

УДК 629.78:621.3

СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ЦИКЛЕ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

©2012 В. Н. Гришанов¹, А. А. Ойнонен²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)
²ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

Рассматриваются современные методы контроля геометрии изделий лазерными измерительными системами. Описаны основные принципы измерения и примеры устройств, их реализующие. Показаны преимущества лазерных измерительных систем над контактными. Проанализированы сложности, возникающие при интеграции лазерных измерительных систем в производственную цепочку предприятия, и намечены пути их преодоления.

Лазерный контроль геометрии, бесконтактные измерения, шаблон, лазерный трекер, крупногабаритный объект.

Введение

Важнейшим критерием качества продукции является соответствие геометрии изделия требованиям конструкторской документации. Если геометрию простых деталей или сборок легко измерить традиционными контактными механическими инструментами, то в случае сложных по форме конструкций это не всегда возможно. В изделиях космической техники сложных сборок – большинство, поэтому проблема контроля их геометрии стоит особенно остро.

С середины прошлого века контроль геометрии значительной части деталей и сборок проводят с помощью различных шаблонов. Технология подобного контроля отработана, проста, но имеет ряд принципиальных недостатков, т.к. на каждую группу контролируемых элементов требуется изготавливать свой шаблон. Эта технология часто не показывает величину отклонения от требований, заложенных в конструкторской документации. При внесении существенного изменения в конструкцию изделия шаблон приходится заменять. Сложность оснастки и самой процедуры измерений геометрии с применением шаблонов можно видеть на примерах, описанных в работах [1, 2].

Основными измерительными задачами, которые встают в процессе сборки космических аппаратов, можно считать контроль геометрии отдельных элементов, а также проверку взаимного расположения элементов изделия, особенно при креплении внешних координатных датчиков [3, 4]. Контроль необходим на всех этапах производства. Задачи измерения и определения положения решаются в робототехнических системах, в частности, для правильной стыковки корпусных элементов летательного аппарата.

Попытки использования лазерных систем в самолётостроении предпринимались со времени начала серийного производства лазеров [5, 6]. Тогда же были заложены принципы функционирования и классификации лазерных систем измерения геометрических параметров (ЛСИГП). Однако разработанные в 70-80-е годы XX века ЛСИГП серийно не производились, предусматривали визуальный отсчёт показаний, требовали высококвалифицированного обслуживающего персонала, и их применение ограничивалось рамками одного предприятия, возможности которого позволяли изготовить и аттестовать подобные устройства.

Современные автоматизированные ЛСИГП лишены недостатков, свойствен-

ных вышеупомянутым разработкам. Они производятся серийно, аттестуются, измерительная информация считывается фотоприёмными устройствами и оцифровывается. В связи с этим они находят всё более широкое применение во многих отраслях промышленности, особенно в машиностроении. Интерес к этим системам вызван их высокой точностью и производительностью в сочетании с бесконтактным способом производства самих измерений и цифровой формой представления результатов. Ещё одно преимущество ЛСИГП обусловлено их компактностью, т.е. их легко приблизить к измеряемому объекту, разместить в сборочном цехе в отличие от, например, координатно-измерительных машин, действие которых предполагает размещение измеряемого объекта на их столе.

С развитием новых информационных CAD/CAM-технологий возрастает актуальность внедрения компьютеризированных систем измерения геометрии в технологических процессах сборки и испытаний. Внедрение ЛСИГП позволит в ряде производственных процессов замкнуть контур обратной связи, т.е. перейти от CAD/CAM-технологий к CAD/CAM/CAMeas-технологиям (measurement – измерение) [7]. Пример цифровой цепочки от этапа конструирования современного самолёта до сборки готового изделия с применением ЛСИГП приведён в работе [8].

Лазерные системы измерения геометрических параметров

ЛСИГП могут функционировать на различных принципах, реализующих те или иные свойства лазерного излучения, обусловленные его когерентностью. Монохроматичность используется для защиты от фонового излучения, направленность, благодаря концентрации энергии, позволяет проводить измерения на протяжённых трассах, пространственная и временная когерентности лежат в основе разнообразных интерференционных схем из-

мерения. Использование коротких и сверхкоротких лазерных импульсов подсветки сводит многие задачи динамических измерений к статическим, устраняя влияние вибраций и смещений объекта. Управление параметрами излучения как в пространственной (структурированные лазерные пучки), так и временной (длительность импульсов, частота электромагнитной волны) способствует дальнейшему расширению спектра дистанционных бесконтактных методов измерения геометрических параметров изделий.

В области измерений линейных размеров корпусных изделий аэрокосмического назначения с характерной длиной $\sim 1 \dots 10$ м и допустимыми погрешностями $0,01 \dots 1$ мм (фюзеляж, космические аппараты, разгонные блоки, обтекатели и т.п.), оптимальным сочетанием рабочих дистанций, погрешностей измерений и их производительности в настоящее время обладают лазерные компьютеризированные системы типа FARO Laser Tracker [9], MV200 и т.п. Они имеют рабочую зону измерений в линейной мере до 100 м, а в угловой: 270° по азимуту и не менее $\pm 50^\circ$ по углу места. Погрешности измерения расстояний на дистанциях ~ 1 м составляют 10 мкм и приблизительно пропорционально увеличиваются до 100 мкм на дистанциях ~ 10 м, погрешность угловых измерений не превышает $10''$. Встроенная метеостанция позволяет частично нейтрализовать влияние параметров окружающей среды на результаты измерений.

Принцип работы лазерного трекера состоит в измерении двух углов и расстояния (рис.1). Трекер посылает лазерный луч к световозвращающему отражателю, который приводится в соприкосновение с поверхностью измеряемого объекта. Луч, отражённый от цели, возвращается по тому же пути и принимается трекером в той самой точке, откуда он был испущен. Часть отражённого световозвращателем света поступает в измеритель расстояний, который вычисляет расстояние от трекера до рефлектора. Измеритель расстояний может быть двух типов: ин-

терферометр (laser interferometers, IFM) или измеритель абсолютных расстояний (absolute distance meter, ADM).

Лазерный трекер содержит два датчика угла поворота головки (энкодера). Эти устройства измеряют угловую ориентацию двух механических осей трекера: оси азимута и оси высоты. Углов, полу-

ченных от энкодеров, и расстояния от измерителя расстояний достаточно для точного определения положения центра ретрорефлектора. Поскольку центр ретрорефлектора находится всегда на фиксированном расстоянии от измеряемой поверхности, координаты измеряемых точек или поверхностей легко вычисляются.

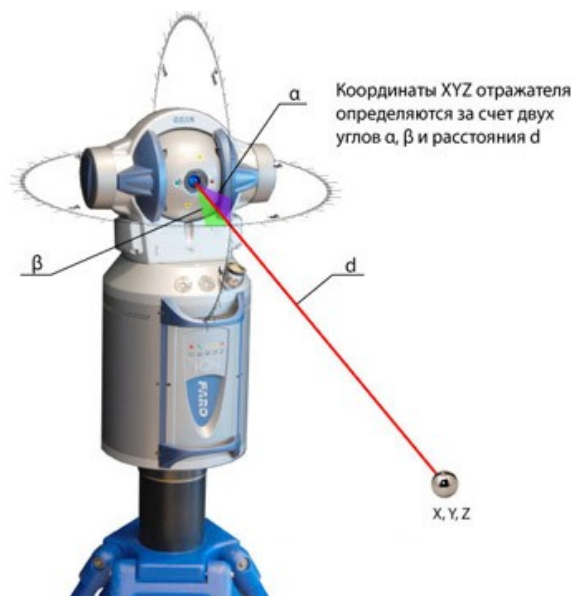


Рис. 1. Принцип определения координат с помощью лазерного трекера

В режиме интерферометра оператор помещает ретрорефлектор в исходную позицию на корпусе трекера и приводит показания интерферометра к известному расстоянию начальной позиции. По мере того, как оператор перемещает ретрорефлектор в необходимое положение на измеряемом объекте, лазерный луч следует за ним, оставаясь привязанным к центру ретрорефлектора. Этот метод работает до тех пор, пока лазерный луч от трекера до ретрорефлектора не встречает препятствия на своем пути. Но если луч обрывается, то показания счетчика теряют связь с положением ретрорефлектора и трекер выдает сигнал об ошибке. Оператор должен вернуть ретрорефлектор в опорную точку и повторить измерение.

Интерферометр реализуется на базе стабилизированного по частоте гелий-неонового лазера. Свет лазера разделяется на два луча. Один направляется прямо в интерферометр. Другой испускается тре-

кером, отражается от ретрорефлектора и на обратном пути поступает в интерферометр. Внутри интерферометра два луча интерферируют, следствием чего является циклическое изменение амплитуды электромагнитной волны всякий раз, когда ретрорефлектор приближается или удаляется от трекера на расстояние, равное половине длины волны (~0,316 мкм). Электронная схема подсчитывает количество циклических изменений интенсивности (известное как «счёт полос») для вычисления пройденного светом расстояния, которое складывается с расстоянием до опорной точки и является расстоянием относительным.

В ADM используется та или иная разновидность фазовых измерений расстояния. Например, в трекере MV200 пилообразно модулируется частота лазерного излучения, а гетеродинный фотоприёмник преобразует расстояние (запаздывание по фазе) принятого сигнала в частоту.

ту. Сегодня некоторые измерители абсолютных расстояний обладают достаточной быстротой, чтобы обеспечить высокоскоростное сканирование с пренебрежимой потерей точности. Поэтому некоторые современные трекары содержат только ADM и не используют интерферометр при измерениях. При согласовании зоны однозначности фазовых измерений с максимальной удалённостью объекта система ADM измеряет расстояние до цели автоматически, даже если луч перед этим был прерван. Кроме того, появляется возможность работы без использования ретроотражателей по любым поверхностям с коэффициентом отражения, превышающим значение 10^{-9} .

Одним из отличительных признаков трекара является автоматическое управление угловыми координатами испускаемого луча. Трекер направляет луч в нужном направлении посредством поворота механических осей. Во многих приложениях трекары должны удерживать луч в центре передвигающегося ретрорефлектора. Он выполняет это, направляя часть отраженного рефлектором луча на позиционно-чувствительный детектор. Если луч лазера попадает не в центр рефлектора, то отражённый луч тоже не попадает в центр детектора позиции и формируется сигнал ошибки. Этот сигнал контролирует поворот механических осей для удержания луча лазера в центре ретрорефлектора.

Трекары позволяют с высокой точностью измерять геометрические примитивы (точки, окружности, плоскости, конусы, цилиндры и т.д.), расстояние и углы между ними, отклонение формы и взаимного расположения. Также возможно контролировать сложные криволинейные поверхности методом сравнения с CAD моделью.

Координаты точек рассчитываются компьютером в системе координат трекара за счёт известных двух углов поворота головки по горизонтали и вертикали и известной дальности до отражателя. Для измерения того или иного геометрического элемента оператор должен замерить на

его поверхности определённое количество точек. Например, для линии - минимум 2 точки, для плоскости - минимум 3 точки, для окружности - минимум 3 точки и т.д. Программное обеспечение определяет координаты центра элемента, его действительные геометрические размеры и отклонения формы. Также возможно контролировать линейно-угловые размеры между измеренными элементами и производить анализ их взаимного расположения (непараллельность, неплоскостность и т.д.). Для измерения криволинейных поверхностей деталей существует возможность импорта CAD моделей в программное обеспечение для контроля методом сравнения с CAD моделью.

Особенностью трекаров является мобильность. Трекер упаковывается в кейсы и легко транспортируется в любое место для проведения измерений. Использование магнитной плиты и треноги позволяет быстро и надёжно устанавливать лазерный трекары вблизи измеряемого объекта. Температурные датчики постоянно следят за окружающей обстановкой и вносят корректировку в результат замеров. Для контроля изделий, габариты которых превышают рабочую зону лазерных трекаров (порядка 100 м), используется метод «прыжков» относительно реперных точек. Причем все измерения производятся в одном файле и с сохранением единой системы координат.

Основные области применения лазерных трекаров:

1. Контроль крупногабаритных изделий.

Благодаря большой рабочей зоне трекары позволяют контролировать крупногабаритные детали: фюзеляжи и крылья самолетов (рис.2), корпуса судов и вагонов, кузова автомобилей, станины станков и прессов, крупные металлоконструкции т.д.

2. Сборка крупногабаритных изделий.

Особенностью лазерных трекаров является то, что они способны отслеживать положение измерительной сферы в

режиме реального времени (в динамике). Это позволяет эффективно использовать оборудование для сборки изделий из нескольких компонентов, например, стыковка крыла самолёта с фюзеляжем. Благодаря использованию трекеров можно сократить время на проведение операции в разы и отказаться от изготовления специальных измерительных шаблонов и контрольной оснастки.

3. Контроль сложных криволинейных поверхностей.

Лазерный трекер может эффективно использоваться для контроля сложных криволинейных поверхностей, например рабочих колес гидротурбин, крупногабаритных антенн, фюзеляжей самолётов и т.д. методом сравнения с САД моделью.



Рис. 2. Контроль геометрии крупногабаритных сборок

4. Настройка ступеней, сборочных линий, сварочных кондукторов.

Правильное позиционирование можно производить по известным координатам или линейно-угловым размерам. Существенно сократить время можно, используя метод сравнения с САД моделью конструкции. Это сокращает время на переналадку и запуск в производство нового изделия, а также уменьшает процент брака.

При решении преимущественно ориентационных задач перспективно использование электронных тахеометров. Они отличаются от трекеров отсутствием автоматической развёртки лазерного луча по угловым координатам и большими погрешностями в измерении расстояний, достигающими 1 мм.

подавляющая номенклатура деталей, сборок и узлов космических аппаратов и двигателей имеет характерные размеры, не превышающие 1 м [10]. Для кон-

троля их геометрических параметров существенно расширяется палитра лазерных измерительных систем - от универсальных до специализированных. Естественно, что и в этом диапазоне размеров при выдержке допусков на погрешности линейных измерений вполне пригодны вышеописанные трекеры и тахеометры, но в этом диапазоне размеров преимущественное распространение получили ЛСИГП с датчиками триангуляционного типа [11] и структурированными лазерными пучками [12] в силу относительно низкой стоимости их элементной базы.

В ЛСИГП проблема идентификации точек измеряемого объекта снимается структурированной лазерной подсветкой. Предложены разнообразные структуры лазерных пучков для применения в подобных системах [13]: коллимированный лазерный пучок, лазерная плоскость, крестообразные, конические и решетчатые структуры. Способы структурированного

подсвета, особенно с применением лазера, имеют более простые схемные реализации по сравнению с другими техническими решениями дистанционных бесконтактных измерений. За счёт структурированной подсветки с помощью одного двумерного датчика воспринимается и анализируется глубина сцены, т.е. трёхмерная информация.

Для прецизионных измерений геометрических параметров с погрешностями, не превышающими длину волны используемого излучения, по-прежнему привлекаются разнообразные интерферометры. Современные тенденции в применении классических интерферометрических схем состоят в фиксации интерферограмм матричными фотоприёмниками с последующем вводом пространственных распределений интенсивности в ПЭВМ и автоматизированной обработке зафиксированных цифровых изображений. Голо-

графические интерферометрические системы, где возможно, заменяются спекл-интерферометрическими [13]. Преимущество последних заключается в прямой фиксации цифровых изображений – картин распределения спеклов - и исключении использования высокоразрешающих фотоматериалов и процессов их обработки.

Схема триангуляционных измерений представлена на рис. 3. Смещение поверхности измеряемого объекта h проявляется в смещении положения энергетического центра лазерного пятна в поле зрения фотоприёмного устройства ν , которое и измеряется. Построенная по представленной на рис. 3 схеме триангуляционная ЛСИГП способна измерять лишь одну поступательную компоненту перемещений и работает по диффузной составляющей отражённого излучения.

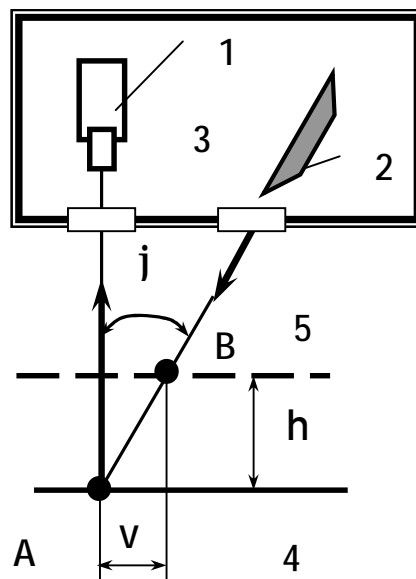


Рис. 3. Принцип триангуляционных лазерных систем измерения геометрических параметров:

- 1 – фотоприёмное устройство с многоэлементным фотоприёмником; 2 – лазер;
 3 – триангуляционная ЛСИГП; 4 - начальное положение поверхности объекта; 5 – конечное положение поверхности объекта; А – начальное положение лазерного пятна на поверхности;
 В – конечное положение пятна на поверхности; h – смещение поверхности; ν – смещение лазерного пятна на поверхности; j – угол между оптическими осями фотоприёмного устройства и лазера

Основной вклад в относительную инструментальную погрешность вносит измерение координат энергетического центра пучка ($D\nu / \nu$). Триангуляционные

датчики размеров, в частности белорусской фирмы ООО «РИФТЭК», имеют относительную погрешность измерений 0,1%, а разрешающую способность ещё на

порядок ниже – 0,01%, максимальную частоту обновления результатов измерения – 9,4 кГц, цифровой и аналоговый выходы. Таким образом, по погрешностям измерений триангуляционные датчики вполне сопоставимы с традиционными контактными измерительными инструментами типа линейек, штангенциркулей, микрометров, но по производительности и простоте сопряжения с ПЭВМ намного их превосходят.

Однако при воплощении триангуляционной схемы в реальную конструкцию следует учитывать скрещенность оптических осей лазера и фотоприёмного уст-

ройства и отклонение траектории перемещения изображения лазерного пучка от центральной линии фотоприёмной линейки. Рис. 4 демонстрирует преимущество структурированного лазерного пучка в форме отрезка по сравнению с традиционным коллимированным пучком.

Если в триангуляционной схеме использовать крестообразно структурированный пучок, то, как показано в работе [15], во-первых, при прочих равных условиях расширяется диапазон измеряемых перемещений h и, во-вторых, появляется возможность одновременного контроля ориентации объекта.

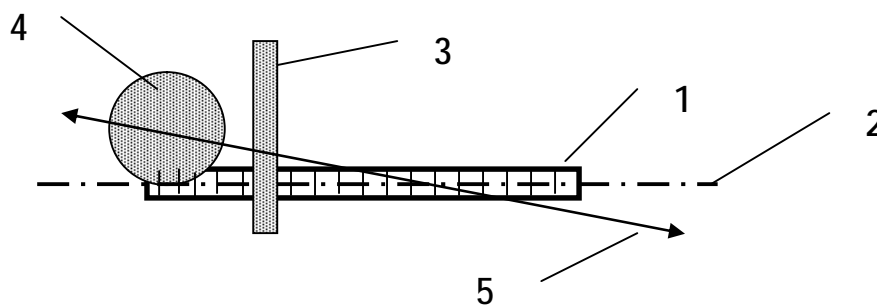


Рис. 4. Погрешности настройки триангуляционной ЛСИГП:

1 - фоточувствительная линейка; 2 - центровая линия линейки; 3 - структурированный лазерный пучок в форме отрезка; 4 - коллимированный лазерный пучок; 5 - траектория перемещения изображения лазерного пучка при смещении объекта измерения

Формированием структурированного лазерного пучка, форма которого в поперечном сечении моделируется отрезком прямой линии, а одно из продольных сечений представляет собой часть плоскости, ограниченной двумя пересекающимися прямыми («лазерная плоскость», «лазерный нож»), занимаются давно в связи разнообразными его применениями. В настоящее время подобную пространственную структуру пучка формирует встроенная в лазерные модули с полупроводниковыми лазерами оптика, причём изготовитель модулей гарантирует изгиб линии (отклонение от прямой в перпендикулярном сечении) на дистанции, например, в 10 м не более 1 мм. Такие модули производятся серийно, что делает их привлекательными для ЛСИГП, и носят на-

звание генераторов линий. Мощность излучения модулей варьируется от единиц до сотен милливатт.

Метод измерения формы поверхности с применением генераторов линий носит название светового сечения. В качестве примера плодотворного применения метода светового сечения и современной элементной базы для контроля размеров в двигателестроении можно привести результаты работ [16, 17], в которых описан прибор контроля профиля лопаток (ПКПЛ) газотурбинного двигателя – изделия массового производства.

Схема ПКПЛ представлена на рис. 5. Для получения двумерного изображения профиля лазерные осветители формируют узкие полосы с обеих сторон лопатки, которые, замыкаясь, очерчивают контур сече-

ния. Для контроля различных сечений лопатка перемещается посредством привода. Лазерный контур фокусируется объективом на матрицу ПЗС-камеры. Для повышения соотношения сигнал/шум применяется

спектральный интерференционный фильтр. Изображение, сформированное цифровой камерой, передаётся в ПЭВМ через высокоскоростной последовательный интерфейс.

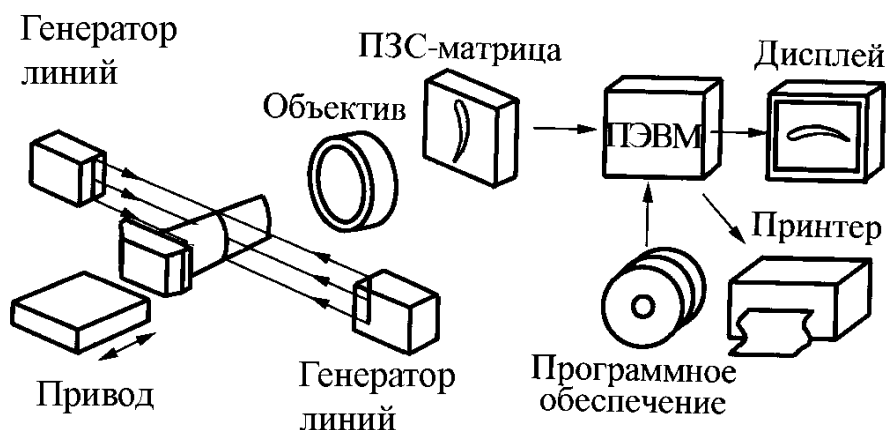


Рис. 5. Схема прибора контроля профиля лопаток

Параметры ПКПЛ таковы: быстродействие – 2 с/сечение; погрешность измерения линейных размеров - 0,01 мм; диапазон измерений по высоте - до 50 мм и длине - до 60 мм. Расширение диапазона измеряемых размеров возможно за счёт сменной оптики.

Проблемы внедрения ЛСИГП и их решение

При применении дистанционных бесконтактных методов измерений, основанных на взаимодействии электромагнитного излучения с поверхностью измеряемого изделия, необходимо принимать во внимание как кривизну и наклон поверхности к падающему лучу [18], так и её оптические свойства [19], учитывая современную тенденцию в работе непосредственно по эксплуатационным поверхностям контролируемых изделий без применения специальных марок и навесных оптических элементов. Поскольку высокие значения коэффициента отражения поверхности измеряемого объекта способствуют полной реализации метрологического потенциала ЛСИГП, то на нерабочие поверхности контролируемых изделий,

например режущего инструмента, полезно нанесение покрытия с высоким коэффициентом отражения. Операции нанесения таких покрытий должны быть предусмотрены при конструкторской и технологической проработке проекта и найти отражение в соответствующей документации, т.е. процедура использования ЛСИГП должна закладываться в проекте изначально.

Ослабление влияния наклона и кривизны поверхности на погрешности измерений геометрических параметров достигается оптимизацией оптических схем измерения, которые должны конструироваться так, чтобы углы падения зондирующего излучения на объект измерения были близки к нормальным. Влияние эффекта изменения фазы волны отражающим материалом на результаты измерения формы поверхности оценивается авторами [19] величиной, не превышающей 100 нм, что на 1...2 порядка меньше допусков, принятых при проведении подавляющего большинства измерений размеров в машиностроении.

В условиях производственных помещений значение вертикального градиента температуры воздушного тракта мо-

жет достигать 10 К/м [20], что вызывает искривление траектории распространения излучения, а вместе с этим и погрешности угловых и дальномерных измерений. Поэтому контроль геометрии объектов, сосредоточенных в пространстве и находящихся на удалении от устройства контроля при излучении, распространяющемся в приземном слое открытой атмосферы, требует исследования температурных условий в помещениях, где производится контроль изделий, и устранения температурных градиентов.

В подтверждение этого произведём оценку углового отклонения $\alpha_{\text{град}}$ оптической оси лазерного пучка от своего начального положения при прохождении атмосферной трассы протяжённостью l с градиентом температур, перпендикулярным начальному положению оптической оси, с использованием выражения, приведённого в работе [20]:

$$\alpha_{\text{град}} \approx \text{tg} \alpha_{\text{град}} = [l(n-1) | \text{grad } T |] / T, \quad (1)$$

где n – среднее значение показателя преломления вдоль трассы; T – температура. При значениях $\dot{\text{grad}} T = 10$ К/м, $l = 10$ м; $T = 300$ К и, согласно [21], $(n-1) = 0,00028$ получим угловое отклонение $\alpha_{\text{град}} = 19''$, которое пересчитывается в линейное отклонение, например, позиционирования как $(\alpha_{\text{град}} l) \approx 1$ мм.

Наряду с плавными изменениями показателя преломления на трассах экспериментально наблюдаются и резкие скачки температур в 2...3 К, а вместе с ними и показателя преломления [22]. Модель с резким скачком показателя преломления при неблагоприятном расположении границы температурных или барических зон по отношению к траектории пучка даёт большие значения углов отклонения, чем модель с постоянным градиентом, и поэтому также должна быть введена в рассмотрение. Для приближённых числовых оценок угла отклонения траектории от начального направления, вызванного взаимодействием с неблагоприятно ориентированной границей, предложено простое выражение [23], при выводе которого

предполагалось, что скачок показателя преломления для нормальных, в среднем, условий обусловлен лишь скачком температуры DT :

$$\alpha_{\text{скач}} = (1,41 \cdot 10^{-3} (\text{рад/К}^{1/2})) \sqrt{\Delta T} = (291 (\text{угл.с/К}^{1/2})) \sqrt{\Delta T}. \quad (2)$$

Разность температур всего в 0,1 К может приводить при неблагоприятном положении границы областей с разными показателями преломления к отклонениям пучка на единицы угловых минут ($\alpha_{\text{скач}} \approx 1,5'$ при $DT = 0,1$ К). Неблагоприятная геометрия в расположении траектории пучка и границы раздела может реализовываться, когда лазерный пучок распространяется вблизи нагретой панели прибора, теплового экрана и т.п. При этом возможны неоднородные отклонения различных зон в поперечном сечении пучка и перераспределение плотности мощности по сечению, т.е. к искажению формы пучка.

Преодолеваются и чисто формальные препятствия на пути применения ЛСИГП – недостаточно развитая нормативная база. Здесь попутно с разработкой собственно прибора приходится создавать и узаконивать методику его аттестационных испытаний, основное содержание которых сводится к сравнению результатов измерений геометрического параметра разработанным прибором и по стандартной, чаще всего контактной методике. Практика внедрения подобных приборов показывает, что это формальное препятствие вполне преодолимо, т.к. практическая метрология предлагает аттестованные по геометрическим параметрам наборы контрольных образцов [24]. Так, разработанные во ВНИИМС ступенчатые меры толщины покрытий и концевые меры перекрывают диапазон от 10^{-1} до 10^5 мкм и позволяют получить экспериментальную оценку погрешности большинства описанных выше ЛСИГП.

Предлагаются специальные одно-, дву- и трехмерные эталоны, предназначенные для калибровки координатно-измерительных машин, представление о которых можно получить на примере про-

дукции германской фирмы КОВА. Эталонная мера КОВА sphere beam представляет собой калиброванную линейку с закреплёнными на ней с известной периодичностью керамическими сферами, стандартные размеры от 1500 до 2500 мм. Калибровочная плита со сферами КОВА – Check (двумерный эталон) имеет стандартные размеры от 230 × 230 × 24 мм до 620 × 620 × 24 мм и разброс расстояний между центрами сфер < 0,3 мкм. Трёхмерный эталон - Ball Cube КОВА – Q3 представляет собой ферменную конструкцию в форме куба с закреплёнными в вершинах сферами и имеет номинальные размеры от 300 × 300 × 300 мм до 600 × 600 × 600 мм. Существуют и прототипы разработок методик аттестации ЛСИГП [25].

Заключение

Таким образом, можно говорить о становлении нового класса измерительной техники, неотъемлемыми компонентами которой являются формователи цифровых изображений структурированных лазерных пучков, а измеряемые геометрические параметры изделий получаются в результате их обработки. Процесс становления связан с преодолением многочисленных противоречий методологического, метрологического и технического характера. Например, использование матричного фотоприёмника с большим числом элементов снижает погрешность координатных измерений, но увеличивается поток обрабатываемой информации и снижается быстродействие. Разрешение указанного противоречия достигается использованием алгоритмов субэлементного разрешения, априорных знаний об измеряемом объекте и переходом от обработки площадей к обработке контуров, т.е. к снижению размерности задачи.

Эффективность применения ЛСИГП многократно возрастает, если оно закладывается ещё на стадии проектирования потенциального объекта измерений и отражается в конструкторской и технологической документации. Это находит прояв-

ление в специальных посадочных местах для установки световозвращателей и других оптических элементов, использовании оптических покрытий с заданными свойствами, стабилизации и контроле параметров атмосферы и вибрационного фона в помещении, где предполагается развертывание ЛСИГП и т.п.

Библиографический список

1. Полетаев, В. А. Технологическая оснастка для контроля проточной части лопаток газотурбинных двигателей [Текст] / В. А. Полетаев. // Контроль. Диагностика. – 2008. - № 12. – С. 19 – 21.
2. Каракулев, Ю. А. Измерение отклонения от соосности деталей в регулировочных клапанах турбин [Текст] / Ю. А. Каракулев. // Изв. вузов. Приборостроение. - 2007. - № 4. – С. 27 – 30.
3. Технология сборки и испытаний космических аппаратов [Текст] / под общ. ред. И. Т. Белякова и И. А. Зернова. // М.: Машиностроение, 1990.- 352 с.
4. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» [Текст] / А. Н. Кирилин, Г. П. Аншаков, Р. Н. Ахметов [и др.] // Самара: АГНИ, 2011. – 280 с.
5. Вагнер, Е. Т. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер, А. А. Митрофанов, В. Н. Барков. // – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.
6. Вагнер, Е. Т. Лазеры в самолетостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер. - М.: Машиностроение, 1982. - 184 с.
7. Григорьев, С. Н. Проблемы измерения в технологических процессах формообразования [Текст] / С. Н. Григорьев, В. И. Телешевский. // Измерительная техника. – 2011. - №7. – С. 3 – 7.
8. Джонс, Б. Программа JSF – пример высокого профессионализма [Текст] / Б. Джонс. // Контроль. Диагностика. – 2005. - № 9. – С. 69 – 72.
9. Ткачев, К. Н. Лазерная координатно-измерительная система FARO Laser

Tracker [Текст] / К. Н. Ткачев // Контроль. Диагностика. – 2006. - № 12. – С. 59 – 61.

10. Барвинок, В. А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов [Текст] / под ред. В. А. Барвинка. - М.: Машиностроение, 1996. – 576 с.

11. Дёмкин, В. Н. Лазерные технологии при измерении геометрии поверхности сложной формы (обзор) [Текст] / В. Н. Дёмкин, В. Е. Привалов. // Вестн. СПбО АИН. Вып. 5. – СПб.: СПбГПУ, 2008. – С. 138 – 187.

12. Катус, Г. П. Обработка визуальной информации [Текст] / Г. П. Катус. - М.: Машиностроение, 1990. - 320 с.

13. Метод спекл-интерферометрии для определения теплового расширения наноматериалов [Текст] / Т. А. Компан, А. С. Корнеев, Н. Ф. Пухов [и др.] // Измерительная техника. – 2011. - № 4. – С. 48 – 52.

14. Гришанов, А. В. Многокомпонентный лазерный измеритель виброперемещений [Текст] / А. В. Гришанов, В. Н. Гришанов. // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 19-й международ. конф. – СПб.: СПбГПУ, 2009. – С. 400 – 410.

15. Гришанов, А. В. Крестообразная структура сечения лазерного пучка для измерения дальности и ориентации изделий [Текст] / А. В. Гришанов, В. Н. Гришанов. // Лазеры, измерения, информация: сб. докл. 20-й международ. конф. – Т.1. – СПб.: СПбГПУ, 2010. – С. 120 - 131.

16. Кеткович, А. А. Лазерная компьютерная система контроля профиля лопаток газотурбинных двигателей ПКПЛ-1 [Текст] / А. А. Кеткович, Н. И. Яковлева, Б. А. Чичигин. // Контроль. Диагностика. – 2007. - № 3. – С. 32 – 34.

17. Кеткович, А. А. Лазерный профилометр объектов сложной формы [Текст] / А. А. Кеткович, Б. А. Чичигин. // Фотоника. – 2009. - № 3. – С. 30 – 33.

18. Вертопрахов, В. В. Влияние формы объекта и ориентации его поверхности на точность лазерных триангуляционных измерений [Текст] / В. В. Вертопрахов. // Автометрия. - 1995. - № 6. - С. 64 - 68.

19. Минаев, В. Л. Влияние эффекта изменения фазы отражённой волны на измерения формы поверхности в оптической профилометрии [Текст] / В. Л. Минаев, К. Е. Лоцилов. // Измерительная техника, 2010. - № 7. – С. 36 – 38.

20. Араканцев, К. Г. Физическое моделирование двухволнового метода измерений в авторефлексионной оптико-электронной системе контроля смещений [Текст] / К. Г. Араканцев, А. Н. Тимофеев. // Оптический журнал, 2009. - № 1. – С. 9 – 12.

21. Физические величины [Текст]: справочник / под. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. // М.: Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.

22. Мищенко, И. А. Исследование температурных режимов горизонтальных трасс приземного слоя атмосферы [Текст] / И. А. Мищенко, А. М. Андрусенко. // Измерительная техника. - 1990. - № 11. - С. 35-36.

23. Гришанов, В. Н. Проектирование лазерных систем авиационного и космического назначения. Ч.1 [Текст] / В. Н. Гришанов, В. И. Мордасов. - Самара: Изд-во СГАУ, 1995.- 121 с.

24. Бабаджанов, Л. С. Метрологическое обеспечение измерений геометрических параметров изделий методами неразрушающего контроля [Текст] / Л. С. Бабаджанов, М. Л. Бабаджанова. // Измерительная техника, 2010. - № 11. – С. 22 – 24.

25. Травкин, С. В. Разработка методов и средств поверки и калибровки геодезических приборов для измерения превышений [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Травкин. - М.: МИИГАиК, 2007. - 22 с.

UP-TO-DATE LASER MEASURING SYSTEMS IN THE PRODUCTION CYCLE OF SPACE TECHNIQUE

©2012 V. N. Grishanov¹, A. A. Oynonen²

¹Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

²Central Specialized Design Bureau "CSDB-Progress"

The paper deals with up-to-date methods of controlling the geometry of products using laser measuring systems. The basic principles of measuring and examples of devices implementing them are described. The advantages of laser measuring systems over contract ones are shown. The difficulties arising in the integration of laser measuring systems into the production chain of the plant are analyzed and the ways of overcoming them are planned.

Laser geometry control, contactless measurements, cliché, laser tracker, large-dimensioned object.

Информация об авторах

Гришанов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: vladgrishanov@yandex.ru. Область научных интересов: бесконтактные дистанционные измерения оптическими методами.

Ойнонен Андрей Алексеевич, инженер-конструктор, ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». E-mail: Grand_forever@inbox.ru. Область научных интересов: бесконтактные дистанционные измерения оптическими методами.

Grishanov Vladimir Nikolaevich, candidate of technical science, senior lecturer of the department of automatic systems of power plants, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov. E-mail: vladgrishanov@yandex.ru. Area of research: contactless remote measurements by optical methods.

Oynonen Andrey Alekseevich, engineer-designer of Central Specialized Design Bureau. E-mail: Grand_forever@inbox.ru. Area of research: contactless remote measurements by optical methods.