

О ПРИНЦИПАХ УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ТЕЛЕСКОПОМ НА АЛЬТАЗИМУТАЛЬНОЙ МОНТИРОВКЕ

А. С. Найшуль, Е. М. Неплохов **

Излагаются принцип управления телескопом на альтазимутальной монтировке с использованием двух фотогидов для выработки сигналов управления телескопом и компенсации вращения поля и принцип комбинированного управления таким телескопом, при котором используется один фотогид и система программной компенсации вращения поля. На основании анализа делается вывод о преимуществах принципа комбинированного управления. Этот принцип положен в основу системы управления большим оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке, строящимся в СССР.

Two principles of control of an optical telescope on an altazimuth mounting are described — the principle of control with the use of two photoelectric guider for working out control signals and for the field rotation compensation, and the principle of a combined control using one photoelectric guider and a system of the program compensation of field rotation. On the basis of an analysis this latter principle is concluded to have advantages over the former. It is assumed as a basis of the control system of the big optical telescope on an altazimuth mounting, being constructed in the USSR.

Большой интерес специалистов во всем мире вызывает создание больших и очень больших оптических телескопов. Особенный интерес вызвал проект советского крупнейшего в мире оптического телескопа с диаметром зеркала 6 м на альтазимутальной монтировке.

Основные принципы управления большим телескопом были разработаны в ЛОМО и в ГАО АН СССР и изложены в ряде работ [1—4]. Доклад доктора Кюна (ФРГ) на конференции по проектированию больших телескопов в Женеве в 1971 г. [5] побудил нас еще раз вернуться к обсуждению принципов управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке.

При создании больших телескопов дискуссия в основном разворачивается по вопросам, связанным с конструкцией и управлением оптическими телескопами на различных монтировках. От решения проблем управления зависит применение тех или иных типов монтировок, а следовательно, и то, по какому пути пойдет дальнейшее развитие оптического телескопостроения.

Конструктивно возможно применение одного из трех принципиально различных типов монтировок — экваториальной, горизонтальной и альтазимутальной.

Основное преимущество экваториальной монтировки заключается в простоте устройства привода. Однако реализация экваториальной монтировки для больших и очень больших телескопов встречает серьезные трудности главным образом из-за сложности разгрузки осей и зеркала.

* Сотрудник Ленинградского оптико-механического объединения.

При горизонтальной монтажке система управления телескопом сложнее, а разгрузка осей и зеркала телескопа и введение поправок за рефракцию и гнутые трубы не проще, чем при экваториальной монтажке. Применение горизонтальной монтажки оправдано лишь при необходимости наблюдения зоны зенита.

При альтазимутальной монтажке существенно упрощается разгрузка осей и зеркала, облегчается введение поправок, учитывающих влияние рефракции и гнутости трубы телескопа, и конструкция телескопа не зависит от широты места установки инструмента. Эти преимущества даются ценой чрезвычайного усложнения системы управления телескопом по сравнению с системой управления при экваториальной монтажке и недоступности для наблюдений некоторой околосенитной зоны в связи с тем, что при приближении объекта наблюдения к зениту азимутальная скорость телескопа растет и при прохождении через зенит теоретически стремится к бесконечности. Именно стремление упростить механику крупного телескопа заставляет отказаться от широко применяемой экваториальной монтажки и применить альтазимутальную.

Основные трудности управления телескопом на альтазимутальной монтажке обусловлены следующими причинами:

1) при слежении за объектом трубу телескопа необходимо перемещать относительно двух осей (вертикальной и горизонтальной), тогда как в случае телескопа на экваториальной монтажке трубу нужно перемещать только относительно одной — полярной — оси;

2) трубу при слежении за объектом необходимо перемещать с неравномерными и знакопеременными скоростями;

3) звездное поле неравномерно вращается в фокальных плоскостях всех оптических схем телескопа.

Методика управления оптическим телескопом зависит от наблюдаемого объекта и характера выполняемых работ. Объекты наблюдения могут быть и протяженными, и практически точечными. Наблюдения могут производиться с различным временем экспозиции и с различными светоприемниками. Во всех случаях необходимо навести телескоп на заданную звезду, откорректировать его положение и скорость ведения и контролировать процесс слежения за наблюдаемым объектом. Последовательность этих операций и при экваториальной и при альтазимутальной монтажке одинакова. Однако для управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтажке необходимо производить преобразование координат из экваториальной в сферическую горизонтальную систему.

Вращение поля представляет собой новую проблему, особенно при фотографировании звезд, а также при фотометрических, спектрофотометрических, спектрографических работах, когда приходится прибегать к автоматическому гидированию по смещенной звезде. Гидирование при вращении поля с использованием фотоэлектрических приемников до настоящего времени не применялось и представляет собой совершенно новую задачу.

В работе [5] описывается метод управления оптическим альтазимутальным телескопом с помощью двух фотоэлектрических гидов, называемых автором «звездными датчиками». Рассмотрим, как происходит выработка сигналов управления по этому методу.

Основные элементы описываемого в [5] устройства показаны на рис. 1. Двухкоординатный звездный датчик 1, вырабатывающий сигналы Δx и Δy , и звездный датчик края 2, вырабатывающий электрический сигнал ΔW , расположены на каретке 3, имеющей возможность перемещаться вдоль осей t' , δ' . Каретка находится на поворотном столе с осью вращения q' . Сигналов Δx , Δy , Δw и трех степеней свободы, t' , δ' , q' , которыми располагает рассматриваемое устройство, достаточно, чтобы удерживать

исследуемый объект на оптической оси инструмента. В процессе отработки к нулю сигналов рассогласования Δx , Δy и Δw датчики, связанные с кареткой и поворотным столом, при движении вырабатывают сигналы $\Delta t'$, $\Delta \delta'$ и q' , которые используются для управления движением телескопа (см. структурную схему системы управления инструментом по этому принципу на рис. 2). Сигналы $\Delta t'$, $\Delta \delta'$ и q' поступают на преобразователь, который преобразует их в сигналы ΔA и Δz по формулам $\Delta A = 1/\sin z_0 \times (\cos q' \Delta t' + \sin q' \Delta \delta')$ и $\Delta z = -\sin q' \Delta t' + \cos q' \Delta \delta'$. В преобразователе из вычислителя вводятся значения функции $1/\sin z_0$. Сигналы ΔA и Δz в ПИД-регуляторе преобразуются, усиливаются по мощности и поступают на исполнительные двигатели, которые приводят телескоп в движение, удерживая объект наблюдения на оптической оси инструмента. Уравнения движения каретки и поворотного стола можно представить в следующем виде:

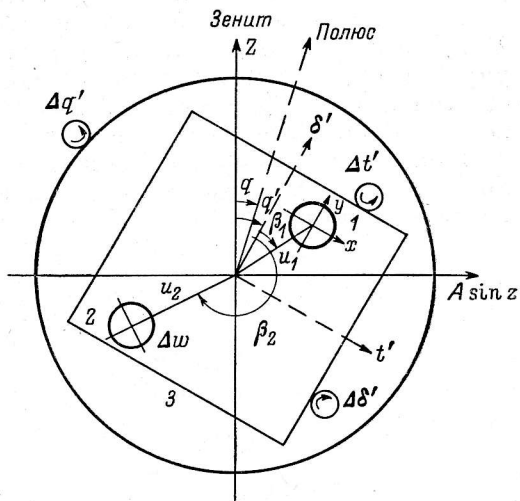


Рис. 1.

$$\begin{aligned} M\Delta\dot{t}' + R\Delta t' &= K_{t'} = cI_{t'} = a\Delta x + b\Delta\dot{x}, \\ M\Delta\dot{\delta}' + R\Delta\delta' &= K_{\delta'} = cI_{\delta'} = a\Delta y + b\Delta\dot{y}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\theta\Delta\dot{q}' + F\Delta q' = K_{q'} = cI_{q'} = k\Delta w + j\Delta\dot{w} + i \int_0^t \Delta w dt,$$

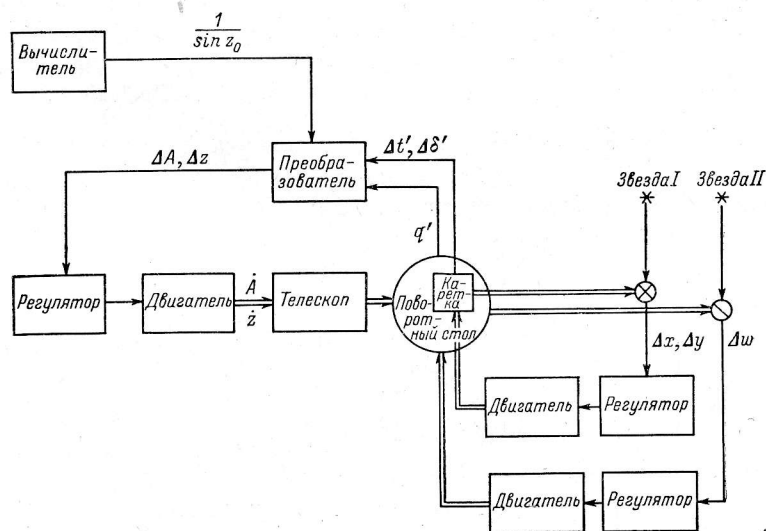


Рис. 2.

где $K_{t'}$, $K_{\delta'}$, $K_{q'}$ — вращающие моменты двигателей каретки и поворотного стола; $I_{t'}$, $I_{\delta'}$, $I_{q'}$ — силы тока якорей двигателей; a , b , c , k , j , i — коэф-

коэффициенты пропорциональности; M, θ — моменты инерции механизмов каретки и поворотного стола; R, F — коэффициенты трения подшипников.

Характеристики механизмов перемещения каретки вдоль осей t' и δ' приняты одинаковыми, причем, как видно из уравнений (1), закон управления движением каретки определяется отклонением и производной от отклонения, а управление поворотным столом — отклонением, производной и интегралом от отклонения.

Отклонения $\Delta x, \Delta y, \Delta w$, вырабатываемые в виде электрических сигналов звездными датчиками, являются сложными функциями движения и положения гидрируемых звезд в поле зрения гида

$$\begin{aligned} \Delta x &= \sin z_0 \cos q_0 \int_0^t (\dot{A}^* - \dot{A}) dt + \sin q_0 \int_0^t (\dot{z}^* - \dot{z}) dt + \\ &+ u_1 \cos \beta_1 \int_0^t \dot{q}^* dt - \Delta t' - u_1 \cos \beta_1 \Delta q', \\ \Delta y &= \sin z_0 \sin q_0 \int_0^t (\dot{A}^* - \dot{A}) dt - \cos q_0 \int_0^t (\dot{z}^* - \dot{z}) dt - \\ &- u_1 \sin \beta_1 \int_0^t \dot{q}^* dt - \Delta \delta' + u_1 \sin \beta_1 \Delta q', \\ \Delta w &= \sin z_0 \cos (q_0 + \beta_2) \int_0^t (\dot{A}^* - \dot{A}) dt + \sin (q_0 + \beta_2) \int_0^t (\dot{z}^* - \dot{z}) dt + \\ &+ u_2 \int_0^t \dot{q}^* dt - \cos \beta_2 \Delta t' + \sin \beta_2 \Delta \delta' - u_2 \Delta q', \end{aligned} \quad (2)$$

где z_0, q_0 — зенитное расстояние объекта наблюдения и параллактический угол; \dot{A}^*, \dot{z}^* — скорости движения объекта наблюдения; \dot{A}, \dot{z} — скорости движения телескопа; \dot{q}^* — скорость изменения параллактического угла; $\Delta t', \Delta \delta', \Delta q'$ — приращения соответствующих координат каретки и поворотного стола.

Так как требуемые при управлении кареткой интервалы времени малы, так что $\dot{A}^*, \dot{A}, \dot{z}^*, \dot{z}$ и \dot{q}^* практически остаются без изменений в течение отработки сигналов $\Delta x, \Delta y, \Delta w$ устройством, т. е.

$$\begin{aligned} \dot{A}^* - \dot{A} &= \Delta \dot{A}(0) \approx \text{const}, \\ \dot{z}^* - \dot{z} &= \Delta \dot{z}(0) \approx \text{const}, \\ \dot{q}^* &= \dot{q}^*(0) \approx \text{const}, \end{aligned} \quad (3)$$

то с учетом (3) уравнения (2) примут вид

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta B' t - \Delta t' - u_1 \cos \beta_1 \Delta q', \\ \Delta y &= \Delta C' t - \Delta \delta' + u_1 \sin \beta_1 \Delta q', \\ \Delta w &= \Delta D' t - \cos \beta_2 \Delta t' + \sin \beta_2 \Delta \delta' - u_2 \Delta q', \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta B' &= \sin z_0 \cos q_0 \Delta \dot{A}(0) + \sin q_0 \Delta \dot{z}(0) + u_1 \cos \beta_1 \dot{q}^*(0), \\ \Delta C' &= \sin z_0 \sin q_0 \Delta \dot{A}(0) - \cos q_0 \Delta \dot{z}(0) - u_1 \sin \beta_1 \dot{q}^*(0), \\ \Delta D' &= \sin z_0 \cos (q_0 + \beta_2) \Delta \dot{A}(0) + \sin (q_0 + \beta_2) \Delta \dot{z}(0) + u_2 \dot{q}^*(0). \end{aligned}$$

На рис. 3 представлена структурная схема рассматриваемого устройства. Обозначения на рисунке:

$$a_{11} = \sin z_0 \cos q_0, \quad a_{12} = \sin q_0, \quad a_{13} = u_1 \cos \beta_1,$$

$$b_{11} = -1, \quad b_{13} = -u_1 \cos \beta_1;$$

$$a_{21} = \sin z_0 \sin q_0, \quad a_{22} = -\cos q_0, \quad a_{23} = -u_1 \sin \beta_1,$$

$$b_{22} = -1, \quad b_{23} = u_1 \sin \beta_1;$$

$$a_{31} = \sin z_0 \cos (q_0 + \beta_2), \quad a_{32} = \sin (q_0 + \beta_2), \quad a_{33} = u_2,$$

$$b_{31} = -\cos \beta_2, \quad b_{32} = \sin \beta_2, \quad b_{33} = -u_2.$$

$$G_1(p) = G_2(p) = \frac{a + bp}{p(R + Mp)}, \quad G_3(p) = \frac{k + jp + i/p}{p(F + \theta p)}$$

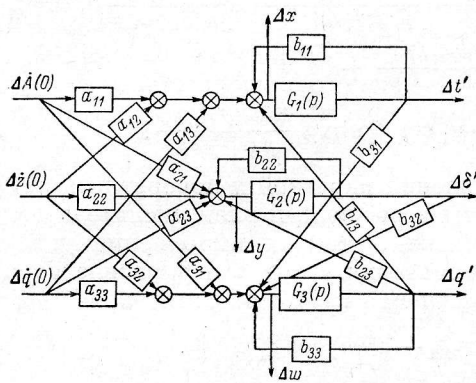


Рис. 3.

передаточные функции регуляторов и исполнительных механизмов каретки и поворотного стола.

Из уравнений (1) и (2) и приведенной структурной схемы устройства видно, что последнее представляет собой многомерную систему управления

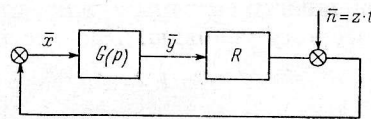


Рис. 4.

с тремя входами и тремя выходами. На рис. 4 приведена структурная схема устройства в виде, удобном для анализа. Обозначения: $\bar{x} = \bar{x} (\Delta x, \Delta y, \Delta w)$ — вектор управления устройством, $\bar{y} = \bar{y} (\Delta t', \Delta \delta', \Delta q')$ — вектор состояния устройства, $\bar{n} = \bar{n} [\Delta \dot{A}(0), \Delta \dot{z}(0), \dot{q}^*(0)]$ — вектор возмущения, $G(p)$ — передаточная матрица регулятора с кассетой и поворотным столом, R — передаточная матрица измерителя.

Для схемы, приведенной на рис. 4, можно написать

$$\bar{x} = R\bar{y} + \bar{n}, \quad \bar{y} = -G(p) \cdot \bar{x};$$

тогда

$$\bar{y} = [I + G(p)R]^{-1} G(p) \bar{n}, \quad (5)$$

где I — единичная матрица. Выражения для $G(p)$ и R получаются соответственно из уравнений (1) и (4)

$$G(p) = \begin{vmatrix} \frac{a + bp}{p(R + Mp)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{a + bp}{p(R + Mp)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k + jp + i/p}{p(F + \theta p)} \end{vmatrix},$$

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & u_1 \cos \beta_1 \\ 0 & 1 & -u_1 \sin \beta_1 \\ \cos \beta_2 & -\sin \beta_2 & u_2 \end{vmatrix}; \quad (6)$$

$$x = \begin{vmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta w \end{vmatrix}, \quad y = \begin{vmatrix} \Delta t' \\ \Delta \delta' \\ \Delta q' \end{vmatrix}, \quad \bar{n} = t \begin{vmatrix} \Delta A' \\ \Delta B' \\ \Delta C' \end{vmatrix}.$$

Числитель выражения $[I + G(p)R]$ есть характеристическое уравнение многомерной системы

$$[I + G(p)R] = \begin{vmatrix} \frac{a+bp}{p(R+Mp)} + 1 & 0 & \frac{a+bp}{p(R+Mp)} u_1 \cos \beta_1 \\ 0 & \frac{a+bp}{p(R+Mp)} + 1 & -\frac{a+bp}{p(R+Mp)} u_1 \cos \beta_1 \\ \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)} \cos \beta_2 - \sin \beta_2 \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)} & u_2 \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)} + 1 & \end{vmatrix} =$$

$$= \left[\frac{a+bp}{p(R+Mp)} + 1 \right]^2 \left[u_2 \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)} + 1 \right] - \left[\frac{a+bp}{p(R+Mp)} + 1 \right] \frac{a+bp}{p(R+Mp)} u_1 \cos \beta_1 \times$$

$$\times \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)} \cos \beta_2 - \left[\frac{a+bp}{p(R+Mp)} + 1 \right] \times$$

$$\times \frac{a+bp}{p(R+Mp)} u_1 \cos \beta_1 \sin \beta_2 \frac{k+jp+i/p}{p(F+\theta p)}. \quad (7)$$

Для устойчивости системы управления кареткой и поворотным столом необходимо, чтобы все коэффициенты и свободный член числителя выражения (7) были больше нуля. Покажем, что для выполнения условия устойчивости системы нужно, чтобы значения углов β_1 и β_2 удовлетворяли некоторому условию. Для этого выпишем из (7) свободный член

$$a^2 u_2 k - a^2 u_1 \cos \beta_1 k \cos \beta_2 - a^2 k u_1 \cos \beta_1 \sin \beta_2. \quad (8)$$

При $u_2 = u_1 = u$ получим

$$a^2 u k (1 - \cos \beta_1 \cos \beta_2 - \cos \beta_1 \sin \beta_2) = a^2 u k [1 - \cos \beta_1 (\cos \beta_2 + \sin \beta_2)]. \quad (9)$$

Из (9) следует, что свободный член будет больше нуля, если $1 - \cos \beta_1 (\cos \beta_2 + \sin \beta_2) > 0$. После несложных преобразований имеем условие

$$\cos(\beta_2 - 45^\circ) \leq 1/\sqrt{2} \cos \beta_1,$$

т. е. если все прочие коэффициенты выражения (7) положительны, то система управления кареткой и поворотным столом будет устойчива при углах β_1 и β_2 , удовлетворяющих этому неравенству.

Приведенный анализ показывает, что при реализации системы управления телескопом на альтазимутальной монтировке по описанному выше принципу следует обратить внимание на обеспечение устойчивости, которая зависит от положения гидрируемых звезд в поле зрения гида.

Следует также иметь в виду, что подобная система требует наличия в поле зрения двух звезд, пригодных для гидрирования. В [6] дан анализ статистического распределения звезд на небесной сфере по яркости. В приводимой таблице из [6] даны значения радиусов R_0 поля зрения

m_p	p					m_p	p				
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
8 ^m 0	1.67	2.08	2.34	2.47	2.54	10 ^m 0	0.59	0.73	0.82	0.87	0.90
8.5	1.30	1.62	1.82	1.94	1.97	10.5	0.50	0.62	0.70	0.74	0.76
9.0	1.00	1.25	1.40	1.48	1.52	11.0	0.36	0.44	0.50	0.53	0.56
9.5	0.77	0.96	1.08	1.14	1.17						

трубы гида, при которых с вероятностью p в поле не найдется ведущей звезды ярче величины m_v .

Пользуясь таблицей, можно определить вероятность p_0 нахождения одновременно двух звезд величины m_v , пригодных для гидирования и находящихся в поле зрения гида заданного радиуса R_0 . Так, например, для гида с радиусом поля $R_0=0.5^\circ$ вероятность нахождения одновременно двух звезд ярче $m_v=10.5$ составляет величину $p_0=(1-p)^2=0.998$, причем вероятность p_0 уменьшается при необходимости гидирования по более ярким звездам.

Кроме того, следует учесть, что две звезды, попавшие в поле зрения гида, должны находиться друг от друга на расстоянии, достаточно большом, чтобы можно было пропустить свет от каждой из них через головки модуляторов «звездных датчиков».

Таким образом, необходимость применения вычислителя и преобразователя, задача точного наведения телескопа, конструктивные трудности в реализации принципа управления с двумя фотогидами, необходимость наличия в поле зрения гида двух звезд, пригодных для гидирования, привели нас к выводу, что более перспективным решением системы управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке, по нашему мнению, является система управления с одним фотоэлектрическим гидом (см. рис. 5), работающая совместно с системой программного управления.

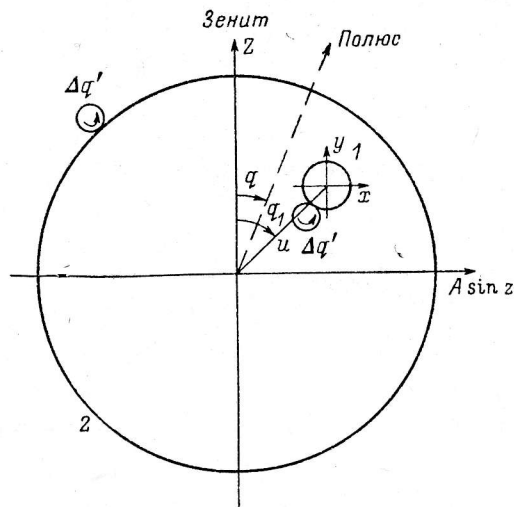


Рис. 5.

На рисунке показан двухкоординатный фотоэлектрический гид 1, размещенный на поворотном, относительно оси гида, столе 2, который управляется программной системой по закону изменения параллактического угла. Для сохранения ориентации осей x и y датчика фотоэлектрического гида датчик должен вращаться относительно собственной оптической оси также по закону изменения параллактического угла, но в сторону, противоположную направлению вращения поворотного стола.

Сигналы управления в рассматриваемом случае могут быть записаны в виде

$$\Delta x = \sin z_0 \int_0^t (\dot{A}^* - \dot{A}) dt + u \cos q_1 \int_0^t \dot{q}^* dt - \Delta t' - u \cos q_1 \Delta q',$$

$$\Delta y = \int_0^t (\dot{z}^* - \dot{z}) dt - u \sin q_1 \int_0^t \dot{q} dt - \Delta \delta' + u \sin q_1 \Delta q'.$$

При программном управлении вращением поворотного стола можно обеспечить

$$\int_0^t \dot{q}^* dt = \Delta q'.$$

С учетом (11) выражения (10) примут вид

$$\Delta x = \sin z_0 \int_0^t (\dot{A}^* - \dot{A}) dt - \Delta t',$$

$$\Delta y = \int_0^t (\dot{z}^* - \dot{z}) dt - \Delta \delta'.$$
(12)

Из сравнения выражений (2) и (12) видно, что в рассматриваемом случае связь между сигналами управления Δx и Δy отсутствует в принципе, а на погрешность в расчете и обработке угла можно наложить ограничения, исходя из допусаемого размера изображения.

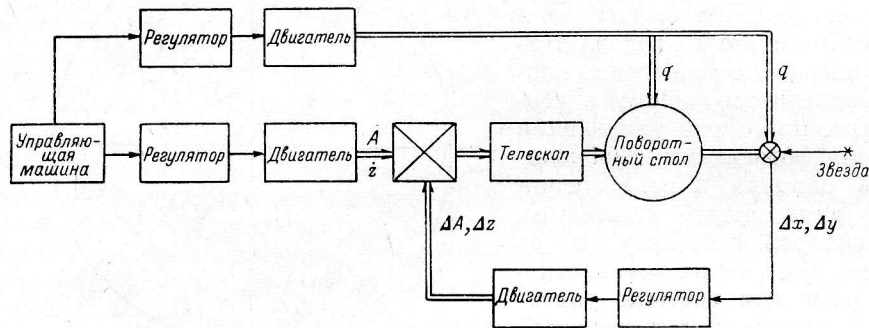


Рис. 6.

Для того чтобы реализовать технически предлагаемую структуру управления и обеспечить практически приемлемую полосу пропускания фотоэлектрического гида, необходимо ввести программное управление телескопом по азимуту и зенитному расстоянию. Программное управление решит также задачу наведения телескопа на заданный объект наблюдения, причем информация о фактическом положении осей телескопа будет поступать в управляющую машину с датчиков положения, которые отключаются при работе фотоэлектрического гида.

Таким образом, для управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке по предложенному методу необходима совместная работа трех систем: а) системы программного автоматического управления телескопом, б) системы фотоэлектрического гидирования, в) системы программной компенсации вращения поля.

Структурная схема управления телескопом, организованного по этому принципу, показана на рис. 6. Такой принцип организации управления применен для крупнейшего в мире оптического альтазимутального телескопа БТА.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что систему управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке целесообразно строить на основе структурной схемы с одним фотоэлектрическим гидом и программным управлением.

Авторы выражают благодарность В. Я. Катковнику за ценные замечания по статье.

Литература

1. Е. М. Неплохов, А. С. Найшуль, Оптико-механическая промышленность, № 19, 20, 1966.
2. Е. М. Неплохов, в сб. «Цифровое управление в системах автоматике», Изд-во «Наука», М., 1968, стр. 173—181.
3. Е. М. Неплохов, В. А. Бесекерский, в сб. «Теория инвариантности автоматических систем», Изд-во «Наука», М., 1970, стр. 319—326.
4. Е. М. Неплохов и др., в сб. «Цифровое управление в системах автоматике», Изд-во «Наука», М., 1968, стр. 73—82.
5. C. Kühn e, in: On drive controls for altazimuth mountings. Large telescope design. Geneva, March 1—5, 1971, p. 453—468.
6. О. А. Мельников и др., Изв. Глав. астр. обс. в Пулкове, 24, № 177, вып. 1, 81, 1964.
7. В. Я. Катковник, Р. А. Полуэктов. Многомерные дискретные системы управления. Изд-во «Наука», М., 1966.

Декабрь 1971 г.
