

А. В. ПИПИНОВ, Г. С. ОРДУЯН

О РАЗРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ПО СОЛНЦУ

В работе описаны оптические датчики угловых рассогласований, предназначенные для использования в системе автоматической ориентации астрономической аппаратуры по Солнцу. Для предварительной (грубой) и последующей точной ориентации (соответственно с максимальным отклонением $10'$ и $1'$) предложено два типа датчиков. Получена зависимость величины выходного сигнала от угла рассогласования и конфигурации диафрагм. Оценена зависимость угловой ошибки от изменения параметров фотоэлементов. В случае использования соответствующих индикаторов излучений щелевые датчики могут быть использованы для ориентации по источникам инфракрасных, ультрафиолетовых или рентгеновских лучей.

Задача непрерывной автоматической коррекции положения оптических инструментов относительно объекта наблюдения возникла в астрономических обсерваториях в связи с необходимостью компенсации суточного вращения Земли. Она решается путем использования устройств, позволяющих: во-первых, обнаружить и оценить величину углового смещения наблюдаемого объекта относительно оптической оси инструмента и, во-вторых, подать сигнал на исполнительные двигатели подвижной платформы, при вращении которой ошибка сводится к заданному минимуму.

Подобные фотогидрирующие устройства сейчас успешно заменяют применявшиеся ранее системы автоматического ведения телеско-

пов по часовому углу, имеющие ряд существенных недостатков и ограничений, присущих регуляторам без обратной связи [1].

В зависимости от объекта гидирования следует различать по крайней мере две категории фотогидов: звездные и солнечные. Оптические датчики первых обычно бывают рассчитаны на работу с объектами, диаметр изображения D которых в фокальной плоскости объектива составляет всего 20—100 микрон. Освещенность, создаваемая на поверхности земли даже далеко еще не слабыми звездами шестой величины ($m = 6$), достигает $8,5 \cdot 10^{-9}$ люкс. Поэтому время экспозиции при фотографировании наиболее слабых звезд, а следовательно, и время непрерывного гидирования может составить от нескольких минут до 1—2 часов [2]. Для получения четких фотографий сдвиги d изображения не должны превышать размеров зерен фотоэмульсии (20 микрон). Таким образом, погрешность гидирования относительно D не превышает $\frac{d}{D} \approx 10^{-1}$.

Иначе обстоит дело с датчиками солнечных гидов. Здесь яркость столь велика ($m_0 \approx -27$), что приходится уделять серьезное внимание защите фотоэлементов от перегрузок. С другой стороны, если считать допустимой сравнительно большую абсолютную погрешность гидирования в $10''$, отношение $\frac{d}{D}$ оказывается все еще очень малым ($\sim \frac{1}{200}$).

Последнее обстоятельство вызывает существенное усложнение оптических датчиков, так как затрудняет возможность сравнительно простого гидирования по „центру тяжести“ изображения, широко применяемого в звездных гидах.

В данной работе описаны фотоэлектрические датчики, предназначенные для применения в устройстве двухкоординатного автоматического наведения астрономических приборов на центр солнечного диска. Основу устройства составляют две независимые релейные следящие системы, которые производят наводку и гидирование в режиме автоколебаний по двум взаимно-перпендикулярным осям. При разработке ставилась задача получения относительно простыми средствами максимально возможной скорости отработки рассогласований, необходимой для проведения астрономических наблюдений с движущихся объектов (самолета, зонда и т. п.) при сравнительно небольшой точности гидирования порядка $1'$. Вместе с тем устройство должно было обеспечить отработку начальных угловых отклонений порядка $\pm 25^\circ$. Столь противоречивые требования по точности и начальному углу могут быть удовлетворены путем применения двух ступеней оптической индикации отклонений.

На рис. 1 приведена оптическая схема индикатора грубой однокоординатной наводки—„захватчика“, обладающего большим „углом

зрения", но соответственно меньшим угловым разрешением, чем основной индикатор гида. Заметим, что в системе используются два совершенно одинаковых захватчика, установленных таким образом, что их оптические оси строго параллельны, а рабочие плоскости (см. ниже) составляют угол 90° .

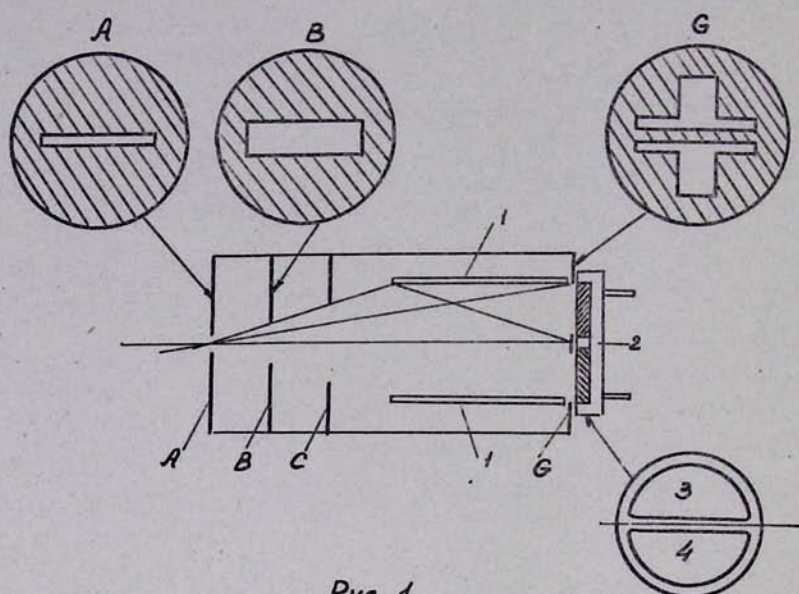


Рис. 1.
Схема захватчика

А, В, С, Г - диафрагмы
1 - плоские зеркала
2 - фотоземляк
двух половинок 3,

Захватчик представляет собой полую трубку, переднее отверстие которой закрыто диафрагмой А с прямоугольной щелью. В противоположном конце трубки помещена металлическая пластинка 2 с селеновым покрытием, которое состоит из электрически изолированных половинок 3 и 4, образующих с пластинкой 2 два независимых фотозлемента. Линия раздела последних параллельна краям входной щели диафрагмы. Выводы фотозлемента включены таким образом, что результирующая ЭДС имеет ту или иную полярность в зависимости от величины светового потока, приходящегося на каждую из половинок. Представим, что диафрагма А освещена лучами Солнца, угловой диаметр которого составляет, как известно, $\alpha \approx 32'$. Будем называть рабочей плоскостью захватчика плоскость, проведенную через оптическую ось перпендикулярно к краям входной щели. На рисунках, приводимых ниже, она совпадает с плоскостью рисунка. Пусть угловой

сдвиг β центра солнечного диска относительно оптической оси захватчика в рабочей плоскости равен 0. Тогда ширина изображения d входной щели S (рис. 2), проектируемой на фотоэкран, равна

$$d = s + 2l \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (1)$$

Освещенность в произвольной точке экрана, лежащей на оси X , можно определить, зная угловое распределение яркости $B(\varphi)$ источника света и граничные углы $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ краев входной щели:

$$E(x) = \int_{-\psi_1(x)}^{\psi_2(x)} B(\varphi) d\varphi, \quad (2)$$

где $\psi_1(x)$ равна большему (по абсолютной величине) из углов $\frac{\alpha}{2}$ и

$$\varphi_1(x) = \operatorname{arctg} \frac{\frac{s}{2} - x}{l}, \text{ т. е.}$$

$$\psi_1(x) = \operatorname{Sup} \left[\frac{\alpha}{2}; \varphi_1(x) \right] \quad (3)$$

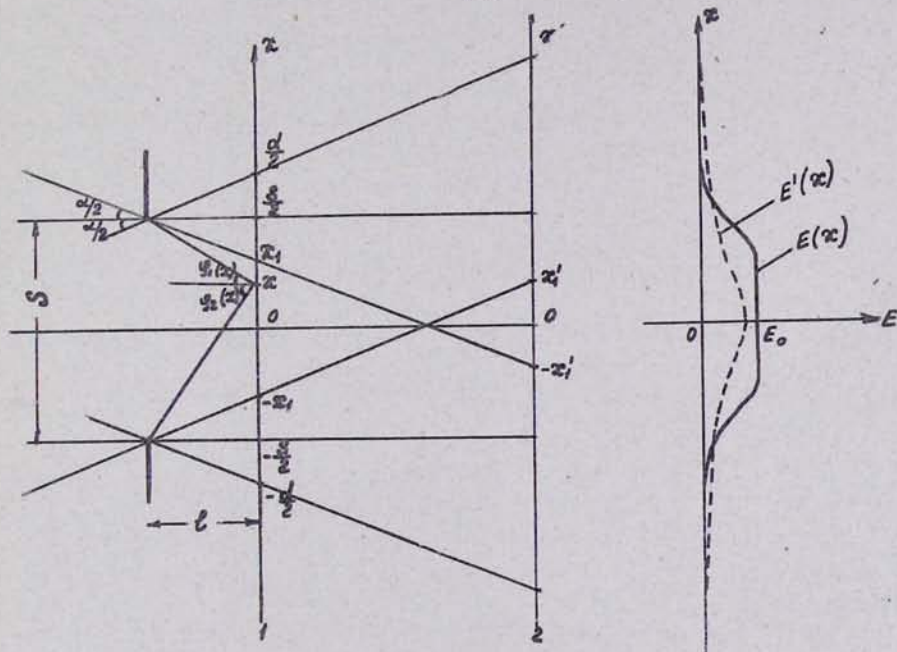


Рис. 2.

и точно также

$$\psi_2(x) = \operatorname{Sup} \left[\frac{\alpha}{2}; \varphi_2(x) = \operatorname{arctg} \frac{\frac{s}{2} + x}{l} \right]. \quad (4)$$

Поскольку распределение освещенности симметрично относительно оси $x=0$, ниже ограничимся построением $E(x)$ для области $x \geq 0$.

I. Сначала допустим, расстояние l таково (рис. 2, 1), что угловая ширина φ_0 входной щели превосходит α :

$$\varphi_0 = \varphi_1(0) + \varphi_2(0) > \alpha, \quad (5)$$

тогда путем рассмотрения соответствующих интервалов изменения аргумента функций $\varphi_1(x)$ и $\varphi_2(x)$ и с учетом (3), (4) и того, что для солнца $B(\varphi) = B_0 \approx \text{Const}$, нетрудно из (2) получить распределение (6), график которого показан справа на рис. 2 (сплошная линия).

$$E(x) = \begin{cases} B_0 \cdot \varphi \Big|_{-\frac{\alpha}{2}}^{\frac{\alpha}{2}} = B_0 \cdot \alpha = E_0 & \text{при } 0 \leq x < x_1 \\ B_0 \cdot \varphi \Big|_{-\varphi_1(x)}^{\frac{\alpha}{2}} = B_0 \left[\frac{\alpha}{2} + \varphi_1(x) \right] & \text{при } x_1 \leq x < \frac{s}{2} \\ B_0 \cdot \varphi \Big|_{\varphi_1(x)}^{\frac{\alpha}{2}} = B_0 \left[\frac{\alpha}{2} - \varphi_1(x) \right] & \text{при } \frac{s}{2} \leq x \leq d \end{cases} \quad (6)$$

II. В случае, если расстояние l настолько велико (рис. 2, 2), что угловая величина входной щели φ_0 меньше углового диаметра солнца α , то взамен (6) распределение освещенности принимает вид (7), (см. рис. 2—пунктирная линия).

$$E'(x) = \begin{cases} B_0 [\varphi_2(x) + \varphi_1(x)] & \text{при } 0 \leq x < x'_1 \\ B_0 \left[\frac{\alpha}{2} + \varphi_1(x) \right] & \text{при } x'_1 \leq x < \frac{s}{2} \\ B_0 \left[\frac{\alpha}{2} - \varphi_1(x) \right] & \text{при } \frac{s}{2} \leq x \leq \left(s + 2l \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right). \end{cases} \quad (7)$$

Дальнейшее удаление экрана ведет к полному исчезновению интервала $x'_1 \leq x < \frac{s}{2}$, так как достигается неравенство $x'_1 > \frac{s}{2}$.

При небольших угловых смещениях $\beta \leq 20'$ ($\cos \beta \geq 0,995$) центра солнечного диска в рабочей плоскости можно с высокой степенью приближения считать неизменным распределение освещенности относительно центра изображения щели. Вместе с тем, линейное смещение ξ последнего относительно центра экрана оказывается пропорциональным

$$\beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{\xi}{l}. \quad (8)$$

По технологическим соображениям граница раздела фотоэлементов прикрыта полоской шириной S_1 из непрозрачного материала. Поэтому полный прирост светового потока $\Delta \Phi_0$ (на единицу длины щели) на фотоэлементах, вызванный угловым смещением солнца β , может быть вычислен в виде:

$$\Delta \Phi_0 = \int_{-\frac{d}{2}}^{-\frac{s_1}{2} + \xi} E(x) dx - \int_{\frac{s_1}{2} + \xi}^{\frac{d}{2}} E(x) dx = \int_{\frac{s_1}{2} - \xi}^{\frac{s_1}{2} + \xi} E(x) dx \quad (9)$$

так как $E(x) = E(-x)$ последовательная подстановка (6) и (7) в (9) показывает (даже без взятия интеграла), что при выполнении неравенств (10)

$$\begin{cases} \frac{s_1}{2} < \left(\frac{s}{2} - \lg \frac{\alpha}{2} \right) \\ \xi < \left(\frac{s - s_1}{2} - \lg \frac{\alpha}{2} \right) \end{cases} \quad (10)$$

производная выражения (9) принимает в интервале $0 \leq x < x_1$ [см. (6)] максимальное значение, равное $2B_0 \alpha = 2E_0 = \text{Const}$. Иными словами, при выполнении неравенств (10) изменения светового потока, $\Delta \Phi_0$, а, следовательно, и фототока $I(\xi)$ максимальны при $0 \leq x < x_1$ и пропорциональны произведению линейного смещения $\xi = l \lg \beta$ и коэффициента чувствительности K_0 . Таким образом, найдены условия, налагаемые на геометрические параметры захватчика для получения максимальной чувствительности и одновременно линейности в области малых отклонений. Зависимость $I = I(\xi) = \Delta \Phi_0(\xi) K_0$ в большом диапазоне изменения (см. (6)) аргумента ξ показана на рис. 3а (кривая 1). Там же для сравнения приведена другая зависимость 2, соответствующая условию $s_1 > d$ и обладающая „зоной нечувствительности“.

Для оценки нестабильности показаний захватчика, вызванной изменением коэффициента чувствительности одного из фотоэлементов до значения K_1 ($x > 0$) $\neq K_0$ ($x < 0$), необходимо вернуться к выражению (9), из которого следует равенство:

$$I(\xi) = K_0 \int_{\frac{s_1}{2}}^{\frac{d}{2}} E(x) dx + K_1 \int_{-\frac{s_1}{2}}^{-\frac{d}{2}} E(x) dx + K_0 \int_{\frac{s_1}{2} - \xi}^{\frac{s_1}{2}} E(x) dx + K_1 \int_{-\left(\frac{s_1}{2} + \xi\right)}^{-\frac{s_1}{2}} E(x) dx.$$

В этом случае баланс фототока ($I = 0$) достигается при некотором отличном от нуля смещении ξ_0 изображения, т. е. $I(\xi_0) = 0$. На рис. 3б приведена снятая экспериментально характеристика подобного вида. Для работоспособного захватчика значение ξ_0 во всяком случае не выходит за пределы линейного участка характеристики. Поэтому последнее выражение переписывается в виде

$$0 = (K_0 - K_1) \int_{\frac{s_1}{2}}^{\frac{d}{2}} E(x) dx + (K_0 + K_1) E_0 \xi_0 = (K_0 - K_1) \Phi(d - s_1) + \\ + (K_0 + K_1) E_0 \xi_0,$$

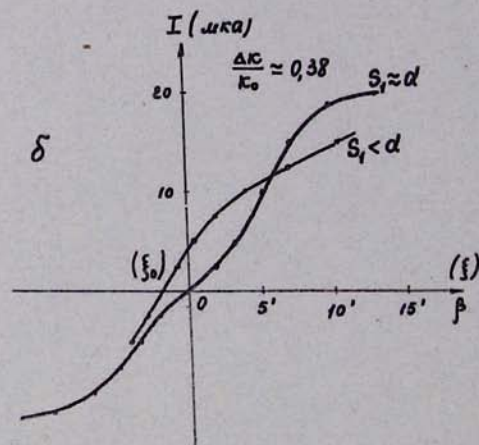
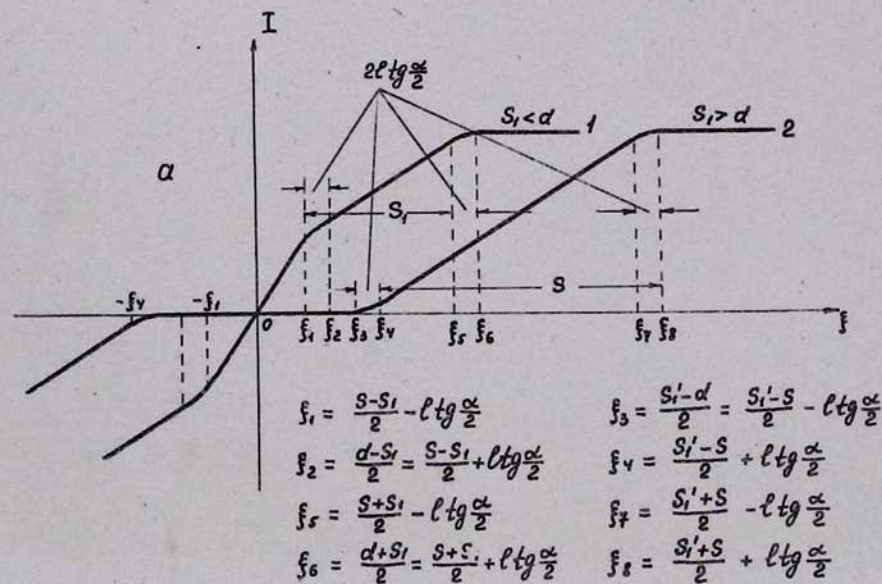


Рис. 3.

Рис. 3. Расчетные (а) и экспериментальные (б) характеристики затухания

отсюда следует

$$\xi_0 \approx \frac{\Delta K}{K_0} \frac{\Phi (d - s_1)}{2E_0} \quad (11)$$

Таким образом, рассматриваемая погрешность показаний ξ_0 пропорциональна относительному изменению $\frac{\Delta K}{K_0}$ коэффициента чувствительности фотоэлементов, а также площади освещенной поверхности последних. При фиксированном s_1 (см. выше) и неизменной ширине линейного участка (см. (10)) характеристики минимизация выражения

$$\Phi = \frac{1}{2E_0} \int_{\frac{s_1}{2}}^{\frac{d}{2}} E(x) dx$$

производится в первую очередь путем уменьше-

ния полутеневой части изображения d , т. е. члена $2l \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$ по сравнению с s [см. (1)]. Кроме того, s также должно быть уменьшено до некоторого оптимального значения. Последнее определяется в соответствии с (10) таким образом, чтобы ширина линейного участка характеристики $I = I(\xi)$ (рис. 3, 1) не оказалась меньшей некоторого допустимого минимума, определяемого динамическими свойствами следящей системы.

При больших начальных отклонениях может произойти перегрузка усилителя сигналов рассогласований, которая, в свою очередь, вызывает затягивание переходных процессов, нарушающее нормальную работу системы. Во избежание этого в захватчике перед фотоэлементами установлена дополнительная фигурная диафрагма G (см. рис. 1), которая ограничивает величину светового потока.

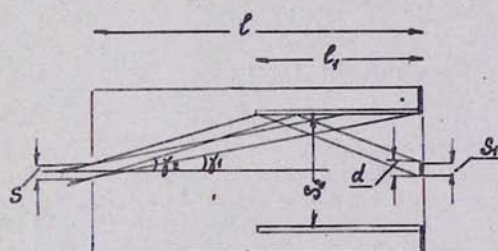


Рис. 4.

$$\gamma_1 = \beta_{\max} + \frac{\alpha}{2}$$

$$\gamma_2 = \beta'_{\max} + \frac{\alpha}{2}$$

Нетрудно понять, что если диаметр фотоэлемента равен s_2 , то максимальное „поле зрения“ захватчика равно

$$\beta_{\max} = \pm \operatorname{arctg} \frac{s_2 + d}{2l}$$

Однако, применив пару боковых плоских зеркал (рис. 1, 1), можно значительно увеличить угол $\beta_{\max}$. На рис. 4 показано предельно допустимое значение β , при котором луч, отраженный от бокового зер-

кала, достигает границы противоположного фотоэлемента, но пока еще не вызывает изменения (ошибочного) полярности сигнала. Максимальное значение $\beta'_{\max}$ связано с предельно допустимой длиной зеркала l_1 уравнениями

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \left(\beta'_{\max} + \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{s_1 + d}{2l_1} \\ \frac{s_2 - s}{2(l - l_1)} = \frac{s_2 + d}{2l_1} \end{cases}$$

отсюда находим $l_1 = \frac{l}{1 + \frac{s_2 - s}{s_2 + d}}$ и, следовательно,

$$\beta'_{\max} = \arctg \frac{2s_2 + (d - s)}{2l} - \frac{\alpha}{2}.$$

Если $s < d \ll s_2$, то $l_1 \approx \frac{l}{2}$ и максимальный рабочий угол равен

$$\beta'_{\max} \approx \arctg \frac{s_2}{l} - \frac{\alpha}{2} \approx 2\beta_{\max}.$$

Для исключения помех в работе со стороны лучей, падающих под углом большим $\beta'_{\max}$, поле зрения захватчика дополнительно ограничено диафрагмами В и С (рис. 1).

Описанный выше датчик углов не содержит линз и сферических зеркал, ограниченные возможности которых обычно служат препят-

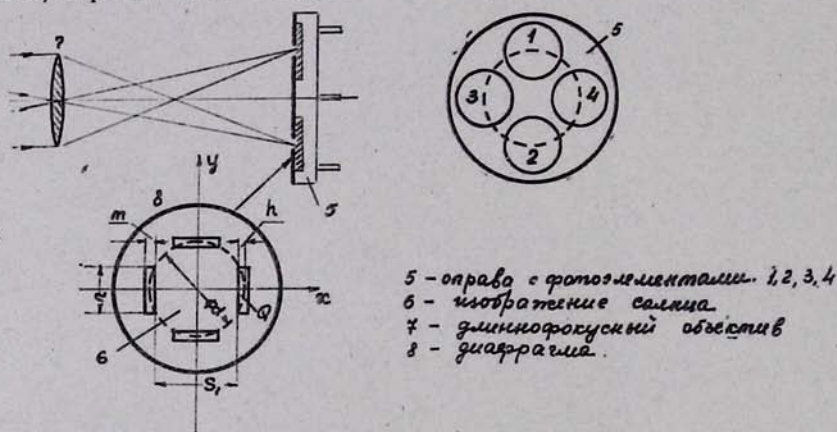


Рис. 5

Схема индикатора угла.

ствием для применения оптических систем в том или ином участке спектра. Поэтому при условии замены фотоэлементов соответствующими индикаторами излучений щелевой захватчик может быть с успехом применен в системах ориентации, работающих от источников инфракрасных, ультрафиолетовых или рентгеновских лучей.

Как уже было отмечено, захватчики применяются только для первоначальной грубой ориентации—(„захвата“). На рис. 5 приведена схема основного—более чувствительного оптического индикатора гйда, используемого для точного ведения системы. Он располагается таким образом, что после окончания режима „захвата“ солнечные лучи попадают в объектив 7, в фокальной плоскости которого на непрозрачном экране получается изображение солнечного диска 6. В зависимости от положения оптической оси объектива относительно солнца, изображение может быть сдвинутым в ту или иную часть экрана. В последнем имеются четыре симметрично расположенных прямоугольных отверстия, за которыми помещены фотоэлементы, реагирующие на изменения светового потока. Фото ЭДС, вырабатываемые диаметрально противоположными элементами (1, 2 и 3, 4), включены встречно и сигналы с пар 1, 2 и 3, 4 позволяют обнаружить и измерить величину сдвига изображения. Эти сигналы используются в двух независимых следящих системах, управляющих ориентацией вдоль взаимно перпендикулярно осей X и Y .

Пользуясь прежними обозначениями, можно определить диаметр изображения, равный $d = 2f \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$, и освещенность в точке, удаленной от центра последнего на расстояние r :

$$E_1 = \begin{cases} \operatorname{const} \approx K E_0 \frac{d_1^2}{d^2} & \text{при } r \leq \frac{d}{2} \\ 0 & \text{при } r > \frac{d}{2} \end{cases} \quad (12)$$

где d_1 —диаметр входного отверстия объектива;

f —фокусное расстояние и $K = 0,7$ —коэффициент, учитывающий потери света в объективе. В сложном объективе расстояние f нетрудно сделать равным 1—2 метрам, при вполне приемлемых общих габаритах, определяемых удалением плоскости изображения от задней линзы объектива (100—150 мм). Отсюда следует, что в случае одинаковых с щелевым захватчиком угловых отклонений объекта наблюдения, сдвиг изображения в фокальной плоскости объектива, а следовательно, и угловая разрешающая способность последнего, оказываются значительно большими $\left(\frac{f}{l} \text{ раз} \right)$.

Для оценки величины светового потока Φ_1 , проходящего сквозь отверстие экрана на пару фотоэлементов (3, 4), следует рассмотреть зависимость площади сегмента Q от его стрелки h . Точная аналитическая зависимость достаточно сложна. Однако выяснилось, что для окружности с диаметром d она достаточно хорошо аппроксимируется параболой

$$Q(h) = 1,8 \left(\frac{2h}{d} \right)^{1,49} \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 0,45 d^2 \left(\frac{2h}{d} \right)^{1,49} \quad (13)$$

причем при $h \geq 0,25d$ максимальная ошибка приближения не превосходит 5%. Пусть изображение солнца расположено в центре экрана ($x = y = 0$), и расстояние s таково, что длина хорд сегментов изображения, попадающих на фотоэлементы, не превосходит n , т. е.

$$2 \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{s_1}{2}\right)^2} = \sqrt{d^2 - s_1^2} \leq n,$$

и одновременно $\left(\frac{d}{2} - \frac{s_1}{2}\right) \leq m$.

Тогда из (12) и (13) значение потока Φ_1 определяется как

$$\Phi_1 = Q \left(\frac{d - s_1}{d} \right) \cdot E = \begin{cases} 0,45 \left(\frac{d - s_1}{d} \right)^{1,49} \cdot E_0 d_1^2 & 0 < (d - s_1) < 2m \\ 0 & (d - s_1) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

При смещении центра изображения на небольшую величину изменения светового потока на фотоэлементах три и четыре составят

$$\Delta \Phi(x) = \Phi_1 \left(\frac{d - s_1 + x}{d} \right) - \Phi_1 \left(\frac{d - s_1 - x}{d} \right). \quad (15)$$

Для параболической функции Φ_1 эта разность растет с увеличением $d - s_1$. Поэтому, с точки зрения увеличения чувствительности датчика, следует выбрать $d - s_1 \approx 2m$, т. е. работать при больших освещенных поверхностях фотоэлементов. Однако при этом световой поток на фотоэлементах 3 и 4 зависит также от наличия сдвига вдоль Y , т. е. не удовлетворяется требование независимости показаний датчика при отклонениях по X и Y .

Кроме того, при этом в соответствии с (11) снижается стабильность индикации углов. Поэтому было найдено целесообразным остановиться на значении s , удовлетворяющем равенству $d - s_1 \approx 0,1 m$. При этом исключается зона нечувствительности датчика [см. (14)], но общий вид зависимости фототока от угла все же остается нелинейным (14, 15). Однако, при малых отклонениях X , соответствующий отрезок параболы можно считать мало отличающимся от прямой.

В основном индикаторе, так же как и в захватчиках, используются селеновые вентильные фотоэлементы типа УФ-101, основные параметры которых приведены в литературе [3]. Однако, в связи с несколько необычным режимом их использования, были проведены дополнительные всесторонние испытания. В частности, проверялась зависимость фототоков от площади светового пятна при работе с узкими лучами высокой интенсивности $\left(\sim 10^4 \frac{\text{л.м}}{\text{м}^2} \right)$, также стабильность

характеристик при длительном освещении и при изменении температуры. Использование в датчиках балансной схемы включения фотоэлементов позволило свести к минимуму влияние температурных и тому подобных факторов.

При соблюдении известных мер предосторожности, оказалось вполне возможным производить в процессе изготовления датчиков

необходимую механическую обработку фотоэлементов: удаление участков фотослоя и даже разрезание фотоэлементов на части. Тщательная проверка показала, что возникающие при этом изменения чувствительности обычно очень не велики. Селеновые фотопокртия, конечно, не рассчитаны на работу при прямом солнечном освещении ($E_0 \approx 10^5$ люкс), поэтому в датчиках используются нейтральные фильтры, уменьшающие освещенность до $\sim 5 \cdot 10^2$ люкс. При снятых фильтрах датчики и устройства в целом допускают отладку в лабораторных условиях от достаточно мощной осветительной лампы. Характеристики датчиков, полученные экспериментально, полностью согласуются с приведенным выше анализом. Данная работа входит в тематику, выполняемую Вычислительным центром совместно с Бюраканской астрофизической Обсерваторией Академии наук АрмССР.

Научный руководитель темы доктор физико-математических наук Г. А. Гурзян.

Поступило 8.I 1964

ՊԵՊԻՆՈՎ Ա. Վ., ՕՐԴՈՒՅԱՆ Գ. Ս.

ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՏՎԻԶՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ՄԱՍԻՆ ՀՍԱՐԵԳԱԿԻ ԳԻՏԱԿԱՆ ՍԱՐՔԱՎՈՐՈՒՄՆ ԱՎՏՈՄԱՏ ԿԵՐՊՈՎ ԿՈՂՄՆՈՐՈՇԵԼՈՒ ՀԱՄԱՐ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Աշխատանքում նկարագրվում են անկյունային անհամապատասխանության օպտիկական տվիչներ, որոնք նախատեսված են օգտագործվելու ըստ արեգակի աստղագիտական սարքավորումն ավտոմատիկորեն կողմնորոշելու համար: Սկզբնական (կոպիտ) և հետագա ճշգրիտ կողմնորոշման համար (համապատասխան 10 և 1 առավելագույն շեղումների) առաջարկված է երկու տիպի տվիչներ: Ստացված է հլքի աղղանշանի մեծության կախվածությունն անհամապատասխանության անկյունից և դիաֆրագմայի ձևից: Գնահատված է անկյունային սխալի կախվածությունը ֆոտոէլեմենտների պարամետրերի փոփոխությունից: Համապատասխան ճառագայթման հայտնաբերիչներ օգտագործելու դեպքում, ճեղքավոր տվիչները կարող են օգտագործվել ըստ ինֆրակարմիր, ուլտրամանուշակագույն կամ ռենտգենյան ճառագայթների աղբյուրների կողմնորոշվելու համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

- ¹ Николаев П. В. Фотоэлектрическая система автоматического гидирования телескопов. Сб. по вопросам электромеханики, вып. 4. Ин-т Электромеханики АН СССР, 1960.
- ² Сабинин Ю. А. Автоматическое ведение телескопов. Труды совещания по исследованию мерцания звезд (18—20 июня 1958 г.), М., 1959.
- ³ Сб. „Полупроводники в науке и технике“, том 2, Институт полупроводников АН СССР, 1958.