ЭЛЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ПЛАНИМЕТР

Г. А. Гурзадян

В астрофизике, прикладной математике, геодезии и т. д. встречаются задачи, решение которых связано с измерением площадей фигур, имеющих самые разнообразные формы и величины. К ним относятся, например, измерения площадей, образованных контурами спектральных линий, графическое интегрирование сложных функций и др. Обычно для этой цели применяются механические планиметры разных систем. Наряду с определенными положительными качествами, которыми обладают эти планиметры, они страдают и рядом недостатков, важнейшим из которых нужно считать недостаточную точность измерения при малых площадях. В настоящее время установлено, что при небольших площадях предельная относительная ошибка измерения поверхности механическим планиметром примерно обратно пропорциональна самой площади, т. е. с уменьшением поверхности увеличивается относительная ошибка измерения. Кроме того, точность измерения планиметром зависит от формы фигуры: фигура вытянутая и вообще фигура, у которой периметр очень велик по сравнению с площадью, дает меньшую точность измерения. Указанные неблагоприятные условия — вытянутая форма, небольшая площадь (порядка нескольких квадратных сантиметров) — встречаются в частности при измерении спектральных линий в астроспектрофотометрии и вообще в спектрофотометрии. Наконец, механический планиметр требует особой сноровки со стороны применяющего его.

Нами осуществлен другой способ измерения поверхностей. Насколько нам известно, в обсерваторской практике этот способ до сих пор не применялся. Он основан на измерении эквивалентного данной площади светового потока.

Принцип работы такого планиметра весьма прост. Световой поток, исходящий от искусственного источника, пропускается через вырез, сделанный на обыкновенной бумаге, форма которого должна соответствовать измеряемой фигуре. Величина проходящего через вырез светового потока будет пропорциональна величине измеряемой площади, независимо от ее формы, при условии, что интенсивность светового пучка во всех точках постоянна. Величину проходящего через вырез светового потока можно измерить с помощью фотоэлемента в комбинации с гальванометром. Планиметр, работающий на этом принципе, можно назвать элекрофотометрическим. Экспериментальный экземпляр такого планиметра построен в механической лаборатории Бюраканской астрофизической обсерватории. На рис. 1 приведена схема этого инструмента, на рис. 2—его общий вид.

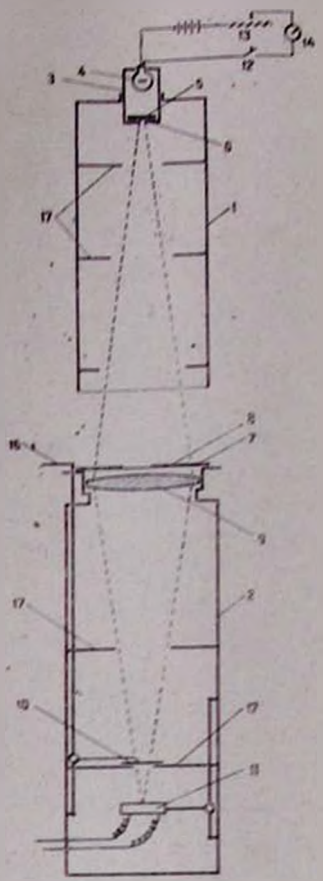

Рис. 1. Схема электрофотометрического планиметра: 1. Верхний цилиндр. 2. Нижний цилиндр. 3. Источник освещения. 4. Лампа накаливания. 5. Два слоя матового стекла. 6. Диафрагма. 7. Предметное стекло (диафрагма). 8. Шаблон измеряемой фигуры. 9. Собирающая линза. 10. Затвор. 11. Фотоэлемент. 12. Выключатель лампы (4). 13. Реостат. 14. Амперметр. 16. Рычаг затвора (10). 17. Диафрагмы.

Электрофотометрический планиметр состоит из двух цилиндров (1) и (2), установленных на общей оси. В верхнем конце цилиндра (1) находится источник освещения (3), состоящий из лампы накаливания (4), двух слоев матового стекла (5) и диафрагмы (6). Лампа (4) питается или от общей сети через стабилизатор напряжения или, что лучше, от аккумулятора. Конусооб-

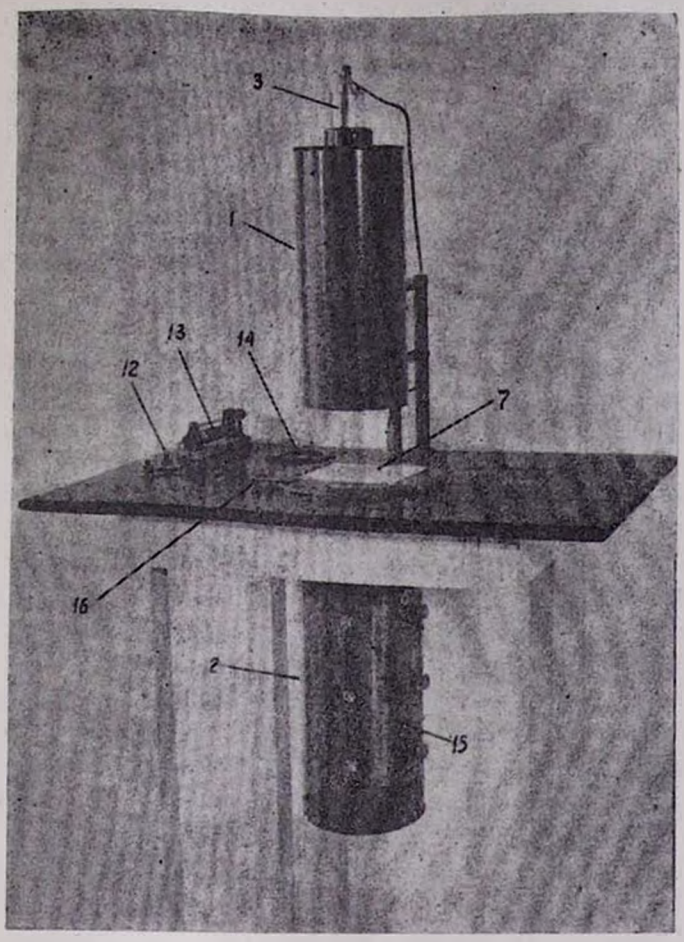

Рис. 2. Общий вид электрофотометрического планиметра: 1. Верхний цилиндр. 2. Нижний цилиндр. 3. Источник освещения. 7. Предметное стекло (диафрагма), шаблон и чистое стекло. 12. Выключатель лампы. 13. Реостат. 14. Амперметр. 15. Крышка окошка нижнего цилиндра. 16. Рычаг затвора перед фотоэлементом.

разный пучок света от диафрагмы (6) падает на диафрагму (7), которая представляет собой стекло с приклеенной с нижней стороны черной бумагой с круглым отверстием в центре. За диафрагмой (7) находится сферическая линза (9). Сфокусированный пучок света падает на селеновый фотоэлемент (11), фототок от которого передается к гальванометру.

Процедура измерения заключается в следующем. Фигура, подлежащая измерению, наносится на какую-нибудь непрозрачную бумагу и вырезывается с помощью ланцета. Включая лампу (4) с помощью выключателя (12), добиваются определенного накала с помощью реостата (13). Степень накала контролируется с помощью амперметра (14).

Перед пучком света, прямо на диафрагму (7) кладется бумага с вырезанной фигурой (8). На бумагу ставится чистая стеклянная пластинка и таким образом бумага зажимается между двумя пластинками. Затем открывается затвор (10) с помощью рычага (16) и фиксируется результат измерения на указателе зеркального гальванометра. Имея значение одного деления указателя, мы можем определить величину площади измеряемой фигуры. Последняя процедура сильно облегчается благодаря тому обстоятельству, что существует линейная зависимость между величиной потока света, падающего на фотоэлемент, и возбуждаемым при этом фототоком, за исключением очень малых и очень больших значений этого потока. На практике всегда можно избежать столь больших и столь малых значений. Градуировку указателя гальванометра легче всего осуществить следующим образом. На бумаге делается квадратный вырез, площадь которого равна 1 *см*². Ставя этот „стандарт" на диафрагму (7), мы изменяем степень накала лампы с помощью реостата (13) так, чтобы получить на указателе отметку, удобную для измерения, например 10 или 100 *мм*.

Из вышеизложенного следует, что для точности измерения фотоэлектрическим планиметром весьма важное значение имеет постоянство интенсивности вышедшего из линзы светового потока по всей поверхности измерения. Между тем дифференциальное поглощение, вызванное разницей

толщины линзы в ее центре и на краях, нарушает это условие, если интенсивность падающего сверху параллельного светового пучка будет везде одинаковой. Приходится поэтому отказаться от параллельного пучка и обратиться к конусообразному пучку, что и сделано нами на вышеописанной схеме Благодаря этому, интенсивность падающего света в центре линзы (там, где поглощение больше) будет больше, а на краях — меньше. Подходящим подбором расстояния R источника излучения (3) от линзы (1) можно добиться взаимной компенсации этих двух противоположно действующих эффектов. Этим обеспечивается постоянство интенсивности вышедшего по всей поверхности линзы светового потока. Очевидно, что R будет зависеть от параметров линзы—коэффициента поглощения k, толщины в центре a_0, радиуса кривизны R_0, а также размера измеряемой фигуры D. Желательно поэтому вывести зависимость R от этих параметров.

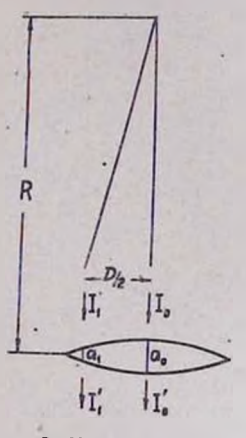

Рис. 3. К выводу формулы (3).

Как видно из рис. 3, интенсивности падающего света в центре I_0 и на расстоянии D/2 от центра I_1 пропорциональны: $I_0 \sim R^{-2}$, $I_1 \sim \left(R^2 + \frac{D^2}{4}\right)^{-1}$. Интенсивности же вышедшего из линзы света I_0' и I_1' будут пропорциональны:

$$I_0' \sim R^{-2}e^{-ka_0} \simeq R^{-2}(1 - ka_0), \qquad (1)$$

$$I_1' \sim \left(R^2 + \frac{D^2}{4}\right)^{-1} e^{-ka_1} \simeq \left(R^2 + \frac{D^2}{4}\right)^{-1} (1 - ka_1), \qquad (2)$$

где a_1—толщина линзы на расстоянии D/2 от ее центра.

Идеальный электрофотометрический планиметр должен удовлетворить условию $I_0' = I_1'$. Отсюда находим для сферической линзы:

$$R = \frac{D}{2}\left[\frac{1 - ka_0}{2kR_0\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{D}{2R_0}\right)^2}\right)}\right]^{1/2}. \qquad (3)$$

Поскольку форма линзы дана, то зависимость R от D является неизменной. Весь вопрос заключается в том, насколько слаба эта зависимость, ибо если она сильна, то размеры измеряемых фигур придется сильно ограничить. Конкретное вычисление показывает, что эта зависимость весьма слаба. Так, например, для случая $k = 0{,}02$ *см*$^{-1}$, $R_0 = 30$ *см* и $n_0 = 1{,}8$ *см* мы получим следующие значения R для различных D, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

D *см*	R *см*
10	33.95
8	31.00
6	31.05
4	31.26
2	31.40

В рассматриваемом случае вычисленная относительная ошибка измерения, вызванная зависимостью R от D, меньше 1%.

Учитывая, что обычно $kn_0 \ll 1$, будем иметь для малых D с точностью до $\left(\frac{D}{2R_0}\right)^2$:

$$R = \sqrt{\frac{R_0}{k}} \qquad (4)$$

и не зависит от D.

Таким образом, в принципе электрофотометрического планиметра не имеется каких-нибудь источников крупных ошибок систематического характера. Поэтому предельная относительная ошибка измерения площадей должна определиться степенью точности самой измеряющей системы—гальванометра со шкалой, а также градуировкой этой шкалы. Соответственной градуировкой шкалы можно добиться одинаковой точности измерения для сравнительно широкого диапазона величин площадей. Для этого достаточно класть на предметное стекло (7) стандарты с площадями, равными, например, 100, 10, 1 и 0,1 *см*^{2}, и путем изменения силы тока с помощью реостата (лучше иметь два реостата, один для грубой регулировки, второй — для тонкой) добиваться одинакового отброса на шкале гальванометра, например 200 *мм*. Результат измерения на указателе гальванометра можно брать с точностью до 0.5 *мм*. Поэтому относительная ошибка при измерении площадей порядка 100, 10, 1 и 0.1 *см*^{2} будет одна и та же — $\frac{1}{400}$, или 0,25 %. Для удобства и быстроты работы лучше пользо-

ваться заранее подготовленной табличкой с указанием порядка силы тока в амперах при измерении площадей порядка 100, 10, 1 и 0.1 *см*².

Что же касается ошибок, вызванных непостоянством накала лампы, неаккуратностью вырезывания шаблона и т. д., то их устранение является чисто техническим вопросом и не затрагивает существа метода.

Предельные размеры измеряемой поверхности ограничиваются диаметром диафрагмы (7), т. е. диаметром линзы. Более крупные фигуры, если невозможно уменьшить их размеры, приходится измерять частями (закрывая сначала одну половину, а потом другую).

Диаметр линзы нашего экспериментального прибора равен 10 *см*, фокусное расстояние — 32 *см*. Диаметр диафрагмы (6) — 5 *мм*. В качестве измерительной системы применен магнитоэлектрический зеркальный гальванометр типа М21 с чувствительностью порядка 10^{-9} Амм/м, постоянной времени 4 сек. Фотоэлемент — селеновый, типа УФ101, лампа накаливания — 12 в., питание — от общей сети (через стабилизатор напряжения). Для уменьшения влияния рассеянного света трубы (1) и (2) окрашены изнутри в черный цвет. Для установки и фокусировки фотоэлемента (11) сделано специальное окошко (15) на цилиндре (2). Весь прибор, кроме гальванометра, смонтирован на специальном столике.

Испытание экспериментального экземпляра электрофотометрического планиметра дало удовлетворительные результаты: ошибка, например, при измерении фигур, поверхности которых порядка 0.2 *см*², не превышает 1%.

Электрофотометрический планиметр весьма удобен для работы. Для обращения с ним не требуется особого опыта. Независимость степени точности измерения от размера и формы измеряемой поверхности следует считать основным преимуществом электрофотометрического планиметра. Однако он чувствителен к постороннему свету, поэтому следует во время работы прибора затемнить комнату.

Октябрь 1955 г.

Գ. Ա. ԳՈՒՐՋԱԴՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐՈՖՈՏՈՄԵՏՐԻԿ ՊԼԱՆԻՄԵՏՐ

Աստրոֆիզիկայում, գեոդեզիայում, կիրառական մաթեմատիկայում և այլ բնագավառներում շատ հաճախ ասիթ է լինում գործ ունենալ այնպիսի խնդիրների հետ, որոնց լուծումը կապված է կամայական ձևի ու մեծության մակերևույթների չափման հետ։ Այդ նպատակով սովորաբար օգտագործում են մեխանիկական պլանիմետրներ։ Որոշ առավելությունների հետ միասին այդ պլանիմետրերը ունեն նաև թերություններ, որոնցից հիմնականը պետք է համարել չափման ճշտության անբավարար լինելը փոքր մակերևույթների դեպքում։

Մեր կողմից իրականացված է մակերևույթների չափման մի ուրիշ մեթոդ, որը հիմնված է չափման ենթակա մակերևույթ մեծություններ համարժեք լուսային հոսքի չափման վրա։ Նկ. 1-ում բերված է այդ պլանիմետրի սխեման, իսկ նկ. 2-ում՝ նրա իրականացված նմուշի ընդհանուր տեսքը։

Էլեկտրոֆոտոմետրիկ պլանիմետրը բաղկացած է երկու դրաններից (1) և (2), որոնք տեղակայված են մեկ ընդհանուր առանցքի վրա։ Դրան (1)-ի վերին մասում դնվում է լուսաղբյուրը (3), որը սնվում է հաստատուն աղբյուրից։ Կոնաձև լուսային փունջը ընկնում է (7) դիաֆրագմայի վրա, որի վրա դրվում է շաբլոնը։ Այս վերջինս իրենից ներկայացնում է բացված ունեցող մի սովորական անթափանց թուղթ։ բացվածքի ձևն ու չափերը ամբողջովին համապատասխանում են չափման ենթակա պատկերին։ Այդ կերպ ասած, բացվածքով անցնող լուսային փունջը համեմատական է չափման ենթակա մակերեսի մեծությանը։

Բացվածքով անցած լույսը (9) ոսպնյակի օգնությամբ հավաքվում է նրա ֆոկուսում տեղակայված սելենային ֆոտոէլեմենտի վրա, որից արտադրված ֆոտոհոսանքը չափվում է առանձին տեղում դրված գալվանոմետրի օգնությամբ։ Գալվանոմետրի ցուցմունքի միավորի արժեքը որոշվում է նախապես՝ հատուկ ստանդարտի օգնությամբ։ Չափման այս մեթոդի նպատակահարմարությունը թելադրվում է նրանով, որ գոյություն ունի դծային կապ լույսի հոսքի մեծության և ֆոտոհոսանքի մեծության միջև։

Էլեկտրոֆոտոմետրիկ պլանիմետրի անհրաժեշտ պարամետրն է հանդիսանում R-ը՝ լույսի աղբյուրի (3) հեռավորությունը (9) ոսպնյակից։ Այն որոշվում է (3) կամ (4) բանաձևով, կախված ոսպնյակի կենտրոնում նրա ունեցած հաստությունից a_0, կորության շառավիղից R_0 և թափանցկականությունից k։

Չափման սխալի մեծությունը, օրինակ 0,2 սմ² մակերես ունեցող պատկերների համար չի անցնում 1%-ից։ Չափման ճշտությունը բարձրանում է մակերեսի մեծացման հետ։ Չափելիք մակերեսների սահմանային մեծությունը որոշվում է ոսպնյակի տրամագծով։

Էլեկտրոֆոտոմետրիկ պլանիմետրը շատ հարմար է շահագործման տեսակետից. այն չի պահանջում առանձին հմտություն՝ աշխատանքի և առանձնահատուկ խնամք՝ գործիքի։