

УДК 535+621

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ОТКЛОНЕНИЯ ЛУЧА В АВТОКОЛЛИМАТОРЕ НА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

**М. С. Дорошенко<sup>1</sup>,**  
 младший научный сотрудник  
 Институт проблем машиноведения РАН

Рассматривается принцип работы автоколлиматора, предлагается способ улучшения системы управления угловыми перемещениями с использованием экрана из пористого кремния. Анализируется эффективность управления определенными блоками автоколлиматора в целях повышения точности измерений.

**Ключевые слова** — автоколлиматор, принцип работы автоколлиматора, повышение точности автоколлиматора.

Для измерения углового рассогласования обычно используют автоколлимационный метод измерения, обладающий наибольшей чувствительностью [1].

Следуя методу, на одном из объектов располагают пассивный контрольный элемент (КЭ) — автоколлимационное зеркало (рис. 1), а на другом — приемно-излучающий блок — автоколлиматор (АК).

При наличии углового рассогласования между объектами происходит отклонение пучка, отраженного от контрольного элемента. Величина угла  $\xi$  отклонения пучка, являющаяся мерой углового рассогласования, определяется анализатором приемной системы АК.

В соответствии с классическим алгоритмом измерения по автоколлимационному методу при повороте КЭ отраженный пучок отклоняется от исходного направления, что приводит к смещению формируемого им изображения в плоскости анализа. Величина смещения изображения, измеряемая анализирующей системой, определяет искомый угол поворота КЭ. Таким образом, при любой схеме построения оптико-электронного автоколлиматора (ОЭАК) мерой измеряемых углов поворота контролируемого объекта является ве-

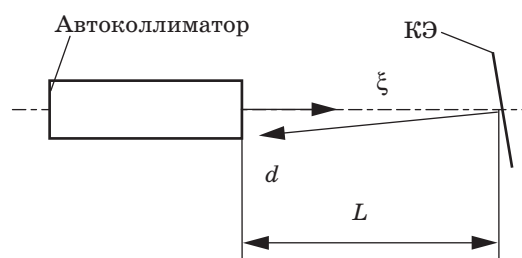
личина угла отклонения орта отраженного КЭ пучка от первоначального направления.

На практике, в частности при контроле угловых положений элементов зеркальной системы больших радиотелескопов, часто требуется контролировать угловые перемещения объекта на больших расстояниях с высокой точностью и при больших диапазонах изменения измеряемого перемещения. Выполнить эти требования не всегда удается ввиду их противоречивости. Кроме того, регистрация углового отклонения  $\xi$  отраженного пучка возможна только при условии его нахождения в пределах углового поля  $\Omega$  измерительного оптико-электронного преобразователя (ИОЭП):  $\xi \leq \Omega$ .

Это означает, что диапазон измеряемых углов в соответствии с выражением

$$\xi = K \Theta \quad (1)$$

определяется соотношением



■ Рис. 1. Смещение отраженного пучка

<sup>1</sup> Научный руководитель — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН А. Е. Городецкий.

$$\Theta_{\max} = \Omega / K, \quad (2)$$

где  $\Theta_{\max}$  — диапазон измерения угла  $\Theta$ ;  $\Omega$  — угловое поле ИОЭП;  $K$  — коэффициент преобразования КЭ.

Соотношения (1) и (2) определяют ограничение диапазона измерения «по угловому полю».

Диапазон измеряемых углов ОЭАК также ограничивается условием попадания принимаемого пучка в приемный объектив ИОЭП.

При величине дистанции  $L$  до контролируемого объекта и угле отклонения  $\xi$  центр отраженного пучка в плоскости входного зрачка объектива автоколлиматора (приемного объектива ИОЭП) оказывается смещенным относительно оптической оси на величину (см. рис. 1)

$$d = L \operatorname{tg}(\xi).$$

Очевидно, что измерения возможны только при условии попадания отраженного пучка во входной зрачок объектива автоколлиматора:

$$d \leq D/2, \quad (3)$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка (апертура) объектива автоколлиматора (диаметр отраженного пучка полагается малым).

Наибольшее значение смещения  $d_{\max}$  определяется при подстановке в выражение (3) наибольшего угла отклонения пучка  $\xi_{\max}$ , соответствующего повороту КЭ на величину диапазона измерения:

$$\xi_{\max} = K \Theta_{\max}.$$

Таким образом, при увеличении диапазона измерения  $\Theta_{\max}$  или дистанции  $L$  до объекта величина смещения  $d_{\max}$  также будет возрастать, что при конечной величине апертуры объектива приведет к 100 %-му виньетированию регистрируемого отраженного пучка и невозможности дальнейшего измерения. Фактически диапазон измерения  $\Theta_{\max}$  или предельная дистанция  $L$  определяются из соотношений (диаметр самого отраженного пучка принимается малым)

$$d_{\max} = L \operatorname{tg}(\xi_{\max}) = L \operatorname{tg}(K \Theta_{\max}) = D/2. \quad (4)$$

Следовательно, при известных  $D$  и  $L$  реализуемый диапазон измерения  $\Theta_{\max}$  определится как

$$\Theta_{\max} = \operatorname{arctg}(D/2L)/K. \quad (5)$$

В частности, при  $D = 4 \cdot 10^{-2}$  м,  $K = 1$  и  $L = 50$  м (эти величины характерны для системы измерения угловых уходов ЗС РТ-70) получим  $\Theta_{\max} \approx 4 \times$

$\times 10^{-4}$  рад, что явно недостаточно для обеспечения работоспособности системы измерения во всем диапазоне изменения измеряемых величин.

Следовательно, стоит задача увеличения рабочей дистанции при заданном диапазоне или расширения диапазона измерения при заданной дистанции.

Соотношения (4) и (5) определяют ограничение диапазона измерения и дистанции «по апертуре».

Из ограничений диапазона «по угловому полю» и «по апертуре» наиболее жестким с точки зрения приборной реализации является второе, поскольку ограничивает как диапазон измерения, так и рабочую дистанцию ОЭАК. По этой причине рассмотрим схему, позволяющую расширить диапазон измерения ОЭАК именно за счет уменьшения ограничения «по апертуре».

Известны три схемных решения ОЭАК, реализующих измерения с уменьшением ограничения «по апертуре»: с активной компенсацией отклонения пучка, с рабочим полипучком и со специальными КЭ [2].

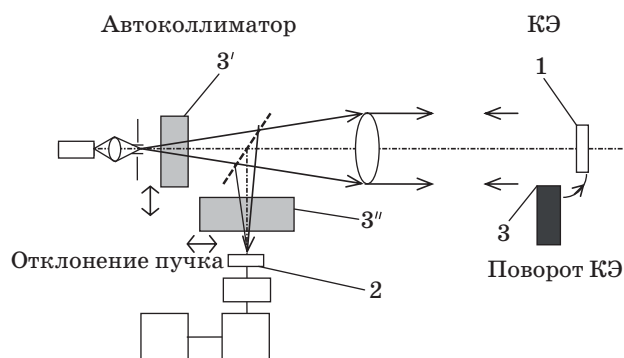
В схемах ОЭАК с активной компенсацией, обеспечивающей наибольшее ослабление ограничения (5), отклонения пучка при повороте КЭ на угол, превышающий допустимый (5), отраженный пучок с помощью управляемого отклоняющего элемента удерживается в пределах углового поля ИОЭП или в зоне входного зрачка его объектива.

Фактически, при этом используется один из методов сравнения, в частности, нулевой метод [3], который может явиться и способом уменьшения погрешности измерения, вызываемой нестабильностью параметров ОЭАК.

Эффективность использования активной компенсации зависит от положения компенсатора и от динамических свойств системы управления в измерительной цепи ОЭАК.

Очевидно, что ограничения как «по апертуре», так и «по угловому полю» отсутствуют, если в результате компенсации полностью восстанавливается первоначальный (до поворота КЭ) ход лучей через все оптические компоненты ОЭАК.

Для этого необходимо, чтобы компенсирующее воздействие оказывалось либо непосредственно на КЭ 1 (рис. 2), т. е. производился бы его поворот (например, с помощью электродвигателя обработки) в направлении, обратном повороту контролируемого объекта 3, либо на автоколлиматор в целом, т. е. производилось бы его смещение на  $x = L/\operatorname{tg}\xi$ . Очевидно, что в первом варианте в связи с малыми габаритами и весом КЭ динамические характеристики системы управления активной компенсацией (СУАК) могут быть лучше, чем во втором. Однако техническая реализация



■ Рис. 2. Схема ОЭАК с активной компенсацией

первого варианта не всегда осуществима из-за технологических соображений и условий эксплуатации объектов измерения.

При других возможных положениях компенсатора (позиции 3', 3'') восстанавливается только часть исходного хода лучей, что сохраняет без изменения ограничение диапазона измерения «по апертуре».

Однако эффективный с точки зрения расширения диапазона измерения способ активной компенсации требует использования высокоточной и быстродействующей СУАК с обратной связью по положению отраженного пучка.

Для повышения динамической точности системы управления угловыми перемещениями обычно вводится дополнительная обратная связь по скорости перемещения. В рассматриваемом случае представляется перспективным информацию о скорости перемещения отраженного луча получать, используя в анализаторе 2 (см. рис. 2) люминесцирующий экран из пористого кремния [4], обладающего эффектом усталости люминесценции [5]. Тогда, в зависимости от соотношения скорости движения по экрану отраженного луча и скорости затухания свечения экрана, получаемое изображение будет выглядеть совершенно по-разному.

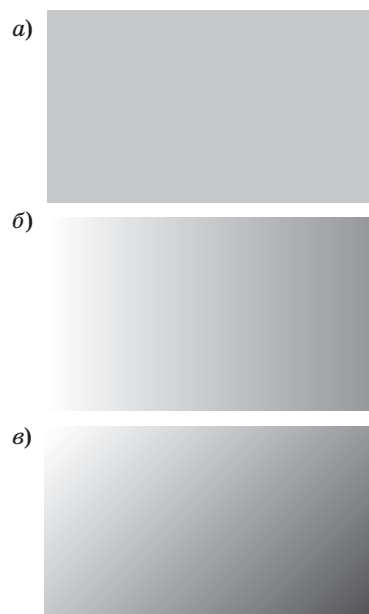
Для примера рассмотрим два наиболее простых предельных случая — почти неподвижный луч и быстро движущийся. В первом случае материал экрана будет «уставать» отображать проецируемое на него изображение, и будет наблюдаться постепенное ослабление яркости изображения луча вплоть до полного его исчезновения. Во втором случае, если движущийся луч перемещается на расстояние порядка своего размера за время, меньшее, чем время затухания экрана, изображение не будет отличаться от изображения на обычном экране. Наиболее интересен случай движения с промежуточной скоростью. При этом край луча, направленный в сторону движения, проецируется на свежие, ранее не активиро-

ванные участки экрана и отображается с нормальной яркостью. Противоположный край проецируется на области, уже люминесцировавшие какое-то время и поэтому слабее отзывающиеся на активацию. В результате изображение движущегося луча будет иметь градиент яркости в направлении движения. Величина этого градиента будет зависеть от соотношения времени затухания свечения и скорости движения.

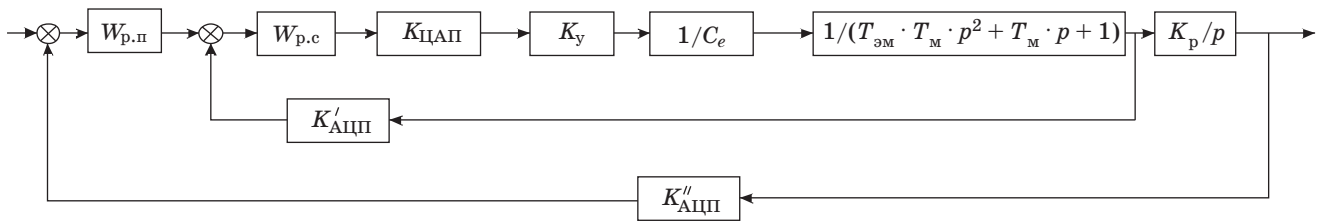
С помощью такого экрана можно определять скорость и направление движения «с одного взгляда» на экран, хотя, по самым общим представлениям, для определения скорости нужно иметь, по крайней мере, два отсчета. Следовательно, запаздывание в получении сигнала обратной связи по скорости в данном случае будет минимальным.

Результаты моделирования работы подобной системы определения скорости показаны на рис. 3.

Из начального положения (рис. 3, а) объект движется справа налево с условной скоростью  $v$  (рис. 3, б), затем — справа налево и снизу вверх со скоростью  $v/3$  (рис. 3, в). Разница в скорости движения объектов заметна по интенсивности излучения их «заднего» края (т. е. правой стороны для объекта на рис. 3, б и правого нижнего угла для объекта на рис. 3, в). Чем медленнее движется объект, тем больше материал успевает «привыкнуть» к нему и тем темнее будет «задний» край. Разница между отображениями объектов, движущихся в разных направлениях, очевидна.



■ Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования: а — неподвижное состояние луча; б — движение луча справа налево; в — движение луча справа налево и снизу вверх



■ Рис. 4. Структурная схема САУК

При расчете яркости объекта, в соответствии со свойствами пористого кремния, отклик материала на стационарное возбуждающее воздействие рассчитывался по формуле

$$I(t) = I_0 \exp(-t / \tau)^\gamma,$$

где  $I_0$  — интенсивность люминесценции в начальный момент времени;  $\tau$  и  $\gamma$  — характерное время и показатель степени растянутой экспоненты соответственно.

Причем в данном случае для эксперимента полагалось  $\gamma = 0,8$ . Теоретически это значение может лежать в интервале от 0 до 1 [6].

Легко заметить, что по внешнему виду объектов на рис. 3, б и в можно определить направление и относительную скорость перемещения объекта. Тем самым имитационное моделирование показывает возможность и эффективность измерения скорости с помощью экрана из нового функционального материала — пористого кремния.

Для иллюстрации влияния настроек регуляторов САУК рассмотрим систему, построенную на основе электродвигателя постоянного тока со следующими параметрами: номинальная скорость  $\omega_n = 354$  1/с; номинальный момент  $M = 0,28$  нм; номинальное напряжение  $U_n = 440$  В; момент инерции  $J = 11 \cdot 10^{-6}$  кгм<sup>2</sup>; коэффициент ЭДС  $C_e = 1,24$  В · с; постоянные времени  $T_m = 2,6 \cdot 10^{-3}$  с и  $T_{эм} = 1,3 \cdot 10^{-3}$  с. На структурной схеме САУК (рис. 4) используются следующие обозначения:  $W_{p.п}$  — передаточная функция регулятора перемещения;  $W_{p.с}$  — 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;  $C_e = U_n / \omega_n$ ;  $K_p$  — коэффициент редукции;  $p$  — оператор дифференцирования.

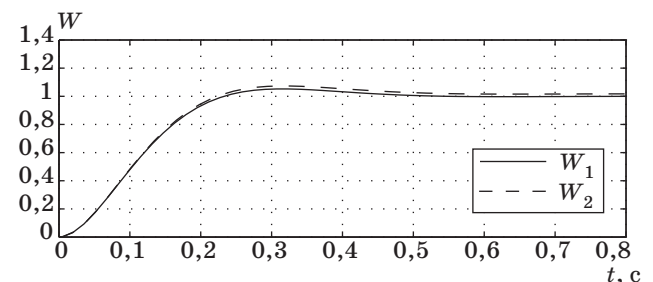
В качестве регулятора скорости двигателя будем использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией  $W_{p.с} = (K_3 p^2 + K_1 p + K_2) / p$  и следующей настройкой параметров:  $K_1 = T_m$ ;  $K_2 = 1$ ;  $K_3 = T_m \cdot T_{эм}$ , обеспечивающей наилучшее управление скоростью двигателя. Разрядность  $n$  ЦАП

и АЦП выбираем из условия получения погрешности преобразования не выше 0,01 %, т. е.  $2^n \geq 100/0,01$ . Положим  $n = 14$ , тогда  $K_{ЦАП} = 2U_n / 2^{14} = 0,0537$ ,  $K'_{АЦП} = 2^{14} / 2\omega_n = 23,14$  и  $K''_{АЦП} = 2^{14} / 2x = 4,1 \cdot 10^5$  (при  $x = 2 \cdot 10^{-2}$  м). Далее, если в САУК использовать ЦАП со стандартным уровнем выходного напряжения 12 В, то  $K_y = 440/12 = 36,7$ . Коэффициент редукции  $K_p$  выбираем, исходя из требуемой скорости перемещения АК  $v_{АК} = 2000$  м/с:  $K_p = v_{АК} / \omega_n = 5,65$ .

Анализ влияния настройки регулятора перемещения проводился с помощью компьютерного моделирования САУК (рис. 5). При этом анализировались регуляторы двух типов: пропорциональный ( $W_{p.п1} = K_p$ ) и ПИ-регулятор ( $W_{p.п2} = K_p + K_i / p$ ).

При использовании стандартного двигателя в следящем режиме будет большая динамическая погрешность при времени измерения менее 0,4 с. Для уменьшения динамической погрешности и времени измерения требуется применять специализированный быстродействующий электропривод. Кроме того, можно исключить динамические погрешности, связанные с использованием электродвигателей для поворота АК, изменив следящий режим на режим переключения диапазонов измерения за счет поворота АК с помощью электропривода. При этом в пределах одного диапазона электропривод не будет работать и не будет вызывать соответствующие динамические погрешности. Однако на переключение диапазонов потребуется выделять определенное время порядка 0,5 с, в течение которого нельзя будет проводить измерения.

Таким образом, использовать электропривод поворота АК для увеличения диапазона измере-



■ Рис. 5. Результаты моделирования при  $K_n = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $K_u = 2 \cdot 10^{-5}$



ния можно только при медленно изменяющихся углах поворота объектов измерения. При быстрых изменениях углов поворота объекта измерения целесообразно для увеличения диапазона измерения перемещать либо сам КЭ (3 на рис. 2),

либо падающий или отраженный луч (3' или 3'' на рис. 2). В первом случае в качестве КЭ можно использовать гальванометр. Во втором случае по ходу луча устанавливается оптико-электронный дефлектор.

## Литература

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 // Исследования в области оптики и физики: Науч.-техн. вестник СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18. С. 232–236.
3. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Управление и нейронные сети. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. — 312 с.
4. Городецкий А. Е., Компан М. Е., Шабанов Н. Ю., Панков Э. Д. Использование эффекта усталости

- люминесценции пористого кремния для адаптивной оптической обработки информации // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. № 9. С. 52–55.
5. Gorodetsky A. E., Kompan M. E., Tarasova I. L. Self Formation of Porous Silicon Structure: Primary Microscopic Mechanism of Pore Separation // Solid State Phenomena. 2004. Vol. 97–98. P. 181–184.
  6. Боков В. Л., Новикова Ю. В., Пашков В. С., Тидеман Н. А. Исследование точностных характеристик оптико-электронных приборов с многоэлементными фотоприемниками // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 11. С. 64–68.



Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН  
 Университет Помпеу Фабра (Барселона, Испания)  
 Технический университет Дрездена (Германия)  
 ООО «Центр Специальных Информационных Технологий» (Санкт-Петербург)

### III МЕЖДУНАРОДНЫЙ СЕМИНАР ПО СИСТЕМАМ МНОЖЕСТВЕННОГО ДОСТУПА «MACOM-2010»

Барселона, Испания, 13–14 сентября 2010 года

#### Тематика и цели семинара

Основы дисциплины, известной сейчас как «теория множественного доступа», были заложены Клодом Шенноном в 1961 году в его пионерской работе «Two-way Communication Channels» и позднее в 1970 году Норманном Абрамсоном в статье «The Aloha System — Another Alternative for Computer Communications», где была предложена концепция коллективного использования абонентами общего канала связи. Семинар MACOM проводится в третий раз в целях обсуждения как теории множественного доступа, так и вопросов стандартизации протоколов современных сетей передачи данных в части физического и канального уровней. В семинаре примут участие специалисты телекоммуникационных компаний и ведущие ученые, которые представят свои последние результаты в области множественного доступа и сопутствующих областях.

#### Направления работы

Теория множественного доступа.  
 Технологии физического уровня (PHY), такие как CDMA, OFDMA и т. д.

Протоколы управления доступом к среде передачи (MAC), такие как 802.11, 802.16 и т. д.

Вопросы совместной оптимизации протоколов физического и канального уровней.

Теория очередей и систем поллинга.

#### Издание трудов

Все принятые работы публикуются в сборнике трудов Lecture Notes in Computer Science (SPRINGER).

#### Контрольные сроки

Заявки и тексты принимаются до 15 апреля 2010 года.

Все работы рецензируются Международным техническим комитетом.

#### Дополнительная информация и справки

Подробную информацию о мероприятии можно получить на web-странице MACOM-2010:

<http://www.csit-spb.ru/macom2010.html>

или у Алексея Викторовича Винеля (СПИИРАН):

эл. адрес: [vinel@ieee.org](mailto:vinel@ieee.org).