

- // Измерения, контроль, автоматизация: Научно-техн.: Сб. обзоров / ЦНИИТЭИ приборостроения. – М., 1986. – Вып. 1(57). – С. 3–17.
14. Ройтман М.С., Ким В.Л., Калининко Н.П., Беккеров В.П. Прецизионный индуктивный делитель напряжения ДИ-4 // Метрология в радиоэлектронике: Тез. докл. VI Всесоюз. науч.-техн. конф. – 16 окт. 1984 г. – М., 1984. – С. 217–218.

15. А. с. 1249622 СССР. МКИ³ H01F 21/12. Индуктивный делитель напряжения / М.С. Ройтман, Н.П. Калининко, В.Л. Ким. – Опубл. 07.08.86, Бюлл. № 29. – 8 с.
16. Установка высшей точности для измерения ослабления электромагнитных колебаний на фиксированных частотах в диапазоне частот 0–100 МГц УВТ 52–А–87. <http://www.vniiftri.ru/standards/stand212.html>.

УДК 681.586.773: 535

МНОГОМЕРНОКООРДИНАТНЫЙ ПРИВОД МИКРОУПРАВЛЕНИЯ

С.М. Слободян

Инновационный центр "Тест". г. Томск
E-mail: IC_Test@inbox.ru

Описан системный пьезоэлектрический привод для пространственного (по углам наклона с продольным сдвигом) управления зеркалом корректора фронта адаптивной следящей системы. Эффективность привода подтверждена экспериментом.

Эффективность применения пьезоэлектрических систем, обеспечивающих перемещение и позиционирование объектов управления в диапазоне 0,01...1 мм (с погрешностью – до долей мкм; быстродействием – до 10^{-3} с и силой воздействия до 1 Н), рассмотрена в [1, 2]. Их использование в прецизионных автоматических системах управления [3–6] позволяет обеспечить заданную точность по-

зиционирования объекта, обычно осуществляемого в пространственной трехмерной координатной системе. Особенно важно трехмерное управление объектом в задачах повышения качества изображения, в оптико-телевизионных системах, звездных и солнечных телескопах, системах адаптивной оптики. Решение этой задачи достигается путем введения в системы дополнительных контуров управления компенсацией влияния случайных искажений волнового фронта принимаемого излучения. Компенсация случайных искажений производится на основе сигналов, вырабатываемых следящими датчиками углового положения [3–5] и прогиба волнового фронта [6] адаптивно-оптической системы и, после соответствующего алгоритмического преобразования и фильтрации, подаваемых на пьезоэлектрические тяговые толкатели зеркала. Для обеспечения многокоординатного управляемого движения зеркала в трехмерном пространстве возможны два варианта: использование набора однокоординатных приводов и оптимизированного под решение конкретной задачи пьезопривода с распределенным независимым по каждой из координатных осей управлением.



Рис. 1. Структурная схема устройства с пьезоприводом

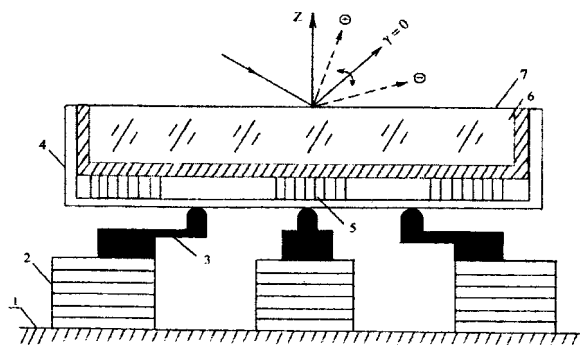


Рис. 2. Устройство системного пьезоэлектрического привода

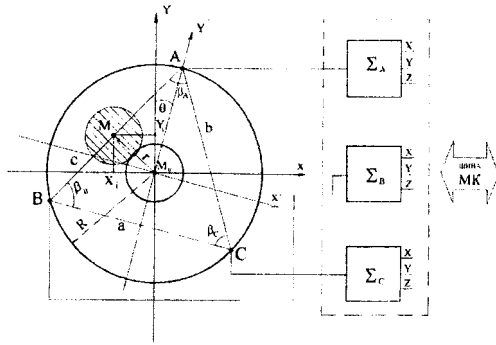


Рис. 3. Схема распределенного трехфазного управления приводом

Структурная схема устройства с пьезоэлектрическим приводом для трехмерного управления зеркалом корректора волнового фронта представлена на рис. 1. Оно состоит из двух основных узлов: системы слежения с датчиками искажений волнового фронта и функциональных блоков формирования сигналов рассогласования $U(x, y, z)$ в декартовой системе координат и собственно пьезопривода с алгоритмическим преобразователем декартовых сигналов следящей системы в трехфазные сигналы управления приводом, трехфазным согласующим устройством (усилителем – сумматором сигналов управления) и исполнительным устройством, выполненным на основе пьезоэлектрических элементов из керамики типа цирконат-титанат свинца (ЦТС–19, PZT и т.п.), с зеркалом – объектом управления. Система слежения в качестве датчиков углового положения и фокусировки изображения использует известные позиционно-чувствительные датчики смещения и фокусировки, формирующие сигналы рассогласования, пропорциональные отклонению параметров изображения от требуемых в декартовой системе координат и подаваемых для управления пьезоприводом с целью отработки зеркалом этих отклонений.

Схема устройства пьезопривода для трехмерного управления приведена на рис. 2. На основании привода – 1, расположенном на пути распространения оптического излучения, установлены три (А, В, С) пьезоэлектрических толкателя – 2, к которым через рычажные опоры – 3 с бесфрикционным упругим шарниром (на рисунке не показан) прикреплен держатель – 4 с полимерным ложементом для зеркала и упруго-пластичными полимерными опорами – 5 – элементами разгрузки зеркала – 6 с нанесенным на его внешнюю плоскость отражающим излучение слоем – 7. Пьезотолкатели – 2 имеют идентичные конструктивные и пьезоэлектрические свойства. Их количество и геометрия исполнения в принципе могут быть любыми. Располагаются пьезотолкатели по окружности под некоторыми центральными углами $\alpha_{A,B,C}$ относительно друг друга. В общем случае, $\alpha_A \neq \alpha_B \neq \alpha_C$. В частном случае [3]:

$$\alpha_A = \alpha_B = \alpha_C = \frac{2}{3} \pi. \text{ Рычажные опоры достаточ-}$$

ной жесткости с бесфрикционным упругим шарниром позволяют за счет пятикратной мультиплексии перемещения пьезотолкателей в такой же степени снизить требуемую амплитуду сигналов управления приводом (для малых углов поворота зеркала), но при сохранении амплитуды сигналов управления – пятикратно расширить диапазон угловых отклонений зеркала. Установка регулируемого элемента разгрузки позволяет величину стрелы прогиба зеркала свести до минимального значения, соизмеримого с погрешностями интерферометра (для зеркала $80 \times 80 \times 10 \text{ мм}^3$ в статическом режиме контроля на ИТ-100 не превышала 10^{-2} мкм).

Напряжение управления пьезотолкателями подводится от трехфазного усилителя-сумматора управляющих сигналов, поступающих с выхода алгоритмического преобразователя. Схема (рис. 3) реализует принцип распределенного управления пьезоприводом, когда путем однокоординатного возвратно-поступательного движения толкателей обеспечивается трехмерное перемещение зеркала в пространстве (X, Y, Z) по сложной нелинейной траектории. Этот привод дает возможность выполнять зеркалу функции линейного модулятора пространственной фазы с одновременным управлением средним наклоном фронта падающего излучения. В зависимости от синхронного или асинхронного способа управления толкателями имеем зеркало с подвижным или неподвижным виртуальным центром углового вращения в пространстве XYZ.

Возвратно-поступательное "поршневое" движение зеркала обеспечивается одновременной подачей на все пьезотолкатели одного сигнала управления. Изменение же угловой пространственной ориентации зеркала происходит под воздействием композиции XY сигналов управления пьезотолкателями, сформированных по определенной закономерности, обусловливаемой структурной схемой (рис. 3) размещения толкателей на опорной плоскости. Для осуществления трехкоординатного управления зеркалом число активных пьезотолкателей как опор управления в приводе минимизировано до трех [3]. В принципе, возможен, обладающей меньшей динамикой перемещения, вариант привода из пассивной и двух активных опор. Описываемая конструкция привода позволяет при необходимости увеличивать число управляемых степеней свободы.

Процесс управления зеркалом описывается системой уравнений:

$$H_i(x, y, z, t) = H_{i0}(z, t_0)[1 \pm F_i(x, y, \alpha_i, \theta, t)],$$

для $i \leq k,$

где H_{i0} – длина i -ого пьезотолкателя после начальной установки привода в момент времени $t=0$; H_i – текущая величина длины пьезотолкателей под воздействием сигналов управления в момент времени $t \geq 0$; $F_i(x, y, \alpha_i, \theta, t)$ – функция, описывающая закономерность изменения углового пространственного положения зеркала в соответствии со смещением изображения в плоскости XY датчика

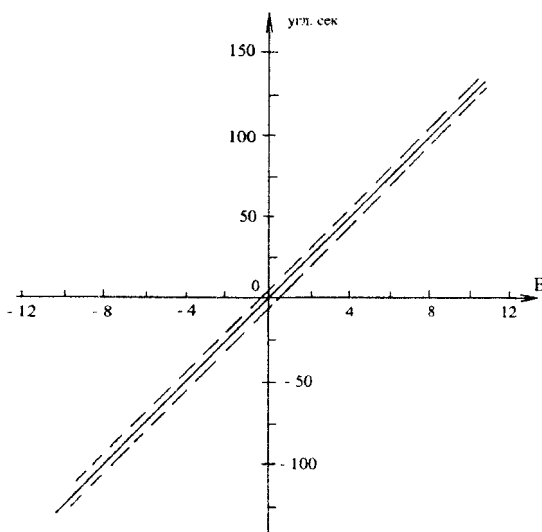


Рис. 4. Экспериментальная статическая характеристика привода

смещений и зависящая от структурных особенностей привода — величины соответствующего пьезотолкателю центрального угла α_i и θ — угла разъюстировки измерительной (датчика) и опорной (привода) систем координат; $i \leq \kappa$. Знак "+" и "-" — означает удлинение и сжатие данного пьезотолкателя.

Для стабилизации изображения в компенсационной ветви системы реализуем алгоритм управления зеркалом $\ddot{Z} + U = 0$ с управляющим воздействием вида $U = K_y^2 Z + 2K_y \dot{Z}$. Дифференциальное уравнение управления корректором случайных смещений изображения примет вид:

$$\ddot{Z} + 2\kappa_y \dot{Z} + \kappa_y^2 Z = 0.$$

Корни его решения для начальной точки Z_0 :

$$\begin{cases} Z = [Z_0 + (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t); \\ \dot{Z} = [\dot{Z}_0 - \kappa_y (\dot{Z}_0 + \kappa_y Z_0)t] \exp(-\kappa_y t). \end{cases}$$

Обеспечив в системе условие $\dot{Z}_0 = -\kappa_y Z_0$, упростим решение:

$$\begin{cases} Z = Z_0 \exp(-\kappa_y t); \\ \dot{Z} = \dot{Z}_0 \exp(-\kappa_y t). \end{cases}$$

Отсюда $\kappa_y = -\dot{Z}/Z$ и $U = \kappa_y \dot{Z}$. То есть, рассогласование положения изображения и величина сигнала управления зеркалом корректора плавно изменяются во времени по закону $\exp(-\kappa_y t)$, что соответствует апериодическому процессу управления зеркалом с нулевым перерегулированием. Экспоненциальный закон управления как монотонное воздействие обрабатывается приводом без возникновения упругих колебаний в его элементах. Увеличение коэффициента усиления в компенсационной ветви корректора для повышения быстродействия с целью компенсации влияния малых амплитуд высокочастотного тренда спектра случайных смещений изображения нарушает монотонность управления [5].

Положение плоскости изображения и наклон фронта пучка определяется изменением длин пьезотолкателей А, В и С относительно некоторого опорного значения. Смещение изображения пучка в некоторую точку $M(x_i, y_i, z_i, t)$ относительно центра инерциальной системы координат датчика следящей системы фиксируется датчиком. Система вырабатывает сигнал рассогласования $U(x, y, z, t)$ как величину отклонения изображения от опорного положения, который поступает на алгоритмический преобразователь координат, осуществляющий преобразование декартовых сигналов рассогласования системы слежения в трехфазные сигналы управления толкателями пьезопривода. Алгоритм преобразования сигналов из системы координат датчика в систему координат привода, с учетом возможной разъюстировки осей, имеет вид:

$$U_i = K_0 \cos\left(\frac{\pi}{2} \pm \theta\right) [U_x \cos \beta_i + U_y \sin \beta_i]$$

для $i = A, B, C$,

где K_0 — нормирующий множитель пропорциональный коэффициенту усиления цепи обратной связи; θ — угол разъюстировки осей X и Y инерциальных систем координат измерительной (датчика) и опорной (привода); U_x и U_y — вырабатываемые следящей системой сигналы рассогласования пропорциональные величине смещения изображения в фокальной плоскости датчика относительно центральной точки системы координат датчика $O(X=0, Y=0)$; β_i — угол при соответствующей вершине $i = (A, B, C)$ треугольника размещения i -ых пьезотолкателей привода, стороны которого (a, b, c) являются хордами описанной окружности радиуса R .

Величина коэффициента усиления цепи обратной связи K_0 находится в прямой функциональной пропорции с радиусом R , легко определяемой из тригонометрических выражений [7]. Для размещения толкателей в углах равностороннего треугольника ($\theta=0$) и нормировки на $e^{-1} = 0,366$ получим, приведенный в [3], простейший алгоритм в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} U_A = -\sqrt{3}U_x - U_y; \\ U_B = 2U_y; U_C = \sqrt{3}U_x - U_y. \end{cases}$$

Под действием трехфазного сигнала пьезопривод приводит зеркало в положение минимизирующее смещение, и дефокусировку изображения в течение временного интервала управления с определенной в системе точностью. То есть, возвращает изображение к опорной точке. Этот алгоритм функционирования пьезопривода корректора наклона фронта был реализован в системе автоматического управления на базе микропроцессорного семейства 580 серии (Intel 8080). Реализация алгоритмов управления на основе микроконтроллеров семейства AT89 (фирма ATMEL) и MC68HC11 (фирма

Motorola) с встроенным широтно-импульсным модулятором [8] упрощает схемную реализацию многофазного усилителя сигнала управления пьезотолкателями, работающего на емкостную нагрузку до 1 мкФ в частотном диапазоне до $2 \cdot 10^3$ Гц (частота следящей развертки и выборки данных в системах слежения [5, 6]). Применение микроконтроллеров и операционных усилителей типа HA2-2640/45 (фирмы Hitachi) позволяет расширить динамический диапазон управления пьезоприводом до 74...80 дБ (для усилителей 2640 или 2645 соответственно).

Статическая амплитудная характеристика пьезопривода (рис. 4) представляет усредненную по множеству экспериментальную зависимость угла наклона зеркала от амплитуды фазного сигнала трехмерного управления приводом. Влияние гистерезиса в относительно статическом режиме работы (частота изменения фазного сигнала $\sim 10^{-3}$ Гц) не превышало 6%; в динамическом компенсационном режиме работы привода (в полосе пропускания 0...500 Гц) он практически не оказывал заметного влияния на работу системы. Закон распределения погрешностей измерения характеристик привода соответствовал нормальному. Дискриминационная характеристика системы с приводом является нелинейной нерелейной характеристикой с гистерезисной петлей и насыщением. Основные технические характеристики привода для многомерного управления исследовались в составе системы на специальном стенде: статические – в разомкнутом режиме работы системы датчик – корректор волнового фронта; динамические – в замкнутом режиме (слежения и адаптации) при контролируемых модельных видах турбулентного воздействия среды. Наклон зеркала соответствовал корректируемым аберрациям. Среднеквадратическая ошибка компенсации стрелы прогиба поверхности зеркала, которая определяет точность управления фокусировкой, составила 0,02 мкм для квадратного зеркала $100 \times 100 \times 5$ мм³. Для зеркал $\varnothing 38 \times 9$ мм³ и $\varnothing 19 \times 10$ мм³

эта процедура не имела смысла в связи с предельно малой стрелой прогиба.

Проведение измерений по определению величины неортогональности осей систем координат привода, датчика волнового фронта и всей следящей системы в целом, обусловленной погрешностями их изготовления и влиянием электронных цепей передачи сигналов, не представляется сложным и является тривиальной процедурой настройки и юстировки следящих систем [5]. Общая погрешность, обусловленная этими факторами, после юстировки системы не превышала ± 1 угл. сек. При наличии в приводе корректора фронта легкого зеркала более эффективно использование биморфных пьезоэлементов вместо пьезопакетов при сохранении принципа расположения и алгоритма управления элементами. Современный уровень техники микропроцессорных систем [8] позволяет создавать достаточно простые устройства управления зеркалом корректора, выполняющие, кроме автоматической компенсации простейших мод искажений, и другие дополнительные функции: определение текущего значения интенсивности турбулентности среды по структурной характеристике показателя преломления атмосферы; вычисление статистических характеристик результата воздействия среды на параметры пучка (статистическая обработка данных); автоматическая подстройка значений сигнала управления и его производных для достижения оптимального качества управления пьезоприводом с учетом колебательного характера звена и наличие гистерезиса; прогнозирование возникновения явления механического резонанса, с учетом влияния нагрузки – объекта управления, и предотвращения срыва слежения, в области прилегающей к точкам, так и в точках механического резонанса; качественное управление на границе области устойчивости системы и многие другие алгоритмы повышения качества управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
2. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. – М.: Советское радио, 1997. – 336 с.
3. А. с. 589821 СССР. МКИ G01S 3/78. Нугационное устройство оптического локатора / С.М. Слободян. Заявлено 16.10.1975. Опубликовано 22.10.1976., Бюл. № 45 – 5 с.: ил.
4. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника – 1988. – № 6. – С. 13–20.
5. Слободян С.М. Оптимизация биморфного привода оптических измерительных систем с обратной связью // Измерительная техника. – 2003. – № 1. – С. 19–23.
6. Арутюнов В.А., Слободян С.М. Исследование ПЗС-датчика волнового фронта адаптивно-оптической системы фокусировки излучения // Приборы и техника эксперимента. – 1985. – № 1. – С. 160–162.
7. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Гостехиздат, 1945. – 556 с.
8. Современные микроконтроллеры: Архитектура, средства проектирования, примеры применения, ресурсы сети Интернет / Под ред. И.В. Коршуна; Пер. с англ. под ред. Б.Б. Горбунова. – М.: Изд-во "АКИМ", 1998. – 272 с.