

ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ПОЛЯ БИФОКАЛЬНОЙ ЛИНЗЫ ПРИ ВНЕОСЕВОМ ПРОХОЖДЕНИИ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

© 2004 г. Ю. В. Осипов, доктор физ.-мат. наук
СПбГЭТУ "ЛЭТИ", Санкт-Петербург

Предложено устройство, действующее на основе поляризационного интерферометра, позволяющее формировать в лазерном излучении двумерные интерферограммы и интерференционные сигналы, удовлетворяющие закону квадратичной частотной модуляции (КЧМ). Проведено исследование КЧМ-сигналов с плавно изменяющимися информативными параметрами, и показана возможность их использования для контроля малых линейных и угловых перемещений.

Коды OCIS: 260.0260, 260.3160.

Поступила в редакцию 08.10.2003.

В оптико-электронных системах обработки информации, включающих поляризованное излучение [1], перспективно использование сложных интерференционных сигналов для разработки высокоточных координатно-чувствительных устройств. Информационным сигналом при этом может служить двумерная интерферограмма, по изменчивости вида которой можно судить о линейных и угловых перемещениях объекта или позиционировании лазерного луча в пространстве. Компьютерная обработка двумерных интерферограмм [2] представляется существенной операцией в разрабатываемом устройстве.

В настоящей работе исследовано лазерное интерференционно-поляризационное устройство, формирующее двумерные интерферограммы, которым соответствуют оптические (интерференционные) сигналы, пространственные частоты которых удовлетворяют закону квадратичной частотной модуляции (КЧМ-сигналы).

Формирование КЧМ-сигналов (рис. 1а) осуществляется при внеосевом прохождении конусообразного лазерного пучка через бифокальную линзу (БЛ) из исландского шпата [3, 4]. Регистрация интерференционного сигнала осуществляется путем пространственно-временного преобразования оптического сигнала в электрический сигнал на основе телевизионного датчика типа диссектор. В варианте I (рис. 1б) БЛ перемещается на оптическом столе перпендикулярно оси z из центрально-симметричного положения, соответствующего точке O , в боковое (внеосевое) положение, соответствующее точке A на оси x . При этом лазерный пучок фокусируется объективом Об в окрестность точки A , и при плавном перемещении БЛ вдоль оси z сфокусированный лазерный пучок оказывается либо левее ($-Z$, точка D), либо правее ($+Z$, точка E) точки A . При этом условие интерференции поляризованных лучей, выходящих из БЛ, меняется и соответственно меняется вид интерференционной картины (см. таблицу, ряды 1, 2, 3).

В горизонтальных рядах 1–6 таблицы представлены (слева направо): двумерная интерферограмма, интерференционный сигнал $I(x)$ в центральном сечении (ЦС) при $y = 0$ и нецентральной сечении (НЦС) при $y = b$ интерферограммы, фаза $\varphi(x)$, пространственная частота $\Omega(x)$ КЧМ-сигнала.

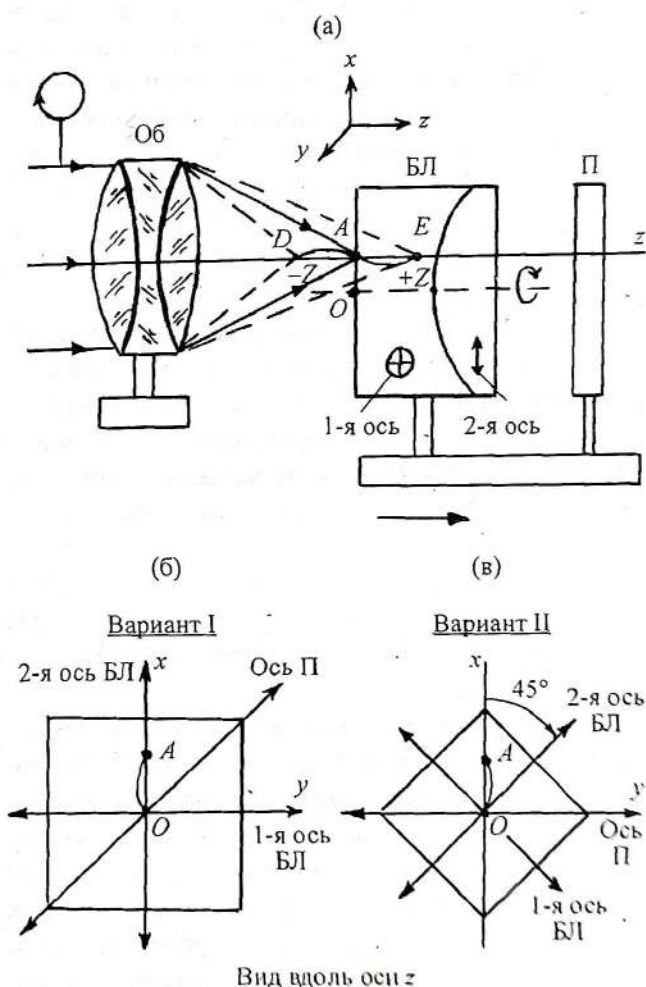


Рис. 1. а – блок-схема интерференционной системы лазерного устройства (БЛ – бифокальная линза, Об – объектив, П – поляризатор). Вариант I (б) и вариант II (в) взаимного расположения БЛ и П в интерференционной системе.

(а)



(б)



Рис. 2. Преобразование интерферограмм при малом угле поворота бифокальной линзы вокруг оси y . Исходные интерферограммы соответствуют горизонтальным рядам 1 и 5 (см. таблицу) для рис. 2а и рис. 2б соответственно. Интерферограммы синтезированы на ЭВМ.

В варианте II (рис. 1в) БЛ вместе с поляризатором П поворачивается на угол 45° вокруг оси z и перемещается вдоль оси x . При этом точка A оказывается на другом участке БЛ, где оптическая разность хода между обыкновенным (o) и необыкновенным (e) лучами изменяется (в сравнении с вариантом I), что приводит в конечном итоге к преобразованию интерферограммы и, следовательно, КЧМ-сигнала. При перемещении БЛ вдоль оси z интерферограмма также преобразуется (см. таблицу, ряды 4, 5, 6).

Структура двумерных интерферограмм и их трансформации получены методами алгебраической геометрии путем перемножения линий нулевого порядка (прямой и окружности) и варьирования их взаимного расположения. Распределение интенсивности вдоль оси x в двумерных интерферограммах имеет вид:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} I_0 \times \left(1 + \cos 2\pi a \left\{ \left[(x-b)^2 + y^2 - R^2 \right] x + ky \right\} \right), \quad (1)$$

где I_0 – интенсивность в максимумах интерференционной картины; a, b, R, k – параметры геометрической структуры интерферограммы, причем a характеризует густоту (или число n) линий между фокусами F_1 и F_2 интерферограммы, b – нецентральное сечение ($y \neq 0$) интерферограммы, R – радиус окружности ненаблюдаемой интерференционной линии нулевого порядка, k – характеризует изгиб интерференционных линий в виде “крюков” между фокусами F_1 и F_2 , возникающих при повороте БЛ вокруг оси y согласно (1) (рис. 2а).

В таблице представлены результаты расчетов контуров линий интерферограммы, зависимости

сигнала $I(x)$, фазы $\phi(x)$, частоты $\Omega(x)$ и соответствующие графики для ряда частных случаев при $k = 0$ для центрального сечения ($y = 0$) и нецентрального сечения ($y = b$) интерферограммы, а также с учетом параметра d , характеризующего величину отклонения от диаметрального сечения окружности и прямой (см. таблицу, ряды 4, 5, 6).

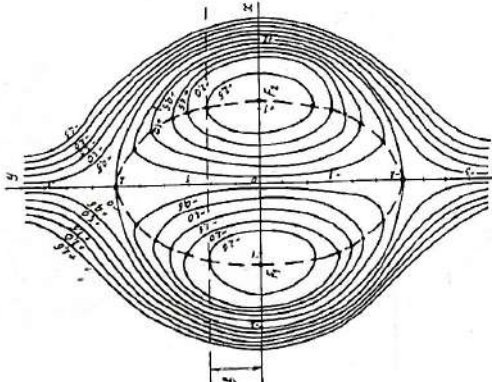
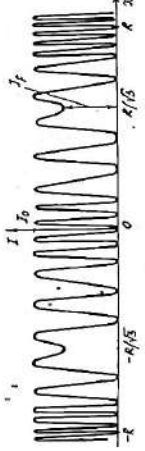
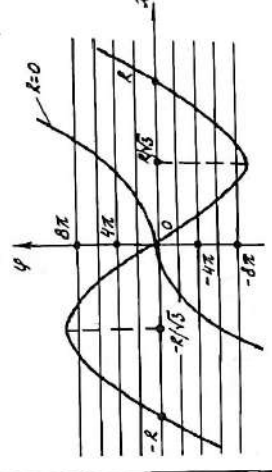
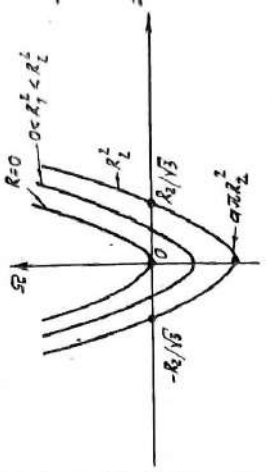
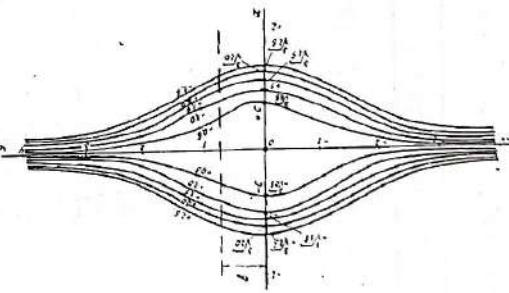
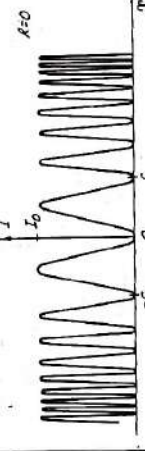
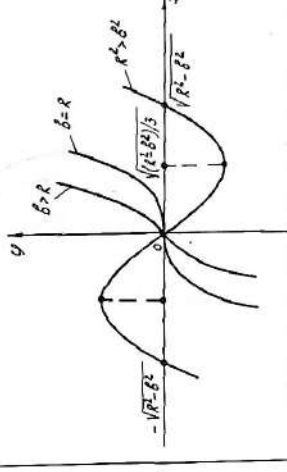
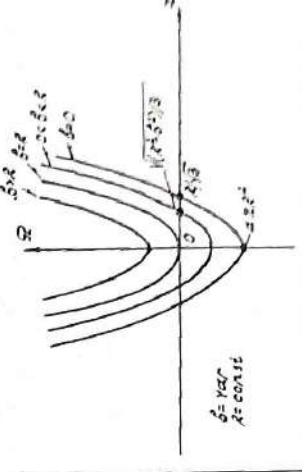
Как видно из таблицы, интерферограммы КЧМ-сигналов обладают двумя осями симметрии x и y (см. таблицу, ряды 1, 2, 3) или одной осью симметрии x (см. таблицу, ряды 4, 5, 6), а пространственные частоты $\Omega(x)$ для сигналов в ЦС и НЦС удовлетворяют КЧМ-закону. Интерференционные КЧМ-сигналы ранее детально не исследовались, поэтому изучение их свойств представляет самостоятельный интерес.

Для асимметричных относительно оси y двумерных интерферограмм (см. таблицу, ряды 4, 5, 6) параметр a в общем случае зависит сложным образом от полного числа $n = n_1 + n_2$ замкнутых интерференционных линий внутри левой (n_1) и правой (n_2) частей двумерной интерферограммы, сдвига d и радиуса R , определяемых исходя из геометрических измерений интерферограммы:

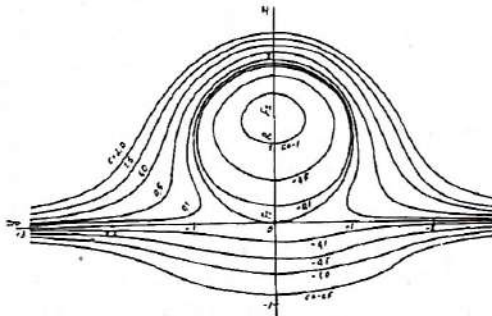
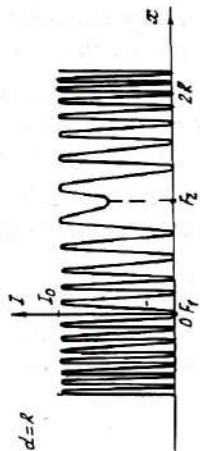
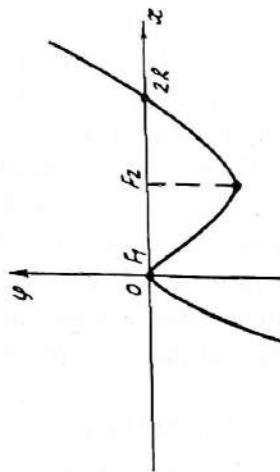
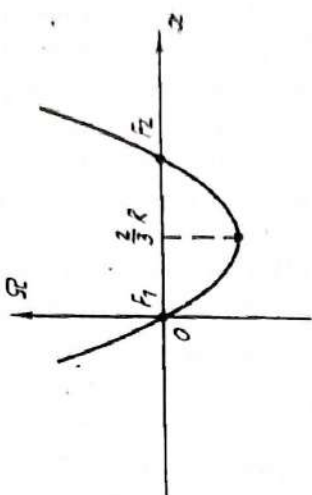
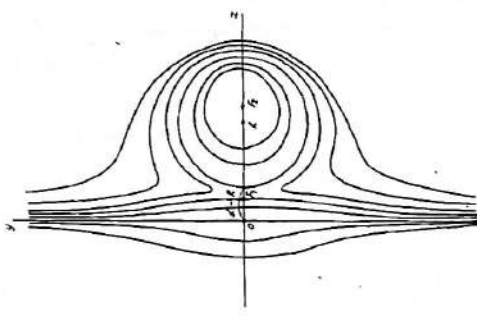
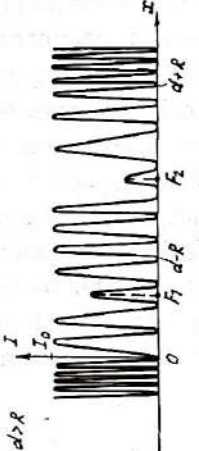
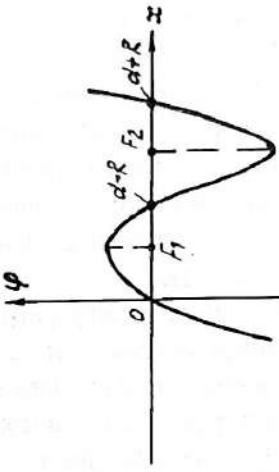
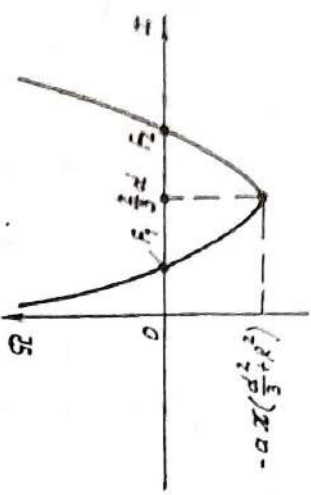
$$a = \frac{2\pi n + \arccos\left(1 - \frac{2I_{F_1}}{I_0}\right) + \arccos\left(1 - \frac{2I_{F_2}}{I_0}\right)}{\frac{4}{27} \pi (d^2 + 3R^2)^{3/2}}, \quad (2)$$

где I_{F_1} и I_{F_2} – интенсивности сигналов в “неполных” максимумах (или минимумах) интерферограммы в точках с координатами

$$x_{1,2} = \frac{2}{3} d \pm \frac{1}{3} \sqrt{d^2 + 3R^2}. \quad (3)$$

Интерферограмма	Сигнал	Фаза $\varphi(x)$	Частота $\Omega(x)$
$ax(x^2 + y^2 - R^2) = \pm 1, \pm 2, \dots (R^2 > 0)$ 	$I = \frac{1}{2} I_0 \left\{ 1 - \cos \left[\pi a x (x^2 + y^2 - R^2) \right] \right\}$ 	$\pi a x (x^2 - R^2), \quad \Pi C(y=0)$ 	$\pi a (3x^2 - R^2), \quad a = f(R, n, I_F)$ 
$ax(x^2 + y^2) = \pm 1, \pm 2, \dots (R=0)$ 	$I = \frac{1}{2} I_0 \left\{ 1 - \cos \left[\pi a x (x^2 + b^2 - R^2) \right] \right\}$ $\Pi C(y=b)$ 		$\pi a (3x^2 + b^2 - R^2)$ $a = 2/C^3 \text{ при } x=C$ 

Интерферограмма	Сигнал	Фаза $\varphi(x)$	Частота $\Omega(x)$
$\alpha x(x^2 + y^2 + R^2) = \pm 1, \pm 2, \dots (R^2 < 0)$	$I = \frac{1}{2} I_0 \left\{ 1 - \cos \left[\pi \alpha x (x^2 + y^2 + R^2) \right] \right\}$		$\pi \alpha (3x^2 + y^2 + R^2)$ $a, R^2 = f(C_1, C_2)$
$\alpha x[(x-d)^2 + y^2 - R^2] = \pm 1, \pm 2, \dots (d < R)$	$I = \frac{1}{2} I_0 \left\{ 1 - \cos \left[\pi \alpha x [(x-d)^2 + y^2 - R^2] \right] \right\}$	$\pi \alpha x [(x-d)^2 - R^2], \text{ ЦС (y=0)}$	$\pi \alpha (3x^2 - 4dx + d^2 - R^2)$ $a = f(n_1, d, R, I_{F_1}), \quad a = f(n_2, d, R, I_{F_2})$ $I_{F_1} \neq I_{F_2}$

Интерферограмма	Сигнал	Фаза $\varphi(x)$	Частота $\Omega(x)$
$\arg[(x-R)^2 + y^2 - R^2] = \pm 1, \pm 2, \dots (d=R)$ 	$I = \frac{1}{2} I_0 \left(1 - \cos \left[\pi \arg \left[(x-R)^2 - R^2 \right] \right] \right)$ $\text{ЦС}(y=0)$ 		$\pi \arg(3x - 4R), \quad a = f(n_2, R, I_{F_2})$ $F_2 = \frac{4}{3} R, \quad I_{F_2} \neq 0$ 
	$I = \frac{1}{2} I_0 \left(1 - \cos \left[\pi \arg \left[(x-d)^2 - R^2 \right] \right] \right)$ $\text{ЦС}(y=0)$ 		$\pi \arg(3x^2 - 4dx + d^2 - R^2)$ $a = f(n, I_{F_1}, R^2)$ 

В случае интерферограмм (горизонтальные ряды 2 и 3 в таблице), для которых параметр $R^2 < 0$ и определение $|R^2|$ из окружности невозможно, стандартные параметры КЧМ-сигнала a и $|R^2|$ следует находить из экспериментальных параметров интерферограммы, то есть определяя координаты точек C_1 и C_n пересечения интерференционных линий 1-го и n -го порядков с осью x :

$$|R^2| = \frac{C_n^3 - nC_1^3}{nC_1 - C_n}, \quad a = n \left(C_1^3 + \frac{C_n^3 - nC_1^3}{n - \frac{C_n}{C_1}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

В (4) под C_1 и C_n подразумеваются координаты соответствующих точек.

Экспериментальные данные интерференционных сигналов от двумерных интерферограмм регистрировались с помощью телевизионного датчика типа диссектор и осциллографической записи сигнала. Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы.

Трансформация интерферограмм, происходящая с уменьшением параметра R^2 (см. таблицу, ряды 1, 2, 3), показывает, что в случае выбора рабочей точки на ЦС интерферограммы можно управлять частотой КЧМ-сигнала по двум параметрам (a, R^2), а для НЦС – по трем параметрам (a, b^2, R^2).

Трансформация интерферограмм, происходящая с увеличением сдвига d между центром окружности и прямой (см. таблицу, ряды 4, 5, 6), показывает, что вследствие несимметричного относительно оси u вида двумерной интерферограммы фазовая и частотная характеристики КЧМ-сигнала смещаются, причем в случае выбора рабочей точки на ЦС интерферограммы можно управлять частотой КЧМ-сигнала по двум (a, R^2) или трем (a, d, R^2) параметрам, а для НЦС – по четырем параметрам (a, b^2, d, R^2).

Изменчивость интерферограммы по каждому параметру соответствует определенной кинематике перемещения БЛ в пространстве x, y, z . При повороте БЛ вокруг оси u возникает изгиб линий на интерферограмме (рис. 2б) и интерференционный сигнал $I(x, y)$ определяется из выражения (1) при $k \neq 0$.

Наличие многопараметрической зависимости КЧМ-сигнала позволяет использовать его в координатно-чувствительных системах с отслеживанием по лазерному пучку. Потенциальная точность для линейных и угловых измерений в устройстве ограничивается возможностью фиксации смещения интерференционных полос анализируемой интерферограммы, что составляет в реальных экспериментах порядка 0,1 полосы.

В работе выполнен компьютерный синтез двумерных интерферограмм, относящихся к классу КЧМ-сигналов. Их анализ показал, что получаемые цифровые изображения полностью соответствуют экспериментально наблюдаемым КЧМ-интерферограммам, что позволяет проводить численные исследования трансформации КЧМ-сигналов для различных варьируемых параметров с целью расширения функциональных возможностей лазерных измерительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батраков А.С., Бутусов М.М., Гречка Г.П. и др. Лазерные измерительные системы / Под ред. Д.П. Лукьянова. М.: Радио и связь, 1981. 456 с.
2. Ушаков А.Н. Автоматическая обработка интерферограммы на ЦВМ / В сб. статей: Цифровая обработка сигналов и ее приложения. М.: Наука, 1981. С. 99–124.
3. Осипов Ю.В., Осипов В.Ю. Интерференционное поле бифокальной линзы из одноосных кристаллов // ОМП. 1991. № 1. С. 26–30.
4. Осипов В.Ю., Осипов Ю.В. Оптический синтез и двумерный фурье-анализ сложных КЧМ-интерференционных полей // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 6. С. 140–150.