

В. В. БУКАТИН, Е. В. ДНЕПРОВСКИЙ, Ю. В. ЛАРЧЕНКО

(Минск)

АНАЛИЗ ОДНОГО КЛАССА ЛИНЕЙНЫХ ОПЕРАТОРОВ записи, считывания, отображения и документирования графической информации является координатно-измерительная система (КИС), в значительной степени определяющая выходные характеристики системы в целом. К координатно-измерительной системе предъявляются исключительно высокие требования, касающиеся пространственной ($10^4 - 0,5 \times 10^6$ бит на диапазон измерений по каждой координате) и временной ($0,5 \cdot 10^7 - 10^3$ бит/с) пропускных способностей, а также нелинейности измерительной шкалы ($10^{-3} - 10^{-4}\%$), стабильности и надежности измерений.

Хорошо зарекомендовавшие себя в качестве датчиков КИС измерители перемещений на основе симметричного дифференциального интерферометра Майкельсона [1], осуществляющие косвенные измерения координат сканирующего светового пятна в плоскости носителя информации, обладают, однако, значительной нелинейностью шкалы [2]. К недостаткам таких датчиков следует отнести также необходимость установок отражательных элементов интерферометра (например, уголковых отражателей) непосредственно на подвижной части электромеханического зеркального дефлектора, что снижает быстродействие системы развертки луча и в принципе исключает применение таких датчиков в дефлекторах немеханического типа.

Этих недостатков лишены двухкоординатные датчики величины и направления перемещения, построенные на основе интерферометра с двумерной дифракционной решеткой [3]. Оптико-электронная часть датчика осуществляет поляризационное декодирование двух пространственно разделенных одномерных интерференционных картин и выделение двух пар квадратурных сигналов, необходимых для определения направления перемещения [4] по каждой из координат.

Метод поляризационной селекции имеет ряд преимуществ. Прежде всего это простота схемы и высокая стабильность фазового сдвига получаемых квадратурных сигналов.

Тем не менее применение таких датчиков в высокоскоростных лазерных сканирующих системах создает определенные трудности. Необходимость идентификации оптических сигналов с высокой степенью надежности определяет повышенные требования к контрасту интерференционной картины, подавлению перекрестных помех и стабильности постоянной составляющей сигнала, которая в описанном в [3] датчике остается величиной неизмеряемой. Повышения контраста можно добиться улучшением поляризационных свойств поляризаторов, применяемых для селекции оптических сигналов, что, в свою очередь, вызывает падение уровня освещенности и уменьшение отношения сигнал/шум. Все это при ограниченной мощности источника приводит к снижению быстродействия оптико-электронной системы (ОЭС). С этой точки зрения метод пространственной селекции обладает более высоким КПД.

В настоящей работе исследуется одно из возможных построений ОЭС распознавания оптического измерительного сигнала в виде двумерной интерференционной картины с пространственной селекцией. Для описания работы ОЭС служат линейные операторы, осуществляющие преобразования оптической информации в электрический сигнал, действие кото-

рых представлено операцией преобразования пространственного спектра входного оптического сигнала.

Разделение спектра оптического сигнала на составляющие. Рассмотрим случай, когда в плоскости анализа ОЭС перемещается двумерная интерференционная картина, имеющая одинаковые по каждой из координатных осей и неизменные в течение времени анализа пространственные периоды $P_x = P_y = P_0$ и мгновенные скорости смещения по осям V_x и V_y .

Количество идентифицируемых параметров равно пяти (две пары квадратурных сигналов и постоянная составляющая), что обуславливает выбор минимального числа фоточувствительных элементов анализаторов ОЭС.

Определим вид операторов, позволяющих осуществить полную идентификацию входного оптического сигнала. Каждый из выходных электрических сигналов $u_i(t)$ может быть представлен как

$$u_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\Omega) \exp(j\Omega t) d\Omega. \quad (1)$$

Здесь $S_i(\Omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) D(\omega, \Omega) H_i^*(\omega) d\omega_x d\omega_y$ — амплитудный спектр

i -го сигнала; t — время; Ω — временная угловая частота; ω — вектор пространственной угловой частоты, имеющий декартовы компоненты ω_x и ω_y по соответствующим осям; $E(\omega)$ — пространственный спектр (ПС) оптического сигнала; $D(\omega, \Omega)$ — пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) закона изменения оптического сигнала относительно анализатора; $H_i^*(\omega)$ — комплексно-сопряженная ПЧХ i -го анализатора.

С учетом независимости движения интерференционной картины вдоль каждой из осей ПЧХ $D(\omega, \Omega)$ может быть представлена в виде двух составляющих $D_x(\omega_x, \Omega)$ и $D_y(\omega_y, \Omega)$, выражения для которых можно записать, используя известное спектральное представление δ -функций:

$$D_x(\omega_x, \Omega) = 2\pi\delta(\omega_x V_x - \Omega),$$

$$D_y(\omega_y, \Omega) = 2\pi\delta(\omega_y V_y - \Omega).$$

При идентичности элементов анализаторов ПЧХ i -го анализатора может быть представлена как

$$H_i^*(\omega) = H_0^*(\omega) Z_i(\omega, x_0, y_0), \quad (2)$$

где $H_0^*(\omega)$ — комплексно-сопряженная ПЧХ элемента анализатора, $Z_i(\omega, x_0, y_0)$ — оператор идентификации i -го параметра входного сигнала.

В качестве искоемых операторов Z_i можно использовать обладающие хорошими разделяющими свойствами комплексные функции вида $\cos(\omega_x, x_0)$, $\cos(\omega_y, y_0)$ и $j \sin(\omega_x, x_0)$, $j \sin(\omega_y, y_0)$ — линейные комбинации спектров дискретизирующих операторов анализа изображения, моделирующих δ -функцию и симметричных относительно сдвигов x_0 и y_0 в пространственной области:

$$Z_1 = \exp(j\omega_x x_0) + \exp(-j\omega_x x_0) = 2 \cos \omega_x x_0,$$

$$Z_2 = \exp(j\omega_x x_0) - \exp(-j\omega_x x_0) = 2j \sin \omega_x x_0,$$

$$Z_3 = \exp(j\omega_y y_0) + \exp(-j\omega_y y_0) = 2 \cos \omega_y y_0,$$

$$Z_4 = \exp(j\omega_y y_0) - \exp(-j\omega_y y_0) = 2j \sin \omega_y y_0. \quad (3)$$

Графически операторы $Z_1 \dots Z_4$ показаны на рис. 1, где их изображение совмещено с нормализованным спектром идентифицируемого оптического сигнала вида

$$e(x, y) = E_0 + E_x \sin(2\pi/P_0)x + E_0 + E_y \sin(2\pi/P_0)y.$$

Рис. 1. Графическое изображение операторов Z_i , совмещенное со спектром входного оптического сигнала.

При условии $|x_0| = |y_0| = P_0/4 + nP_0$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) операторы (3) приобретают вид $Z_i = \pm[j \pm (-j)]$ на частотах входного сигнала $\omega_x = \pm 2\pi/P_0$, $\omega_y = \pm 2\pi/P_0$ и $Z_i = 1 \pm 1$ на частотах $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0$, преобразуя спектр сигнала $E(\omega) = 2E_0 + (1/2) \times jE_x[\delta(\omega_x + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_x - 2\pi/P_0)] + (1/2)jE_y[\delta(\omega_y + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_y - 2\pi/P_0)]$ в ряд спектров E_i , содержащих новые видоизмененные составляющие:

$$\begin{aligned} E_1 &= Z_1 E(\omega) = 4E_0 + jE_y[\delta(\omega_y + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_y - 2\pi/P_0)], \\ E_2 &= Z_2 E(\omega) = E_x[\delta(\omega_x + 2\pi/P_0) + \delta(\omega_x - 2\pi/P_0)], \\ E_3 &= Z_3 E(\omega) = 4E_0 + jE_x[\delta(\omega_x + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_x - 2\pi/P_0)], \\ E_4 &= Z_4 E(\omega) = E_y[\delta(\omega_y + 2\pi/P_0) + \delta(\omega_y - 2\pi/P_0)]. \end{aligned}$$

Выражение

$$D(\omega, \Omega) Z(\omega, x_0, y_0) = D_z(\omega, \Omega) \quad (4)$$

является спектральным представлением закона анализа движущегося изображения. ПЧХ $D(\omega, \Omega)$ однозначно переводит пространственные частоты преобразованных спектров по направлению перемещения в соответствующие временные частоты в масштабах $1/V_x$ и $1/V_y$, реализуя преобразование $E_i(\omega) \rightarrow S_i(\Omega)$ и соответственно $S_i(\Omega) \rightarrow u_i(t)$.

Выбор конфигурации элементов анализаторов. Отметим, что, как следует из анализа выражений (1), (2) и (4), вид ПЧХ $H_0^*(\omega)$ не оказывает влияния на закон анализа изображения, т. е. форма и размеры фоточувствительных площадок (ФП) элементов каждого из анализаторов в этом смысле не существенны. Анализатор может состоять из двух элементов произвольной формы, сдвинутых друг относительно друга (параллельным переносом) на величину $2P_0/4 + nP_0$ вдоль соответствующих осей координат. Форма, размеры и чувствительность площадок выбираются из условий получения требуемых уровней сигнала и максимальных глубин его модуляции $|U_x|/U_0$ и $|U_y|/U_0$.

Для ФП прямоугольной формы, ориентированных вдоль координатных осей (рис. 2), ПЧХ которых имеют вид

$$H_0(\omega) = \eta XY \frac{\sin \omega_x X/2 \sin \omega_y Y/2}{\omega_x X/2 \omega_y Y/2}$$

(η — токовая (вольтовая) чувствительность ФП; X, Y — ее размеры), условия получения максимальной глубины модуляции сигнала при сканировании вдоль оси x и y запишутся как

$$d \left(\frac{\sin \omega_x X/2}{\omega_x X/2} \right) / dX = 0 \Big|_{\omega_x = 2\pi/P_0} \text{ или } d \left(\frac{\sin \omega_y Y/2}{\omega_y Y/2} \right) / dY = 0 \Big|_{\omega_y = 2\pi/P_0},$$

откуда $X = P_0/4$ и $Y = P_0/4$. Это соответствует размеру площадки анализатора вдоль идентифицируемой им координаты. Размер ФП в поперечном направлении может быть произвольным.

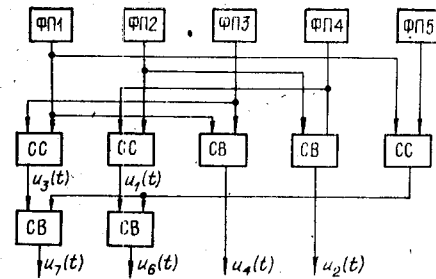
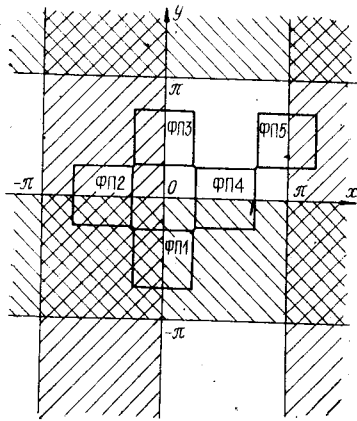


Рис. 3. Электрическая схема ОЭС.

Рис. 2. Суперпозиция фоточувствительных площадок (ФП) анализаторов и двумерной интерференционной картины.

Дискриминация постоянной составляющей. При отсутствии паразитных засветок в плоскости анализа обычно имеет место равенство модулей амплитуд $|E_x| = |E_y| = E_0$. Однако колебания постоянной составляющей оптического сигнала, вызываемые нестабильностью источника излучения, а также необходимость работы в области низких частот (при $V_x \rightarrow 0$ или/и $V_y \rightarrow 0$), когда становится практически невозможной электрическая фильтрация постоянной составляющей, требуют выделения и устранения постоянной составляющей из спектров E_1 и E_3 . Это может быть осуществлено применением симметричного относительно сдвигов x_0 и y_0 ($|x_0| = |y_0| = P_0/4 + nP_0$ ($n = 0, 1, 2, \dots$)) оператора $Z_5 = (1/2)(Z_1Z_3 + Z_2Z_4) = \exp(j\omega_x x_0 + j\omega_y y_0) + \exp(-j\omega_x x_0 - j\omega_y y_0)$, преобразующего спектр входного сигнала следующим образом: $E_5 = Z_5 E(\omega) = 4E_0$.

Применяя операторы вида $Z_6 = Z_1 - Z_5$ и $Z_7 = Z_3 - Z_5$, можно с помощью электронных разностных схем получить сигналы, в спектре которых отсутствует постоянная составляющая. Эквивалентные ПС, соответствующие этим сигналам, $E_6 = Z_6 E(\omega) = jE_y[\delta(\omega_y + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_y - 2\pi/P_0)]$, $E_7 = Z_7 E(\omega) = jE_x[\delta(\omega_x + 2\pi/P_0) - \delta(\omega_x - 2\pi/P_0)]$.

На рис. 2 показано возможное расположение ФП, которые совместно с электрической схемой (рис. 3), включающей в себя схемы суммирования (СС) и схемы вычитания (СВ), образуют совокупность оптико-электронных анализаторов, реализующих описанные симметричные операторы идентификации. Отметим, что при выделении переменных составляющих пространственного спектра входного сигнала имеет место двухосевая симметрия, а при выделении постоянной составляющей — центральная. Анализаторы ОЭС совместно со схемами сложения-вычитания могут быть реализованы в интегральном исполнении в одном корпусе.

Компенсация погрешности фазирования. При $P_0 \neq \text{const}$, что имеет место в реальных условиях работы КИС, включающей интерферометр с дифракционной решеткой, главным образом из-за наличия кривизны поля объектива, фокусирующего пучки света на плоскую решетку, наблюдается изменение фазового сдвига на величину $\pm \Delta\phi$ в каждой паре квадратурных сигналов. Эти сигналы, вид которых может быть найден подстановкой в (1) преобразованных ПС E_7 , E_2 и E_6 , E_4 , изменяются по закону \sin и \cos :

$$u_7(t) = U_x \sin(\Omega_x t \pm \Delta\phi/2), u_2(t) = U_x \cos(\Omega_x t \mp \Delta\phi/2), \\ u_6(t) = U_y \sin(\Omega_y t \pm \Delta\phi/2), u_4(t) = U_y \cos(\Omega_y t \mp \Delta\phi/2),$$

где $\Omega_x = (2\pi/P_0)V_x$ и $\Omega_y = (2\pi/P_0)V_y$ — временные частоты сигнала при смещении интерференционной картины вдоль соответствующих осей.

Определим погрешность фазирования $\pm \Delta\phi$ и рассмотрим возможный способ ее компенсации. Разность фаз в каждой паре квадратурных сигналов при изменении периода интерференционной картины на $\pm \Delta P$ со-

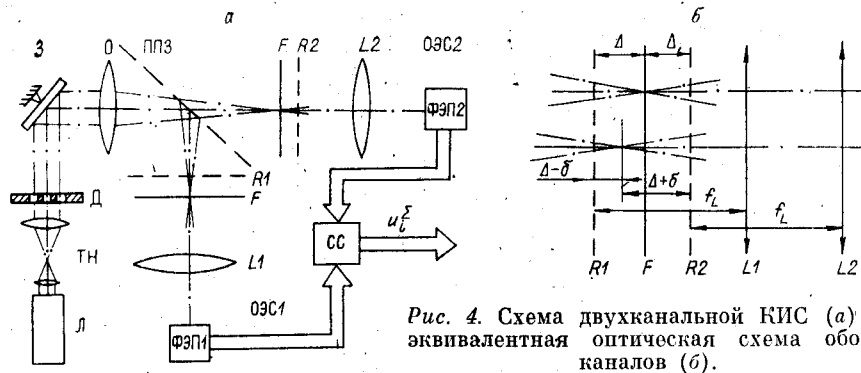


Рис. 4. Схема двухканальной КИС (а) и эквивалентная оптическая схема обоих каналов (б).

ставит величину $(\pi/2)P_0/(P_0 \pm \Delta P)$. Тогда погрешность фазирования $\pm \Delta\varphi = (\pi/2) (1 - 1/(1 \pm \Delta P/P_0))$. (5)

Рассмотрим КИС, состоящую из двух каналов ОЭС1 и ОЭС2 (рис. 4, а). В качестве фотоэлектрических преобразователей в них используются описанные выше идентичные многоэлементные анализаторы, включенные по схеме суммирования выходных сигналов. Оптические схемы каналов отличаются друг от друга лишь тем, что дифракционные решетки $R1$ и $R2$ в них смещены относительно идеальной фокальной поверхности F на величину $-\Delta$ в первом канале и на величину $+\Delta$ во втором (рис. 4, б). При смещении точки схождения лучей от плоскости F , например, на величину $-\delta$ относительно изменения периода интерференционной картины в плоскости анализа ОЭС1 через выражения для сходящихся пучков [5] может быть записано в виде

$$\Delta P/P_0 = (P_{сх} - P_0)/P_0 = \delta f_L / (f_L - \Delta) (\Delta - \delta) \approx \delta / (\Delta - \delta), \quad (6)$$

где f_L — фокусное расстояние коллективной линзы.

Подставляя (6) в (5), находим погрешность фазирования:

$$\Delta\varphi = (\pi/2) (\delta/\Delta) = f(\delta).$$

Для ОЭС2 $\Delta P/P_0 = (P_0 - P_{расх})/P_0 = \delta f_L / (f_L + \Delta) (\Delta + \delta) \approx \delta / (\Delta + \delta)$, что при подстановке в (5) дает $\Delta\varphi = (-\pi/2) (\delta/\Delta) = f(\delta)$.

На основании изложенного можно сделать вывод, что изменения фазового соотношения в формируемых ОЭС1 и ОЭС2 сигналах при смещении точки схождения лучей равны между собой по величине и противоположны по знаку. Алгебраическое суммирование соответствующих сигналов $u_i(t)$ с выходов обеих ОЭС позволяет реализовать свойство инвариантности такой двухканальной ОЭС — постоянство фазового соотношения в квадратурных сигналах при $\delta = \text{var}$.

Например:

$$\begin{aligned} u_7^{\text{ОЭС1}}(t) + u_7^{\text{ОЭС2}}(t) &= U_0 [\sin(\Omega_x t \pm \Delta\varphi/2) + \sin(\Omega_x t \mp \Delta\varphi/2)] = \\ &= 2U_0 \cos(\Delta\varphi/2) \sin \Omega_x t, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_2^{\text{ОЭС1}}(t) + u_2^{\text{ОЭС2}}(t) &= U_0 [\cos(\Omega_x t \pm \Delta\varphi/2) + \cos(\Omega_x t \mp \Delta\varphi/2)] = \\ &= 2U_0 \cos(\Delta\varphi/2) \cos \Omega_x t. \end{aligned}$$

Аналогичные соотношения могут быть получены и для y -координаты. **Оптическая схема КИС.** Координатно-измерительная система (см. рис. 4) включает в себя лазер (Л); телескопическую насадку (ТН), расширяющую и коллимирующую световой пучок; профилирующую диафрагму (Д), формирующую четыре параллельных когерентных пучка; фокусирующий объектив (О); полупрозрачное зеркало (ППЗ), направляющее измерительные пучки в два канала — ОЭС1 и ОЭС2, содержащие двумерные дифракционные решетки $R1$ и $R2$; линзы $L1$ и $L2$, строящие изображение интерференционной картины в плоскости многоэлементных

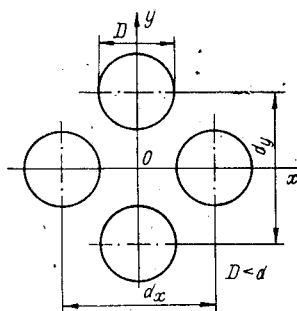


Рис. 5. Нормальное сечение измерительных световых пучков.

фотоэлектрических преобразователей (ФЭП1 и ФЭП2). Формируемые ими сигналы поступают на схему суммирования (СС), с выходов которой снимаются две пары необходимых квадратурных сигналов.

Для направления измерительных пучков в ОЭС служит либо рабочая поверхность зеркала дефлектора (З), либо его задняя поверхность. В первом случае в качестве объектива, собирающего измерительные пучки на дифракционной решетке, может быть использован объектив, формирующий сходящийся рабочий (записывающий или считывающий) пучок света. Последующее разделение пучков осуществляется с помощью светоделителя.

Условия получения интерференционной картины. Двумерная интерференционная картина формируется посредством интерференции соответствующих порядков дифракции четырех параллельных световых пучков, сводимых объективом в плоскость двумерной дифракционной решетки. Ориентация пучков (в сечении) относительно осей координат и совпадающих с ними направлений штрихов двумерной решетки показана на рис. 5. Расстояния между осями пучков выбираются из условия получения интерференции:

$$d_x = d_y = \lambda b f |N_1 - N_2|,$$

где λ — длина волны света, b — пространственная частота решетки, f — фокусное расстояние объектива, N_1, N_2 — интерферирующие порядки дифракции.

Заключение. Рассмотренные операторы и схемы преобразования входного ПС оптического измерительного сигнала, представляющего собой двумерную интерференционную картину, позволяют строить ОЭС полной идентификации входного сигнала, инвариантную к случайным изменениям фазы и флуктуациям постоянной составляющей сигнала.

В экспериментально исследованной нами КИС, построенной по описанной схеме с использованием рассмотренного метода, были применены двумерные дифракционные решетки размером 100×100 мм, имеющие пространственную частоту $b = 100 \text{ мм}^{-1}$. При использовании +1 и -1 порядков дифракции и формировании четырех счетных импульсов на период интерференционной картины такая КИС обеспечила надежное измерение $8 \cdot 10^4 \times 8 \cdot 10^4$ позиций сканирующего светового пятна по полю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Выскуб В. Г. и др. Прецизионные измерения угловых перемещений объекта в пространстве. — Измерит. техника, 1974, № 2, с. 11—13.
2. Савостин П. И. Разработка и исследование лазерно-зеркальных устройств для прецизионного воспроизведения графической информации: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. — М.: МИФИ, 1982.
3. Яблоповский Д. Интерференционная система контроля положения с решетками Ронки. — Приборы для науч. исследований, 1976, № 1, с. 100—105.
4. Фотометрические преобразователи информации/Под ред. Л. Н. Преснухина. — М.: Машиностроение, 1974.
5. Васильев Л. А., Ершов И. В. Интерферометр с дифракционной решеткой. — М.: Машиностроение, 1976.

Поступила в редакцию 14 июля 1983 г.;
окончательный вариант — 25 сентября 1983 г.