

# ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ МИНИМАЛЬНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПОЛЕЙ ЗРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СОСТАВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ЭРОЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Ахмеров А. Х., Васильев А. С.  
Университет ИТМО

Исследование посвящено определению минимального перекрытия полей зрения оптических каналов. При помощи экспериментального стенда получены данные об эффективности комплексирования изображений при разных уровнях перекрытия полей зрения оптических каналов. Приведена оценка результатов в соответствии с визуальным и математическим критериями.

## Введение

Одним из ключевых элементов паровых турбин (ПТ), широко используемых в современной энергетике, является лопаточный аппарат. Главным источником эрозионного износа является взаимодействие поверхности рабочих лопаток (РЛ) с каплями крупнодисперсной влаги, формирующимися из-за содержания посторонних частиц внутри пара .

Оптико-электронный комплекс эрозионного контроля (ОЭКЭК), получает изображения и сопоставляет их с конкретными РЛ за счет использования многоканальной съёмки, синхронизированной с вращением вала ПТ, и комплексирования получаемых изображений .

**Целью** данного исследования является определение минимального перекрытия угловых полей зрения оптических каналов УПИ для успешного комплексирования изображений. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

- определить геометрические соотношения, размещения каналов УПИ и состав используемых алгоритмов обработки изображений;
- разработать и осуществить монтаж экспериментального стенда;
- разработать программное обеспечение для регистрации, обработки и комплексирования изображений тестовых объектов;
- систематизировать и проанализировать полученные результаты.

## Перекрытие полей зрения

Оптические каналы размещаются внутри трубки, вводимой в цилиндр ПТ через специальное технологическое отверстие. Геометрические соотношения расположения оптических каналов приведены на Рисунке 0.1.

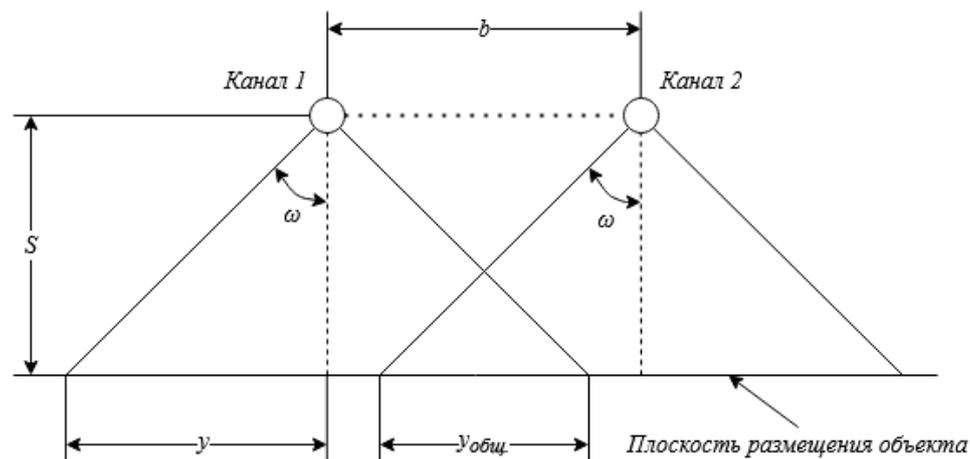


Рисунок 0.1 – Геометрические соотношения оптических каналов УПИ

Два оптических канала располагаются в одной плоскости на расстоянии  $S$  от плоскости размещения объекта. Расстояние между оптическими осями каналов вдоль плоскости их размещения равно  $b$ . Каналы обеспечивают одинаковое поле зрения  $2\omega$ . Линейный размер обзораемого каждым каналом пространства в плоскости размещения объекта равен  $2y$ , а линейный размер обзораемого обоими каналами пространства равен  $y_{общ}$ .

Перекрытие полей зрения в данном случае будет равно:

$$\beta = \frac{2 \cdot S \cdot \operatorname{tg}(\omega) - b}{2 \cdot S \cdot \operatorname{tg}(\omega)} = 1 - \frac{b}{2 \cdot S \cdot \operatorname{tg}(\omega)}. \quad (0.1)$$

#### Применяемые алгоритмы обработки изображений

Для повышения четкости контуров, в данном исследовании использован метод **нерезкого маскирования**, заключающийся в наложении на изображение маски, полученной в результате вычитания из изображения нерезкой версии самого себя. **Гамма-коррекция** позволяет усилить контраст между лопаткой и фоном [Ошибка! Залка не определена.]. Для **комплексирования изображений** с общим отображаемым пространством целесообразно использовать алгоритмы, основанные на **признаках**.

На основе проведенных ранее исследований, для данного эксперимента принято решение использовать алгоритм Scale-Invariant Feature Transform (SIFT). Для сопоставления признаков в данном исследовании используется метод **определения дистанции в евклидовом пространстве между дескрипторами**. Он прост в исполнении, уместен в плане вычислительных мощностей и предоставляет хорошие результаты.

#### Экспериментальное исследование перекрытия полей зрения

Для проведения эксперимента собран стенд на базе системы позиционирования 8MT295 от компании Standa с разрешением 12,5 мкм, фотография которого представлена на Рисунке 0.1.

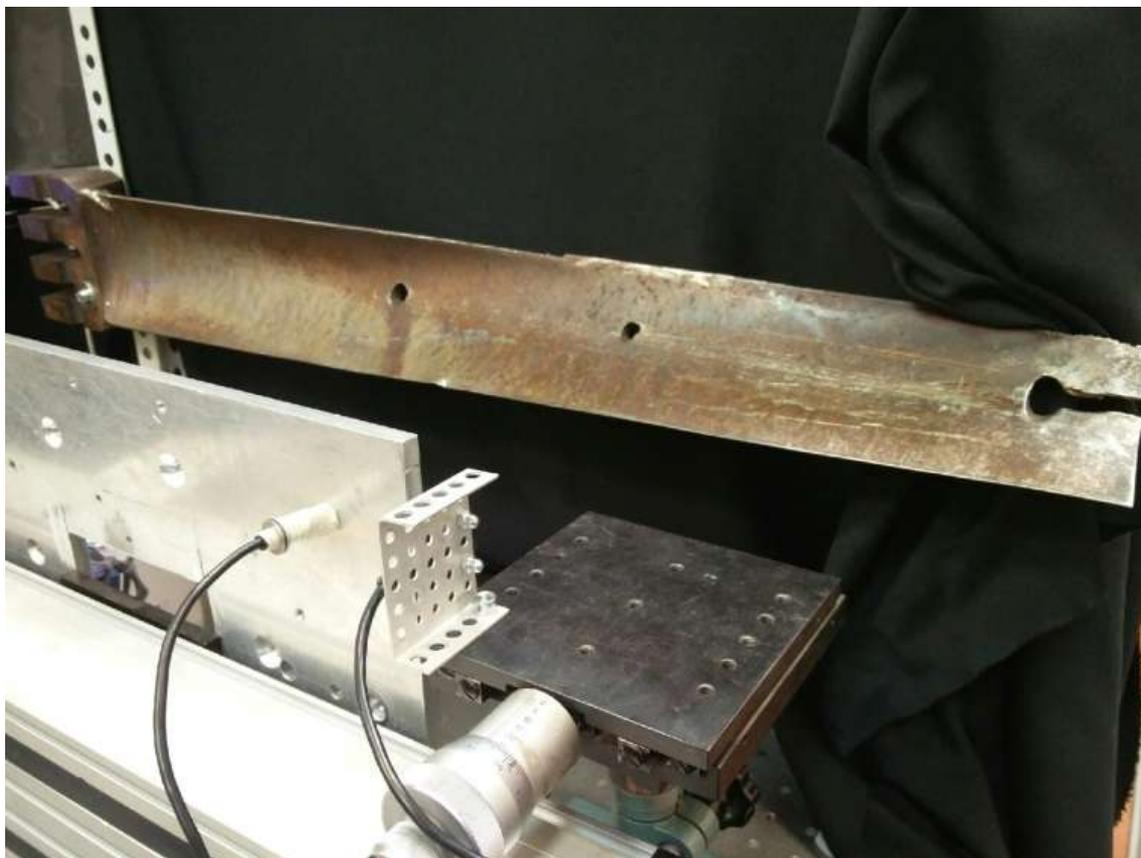


Рисунок 0.1 – Экспериментальный стенд

Результаты оцениваются визуально (по шкале от 0 до 100%) и математически. Математическая оценка эффективности алгоритма комплексирования для данного исследования рассчитывается, как:

$$\delta = \frac{\sum_{i=3}^9 \left( \sum_{j=1}^3 \frac{m_{ij} - m_{ij \text{ ср.}}}{m_{ij \text{ ср.}}} \right)}{9}, \quad (0.1)$$

где  $\delta$  – математическая оценка эффективности, показывающая нестабильность матрицы преобразования координат;  $m_{ij}$  – элемент матрицы преобразования координат строки  $i$  и столбца  $j$ ;  $m_{ij \text{ ср.}}$  – усредненное значение элемента  $m_{ij}$  между всеми матрицами преобразования координат. Идеальное совмещение характеризуется величиной  $\delta = 0$ , и чем больше эта величина, тем больше нестабильность матрицы преобразования координат, и следовательно совмещение с большей вероятностью будет осуществлено неправильно. Допустимо биение матриц преобразования координат в пределах 5%.

Для исследования, на языке C++, в среде разработки Microsoft Visual Studio, с использованием открытой библиотеки компьютерного зрения OpenCV, было разработано программное обеспечение, осуществляющее захват и обработку изображений с двух эндоскопов

В эксперименте используются два объекта – «сложный» (линейка), содержащий множество мелких деталей, которые использовать в качестве ключевых точек, и «простой» (реальный образец лопатки). Съёмка и обработка изображений производится с шагом 10 мм, начиная с отметки  $b = 62$  мм, при которой перекрытие полей зрения равно 54%, визуальная оценка показывает, что изображения для «простого» (лопатка) и «сложного» (линейка) объектов совмещены идеально. На Рисунке 0.2 представлены полученные результаты.

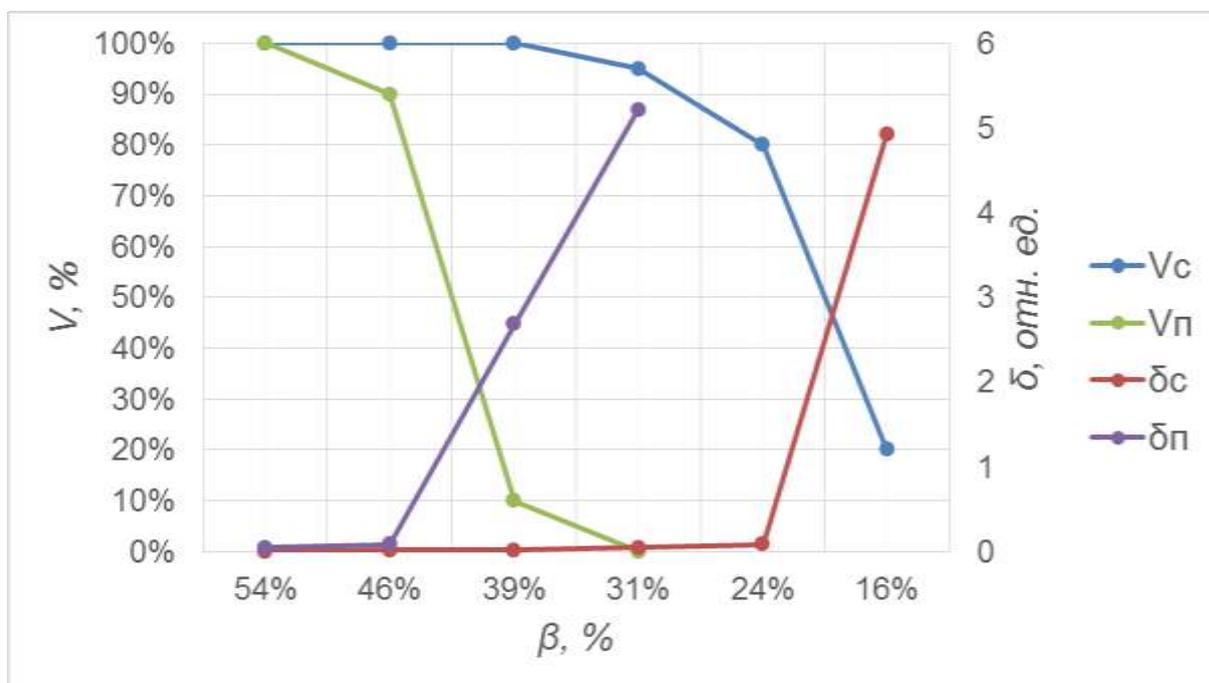


Рисунок 0.2 – График полученных результатов

По горизонтальной оси показано перекрытие полей зрения, рассчитанное по формуле (0.1). Графики  $V_c$  и  $\delta_c$ ,  $V_{\text{п}}$  и  $\delta_{\text{п}}$  показывают визуальную и математическую оценки для сложного и простого объектов соответственно. По полученному графику видно, что пространственное совмещение изображений «простого» объекта дается алгоритму SIFT значительно сложнее, чем «сложного» – уже при перекрытии полей зрения 46% одна из 10 пар изображений была совмещена не совсем правильно, а нестабильность матрицы преобразования координат достигла значения выше 8%. Обработка «сложного» изображения даёт приемлемые результаты при пересечении полей зрения более 31%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование зависимости эффективности методов комплексирования изображений от доли взаимного перекрытия полей зрения двух оптических каналов. Вопрос согласования полей зрения каналов рассмотрен в рамках теоретического и практического подходов. Для проведения эксперимента собран **экспериментальный стенд**, позволяющий задавать базовое расстояние между каналами с высокой точностью (менее 100 мкм). Для работы со стендом разработано соответствующее **программное обеспечение**, осуществляющее регистрацию изображений при помощи установленных на стенде видеозэндоскопов, а также их обработку и комплексирование.

Проведены исследования эффективности алгоритмов пространственного совмещения изображений при работе с «простым» и «сложным» тестовыми объектами, для которых были сформированы **как визуальный, так и математический критерии** качества получаемых изображений. Полученные результаты показывают, что при дальнейшем проектировании ОЭКЭК следует обеспечить перекрытие полей зрения соседних каналов **не менее 50%**, так как изображения

поверхностей реальных РЛ содержат малое количество мелких деталей, которые могут использоваться в качестве ключевых точек.

Следует отметить, что при использовании эндоскопов лучшего качества (высокое разрешение матрицы, качество объектива, хорошая подсветка) алгоритмы комплексирования могут обеспечить более хороший результат. Также, в рамках дальнейших исследований, могут быть опробованы методы, основанные на разложении получаемых изображений на цветовые плоскости, отдельной обработке каждой цветовой плоскости и комбинировании полученных результатов.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Перельман Р. Г., Пряхин В. В. Эрозия элементов паровых турбин // М.: Энергоатомиздат, 1986.
- 2 Akhmerov A.K., Vasilev A.S., Vasileva A.V. Research of spatial alignment techniques for multimodal image fusion // Proceedings of SPIE - 2019, Vol. 11059, pp. 1105916.
- 3 Vasilev A. S., Korotaev V. V. Research of the fusion methods of the multispectral optoelectronic systems images // Proceedings of SPIE, ИЕТ – 2015. Vol. 9530, pp. 953007;
- 4 Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений // Издание 3-е, исправленное и дополненное // Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с. ISBN 978-5-94836-331-8.
- 5 Mitchell, H. B. Image Fusion: Theories, Techniques and Applications // Berlin: Springer-Verlag, Heidelberg, 2010. 247 p.
- 6 Stathaki, T., [Image Fusion: Algorithms and Applications], Academic Press is an imprint of Elsevier, 520 (2011).
- 7 Ахмеров А.Х., Васильев А.С. Анализ и классификация современных методов комплексирования изображений // XIII Международная конференция "Прикладная оптика-2018" (19-21 декабря 2018г.): сборник трудов конференции - 2018. - Т. 2. - С. 132.
- 8 Lowe, D., "Object recognition from local scale-invariant features," // Proc. International Conference on Computer Vision – 1999, Vol. 2, pp. 1150-1157.
- 9 Vanitha, J., Senthil Murugan, M., "Feature Matching Process Using Euclidean Distance of Weighted Block Color Histogram and Color Co-Occurrence Matrix for Content Based Image Retrieval System," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 7(6), 143-147 (2008).
- 10 8MT295 – Long-Travel Motorized Linear Stages [Электронный источник] // STANDA in Lithuania, 2020. URL: [http://www.standa.lt/products/catalog/motorised\\_positioners?item=305&prod=long-travel-motorized-stages](http://www.standa.lt/products/catalog/motorised_positioners?item=305&prod=long-travel-motorized-stages) (Дата обращения: 15.09.2020).
- 11 C++ : News, Status & Discussion about Standard C++ [Электронный источник] // Standard C++ Foundation, 2020. URL: <https://isocpp.org/> (Дата обращения: 29.09.2020).
- 12 Visual Studio: Лучшие в своем классе средства для разработчиков [Электронный источник] // Microsoft, 2020. URL: <https://visualstudio.microsoft.com/ru/> (Дата обращения: 29.09.2020).
- 13 OpenCV [Электронный источник] // OpenCV team, 2020. URL: <https://opencv.org/> (Дата обращения: 29.09.2020).