

Рис. 5. Распределение интенсивности в области интерференции

В области максимума электрических импульсов (рис. 4, 5) также наблюдаются высокочастотные хаотично расположенные пикеты, обусловленные дробовыми шумами ФЭУ. Вид изменения электрического сигнала в области первого минимума в графике зависимости распределения интенсивности в области интерференции (рис. 5) близок к синусоиде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика плазмы: Сб. статей. Вып. 7 / Под ред. М.И. Пергамента. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 271 с.
2. А.с. СССР 1508742. МКИ G01N 15/02. Способ определения параметров дисперсных частиц / И.А. Тихомиров, Ю.Д. Копытин, О.Г. Новиков, С.Ф. Баландин, В.Ф. Мышкин. Заявлено 19.08.1987; Опубл. Бюл. № 29 от 15.10.87. — 5 с.: ил.: 2.
3. А.с. СССР 1467449. МКИ G01N 15/02. Способ определения параметров дисперсных частиц / И.А. Тихомиров, О.Г. Новиков, В.Ф. Мышкин, С.Т. Мамыргазиев. Заявлено 01.06.1987; Опубл. 23.03.89, Бюл. № 11. — 5 с.: ил.: 1.
4. Ринкевичус Б.С., Янина Г.М. / В кн.: Парожидкостные потоки. — Минск: Ин-т тепломассообмена БССР. 1977. — 294 с.
5. Патент РФ 2184379. МКИ G01N 15/02. Способ формирования счетного объема для измерения скорости микронных и субмикронных дисперсных частиц / В.Ф. Мышкин, В.А. Власов, А.В. Литкевич. Заявлено 18.12.2000; Опубл. 27.06.2002, Бюл. № 18. — 5 с.: ил.: 2.
6. Патент РФ 2183828. МКП G01N 15/02. Способ определения малоугловой индикатрисы рассеяния / В.Ф. Мышкин, И.А. Тихомиров, В.Н. Цимбал, Б.П. Иваненко. Заявлено 25.12.2000; Опубл. 20.06.2002, Бюл. № 17. — 5 с.: ил.: 1.
7. Тихомиров И.А., Власов В.А., Мышкин В.Ф. и др. Методы и устройства по определению индикатрисы рассеяния лазерного излучения в газодисперсной среде // Известия Томского политехнического университета. — 2003. — Т. 306. — № 5. — С. 41–44.

УДК 621.38:681.33:535.4

ПРИНЦИП СЛЕДЯЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО ФАЗОМЕТРИРОВАНИЯ С ВРЕМЕННЫМ ДИСКРИМИНАТОРОМ

С.М. Слободян

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

Описан принцип следящего оптического фазометра с временным дискриминатором видеосигнала для обработки малоконтрастного интерференционного поля, практически апробированный в условиях гауссова распределения и марковской модели сигнала и фона.

Интерференционные методы оптической фазометрии широко применяют [1–5] для регистрации и определения закономерностей и динамики изменения временных и пространственных характеристик волнового фронта светового излучения в процессе его взаимодействия с поверхностью отражающего или поглощающего свет материала или с пространственной структурой среды распространения.

Искажение формы максимумов и появление дополнительных пикетов в областях минимумов интерференционной картины обусловлено частичным пространственным разделением пучков, имеющих неоднородное распределение интенсивности по сечению. Контраст интерференционной картины с периодом 1,2 мм на расстоянии 5 м от плоскости формирования когерентных волн, при взаимодействии многомодовых пучков диаметром 16 мм лазера ЛГН-118, уменьшается до значения 0,1.

Заключение

Экспериментально исследовано влияние дифрагированного на непрозрачных объектах потока на распределение интенсивности излучения в интерференционной картине. Установлено, что дифрагированный поток от непрозрачных объектов, превышающих длину волны зондирующего излучения, может изменять распределение интенсивности одной или нескольких светлых полос.

Из анализа опубликованных за последнее десятилетие по этой проблеме работ видно, что наибольшее практическое распространение получили интерферометрические методы обработки изображений оптических полей, базирующиеся на внесении в оптическую волну $\Phi(x,y;z)$ дополнительной $Z_M(t)$ фазовой временной модуляции интерференционного поля (ИП) или управляемого фазового сдвига волново-

го фронта $\Phi[x=x_0; y=y_0; z=z_M(t)]$ и пространственно-фазовой модуляции ИП или управления пространственным положением формой волнового фронта $\Phi[x; y; z; t]$, впервые предложенные в работах [2, 3]. Здесь $x; y; z$ – пространственные координаты в плоскости изображения. Для практической реализации алгоритмов управления временными и пространственными параметрами волнового фронта оптического излучения, чаще всего, служат пьезоэлектрические устройства управления фронтом типа [6–10]. Распределение поля интерференции в плоскости регистрации изображения, определяемой пространственными координатами $(x; y)$, в общем случае зависящее от времени t , может быть описано выражением, соответствующим аддитивной модели представления интерференционного изображения:

$$I(x; y; t) = B(x; y; t) + A(x; y; t) \cos[\Phi(x; y; z(t))].$$

Здесь $I(x; y; t)$ – функция распределения интенсивности в изображении полос картины интерференции; $B(x; y; t)$ – фоновая компонента изображения поля интерференции, уровень которой определяется влиянием внешнего фонового излучения и модулем (квадратом) амплитуды суммарного поля, зависящего от мощности опорного гетеродинного и информационного сигнального излучений; $A(x; y; t)$ – распределение переменной составляющей амплитуды и $\Phi(x; y; z(t))$ – пространственное распределение фазы в изображении поля интерференции. Учет соотношения $\cos\Phi = 0,5(e^{i\Phi} + e^{-i\Phi})$ где $i = \sqrt{-1}$, дает распределение интенсивности в поле интерференции в виде

$$I(x; y; t) = B(x; y; t) + 0,5A(x; y; t) \exp[i\Phi(x; y; t)] + 0,5A(x; y; t) \exp[-i\Phi(x; y; t)],$$

или в комплексно-сопряженном представлении компонентов поля интерференции

$$I(x; y; t) = B(x; y; t) + A^-(x; y; t) + A^+(x; y; t),$$

где $A^-(x; y; t) = 0,5A(x; y; t) \exp[i\Phi(x; y; t)]$ и

$$A^+(x; y; t) = 0,5A(x; y; t) \exp[-i\Phi(x; y; t)]$$

– комплексно-сопряженные величины описания пространственного поля интерференции. Равенство Эйлера изменяет их вид:

$$A^{-+}(x; y; t) = 0,5A(x; y; t) \cos \Phi(x; y; t) \pm \pm 0,5iA(x; y; t) \sin \Phi(x; y; t),$$

где знак "+" относится к описанию $A^-(x; y; t)$; а знак "-" – к $A^+(x; y; t)$. Отношение мнимой к действительной части описания модуляционных составляющих, исключая влияние амплитудной модуляции полос интерференции (ИП), дает распределение фаз для каждого отдельного элемента изображения поля интерференции в виде функциональной зависимости арктангенса, которая определена в области значений $\pm \pi/2$:

$$\Phi_i(x; y; t) = \arctg \left[\frac{\text{Im}}{\text{Re}} A(x; y; t) \right].$$

Временная модуляция фазового фронта осуществляется путем линейного перемещения зеркала [4, 6], приводящего к сдвигу, например, в интерфе-

рометре Тваймана-Грина [2], фазового фронта $\Phi[x=x_0; y=y_0; z=z_M(t)]$ опорной волны. Это позволяет спектрально разделить пространственные компоненты видеосигнала для однозначного определения значений фазового фронта в каждой точке изображения поля интерференции. Аналогично [3], управляя наклоном фазового фронта опорной волны, например [7, 8], с помощью привода трехмерного управления положением зеркала, в интерферометре Маха-Цендера можно осуществить модуляцию фазового фронта опорной волны $\Phi[x_0 + \Delta x(t); y_0 + \Delta y(t); z_0 + \Delta z(t)]$ за счет внесения дополнительного фазового сдвига, связанного с управляемым изменением угла падения опорного пучка. Этот подход также разделяет в пространственной области спектральные составляющие модуляционной компоненты видеосигнала изображения ИП. Область определения функции арктангенса ограничена небольшим диапазоном значений $\pm \pi/2$ однозначной оценки динамики изменения фазы по полю изображения. Поэтому, точность оценки распределения фазы с использованием методов дополнительной временной и пространственной модуляции фазового фронта опорной волны ограничена в основном погрешностями алгоритмической и аппаратной реализации способов пространственно-временного сдвига и наклона фазового фронта опорной волны. Создание измерительных систем с обратной связью на основе следящих оптических фазометров [9] позволяет решать проблему повышения точности контроля динамики поля и обеспечивать измерение дифференциального распределения фазы в поле интерференции не хуже $(10^{-2} \dots 10^{-3})\lambda$ или в угловой мере – точнее $(0,03 \dots 0,003)$ рад.

Рассматриваемый принцип и структура системы, частично представленные на рис. 1, позволяют отслеживать положение ИП, характеризуемого координатой $X(t)$, изменяющейся при перемещении зеркала опорного канала интерферометра. Это перемещение осуществляется пьезоприводом за счет соответствующей величины потенциала управляющего напряжения деформации пьезоэлемента. Координата положения зеркала $Z(t)$, в данном случае, связана с ИП, параметры смещения которой подлежат измерению и определенной коррекции к реальному положению. Изменение параметров фазового фронта поля интерференции в зависимости от особенностей структурной реализации, сопровождается функционально зависимым перемещением зеркала, а вместе с ним и изменением местоположения ИП в плоскости изображения. При выполнении задачи слежения цель управления пьезоприводом формулируется как обеспечение, в идеальном случае, полного синхронного совпадения процессов изменения входной и выходной координат ИП, в выбранных временном и пространственном масштабах: $X_{\text{вх}} \equiv X_{\text{вых}}$. При априорной неопределенности распределения реальных стохастических воздействий это соотношение можно трактовать как практическую необходимость обеспечения тех-

ническим средством наиболее близкого совпадения $X_{вх} \Rightarrow X_{вых}$. Это выражается в нахождении путей уменьшения отклонения $X_{вых}$ от $X_{вх}$, характеризующей величиной их рассогласования, определяемой разностью входной и выходной координат

$$\xi = \Delta x = X_{вых} - X_{вх} \rightarrow 0.$$

Цель оптимизации принципов осуществления слежения и технических решений построения следящих оптических фазометров состоит в обеспечении наименьшей погрешности слежения. Ошибка слежения отражает разбаланс или расстройку реальной следящей системы за ИП. Ее формирование осуществляется путем механического реверсивного смещения зеркала опорного плеча интерферометра, приводимого в движение пьезоприводом, за счет обратимой деформации, проявляющейся как результат обратного пьезоэффекта при подаче на пьезоэлементы привода электрического потенциала, соответствующего величине разбаланса системы из-за временной расстройки опорного и реального положения видеосигнала от ИП. Из-за несовершенства структурных элементов реальной системы, когда ее передаточная функция $\Phi(p) \neq 1$ или передаточная функция по ошибке $\Phi_\xi(p) \neq 0$ (где $p = i\omega$ – оператор), трудно обеспечить полное идеальное совпадение X и Y. Практически всегда в реальной системе присутствует некоторая структурная ошибка слежения $\xi(p) = \Phi_\xi(p)X(p)$. Описываемый ниже принцип автоматического слежения за временным положением видеосигнала от ИП основан на использовании временного дискриминатора в контуре обратной связи цепи управления пьезоприводом зеркала измерительных фазометрических систем. Время-импульсный способ контроля положения видеосигнала от удаленного точечного объекта в оптико-электронных следящих системах изложен в [10]. Рассмотрим его особенности применительно к слежению за положением ИП, смещение которой обусловлено перемещением зеркала пьезоприводом под воздействием управляющего напряжения. Оптический смесительный блок преобразует входную измеряемую величину смещения X зеркала пьезоприводом в угловое или линейное смещение изображения поля в плоскости анализатора. С учетом коэффициента оптико-механической редукции γ -функция этого преобразования имеет вид $x = \gamma X$. Для малых величин угловой меры порядка 0,3 рад с точностью от двух до четырех значащих цифр справедливо соотношение $\text{tg}\Phi \approx \Phi$. Эта тождественность упрощает алгоритм вычисления дифференциального распределения фазы в анализируемом поле интерференции методами дополнительной фазовой модуляции. Тождество позволяет получать непосредственно отклонение фазы в каждой точке волнового фронта относительно дополнительного опорного уровня линейного сдвига или угла наклона фазового фронта поля интерференции. Если осуществлять дополнительную модуляцию излучения в опорном плече интерферометра по некоторому периодическому

закону $\Phi_\Delta(x; y; t) = \Phi_\Delta[x + \Delta x_i; y + \Delta y_i; t + \Delta t_i]$ где Δx_i и Δy_i – управляемое изменение положения фазовой плоскости волнового фронта в течение i -ого из тактов периода модуляции $T = n(t)$, то выходной сигнал фотоприемника (Φ):

$$I(x; y; t) = K \sin \{ 2\kappa [\Phi(x; y; t) + \Phi_\Delta(x; y; t)] \}$$

(где K – коэффициент пропорциональности; $\kappa = 2\pi/\lambda$ – волновое число) отражает периодичность изменения положения ИП относительно среднего опорного положения (x_0, y_0, t_0) определяемого величиной и характером модулирующего смещения $\Phi_\Delta(x; y; t)$.

Для изменения разности фаз между интерферирующими излучениями в угловом диапазоне $\pm 2\pi$ рад достаточно обеспечить управление, например, перемещением зеркала $X_M(t)$ в диапазоне значений, равных половине длины волны ($\pm \lambda/2$) основного излучения. Разность фаз сигнального и опорного излучения обусловлена дополнительным фазовым набегом за счет изменения длины опорного плеча интерферометра при перемещении зеркала, управляемого пьезоприводом. Результирующее значение фазы можно определить несколькими путями, в том числе: подсчетом числа ИП в плоскости изображения, измерением изменения расстояния между смежными полосами интерференционной картины или измерением координат смещения полосы выбранного порядка интерференции. Последний вариант измерения фазового набега, обеспечивающий большее быстродействие и точность, является наиболее предпочтительным.

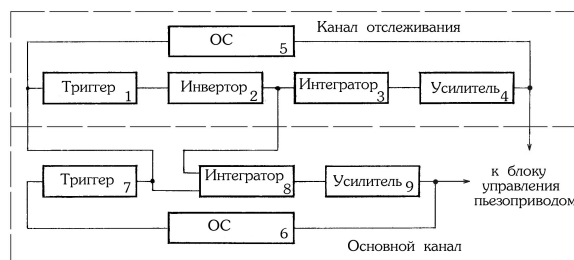


Рис. 1. Структурная схема блока формирования сигналов управления пьезоприводом

Измерение смещения полос интерференционной (кольцевой или линейной) картины, представляющих собой геометрическое место точек, линейное расстояние между которыми кратно λ – длине волны интерферирующих излучений, является наиболее действенным способом контроля параметров волны в оптической фазометрии.

На рис. 1 приведена структурная схема формирования аналогового сигнала управления пьезоприводом. Устройство [12] состоит из двух каналов: основного и канала отслеживания. В исходном состоянии каждый триггер – 1 и – 7 принимает одно из своих устойчивых состояний, например, триггер – 1 такое, что напряжение на его выходе положительное, а на выходе триггера – 7 – нулевое. Тогда отрицательное напряжение с усилителя-инвертора – 2 через интегратор – 3 подается на усили-

тель – 4, что приводит к изменению отрицательного потенциала на пьезоэлементе привода и к соответствующим этому изменению потенциала деформации пьезоэлемента и смещению зеркала в опорном канале интерферометра. Смещение зеркала в отрицательном направлении продолжается до тех пор, пока потенциал с выхода усилителя – 4 не превысит опорный отрицательный пороговый уровень срабатывания двуполярной цепи обратной связи (ОС) – 5. При превышении опорного уровня, отрицательное напряжение поступает на вход триггера – 1, переводя его в другое устойчивое состояние, в котором напряжение на его выходе становится равным нулю, а на выходе усилителя-инвертора – 2 – положительный потенциал, прекращающий разряд емкости интеграторов – 3 канала отслеживания и 8 основного канала. Возрастание положительного напряжения на выходе интеграторов, усилителей и на пьезоэлементе привода обуславливает изменения направления деформации пьезоэлемента и перемещение зеркала опорного канала интерферометра. Положительное напряжение растет до тех пор, пока не достигнет величины опорного порогового уровня цепи ОС – 5, например, выполненной на основе стабилизаторов уровня [13]. Превышающее уровень напряжение перебрасывает триггер – 1 в исходное состояние, устанавливая на его выходе положительный потенциал, и вышеописанный цикл работы канала отслеживания и осуществления следящего сканирования зеркалом в малой области перемещений, измеримых с длиной волны λ , относительно опорного уровня задаваемого интегратором – 8 основного канала, повторяется.

Изменение напряжения на выходе интегратора – 8 основного канала меняет на выходе усилителя – 9 потенциал сигнала управляющего пьезоприводом и соответственно деформацию пьезоэлемента привода, смещая зеркало. Изменение этого потенциала на пьезоэлементе прекращается в момент возвращения триггера – 1 в исходное состояние. Поэтому следующий продольный ход зеркала в процессе следящего сканирования смещен в пространстве относительно предыдущего, в данном случае, первого, цикла отслеживания на величину деформации пьезоэлемента, пропорциональную изменению напряжения на выходе усилителя – 9 основного канала за предыдущие циклы, в данном случае, первый цикл. Основной канал формирует опорное напряжение сигнала ступенчатой формы для перемещения зеркала. Момент формирования траектории следящего сканирования каналом отслеживания указывает на начало формирования очередной ступеньки опорного сигнала управления пьезоприводом основным каналом. Уровень сигнала управления пьезоприводом изменяется только после окончания полного цикла следящего сканирования, осуществляемого за счет сигнала канала отслеживания. То есть, опорный уровень отсчета положения полосы за время его оценки остается постоянным. Рост ступенчатого напряжения, приво-

дящего к изменению сигнала управления пьезоприводом и соответствующему смещению опорного положения зеркала в широком диапазоне перемещений, происходит до тех пор, пока при формировании очередной ступеньки напряжения не будет превышен опорный пороговый уровень цепи ОС – 6 основного канала. Положительное напряжение с выхода цепи ОС – 6 перебрасывает триггер – 7 в другое устойчивое состояние с отрицательным потенциалом на его выходе. Это формирует отрицательное напряжение на выходе интегратора и усилителя основного канала, подаваемого на пьезоэлементы. Смена полярности управляющего сигнала приводит к процессам обратной деформации пьезоэлементов привода и перемещению опорного положения зеркала интерферометра в обратном направлении относительно прямого хода сканирования, то есть, к начальному исходному положению (или к противоположному нижнему крайнему) относительно нулевой точки при максимальном продольном удлинении привода. В момент смены направления деформации пьезопривода отрицательное напряжение триггера – 7 удерживает триггер – 1 в состоянии нулевого напряжения на его выходе. Тогда и интегратор – 3 канала отслеживания удерживает постоянное напряжение, ограниченное пороговым уровнем цепи ОС – 5. Появление на выходе цепи ОС – 6 отрицательного напряжения перебрасывает триггер – 7 в исходное состояние с нулевым потенциалом на выходе. Его нулевой сигнал позволяет триггеру – 1 перейти в исходное закрытое состояние, и вся схема возвращается к начальному вышеописанному состоянию.

Таким образом, обеспечивается стабилизация числа тактов шагового перемещения, циклов следящего сканирования, диапазона полного перемещения зеркала и необходимая синхронность следящего за положением ИП на каждом такте управления перемещением зеркала в широком диапазоне. Описанная схема позволяет управлять смещением зеркала в режиме однонаправленного [8, 9] циклически повторяющегося перемещения от нижнего минимального значения до максимального значения выбранного диапазона перемещений зеркала и в режиме равномерного реверсивного [8] качания зеркала. Оно перемещается относительно средней точки, выбранной за центральную "нулевую", полного диапазона перемещений зеркала опорного канала интерферометра. Таким образом, сформированное линейное и линейно-ступенчатой формы с высокой стабильностью напряжение сигналов управления и поданное на пьезопривод зеркала, установленного в опорном плече интерферометра, изменяет длину плеча интерферометра по закономерности вида:

$$x(t) = X_0(t + T_0) + x_M(t + T_{ck}),$$

где $x_M(t + T_{ck}) = \chi \lambda / 2$ – амплитуда сканирования определяется размером ИП; χ – коэффициент кратности размера следящего сканирования, не обязательно целое число.

Изменение сигнала ФП определяется этой периодической закономерностью перемещения ИП относительно некоторого начального положения, определяемого выбранной величиной смещения $X_0=(t+T_0)$ в качестве исходной начальной точки с небольшими перемещениями модуляционного вида. Модуляция необходима для дополнительного периодического смещения ИП в пределах перемещений зеркала, задаваемых изменением $x_M(t+T_{ck})$, относительно среднего положения, определяемого в i -ый момент времени t_i уровнем опорного напряжения, формируемого в основном канале. Этот уровень определяет опорное положение $X_0=(t+T_0)$ зеркала в опорном плече интерферометра, относительно которого и производится следящее сканирование $x_M(t+T_{ck})$ полосы выбранного порядка интерференции. Здесь T_0 определяет интервал времени, равный длительности ступеньки опорного управляющего сигнала, отводимый для следящего сканирования зеркалом на одном такте изменения опорного сигнала управления в диапазоне nT_0 , равном временному интервалу продольного перемещения зеркала между крайними положениями; T_{ck} – временной интервал однократного следящего сканирования зеркалом относительно среднего положения, устанавливаемого на данном такте опорным уровнем сигнала, формируемого основным каналом. Обычно $T_0 \gg T_{ck}$ и, в случае синхронизации обоих каналов формирования сигналов управления пьезоприводом, относительное изменение перемещений $x_0(t+T_0)$ и $x_M(t+T_{ck})$ определяется взаимосвязью:

$$T_{0max} = m \cdot n \cdot T_{ck},$$

где m и n – целые числа ≥ 1 , определяющие m – число тактов следящего сканирования на каждом из n – тактовых интервалов изменения опорного сигнала управления пьезоприводом. Размер следящего сканирования зеркалом на такте оценки положения ИП определяется многими факторами. В любом случае он выбирается кратным длине волны излучения или в угловой мере кратным 2π :

$$x_M(t+T_{ck}) = \chi \lambda / 2 = \chi \pi.$$

Для получения высокой точности слежения за смещением ИП необходимо обеспечить весьма высокую линейность формирования сигналов управления пьезоприводом. Вышеописанный принцип формирования сигналов следящего сканирования, реализованный в обоих каналах, этим жестким требованиям удовлетворяет.

Пьезоприводы имеют ограниченный участок равномерной амплитудно-частотной характеристики. Поэтому, форма управляющего сигнала основного канала и сигнала канала отслеживания должна быть достаточно "гладкой", а изменения управляющего потенциала – достаточно монотонными. Влияние ступенчатых "мелкомасштабных" изменений управляющего сигнала основного канала на динамику привода нейтрализуется способами, описанными в [7]. Выбором треугольной фор-

мы управляющих сигналов в канале отслеживания и в основном канале исключаются временные потери на неинформативный переход (обратный ход траектории сканирования) привода к начальному состоянию. Для обратного нерабочего хода пилообразного сканирования необходимо формировать относительно большие величины тока перезаряда емкостей пьезоэлементов – основы привода. Он составляет до 10 % от длительности прямого хода сканирования. В принципе, частота следящего сканирования канала отслеживания может быть выбрана соизмеримой с одной из частот механического резонанса амплитудно-частотной характеристики привода для повышения максимальной скорости слежения за положением ИП. В любом случае, выбор треугольной формы управляющего приводом сигнала с равными по длительности рабочими прямым и обратным ходами значительно повышает (по сравнению с обычной пилообразной формой) примерно на порядок, равный отношению длительности прямого и обратного ходов) быстродействие процесса слежения за счет увеличения максимально возможной скорости следящего сканирования и частоты следования видеосигнала от отслеживаемой ИП. При этом появляется возможность осуществления в течение длительности одной ступеньки управляющего потенциала, формируемого основным каналом, многократного следящего сканирования ИП со значительным усреднением сигнала рассогласования до установившихся состояний ступеньки сигнала управления и сигнала ошибки слежения. Независимо от этого, изменение временного положения полосы осуществляется на линейном участке полного диапазона (2π рад) следящего сканирования, равного расстоянию разноса полос – супермалой величины по сравнению с полным размером картины интерференции. Размер и скорость следящего сканирования могут быть оптимизированы на основе теории статистических решений, например, по критерию минимума средней квадратической погрешности, максимизирующей точность системы слежения и зависящей от энергетических, например, отношения сигнал/шум, и неэнергетических параметров.

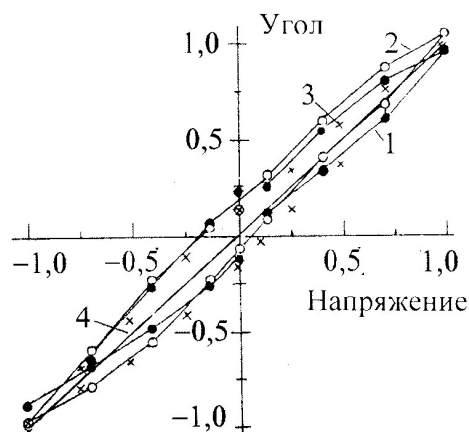


Рис. 2. Позиционная характеристика смещения ИП пьезоприводом (в отн.ед.)

Эффективность применения системы слежения за малоконтрастной ИП с временным дискриминатором видеосигнала была проверена на практике в целях измерения и изучения возможностей линеаризации в реальном времени функции преобразования "управляющий сигнал – перемещение" триангуляционного пьезопривода [8] трехмерного управления перемещением зеркала, как базисного элемента составной сегментированной системы управления формой поверхности. Некоторые экспериментальные данные приведены на рис. 2 в виде угловых позиционных характеристик независимого перемещения зеркала относительно осей X (кривая 1) и Y (кривая 2) декартовой системы координат. Там же, для сопоставления аутентичности поведения, независимо от масштабного фактора пьезоэлементов, типа управляемой моды искажений и конструктивных особенностей корректора волнового фронта, приведена (кривая 3) позиционная характеристика пьезокерамического дискового одноканального адаптивного зеркала, полученная экспериментально автором работы [14]. Характеристики практически идентичны друг другу в координатах относитель-

ного нормированного по деформациям представления; хотя назначение первого привода [8] управление клапаном фронта (линейная мода), а второго [14] – управление интегрированным прогибом фронта (квадратичная мода) и фокусировкой лазерного пучка. Некоторое смещение характеристики (кривая 3) по вертикали наблюдается в пределах точности нормирования на принятое для нормировки максимальное значение деформации из первого квадранта координат. Кроме того, система слежения за ИП с временным дискриминатором формирования дифференциального сигнала ошибки внутри системы позволяет получить функцию преобразования триангуляционного пьезопривода в виде линейной функции (рис. 2, кривая 4) с весьма малым отклонением от линейного закона ($\ll 1\%$). Необходимость получения линейной в реальном времени передаточной характеристики пьезопривода, хотя и за счет усложнения системы, является важным фактором повышения точности управления объектами. Исследование способов практической линеаризации пьезопривода нелинейного элемента, представляет самостоятельный интерес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптация в информационных оптических системах / И.Н. Матвеев, А.Н. Сафронов, И.Н. Троицкий, Н.Д. Устинов; Под ред. Н.Д. Устинова. – М.: Радио и связь, 1984. – 344 с.
2. Bruining J.H., Herriott D.R., Gallagher J.E. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses // *Applied Optics*. – 1974. – V. 13. – № 11. – P. 2693–2696.
3. Ichioka Y., Inuiya M. Direct phase detecting system // *Applied Optics*. – 1972. – V. 11. – № 7. – P. 1507–1510.
4. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
5. Tang S., Hung Y.Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes // *Applied Optics*. – 1990. – V. 29. – № 20. – P. 3012–3014.
6. Слободян С.М., Яковлев А.Р. Биморфный привод системы управления // *Приборы и системы управления*. – 1988. – № 5. – С. 51.
7. Слободян С.М. Оптимизация биморфного привода оптических измерительных систем с обратной связью // *Измерительная техника*. – 2003. – № 1. – С. 19–23.
8. Слободян С.М. Многомернокоординатный привод микроуправления // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
9. Слободян С.М. Следящий оптический фазометр // *Известия Томского политехнического университета*. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 102–106.
10. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
11. Митяшев Б.Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех. – М.: Советское радио, 1962. – 199 с.
12. А.с. 466825 СССР. МКИ H04N 3/16. Устройство телевизионной развертки / С.М. Слободян // *Открытия. Изобретения*. – 1973. – № 27.
13. А.с. 387535 СССР. МКИ H04N 3/16. Генератор поисковой развертки телевизионной системы слежения / Н.И. Мищенко // *Открытия. Изобретения*. – 1972. – № 21.
14. Сафронов А.Г. Одноканальные адаптивные зеркала для лазерной оптики // *Квантовая электроника*. – 1995. – Т. 22. – № 11. – С. 1113–1117.