

УДК 004.932

ББК 32.973.26

## **АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ**

**Сергеева А. В.<sup>1</sup>**

*(Арзамасский политехнический институт (филиал)  
НГТУ, Арзамас)*

**Суханов С. В.<sup>2</sup>, Гурлов Д. В.<sup>3</sup>**

*(ОАО «АНПП «Темп-Авиа», Арзамас)*

*В данной статье рассмотрена оценка возможности применения алгоритмов цифровой обработки сигналов для автоматизации процесса исследования качества оптических зеркал кольцевого резонатора лазерного гироскопа с использованием IP-видеокамеры. Показано, что разработанное на основе алгоритма цифровой обработки программное обеспечение позволяет в значительной мере сократить время, затрачиваемое на проверку зеркала, уменьшить сложность выполнения данной процедуры для исследователя и повысить точность оценки качества оптических зеркал.*

---

<sup>1</sup> Анна Владимировна Сергеева, студентка (sergeeva\_a92@inbox.ru).

<sup>2</sup> Сергей Валерьевич Суханов, кандидат технических наук, начальник сектора (serega\_sv@list.ru).

<sup>3</sup> Дмитрий Владимирович Гурлов, инженер-математик (gurlov89@yandex.ru).

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, лазерный гироскоп, оптические зеркала.

## **1. Введение**

В настоящее время лазерный гироскоп (ЛГ) является одним из наиболее распространенных датчиков угловой ориентации и обладает, по сравнению с другими типами гироскопов, рядом достоинств. К достоинствам следует отнести прежде всего отсутствие вращающего ротора, подшипников или других механически движущихся частей, работа которых связана с наличием трения. В результате этого надежность таких гироскопов должна быть выше, чем обычных гироскопов на шарикоподшипниках. Также отсутствие трения снимает ряд проблем, с которыми приходится сталкиваться при создании высокоточных гироскопов.

Наряду с достоинствами необходимо указать и ряд их недостатков и специфических проблем, с которыми приходится столкнуться при разработке таких гироскопов.

Наиболее сложная из них связана с так называемым эффектом блокировки или «захвата» лучей, распространяющихся в рабочем контуре гироскопа в противоположных направлениях. «Захват» лучей обусловлен рассеиванием излучения по кольцевому тракту и является следствием взаимного проникновения энергии луча одного направления в луч другого направления. В результате этого явления при малых скоростях вращения (менее 20-100 Гц) частоты световых квантов обоих лучей гироскопа оказываются одинаковыми, а разностная частота на выходе гироскопа — равной нулю [2].

В связи с тем, что «захват» лучей, распространяющихся в кольцевом лазере в противоположных направлениях, связан с их обратным рассеянием, уменьшение зоны «захвата» сводится, прежде всего, к уменьшению этого рассеяния. Учитывая, что рассеяние происходит по тракту движения лучей, а также на зеркалах, обеспечивающих распространение лучей по кольцу, необходимо [2]:

- довести до минимума рассеяние на зеркалах;
- вакуумировать, где это возможно, тракт, по которому распространяются лучи;
- свести к минимум влияние плазмы активного вещества чувствительного элемента гироскопа.

Таким образом, видно, что тщательно продуманным подбором составных элементов лазерного гироскопа зона «захвата» может быть значительно сужена. Следовательно, одним из критериев создания ЛГ с улучшенными характеристиками является применение в конструкции ЛГ высококачественных оптических зеркал. Поэтому на этапе сборки оптических генераторов необходимо проводить оценку качества оптических зеркал.

## **2. Актуальность проводимых исследований**

Визуальная оценка качества зеркал является достаточно трудоемким процессом, а точность данного исследования достаточно низкая. Следовательно, для повышения качества оценки зеркал должно быть разработано специальное оборудование (автоматизированное рабочее место), программное обеспечение для обработки цифровых изображений, а также методика проверки зеркал до установки в конструкцию ЛГ. Основными требованиями к такой методике являются удобство, простота и эффективность, а также минимальные временные затраты на проверку зеркала.

## **3. Методика оценки качества оптических зеркал с использованием цифровой обработки**

### **3.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ДЕФЕКТОВ ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ**

Одной из характеристик оптического зеркала, имеющей первостепенное значение, является его дефектность. К основным типам дефектов можно отнести следующие: шероховатости подложки и слоев, посторонние частицы, зерна покрытия [5].

Наиболее распространенным дефектом покрытия является точка. Точкой называется дефект, изображающийся в оптиче-

ском микроскопе в условиях освещения, предусмотренных технической документацией, в виде образования округлой формы (отношение максимального размера к минимальному не более 2). Физически точка может иметь самую разную природу. Например, это может быть вскрытый пузырь на поверхности подложки, дефект роста, посторонняя частица, осевшая на подложку или покрытие из атмосферного аэрозоля. Основной мерой борьбы с точечными дефектами является борьба с запыленностью: создание чистых помещений; поддув обеспыленным воздухом; сокращение времени пребывания зеркал вне вакуумного объема и т.п.

Вторым и последним допустимым дефектом покрытия является царапина. Фактически царапина представляет собой дефект подложки, а не покрытия.

Практически в поле зрения может попасть 1-2 царапины. По чертежу покрытие должно иметь оптическую чистоту, соответствующую II классу, поэтому суммарная длина всех царапин не должна превышать двух световых диаметров.

### *3.2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ*

Визуальная оценка размера и положения допустимых дефектов проводится исследователем с помощью микроскопа и лазерного осветителя, луч от которого направляется на исследуемое зеркало. Для этого к объективу микроскопа крепится мерная сетка с известной площадью ячейки. В связи с тем, что мерная сетка имеет определенную ширину, исследователь может просто не заметить наиболее мелкие дефекты.

При определенном положении зеркала к направлению светового пучка, исходящего от осветителя, некоторые царапины проявляются либо становятся незаметными. Поэтому для выявления таких царапин, производится несколько поворотов зеркала при неизменном положении осветителя и микроскопа. Таким образом, исследователь находит оптимальное расположение зеркала по отношению к световому пучку для последующей установки в оптическом резонаторе ЛГ.

Таким образом, к недостаткам данной методики можно отнести:

- человеческий фактор при обнаружении дефектов;
- использование дополнительного оборудования, требующего контроля точности при изготовлении и установке;
- большая трудоемкость;
- невозможность сохранения полученных данных.

### 3.3. ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

В рамках работы применение алгоритмов цифровой обработки рассматривается как инструмент для контроля и определения качества оптических зеркал резонатора ЛГ. Действительно, цифровая обработка позволяет улучшать изображения, повышать их резкость и искать фрагменты на изображении, используя специальные фильтры. Ее применение в качестве инструмента для контроля оптических зеркал ЛГ поможет более точно оценить качество зеркал, а так же размер и положение дефектов.

Цифровое изображение представляет собой функцию  $f(x, y)$ , где  $x, y$  — пространственные координаты, а  $f$  называется интенсивностью изображения в точке с координатами  $x$  и  $y$ . Цифровая обработка изображений представляет собой обработку цифровых изображений с помощью компьютеров. Отметим, цифровое изображение представляет собой двумерный массив, элементы этого массива принято называть элементами изображения или пикселями [3].

На первом этапе возникает необходимость проведения сегментации изображения, то есть выделения фрагментов изображения (дефектов). Дефекты на зеркалах возможно увидеть под воздействием лазерного осветителя, при этом они имеют цвет, отличный от остального изображения.

Цветовая сегментация, в свою очередь, заключается в выделении на изображении объектов, цвет которых лежит в определенном диапазоне, что позволяет выделить существующие дефекты [6]. При этом возможно выделить дефекты, недоступные человеческому глазу, что позволяет получить наиболее точное представление о качестве зеркала.

Для расчета площади дефектов необходимо воспользоваться функцией, которая позволяет выделить связанные области на изображении (объекты), а затем посчитать площадь этих областей. В этом случае исключается возможность «перекрывания» наиболее мелких дефектов мерной сеткой и их площадь также может быть вычислена.

Таким образом, к достоинствам данной методики можно отнести:

- отсутствие человеческого фактора при обнаружении дефектов;
- отсутствие дополнительного оборудования, требующего контроля точности при изготовлении и установке (мерная сетка, различные крепёжные элементы);
- уменьшение временных затрат;
- повышение точности при вычислении площади дефектов;
- возможность сохранения полученных данных.

### *3.4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ*

Для определения качества оптических зеркал необходимо разработать ПО, которое позволяет выделить существующие дефекты на изображении и рассчитать их характеристики.

Использование интерфейса Ethernet позволяет включить IP-видеокамеру в любую локальную сеть предприятия или организации, в домашнюю сеть к сети Интернет. При этом, для нужд видеонаблюдения можно использовать любые существующие сети TCP/IP Ethernet, что позволяет унифицировать сетевую инфраструктуру и избежать затрат на прокладку отдельных кабелей для видеокамер.

Изображение, полученное с IP-видеокамеры — цветное RGB изображение, которое представляет собой массив  $(M \times N \times 3)$  [6]. Первым шагом является переход к полутоновому изображению. Под воздействием лазерного осветителя дефекты на зеркале «выделены» красным цветом, поэтому переход осуществляется путем выделения красной цветовой составляющей изображения.

Далее необходимо выполнить переход к бинарному изображению, выделить и оценить существующие дефекты. Так как дефекты должны быть вычислены достаточно точно, порог яркости выберем близким к максимальному — 0.95. Значения матрицы, которые меньше заданного порога, становятся логическими нулями.

После перехода к бинарному изображению, на нем можно выделить существующие объекты. Пикселы со значением 1 относятся к объектам, а с нулевым значением — к фону [1]. Особо крупные объекты представляют собой восьмисвязные области единиц, см. рис. 1. Именно они и представляют наибольший интерес при контроле качества оптических зеркал. При необходимости выделения наиболее мелких дефектов на изображении, критерий связности можно уменьшить.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Рис. 1. Массив, представляющий собой бинарное изображение с выделенными на нем объектами*

Далее формируется массив структур, в котором содержится информация о существующих дефектах (изображение, местоположение в системе координат, площадь, центр масс объекта).

Данная информация необходима для вычисления искомых характеристик оптических зеркал.

Основной характеристикой, необходимой для оценки качества оптического зеркала, является относительная площадь дефектов:

$$(1) \text{ Relative\_Square\_Defects} = \frac{S_{def}}{S},$$

где  $S_{def}$  — площадь дефектов зеркала,

$S$  — площадь всего изображения.

Следующей характеристикой является суммарная яркость изображения:

$$(2) \text{ All\_Brightness} = \frac{\sum_i \sum_j A(i, j)}{\text{Exposure} \cdot \text{Gain}},$$

где  $A(i, j)$  — массив данных, представляющий собой полутоновое изображение в формате uint16,

$\text{Exposure}$  — время экспозиции,

$\text{Gain}$  — усиление.

Для оценки значения рассеивания на зеркалах необходимо вычислить полное интегральное рассеивание:

$$(3) \text{ TIS} = \frac{\sum_i \sum_j A(i, j)}{\text{Exposure} \cdot \text{Gain} \cdot \text{IdealScatterer}},$$

где  $\text{IdealScatterer}$  — идеальное рассеивание.

Такую же характеристику необходимо вычислить и для инвертированного изображения (3.4).

$$(4) \text{ TIS} = \frac{\sum_i \sum_j B_{not}(i, j)}{\text{Exposure} \cdot \text{Gain} \cdot \text{IdealScatterer}},$$

где  $B_{not}(i, j)$  — массив данных, представляющий собой полутоновое инвертированное изображение в формате uint16.



#### **4. Программное обеспечение для исследования оптических зеркал**

Наиболее удобным инструментом для применения алгоритмов цифровой обработки является система Matlab, так как она включает в себя расширения в виде наборов специализированных программ (toolbox). Для цифровой обработки сигналов используется пакет Signal Processing Toolbox (SPT), а для цифровой обработки изображения используется пакет Image Processing Toolbox (IPT). Для создания удобного интерфейса пользователя в системе Matlab используется среда Graphical User Interface (GUI).

Разработанное программное обеспечение обеспечивает прием изображения с IP-видеокамеры, которая через телевизионный адаптер TV-A подключается к микроскопу, его обработку, а также вывод информации об имеющихся дефектах для всего зеркала, таких как относительная площадь, суммарная яркость и полное интегральное рассеивание.

Кроме этого, обеспечено сохранение информации о дефектах зеркала в файл. Данные сохранены не только для всего изображения, но и для части зеркала, входящую в окружность с радиусом 240 пикселей от центра, а также для центральной части зеркала, входящую в окружность с радиусом 90 пикселей от центра. Все дефекты отсортированы в зависимости от их удаленности от центра изображения (от близких к дальним).

Также обеспечена возможность сохранения изображения, полученного с IP-видеокамеры и загрузка ранее сохраненного изображения, в случае необходимости проведения его повторной обработки.

#### **5. Заключение**

В результате работы было разработано программное обеспечение, которое обеспечивает:

- возможность просмотра «реального» (без какой-либо обработки) изображения с IP-видеокамеры, для оценки положения зеркала;
- обработку изображения, полученного с IP-видеокамеры в текущий момент времени;
- сохранение фотографий оптических зеркал для их последующей обработки;
- обработку ранее сохраненных изображений оптических зеркал;
- сохранение результатов обработки.

Разработанное программное обеспечение и соответствующая организация рабочего места исследователя позволяет автоматизировать процесс оценки качества оптических зеркал и практически исключить влияние человеческого фактора на проводимые исследования. Кроме того, в значительной мере уменьшается время, затрачиваемое на проверку. А точность оценки увеличивается.

Таким образом, применение цифровой обработки является оптимальным инструментом для повышения качества процесса оценки оптических зеркал резонатора ЛГ.

### ***Литература***

1. ДАШКОВСКАЯ Т.В. *Цифровая обработка сигналов в среде matlab: лабораторный практикум в 2 ч. Ч. 2*. Новосибирск: СГГА, 2010
2. МАЛЕЕВ П.И. *Новые типы гироскопов*. Л., «Судостроение», 1971
3. *Основы расчета, проектирования и технологии изготовления лазерных и волоконно-оптических гироскопов* / ПОД РЕД. КАРАСИКА В.Е. МВТУ им. Н.Э.Баумана. М., 1989.
4. Р. ГОНСАЛЕС, Р. ВУДС *Цифровая обработка изображений*. Москва: Техносфера, 2005

5. *Справочник технолога-оптика* / М.А. ОКАТОВ, Э. А. АНТОНОВ, А. БАЙГОЖИН И ДР.; Под ред. М.А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004.
6. ЯНЕ Б. *Цифровая обработка изображений*. Москва: Техносфера, 2007

## **The algorithms of the signal digital processing to automate process of merit rating of optical mirrors.**

**Anna Sergeeva**, Arzamas Polytechnical Institute, Arzamas  
(sergeeva\_a92@mail.ru)

**Sergey Sukhanov**, ANPP «Temp-Avia», Arzamas  
(serega\_sv@list.ru)

**Dmitry Gurlov**, ANPP «Temp-Avia», Arzamas  
(gurlov89@yandex.ru)

*Abstract: This article describes the estimation of possible using the algorithms of signal digital processing to automate of quality research process of optical mirrors a ring resonator of a laser gyro by using IP-camera. It is shown that software developed on the bases of the digital processing algorithm allows significantly to reduce time spent on checking the mirrors, reduce the complexity to fulfill procedure by a researcher and improve the accuracy of quality optical mirrors estimation.*

**Keywords:** digital signal processing, laser gyro, optical mirror.