

М. А. Мартиросян

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ

Одним из основных затруднений при обстоятельном изучении распределения яркости по поверхности протяженных объектов в различных участках спектра является чрезвычайная трудоемкость фотометрических работ. Это объясняется тем, что созданные до сих пор автоматические приборы или приставки к фотометрам не приспособлены для указанной цели, так как некоторые из них удобны для спектрофотометрических работ в шкале интенсивности [2, 3, 4, 6], а другие, например, изофотометры [1, 5] позволяют получить лишь общее представление о распределении яркости протяженного объекта. Получение же обстоятельного представления о распределении яркости на протяженном объекте с помощью изофотометра встречает серьезные затруднения. Часто для этой цели используются обычные объективные микрофотометры со столиками, имеющими точные микрометрические движения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Такой прибор дает возможность путем последовательных, весьма малых перемещений столика производить сплошные замеры поверхности протяженного объекта. Подобные измерения позволяют получать обстоятельное и детальное представление о распределении яркости, при желании в различных участках спектра, следовательно, и о распределении цвета.

Но такого рода измерения, как указывалось выше, чрезвычайно трудоемки и утомительны, так как приходится

вручную, микрометрическим винтом передвигать столик и фиксировать как его координаты, так и показания гальванометра. Подобные операции могут повторяться несколько тысяч раз. Для полного представления о затрачиваемом труде к сказанному надо добавить, что для определения яркости по результату каждого из многих измерений надо произвести ряд математических операций, а затем по характеристической кривой определить звездную величину или интенсивность.

Необходимо отметить, что при автоматизации, описанного метода измерения должна появиться возможность уменьшить измеряемую площадку или частично наложить друг на друга соседние. При этом неизбежно увеличивается количество операций, но зато результаты дискретных измерений по отдельным площадкам дают более точное представление о действительной непрерывной картине.

Описанный метод определения распределения яркости и цвета протяженных объектов включает в себя ряд идентичных операций и предусматривает дискретные измерения звездных величин или интенсивностей в отдельных, расположенных рядом площадках.

Указанное обстоятельство делает возможным почти полностью автоматизировать описанный процесс измерений на основе цифровой техники.

На наш взгляд, микрофотометр интенсивностей для указанной цели должен быть построен на основе цифровой техники еще и потому, что она позволяет значительно повысить точность измерения.

Основной частью подобного микрофотометра интенсивностей явился бы преобразователь пропусканий $\frac{A}{A_0}$ негатива в интенсивности или звездные величины.

В настоящей работе описывается принцип работы преобразователя и приводятся результаты испытания его макета.

Величину интенсивности можно получить путем предварительного преобразования отклонения зеркала гальва-

нометра, пропорционального по чернению негатива во временной интервал, а затем в цифровой код, эквивалентный интенсивности или звездной величине.

Принцип работы такого преобразователя состоит в подсчете импульсов тактового генератора, укладываемых в преобразуемом интервале времени. Блок-схема преобразователя временных интервалов в цифровой код представлен на рис. 1.

Старт-импульс, отмечающий начало преобразуемого интервала времени, ставит триггер (Т) в положение, обеспечивающее открытое состояние вентилей (В).

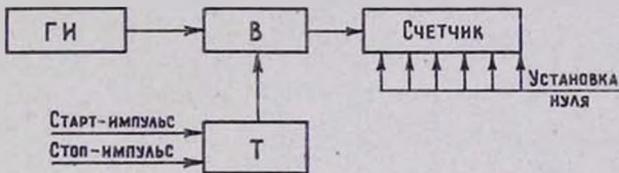


Рис. 1. Структурная схема преобразователя.

Fig. 1. Structural diagram of the converter.

Через вентиль на счетчик поступают импульсы от генератора стабильной частоты (ГИ). С момента открытия вентилей счетчик начинает подсчет импульсов генератора. Стоп-импульс, отмечающий конец временного интервала, возвращает триггер в исходное положение, вентиль закрывается, прекращается поступление импульсов на счетчик. Показания счетчика будут пропорциональны величине временного интервала между старт- и стоп-импульсами. Преобразование же почернений негатива в старт- и стоп-импульсы, разделенные временным интервалом, пропорциональным соответствующим звездным величинам или интенсивностям, может производиться следующим образом.

На прозрачный барабан, вращающийся с постоянной скоростью, накладывается характеристическая кривая негатива, вычерченная тушью по кальке. Диафрагмированный пучок света отраженный от зеркальца гальванометра, соединенного с фотоэлементом, ток которого пропорционален по-

чернению негатива, через систему линз и зеркал проходит сквозь барабан с характеристической кривой на фотоумножитель, рис. 2.

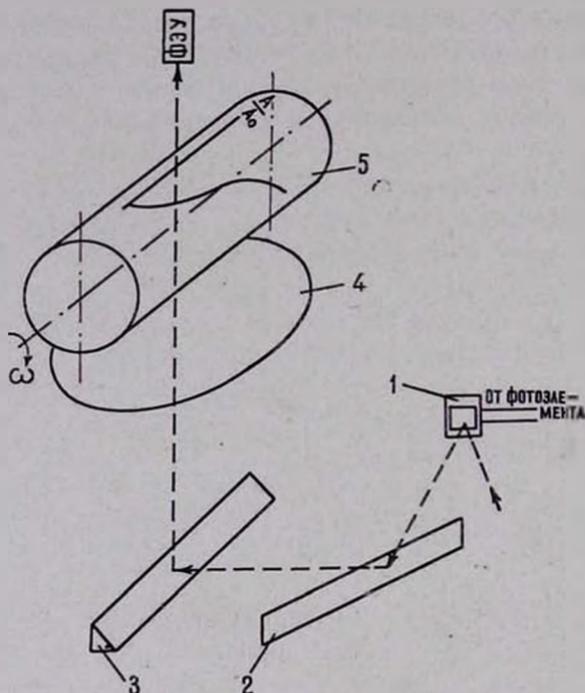


Рис. 2. Схематическое изображение оптической части преобразователя:

1—гальванометр, 2, 3—плоские зеркала, 4—линза, 5—прозрачный барабан с характеристической кривой.

Նկ. 2. Փոխակերպիչի օպտիկական մասի սխեմատիկ պատկերումը.

1—գալվանոմետր, 2, 3—հարթ հայելիներ, 4—սպինյակ, 5—բևույթագծային կորով թափանցիկ զլան:

Изменение почернений негатива вызывает перемещение луча по оси пропусканий. При вращении барабана световой пучок пересекается сначала осью пропусканий, выделяя на катоде фотоумножителя старт-импульс, а затем — характеристической кривой, выделяя стоп-импульс.

Выведем зависимость определяемой звездной величины от расстояния точки на характеристической кривой до оси пропускания „ l “, радиуса барабана „ R “ и числа его оборотов „ n “.

Известно, что

$$l = R \varphi, \quad (1)$$

где φ — угол поворота барабана в радианах.

При постоянной скорости вращения

$$\varphi = \omega t, \quad (2)$$

где ω — угловая скорость.

Поэтому имеем

$$l = R \omega t. \quad (3)$$

С другой стороны,

$$\omega = 2\pi n. \quad (4)$$

Исключив ω из (3) и (4) и определив t , получим выражение

$$t = \frac{l}{2\pi R n}. \quad (5)$$

Из выражения (5) явствует, что при постоянной скорости вращения барабана интервал времени между старт- и стоп-импульсами будет пропорциональным „ l “.

Наименьшая звездная величина соответствует наибольшему l , а следовательно, наибольшему интервалу времени T_{\max} .

Текущее значение звездной величины m будет соответствовать временному интервалу t , который равен

$$t = \frac{T_{\max}}{m_{\min}} m. \quad (6)$$

Решив совместно (5) и (6), находим

$$m = \frac{l m_{\min}}{2\pi R n T_{\max}}. \quad (7)$$

Рассмотрим причины, вызывающие погрешность при преобразовании почернений в интенсивности для описанного выше принципа преобразования.

Под погрешностью понимается средняя квадратичная ошибка преобразования, в которой учитывается влияние всех возможных частных источников погрешностей. Ее можно разбить на

1) инструментальную погрешность, вызванную технологическими отклонениями при изготовлении отдельных элементов преобразователя, их конечными чувствительностями и стабильностями во времени;

2) погрешность, определяющуюся принципом преобразования, в первую очередь вызванную квантованием по уровню и времени.

Рассмотрим инструментальную погрешность с целью установления технологических допусков на отдельные детали и механизмы аналоговой части преобразователя.

Вычислим погрешность определения звездной величины, вызванную нестабильностью оборотов двигателя.

Дифференцируя выражение (7) по „ n “, получим

$$dm = - \frac{l m_{\min}}{2 \pi R T_{\max}} \cdot \frac{dn}{n^2} \quad (8)$$

или в конечных приращениях

$$\Delta m_1 = - \frac{l m_{\min}}{2 \pi R T_{\max}} \cdot \frac{\Delta n}{n^2} \quad (9)$$

При

$$l = 300 \text{ мм},$$

$$R = 100 \text{ мм},$$

$$m_{\min} = 8^{\text{н}},$$

$$T_{\max} = 0.5 \text{ сек.},$$

$$|\Delta m_1| = 7.65 \frac{\Delta n}{n^2}.$$

При питании синхронного двигателя, вращающего барабан от сети, нестабильность его оборотов (Δn) в секунду равна нестабильности частоты (Δf) сети.

В мощных энергосистемах $\Delta f = 0.1$ гц.

При передаточном числе редуктора от двигателя к барабану $i = 50$ нестабильность оборотов барабана будет:

$$\Delta n = \frac{\Delta n_1}{50} = \frac{0.1}{50} = 0.002.$$

Тогда

$$\Delta m_1 = 7.65 \times 0.002 = \pm 0.015.$$

Ошибка вполне приемлемая.

Погрешность, вызванная технологическими отклонениями радиуса барабана от заданного радиуса R , определяется по аналогии с (9) выражением

$$\Delta m_2 = - \frac{l_{m_{\min}}}{2 \pi n T_{\max}} \cdot \frac{\Delta R}{R^2}. \quad (10)$$

При допуске ΔR , равном 0.1 мм, и при принятых выше значениях других параметров имеем

$$|\Delta m_2| = \frac{300 \times 8 \times 0.1}{2 \times 3.14 \times 1 \times 0.5 \times 10000} = 0.0008.$$

Таким образом, инструментальная погрешность при указанных выше допусках будет

$$\Delta m_{\text{и}} = \sqrt{\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2} = 0.0017.$$

Для определения ошибки, вызванной принципом преобразования, выразим звездную величину, определяемую выражением (6), через число импульсов, зафиксированных счетчиком.

Обозначим частоту импульсов, заполняющих счетчик, через $f_{\text{и}}$. Число N , зафиксированное счетчиком в результате выполнения одного цикла преобразования, будет

$$N = f_{\text{и}} \cdot t. \quad (11)$$

Решив совместно (6) и (11) для m , получим

$$m = \frac{m_{\min}}{T_{\max}} N \tau, \quad (12)$$

где введено выражение периода $\tau = \frac{1}{f_{\text{и}}}$.

Число импульсов N является числовым эквивалентом измеряемой звездной величины. Этот эквивалент позволяет

определить не точное значение звездной величины, а лишь ее распределение. Это объясняется отсутствием связи между моментом прихода старт- и стоп-импульсов и последовательностью импульсов ГИ.

Легко показать, что при гауссовском распределении ошибок дисперсия равна $\frac{\tau}{\sqrt{6}}$, а максимальная погрешность $\pm \tau$.

Таким образом, при уменьшении τ уменьшается и максимальная ошибка.

Пусть характеристическая кривая вычерчена для интервала в 8 звездных величин, а объем счетчика равен 3000 импульсов. Тогда интервал между двумя соседними импульсами будет

$$\tau = \frac{m T_{\max}}{m_{\min} N} = 0.167 \cdot 10^{-3} \text{ сек.}$$

Частота генератора импульсов

$$f_{\text{ГН}} = \frac{1}{\tau} = 6000 \text{ ц.}$$

Одному импульсу будет соответствовать 0.00266 звездной величины, то есть максимальная ошибка, вызванная принципом преобразования при указанных τ , m_{\min} и N , будет

$$\Delta m_s = 0^m 003.$$

На точность преобразования также влияет стабильность частоты генератора импульсов, ибо перемена периода повторения импульсов — τ может вызвать изменение кода, зафиксированного счетчиком.

Определим значение коэффициента нестабильности частоты генератора — α , при котором код, зафиксированный счетчиком, изменится на единицу младшего разряда. Измененное значение частоты генератора $f'_{\text{ГН}}$ и периода повторения импульсов τ' будут

$$f'_{\text{ГН}} = f_{\text{ГН}} (1 \pm \alpha), \quad (13)$$

$$\tau' = \frac{1}{f_{\text{ГИ}}} = \tau \frac{1}{1 \pm \alpha}. \quad (14)$$

Наибольшая ошибка получается при преобразовании минимального почернения или при максимальном интервале времени.

При неизменном значении частоты числовой эквивалент, зафиксированный счетчиком, будет

$$N_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}}}{\tau}; \quad (15)$$

при новом

$$N_{\text{max}} \pm 1 = \frac{T_{\text{max}}}{\tau'} = \frac{T_{\text{max}}(1 \pm \alpha)}{\tau}. \quad (16)$$

Используя (13), получим

$$N_{\text{max}} \pm 1 = N_{\text{max}}(1 \pm \alpha).$$

Следовательно, для того чтобы ошибка из-за изменения частоты генератора ГИ не превышала единицы младшего разряда, коэффициент нестабильности его должен быть

$$\alpha \leq \left(\frac{N_{\text{max}} \pm 1}{N_{\text{max}}} - 1 \right) = \frac{1}{N_{\text{max}}}.$$

Для счетчика с объемом в 3000 импульсов

$$\alpha = \frac{1}{3000} = 0.333 \times 10^{-3}.$$

При использовании простого лампового генератора с температурной компенсацией изменения кода не могут быть обнаружены, так как для такого генератора $\alpha = 2 \times 10^{-4}$.

Таким образом, при указанных допусках среднеквадратичная ошибка описанного метода преобразования почернений в звездные величины или интенсивности будет

$$\begin{aligned} \Delta m &= \sqrt{\Delta m_1^2 + \Delta m_2^2 + \Delta m_3^2} = \\ &= \sqrt{0.015^2 + 0.008^2 + 0.003^2} = 0.017. \end{aligned}$$

Подсчет среднеквадратичной погрешности показывает,

что данный метод преобразования позволяет использовать наибольшую точность, возможную при фотографическом методе регистрации световых потоков.

Для сравнения с точностью преобразования, достигнутой другими схемами, определим относительную погрешность предложенного нами метода.

В нашем случае относительная ошибка равна

$$\frac{\Delta m}{m_{\min}} \times 100 = \frac{0.017}{8} \times 100 = 0.21\%$$

Здесь m_{\min} — наименьшая измеряемая звездная величина, при изменении которой возможны наибольшие погрешности, а Δm — наибольшая абсолютная погрешность.

Полученная относительная погрешность на порядок меньше погрешностей описанных в литературе [2, 4, 5] схем преобразований пропускания в интенсивности.

Для оценки точности описанного метода преобразования и проверки принципа его работы в Бюраканской астрофизической обсерватории построен макет такого преобразователя. Он состоит из микрофотометра МФ-4, в котором регистрирующая часть заменена вращающимся с постоянной скоростью прозрачным барабаном пересчетного устройства ПС-10 000, снабженного релейной схемой, обеспечивающей возможность повторения цикла преобразования после снятия с него предыдущего результата и линзы, фокусирующей регистрирующий луч МФ-4 на катод фотоумножителя.

Макет испытывался на стабильность показаний и на точность преобразования. Испытание на стабильность производилось следующим образом. На барабан накладывалась характеристическая кривая, построенная для интервала в восемь звездных величин.

Регистрирующий луч МФ-4 оптическим клином устанавливался на различные значения пропусканий. В каждой точке производилось несколько преобразований. Для иллюстрации стабильности метода результаты трехкратных измерений для десяти точек сведены в табл. 1.

Таблица 1

Показания счетчика преобразователя

Точки	Номер измерения		
	1	2	3
1	2037	2038	2037
2	1840	1839	1838
3	1456	1455	1456
4	1227	1227	1228
5	1131	1131	1133
6	1088	1089	1089
7	0940	0938	0938
8	714	715	712
9	605	606	606
10	335	334	334

Как видно из этой таблицы, стабильность системы хорошая.

Испытание на точность производилось следующим образом. Пластика устанавливалась на средний фон, который

Таблица 2

№№ площадок	Звездные величины		Разность
	обычная обработка	измерения на макете	
1	13.68	13.679	-0.001
2	13.16	13.164	+0.004
3	11.88	11.879	-0.001
4	11.67	11.672	+0.002
5	11.97	11.972	+0.062
6	11.27	11.271	+0.001
7	10.84	10.854	+0.014
8	10.56	10.572	+0.012
9	10.76	10.781	+0.021
10	11.12	11.143	-0.023
11	10.76	10.781	+0.021
12	11.22	11.211	-0.009
13	11.43	11.441	+0.011
14	10.76	10.781	+0.021
15	10.16	10.157	-0.003
16	10.56	10.578	+0.018
17	10.86	10.862	+0.002
18	10.40	10.400	0
19	9.68	9.673	-0.007
20	7.84	7.822	-0.018

заранее определялся путем наведения на несколько участков фона. Оптическим клином микрофотометра регистрирующий луч устанавливался на единицу оси пропусканий. Передвижением столика микрофотометра измерялись площадки протяженного объекта величиной 0.01 мм^2 . Полученные данные сопоставлялись с результатами обычной обработки. Эти данные сведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что максимальная разница между результатами составляет 0.023, что соответствует относительной погрешности в 0.2% .

В настоящее время в Бюраканской астрофизической обсерватории заканчивается изготовление автоматического микрофотометра интенсивности с выводом результатов измерений на печать. Работа его основана на описанном принципе преобразования.

Մ. Ա. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԹՎԱՅԻՆ ՓՈԽԱԿԵՐՊԻՉԻ ՍԿՋԲՈՒՆՔԸ ՊԱՅՄԱՌՈՒԹՅԱՆ ԲԱՇԽՄԱՆ ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ու մ

Տարածված առարկաների պայծառութիւնն բաշխման լուսաչափական աշխատանքները չափազանց աշխատատար են: Նրանք առանձնապես բացառիկ բնուիթ ունեն, երբ անհրաժեշտ է լինում հանդամանորեն ուսումնասիրել պայծառութիւնն բաշխումը տարածված առարկաների մակերեսի վրա, լուսապատկերի տարբեր մասերում:

Հոգւածում առաջարկվում է նոր տիպի փոխակերպիչ սարքավորում՝ թողարկումներից ինտենսիվութիւնների կամ աստղալին մեծութիւնների անցնելու համար: Այդ հնարավորութիւն է տալիս համարյա լրիվ ավտոմատացնել նշված լուսաչափական աշխատանքները:

Տրված են առաջարկվող փոխակերպման մեթոդի ճշտութիւնն հաշվարկը և նրա նախանմուշի վրա կատարված փորձերի արդիւնքները:

M. A. MARTIROSIAN

APPLICATION OF PRINCIPLE OF DIGITAL
TRANSFORMATION TO THE MEASUREMENT OF THE
BRIGHTNESS DISTRIBUTION

S u m m a r y

The photometric measurements of the brightness distribution of the extended objects are extremely labour-consuming especially for investigation of the detail brightness distribution on the surfaces of the extended objects in different parts of their image. An instrument is suggested for the transformation the blackness into intensities or stellar magnitudes. The Instrument gives possibility to carry out almost automatic above mentioned photometric works.

The calculation of the precision of the suggested transformation method and the results of the tests of a model are presented.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Н. Н. Михельсон, Изв. ГАО АН СССР, 19, № 151, 69, 1953.
2. Р. Е. Гершберг, В. И. Проник, С. И. Коркин, Изв. Кр. АО, 22, 166, 1960.
3. Г. А. Гурзадян, Сообщения Бюраканской обсерватории, 14, 11, 1955.
4. М. В. Долидзе, Л. М. Фишкова, Бюлл. Абастуманской астрофизической обсерватории, 22, 124, 1958.
5. Э. В. Конанович, Новая техника в астрономии, 1963, стр. 158, М.—Л.
6. M. Minnaert a. J. Houtgast, Z. für Ap., 15, 354, 1938.