

ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР АТМОСФЕРНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

Паненко Д. В., аспирант

Ряд характеристик турбулентности может быть получен интерферометрическими методами по измерению степени когерентности света звезд, прошедшего через атмосферу. В последнее время для этой цели стали использоваться интерферометры с зеркалом Ллойда [1].

С целью совершенствования техники измерений был разработан новый, двухзеркальный вариант интерферометра [2]. Он имеет большую чувствительность и более широкие функциональные возможности. Оптическая схема и расчет интерференционной картины были даны в [3]. Настоящая работа посвящена расчету элементов двухзеркального интерферометра.

Оптическая схема двухзеркального интерферометра показана на рис. 1. Объектив 1 плоскую

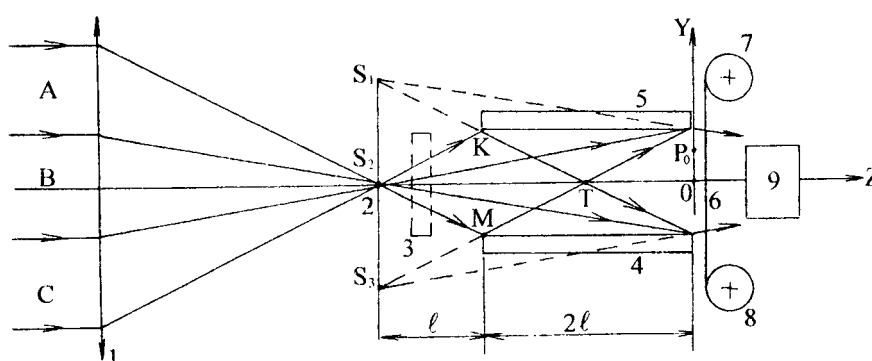


Рис. 1. Оптическая схема двухзеркального интерферометра атмосферной когерентности.

волну, идущую от звезды, собирает в действительном фокусе 2, 3 – интерференционный фильтр, предназначенный для монохроматизации света. Зеркала 4 и 5 расположены симметрично оптической оси S_2O (ось Z), параллельны одно другому и повернуты отражающими поверхностями к оптической оси. Расстояние между фокусом 2 и входной плоскостью KM , перпендикулярной оси Z , равно l должно быть согласовано с относительным отверстием объектива. Оптическая схема рис. удовлетворяет этим требованиям. Световой конус, ограниченный лучами, S_2K и S_2M входит промежутком между зеркалами 4 и 5. Расстояние $KM = S_1S_2 = S_2S_3 = d$, есть расстояние между зеркалами. Длина зеркал равна $2l$. Если конус лучей будет более расходящимся и l будет меньше половины длины зеркал, то будут возникать переотражения, искажающие вид интерференционной картины

выходной плоскости 6. Выходная плоскость содержит оси OX , OY и перпендикулярна оси Z . За счет отражения света от зеркал образуются мнимые источники S_1 и S_3 . Действительный источник S_2 является частью действительного фокуса 2, создает лучи, падающие на выходную плоскость без отражений. В точку выходной плоскости, например, т. P_0 оси Y , свет падает от трех источников, что приводит к появлению в выходной плоскости интерференционной картины. В выходной плоскости можно расположить фотопленку 7, 8, цифровой фотоаппарат или пользоваться микроскопом 9.

Топология выходной плоскости, соответствующая оптической схеме рис. 1, показана на рис. 2.

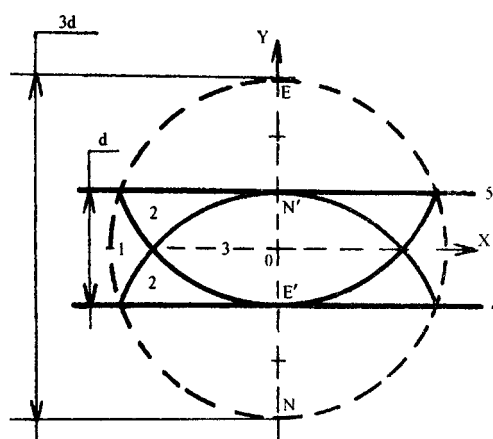


Рис.2 Топология выходной плоскости интерферометра.

Круг, ограниченный штриховой окружностью, представляет собой сечение светового конуса выходной плоскостью при отсутствии зеркал. Прямые линии 4 и 5 показывают выходные торцы зеркал. Зеркала из-за отражений меняют вид светового конуса в выходной плоскости. Верхний сегмент с вершиной E отображен на рис.2 зеркально симметричным относительно верхнего зеркала 5 сегментом с нижней точкой E' . Нижний сегмент с точкой N отображен зеркально симметричным относительно нижнего зеркала 4 сегментом с вершиной N' . Световое поле в выходной плоскости, как это следует из рис.2, можно разделить на участки трех видов: 1 – участки, освещаемые светом одного источника (S_2); 2 – участки, освещаемые светом двух источников (S_1, S_2) и (S_2, S_3); участок 3, на котором интерференция создается светом трех источников (S_1, S_2, S_3). Если увеличивать относительное отверстие объектива за счет уменьшения фокусного расстояния, то участок 3 будет расширяться по горизонтали. Представляется лучшим вариант, соответствующий рисунку 1, поскольку можно наблюдать интерференцию от двух и трех источников и иметь возможность выделять среднюю линию интерференционного поля, совпадающую с осью OX , рис.2. Параксиальный участок 3 по своим горизонтальным размерам вполне достаточен для регистрации интерференционного поля от трех источников.

При расчете выбирается звезда, позволяющая решить поставленную задачу, например: Полярная, α UMi; Вега, α Lyr или другая. Функция спектральной плотности энергетической освещенности E_λ , необходимая для расчета освещенности объектива, может быть взята из спектрофотометрического каталога звезд [4]. Перед расчетом необходимо выбрать фотоприемник: фотопленку, цифровой фотоаппарат, видеокамеру с ПЗС элементом или др. В любом случае необходима интегральная чувствительность S и разрешающая способность R , которые имеются в литературе [5]. В [6] описано получение интерференционных картин высокого контраста коллимированным светом ртутной лампы с выделенной зеленой линией 546,1 нм с шириной около 10 нм. Примем это как практическое обоснование такой величины $\Delta\lambda$ для фильтра интерферометра. При расчетах элементов интерферометра его качество в отношении временной когерентности будем оценивать длиной когерентности $L_{\text{ког.}} = (\lambda_0)^2 / \Delta\lambda$, где λ_0 – средняя длина волны спектрального интервала $\Delta\lambda$. Для получения интерференционной картины с высоким контрастом необходимо чтобы оптическая разность хода ΔL была значительно меньше $L_{\text{ког.}}$. В начале выполняется расчет геометрических размеров элементов интерферометра, поскольку они являются основой для других расчетов. Вертикальный размер выходной плоскости можно бы было выбрать соизмеримым с размерами фоточувствительного окна матричного ПЗС приемника, приняв расстояние между зеркалами равным 4-6 мм. Необходимость удовлетворять условиям временной когерентности заставляет принимать меньшие размеры между зеркалами: $d \sim 1$ мм. Выбрав d , можно по разрешающей способности R фотоприемника рассчитать ℓ . При этом пространственный период полос приравняем $1/R$: $\Delta Y = 1/R = 3\lambda\ell/2d$, откуда $\ell = 2d/3\lambda R$.

Значение ℓ определяет длину зеркала, равную 2ℓ и относительное отверстие A объектива. Из подобия равнобедренных треугольников общей вершиной S_2 имеем $A = d/\ell = D/f$, где D – диаметр, f – фокусное расстояние объектива. Диаметр D рассчитывается по условию достаточности энергетического освещения фотоприемника. Фокусное расстояние f объектива рассчитывается по отношению к отверстию A . По определению функция спектральной плотности энергетической освещенности равна

$$E_\lambda = \frac{\Delta E_\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{dE_\lambda}{d\lambda} \quad (1)$$

откуда $dE_\lambda = E_\lambda d\lambda$.

Считая фильтр расположенным перед объективом, учтем его влияние и влияние атмосферы на освещенность объектива. Пусть t_λ – спектральная функция пропускания фильтра, по определению

$t_\lambda = \Phi_{\lambda_{\text{вых}}} / \Phi_{\lambda_{\text{вх}}}$, Φ – поток, откуда $\Phi_{\lambda_{\text{вых}}} = t_\lambda \Phi_{\lambda_{\text{вх}}}$. Следовательно, интегральная энергетическая освещенность на объективе E равна

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} t_\lambda E_\lambda d\lambda \quad (2),$$

где λ_1 и λ_2 граничные длины волн пропускания интерференционного фильтра. Для учета поглощения атмосферы следует в формуле (4) ввести множитель 0.77, поскольку атмосфера в среднем поглощает 23% светового потока [4]. При необходимости более точного учета следует найти коэффициент прозрачности путем наблюдений. Считая, что зеркал на рис.1 нет найдем освещенность E_1 в выходной плоскости, используя соотношение для оптической мощи объектива,

$$E_1 = \frac{D^2}{(3d)^2} E \quad (3).$$

где $3d$ – диаметр освещенного круга в выходной плоскости при отсутствии зеркал. Следовательно,

На участке 3 выходной плоскости (рис.2) при наличии зеркал освещенность возрастает в три раза из-за отражения света от двух зеркал:

$$E_3 = \frac{D^2}{3d^2} E \quad (4),$$

E_3 – интегральная энергетическая освещенность фотоприемника. Обозначим H экспозицию фотоприемника, $H = E_3 \cdot \tau$, где τ – время экспозиции. Интегральная чувствительность ПЗС фотоприемника S равна: $S = U/H$, где U – выходное напряжение. Подставляя $H = E_3 \tau$, и, зная E_3 , находим диаметр объектива:

$$D = \sqrt{\frac{3d^2 U}{S \cdot E \cdot \tau}} \quad (5).$$

По D и A находится фокусное расстояние объектива: $f = D/A$.

Были выполнены расчеты на $\lambda = 555$ нм для двух звезд при различных размерах выходной плоскости. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Звезда	D мм	ℓ мм	A	E Дж/м ² с	D м	F М	ΔL мкм	L _{ког.} мкм	$\Delta \lambda$ мкм	λ_0 мкм	ΔY мкм
α UMi	0.5	6	0.083	$4680 \cdot 10^{-14}$	0.29	3.5	14	31	0.01	0.555	10
α UMi	0.6	7.2	0.083	$4680 \cdot 10^{-14}$	0.34	4.0	17	31	0.01	0.555	10
α Луг	1.0	12	0.083	$2744 \cdot 10^{-13}$	0.24	2.9	28	31	0.01	0.555	10

Ряд величин оставались постоянными: разрешающая способность $R=100 \text{ мм}^{-1}$, интегральная чувствительность ПЗС фотоприемника $S=500 \text{ В м}^2/\text{Дж}$, напряжение ПЗС фотоприемника $U=0,08\text{В}$, время экспозиции 30с [1], амплитудное пропускание интерференционного фильтра $t=0,8$.

ВЫВОДЫ:

1. Интерферометр атмосферной когерентности можно построить только на базе телескопа с диаметром объектива не менее $0,5 \text{ м}$. В качестве базовых выбирать яркие звезды, например, $\alpha\text{Луг}$.

2. Для увеличения длины когерентности света ширину полосы интерференционного фильтра целесообразно уменьшать, используя, например, интерференционный фильтр из слоев сульфида цинка и криолита с данными $\lambda=520 \text{ нм}$, $t=0,8$, $\Delta\lambda=3,5 \text{ нм}$.

3. По условиям получения небольшой разности хода использовать интерферометры с небольшим расстоянием между зеркалами.

4. В качестве фотоприемников использовать цифровые фотоаппараты, позволяющие регистрировать интерференционные картины в виде цифровых массивов, удобных для последующей обработки на персональном компьютере.

Автор выражает признательность научному руководителю, профессору Э.И.Терезу за интерес к работе.

Литература.

1.Токовинин А.А., Интерферометр с зеркалом Ллойда для измерения качества изображения // *Астрономический циркуляр*, 1985, № 1366, с.4 – 7.

2. Пат. 2087878 RU, МКИ³ 6G01, J3/26. Интерферометр атмосферной когерентности / Паненко Д.В., (UA).—N5068068; заявлено 04.06.1992; опубл.23.08.97, бюл. №23 от 23.08.97, приоритет 04.06.92 (RU).

3 Panenko D.V., Terez E.I., Atmosphere turbulence investigation with two-mirror interferometer/ *SPIE*,1997, vol.3237,p.18-22.

4. Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н., Сводный фотометрический каталог звезд. Алма-Ата, Наука Каз.ССР, 1978,—197с.

5. Пресс Ф.П., Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991, 264с.

6. Де Веллис Дж., Рейнольдс Дж., Голография. – М.: Наука, 1970, –247с.