

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СХЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

© 2020 г. В.Е. Махов^{1,*}, А.И. Потапов^{2,**}, В.В. Широбоков^{1,***}, Я.Г. Смородинский^{3,4}

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Россия 197082 Санкт-Петербург, Ждановская ул., 13

²Санкт-Петербургский горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2

³Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

⁴ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

E-mail: * wmahov@gmail.com; ** apot@mail.ru; *** 17126vlad@gmail.com

Поступила в редакцию 27.01.2020; после доработки 10.04.2020

Принята к публикации 06.05.2020

Рассмотрены вопросы построения измерительных систем технологического контроля и мониторинга объектов на базе гетеродинно-растрового преобразования оптических информационных полей, полученных в оптико-электронных системах. Описан принцип построения схемных решений получения периодических сигналов сформированных информационных полей, фазовый параметр которых связаны с контролируемыми параметрами наблюдаемых объектов. Детально рассмотрены типичные схемы контроля геометрических параметров оптически прозрачных и непрозрачных объектов. Для рассмотренных схем проведен анализ чувствительности отклонения контролируемого от номинального параметра. Представлены схемные решения контроля нормальных и касательных деформаций поверхности контролируемого объекта методами интерферометрии. Разработана методика контроля первой и второй производной смещений точек поверхности методом голографической и спекл-фотографии. Показаны пути практической реализации гетеродинно-растровых преобразователей. Указаны перспективные направления формирования периодических сигналов с фазовым информационным параметром на базе твердотельных простых и вложенных матричных структур фотодиодов.

Ключевые слова: технологический контроль, гетеродинно-растровое преобразование, формирование информационных полей, фазовый детектор, фазово-растровый дилатометр, голографическая интерферометрия, спекл-фотография, матричный фотоприемник, регистратор светового поля.

DOI: 10.31857/S0130308220060032

ВВЕДЕНИЕ

Технологический контроль (ТК) изделий является наиболее важной областью современного производства или систем технического мониторинга состояния наблюдаемых объектов. Отличительной особенностью ТК является высокая чувствительность к контролируемому параметру и помехозащищенность к внешним факторам, возможность непрерывного мониторинга контролируемых параметров объектов контроля. При этом средствами ТК необходимо обеспечить высокое быстродействие, встраиваемость в технологический процесс или систему мониторинга.

Аналогичные по своему характеру задачи возникают в других важных областях, например, в средствах мониторинга объектов космического мусора, включающих как крупные, так и мелкие объекты природного или искусственного происхождения. Основной проблемой космического мусора является то, что объекты могут долго находиться на орбите. Так объекты, находящиеся на высоте до 600 км, за счет тормозящего эффекта атмосферы постепенно снижаются и сгорают в плотных слоях атмосферы (до 200 км — несколько дней, а от 200 до 600 км — до нескольких лет). Объекты на высотах свыше 800 км могут находиться в космическом пространстве десятки и сотни лет. Особенно остро встает проблема мониторинга космического мусора на геостационарной орбите, которая является наиболее удаленной, привлекательной и выгодной для решения различных научных и коммерческих задач. Каждый год на геостационарную орбиту запускают десятки спутников, в то же время орбита заполняется отработавшими ресурс спутниками и другим космическим мусором (ступени ракет, детали старых спутников и др.).

Мониторинг изменения обстановки в околоземном космическом пространстве позволяет получить наиболее точные данные для безопасного вывода на орбиту новых объектов и изменения орбиты действующих спутников для предотвращения чрезвычайных ситуаций, а также учесть риски и последствия столкновения с космическим мусором в процессе эксплуатации на основе мониторинга технического состояния спутников.

Поэтому разработка принципов построения средств ТК и мониторинга окружающей среды является важной задачей во многих значимых сферах человеческой деятельности.

АНАЛИЗ СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

В настоящее время оптические системы остаются одними из самых производительных средств ТК в промышленности и других сферах хозяйственной деятельности [1]. Использование системы электронной регистрации оптического изображения и средств компьютерной обработки изображений расширяет возможности применения класса оптико-электронных систем (ОЭС) в области автоматизированного контроля технологических процессов, например изготовления изделий и контроля обрабатывающего инструмента [2], а так же построение интеллектуальных систем промышленного технологического контроля [3]. Следует отметить, что на базе интегральных математических методов обработки получаемой информации (например, непрерывное вейвлет-преобразование) существует возможность получить достаточно высокую чувствительность измерений и помехозащищенность [4]. Однако все оптические средства, использующие электронную регистрацию, требуют учета объемных параметров отображаемого пространства и объекта контроля, что вызывает необходимость проведения калибровки измерительной системы [5, 6]. При этом не всегда удается обеспечить достаточную устойчивость результатов контроля к воздействию неконтролируемых внешних факторов.

Наряду с известными принципами оптического неразрушающего контроля [4, 7] с целью получения более высокой точности и помехозащищенности при автоматизированном способе получения результатов остаются актуальным принцип построения измерительных ОЭС на базе фазовых измерений специальным образом сформированных сигналов [8, 9], когда контролируемый параметр объекта контроля отображается в периодические сигналы с фазовой характеристикой. Тогда мониторинг контролируемого параметра производится по разности фаз получаемых сигналов [10]. При этом технически создаются наиболее благоприятные условия построения автоматизированных систем промышленного контроля, оперативного получения отклонения исследуемых параметров объекта от номинального значения и возможность управления режимами технологического процесса.

Основные преимущества способа контроля, который использует принцип определения контролируемого параметра через функцию взаимной корреляции формоизменения сигналов, сформированной измерительной системой, на практике дают более высокую точность и помехозащищенность, более полное использование полезной информации регистрируемого светового поля.

Используемые в настоящее время для регистрации яркостных полей матричные фотоприемники [11] и интегральные математические методы обработки сигналов [4] можно рассматривать как аналог координатно-временного преобразования яркостных полей или их растровую модуляцию. Однако матричные фотоприемники обладают ограниченным диапазоном измерений и узким динамическим диапазоном регистрируемых яркостных полей.

В настоящее время представляет интерес разработка единой методики построения систем ТК для каждого типа объектов и их контролируемых параметров. Необходимо также определить пути совершенствования метода фазовых измерений для систем ТК в направлении использования перспективных методов регистрации яркостных полей [12]. Актуальным является рассмотрение новых возможностей контроля по цифровой регистрации волновых фронтов состояния и формы поверхности объектов [13] в плане возможности применения схем с использованием аналога принципа фазовых измерений.

ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕТЕРОДИННО РАСТРОВЫХ СХЕМ

В зависимости от выбранной геометрии контролируемого волнового фронта, то есть структурного вида яркостного информационного поля $S(r)$ и типа его параметров, связанных с измерениями на контролируемом объекте, можно выделить следующие возможные типы схем гетеродинно-растрового (ГР) контроля [10]:

одноточечная схема — определение координат центра тяжести r_0 локализованной яркостной структуры $S(r)$, которое осуществляется по фазе периодического сигнала, полученного путем схемного преобразования $r_0 \rightarrow u(\omega, \varphi)$;

двухточечная схема — определение периода T_s и угла его наклона θ яркостной структуры $S(r)$, которые осуществляются путем преобразования их в разность фаз двух и более периодических сигналов $\{T_s, \theta\} \rightarrow \{u_1(\omega, \varphi), u_2(\omega, \varphi + \Delta\varphi_1), \dots\}$;

многоточечная схема — определение различных параметров яркостной структуры $S(r)$ (производных d/dx , d^2/dx^2) по разности фаз двух и более периодических сигналов с разными частотами.

Рассмотрим построения оптических измерительных схем контроля геометрических параметров объекта для этих типов схем на конкретных примерах.

Одноточечная схема. Распределение интенсивности освещенности $S(r)$ энергетически локализовано в наблюдаемой области (E), а координаты центра распределения интенсивности освещенности $\langle S(r) \rangle$ определяет измеряемый параметр объекта контроля. Фаза выходного периодического сигнала $u(t, \varphi)$ определяется фазой раstra в каждой точке (рис. 1а), то есть его временная форма соответствует пространственно-временной формой раstra $u_1(t, \varphi_1) \approx R(t, a_1)$. Для другого точечного источника $S_2(r)$, расположенного в точке с координатой a_2 , будем иметь аналогичное выражение, то есть $u_2(t, \varphi_2) \approx R(t, a_2)$. Очевидно, проекцию расстояния в направлении периода раstra между источниками $a_1 - a_2$ можно определить по разности фаз полученных периодических сигналов $\varphi_1 - \varphi_2$.

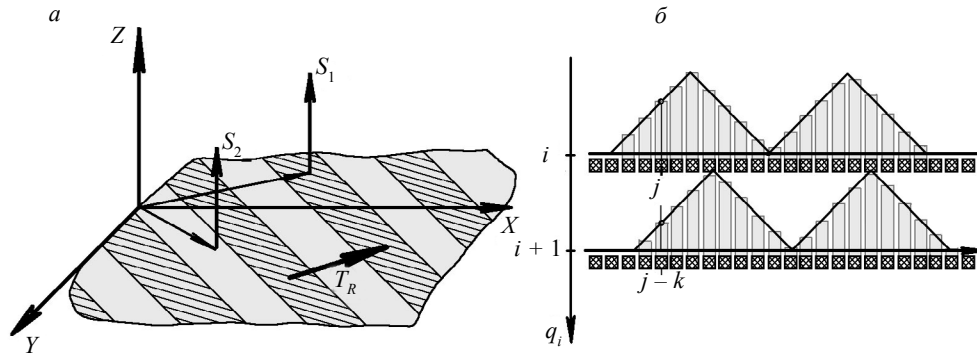


Рис. 1. Принципы фазово-растрового метода контроля:

а — точечные источники на растровой структуре; б — форма дискретного преобразования источника на прямоугольном растре.

Данная схема может быть использована как для измерения локальных деформации и наклонов, как для зеркальных, так и диффузно отражающих поверхностей объектов, в том числе оптически прозрачных (фазовых) объектов.

Примером построения схемы такого вида контроля является оптический фазово-растровый дилатометр [14], предназначенный для контроля изменения толщины слоя слабосвязанного материала относительно основания (например, порошкового материала на подложке, формирующегося в покрытие). Оптическая схема дилатометра выполнена на основе двухканальной одноточечной схемы (рис. 2).

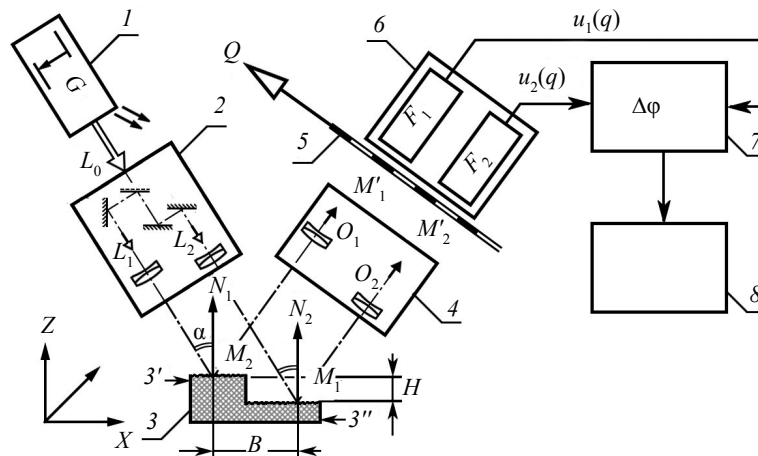


Рис. 2. Одноточечная двухканальная схема контроля толщины ступенчатой поверхности:

1 — лазер; 2 — осветительное устройство; 3 — объект контроля (3' — поверхность контролируемого слоя, 3'' — поверхность подложки); 4 — проекционная оптика (O_1 , O_2); 5 — растр (ГР-преобразователь); 6 — фотоприемники (F_1 , F_2); 7 — фазовый детектор; 8 — регистрирующий прибор.

Отличием такой схемы от аналогичных растровых схем [15] является отсутствие жестко связанных с образцом реперных меток. Световые метки $M_1(x_1, z_1)$ и $M_2(x_2, z_2)$ на двух базовых поверхностях образца 3' и 3'' в требуемых координатах ($x_1 = x_2 + B$) формируются двумя сфокусированными гомоцентрическими пучками лучей L_1 и L_2 от лазерного источника 1 (L_0) с помощью оптического осветительного устройства 2, в качестве которого используется устройство интерферометрического типа [16]. Световые метки формируются под углом визирования α к нормальным N_1 и N_2 соответствующих базовых поверхностей. В данной измерительной схеме может быть использован также некогерентный источник освещения. Нормальное смещение базовых поверхностей ($z_2 = z_1 + H$) вызывает смещение изображений построенных оптической системой 4 световых реперных меток M'_1 и M'_2 в области растрового модулятора 5. Каждое смещение поверхностей изменяет фазу модулированных световых потоков от световых меток, которые регистрируются фотоприемниками 6 (F_1 и F_2) в выходные электрические сигналы: $u_1(t + \varphi_1)$ и $u_2(t + \varphi_2)$. Разность фаз сигналов $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ определяется фазовым детектором 7 и связана с изменением высоты H поверхности образца следующим выражением:

$$H = \beta_{\text{o.s.}} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \frac{T_R}{2\sin\alpha}, \quad (1)$$

где $\beta_{\text{o.s.}}$ — линейное увеличение оптической системы 4, T_R — период растрового модулятора.

Предельная чувствительность такой измерительной схемы определяется из условия:

$$\delta H = \frac{2,44\lambda}{\pi \sin\alpha} \left(\frac{f'}{D} \right) \delta\Delta\varphi, \quad (2)$$

где (D/f') — относительное отверстие оптической системы осветителя 2, формирующей световую метку.

Для параметров оптической схемы: $\alpha = 30^\circ$, $\lambda = 0,63$ мкм (He—Ne-лазер), $(D/f) = 1:2$, $\delta\Delta\varphi = 10^{-3}$, чувствительность измерения будет составлять $\delta H = 2 \cdot 10^{-3}$ мкм.

Принцип измерения сохраняется, если информационное поле локализовано по одной координате, перпендикулярной периоду ГР-преобразователя T_R , что может быть использовано в описанной выше схеме (см. рис. 2), при этом световые метки имеют вид линейных полос освещенности, перпендикулярных плоскости рисунка, которые могут быть получены, например, цилиндрическим объективом.

Схемы, построенные по этому принципу (рис. 3), позволяют осуществить контроль геометрических параметров трубчатых оптически прозрачных изделий (например, капилляров) [17], которые имеют внутренний диаметр d_0 , наружный диаметр D_0 и показатель преломления материала n_T .

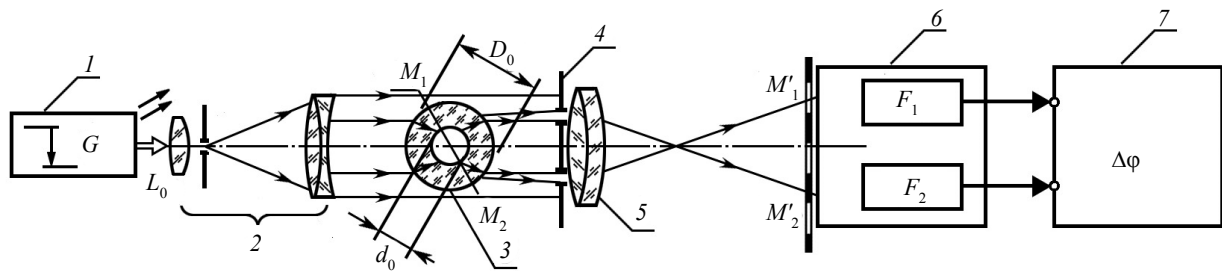


Рис. 3. Измерительная схема контроля оптических капилляров:

1 — лазер; 2 — телескопическая система; 3 — объект контроля; 4 — диафрагма угловой фильтрации выходящий лучей; 5 — проекционная оптика; 6 — ГР-преобразователь; 7 — фазовый детектор.

Нетрудно видеть, что в этом случае характер получаемых линейных световых меток определяется цилиндрическими формами поверхностей самого капилляра и геометрией диафрагмы 4, которая осуществляет угловую фильтрацию проходящего капилляр пучка лучей. В общем случае оптический капилляр можно также представить как двухфазную гетерогенную регулярную структуру [18], в этом случае можно говорить, что данная схема позволяет контролировать параметры структуры гетерогенного материала, а структура изделия формирует параметры световых меток.

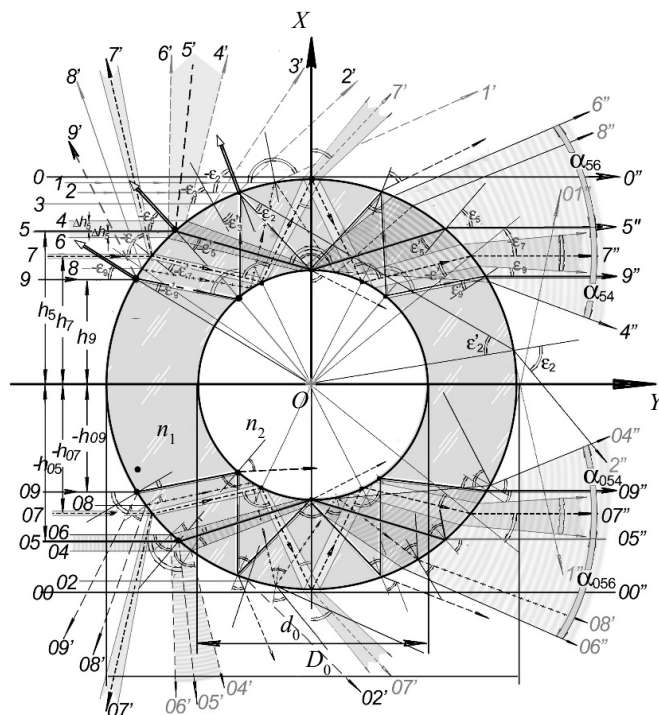


Рис. 4. Ход лучей через оптический капилляр, формирующих световые метки.

Рассмотрим более подробно принцип формирования информационных световых меток. Контролируемое оптически прозрачное изделие 3 (см. рис. 3) просвечивается однородным гомоцентрическим пучком лучей (в частности, плоскопараллельным) большего диаметра, чем наружный диаметр капилляра D_0 . Оптическая схема хода лучей $L(x)$ через капилляр показана на рис. 4.

В результате преломления, однократного и многократных отражений от наружной и внутренней поверхностей трубки происходит потеря гомоцентричности выходящего пучка лучей. В результате образуются наборы выходящих лучей разного направления распространения, координат точек схождения и интенсивности $\{L_i(x_p, y_p, \alpha_i)\}$, которые выделенные по углу распространения диафрагмой-фильтром 4 (см. рис. 3) или апертурой объектива. Выходящие лучи образуют в предметной области объектива 5 парные наборы световых реперных меток M_k и M_{0k} (рис. 5). Так, например, пара световых меток M_5 и M_{05} , соответствует двукратному преломлению лучей на наружной поверхности и однократному отражению от внутренней поверхности капилляра.

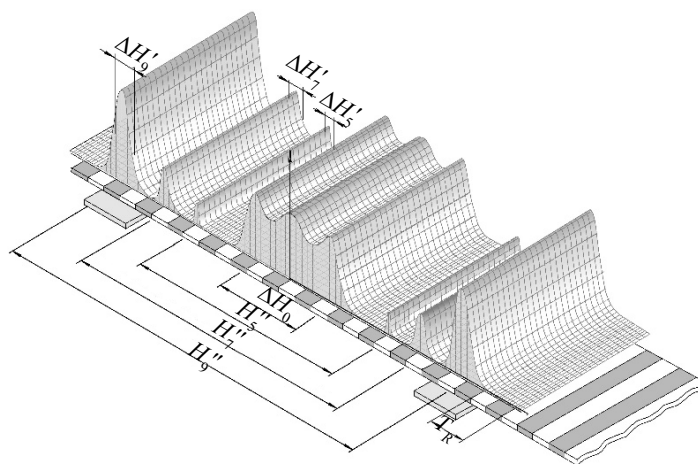


Рис. 5. Типичное распределение освещенности в световых реперных метках в плоскости изображений для оптического капилляра.

В зависимости от соотношения геометрических размеров трубки (внутреннего диаметра d_0 , наружного диаметра D_0 и показателя преломления n_T) формируются ряд симметрично расположенных пар световых меток разной интенсивности, ширины и плоскости локализации в предметной области (см. рис. 5). Плоскость локализации световых меток определяется координатой (по оси OY) пересечения продолжений рассматриваемых выходящих лучей. Эти световые метки соответствуют двухкратному преломлению на наружной поверхности и нескольким кратным отражениям от наружной и внутренней поверхностей трубки лучей света. Участвующих в формировании выделенных диафрагмой лучи определяют опорные участки поверхности (измерительные в радиальном направлении). Каждую пару световых меток (M_k и M_{0k}), полученных путем одинакового количества преломлений и отражений лучей света в областях наружной и внутренней поверхности капилляра, будем называть в дальнейшем соответственными, отмечая этот факт дополнительным нулем индексом в их обозначении, например H'_k и H'_{0k} .

При осевом наблюдении указанного пучка лучей (см. рис. 4) параметры капилляра связаны следующей системой уравнений:

$$\cos \alpha_k = \frac{H_k}{D_0}, \quad \sin \varepsilon'_k = \frac{H_k}{n_T D_0}, \quad (k = 1, 2, 3), \quad (3)$$

$$d_0 \sin \left(\frac{\alpha_k}{k} \right) = \left[D_0 - d_0 \left(\frac{\alpha_k}{k} \right) \right] \operatorname{tg} \varepsilon'_k, \quad (4)$$

где n_T — показатель преломления трубки, $\beta_{\text{o.s.}}$ — линейное увеличение оптической системы 4, H'_k — размер изображений световых меток на поверхности ГР-преобразователя.

Положение каждой световой метки определяет фазу сигнала φ_k :

$$H'_k = \beta_{\text{o.s.}} \cdot H_k = \frac{\Delta \varphi_k}{2\pi} T_R + n T_R, \quad (5)$$

где $\beta_{\text{o.s.}}$ — линейное увеличение оптической системы.

Выходящие лучи строят другие пары изображений линейных световых реперных меток $\{M'_k\}_{k=1}^m - \{M'_{0k}\}_{k=1}^m$ в плоскости ГР преобразователя 5.

Зависимость расстояний между соответственными световыми метками H'_k и H'_{0k} связано с контролируемыми параметрами капилляра (D_0 , d_0 , n_T) системой ортогональных уравнений (3) и (4), что позволяет осуществлять их одновременный технологический контроль с точностью более, чем 10^{-2} мкм (для D_0 , d_0) и более, чем 10^{-5} (для показателя преломления n_T).

В силу технологических особенностей процесса получения капилляров отношение $D_0/d_0 = \text{const}$, $n_T = \text{const}$. Поэтому на практике нет необходимости осуществлять одновременный контроль всех параметров капилляра (D_0 , d_0 , n_T). Практический интерес представляет контроль внутреннего диаметра d_0 , который до настоящего времени контролировать в технологическом процессе представляется весьма затруднительным. При этом все же приходится учитывать возможный разброс параметров D_0 , n_T , а также несоосность внутренней и наружных цилиндрических поверхностей и отклонение формы от цилиндра, а также возможный градиент показателя преломления n_T .

Аналогичную оптическую схему можно использовать для определения геометрического размера непрозрачных объектов, в том числе имеющих зеркально отражающие боковые поверхности. Возможный вариант такой схемы, который может быть использован для контроля высокоточных цилиндрических плунжеров, представлен на рис. 6. Как и в измерительной схеме прозрачных капилляров (см. рис. 3), объект должен располагаться так, чтобы измеряемый размер был перпендикулярен освещающим лучам L_1 и L_2 и при своем перемещении перекрывался ими. В отличие от рассмотренных ранее схем (см. рис. 2, 3) были дополнительно использованы двойные зеркала 4' и 4'', формирующие периодическую структуру границ теневого изображения плунжеров и лучей дифракции на поверхности ГР-преобразователя.

В представленной схеме изменение размера между границами контролируемого объекта 3 приводит к смещению периодической яркостной структуры, которая формируется зеркалами 4' и 4'', на поверхности растрового модулятора 5. Это обеспечивает пропорциональное изменение разности фаз $\Delta \varphi$ в зависимости от контролируемого размера L_{AB} , в то время как перемещение объекта как целое дает нулевое изменение $\Delta \varphi$.

На основе рассмотренных схем могут быть также построены многоканальные измерительные схемы, которые дополняются наборами из n фотоприемников $\{F_1, \dots, F_n\}$ и соответствующим им

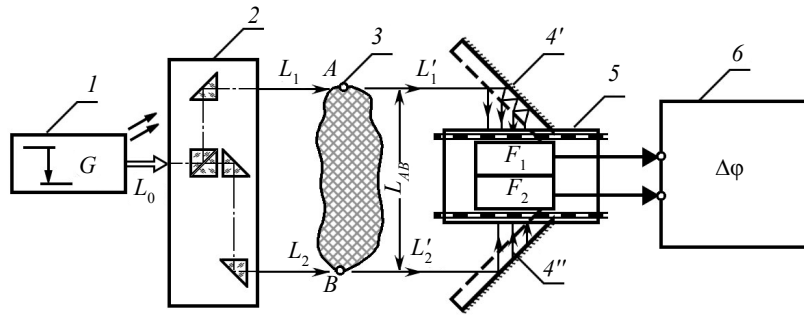


Рис. 6. Схема контроля непрозрачных объектов:

1 — лазер, 2 — осветительная система, 3 — контролируемый объект, 4' и 4'' — поворотные зеркала, 5 — система растр-регистратор, 6 — фазовый детектор.

набором фазовых детекторов $\{\Delta\phi_{ij}\}$, что позволяет проводить контроль формы объекта, аналог методов фотограмметрии [19].

Двухточечная схема. Распределение интенсивности в $S(r)$ имеет вид периодического распределения световой энергии в области (E) [20]: $S(r) \leftrightarrow S(r + T_s)$ (знак $\leftrightarrow$ используется для реального случая в смысле минимума нормы структуры (подобия):

$$N_s = \min_{r \in E_0} \int_{E_0} \|S(r) - S(r + T_s)\| dr. \quad (6)$$

Измеряемая информация, связанная с контролируемым параметром, содержится как в периоде T_s (как абсолютном значении величины периода $|T_s|$), так и его ориентации по отношению к выбранной системе координат XOY . Измерение осуществляется по разности фаз $\Delta_{12}\phi$ двух периодических сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$, полученных от ГР-преобразования $S(r)$ (4) по областям $E_1 \subset E_0$ и $E_2 \subset E_0$ с координатами:

$$z_{xi} = \frac{1}{E_{xi}} \int_{E_i} x dr, \quad z_{yi} = \frac{1}{E_{yi}} \int_{E_i} y dr, \quad (i = 1, 2). \quad (7)$$

Очевидно, что максимальная амплитуда регистрируемых сигналов соответствует выбору размеров областей (E_1) и (E_2) кратному T_R в направлении периода растра с одной стороны, с другой — выбору T_R , близкому к измеряемому периоду T_s :

$$\frac{\|T_s - T_R\|}{\|T_R\|} \ll 1. \quad (8)$$

Фазы сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ определяются начальной пространственной фазой растра $R(r, 0)$ по отношению к началу координат XOY , периодом растра T_R , а также положением областей $E_1(z_{x1}, z_{y1})$ и $E_2(z_{x2}, z_{y2})$. В то время как разность фаз $\Delta_{12}\phi$ за время наблюдения T , формирующего более одного периода сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$:

$$\Delta\phi_{12} \frac{2\pi}{p} \Delta\phi, \quad u_1(t) \cong u_2(t - \Delta\phi), \quad t \in (T) \quad (8)$$

определяется только значением угла их взаимного наклона

$$\Delta\alpha = |E_1 - E_2| \cos \alpha, \quad \alpha = \angle(\text{grad} S(r), E_1 E_2) \quad (9)$$

и соотношением периодов T_R и T_s , из которого при измерении $\Delta\phi$ определяется T_s :

$$|T_s| = \left(\frac{1}{T_R} - \frac{\Delta\phi_{12}}{2\pi\Delta\alpha} \right)^{-1}. \quad (10)$$

Для более точного определения периода $S(r)$ необходимо также определять ориентацию θ периодической структуры $S(r)$. Например, по разности фаз сигналов $u_3(t)$ и $u_4(t)$, полученных от $S(r)$ по двум дополнительным областям $E_3 \subset E_0$, $E_4 \subset E_0$ с центрами тяжести (z_{x3}, z_{y3}) и (z_{x4}, z_{y4}) ориентированных под углом $\beta = \angle(E_3 E_4, OY)$:

$$\theta = \beta + \operatorname{arctg} \frac{|T_s| \Delta \varphi_{34}}{2\pi \Delta b}, \quad \alpha = \theta - \angle(E_1 E_2), \quad (11)$$

где $\Delta b = |E_3 - E_4| \cos \beta$.

Таким образом, для осуществления полного контроля параметров объекта, связанных с величиной и наклоном T_s , необходимо ГР-преобразование и регистрацию осуществлять минимум по трем областям, оптимально координаты расположения которых образуют равносторонний прямоугольный треугольник.

Диапазон измерения периода $|T_s| - D_T$ и ориентации структуры $S(r) - D_0$ определяется из условия их однозначной связи с измеренной разностью фаз $\Delta \varphi = [0, \pi]$:

$$D_T = \frac{|T_s|}{2\Delta a - |T_s|}, \quad D_0 = \operatorname{arctg} \frac{|T_s|}{2\Delta b}. \quad (12)$$

При этом чувствительность и точность измерения периода полос δT_s будет определяться следующим выражением:

$$\delta T_s = \frac{|T_s|}{|T_R|} \delta T_R + \frac{|T_s|^2 \Delta \varphi}{2\pi \Delta a} \delta \Delta a + \frac{|T_s|^2}{2\pi \Delta a} \delta \Delta \varphi. \quad (13)$$

Как можно видеть из (13), погрешность измерения $|T_s|$ более, чем на порядок меньше погрешности измерения $\Delta \varphi$. Если взять реальные параметры для некоторой измерительной схемы: $|T_R| = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta a = 10^{-2}$ м, получим оценку относительной чувствительности измерения периода яркостной структуры: $\delta T_R / |T_s| = 3 \cdot 10^{-5}$.

Большие информационные возможности для построения схем технологического контроля имеют методы интерферометрии, голографической и спекл-интерферометрии [21, 22], которые связаны с их высокой чувствительностью и информативностью в пространственной области (ГР-метод информативен также по времени). Контролируемые параметры объекта выражаются через структуру волнового фронта, полученную в результате интерференции: частота или период полос; фаза и ориентация полос; контраст; плоскость локализации полос [7]. Однако практическое применение этих методов наталкивается на ряд трудностей, связанных с той или иной совокупностью их следующих недостатков: чувствительность к механической нестабильности регистрирующей схемы; малым диапазоном измерения; низкой точностью определения отдельных проекций деформаций; трудоемкость процесса контроля и трудностью его автоматизации.

В то же время разрабатываются новые принципы регистрации волнового фронта (светового поля), которые реализуются цифровыми камерами светового поля [12], обеспечивая контроль геометрических параметров объемных изделий [5]. Корреляция волновых фронтов (морфологический анализ слоев изображения $\operatorname{Im}(z_1, Dz_1)$ и $\operatorname{Im}(z_2, Dz_2)$) обеспечивает новые возможности контроля формы и микрорельефа поверхности изделий [13]. Учитывая низкие требования к механической стабильности к объекту контроля, данный способ обеспечивает не только высокую точность контроля, но и возможность проведения контроля материалов и изделий в технологических условиях [23].

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Многоточечная схема. Растровый метод, реализующий принцип гетеродинного в плане получения и анализа динамических сигналов, позволяет расширить возможности интерферометрических методов, в некоторой степени устраняя ряд их недостатков за счет обеспечения возможности выбора регистрирующих схем. В частности, гетеродинно-растровый (ГР) метод обеспечивает возможность высокоточной расшифровку интерферограмм, которая, как известно, может быть реализована только в схемах гетеродинной голографической интерферометрии (интерференция двух пучков света со сдвинутыми оптическими частотами) [9], которые дают динамическую картину интерференции. Расширение диапазона измерения и разделение отдельных проекций деформаций достигается выбором соответствующих схем регистрации [7] и конструктивными особенностями устройств расшифровки [16]. Например, выделение проекций деформации реализуется в схемах с одним опорным пучком, при этом повышение точности и чувствительности их определения достигается использованием ГР-метода обработки полученных интерферограмм.

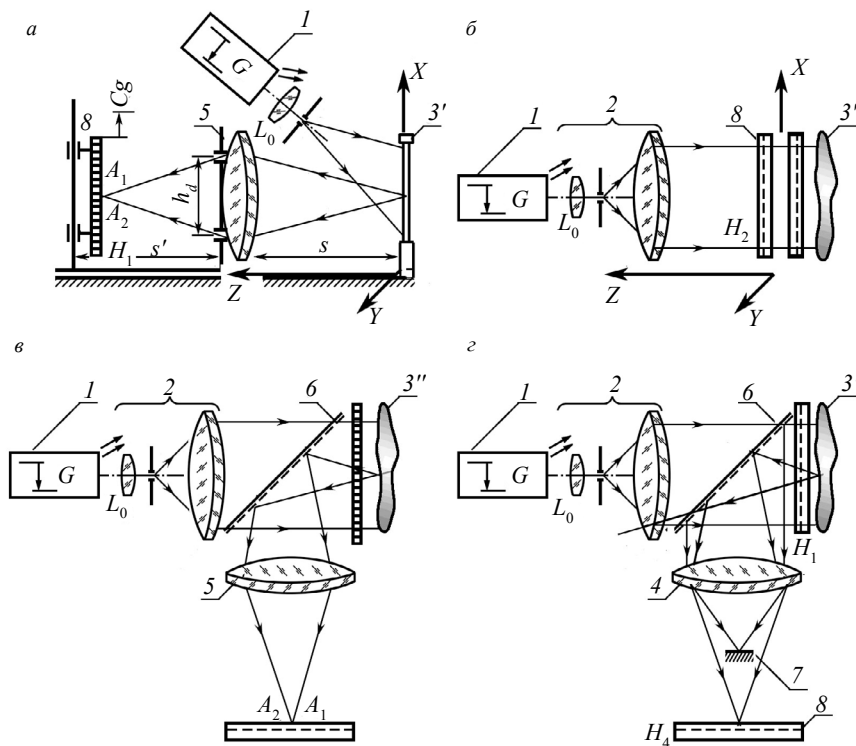


Рис. 7. Схемы регистрации деформаций диффузно отражающих объектов методом двух экспозиций: *a* — спекл-фотография касательных деформаций с маскированной апертурой (H_1); *б* — голограмма во встречных пучках для нормальных деформаций (H_2); *в* — спекл-интерферограмма касательных деформаций с голограммы H_2 ; *г* — спекл-интерферограмма нормальных деформаций со спекл-фотографии H_1 . 1 — лазер; 2 — телескопический расширитель; 3 — объект контроля; 4 — объектив; 5 — диафрагма; 6 — полупрозрачное зеркало; 7 — экран; 8 — КР-фотопластинка (квадратный регистратор).

Варианты схем регистрации деформаций методами голографической, спекл фотограмм и спекл интерферометрии представлены на рис. 7. Для понимания их возможностей и характеристик проведем анализ указанных схем.

Для определения касательных деформаций поверхности диффузно отражающих объектов по методам двух экспозиций оптимальной является схема регистрации спекл-фотографии H_1 (рис. 7а), обладающая невысокими чувствительностью и требованиям к механической стабильности системы регистрации.

Для повышения дифракционной эффективности фотопластинки H_1 используется маскированная апертура 5, состоящая из двух малых отверстий (d), расположенных диаметрально перед объективом в направлении интересующей деформации на расстоянии h_d . В результате при регистрации спекл-интерферограмм (фотографии) будут получены спеклы с характерным размером $b_s = 1,22 \times s\lambda/d$, модулированные высокочастотными интерференционными полосами с расстояниями между ними $s\lambda/2h_d$. Между двумя экспозициями соответствующих двум состояниям контролируемого изделия квадратичный регистратор (КР, например, фотопластинка) H_1 с целью расширения диапазона измерения, реализуемого на стадии расшифровки, смещается на некоторую величину c_g в своей плоскости в известном направлении.

Для выделенной регистрации нормальных к поверхности образца деформаций наиболее подходит схема регистрации голограммы H_2 во встречных пучках (рис. 7б). С полученной голограммы H_2 можно в дальнейшем записать спекл-интерферограмму для определения касательных деформаций со смещением $C_0 \rightarrow H_3$ (рис. 7в) или спекл-интерферограмму для определения нормальных деформаций H_4 (рис. 7г).

Полученные интерферограммы могут быть впоследствии обработаны, в том числе ГР-методом. При этом постоянная составляющая смещения объекта C и введенное смещение КР C_0 (H_1 , H_3) компенсируются сдвигом в пространстве изображений ($C_h = C + C_0 + \delta C$) соответственных точек A_1 и A_2 , например, с помощью двухлучевого интерферометра сдвига [16], который по сравнению с известной сэндвич-интерферометрией [7] строит изображения A'_1 и A'_2 — в первом, A''_1 и A''_2 — во втором оптических каналах. Сдвиг соответственных точек (как в плоскости XOY , так и по

оси OZ) осуществляется оптическими элементами в интерферометре [16] (например, синхронным наклоном двух плоскопараллельных пластинок), который должен обеспечивать период картины интерференции (КИ) — $T_S(x, y)$ изображений соответственных точек A'_1 и A'_2 (определяется величиной δC) близким к периоду ГР-преобразования — T_R , в то время как период интерференции от A'_1 и A'_2 не будет разрешаться регистратором.

Близость значений T_S и T_R необходимо обеспечить в диапазоне ГР-преобразования для исследуемой области E_m поверхности изделия. В отличие от гетеродинных схем обработки, в которых используется сдвиг оптической частоты света в одном из каналов интерферометра [10], схемы с ГР-преобразованием в плоскости локализации полос КИ значительно проще и позволяют более эффективно с той же точностью измерять поля смещения и деформаций.

Смещение интерферирующих точек, сдвига оптической частоты в каналах интерференции, ГР-преобразование картины интерференции открывает новые возможности определения поля деформаций поверхности. На рис. 8 представлена структурная схема для определения поля смещений регистрируемых точек поверхности $L(x, y)$, $(x, y) \in E_m$ с точностью до некоторой постоянной для всей области величины — C_p смещения изображений в интерферометре 4 путем определения периода T_S и угла наклона полос КИ. Тонкий луч лазера 1 освещает интерферограмму 3 в области $A(x, y)$, содержащей наборы соответственных точек A_1 и A_2 . Интерферометр 4 с устройством сдвига изображений 5 обеспечивает необходимый период КИ от изображений A'_1 и A'_2 в плоскости ГР-преобразователя 6, которая регистрируется парой фотоприемников 7 и детектируется фазовым детектором 8.

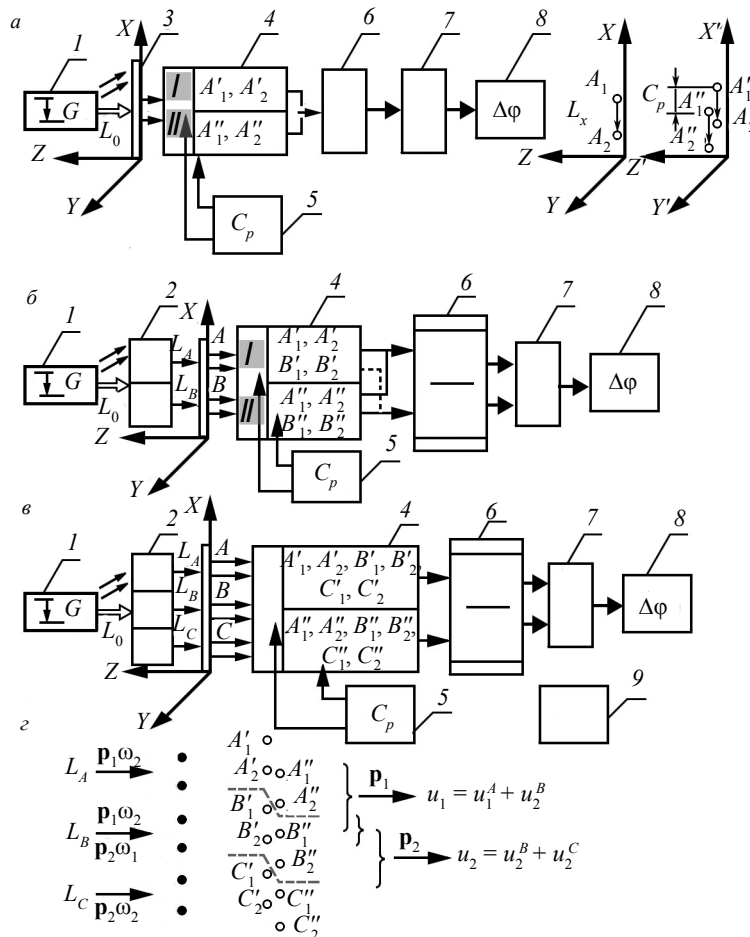


Рис. 8. Схема расшифровки интерферограмм ГР-методом:

a — измерение поля смещений; *б* — измерение первой производной от вектора смещений; *в* — измерение второй производной от вектора смещений; *г* — схема освещения соответственных точек в схеме измерения второй производной вектора смещений: 1 — лазер; 2 — устройство освещения; 3 — интерферограмма; 4 — двух лучевой интерферометр; 5 — устройство сдвига изображений в интерферометре; 6 — ГР преобразователь; 7 — регистратор; 8 — фазовый детектор; 9 — устройство сдвига частоты света.

На рис. 8б представлена схема, которая позволяет непосредственно связать фазовые измерения с полем деформаций поверхности объекта, например $\epsilon_x = \partial L(x, y)/\partial x$. В этом случае следует использовать два тонких луча L_A и L_B , которые освещают две области на интерферограмме $A(x, y)$ и $B(x+\Delta x, y)$, содержащие наборы соответственных точек A_1, A_2 и B_1, B_2 . Центры освещенных областей расположены на расстоянии Δx вдоль выбранного направления (OX), соответствующие координате дифференцирования поля смещений $L(x, y)$. Картины интерференции от соответственных точек A_1', A_2' и B_1', B_2' , построенных в I-м и II-м каналах интерферометра, соответственно регистрируются 7 раздельно (напр., разделение по поляризации) и определяются две разности фаз $\delta\phi_1, \delta\phi_2$, разность которых $\delta\Phi = \delta\phi_1 - \delta\phi_2$ соответствует деформации, вычисленной в конечных разностях. Можно непосредственно регистрировать два сигнала от A_1', A_2' и B_1', B_2' по двум аппретурам E_1 и E_2 , разность фаз выходных сигналов которых также определяет деформацию. При таких измерениях точность по сравнению с численным дифференцированием поля смещений с 30 % возрастает до 3—5 %.

Обычно при исследовании механико-прочностных свойств материалов и изделий возникают трудности определения с достаточной точностью вторых производных от поля смещений, например, $[\partial^2 L(x, y)]/\partial x^2$ и $\partial^2 L(x, y)/\partial x \partial y$, которые определяют поле напряжений. Непосредственная обработка результатов измерения смещений $L(x, y)$ будет давать еще большую погрешность. Как и в случае определения первой производной, ГР-метод позволяет существенно повысить точность и автоматизировать процесс измерения.

Структурная оптическая схема измерений напряжений представлена на рис. 8в. В этом случае интерферограмма 3 освещает тремя тонкими лучами L_A, L_B и L_C (рис. 4з) три области A, B и C , содержащие наборы соответственных точек $A_1, A_2; B_1, B_2; C_1, C_2$ и смещенных относительно друг друга на Δx и Δy :

$A(x - \Delta x, y), B(x, y), C(x + \Delta x, y)$ — для измерения $d^2 L/dx^2$ в точке (x, y) ;

$A(x + \Delta x, y), B(x, y), C(x, y + \Delta y)$ — для измерения $d^2 L/dx dy$ в точке (x, y) .

Пучок лучей L_A имеет линейную поляризацию P_1 с оптической частотой ω_1 ; пучок лучей $L_B = L'_B + L''_B$ — линейную поляризацию $P_1(L''_B)$ с оптической частотой ω_2 и ортогональную линейную поляризацию $P_2(L''_B)$ с оптической частотой ω_2 ; пучок лучей L_C — линейную поляризацию P_2 с оптической частотой ω_2 . Двух лучевой интерферометр сдвига строит по два изображения каждой из соответственных точек в 1-м $A'_1, A'_2, B'_1, B'_2, C'_1, C'_2$ и 11-м $A''_1, A''_2, B''_1, B''_2, C''_1, C''_2$ каналах, смещенных относительно своего исходного положения устройством сдвига изображения 5, которое компенсирует вектор смещения КР — C_0 и объекта — C , причем частота света во втором канале интерферометра смещается на частоту $+\Omega$ устройством сдвига частоты 9 для обоих типов поляризации. Альтернативным смещению частоты на $+\Omega$ является ГР-преобразование в плоскости локализации картины интерференции (КИ) от соответственных точек (рис. 8з) с поляризацией $P_1 - (A''_1, A''_2), (B''_1, B''_2); P_2 - (B''_1, B''_2), (C''_1, C''_2)$ (КИ от соответственных точек с $P_1 (A'_1, A'_2), (B'_1, B'_2)$, а также $P_2 - (B'_1, B'_2), (C'_1, C'_2)$) имеет высокую пространственную частоту, которая не регистрируется. Информационный выходной сигнал с поляризацией P_1 от соответственных точек A''_1 и A'_2 :

$$u_1^A(t) = u_0^A [1 + \cos(\Omega t + \varphi_A)], \quad (14)$$

от точек B''_1 и B'_2

$$u_1^B(t) = u_0^B [1 + \cos((\Delta\omega + \Omega)t + \varphi_B)], \quad (15)$$

с поляризацией P_2 от соответственных точек B''_1 и B'_2 :

$$u_2^B(t) = u_0^B [1 + \cos(\Omega t + \varphi_B)], \quad (16)$$

от точек C''_1 и C'_2

$$u_1^C(t) = u_0^C [1 + \cos((\Delta\omega + \Omega)t + \varphi_C)]. \quad (17)$$

Суперпозиция сигналов с поляризацией P_1 при $u_0^A = U_0^B$:

$$u_1 = 2u_0 \left\{ 1 + \cos \left[\left(\Omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} \right] \cos \left[\frac{\Delta\omega}{2} + \frac{\varphi_B - \varphi_A}{2} \right] \right\}, \quad (18)$$

с поляризацией P_2 при $u_0^A = U_0^B$

$$u_2 = 2u_0 \left\{ 1 + \cos \left[\left(\Omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t + \frac{\varphi_B + \varphi_C}{2} \right] \cos \left[\frac{\Delta\omega}{2} + \frac{\varphi_C - \varphi_B}{2} \right] \right\}. \quad (19)$$

Отсюда видно, что разность фаз низкочастотной составляющей $\Delta\omega/2$ сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$ пропорциональна соответствующим вторым производным, записанным в конечных разностях.

Таким образом, принципы построения указанных схем позволяют существенно повысить производительность и точность контроля, обеспечивая возможности технологического контроля материалов и изделий.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Как следует из представленной выше математической модели ГР-метода с гетеродинным преобразованием информационного поля в сигнал периодический сигнала с фазовой характеристикой, могут быть использованы следующие способы их реализации.

1. Перемещение структуры информационного поля в плоскости неподвижного фото приемного устройства (ФП) — гетеродинные методы. В этом случае выходной сигнал описывается следующей зависимостью:

$$u_l(t) = K \int_{E_l} R_a(r) \cdot S'(\omega t - \Omega r - \Phi_0) dr, \quad l = 1, 2, \dots, \quad (20)$$

где $R_a(r)$ — геометрия фотоприемника.

Часто используют собственную апертуру ФП, например:

$$R_a(r) = \text{circ} \left(\frac{r}{R_0} \right), \quad \text{при } R_0 = \frac{|T_s|}{2}. \quad (21)$$

Представляет интерес апертура большего размера, имеющей форму периодической структуры с периодом $T_a \approx T_s$. Это достигается конструкцией ФП или соответствующей диафрагмой.

2. Перемещение растрового фильтра в плоскости неподвижного информационного поля (ГР-преобразование). Элементами преобразования могут служить различные элементы, некоторые типы которых представлены в табл. 1, среди которых дисковые растровые модуляторы

Таблица 1

Типы устройств для ГР преобразователей

Тип раstra	Геометрия	Технология изготовления	Материал	Диапазон, мкм
Механический	Дисковый	Литография	Стекло	От 10
	Цилиндрический	Литография Фрезерно-механический Зуборезный	Д16Т Д16Т	От 300 до 4000
Электронно-механический	Дисковый	Литография, атомарно-лучевая эпитаксия	Кварц	От 10
	Цилиндрический	Литография, пиролиз поликристаллического кремния Координатное расположение набора ФП, дискретное перемещение	Сапфир Д16Т	От 1500 до 4000
Электронный	Плоский линейный	Линейка ПЗС, ПЗИ	p-Si	От 80 до 2500
	Плоский матричный	Матрица ПЗС, ПЗИ	n-Si	
Оптический	Плоский	Акустооптический	TeO ₂ , PbMoO ₄ , LiNbO ₃ , SiO ₂	'1
	Плоский	Пленочный	Диэлектрик	От 1 до 1000

эффективно могут применяться только в одноточечных схемах, а цилиндрические в многоточечных. Цилиндрические системы могут быть линеаризованы в плоскость (цилиндрической оптикой,

например, объективом, задний отрезок которого совпадает с осью цилиндра), что делает возможным их использование для анализа сложных яркостных полей от волновых фронтов с большей апертурой. Эвольвентный профиль прорезей для механических цилиндрических растров позволяет увеличить угловую апертуру.

3. Сканирование ФП. Гетеродинно-растровое преобразование может осуществляться электронно-механической системой, представляющей собой перемещающийся ФП, выполненный в виде фоточувствительного слоя, имеющего геометрию раstra, или сплошного фоточувствительного слоя с апертурой диафрагмой в виде раstra

$$u_1(t) = K \int_{(E'_1(t))} R_a(r) \cdot S(r) dr, \quad (22)$$

где $(E'_1) = (E_1)R(r, t)$.

Выходной сигнал с перемещающейся фоточувствительной структуры может передаваться на неподвижную часть устройства бесконтактным трансформатором токосъемником [24]. Сканирование ФП устройства с ГР-преобразованием можно реализовать путем задания закона движения ФП, например, для набора ФП равномерно расположенных по окружности с периодом T_R , приводимого в движение шаговым двигателем (время шага τ_0 , линейный период T_0 дают частоту модуляции $f_0 = (T_0 - T_R)/\tau_0 T_R$).

4. Многоэлементные ФП, у которых периодически во времени изменяется характеристика преобразования свет—сигнал элементов, сигналы с элементов суммируются, а фаза модуляции в пространстве распределена по закону $\Phi(r) = \Omega r$. Такая система эквивалентна сканированию ФП. Такие системы реализуются на линейных и матричных ФП типа ПЗС (прибор с зарядовой связью) или ПЗИ (прибор с заряд-инжекцией) [25]. Гетеродинно-растровое преобразование при этом достигается получением набора N дискретно заданных m значениями однопериодных выходных сигналов $\{u_l(k)_{k=1}^m\}$, $l = 1, 2, \dots, N$, которые являются суммой сигналов с групп элементов матричного ФП с весовыми функциями раstra, определяющих временную модуляцию выходных сигналов (по k) [17]:

$$u_l \left[\frac{p}{m}(k-1) \right] = \sum_{\Delta(i,j) \in E_l} S_{ij} R_{ij} \left[\frac{p}{m}(k-1) \right], \quad (23)$$

$$S_{ij} = K_{ij} \int_{\Delta(i,j)} S(r) dr, \quad (24)$$

где k_{ij} — чувствительность преобразования свет—сигнал (i, j) элемента приемника с апертурой $\Delta(i, j)$. Применение матричных ФП в рамках ГР-метода позволяет оперативно выбирать диапазон измерения, осуществлять измерения геометрических параметров различных структур, имеющих сложную форму. Использование массива микролинз перед матричным ФП и заданного алгоритма суммирования сигналов с фотодиодов [26] позволяет осуществить двойное гетеродинирование, определение смещение поверхности по оси визирования регистратора [26].

5. Оптические растры. Гетеродинно-растровое преобразование реализуется путем перемещения оптической структуры (акустооптические модуляторы) или может быть реализовано на основе «стоппинг-эффекта» в тонких диэлектрических волноводах [27], волоконно сопряженных с набором ФП. Координатно-чувствительный растр с преобразованием координаты в частоту и фазу сигнала может быть реализован двух лучевой интерференцией с двумя оптическими частотами, полученных в устройствах на базе эффекта Доплера или эффекта Зеемана [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель гетеродинно-растрового преобразования локализованных и периодических яркостных полей может быть использовано не только в методах контроля на базе голографической и спекл-интерферометрии, но и в оптических измерительных схемах контроля различных геометрических и физических параметров изделий. При этом такие системы легко встраиваются в автоматизированный технологический процесс или автоматизированную систему мониторинга наблюдаемой ОЭС обстановки, имеют высокую чувствительность к измеряемому параметру, помехозащищенность к механической нестабильности измерительной системы и широкий яркостной и измерительный динамический диапазон.

Существуют новые средства получения периодических сигналов, где информационным носителем является фазовый параметр. Одним из способов формирования аналога периодической выборки сигнала является алгоритмы обработки сигналов с фотодиодов твердотельных матричных и

растровых структур фотоприемников. Перспективным направлением является использование массивов матричных и растровых структур, который может быть получен, например, путем массива микролинз, массива оптических капилляров перед матричным фотоприемником — регистратор светового поля. Использование ЦК светового поля может алгоритмически решить вопрос неопределенности плоскости локализации яркостных полей, обеспечивает дополнительно сканирование поле зрения.

Перспективным направлением является применение обработки сигналов с растровых структур в таких важных областях как средствах мониторинга объектов космического мусора. При этом остаются не до конца решенными вопросы быстродействия таких систем и автоматизации процесса измерений.

Все схемы ГР-контроля позволяют повысить производительность и точность контроля, обеспечивая возможности технологического контроля.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optical Shop Testing / Edited Daniel Malacara. Copyright @ 2007 by Wiley-Interscience A John Wiley & Sons, Inc., Publication. 861 p.
2. Махов В.Е., Шалдаев С.Е. Высокоточные оптические измерительные системы формы изделий и инструмента // Вестник Донецкого национального технического университета. 2016. № 4 (4). С. 50—57.
3. Potapov A.I., Makhov V.E. et al. Smart-Camera-Based Linear Sizing // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 7. P. 524—532. [Потапов А.И., Махов В.Е., Смородинский Я.Г., Маневич Е.Я. Контроль линейных размеров на база смарт-камеры // Дефектоскопия. 2019. № 7. С. 37—45.]
4. Махов В.Е., Потапов А.И. Использование алгоритмов вейвлет анализа для построения оптических измерительных систем // Контроль. Диагностика. № 1 (175). 2013. С. 12—21.
5. Махов В.Е., Потапов А.И., Шалдаев С.Е. Контроль геометрических параметров изделий методом светового поля // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 12—24.
6. Bok Yunsu, Jeon Hae-Gon, Kweon In So. Geometric Calibration of Micro-Lens-Based Light-Field Cameras Using Line Features // European Conference on Computer Vision (ECCV), Sep 2014. Springer International Publishing. P. 47—61.
7. Вест Ч. Голографическая интерферометрия / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 504 с.
8. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / Учебн. пособие для вузов. 2-е изд. Перераб. и доп. М.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1983. 696 с.
9. Dandliker R. Heterodune holographic interferometru / Progress in Optik. Ed. E.Wolf. 1980. V. 17. P. 3—84.
10. Махов В.Е., Потапов А.И. Гетеродинно-растровый метод контроля качества изделий // АН СССР. Дефектоскопия. 1989. № 10. С. 68—84.
11. Гаврилов Г.А., Сотников Г.Ю. Разрешающая способность преобразователей оптического изображения на основе ПЗС / В кн.: Оптическая обработка изображений. Л.: Наука, 1985. С. 90—103.
12. Kučera J. Computational photography of light-field camera and application to panoramic photography (Prague). 2014. 98 p.
13. Makhov V.E., Sytko I.I. Shape and Relief Evaluation Using the Light Field Camera // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. С. 022020.
14. Махов В.Е., Потапов А.И. Способ определения температурной деформации образца и устройство для его осуществления. А.с. №1392354. 13.04.88. Бюллетень № 16.
15. Методы и приборы для точных дилатометрических исследований материалов в широком диапазоне температур. (Третье Всесоюзное совещание, тезисы докладов). Л.: Госкомитет СССР по стандартам, 1984. 151 с.
16. Makhov V.E., Potapov A.I. et al. Using Two-Beam Interferometry in Surface Deformation Monitoring Systems // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 8. P. 622—629. [Махов В.Е., Потапов А.И., Смородинский Я.Г., Маневич Е.Я. Использование двухлучевой интерферометрии в системах контроля деформации поверхностей // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 59—66.]
17. Махов В.Е., Потапов А.И. Анализ эффективности оптического метода контроля капилляров. Теоретические основы оптического контроля капилляров // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2013. № 7 (196). С. 48—56.
18. Махов В.Е., Певзнер Б.З. Влияние типа структуры на свойства гетерогенных материалов // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1985. № 9. С. 1599—1607.
19. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах / Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. 168 с.
20. Махов В. Использование непрерывного вейвлет-преобразования в интерферометрии // Компоненты и технологии. 2015. № 11 (172). С. 132—136.

21. *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339с.
 22. *Джоунс Р., Уайкс К.* Голографическая и спекл-интерферометрия / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 328 с.
 23. *Maksarov V.V., Makhov V.E.* Method for studying the shape of the cutting tool Light field recorder // AER-Advances in Engineering Research. V. 1. 2017. P. 452—457.
 24. *Руднев О.Н., Лебедев В.Г.* Повышение точности измерительных систем с вращающимися термоприемниками // Измерительная техника. 1975. № 7. С. 63—65.
 25. *Пресс Ф.П.* Формирование видеосигнала на приборах с зарядовой связью. М.: Радио и связь, 1981. 136 с.
 26. *Махов В., Потапов А., Закутаев А.* Принципы работы цифровых камер светового поля с массивом микролинз // Компоненты и технологии. 2018. № 1 (198). С. 14—20.
 27. *Интегральная оптика* / Под ред. Т. Тамира. Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 344 с.
 28. *Дьяконов М.И., Фридрихов С.А.* Газовый лазер в магнитном поле // УФН. 1966. Т. 90. Вып. 4. С. 565—600.
-