
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 536.8:621.384

А. Е. ГОРОДЕЦКИЙ, М. С. ДОРОШЕНКО, И. Л. ТАРАСОВА, И. А. КОНЯХИН

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЛИМАТОРА С АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Представлен метод увеличения диапазона измерения автоколлиматора посредством активной компенсации угла поворота контрольного элемента. Проанализировано влияние системы автоматического управления на погрешности измерений. Обосновано использование гальванометрического привода в системе управления для уменьшения динамических погрешностей и времени измерения.

Ключевые слова: автоколлиматор, погрешность виньетирования, система автоматического управления, динамическая погрешность.

Для контроля углового положения крупногабаритных конструкций требуются измерительные системы, обеспечивающие высокую точность измерения при значительной рабочей дистанции и относительно широком диапазоне измерения. Например, для измерения углового положения элементов конструкции 70 метрового радиотелескопа РТ-70 (Суффа) для работы в миллиметровом диапазоне длин волн необходима малогабаритная углоизмерительная система с погрешностью измерения не более 1,5—2" при значительной рабочей дистанции до 20 м и диапазоне измерения 10—12'. Подобные системы необходимы также для решения многих задач в производственной и научной деятельности: контроля деформаций буровых платформ, доков, фундаментов электростанций и других крупногабаритных объектов.

При решении указанных задач эффективно использовать оптико-электронные автоколлимационные системы, обладающие высокой чувствительностью измерения [1]. Одним из главных факторов, затрудняющих автоколлимационные измерения при значительных (десятки метров) расстояниях до контролируемого объекта, является ограничение рабочих пучков оправами оптических элементов.

На объекте измерения располагается пассивный контрольный элемент (КЭ) — автоколлимационное зеркало, а на опорном объекте — приемно-излучающий блок — автоколлиматор (АК).

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема автоколлиматора. Излучение источника излучения 1, пройдя марку 2, установленную в фокальной плоскости объектива автоколлиматора 3, формируется в параллельный пучок лучей, падающий на КЭ в виде плоского зеркала 4. Отраженный пучок после прохождения в обратном ходе объектива 3 формирует в фокальной плоскости его бокового канала (образован светоделителем 5) изображение марки. Изображение марки строится на чувствительной площадке матричного фотоприемника 6.

При повороте плоского зеркала изменяется направление оси отраженного пучка, что приводит к пропорциональному смещению изображения на матричном фотоприемнике 6.

После обработки видеокладов с матрицы 6, соответствующих исходному и повернутому положению плоского зеркала 4, микропроцессорным блоком 7 определяется величина смещения изображения x , которая при известном фокусном расстоянии объектива f' позволяет рассчитать угол Θ поворота зеркала как

$$\Theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{f'} \right). \quad (1)$$

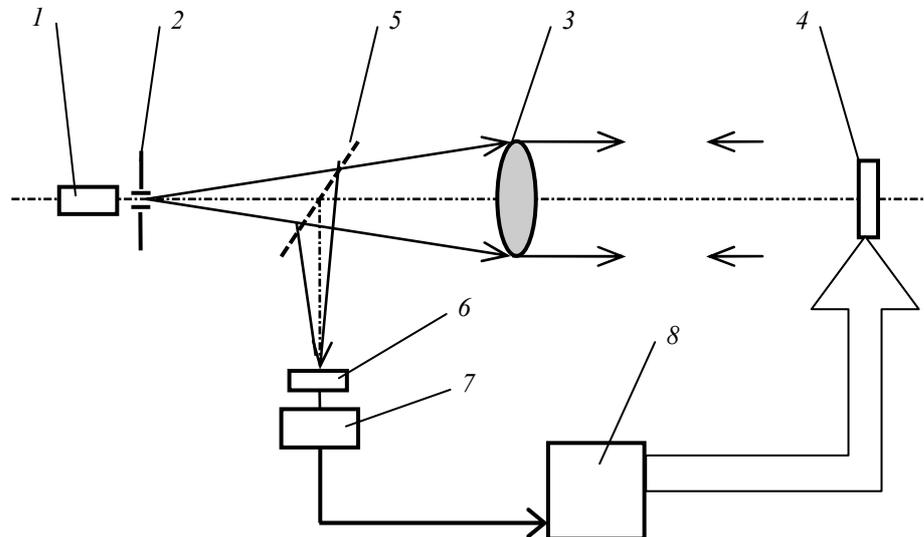


Рис. 1

Принципиальной особенностью автоколлимационного метода является смещение отраженного пучка относительно центра апертуры объектива автоколлиматора при повороте зеркала. Возникающее при этом виньетирование пучка, формирующее изображение марки, приводит к появлению погрешности измерения.

Алгоритмическая компенсация погрешности из-за виньетирования возможна, если при повороте зеркала, расположенного на расстоянии L , на угол Θ смещение отраженного пучка не превышает половины апертуры D объектива автоколлиматора [2]:

$$D/2 \geq L \operatorname{tg} 2\Theta. \quad (2)$$

Из этого условия следует, что при измерении типичных угловых деформаций крупногабаритных конструкций в диапазоне $10\text{--}20'$ рабочая дистанция автоколлиматора с апертурой $30\text{--}100$ мм не превышает нескольких метров, этого недостаточно для многих практических случаев. Например, при измерении угловых деформаций элементов радиотелескопа РТ-70 в диапазоне $12'$ при апертуре объектива 100 мм рабочая дистанция составляет $7,2$ м при требуемой величине 20 м.

Для увеличения рабочей дистанции при заданном диапазоне измерения (или наоборот, увеличения диапазона измерения на требуемой рабочей дистанции) может применяться активная компенсация отклонения пучка при повороте зеркала. В схему автоколлиматора включается система автоматического управления (САУ) 8 (см. рис. 1), которая в процессе измерения поворачивает плоское зеркало (например, с помощью электродвигателя отработки) в направлении, обратном повороту контролируемого объекта и удерживает отраженный пучок в пределах входной апертуры его объектива.

САУ запускается по сигналам, формируемым микропроцессорным устройством обработки 7, при смещении изображения марки на матричном фотоприемнике относительно положения, соответствующего отсутствию поворота контролируемого объекта. Обработка поворота плоского зеркала выполняется до момента восстановления исходного положения

изображения марки. При этом целесообразно связь между устройствами 7 и 8 осуществлять по беспроводному радиоканалу или инфракрасному каналу, в зависимости от расстояния между указанными устройствами.

Величина измеряемого угла Θ поворота зеркала в каждый момент времени равна сумме двух углов: Θ_1 , определяемого по выражению (1), и α , формируемого САУ. Непосредственно величина угла поворота α определяется элементом, интегрирующим компенсирующее воздействие на плоское зеркало, например, сельсином, механически связанным с электродвигателем отработки.

Таким образом, использование САУ позволяет преодолеть ограничение по диапазону измерения (или дистанции работы), определяемое условием (2).

Однако рассмотренный способ увеличения диапазона измерения требует создания высокоточной САУ углом поворота с обратной связью по положению отраженного пучка. При этом важной характеристикой системы является зависимость динамической погрешности измерения угла α , формируемого САУ, от времени измерения, т.е. времени поворота зеркала из начального положения в положение, соответствующее предельному углу поворота по условию (2). Быстродействие САУ должно быть достаточным для удержания отраженного пучка в области апертуры объектива при дальнейшем увеличении угла (полагаем скорость поворота зеркала вследствие поворота контролируемого объекта постоянной).

Рассмотрим динамические погрешности при использовании для компенсации поворота зеркала типичной САУ, построенной на основе электродвигателя постоянного тока со следующими параметрами: номинальная скорость $\omega_n = 314$ 1/с; номинальный момент $M = 0,3$ Н·м; номинальное напряжение $U_n = 220$ В; момент инерции $J = 2,93 \cdot 10^{-4}$ кг·м²; коэффициент момента $C_m = 0,73$ Н·м/А; коэффициент $C_e = U_n / \omega_n = 0,7$ В·с; постоянные времени $T_m = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с и $T_e = 1,3 \cdot 10^{-6}$ с.

Структурная схема САУ показана на рис. 2, здесь используются следующие обозначения: $W_{рп}$ — передаточная функция регулятора перемещения, $W_{рс}$ — передаточная функция регулятора скорости, $K_{ЦАП}$ — коэффициент преобразования ЦАП, $K'_{АЦП}$ — коэффициент преобразования АЦП скорости двигателя, $K''_{АЦП}$ — коэффициент преобразования перемещения, K_y — коэффициент усиления усилителя, $K_{ред}$ — коэффициент редукции, p — оператор дифференцирования.

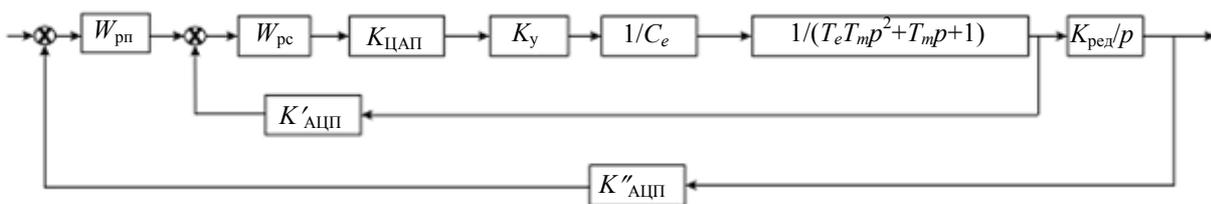


Рис. 2

В качестве регулятора скорости двигателя будем использовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) с передаточной функцией $W_{рс} = (K_3 p^2 + K_1 p + K_2)/p$ и следующей настройкой параметров: $K_1 = T_m$; $K_2 = 1$; $K_3 = T_m T_e$, обеспечивающей наилучшее управление скоростью двигателя. Разрядность n ЦАП и АЦП выбираем из условия получения погрешности преобразования не выше 0,01 %, а именно $2^n \geq 100/0,01$.

Положим $n = 14$, тогда при $x = 2 \cdot 10^{-2}$ м получим: $K_{ЦАП} = \frac{2U}{2^{14}} = 26,4 \cdot 10^{-3}$;

$$K'_{ЦАП} = \frac{2^{14}}{2\omega_n} = 26,089; \quad K''_{ЦАП} = \frac{2^{14}}{2x} = 4,1 \cdot 10^5.$$

Если в САУ использовать ЦАП со стандартным уровнем выходного напряжения 12 В, то $K_y = 220/12 = 18,7$. Коэффициент редукции $K_{ред}$ выбираем исходя из требуемой скорости перемещения плоского зеркала: $V_{ак} = 2000$ м/с, $K_{ред} = V_{ак}/\omega_n = 6,4$ м.

Анализ влияния настройки регулятора перемещения проводился с помощью компьютерного моделирования САУ. При этом анализировались регуляторы двух типов: пропорциональный ($W_{рп} = K_p$) и пропорционально-интегральный ($W_{рп} = K_p + K_i/p$). Результаты моделирования при $K_p = 10^{-4}$ (W_1), $K_i = 2 \cdot 10^{-5}$ (W_2) показаны на рис. 3.

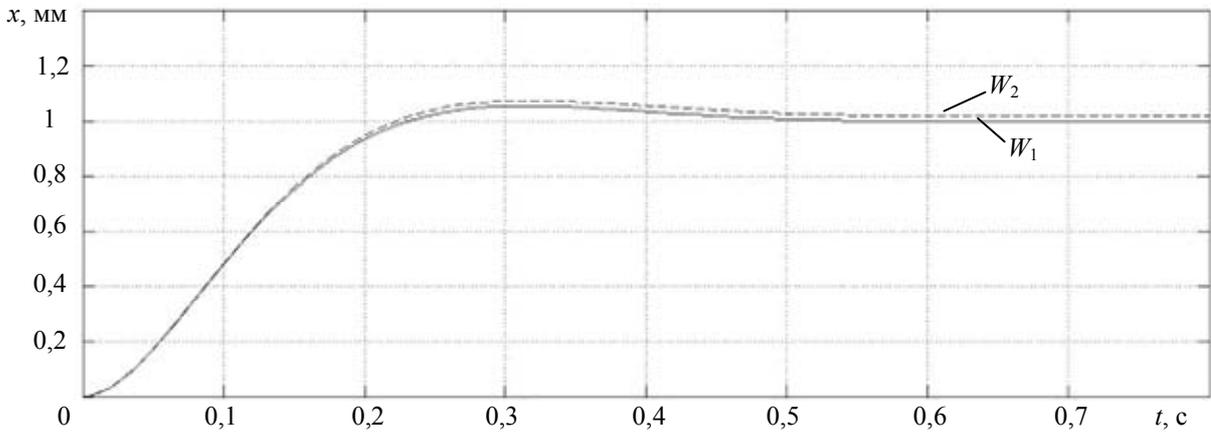


Рис. 3

Как показывает анализ приведенных графиков, при использовании стандартного двигателя в следящем режиме при времени измерения менее 0,5—0,6 с возможна большая динамическая погрешность.

Для уменьшения динамической погрешности и времени измерения требуется применение специализированного быстродействующего электропривода. В частности, в качестве быстродействующего электропривода можно использовать гальванометр, математическая линейная модель которого имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U - C_e p \alpha}{R(T_e p + 1)}, \\ \alpha &= \frac{k_1 I}{(c - k_2)(T_m^2 p^2 + 2\xi T_m p + 1)}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где α — угол поворота, $p = d/dt$, R и l — активное сопротивление электрической цепи с рамкой и ее индуктивность, $T_e = l/R$ — электромагнитная постоянная времени, J — момент инерции рамки, η и c — коэффициент демпфирования и жесткость пружины, $k_1 = C_m \alpha_0$, $k_2 = C_m I_0$, α_0 и I_0 — установившиеся значения угла и тока рамки, C_m — коэффициент момента, U — подводимое к рамке напряжение, $T_m = \sqrt{\frac{J}{c - k_2}}$ — механическая постоянная времени,

$\xi = \frac{\eta}{2T_m(c - k_2)}$ — коэффициент затухания.

Обычно у гальванометров значение T_e очень мало и им пренебрегают, значение затухания ζ лежит в пределах 0,4—0,6 и собственная частота $f = 1/2\pi T_m$ — в пределах 100—7000 Гц.

Введя обозначение $K = k_1/R(c - k_2)$ и полагая в модели (3) $T_e = 0$ и $C_e = 0$, ввиду их малости получим: $W_g = \alpha(p)/U(p) = K/(T_m^2 p^2 + 2\xi T_m p + 1)$. Тогда структурную схему САУ можно представить в виде, приведенном на рис. 4. При этом в САУ целесообразно использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией:

$$W_p = K_1 + K_2 p + K_3/p, \quad (4)$$

где $K_3 = \omega_3/K\delta_d$, где δ_d — допустимая погрешность обработки синусоидального входного сигнала частотой ω_3 ($U = \sin \omega_3 t$, $\omega_3 < 1/T_m$), $K_2/K_3 = T_m^2$, $K_1/K_3 = 2\zeta T_m$.

На рис. 5 приведены результаты компьютерного моделирования САУ, построенной на базе гальванометра М004.3.5, имеющего следующие характеристики: полоса рабочих частот от 0 до 1700 Гц, максимально допустимый ток $I = 80$ мА, внутреннее сопротивление $R = 15$ Ом, чувствительность $S_A = 1,5$ рад/А, собственная частота $f = 3500$ Гц. Моделирование выполнялось для $T_m = 1/2\pi f_0 = 1/6,28 \cdot 3500 = 4 \cdot 10^{-5}$ с; $K = k_1/R(c - k_2) = S_A/R = 1,5/15 = 0,1$; $\zeta = 0,4$; $\delta_d = 0,001$; $\omega_3 = 100$ 1/с.

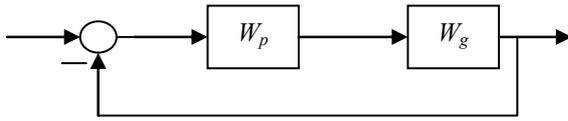


Рис. 4

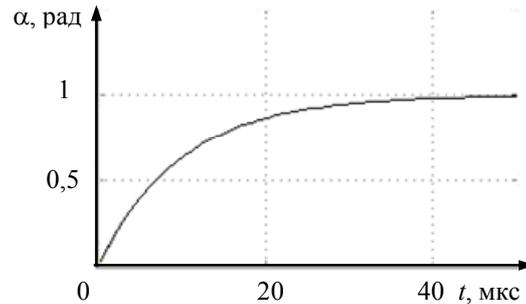


Рис. 5

Из результатов моделирования следует, что при времени измерения, большем 40 мкс, динамическая погрешность пренебрежимо мала. Такого быстродействия углоизмерительной системы вполне достаточно для определения угловых деформаций крупногабаритных конструкций.

Кроме приведенных гальванометрических электроприводов можно использовать приводы на основе соленоидов и электромагнитов, также имеющих высокое быстродействие. Для космических систем, работающих в условиях глубокого вакуума и сверхнизких температур (до 4 К), целесообразно использовать в САУ пьезоэлектрические приводы.

Таким образом, использование в САУ поворота КЭ стандартных электромагнитных двигателей для увеличения диапазона измерения возможно только при медленно изменяющихся углах поворота объектов измерения. При быстром изменении углов поворота объекта измерения целесообразно для увеличения диапазона измерения применять САУ на базе гальванометра либо перемещать падающий или отраженный луч, устанавливая по ходу луча управляемый от САУ оптико-электронный дефлектор.

Исследования по тематике статьи выполняются при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000. 197 с.
2. Коняхин И. А., Лю Лэй. Компенсационный алгоритм автоколлимационных измерений повышенной точности // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18. С. 232—236.

Сведения об авторах

Андрей Емельянович Городецкий — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; E-mail: g27764@yandex.ru

- Максим Сергеевич Дорошенко** — Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; младший научный сотрудник; E-mail: m.s.doroshenko@gmail.com
- Ирина Леонидовна Тарасова** — канд. техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: g17265@yandex.ru
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
03.06.10 г.