

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ

Е. М. Неплохов, М. Н. Сокольский

В качестве критерия точности системы управления телескопом используется изменение структуры оптического изображения. Сделана оценка времени экспозиции, которую можно использовать без промежуточной коррекции положения телескопа.

The change of the optical image structure is used as a criterion of accuracy of the telescope control system. The estimate of exposure time made here may be used without intermediate correction of the telescope position.

При астрономических наблюдениях объект и астрономический инструмент находятся в движении. Это может вызвать поступательное движение или колебание изображения вследствие, например, погрешностей автоматической системы управления. Из-за этих погрешностей в процессе управления оптическим телескопом происходит смещение изображения с оптической оси, и за время экспозиции изображение точки представляется в виде некоторого пятна рассеяния.

Таким образом, изменение структуры оптического изображения может служить критерием для оценки качества системы управления телескопом.

Остановимся кратко на некоторых вопросах оценки качества оптического изображения. Система, формирующая изображение, представляет собой сложную цепь, состоящую из ряда последовательных звеньев. Так, в случае астрономического фотографирования эта цепь состоит из атмосферной среды (А), объектива телескопа (О) и фоточувствительного материала (ФМ). Известно, что при соблюдении условий линейности и изопланатичности оптическая передаточная функция (ОПФ) сложной системы находится как произведение ОПФ составляющих ее элементов [1—2]:

$$A_C = A_A A_O A_{FM}, \quad (1)$$

$$A(V_y, V_z) = T[D(y', z')] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(y', z') \exp i2\pi(V_y y' + V_z z') dy' dz', \quad (2)$$

где $D(y', z')$ — функция рассеяния точки (ФРТ), V_y, V_z — пространственные частоты в плоскости изображения, y', z' — координаты точки изображения; символом $T[D]$ обозначено преобразование Фурье-функции рассеяния точки. ОПФ — величина в общем случае комплексная. Модуль ОПФ называется частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ)

$$m(V_y, V_z) = |A(V_y, V_z)|. \quad (3)$$

ОПФ дает полную информацию о качестве оптического изображения. ОПФ по сравнению с ФРТ не дает какой-либо добавочной информации

о качестве изображения, так как ОПФ и ФРТ получаются одна из другой через преобразование Фурье (2), т. е. зная одну из этих величин, мы тем самым знаем другую. Однако, как видно из формулы (1), ОПФ позволяет легко учесть влияние приемника на качество изображения путем умножения ОПФ приемника на ОПФ объектива.

Определим связь сдвига изображения, вызванного неточностью работы системы управления, с ОПФ. Установлено [1, 3], что сдвиг изображения можно рассматривать как один из независимых элементов последовательной цепи формирования изображения со своими передаточными характеристиками ОПФ и ФРТ. Тогда ОПФ всей системы (A_c) определится произведением ОПФ системы при отсутствии сдвига (A_c) на ОПФ сдвига ($A_{сдв}$)

$$A = A_c \cdot A_{сдв}. \quad (4)$$

Формула (4) позволяет легко установить влияние сдвига на качество изображения, если известна функция $A_{сдв}$. Функция $A_{сдв}$ определяется величиной сдвига и видом функции, описывающей характер сдвига во времени.

В работе [3] приведены оптические передаточные функции ($A_{сдв}$) в зависимости от вида функции, описывающей характер сдвига во времени.

Для различных типов перемещений изображения соответственно имеем (рис. 1):

$$\text{линейное перемещение: } A_{сдв}(V) = \sin \pi a V / \pi a V, \quad (5)$$

$$\text{параболическое: } A_{сдв}(V) = 1/2 \sqrt{aV} \left\{ \int_0^{2\sqrt{aV}} (\cos \pi V^2/a + \sin \pi V^2/a) dV \right\}^{1/2}, \quad (6)$$

$$\text{синусоидальное: } A_{сдв}(V) = I_0(\pi a V), \quad (7)$$

$$\text{случайное: } A_{сдв}(V) = e^{-2\pi^2 a^2 V^2}. \quad (8)$$

Здесь всюду t_e — время экспозиции, a — величина сдвига, V — частота в направлении сдвига, I_0 — функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

Выражения (7) и (8) справедливы, если время экспозиции больше периода колебаний изображений. Если время t_e меньше этого периода, то можно пользоваться формулой (5).

В случае сложного перемещения изображения, например сочетающего линейный и случайный характер перемещения, ОПФ сдвига можно представить, как произведение ОПФ отдельных составляющих.

В качестве критерия допуска на величину сдвига примем критерий Гопкинса: контраст по частоте, равной половине предельной частоты, пропускаемой всей системой, при наличии сдвига изображения не должен уменьшаться более, чем на 20% по сравнению с контрастом системы при отсутствии сдвига, т. е.

$$m_{сдв}(V) = |A_{сдв}(V = 1/2 V_{пр})| \geq 0.8. \quad (9)$$

Выражение (9) с учетом формул (5)–(8) позволяет определить допустимую величину $a_{доп}$. Необходимая для расчетов величина $V_{пр}$ определяется как предельная частота, при которой $|A(V_{пр})| = 0$. На рис. 2 приведен пример определения величины $V_{пр}$. Для безабберационного объектива

$$V_{пр} = 2\alpha'/\lambda, \quad (10)$$

где α' — апертурный угол, λ — длина волны.

В большинстве случаев предельную частоту ограничивает приемник. Так, например, для фотопленки $V_{пр} \cong 100-200$ лин/мм, для суперорти-

кона — 20 лин/мм, тогда как для объектива с относительным отверстием 1 : 4 $V_{пр} = 500$ лин/мм.

Чем меньше частота $V_{пр}$, тем более свободным может быть допуск на величину сдвига изображения. Этот факт имеет важное значение при разработке систем управления телескопом, систем автоматического гидирования. Характер сдвига изображения определяется характером ошибки

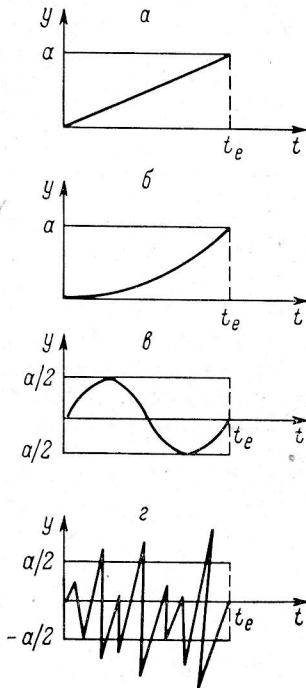


Рис. 1. Типы перемещения изображения.

a — линейное, *б* — параболическое, *в* — синусоидальное, *г* — случайное.

исследованными для альтазимутального телескопа на макете телескопа. Результаты исследования приведены в работе [5].

Из формул (5)–(9) установим допустимые значения на величину сдвига $a_{доп}$. Например, сдвиг изображения для экспозиции $t=20$ мин. происходит по линейному закону [5]. Тогда

$$\sin(\pi a V_{пр/2}) / \pi a V_{пр/2} = 0.8, \quad (11)$$

откуда

$$a_{доп} \leq 0.7 / V_{пр}. \quad (12)$$

Если принять $V_{пр} = 70$ лин/мм, то $a_{доп} \leq 0.01$ мм. На макете телескопа БТА (МБТ-3А) получены при времени экспозиции $t=22$ мин. следующие значения накопленных ошибок в фокальной плоскости:

по координате x — $a_x = 0.075$ мм,

по координате y — $a_y = 0.3$ мм.

Сопоставив эти значения с $a_{доп}$, можно сделать вывод, что фотографирование с экспозицией $t=22$ мин. без промежуточной коррекции положения телескопа не даст желаемых результатов. Исходя из полученных циф-

ведения телескопа. Общий подход к анализу указанной ошибки может быть одинаков для экваториальных и альтазимутальных телескопов. Анализ ошибок ведения телескопа для альтазимутальных телескопов при программном управлении дан в работе [4].

В качестве примера для критерия работы системы управления воспользуемся величинами ошибок и характером изменения их экспериментально

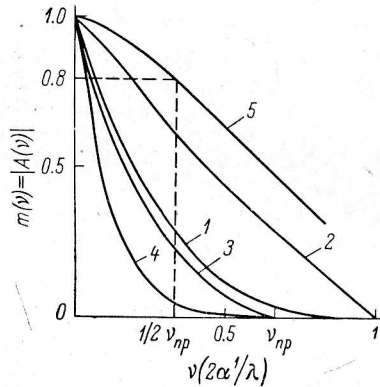


Рис. 2. Определение предельной частоты периодической решетки ($V_{пр}$), пропускаемой системой, включающей атмосферу, объектив, приемник.

1 — ЧКХ атмосферы — (A_A), 2 — ЧКХ объектива телескопа — (A_0), 3 — ЧКХ приемника — (A_n), 4 — суммарная ЧКХ — (A_n) = (A_A) (A_0) (A_n), 5 — ЧКХ сдвига — ($A_{сдв}$).

ровых данных, можно рассчитать, что время экспозиции без промежуточной коррекции положения телескопа не должно превышать 1 мин.

В работе [4] приведен анализ управления телескопом на азимутальной монтировке, где определены максимальные скорости изменения ошибки в различных зонах. Определив объективно допустимое значение ошибки $a_{\text{доп}}$, можем найти время $t = a_{\text{доп}}/a$, определяющее быстродействие системы коррекции в различных зонах, определить зоны, где экспонирование может вестись без коррекции, определить условия плавности работы системы, а именно чтобы ошибка не превышала $a_{\text{доп}}$ (a — скорость изменения ошибки). Могут быть найдены зоны, где возможна работа без фотогидов.

Следовательно, предлагаемый критерий позволяет получить аналитическим путем требования к САУ телескопом и к методике управления в полном объеме.

Выводы

Ошибки системы управления телескопом приводят к сдвигу оптического изображения, вызывающего ухудшение качества изображения.

В качестве критерия точности системы управления определена допустимая величина сдвига $a_{\text{доп}}$ за время экспозиции, которая находится из данных о понижении контраста изображения периодической решетки на половине предельной частоты решетки, пропускаемой системой, состоящей из атмосферы, оптической системы телескопа, приемника.

Литература

1. Э. В. Б а б а к, П. Д. И в а н о в и др. Подводная фотография. Изд-во «Машиностроение», 1969.
2. А. М а р е ш а л ь, М. Ф р а н с о н. Структура оптического изображения, Изд-во «Мир», 1964.
3. R. M i l t o n. Image—motion modulation transfer functions Photogr. Sci. and Enging, 9, 4, 1965.
4. Е. М. Н е п л о х о в, Оценка возможности работы оптического телескопа на азимутальной монтировке при управлении от электронной цифровой системы, Сб. цифровое управление в системах автоматики. Изд-во «Наука», Л., 1968, стр. 173.
5. Я. Б. В я т с к и н, Е. М. Н е п л о х о в, А. С. Н а й ш у л ь, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 3, 20, 1971.