

УДК 53.087.92 + 681.7.064.64

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-10-43-49

Инвариантность результатов измерений к неидеальностям прозрачных носителей при контроле точности углоизмерительных структур

© 2018 г. **А. В. Кирьянов, канд. техн. наук; В. П. Кирьянов, доктор техн. наук**

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: kiryanov@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 28.05.2018

Рассмотрены особенности контроля погрешности формирования топологии угловых лимбов, растров или многорядных кодовых дисков. Показано, что при контроле точности изготовления этих изделий в режиме «на просвет» существующие углоизмерительные машины подвержены возмущающему воздействию со стороны неидеальностей прозрачных носителей объекта контроля. В статье рассмотрена возможность использования повторного прохождения зондирующего луча через прозрачный носитель, позволяющая реализовать процесс измерений, инвариантный к неидеальностям оптической подложки.

Ключевые слова: углоизмерительная структура, топология элемента, угловая погрешность, углоизмерительная машина.

Коды OCIS: 230.4000, 230.0250, 230.0040, 120.5475.

1. ВВЕДЕНИЕ

Оперативный контроль точности изготовления углоизмерительных структур (УИС) типа угловых лимбов, растров или многорядных кодовых дисков позволяет существенно снизить производственные издержки и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. В настоящее время в России имеется весьма ограниченное число измерительных комплексов, ориентированных на метрологический контроль именно УИС (практически 2–3 работающих комплекса). В связи с этим, к настоящему времени слабо разработана как теория построения этих своеобразных измерительных комплексов, так и методика их использования. К числу слабо проработанных вопросов относится, например, проблема зависимости результатов измерений метрологических характеристик УИС от возмущающего воздействия неидеальностей прозрачных носителей УИС. В данной работе эта проблема рассматривается на примере углоизмерительной машины (УИМ) модели АС-700, ориентированной на выполнение измерений основных характеристик УИС в составе технологического оборудования, используемого при выпуске углоизмерительного оборудования (оптоэлектронных датчиков угла, теодолитов, тахеометров и т.д.) [1].

2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ, ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА КОНТРОЛЬ ПОГРЕШНОСТИ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Одной из немногих в России УИМ, ориентированных для работы с УИС, является установка АС-700, созданная и эксплуатируемая специалистами АО «ПО «УОМЗ» [2]. Особенности построения и работы УИМ АС-700 достаточно подробно рассмотрены в публикациях [3, 4]. В основу работы данной УИМ положен так называемый динамический принцип измерения. Согласно этому принципу образцовая и контролируемая структуры устанавливаются на общем валу, который приводится в режим вращения с постоянной скоростью. Если контролируемая и образцовая структуры имеют одинаковое число элементов топологии, то регистрируемый разброс пространственного положения элементов топологии контролируемой структуры относительно соответствующих элементов топологии образцовой структуры является мерой неточности формирования топологии контролируемой структуры. Количественные показатели разброса получают путём заполнения временных

интервалов, границы которых определяются метками F_i , выделенными в ходе регистрации контролируемых признаков структур (например, краёв штрихов контролируемой и образцовой структур: метки F_1, F_2 и F_3 , соответственно).

Здесь события F_1 и F_2 соответствуют моментам прохождения мимо входной щели устройства регистрации переднего и заднего краёв штрихов контролируемой структуры, а F_3 — моментам формирования передних краёв штрихов образцовой структуры.

Края штрихов образцовой структуры выделяются из выходных сигналов считывающих головок встроеного фотоэлектрического углового преобразователя. Для выделения краёв контролируемой структуры предусмотрен специализированный микроскоп с щелевой диафрагмой, работающий «на просвет».

На рис. 1 приведён пример формирования i -го события в потоке F_1 (импульса U_{dif} на выходе дифференцирующей цепи), отображающего факт прохождения переднего края штриха растра перед входной щелью фотоприёмника.

В контроллере УИМ из импульсных потоков F_1, F_2 и F_3 формируются новые импульсные потоки $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$, в которых информативным параметром выступают разности абсолютных моментов событий F_1 и F_3 или F_2 и F_3 , характеризующие разброс положений краёв штрихов контролируемого объекта относительно соответствующих краёв шкалы, взятой в качестве эталона.

Количественные оценки разброса получают в ходе измерения длительности интервалов $\Delta\Phi_i$

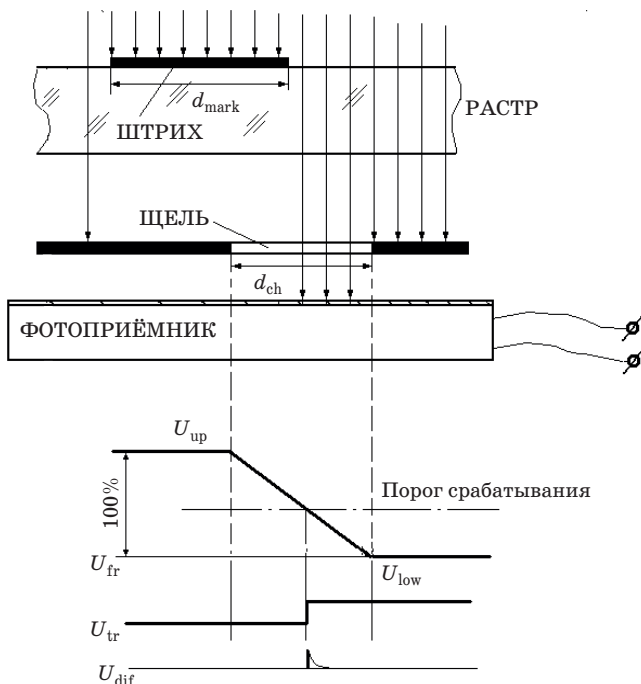


Рис. 1. Пример детектирования края штриха.

путём заполнения их импульсами последовательности F_4 , мгновенная частота следования которых пропорциональна мгновенной частоте потока событий F_3 , умноженной в k раз. Это позволяет получить точный результат при наличии в пределах оборота ограниченных изменений мгновенной скорости вращения контролируемого объекта.

Оценка разброса положений краёв штрихов может быть выполнена как за один оборот контролируемой структуры, так и за несколько оборотов. Поэтому массивы данных в контроллере УИМ подвергаются предварительной обработке, включающей в себя усреднение результатов контроля и подавление в спектре кривой погрешности контролируемой УИС первой гармоники, с которой связывают эксцентриситет установки контролируемой УИС на оправку УИМ. Так как эта составляющая погрешности не характеризует качество изготовления УИС, то её вычлняют из дальнейших оценок.

3. НЕДОСТАТКИ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Примеры кривых погрешности лимбов геодезических приборов (число штрихов $n = 360$), сформированных с помощью лазерного генератора изображений CLWS-300 [3] и обработанных по стандартной программе, приведены на рис. 2.

Результаты контроля указывают, что погрешность формирования топологии лимбов лежит в пределах $\pm(1,2-1,5)''$. Однако первое, на что пришлось обратить внимание, — это слабая повторяемость формы кривых погрешности однотипных растров, сформированных на одной и той же установке, практически в одних и тех же условиях.

В работах [4] и [5] анализировались результаты этих измерений и были выдвинуты предположения относительно возможных причин подобных искажений результатов измерений. Указывалось, что в их числе могли быть такие, количественный вклад которых соизмерим с погрешностью самой измерительной установки, но они входили в измерительный процесс каждый раз со случайной фазой, что приводило к непредсказуемым результатам. Поэтому в качестве первых шагов по снижению неопределённости измерений метрологических характеристик синтеза топологии УИС было предложено использовать методики измерений, позволяющие отделять искажающий вклад, идущий в итоговый результат от измерительной аппаратуры, от погрешности формирования топологии УИС, идущий от технологического оборудования [6].

Указанным свойством обладает, например, фазостатистический метод или метод двух шкал [7, 8]. Фазостатистический метод (ФСМ) позволяет реализовать высокоточные измерения, используя при этом в качестве эталона сравнения шкалы с классом точности, близким контролируемой.

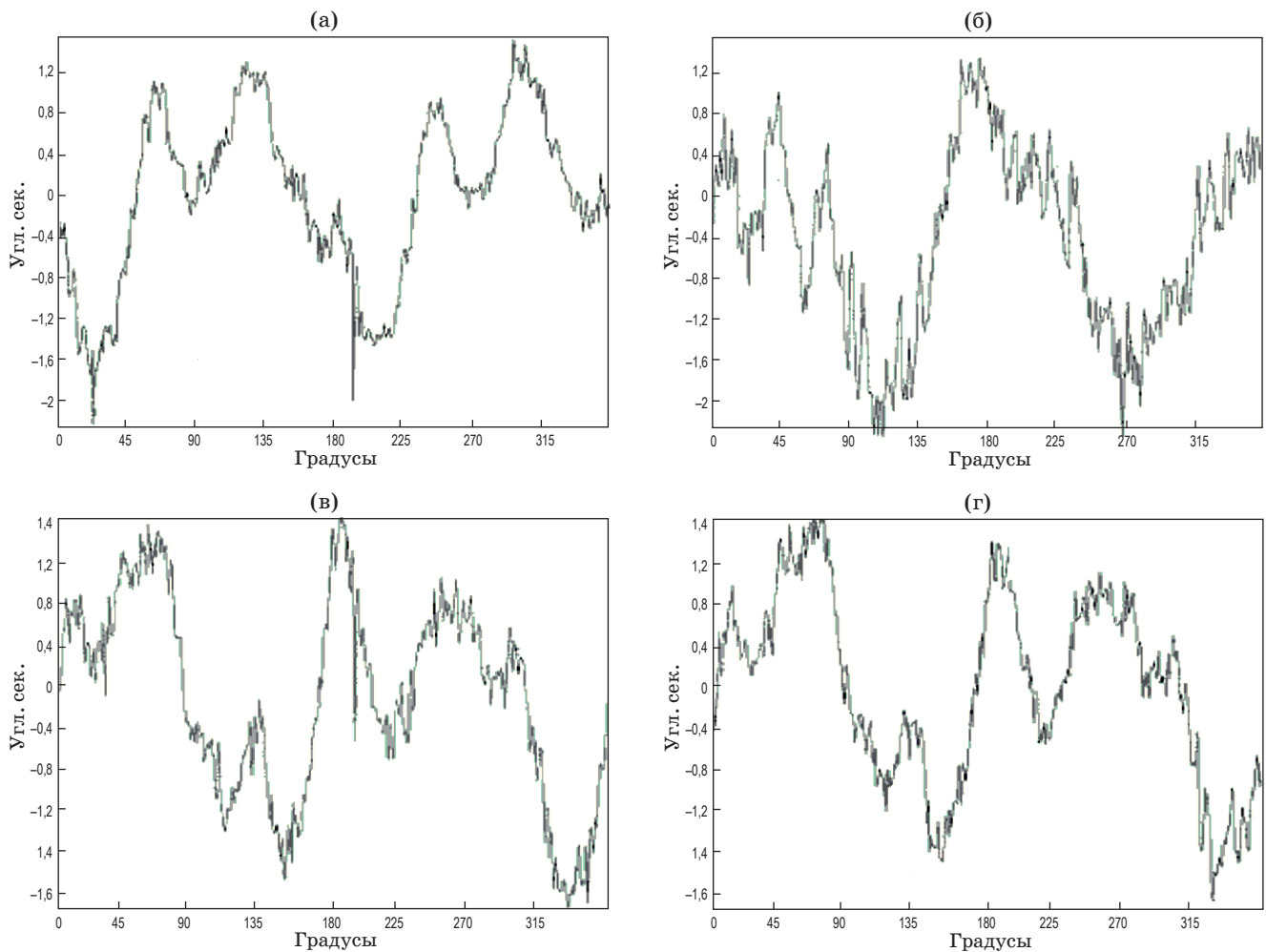


Рис. 2. Примеры кривых погрешности формирования лимбов.

Для реализации этого метода берут две шкалы и измеряют смещение штрихов $\Delta\Phi_i$ одной шкалы относительно штрихов другой при различных начальных положениях шкал. Результаты измерений запоминают в виде матрицы данных, размерностью $[m \times N]$:

$$D_1 = \{\Delta\Phi_{11} \dots \Delta\Phi_{1i} \dots \Delta\Phi_{1N}\},$$

$$\dots\dots\dots$$

$$D_m = \{\Delta\Phi_{m1} \dots \Delta\Phi_{mi} \dots \Delta\Phi_{mN}\}, \quad (1)$$

где N — число штрихов в шкалах, m — число взаимных положений двух шкал. Порядок размещения измеренных данных привязан к некоторому заранее выбранному реперу, например, метке начала оборота одной из шкал.

Для оценки метрологического качества УИС, изготовленных с помощью лазерного генератора изображений, была изготовлена специальная партия подложек класса 0 ($N = 0,5; \Delta N = 0,1$), на которых в течение короткого времени было записано 16 однотипных УИС, приспособленных для использования ФСМ при измерениях на АС-700.

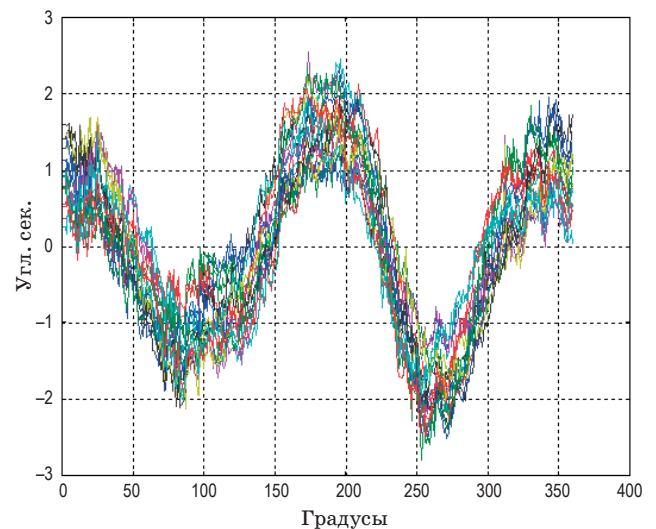


Рис. 3. Результат совмещения 16 кривых погрешности изготовления однотипных УИС.

Полученные 16 кривых, характеризующих погрешность изготовления, были сведены вместе на одном графике (рис. 3).

На приведённом графике каждая из 16 кривых представлена своим цветом. Это позволяет выделить две важные особенности: первая — наличие повторяемости характерных особенностей высокочастотных искажений формы кривых погрешности изготовления каждой из шкал и вторая — наличие относительных низкочастотных смещений кривых погрешности (диапазон смещений $\pm(0,4-0,6)''$). Для полученного значения погрешности изготовления растров, равного $\pm 2,2''$, неопределённость контроля, вызванная этими разбросами показаний, составляет 22%. Столь высокая неопределённость результатов контроля УИС требует анализа причин подобных нестабильностей и разработок методов их преодоления.

Предварительный анализ результатов контроля дал основания связывать зарегистрированные отклонения с действием характерных искажений, вносимых стеклянными подложками, на которых были записаны УИС, и которые могут входить в результат измерений с произвольной фазой.

4. СЛУЧАЙНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПОГРЕШНОСТИ СЧИТЫВАНИЯ ДАННЫХ С КОНТРОЛИРУЕМОГО ЛИМБА

В работах [3] и [9] были исследованы важнейшие источники искажений, вносимых в результаты контроля точности изготовления углоизмерительных структур, в том числе измерительной установкой из-за присутствия в измерениях прозрачного носителя — стеклянных подложек.

4.1. Погрешность эксцентриситета

Наиболее существенным случайным составляющим погрешности измерений $\delta\varphi_{\text{мес}}$ является компонент $\delta\varphi_{\text{ex}}$, обусловленный неточным совмещением центра шкалы с осью вращения шпинделя (известный как погрешность эксцентриситета). Этот компонент погрешности меняется периодически, один раз за оборот шкалы. Чаще всего, этот компонент не характеризует качество изготовления контролируемой шкалы, а определяется неточностью установки её на оправке шпинделя. Считается, что данный тип погрешности может быть устранён в конечном изделии при тщательной юстировке шкалы или при использовании двух головок считывания, установленных диаметрально противоположно. По этой причине в стандартной методике измерений погрешность эксцентриситета не принимают во внимание при оценке качества изготовления шкал и её программно устраняют из результатов контроля.

Но прозрачный носитель УИС сам по себе может вносить составляющие погрешности, изменяющиеся периодически, в том числе меняющиеся один раз за оборот, например, влияние клиновидности подложки.

4.2. Влияние клиновидности подложек на погрешность измерений

Когда у подложки между рабочей и нерабочей поверхностями имеется слой стекла разной толщины, меняющийся линейно от одного края диаметра к другому (рис. 4), то говорят о клиновидности подложки.

Здесь на оправке 1 установлена контролируемая УИС, сформированная на рабочей поверхности 3 подложки 2. Как правило, рабочая поверхность 3 подложки 2 входит в механический контакт с полированным фланцем оправки 1. Выходной луч 5 системы подсветки с помощью поворотного зеркала 6 направляется на контролируемую структуру и далее проходит через нерабочую поверхность 4 подложки 2 на вход линзы 7 микрообъектива системы считывания информации. Клиновидность подложки подобно классической призме приводит к изменению ориентации луча на выходе из подложки. Считая, что отклонение луча происходит в направлении наибольшей толщины подложки, получим, что при её вращении луч описывает коническую поверхность синхронно с вращением подложки. Соответственно, на поверхности входной линзы 7 микрообъектива луч описывает окружность 8, радиусом Δr

$$\Delta r = Htg\beta, \quad (2)$$

где H — рабочий отрезок микрообъектива, β — параметр клиновидности подложки. Соответственно, по этой окружности вокруг оси микрообъектива совершает паразитное движение вся топология УИС. Микрообъектив с увеличением k^{\times} переносит эти качания штрихов раstra в плоскость входной диафрагмы системы регистрации (на рисунке не показана). Тангенциальная проекция вектора качаний изображений штрихов вносит дополнительную угловую ошибку в результатах регистрации границ штрихов, синхронную с частотой вращения заготовки.

4.3. Влияние неплоскостности рабочей поверхности подложки

Неплоскостность рабочей поверхности подложки можно характеризовать в любой точке её поверхности отклонением нормали, восстановленной в этой точке, от вертикали. В общем случае, при

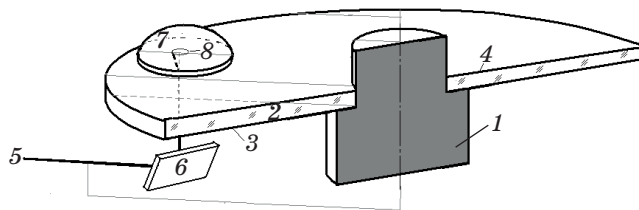


Рис. 4. Механизм образования погрешности измерений от клиновидности подложки лимба.

вращении подложки вместе со шпинделем на одном обороте неплоскостность может дать несколько изменений направления нормали к поверхности подложки относительно вертикали.

В каждой точке поверхности подложки неплоскостность проявляет себя как локальная клиновидность, вклад которой в общую погрешность измерения можно оценить по формуле, аналогичной (2), в которой параметр клиновидности β представлен углом между нормалью к поверхности и вертикалью. Для случая, когда рабочая поверхность лимба представляет собой, например, часть цилиндрической поверхности («корытообразная» поверхность), угол β меняет свой знак два раза за оборот. Радиус флюктуаций топологии в этом частном случае можно выразить через параметр неплоскостности поверхности, оцениваемый в числе интерференционных полос N

$$\Delta r = H\Delta h/R = HN\lambda/2R, \quad (3)$$

где $\Delta h = N\lambda/2$, N — неплоскостность рабочей поверхности подложки в числе интерференционных полос, λ — длина волны света ($\lambda = 0,55$ мкм).

Если нерабочая поверхность лимба не идеальна, то она также может искажать ход зондирующего луча. Выражение для смещения луча в плоскости передней линзы считывающего объектива для случая клиновидности нерабочей поверхности будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta r = -Hn_{gl}\Delta h/R = -HN\lambda n_{gl}/2R, \quad (4)$$

где n_{gl} — показатель преломления стекла.

4.4. Влияние локальных искажений поверхности

Локальная неплоскостность оценивается на практике в долях интерференционной полосы ΔN . Её вклад также можно оценить параметром клиновидности β , абсолютное значение которого обратно пропорционально размеру локального искажения L . Смещение луча, обусловленное действием локальной неплоскостности, можно представить в виде

$$\Delta r = 2H\Delta h/L = H\Delta n\Delta N\lambda/L. \quad (5)$$

Локальные искажения занимают только часть рабочей поверхности лимба, поэтому вносимые ими искажения создают более высокочастотные составляющие в спектре кривой погрешности, чем составляющие от глобальных искажений.

Таким образом, из выполненного анализа следует, что результаты измерений погрешности формирования топологии УИС на УИМ АС-700 чувствительны к различным дефектам изготовления стеклянной подложки УИС, причём как к дефектам поверхности, так и внутренним дефектам подложки.

5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ К НЕИДЕАЛЬНОСТЯМ ПРОЗРАЧНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИ КОНТРОЛЕ ТОЧНОСТИ УИС

Для того, чтобы результаты контроля качества изготовления топологии УИС не зависели от неидеальностей прозрачных подложек, на которых формируется топология контролируемых УИС, необходимо использовать методы контроля, инвариантные (нечувствительные или малочувствительные) к действию неидеальностей прозрачных носителей.

Одним из таких методов, обеспечивающих инвариантность процесса контроля УИС к изменчивости характеристик прозрачных носителей топологии УИС, является метод повторного прохождения через данную прозрачную среду [10]. Его реализация на основе активного зеркала, управляемого по двум координатам, изложена в описании к патенту РФ № 2242715 [11].

Близкий результат может быть получен за счёт использования более простых технических средств, когда вместо активного зеркала на базе двухкоординатного дефлектора со всеми связанными с ним средствами управления используют пассивный световозвращатель, сохраняющий направление отражения, точно совпадающее с направлением падения лучей. Таким свойством обладают, например, отражатели типа «кошачий глаз». На рис. 5 приведена функциональная схема системы считывания с контролируемого раstra, инвариантная к неидеальностям прозрачного носителя 1 за счёт использования отражателя на основе асферического зеркала 6.

Вначале рассмотрим случай, когда стеклянный носитель контролируемого раstra не имеет дефектов. В анализируемой системе используется зондирующий луч 3, имеющий вертикальный вектор поляризации (на схеме обозначен значком \bullet). Поляризационный светоделитель 4 ориентирован таким образом, что пропускает входящее зондирующее излучение напрямую. Как следствие, излучение 3 попадает на вход микрообъектива 5, и с его помощью оно фокусируется на рабочей поверхности стеклянного носителя, на которой нанесена топология контролируемого раstra.

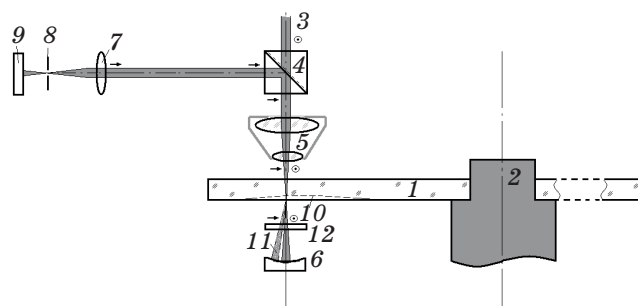


Рис. 5. Функциональная схема системы считывания информации на основе световозвращателя «кошачий глаз».

При наличии прозрачных окон в топологии раstra зондирующее излучение выходит из носителя без каких-либо искажений. Далее уже расфокусированным оно попадает на четвертьволновую пластину 12. На выходе из четвертьволновой пластины линейная поляризация зондирующего луча преобразуется в циркулярную. С такой поляризацией зондирующий луч попадает в центральную зону зеркала 6. Зеркало 6 установлено конфокально по отношению к микрообъективу 5. Это позволяет ему отразить попавшие на него лучи точно назад. В результате эти лучи снова проходят через четвертьволновую пластину 12, на выходе из которой циркулярная поляризация луча снова возвращается к линейной, но уже с горизонтальной ориентацией вектора поляризации (на схеме обозначен значком \rightarrow). Затем зондирующее излучение собирается в точке фокусировки на поверхности стеклянного носителя, проходит через него и поступает на вход микрообъектива 5. С его выхода оно попадает на поляризационный светоделитель 4, который теперь не пропускает его прямо, а отражает от светоделительной плоскости и направляет излучение на тубусную линзу 7 и далее на целевую диафрагму 8 и фотоприёмник 9. В этой схеме регистрации применение поляризационного светоделителя принципиально важно для повышения отношения «сигнал-шум» при контроле топологии растров, изготавливаемых с помощью металлических плёнок, например, хрома, алюминия или золота. В этом случае зондирующее излучение, прошедшее через прозрачный носитель будет отражаться от плёнки (частично или полностью). Далее оно будет возвращаться через светоделитель 4 к источнику излучения и, что важно, оно не будет попадать на фотоприёмник 9. В то время как излучение, отражённое зеркалом 6, будет проходить на фотоприёмник 9.

Если же стеклянный носитель 1 контролируемого раstra не идеальный и имеет дефект, например, в виде локальной неплоскостности 10 (представлена на рисунке пунктирной линией), то на

выходе из прозрачного носителя изначальный ход зондирующих лучей будет нарушен. В результате выходные лучи 11 достигнут поверхности зеркала 6 в окрестности его центральной зоны. Кривизна периферийных зон зеркала 6 подобрана так, чтобы лучи, падающие на зеркало в окрестностях центральной зоны, возвращались им точно назад по направлению, по которому они поступили на зеркало 6. Благодаря этому зондирующие лучи, возвращённые отражателем 6, при прохождении через прозрачный носитель 1 в обратном направлении вновь попадут на ту же оптическую неидеальность, получат на ней искажение, проявляющее себя с противоположным знаком. Как следствие, на выходе из оптической неидеальности зондирующие лучи приобретают направление дальнейшего распространения, точно совпадающее с первоначальным. В этом случае система регистрации 8, 9 фиксирует границы штрихов неискажёнными несмотря на наличие дефекта в прозрачном носителе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При контроле точности изготовления топологии УИС в режиме «на просвет» существующие УИМ подвержены возмущающему воздействию со стороны неидеальностей прозрачных носителей УИС, таких как клиновидность, неплоскостность рабочей и нерабочей поверхностей, пузырчатость, свиля.

Для повышения точности контроля перспективно использование принципа повторного прохождения зондирующего луча через прозрачный носитель, позволяющего при использовании специальных световозвращателей создать процесс измерений, инвариантный к неидеальностям прозрачных носителей, на которых сформирована углоизмерительная структура.

Исследование выполнено за счёт средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (Проект IV. 36.1.3 № гос. регистрации 031920160009) в ИАиЭ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Ю.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кокарев С.А., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.В.* Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 8. С. 61–65.
2. *Кручинин Д.Ю., Яковлев О.В., Андронов М.П.* Исследование влияния условий синтеза круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300, на их угловые погрешности // Оптический журнал. 2013. Т. 79. № 7. С. 41–44.
3. *Bartik S.A., Frizin S.E., Kiraynov A.V., Kiraynov V.P., Kokarev S.A., Kruchinin D.Yu., Nikitin V.G., Yakovlev O.B.* Development of technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesis of high precision angular measuring structures // 10-th IMEKO TC-7 International Symposium, Saint-Petersburg, 2004. V. 2. P. 316–320.
4. *Кирьянов А.В., Кирьянов В.П., Волохов И.В., Бобков А.В.* Использование метода кругового сканирования для формирования и контроля топологии прецизионных фотошаблонов интегральных датчиков физических величин // Оптический журнал. 2016. Т. 82. № 7. С. 26–31.

5. *Кирьянов А.В.* Снижение погрешности формирования прецизионных углоизмерительных структур // Автореф. канд. дис. Новосибирск: КТИ НП СО РАН, 2008. 20 с.
6. *Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кручинин Д.Ю., Яковлев О.Б.* Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 12. С. 40–49.
7. *Portman V., Peschansky B.* Phase-statistical method and device for high precision and high efficiency angular measurements // Precision Engineering. 2001. V. 25. P. 309–315.
8. *Kiryakov V.P.* Phase-statistical method in high-precision angle measuring technologies: special features of use // ACIT 2010: Proceedings of the IASTED International Conferences on Automation, Control, and Information Technology, 2010. P. 296–299.
9. *Kiryakov V.P., Kiryakov A.V., Kokarev S.A., Nikitin V.G., Vedernikov V.M.* Determination of metrological performance technology for forming the precision angular measuring structures using laser image generators with circular scanning. Proceeding of the 2-nd International Symposium Mechanical Measurements. Beijing. China. 2004. P. 129–133.
10. *Алексеев А.В., Кабанов М.В., Куштин М.Ф.* Оптическая рефракция в земной атмосфере. Новосибирск, 1982, 180 с.
11. *Кирьянов В.П., Кирьянов А.В.* Способ измерения точности изготовления углоизмерительных структур, нанесённых на прозрачный носитель // Патент России № 2242715. 2003.