 10,25 \pm 0,03 \text{ см.}$$

$$D = 9,80 \pm 0,03 \text{ дптр.}$$

Измерение с помощью зрительной трубы: $f = 9,3 \pm 0,1 \text{ см.}$

$$D = 10,8 \pm 0,1 \text{ дптр.}$$

Отрицательная линза:

Метод Бесселя:

$$f = -13,1 \pm 0,5 \text{ см}$$

$$D = -7,6 \pm 0,3 \text{ дптр.}$$

Измерение с помощью зрительной трубы:

$$f = -14,9 \pm 0,1 \text{ см.}$$

$$D = -6,7 \pm 0,1 \text{ дптр.}$$

Для положительной линзы №1 результаты определения фокусного расстояния с помощью методов Аббе и Бесселя сходятся в пределах погрешности.

Результаты измерений с помощью зрительной трубы сильно отличаются от измерений с помощью методов Аббе и Бесселя, скорее всего потому, что в при измерения с помощью зрительной трубы нужно было определить такую конфигурацию оптической системы, при которой наблюдается наиболее чёткое изображение. Но точно определить наиболее чёткое изображение не удаётся из-за субъективности человеческого восприятия наблюдаемой картины. Второй причиной расхождения результатов могла быть неточная настройка оптической системы. Луч мог немного отклоняться от главной оптической оси, что приводило к искажению результатов измерений.