

КОНВЕКТОМЕТР — ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ

В. С. Рылов, В. Г. Штоль

Изготовленный в САО АН СССР конвектометр предназначен для измерения оптических неоднородностей в локальных объемах (в подкупольном пространстве астрономических башен, в больших спектрографах, в трубе телескопа) с амплитудами флуктуаций в интервале $1.5-0.004^\circ\text{C}$. Дано описание прибора, приведены результаты испытаний.

A convectometer manufactured at SAO USSR. AS is designed for measuring optical irregularities in local volumes (observatory domes, large spectrographs, telescope tubes) with fluctuation amplitudes within 1.5°C to 0.004°C . A description of the apparatus and results of testing are presented.

Эффективность больших телескопов ограничивается земной атмосферой часто в большей степени, чем качеством оптики. Наибольшие искажения в качество изображения вносит приземный слой толщиной 30—40 м, характеризующийся усиленной тепловой конвекцией. Характерный размер неоднородностей плотности в нем лежит от 1 до 25 см [1, 2]. Астрономическая башня, телескоп и другие тепломки сооружения значительно ухудшают качество изображения. В отличие от окружающей башню воздушной среды в подкупольном пространстве больших телескопов можно создавать устойчивый тепловой режим, уменьшающий влияние сооружений и конструкций на астроклимат. Надежный контроль степени однородности атмосферы в башне и скорости перехода ее в состояние, не вносящее помех в изображение, дает возможность найти связь теплового режима с качеством изображения.

Измерение оптических неоднородностей в подкупольном пространстве можно вести разными методами, но все они должны отвечать следующим требованиям.

1. Критерию подобия. Измерения должны вестись по ходу пучка света в телескопе на отрезке, сопоставимом с длиной пучка, и в сечениях, охватывающих набор характерных размеров неоднородностей воздуха. Опыт измерения астроклимата при помощи малых телескопов [1] показывает, что получаемые таким образом данные плохо коррелируют с качеством изображения, даваемым большим телескопом, что свидетельствует о нарушении критерия подобия.

2. Необходимой чувствительности прибора по измеряемому параметру.

3. Частотному диапазону флуктуаций оптических неоднородностей. Частотный спектр флуктуаций фазы световой волны в приземном слое простирается до 20—30 гц с максимумом в области 1 гц [1]. Нижняя граница частот достигает 0.1 гц. При этом для шестиметрового телескопа возможны частоты, достигающие 0.02 гц [2]. По фотографическим измере-

ниям, которые фиксируют флуктуации, вносящие заметный вклад в ухудшение качества изображения, частотный спектр лежит в интервале 0.1—15 гц [2].

В работе [3] было показано, что флуктуации фазы световой волны, возникающие на оптических неоднородностях воздуха, могут быть зарегистрированы путем измерения флуктуаций сопротивления тонкой проволоки, натянутой в направлении распространения волны. Опорным сигналом служит сопротивление другой проволоки, натянутой параллельно первой на определенном расстоянии. Эта методика была положена в основу нашего конвектометра.

Рассмотрим, в какой степени эта методика может удовлетворить поставленным требованиям.

Характерные расстояния хода световых пучков в башне составляют: в трубе телескопа 25 м, в подкупольном пространстве 20 м, в помещении основного звездного спектрографа куда 8 м. Принимая во внимание характерные размеры неоднородностей плотности, возникающих из-за конвекции воздуха, расстояния между проволоками были взяты 20, 60, 200 и 400 мм. Длина проволоки должна составлять несколько метров, но из соображений жесткости конструкции она была взята равной 1 м. Поскольку расстояния между проволоками в несколько раз меньше их длины, можно считать, что при измерениях регистрировался интегральный эффект флуктуаций плотности по длине проволоки.

Остановимся на чувствительности методики. Флуктуации плотности и пропорциональные ей флуктуации температуры (при постоянном давлении) приводят к изменению показателя преломления n :

$$\Delta n / (n - 1) = -\Delta T / T. \quad (1)$$

Отсюда получим выражение для определения чувствительности этого метода:

$$\Delta F / F = \alpha \Delta R / \beta R, \quad (2)$$

где F — оптическая длина пути вдоль проволоки, на которой измеряется флуктуация фазы волнового фронта ΔF , выраженная в тех же единицах (в нашем случае $F = 1$ м), ΔR — изменение сопротивления R одной проволоки относительно другой, $\alpha = 10^{-6}$ град. $^{-1}$ — температурный коэффициент показателя преломления, β — температурный коэффициент сопротивления проволоки (в нашем случае применялся вольфрам, у которого $\beta = 4 \cdot 10^{-3}$ град. $^{-1}$). По формуле (2) находим, что для измерения ΔF , численно равной длине волны 0.5 мк, на отрезке 1 м необходимо регистрировать флуктуации сопротивления, равные 0.2%. Далее будет показано, что разработанная измерительная схема позволила регистрировать флуктуации сопротивления до $2 \cdot 10^{-3}\%$.

В работе [3] показано, что вольфрамовые проволоки диаметром 0.04 мм имеют весьма малое время установления теплового равновесия с окружающей средой, составляющее для скорости ветра 1 м/сек. 0.5 мсек. Пространственное разрешение составляет 0.5 мм. Следовательно, данная методика удовлетворяет поставленным требованиям, в том числе и по частотному диапазону.

Описание прибора

На основе методики измерения флуктуаций сопротивления двумя параллельными проволоками был изготовлен прибор-конвектометр. Он состоит из антенны (рис. 1), блока измерения и шлейфового осциллографа (рис. 2). Антенна присоединена к блоку измерения радиочастотным ка-

белем длиной 30 м и представляет собой жесткую раму, на которой натянуты 5 вольфрамовых проволок длиной 1 м и толщиной 0.01 мм.

Рассмотрим требования к шкале измерений прибора. Для астрономических телескопов реальные значения углового радиуса турбулентного

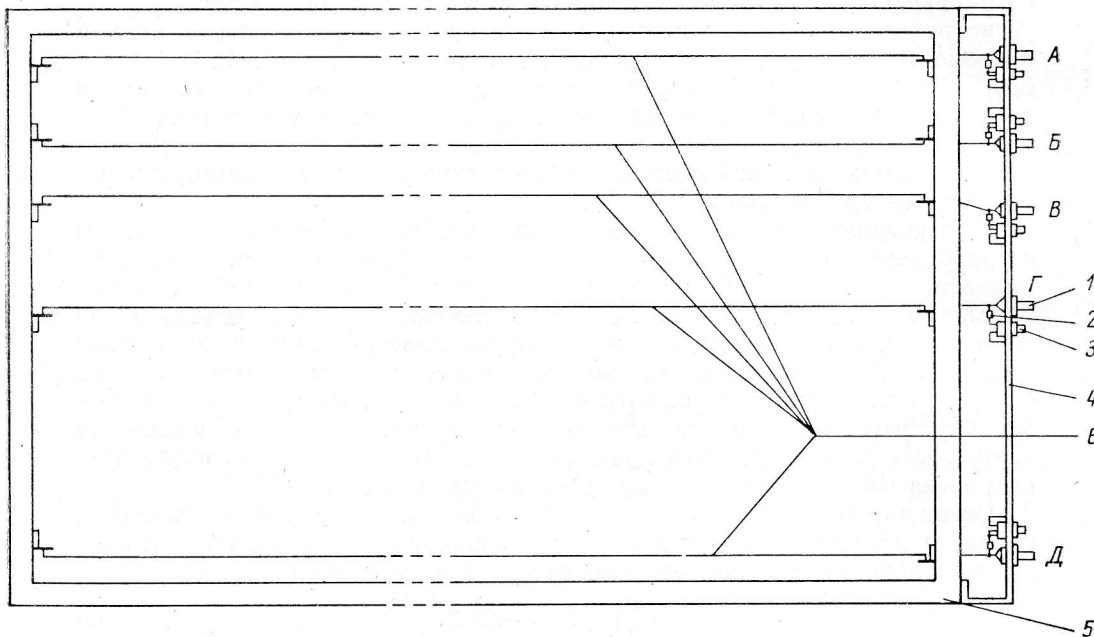


Рис. 1. Антенна.

1 — разъем; 2 — шунтирующее сопротивление (постоянное); 3 — шунтирующее сопротивление (переменное); 4 — скоба; 5 — текстолитовая рама; 6 — вольфрамовые проволоки.

диска изображения звезды лежат в интервале $\Delta F/l = 0.05-1$ угл. сек., где l — расстояние между проволоками. Ниже приведены соответствующие

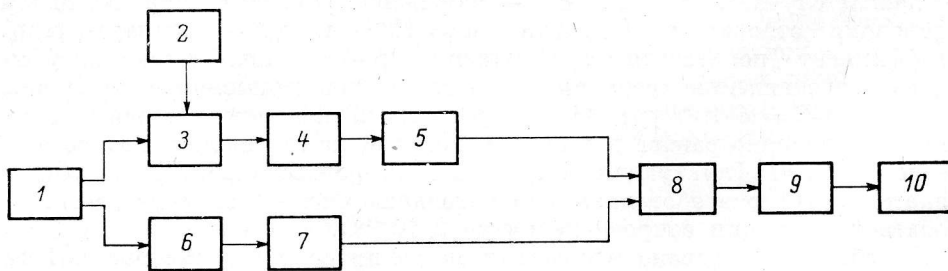


Рис. 2. Блок-схема конвектометра.

1 — генератор; 2 — антенна; 3 — фазовый модулятор; 4 — селективный усилитель; 5 — выходной усилитель; 6 — фазовращатель; 7 — усилитель; 8 — фазовый детектор; 9 — усилитель низкой частоты; 10 — осциллограф.

щие этим значениям $\Delta F/l$ изменения сопротивлений проволок $\Delta R/R$, выраженные в процентах и вычисленные по формуле (2):

$$\Delta R/R (\%) = 1.5 \cdot 10^{-5} l (\Delta F/l).$$

$(\Delta F/l)''$	$l, \text{ мм}$			
	20	60	200	400
0.05	$1.5 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
1	$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	0.3	0.6

Из приведенных данных следует, что прибор должен регистрировать изменения сопротивления от 0.6 до $1.5 \cdot 10^{-3}\%$. Для каждой пары проволок интервал изменений сопротивления невелик и определяется расстоянием между проволоками. Значениям флуктуаций сопротивлений от 0.6 до $1.5 \cdot 10^{-3}\%$ соответствуют изменения температуры от 1.5 до $4 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$.

Для регистрации флуктуаций сопротивления проволок был применен фазовый метод измерения, обеспечивающий лучшую помехоустойчивость измерений по сравнению с амплитудным методом [4]. Две проволоки антенны (рис. 2) подключались к мосту переменного тока частотой 3152 гц, поступающего от генератора. Мост выполнял роль фазового модулятора сигнала. Канал опорного фазового сигнала состоял из усилителя, двух фазовращателей и преобразователя синусоидального напряжения в прямоугольное. Фазовый детектор преобразовывал сигнал в напряжение низкой частоты, которое регистрировалось на шлейфовом осциллографе Н-700. Полоса измерительного блока — 0.1—70 гц. Выравнивание сопротивлений выбранной пары проволок осуществлялось при помощи шунтирующих сопротивлений (рис. 1). Калибровка измеряемого сигнала производилась подключением к одной из проволок набора шунтирующих сопротивлений, имитирующих изменения сопротивлений в необходимом интервале. Для исключения влияния паразитной емкости, вносимой шунтирующими сопротивлениями, на время измерений проволока шунтировалась резистором того же типа, что и калибровочные, но со значением сопротивления, величина которого не влияла на сигнал. Калибровка производилась до начала и после окончания измерения. Воспроизводимость сигналов калибровки лежала в пределах 10—15%, что определяло погрешность измерения.

Режим питания моста переменного тока был подобран так, чтобы выделяемая на проволоках мощность не влияла на результат измерений.

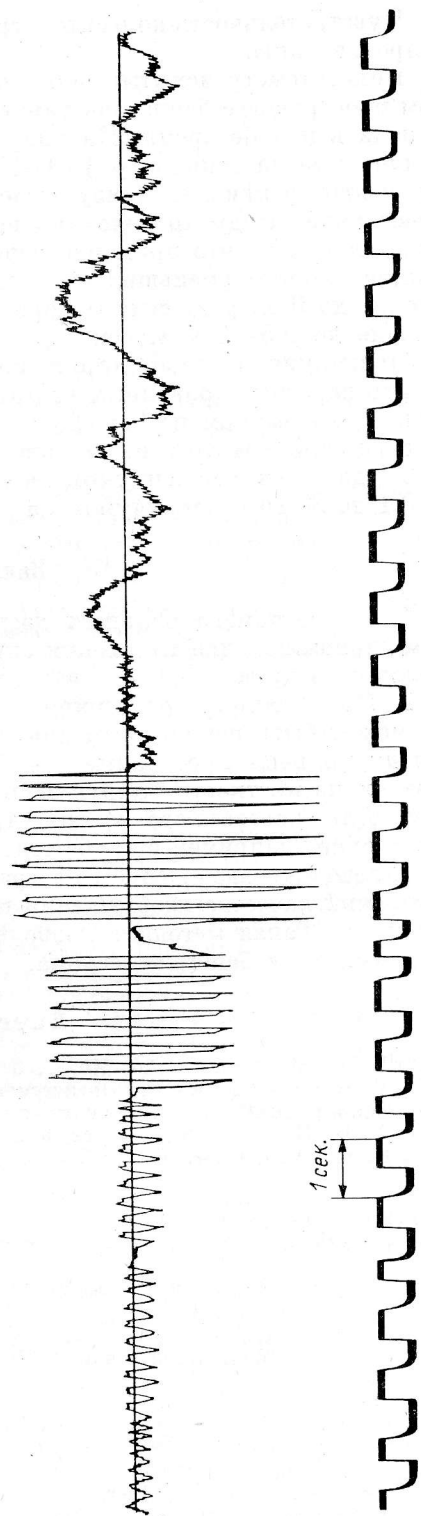


Рис. 3. Образец записи калибровки и флуктуаций температуры на ленте осциллографа Н-700.

Чувствительность конвектометра составляла $1.5 \cdot 10^{-3}\%$ по измеряемому сопротивлению.

Конвектометр испытывался в лабораторных условиях и в подкупольном пространстве башни шестиметрового телескопа около открытой щели купола в ночное время. На рис. 3 даны для примера регистрограммы, полученные на осциллографе Н-700 в подкупольном пространстве, и калибровочные кривые. Внизу записаны метки времени с периодом 1 сек. Расстояние между проволоками во время испытаний составляло 400 мм. Было замечено, что примерно через 3 часа после открытия забрала конвекция заметно уменьшилась и соответствовала искривлению волнового фронта до 0.02 угл. сек. Вскоре начали появляться возмущения, доходившие до 0.5—1 угл. сек.

Испытания в лаборатории показали следующее. При $l = 400$ мм спектр зарегистрированных частот флуктуаций лежит в интервале 0.1—5 гц с максимумом на 0.4—0.6 гц, при $l = 200$ мм спектр частот от 0.1 до 8 гц с максимумом на тех же частотах, при $l = 60$ мм спектр частот от 0.1 до 10 гц с максимумом на 0.5—2 гц, при $l = 20$ мм спектр частот от 0.1 до 20 гц с максимумом на 1—2.5 гц.

Заключение

1. Конвектометр обладает достаточной чувствительностью и частотным диапазоном для измерения оптических нестабильностей в локальных объемах воздуха.

2. Конвектометр интегрирует искажения фазы волнового фронта. Он может быть использован для измерения оптических неоднородностей в подкупольном пространстве, в больших спектрографах, в трубе телескопа и на местности вокруг башни телескопа.

3. Для постоянного и оперативного контроля астроклиматической обстановки, например в трубе телескопа, можно установить 2 параллельные проволоки вдоль трубы на границе светового пучка и путем прямых измерений качества изображения найти корреляцию с показаниями пары проволок. Такая методика позволит быстро выявлять нарушения теплового режима в башне телескопа.

Литература

1. Bulletin Astronomique, 24, No. 2, 3, 1964.
2. И. Г. К о л ч и н с к и й. Оптическая нестабильность земной атмосферы по наблюдениям звезд. Киев, «Наукова думка», 1967.
3. D. N. V. H a l l, Appl. Optics, 6, No. 11, 1992, 1967.
4. В. И. К о с т е н к о, О. Н. С у э т и н. Измерительная техника, № 4, 68, 1966.