



(51) МПК
G03H 1/04 (2006.01)
G02B 5/32 (2006.01)
G02B 27/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G03H 2001/045 (2020.01); *G02B 5/32* (2020.01); *G02B 27/00* (2020.01)

(21)(22) Заявка: 2019141151, 12.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.12.2019

Дата регистрации:
11.03.2020

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.12.2019

(45) Опубликовано: 11.03.2020 Бюл. № 8

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
 МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦИС, для Ковалёва
 М.С.

(72) Автор(ы):

Ковалев Михаил Сергеевич (RU),
 Красин Георгий Константинович (RU),
 Одинокоев Сергей Борисович (RU),
 Сцепуро Никита Геннадьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования "Московский государственный
 технический университет имени Н.Э.
 Баумана (национальный исследовательский
 университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 184828 U1, 12.11.2018. RU 2155982
 C2, 10.09.2000. US 2011267663 A1, 03.11.2011. JP
 2005250038 A, 15.09.2005.

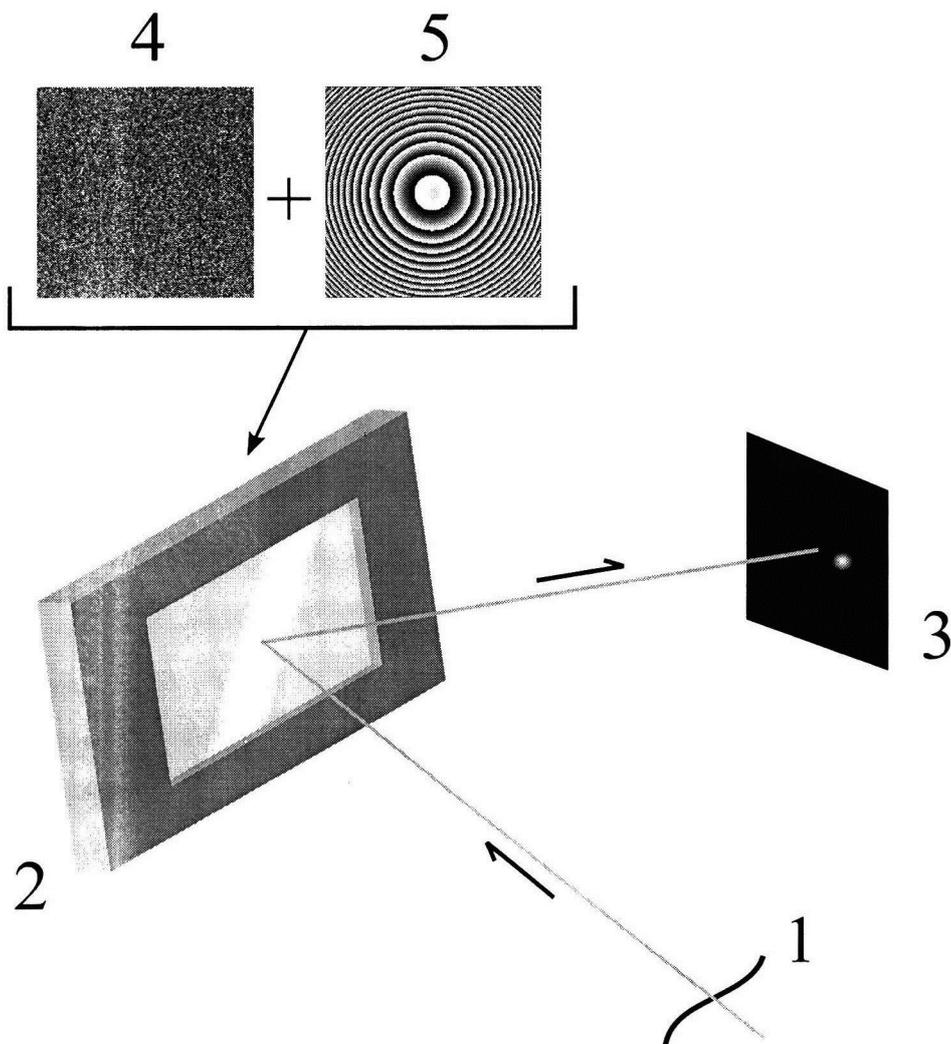
(54) ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ

(57) Реферат:

Предлагаемое устройство относится к оптической технике и может быть использовано для автоматического определения и измерения формы и искажений оптических полей с произвольными абберационными волновыми фронтами принимаемого оптического излучения видимого диапазона, например, в устройствах контроля качества оптических систем. Оптическая схема голографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором содержит пространственный модулятор света (ПМС) отражательного типа, управляемый компьютером с выводом на модулятор заранее рассчитанных необходимых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» абберациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего выделения указанных аббераций, дифрагирующих

ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аббераций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого абберационного волнового фронта. Далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования аббераций в фокальной плоскости цифровой линзы Френеля помещен матричный фотодетектор. При этом на ПМС дополнительно выведены мультиплексированные с КСГ цифровые линзы Френеля, выполняющие преобразование Фурье от падающего волнового фронта, и позволяющие заменить собой физический (реальный) ФО. Технический результат: повышение комплексной эффективности устройства голографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором, а именно: повышение точности работы, удобства эксплуатации и

упрощение конструкции устройства. 4 ил.



Фиг.2

RU 196631 U1

RU 196631 U1

Область техники.

Предлагаемое устройство относится к оптической технике и может быть использовано для автоматического определения и измерения формы и искажений оптических полей с произвольными абберационными волновыми фронтами принимаемого оптического излучения видимого диапазона, например, в устройствах контроля качества оптических систем.

Уровень техники.

В качестве прототипа нового технического решения предлагается авторская полезная модель **ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА (ДВФ) С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ** (патент RU 184828, Опубликовано: 12.11.2018 Бюл. №32), содержащая модулятор заранее рассчитанных компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» абберациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего выделения указанных аббераций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аббераций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого абберационного волнового фронта. Модулятор является пространственным модулятором отражения света фазового типа, управляемым компьютером с выводом на модулятор требуемых, заранее рассчитанных для разного типа аббераций КСГ, далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования аббераций установлен физический Фурье объектив (ФО), после которого в задней фокальной плоскости помещен указанный матричный фотодетектор.

Наличие физического ФО приводит к тому, что собственные абберации реального (принципиально неидеально изготовленного) объектива складываются с измеряемыми абберациями и в результате не всегда можно вычленивать из этой суммы измеряемые абберации. При наличии физического объектива также нужна дополнительная сборка-юстировка, и внешние вибрации в процессе эксплуатации устройства также через физический объектив влияют на результат измерения аббераций.

Раскрытие полезной модели.

Технический результат полезной модели - повышение комплексной эффективности устройства голографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором, а именно: повышение точности работы, удобства эксплуатации и упрощение конструкции устройства.

Для достижения технического результата разработана оптическая схема двухкомпонентного (две компоненты: пространственный модулятор света и приемник излучения, без третьей компоненты физического ФО, как это было в прототипе) датчика голографического волнового фронта на основе пространственного модулятора света для отображения сгенерированных компьютером голограмм в обратной связи с цифровой обработкой и оптимизацией. Вместо физического ФО предлагается выводить на пространственный модулятор света мультиплексированную с КСГ цифровую линзу Френеля. Такой подход позволяет избавиться от физического ФО. С цифровой линзой Френеля, выведенной на модулятор, не нужна дополнительная сборка-юстировка объектива в оптической схеме. Вибрации в процессе эксплуатации также меньше влияют на конечный результат измерения аббераций, так как отсутствует физический объектив.

Таким образом, оптическая схема голографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором содержит пространственный модулятор света (ПМС) отражательного типа, управляемый компьютером с выводом на модулятор заранее рассчитанных необходимых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ),

«закодированных» aberrациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего выделения указанных aberrаций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих aberrаций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого aberrационного волнового фронта. Далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования aberrаций в фокальной плоскости цифровой линзы Френеля помещен матричный фотодетектор. При этом на ПМС дополнительно выведены мультиплексированные с КСГ цифровые линзы Френеля, выполняющие преобразование Фурье от падающего волнового фронта, и позволяющие заменить собой физический (реальный) ФО.

Все устройство оптической схемы преимущественно установлено в едином общем светозащищающем корпусе.

Перечень фигур:

На фиг. 1 представлена предлагаемая оптическая схема.

На фиг. 2 показан принцип работы схемы на основе КСГ с линзой Френеля.

На фиг. 3 и фиг. 4 представлены полученные в ходе имитационного компьютерного моделирования корреляционные пики при детектировании aberrаций вертикального астигматизма и пары вертикального и наклонного астигматизмов, соответственно.

Осуществление полезной модели.

На фиг. 1 номерами позиций обозначены следующие элементы оптической схемы: 1 - анализируемый волновой фронт; 2 - ПМС фазового типа с фазовыми КСГ, «закодированными» aberrациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, мультиплексированными с цифровыми линзами Френеля; 3 - матричный фото приемник, на котором регистрируются порядки дифракции (+1, -1, +2, -2 и т.д.), соответствующие aberrациям волнового фронта 1.

На фиг. 2 дополнительными номерами позиций обозначены: 4 - фазовая КСГ; 5 - цифровая линза Френеля.

На фиг. 3 дополнительными номерами позиций обозначены: 6 - кривая зависимости интенсивности корреляционного пика, по которому определяются aberrации в волновом фронте в зависимости от несовпадения значений aberrаций, закодированных в КСГ и в падающем волновом фронте (прототип с ФО); 7 - кривая зависимости интенсивности корреляционного пика, по которому определяются aberrации в волновом фронте в зависимости от несовпадения значений aberrаций, закодированных в КСГ и в падающем волновом фронте (предлагаемая схема с цифровой линзой Френеля). Позиции 8, 9, 10 обозначают графики зависимостей интенсивности порядка дифракции от различных фокусных расстояний линз Френеля и ФО, а именно 250 мм, 500 мм, 1000 мм соответственно.

На фиг. 4 дополнительными номерами позиций обозначены: 11, 12, 13 - двумерные изображения зависимости интенсивности корреляционного пика, по которому определяется пара aberrаций в волновом фронте в зависимости от несовпадения значений aberrаций, закодированных в КСГ и в падающем волновом фронте, для случаев фокусного расстояния 250, 500 и 1000 мм соответственно (прототип с ФО); 14, 15, 16 - двумерные изображения зависимости интенсивности корреляционного пика, по которому определяется пара aberrаций в волновом фронте в зависимости от несовпадения значений aberrаций, закодированных в КСГ и в падающем волновом фронте, для случаев фокусного расстояния 250, 500 и 1000 мм, соответственно (предлагаемая схема с цифровой линзой Френеля).

Аберрационный волновой фронт попадает на пространственный модулятор света (ПМС) фазового типа 2, куда выводятся с встроенного в схему или внешнего компьютера (на схеме не показан) мультиплексированные с цифровыми линзами Френеля заранее рассчитанные КСГ, как результат интерференции предметной волны, которой является сходящаяся в точку сферическая волна, и опорной волны, которая представляет собой волну, содержащую в себе заданный полином Цернике. Цифровая линза Френеля выполняет преобразование Фурье. На матричном фотоприемнике можно увидеть дифракционную картину с разными порядками дифракции. Плоская волна без аберраций имеет узкую фокусирующую точку с поперечным сечением, обусловленную дифракцией на апертуре пространственного модулятора света. Дифракционные порядки, вызванные дифракцией на структуре модулятора, выходят за пределы поля изображения. Добавление аберрации приводит к размытию точки фокусировки.

Определение аберраций предназначено для выполнения в соответствии с широко известным принципом «грубо-точной» шкалы, в котором предварительный быстрый анализ определяет тип аберрации, а затем их размер анализируется с точным регулированием. В первую очередь было необходимо определить порядок аберрации, поэтому использовали КСГ с большим увеличением значения аберрации (большой погрешностью определения фазовых искажений, которая составляет 1λ (где λ - длина волны лазерного излучения), для этого использовались КСГ с низким разрешением 256×256 . Их размер составлял 9.2 мм, при использовании ПМС (LC 2012, 36 мкм) и 2 мм при использовании ПМС (PLUTO-2, 8 мкм), диапазон измерения от 0 до 10λ , а само измерение занимало 0,16 с. После предварительного определения данной аберрации в системе на ПМС из памяти персонального компьютера начинали поступать КСГ размером 512×512 . Их размеры составляли 18.4 мм и 4 мм соответственно. Этот этап также занимал 0,16 с. Погрешность определения в данном случае составляла 0,1 λ . Далее шло определение аберраций с необходимой погрешностью, для этого выводились КСГ 768×768 , имевшие размеры 27,6 мм и 6,1 мм соответственно. Этот этап также занимал 0,16 с. Таким образом, сканирование анализируемого оптического излучения занимало максимум 0.48 с, но стоит отметить, что таким время будет только в том случае, если не удастся зарегистрировать точку дифракционного качества на фотоприемнике (случай отсутствия именно этой аберрации в оптическом излучении). В случае детектирования точки дифракционного качества в начале или в середине любого из этапов можно автоматически переходить к следующему этапу, тем самым сокращая время общего измерения.

Далее приведено обоснование предлагаемого технического решения и экспериментальные примеры. Задача измерения кривизны волнового фронта оптических полей с высокой точностью сводится к нахождению максимума n-мерной корреляционной функции в зависимости от закодированного в КСГ значения амплитуды одной или нескольких волновых аберраций. Был проведен ряд экспериментов, экспериментально доказывающих работоспособность предлагаемого метода для получения корреляционных функций, используя цифровые линзы Френеля с разными фокусными расстояниями.

Рассмотрим процедуру задания цифровой линзы Френеля с фокусом f . Фазовая функция линзы записывается в виде $\phi_{\lambda} = -k \cdot \frac{x^2 + y^2}{2f}$, где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число. Чтобы получить цифровую линзу Френеля надо привести функцию к интервалу $[0, 2\pi]$, получим $L = \exp(j\varphi_N)$ где $\varphi_N = \text{rem}(\varphi_{\lambda}, 2\pi)$ - фазовая функция линзы, приведенная к интервалу $[0, 2\pi]$, Для получения голограммы с цифровой зонной пластинкой Френеля необходимо

умножить комплексную функцию опорного пучка R на фазовую функцию линзы L : $R_{\text{lens}}=R \cdot L$, где R_{lens} - результат мультиплексирования двух волн. Далее для получения КСГ с линзой Френеля CGH_{lens} необходимо воспользоваться следующим соотношением:
 $CGH_{\text{lens}}=\text{angle}(O+R_{\text{lens}})$ где angle - функция, выделяющая фазовый аргумент выражения,
 O - объектная волна.

На фиг. 2 показан принцип работы схемы на основе КСГ с линзой Френеля. Искривленный лазерный пучок падает на фазовый ПМС, куда выводятся КСГ с цифровыми линзами Френеля. В плоскости регистрации приемника излучения образуется корреляционный пик, размер и интенсивность которого зависит от наличия и величины aberrаций в падающем на ПМС пучке. Корреляционный пик имеет минимальный размер, когда совпадают величины aberrаций, закодированных в КСГ и в лазерном пучке, падающем на ПМС. На фиг. 2 также показано, что корреляционный пик будет образовываться в плоскости, которая определяется фокусным расстоянием цифровой линзы Френеля, с которой мультиплексируется КСГ. Также при увеличении фокусного расстояния цифровой линзы Френеля точка, в которой будет расположен корреляционный пик, будет отдаляться от оптической оси. Это связано с уменьшением оптической силы линзы.

Для облегчения сравнительного анализа работы предлагаемой оптической схемы с цифровой линзой Френеля и прототипа с ФО представлены изображения на фиг. 3, 4.

Сначала была продемонстрирована корреляционная функция aberrации вертикальный астигматизм с помощью классических ФО с фокусным расстоянием 250, 500 и 1000 мм (фиг. 3 кривые 6) Далее в тех же плоскостях регистрировалась уже корреляционная функция для двойной aberrаций - пары вертикального и наклонного астигматизмов (фиг. 4 изображения 11, 12, 13).

Наконец, вторая группа экспериментов демонстрирует применимость предложенного мультиплексирования КСГ с цифровой линзой Френеля 5 для измерения кривизны волнового фронта. ФО был заменен на цифровые линзы Френеля 5 с идентичными фокусными расстояниями и были повторены эксперименты (фиг. 3 кривые 7, фиг. 4 изображения 14, 15, 16).

В результате проведения таких экспериментов можно сравнить качество получаемых корреляционных функций в обеих оптических схемах (предлагаемой схемы и прототипа). Полученные корреляционные пики при детектировании aberrаций вертикального астигматизма и пары вертикального и наклонного астигматизмов представлены на фиг. 3 и фиг. 4 соответственно. Наглядно видно, что у предлагаемого варианта оптической схемы форма корреляционной функции, ее скорость роста и расположение ее максимума идентична корреляционной функции в прототипе с ФО (в абсолютном значении при наличии цифровой линзы Френеля и отсутствии в схеме ФО погрешность измерений составляет не более $0,05\lambda$). Только в плоскости фокусировки, расположенной на расстояние в 250 мм, можно увидеть отличие в скорости роста функций. Увеличение скорости возрастания функции положительно сказывается на точности детектирования волновой aberrации в силу упрощения нахождения точки перегиба функции.

Разработка полезной модели проводилась в рамках проектной части государственного задания для МГТУ им. Н.Э. Баумана от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №3.2236.2017.

(57) Формула полезной модели

Оптическая схема голографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором, содержащая пространственный модулятор света (ПМС)

отражательного типа, управляемый компьютером с выводом на модулятор заранее рассчитанных необходимых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» абберациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего

5 выделения указанных аббераций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аббераций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого абберационного волнового фронта, далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования аббераций в фокальной плоскости помещен матричный фотодетектор,

10 отличающаяся тем, что на ПМС дополнительно выведены мультиплексированные с КСГ цифровые линзы Френеля, выполняющие преобразование Фурье от падающего волнового фронта, и позволяющие заменить собой физический Фурье объектив.

15

20

25

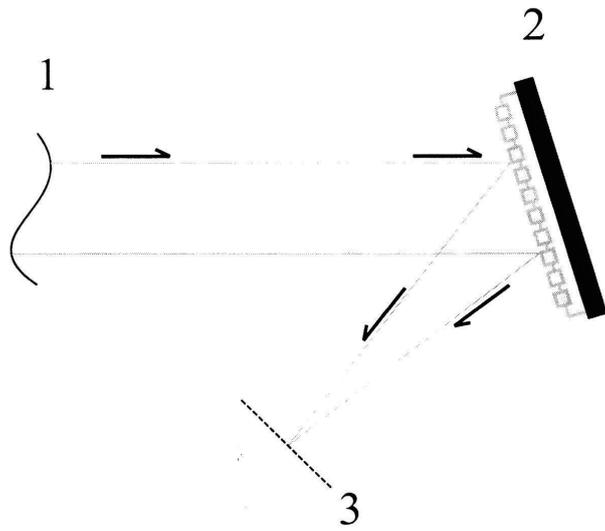
30

35

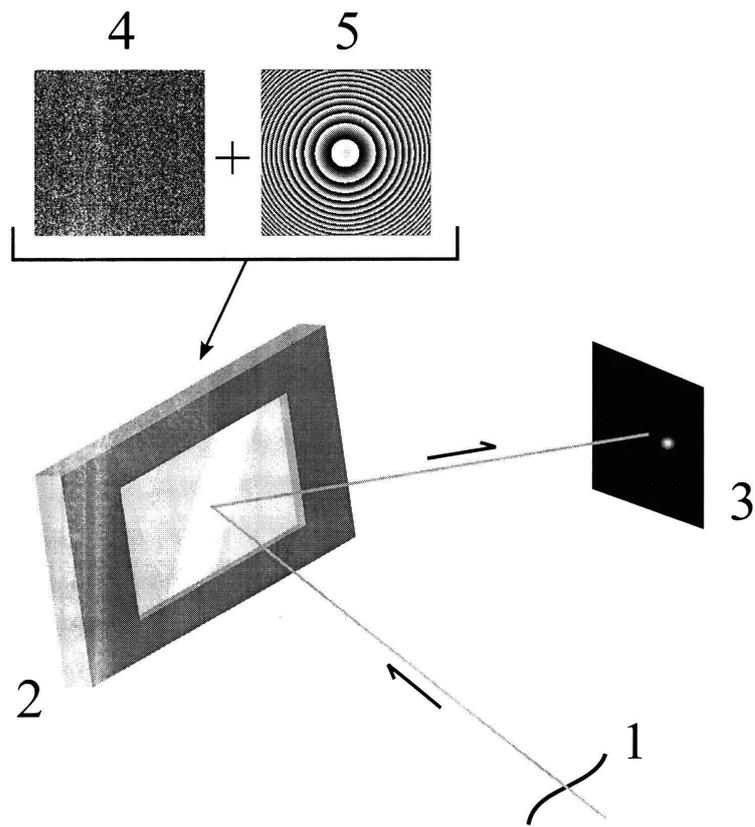
40

45

1

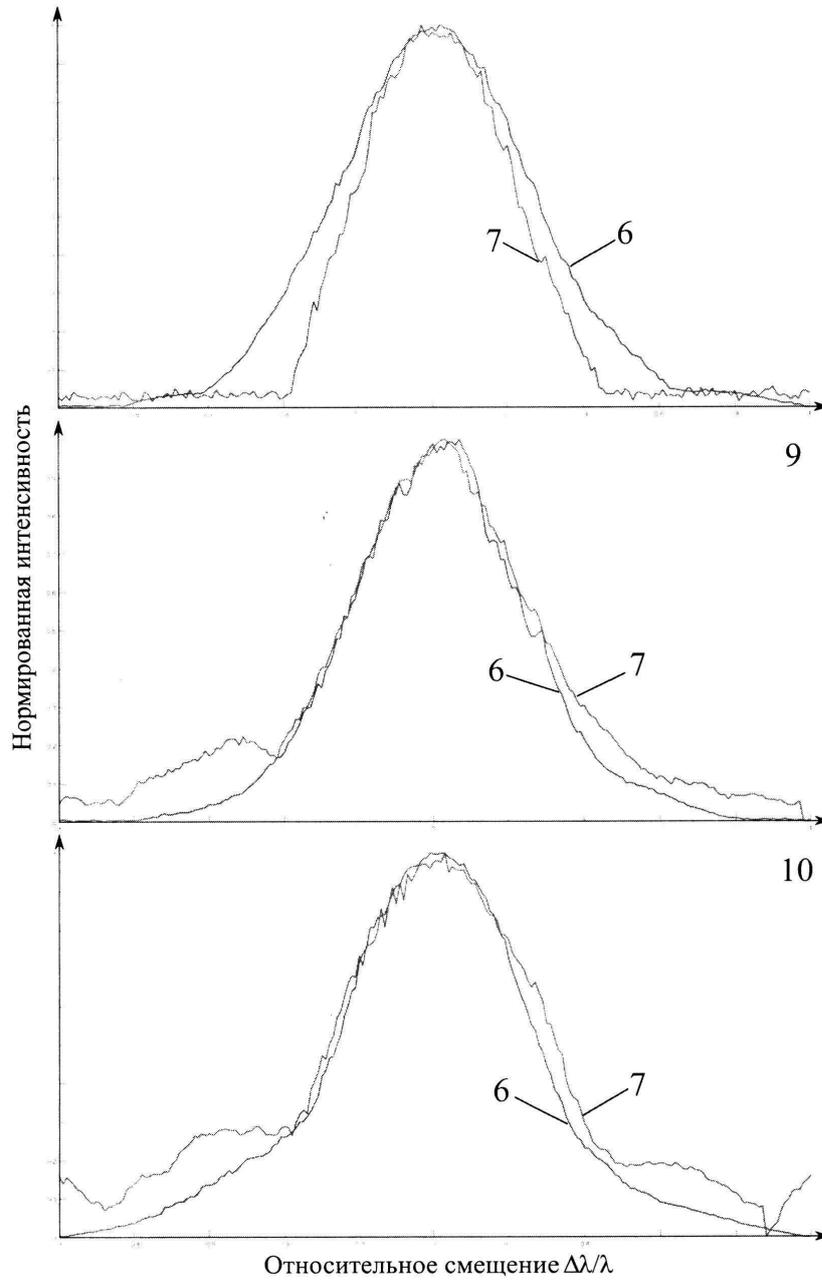


Фиг.1

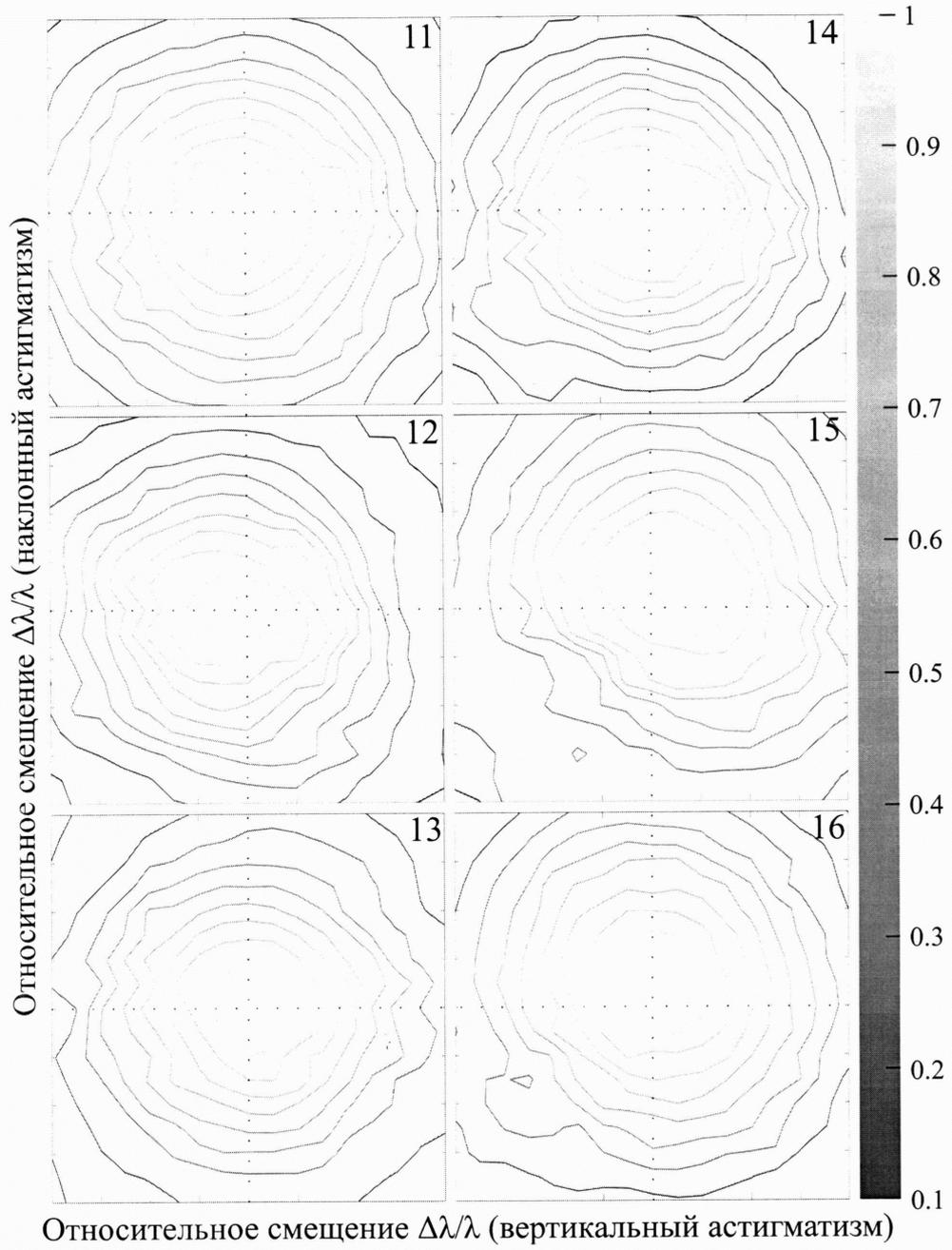


Фиг.2

2



Фиг.3



Фиг.4