

МЕТОДЫ ПОСТОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВ НА ПРИМЕРЕ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МОНИТОРА ПУЧКА ПРОТОНОВ

И. И. Полоник^{а,б,1}, С. А. Гаврилов^{а,б}

^а Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141701, Россия

^б Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312, Россия

Для проведения неразрушающих измерений профиля и положения пучка протонов в низкоэнергетическом канале транспортировки линейного ускорителя ИЯИ РАН используется флуоресцентный монитор на основе свечения остаточного газа в вакуумной камере канала. В данной работе проводится сравнение методов постобработки данных, позволяющих находить границы пучка на зашумленных оптических изображениях с неравномерным фоном. Сравнение эффективности методов производится на тестовом наборе сгенерированных изображений и экспериментальных изображениях, зарегистрированных в сеансах работы ускорителя. Описаны условия, при которых каждый из методов успешно справляется с нахождением границ пучка. Продемонстрирована возможность использования полосовой фильтрации для определения границ пучка на экспериментальных изображениях, зарегистрированных флуоресцентным монитором.

To carry out non-destructive measurements of the profile and position of a proton beam at the low-energy transporting channel of the INR RAS linear accelerator, a beam induced fluorescence monitor based on the fluorescence of residual gas in a vacuum chamber is used. Data post-processing methods, which allow one to detect beam edges at noisy optical images with a non-uniform background, are compared. An efficiency of the methods is compared by test set of generated images and the experimental images obtained during accelerator operation sessions. Conditions under which each of the methods detects the beam edges correctly are described. The possibility of using a band-pass filter for beam edge detection based on images recorded using beam induced fluorescence monitor is demonstrated.

PACS: 29.27.Fh; 29.27.Eg

ВВЕДЕНИЕ

На низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов линейного ускорителя Института ядерных исследований РАН (ЛУ ИЯИ РАН) установлен флуоресцентный монитор [1, 2] (ФЛУМ) на основе стандартных камер машинного зрения

¹E-mail: polonik.ii@phystech.edu

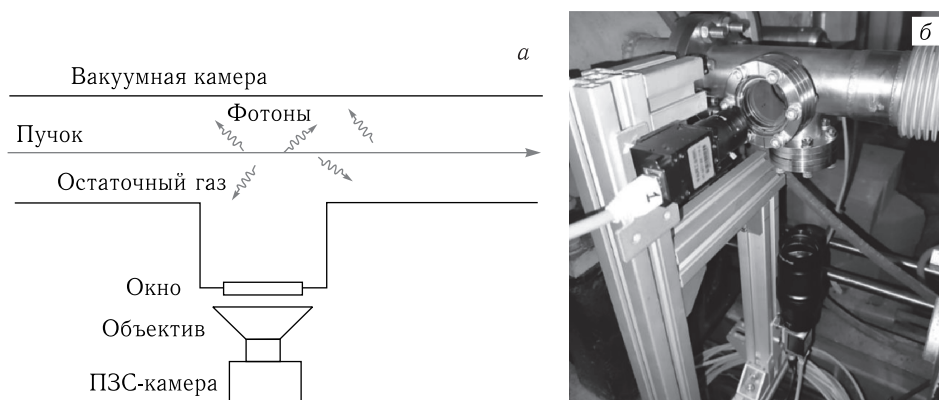


Рис. 1. а) Схема базовой конфигурации ФЛУМ; б) ФЛУМ, установленный на канале инжекции протонов ЛУ ИЯИ РАН

для неразрушающей диагностики поперечного профиля и положения пучка. Принцип работы флуоресцентного монитора основан на том, что пучок вызывает свечение остаточного газа в ионопроводе, при этом время жизни возбужденных состояний молекул и атомов остаточного газа составляет $\sim 10\text{--}100$ нс, что соответствует процессу флуоресценции. Свечение газа вызвано как первичным взаимодействием пучка с газом, так и вторичными электронами, образующимися в результате ионизации газа. На рис. 1, а изображена схема базовой конфигурации ФЛУМ: часть образовавшихся фотонов, прошедшая через окно, фокусируется оптической системой на ПЗС-матрицу, формируя изображение для восстановления поперечного профиля и положения пучка. ФЛУМ состоит из 2 стандартных камер машинного зрения и вакуумной камеры с оптическими окнами (рис. 1, б). Вакуумная камера зачернялась изнутри с помощью графитового напыления для подавления переотражений фотонов от стенок, при этом видеокамеры дополнительно закрывались черной матовой фольгой для уменьшения внешней паразитной засветки. Также видеокамеры закрывались 5-мм свинцовыми экранами для уменьшения влияния рентгеновского фона от инжектора и защиты камеры от радиационных повреждений.

Регистрация и обработка изображений в режиме реального времени производятся с помощью программного обеспечения в среде LabVIEW. Имеющаяся на данный момент постобработка позволяет вычитать фоновый кадр, усредненный по заданному количеству накопленных кадров, применять к изображению ранговую фильтрацию, строить проекции распределения интенсивности, вычислять положение центра тяжести и среднеквадратичный размер пучка. На рис. 2 приведены пример оптического изображения, регистрируемого ФЛУМ, и соответствующая проекция распределения интенсивности, полученные при следующих параметрах: энергия пучка 400 кэВ, импульсный ток 52 мА, частота следования импульсов 50 Гц, экспозиция камеры 5 с.

Одним из факторов, ограничивающих точность измерения поперечного размера пучка, является неравномерный фон, вызванный шумами ПЗС-матрицы камеры, фоновой засветкой и переотражениями фотонов от стенок ионопровода, приводящий к отсутствию ярко выраженных границ пучка и увеличению измеряемой ширины про-

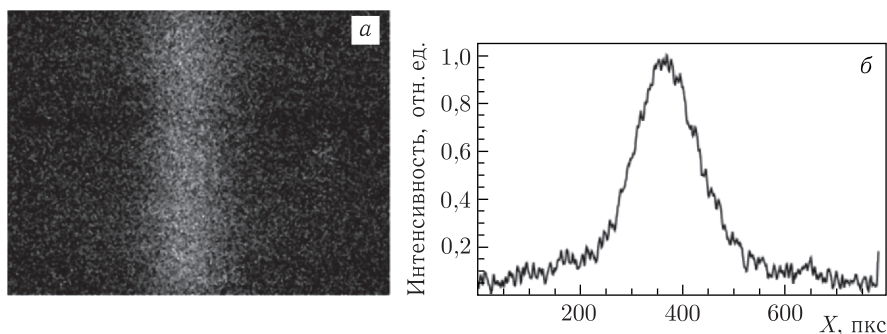


Рис. 2. а) Оптическое изображение пучка, регистрируемое ФЛУМ; б) профиль пучка — проекция распределения интенсивности пикселей (пкс) на зарегистрированном изображении

филя. Целью данной работы является разработка метода постобработки оптических изображений, позволяющего находить границы пучка на регистрируемых изображениях ФЛУМ на основе анализа проекции распределения интенсивности.

СОЗДАНИЕ ТЕСТОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для тестирования методов постобработки и оценки их точности был сгенерирован набор тестовых изображений, имитирующих регистрируемые изображения с известными положениями границ пучка и различными распределениями интенсивности. Неравномерный фон на сгенерированных изображениях имитировался с помощью нормального распределения, а зашумленные изображения получались наложением белого шума. Некоторые тестовые изображения представлены в табл. 1. Для создания тестовых изображений и тестирования исследуемых методов нахождения границ использовалась Wolfram Mathematica.


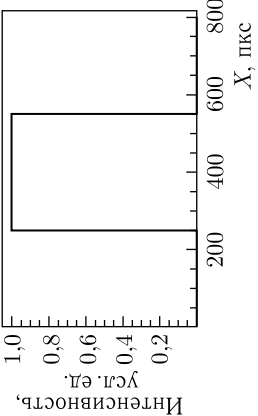
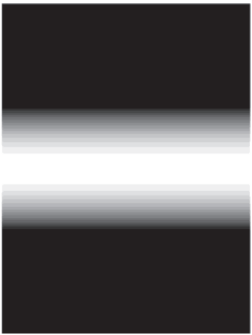
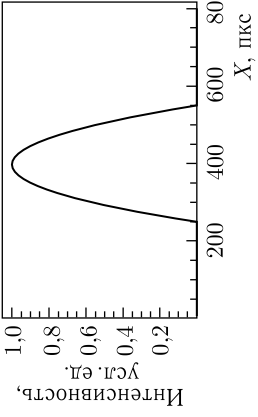

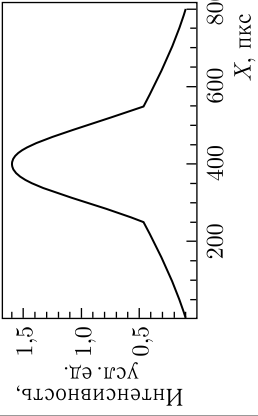
МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ГРАНИЦ С ПОИском НУЛЕЙ ЛАПЛАСИАНА

Классические методы поиска границ объектов на оптических изображениях основаны на предположении резкого изменения интенсивности вблизи границ, примеры таких методов приведены в работах [3, 4]. Один из таких методов заключается в поиске нулей лапласиана [3] распределения интенсивности — т. е. точек x_0 , соответствующих наиболее резкому изменению интенсивности.

Для проверки применимости данного способа нахождения границ была написана программа, в ходе работы которой изображение предварительно сглаживалось с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ) для уменьшения влияния шумовой компоненты на численное нахождение производных, после чего находились ближайшие к пику точки, удовлетворяющие условию $(d^2/dx^2)I(x_0) = 0$, где $I(x)$ — проекция распределения интенсивности.


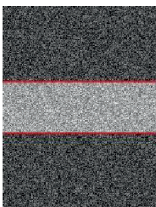
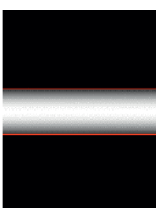
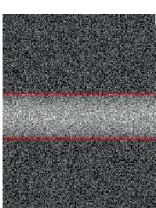
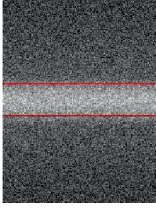

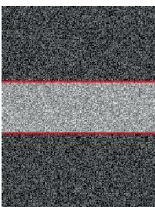
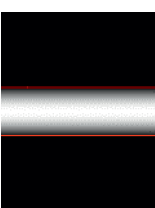
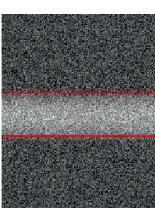
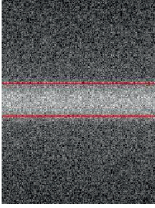

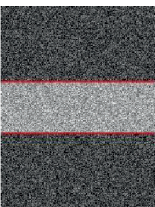
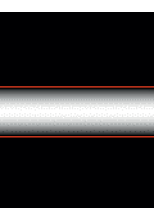
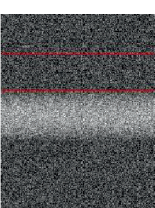
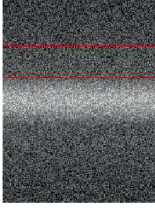
Результаты работы программы на тестовых изображениях приведены в табл. 2 — красными линиями обозначены найденные границы пучка. Из представленных результатов видно, что данный метод хорошо справляется с нахождением границ на изобра-

Таблица 1. Примеры тестовых изображений

Изображение			$I(x) = 1$	Функция распределения
Равномерное распределение			$I(x) = 1 - \left(\frac{x - \mu}{s/2}\right)^2$	Параболическое распределение
Модифицированное параболическое распределение с фоном			$I(x) = \left(1 - \left(\frac{x - \mu}{s/2}\right)^2\right)^{3/2} + A \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	Модифицированное параболическое распределение с фоном

Примечание. μ — положение центра масс пучка; s — его поперечный размер (варьировался в диапазоне 100–300 пкс); σ — ширина фонового сигнала (использовалось значение 210 пкс); A — амплитуда фонового сигнала (варьировалась в диапазоне 0–1).

Таблица 2. Проверка критерия границ по нулям лапласиана

Равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное модифицированное параболическое распределение с фоном ($s = 200$ пкс, $A = 0,4$)
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 0,2$				
 Размер – 201 пкс	 Размер – 201 пкс	 Размер – 178 пкс	 Размер – 178 пкс	 Размер – 127 пкс
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 0,5$				
 Размер – 201 пкс	 Размер – 201 пкс	 Размер – 190 пкс	 Размер – 170 пкс	 Размер – 126 пкс
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 2$				
 Размер – 201 пкс	 Размер – 201 пкс	 Размер – 196 пкс	 Размер – 141 пкс	 Размер – 123 пкс

жениях с резким изменением интенсивности на границе (равномерное распределение), но некорректно работает при плавном изменении интенсивности вблизи границ (параболическое распределение). При использовании низких значений частот среза ФНЧ изображение сглаживается вблизи краев пучка, за счет чего найденные границы сдвигаются внутрь пучка. Спектр зашумленного сигнала представляет собой сумму спектральных компонент сигнала и шума. Из-за конечной ширины сигнала высокие пространственные частоты в его спектре подавлены, поэтому, начиная с некоторой критической частоты, спектральная компонента шума начинает преобладать над сигналом [5]. Вследствие этого при высоком значении частоты среза ФНЧ ($\omega_{\text{ниж}} = 2$) фильтр плохо справляется с подавлением шумов, что приводит к некорректному определению границ.

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ГРАНИЦ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ЯДРА ПУЧКА

В этом разделе описан метод нахождения границ с выделением ядра пучка: в нем сначала определяется область, называемая ядром, в которой интенсивность превышает среднее значение. Затем границы пучка определяются как ближайшие к пику точки, в которых интенсивность становится ниже среднего значения вне ядра (рис. 3). В табл. 3 приведены примеры работы метода, для подавления шумов к распределениям интенсивности предварительно применялся фильтр нижних частот — данный метод корректно работает в отсутствие неравномерного фона (равномерное и параболическое распределения), но при его наличии границы, найденные с помощью данного метода, сдвигаются за пределы пучка.

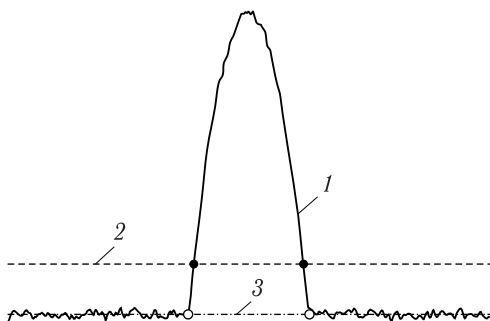
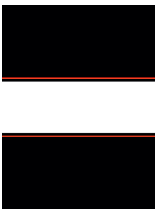
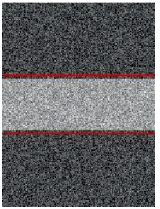
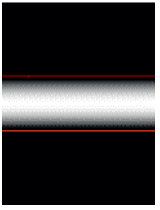
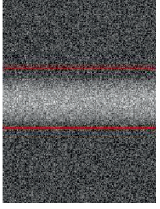
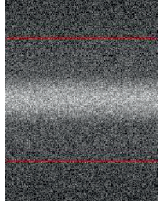

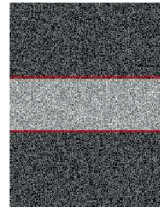
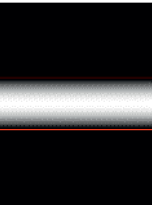
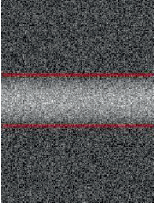
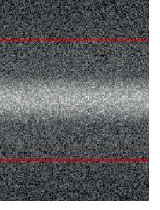

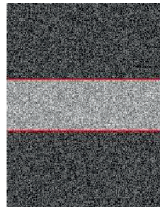
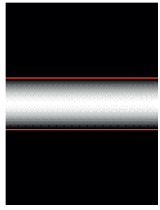
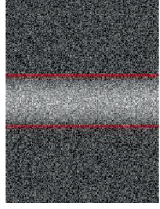
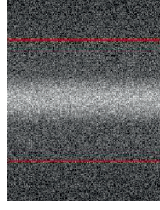


Рис. 3. Принцип работы метода с выделением ядра: 1 — распределение интенсивности; 2 — среднее значение интенсивности; темные кружки — границы ядра; 3 — среднее значение интенсивности вне ядра; светлые кружки — границы пучка

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ГРАНИЦ НА ОСНОВЕ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

В данном разделе рассмотрен способ нахождения границ пучка с помощью полосового фильтра — в пространственном спектре сигнала присутствует высокочастотная область, в которой представлены частоты с характерным масштабом изменения интенсивности существенно меньшим, чем размер пучка, что соответствует шумам, а также низкочастотная область, содержащая частоты с характерным масштабом изменения

Таблица 3. Проверка метода с выделением ядра

Равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное модифицированное параболическое распределение с фоном ($s = 200$ пкс, $A = 0,4$)
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 0,2$				
 Размер — 228 пкс	 Размер — 228 пкс	 Размер — 216 пкс	 Размер — 237 пкс	 Размер — 481 пкс
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 0,5$				
 Размер — 212 пкс	 Размер — 210 пкс	 Размер — 206 пкс	 Размер — 202 пкс	 Размер — 472 пкс
Частота среза фильтра нижних частот $\omega_{\text{ниж}} = 2$				
 Размер — 204 пкс	 Размер — 204 пкс	 Размер — 202 пкс	 Размер — 201 пкс	 Размер — 472 пкс

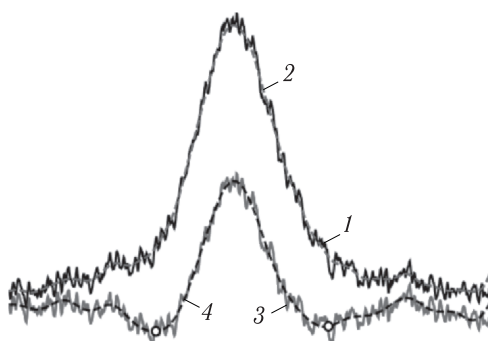


Рис. 4. Принцип работы метода нахождения границ с использованием полосового фильтра: 1 — исходное распределение интенсивности; 2 — распределение после применения фильтра нижних частот; 3 — распределение после применения фильтра верхних частот; 4 — распределение после применения полосового фильтра; светлые кружки — границы пучка

интенсивности, превышающим размер пучка, что соответствует фону. Метод нахождения границ может быть реализован с помощью полосовой фильтрации, включающей в себя фильтр нижних частот, вырезающий высокочастотную часть спектра, в которой шумовая компонента преобладает над сигналом, и фильтр верхних частот, вырезающий низкочастотную часть спектра, содержащую фон. В оставшейся центральной полосе спектра содержится информация о поперечном профиле пучка. В этом методе границы пучка определяются как ближайшие к пику локальные минимумы распределения интенсивности после применения полосового фильтра, принцип работы данного метода проиллюстрирован на рис. 4.

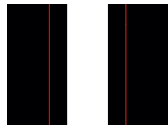
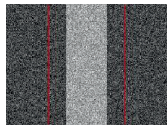
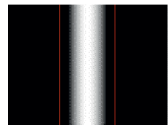
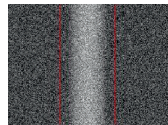
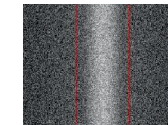

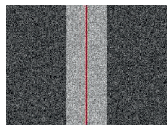
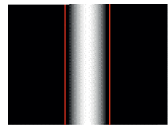
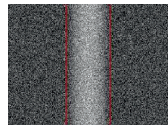
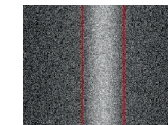

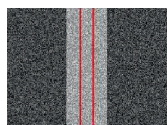

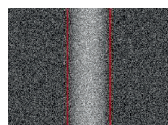
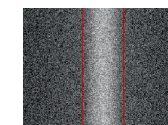

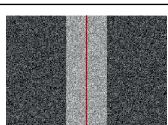
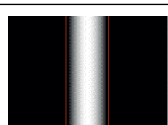
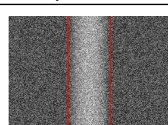
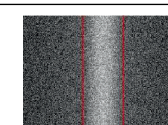

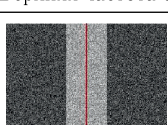
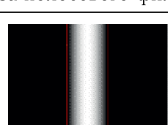
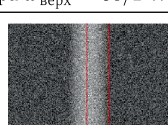
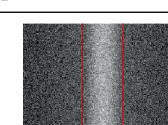
Спектр пространственных частот пучка и, соответственно, частоты среза полосового фильтра зависят от ширины пучка. Поскольку размер пучка заранее неизвестен, но ширина на полувысоте (FWHM) слабо подвержена искажению неравномерным фоном, то параметры полосового фильтра определяются через FWHM, измеряемую по исходному распределению до применения фильтрации.

Критерий низких частот, не содержащих информацию о границах пучка, заключается в том, что их полупериод превышает размер пучка. Для ФЛУМ на низкоэнергетическом канале транспортировки ЛУ ИЯИ РАН характерно распределение интенсивности $I(x) \propto (1 - (x/s/2)^2)^{3/2}$, где x — поперечная координата, s — поперечный размер пучка, для данного распределения размер пучка связан с его шириной на полувысоте следующим соотношением $s \approx 1,6 \text{ FWHM}$, что соответствует нижней частоте среза полосового фильтра $\omega_{\text{ниж}} = \pi/s \approx 2/\text{FWHM}$.

Оптимальная верхняя частота среза полосового фильтра должна быть достаточно низкой, чтобы целиком вырезать высокочастотную часть спектра, в которой шумовая компонента преобладает над сигналом, но при этом быть достаточно высокой для того, чтобы не вырезать из спектра частоты, содержащие информацию о распределении интенсивности вблизи границ пучка.

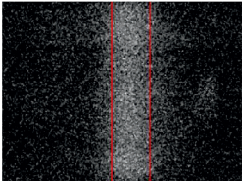
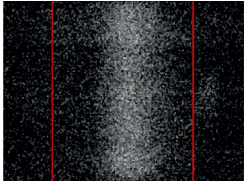
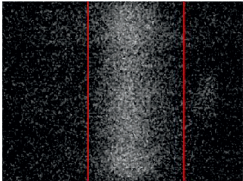
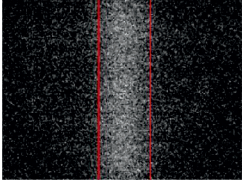
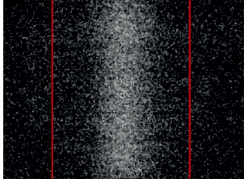
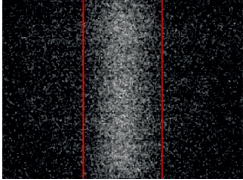
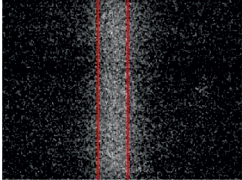
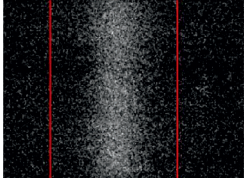
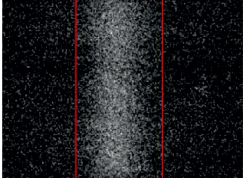
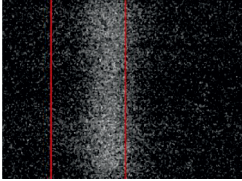
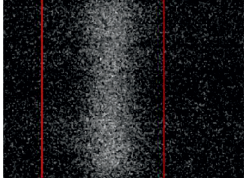
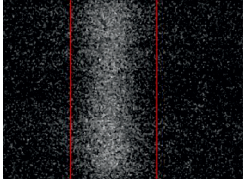
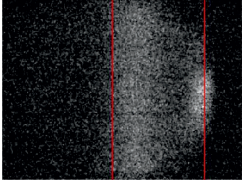
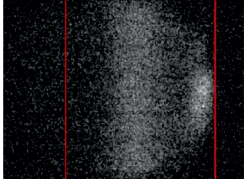
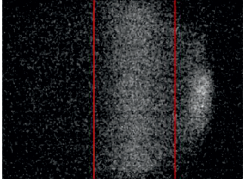
В табл. 4 приведены примеры обработки изображений данным методом с различными верхними частотами среза полосового фильтра. Из представленных результатов видно, что данный метод хорошо справляется с нахождением границ на изображении

Таблица 4. Проверка метода с использованием полосового фильтра

Равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное равномерное распределение ($s = 200$ пкс)	Параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное параболическое распределение ($s = 200$ пкс)	Зашумленное модифицированное параболическое распределение с фоном ($s = 200$ пкс, $A = 0,4$)
Верхняя частота среза полосового фильтра $\omega_{\text{верх}} = 5/\text{FWHM}$				
 Размер – 381 пкс	 Размер – 380 пкс	 Размер – 275 пкс	 Размер – 275 пкс	 Размер – 262 пкс
Верхняя частота среза полосового фильтра $\omega_{\text{верх}} = 15/\text{FWHM}$				
 Размер – 0 пкс	 Размер – 0 пкс	 Размер – 221 пкс	 Размер – 220 пкс	 Размер – 208 пкс
Верхняя частота среза полосового фильтра $\omega_{\text{верх}} = 20/\text{FWHM}$				
 Размер – 65 пкс	 Размер – 65 пкс	 Размер – 215 пкс	 Размер – 214 пкс	 Размер – 205 пкс
Верхняя частота среза полосового фильтра $\omega_{\text{верх}} = 25/\text{FWHM}$				
 Размер – 97 пкс	 Размер – 0 пкс	 Размер – 213 пкс	 Размер – 211 пкс	 Размер – 202 пкс
Верхняя частота среза полосового фильтра $\omega_{\text{верх}} = 50/\text{FWHM}$				
 Размер – 0 пкс	 Размер – 0 пкс	 Размер – 207 пкс	 Размер – 109 пкс	 Размер – 202 пкс

ях с плавным изменением интенсивности вблизи границ (параболическое распределение), но некорректно работает при равномерном распределении интенсивности. Стоит отметить, что верхние частоты среза полосового фильтра, при которых метод работает корректно, зависят от уровня шумов: чем выше уровень шумов, тем ниже значение критической частоты, начиная с которой шумовая компонента преобладает в спектре пространственных частот над сигналом, и тем ниже должна быть верхняя частота

Таблица 5. Обработка экспериментально полученных изображений ФЛУМ

Нули лапласиана с предварительным применением фильтра нижних частот с частотой среза $\omega_{\text{ниж}} = 0,5$	Выделение ядра с предварительным применением фильтра нижних частот с частотой среза $\omega_{\text{ниж}} = 0,5$	Полосовой фильтр с частотами среза $\omega_{\text{ниж}} = 2/\text{FWHM}$, $\omega_{\text{верх}} = 20/\text{FWHM}$
 <p>Размер пучка – 123 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 455 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 311 пкс</p>
 <p>Размер пучка – 167 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 445 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 254 пкс</p>
 <p>Размер пучка – 97 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 412 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 280 пкс</p>
 <p>Размер пучка – 240 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 394 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 278 пкс</p>
 <p>Размер пучка – 297 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 484 пкс</p>	 <p>Размер пучка – 262 пкс</p>

среза полосового фильтра. В то время как уменьшение верхней частоты среза может приводить к завышению размеров пучка, так как при этом вырезается часть спектра, содержащая информацию о границах пучка ($\omega_{\text{верх}} = 5/\text{FWHM}$). При высоких частотах ($\omega_{\text{верх}} = 50/\text{FWHM}$, параболическое распределение) шумовая компонента остается в сигнале, что приводит к неправильному нахождению границ.

ТЕСТИРОВАНИЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ПОЛУЧЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В табл. 5 приведено сравнение рассматриваемых методов постобработки на изображениях, зарегистрированных ФЛУМ в сеансах работы ускорителя. Метод с поиском нулей лапласиана занижает размер пучка, в то время как метод, основанный на выделении ядра пучка, напротив приводит к уширению пучка из-за наличия неравномерного фона, что согласуется с результатами, полученными ранее на тестовых изображениях. Сравнение полученных результатов показывает, что из рассмотренных методов метод с использованием полосовой фильтрации лучше всего справляется с нахождением границ на изображениях с неравномерным фоном как на тестовых изображениях, так и на экспериментально полученных изображениях ФЛУМ.

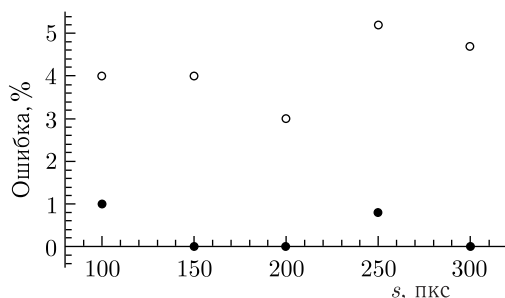


Рис. 5. Оценка точности метода нахождения границ с использованием полосового фильтра на тестовых изображениях: темные кружки — амплитуда фонового сигнала $A = 0$; светлые кружки — амплитуда фонового сигнала $A = 0,6$

На рис. 5 приведена зависимость относительной ошибки определения размера пучка при использовании метода на основе полосовой фильтрации. Расчет проведен для тестовых изображений с модифицированным параболическим распределением при различных размерах пучка и амплитудах фонового сигнала, частотах среза полосового фильтра $\omega_{\text{ниж}} = 2/\text{FWHM}$ и $\omega_{\text{верх}} = 20/\text{FWHM}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено сравнение методов постобработки оптических изображений для определения границ пучка по результатам диагностических измерений флуоресцентного монитора. Были рассмотрены три метода с разными подходами к определению границ пучка и протестированы на сгенерированных тестовых

изображениях и экспериментальных данных, полученных в ходе работы ускорителя протонов.

Метод, основанный на нахождении нулей лапласиана распределения интенсивности, эффективно определяет резкие границы с резкими изменениями интенсивности, но занижает размер пучка при плавном изменении интенсивности вблизи границ. Метод с выделением ядра пучка хорошо работает при отсутствии неравномерного фона, но завышает размер пучка при его наличии. Метод на основе полосовой фильтрации успешно выделяет границы на изображениях с неравномерным фоном, но не подходит для определения границ при равномерном распределении интенсивности в пучке. Показано, что верхние частоты среза полосового фильтра, при которых метод работает корректно, зависят от уровня шумов на изображении, а также приведена оценка точности данного метода постобработки для поперечного профиля пучка, характерного для низкоэнергетического канала транспортировки ЛУ ИЯИ РАН.

Сравнение результатов показывает, что метод с использованием полосовой фильтрации является предпочтительным для постобработки измерений флуоресцентного монитора. Описанный метод постобработки также может быть использован в других датчиках, регистрирующих оптические изображения пучков, таких как люминесцентные экраны и ионизационные профилометры.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика» (НЦФМ-6-2325-113).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Becker F., Andre C., Dorn C., Forck P., Haseitl R., Walasek-Hoehne B., Dandl T., Heindl T., Ulrich A.* // IPAC 2012. New Orleans, 2012. P. 798–800.
2. *Forck P.* Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. 2022. 161 p.
3. *Shrivakshan G. T., Chandrasekar C.* // Intern. J. Comput. Sci. Issues. 2012. V. 9, No. 5. P. 269.
4. *Barcelos C. A. Z., Boaventura M., Silva E. C.* // IEEE Trans. Image Processing. 2003. V. 12, No. 7. P. 751–763.
5. *Пергамент М. И.* Методы исследований в экспериментальной физике. М.: Интеллект, 2010. 303 с.
6. *Singh I., Neeru N.* // Intern. J. Comput. Appl. 2014. V. 96, No. 19. P. 21–30.

Получено 21 марта 2025 г.