

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 621.384.6

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ
ЗАХВАТА И ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ДАТЧИКОВ
ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИЯИ РАН¹

© 2024 г. А. И. Титов^{a, b, *}, С. А. Гаврилов^{a, b}, И. И. Полоник^{a, b}

^a Институт ядерных исследований Российской академии наук
Россия, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

^b Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет),
Россия, 141700, Долгопрудный, Московская обл., Институтский переулок, 9

*e-mail: alexander.i.titov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.2023 г.

После доработки 2.05.2024 г.

Принята к публикации 9.05.2024 г.

За последние несколько лет на линейном ускорителе ИЯИ РАН были установлены флуоресцентный монитор и несколько сцинтилляционных экранов для решения задач по диагностике пучка. Для сбора и обработки изображений пучка, полученных при помощи данных устройств, а также ионизационного монитора поперечного сечения, было разработано многофункциональное программное обеспечение (ПО). Описана работа вычислительного ядра программного обеспечения, которое отвечает за управление камерами машинного зрения, захват и коррекцию полученных изображений. Также обсуждаются особенности ПО, разработанные для конкретных диагностических устройств, и преимущества их использования. Представлены экспериментальные данные с различных датчиков пучка, полученные при помощи реализованного ПО.

~~Ключевые слова: линейный ускоритель ионов, неразрушающая диагностика пучка, измерители профиля пучка~~

1. ВВЕДЕНИЕ

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск

В ускорительных комплексах по всему миру используются профилометры, которые основаны на регистрации оптического излучения от вещества, взаимодействующего с пучком: мониторы свечения остаточного газа, ионизационные мониторы, люминесцентные экраны и экраны переходного излучения. Любой из этих приборов в современном ускорительном комплексе не может функционировать без программного обеспечения (ПО). Именно ПО отвечает за настройку видеокамеры, обработку полученных изображений и анализ измеряемых параметров пучка. Многие ускорительные комплексы разрабатывают ПО этих приборов под свои нужды, что приводит к невероятному разнообразию программ часто со схожими базовыми функциями. В некоторых случаях различные диагностические приборы, работающие с оптическими сигналами, но установленные в одном ускорительном комплексе, имеют различное ПО [1].

На линейном ускорителе (ЛУ) ИЯИ РАН был выбран следующий подход к созданию программного обеспечения для диагностического оборудования, использующего оптические сигналы: создание единой программной основы для всего многообразия оптической диагностики профиля пучка, которая используется в ускорительном комплексе, и добавление уникальных функций, требующихся в конкретном случае.

Линейный ускоритель протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН (Москва, Троицк), схема которого приведена на рис. 1, представляет собой сильноточный резонансный ускоритель, рассчитанный на средние и промежуточные энергии до 602 МэВ, ток пучка до 15 мА, длительность импульса тока до 150 мкс с частотой повторения импульсов до 50 Гц. На нем размещено четыре профилометра, основанных на регистрации оптических сигналов: флуоресцентный монитор (ФЛУМ), установленный на низкоэнергетическом канале транспортировки пучка протонов, ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС), находящийся на выходе ускорителя, и два люминесцентных экрана, предназначенных для диагностики пучка после выхода из ионопровода на стенде протонного облучения (ЛД СПО) и комплексе протонной терапии (ЛД КПТ).

Рис. 1. Схема линейного ускорителя ИЯИ РАН: ФЛУМ – флуоресцентный монитор; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ЛД СПО – люминесцентная диагностика стенда протонного облучения; ЛД КПТ – люминесцентная диагностика; RFQ – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; P – резонатор.

2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Разработанное ПО для всех приборов основано на одинаковой базе, отвечающей за выполнение основных функций. Далее для каждого конкретного случая были созданы дополнительные модули. Все программное обеспечение реализовано на LabVIEW, как и большая часть программного обеспечения системы управления ЛУ ИЯИ РАН.

2.1. Базовое ПО захвата и обработки изображений

Общая для всех диагностических устройств часть программного обеспечения отвечает за сбор, коррекцию, обработку и сохранение изображений, полученных от видеокамеры. Также базовое ПО отвечает за управление настройками самой видеокамеры: выдержкой, усилением и типом синхронизации.

В большинстве случаев для защиты от радиационного воздействия камеры расположены на некотором отдалении от ионопровода ускорителя и под некоторым углом к источнику излучения, что приводит к искажению изображения, регистрируемого камерой. Для получения достоверной информации об одномерных профилях пучка необходима коррекция полученного изображения.

Основная процедура коррекции заключается в геометрическом преобразовании изображения путем задания системы координат на изображении и преобразовании выбранной системы к требуемому виду. Алгоритм работает одинаково для всех диагностических устройств, исключением является выбор точек, по которым проводится коррекция изображения. Процедура коррекции, пример которой приведен на рис. 2, выполняется до измерений, после чего создается специальный файл, на основе которого программа проводит коррекцию всех последующих изображений. Вся дальнейшая работа ведется с откорректированными изображениями.

Рис. 2. Процедура коррекции изображения. Цифрами показано изображение экрана на различных этапах корректировки.

Для исключения паразитных засветок базовая программа включает в себя функцию вычитания фонового кадра. После вычитания фонового кадра изображение подвергается

анализу: создаются графики с поперечным сечением и одномерные профили пучка, рассчитываются положение центра масс и среднеквадратичный размер пучка.

Интерфейс программы, практически полностью определяемый базовым модулем, выполнен в виде трех вкладок с различными функциями. На первой вкладке отображается исходное изначальное изображение, на второй – изображение после процедуры коррекции. На третьей вкладке находятся результаты анализа откорректированного изображения и дополнительные модули, разработанные для конкретного устройства. Также на этой вкладке можно управлять настройками видеокамеры и суммированием кадров, сделанных камерой.

Программа имеет возможность сохранять отдельные изображения и произвольные по размеру серии кадров. ПО сохраняет изображения в формате PNG, скриншот третьей вкладки программы и данные о профилях пучка. На рис. 3 представлена третья вкладка программы люминесцентной диагностики КПП.

Рис. 3. Вкладка интерфейса программы обработки изображения с люминесцентного экрана КПП.

2.2. Модуль расчета заряда

Многие люминофоры имеют линейную зависимость световыхода от числа частиц, попавших в сцинтиллятор [2]. Данный эффект позволяет использовать люминесцентный экран как измеритель не только профиля пучка, но и суммарного заряда (или числа частиц) в импульсе тока пучка.

Для ЛД СПО был реализован модуль расчета числа частиц в импульсе пучка на основе интенсивности свечения люминофора. Для того чтобы не привязываться к свойствам конкретного люминофора и его качеству, в реализованном ПО необходимо предварительно провести калибровку при помощи какого-либо эталонного измерителя тока, например индукционного датчика тока. Таким образом, программа использует только факт линейности световыхода люминофора, учитывает зависимость измеренной интенсивности от настроек видеокамеры и количества суммированных кадров. В случае СПО особый интерес представляет плотность числа частиц, поэтому в программе имеется возможность измерить число частиц в заданной пользователем области.

2.3. Модуль обработки области интереса

В случае ИМПС потери пучка в ускорителе приводят к образованию паразитной засветки, связанной с особенностями работы устройства. При учете свечения всего изображения измеряемый профиль пучка становятся некорректными.

Для решения данной проблемы для ИМПС был написан модуль обработки области интереса, который при создании одномерных профилей пучка учитывает только заданную пользователем область, что позволяет минимизировать влияние паразитной засветки. Также в этом модуле настраивается уровень отсечки интенсивности для ликвидации влияния однородной паразитной засветки по всей выбранной области. Подобная функция используется в ПО ФЛУМ, поскольку там могут присутствовать переотражения от стенок камеры и смотрового окна.

2.4. Модуль онлайн-томографии

Модуль онлайн-томографии является реализацией отдельной процедуры по измерению плотности распределения частиц в поперечных фазовых плоскостях. Изначально данная процедура создавалась как дополнительный модуль для программы обработки изображений ИМПС, но позже вылилась в отдельный процесс вычислений на основе данных с любого профилометра, установленного на ЛУ ИЯИ РАН. Реализация в виде дополнительного модуля включает в себя управление магнитоопикой ускорителя, томографическую реконструкцию и постобработку полученных данных. Подробное описание работы данного модуля представлено в [3].

2.5. Модуль ранговой фильтрации

Для флуоресцентного монитора был разработан модуль ранговой фильтрации изображения. Небольшая яркость свечения газа приводит к тому, что видеокамеры ФЛУМ работают на пределе чувствительности или с максимальными значениями выдержки и усиления сигнала. Ранговая фильтрация была введена для подавления возникающих шумов и улучшения качества изображения.

Для подбора оптимальных параметров была реализована возможность проводить фильтрацию отдельных кадров и изображения, просуммированного базовым модулем. Во

время работы оператор может настраивать размер окна фильтрации и ранг, а также переключить модуль в режим медианной фильтрации.

В табл. 1 приведены данные по использованию конкретных модулей на различных профилометрах, а на рис. 4 представлены интерфейсы отдельных модулей.

Таблица 1. Данные об использовании модулей на различных профилометрах

Название модуля	ФЛУМ	ИМПС	ЛД СПО	ЛД КПТ
Базовый модуль	+	+	+	+
Модуль расчета заряда	-	-	+	-
Модуль обработки области интереса	+	+	-	-
Модуль онлайн-томографии	-	+	-	-
Модуль ранговой фильтрации	+	-	-	-

Рис. 4. Интерфейсы дополнительных модулей: 1 – модуль расчета заряда, 2 – модуль выбора области интереса, 3 – модуль ранговой фильтрации, 4 – модуль онлайн томографии.

3. ОПЫТ И РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Результаты ФЛУМ

Флуоресцентный монитор был установлен с целью проверки работоспособности подобного устройства. Были проведены исследования оптимальных настроек модуля ранговой фильтрации на основе изображений пучка. Сравнение показало, что оптимумом является применение медианного фильтра до и после суммирования кадров при размере окна фильтрации равном 5 пикселям.

Что касается контроля за пучком, то ФЛУМ обеспечил неразрушающий контроль за размером и положением пучка на канале транспортировки. Это позволило провести оптимизацию динамики пучка на данном участке и отслеживать изменение параметров работы инжектора протонов и элементов магнитооптики канала.

3.2. Результаты ИМПС

Обновление программного обеспечения для системы сбора данных с ИМПС позволило упростить настройку перед сеансами работы ускорителя. Возможность суммировать отдельные кадры позволяет использовать меньшую выдержку видеокамеры, что снижает зашумленность итогового изображения. В остальном ПО дает возможность применять ИМПС

для диагностики пучков протонов и отрицательных ионов водорода с разными параметрами (рис. 5).

Рис. 5. Изображения пучков с разными параметрами с ИМПС: 1 – пучок H^+ с импульсным током 12 мкА, длительностью 20 мкс, энергией 158 МэВ; 2 – пучок H^- с импульсным током 1.5 мА, длительностью 47 мкс, энергией 100 МэВ; 3 – пучок H^+ с импульсным током 7 мА, длительностью 100 мкс, энергией 267 МэВ; 4 – пучок H^+ с импульсным током 10 мА, длительностью 0.25 мкс, энергией 267 МэВ.

3.3. Опыт использования ЛД СПО

Способность измерять заряд при помощи люминесцентной диагностики СПО позволила провести исследования во всем заявленном диапазоне работы стенда во время первых сеансов, поскольку количество частиц в импульсе от 10^9 до 10^{11} могло быть точно измерено только люминесцентным экраном. Установленные там же индукционный датчик тока (ИДТ) и многоанодный газовый счетчик (МГС) имели следующие рабочие диапазоны: 10^{11} – 10^{13} и 10^7 – 10^9 частиц в импульсе соответственно.

На данный момент диапазоны ИДТ и МГС пересекаются, поэтому нет необходимости в промежуточном измерителе интенсивности. Люминесцентный экран используется как профилометр, а показания модуля расчета заряда используются только для качественной оценки параметров пучка.

3.4. Результаты ЛД КПП

Люминесцентный экран на выходе ионопровода у комплекса протонной терапии был установлен для улучшения качества проводки пучка в процедурную КПП и увеличения точности измерений положения и размера пучка. Данная задача возникла после начала исследований в области флэш-терапии сотрудниками КПП. Использование люминесцентной диагностики в паре с МГС, установленном на оси пучка на расстоянии 1 м от экрана, позволяет провести пучок в процедурную строго в соответствии с запросами комплекса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программное обеспечение для обработки данных с оптических измерителей профиля пучка разработано таким образом, что может быть использовано для любого типа оптического измерителя независимо от принципов его работы. Это подтверждается тем, что описанное в данной работе ПО успешно используется на протяжении нескольких лет на четырех профилометрах трех разных типов.

Используемый в разработке подход позволяет использовать успешные наработки, реализованные для одного прибора, на всех остальных устройствах. При необходимости установки дополнительных профилометров, работающих по принципу излучения оптических сигналов, реализованное базовое ПО и дополнительные модули могут быть в кратчайшие сроки адаптированы для использования с новым прибором.

Результаты, полученные с помощью уже установленных приборов и данного ПО, позволяют осуществлять контроль за параметрами пучка и выполнять поставленные задачи по его проводке.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forck P.* Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. Germany, Darmstadt: Joint University Accelerator School, January – March, 2006. P. 71.
2. *Forck P., Andre C., Becker F., Haseitl R., Reiter A., Walasek-Höhne B., Krishnakumar R., Ensinger W.* Scintillation screen investigations for high energy heavy ion beams at GSI // Proc. of DIPAC11. Hamburg, Germany. P. 170.
3. *Титов А.И., Брагин С.Е., Володкевич О.М., Гаверлов С.А.* // ПТЭ. № 1. 2023. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816222060209>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема линейного ускорителя ИЯИ РАН: ФЛУМ – флуоресцентный монитор; ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения; ЛД СПО – люминесцентная диагностика стенда протонного облучения; ЛД КППТ – люминесцентная диагностика; RFQ – резонатор с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой; Р – резонатор.

Рис. 2. Процедура коррекции изображения. Цифрами показано изображение экрана на различных этапах корректировки.

Рис. 3. Вкладка интерфейса программы обработки изображения с люминесцентного экрана КППТ.

Рис. 4. Интерфейсы дополнительных модулей: 1 – модуль расчета заряда, 2 – модуль выбора области интереса, 3 – модуль ранговой фильтрации, 4 – модуль онлайн томографии.

Рис. 5. Изображения пучков с разными параметрами с ИМПС: 1 – пучок H^+ с импульсным током 12 мкА, длительностью 20 мкс, энергией 158 МэВ; 2 – пучок H^+ с импульсным током 1.5 мА, длительностью 47 мкс, энергией 100 МэВ; 3 – пучок H^+ с импульсным током 7 мА, длительностью 100 мкс, энергией 267 МэВ; 4 – пучок H^+ с импульсным током 10 мА, длительностью 0.25 мкс, энергией 267 МэВ.

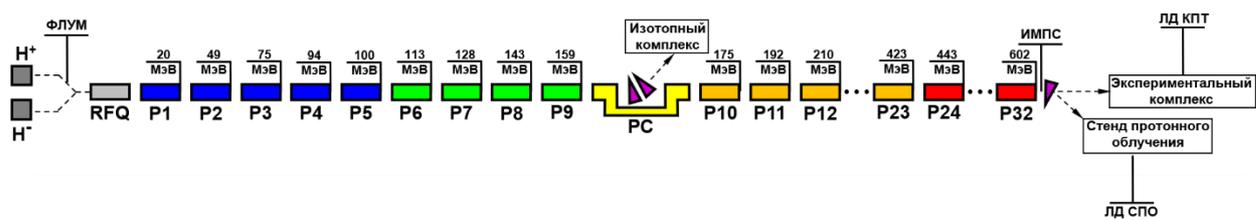


Рис. 1

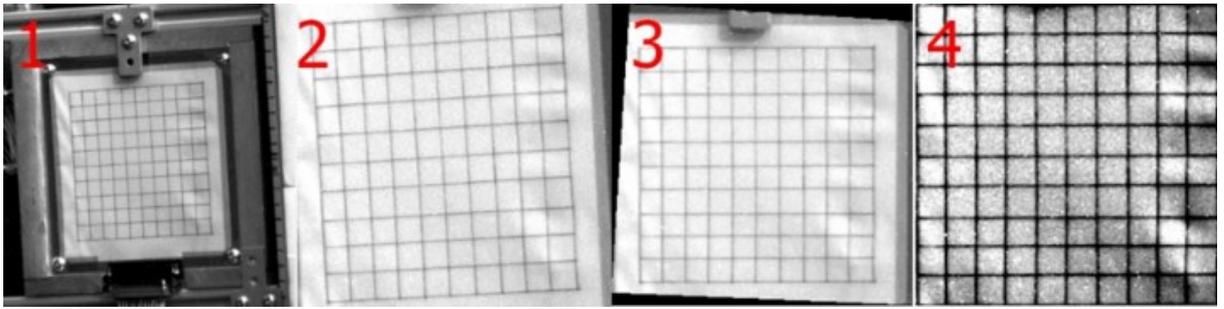


Рис. 2

Изображение пучка

Настройки

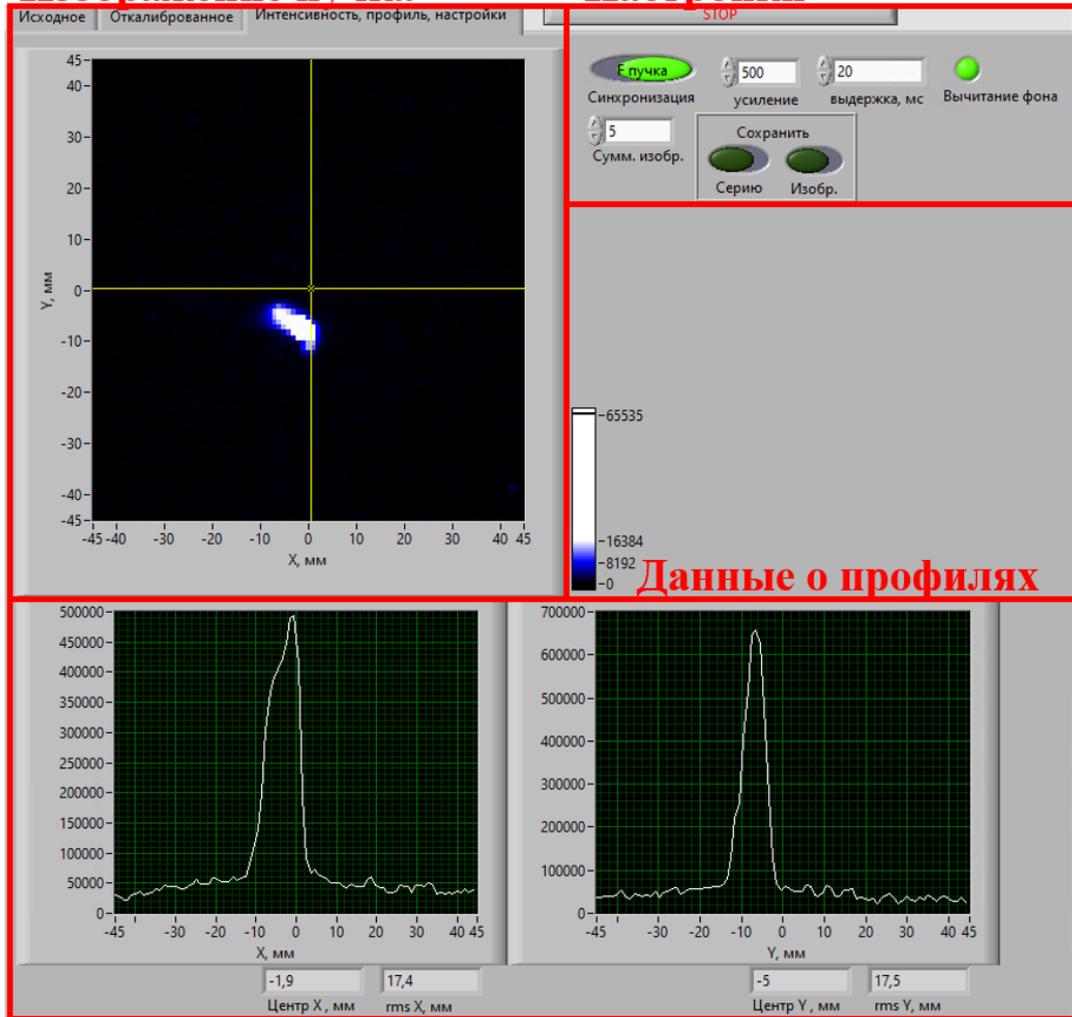


Рис. 3

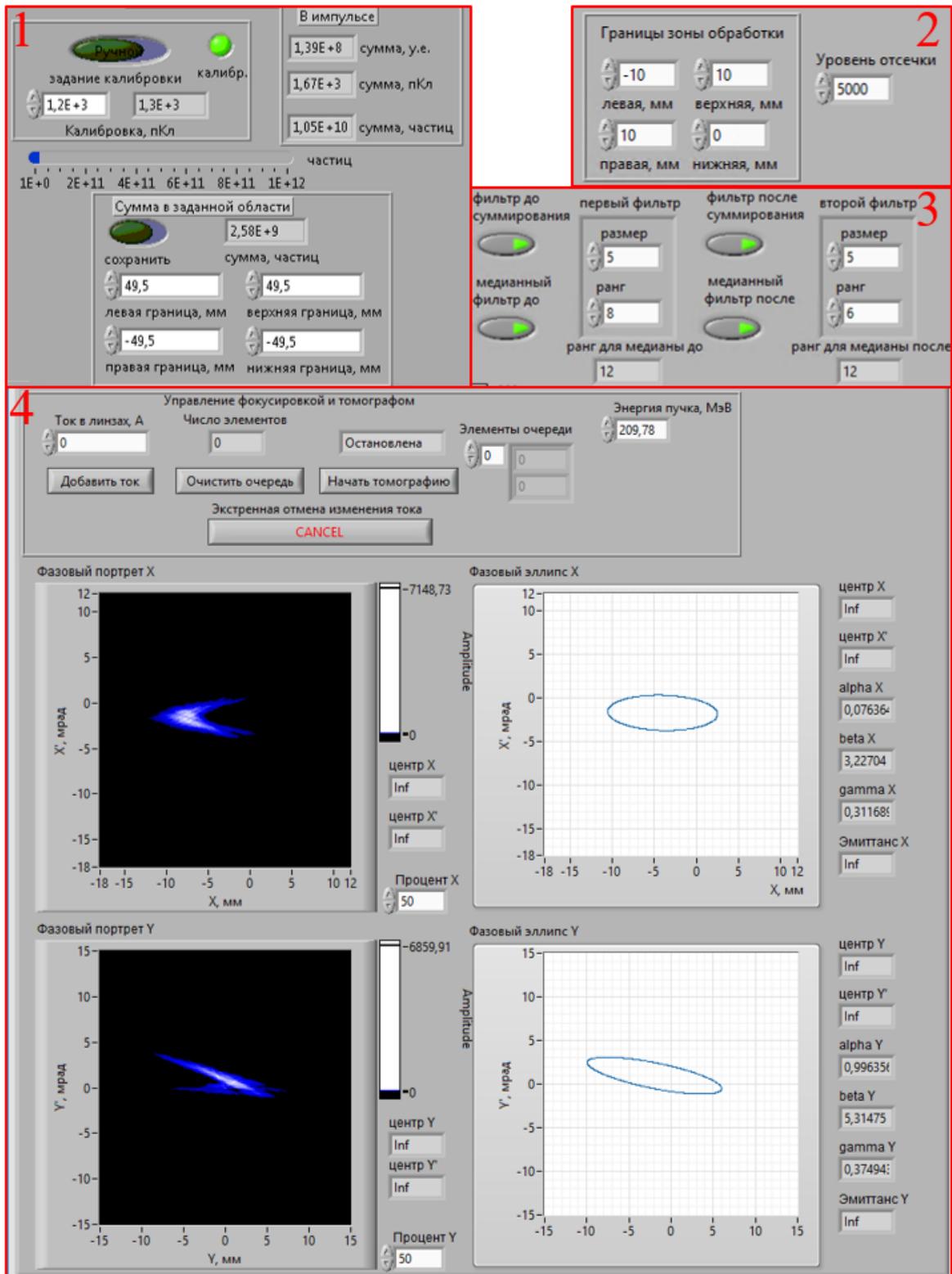


Рис. 4

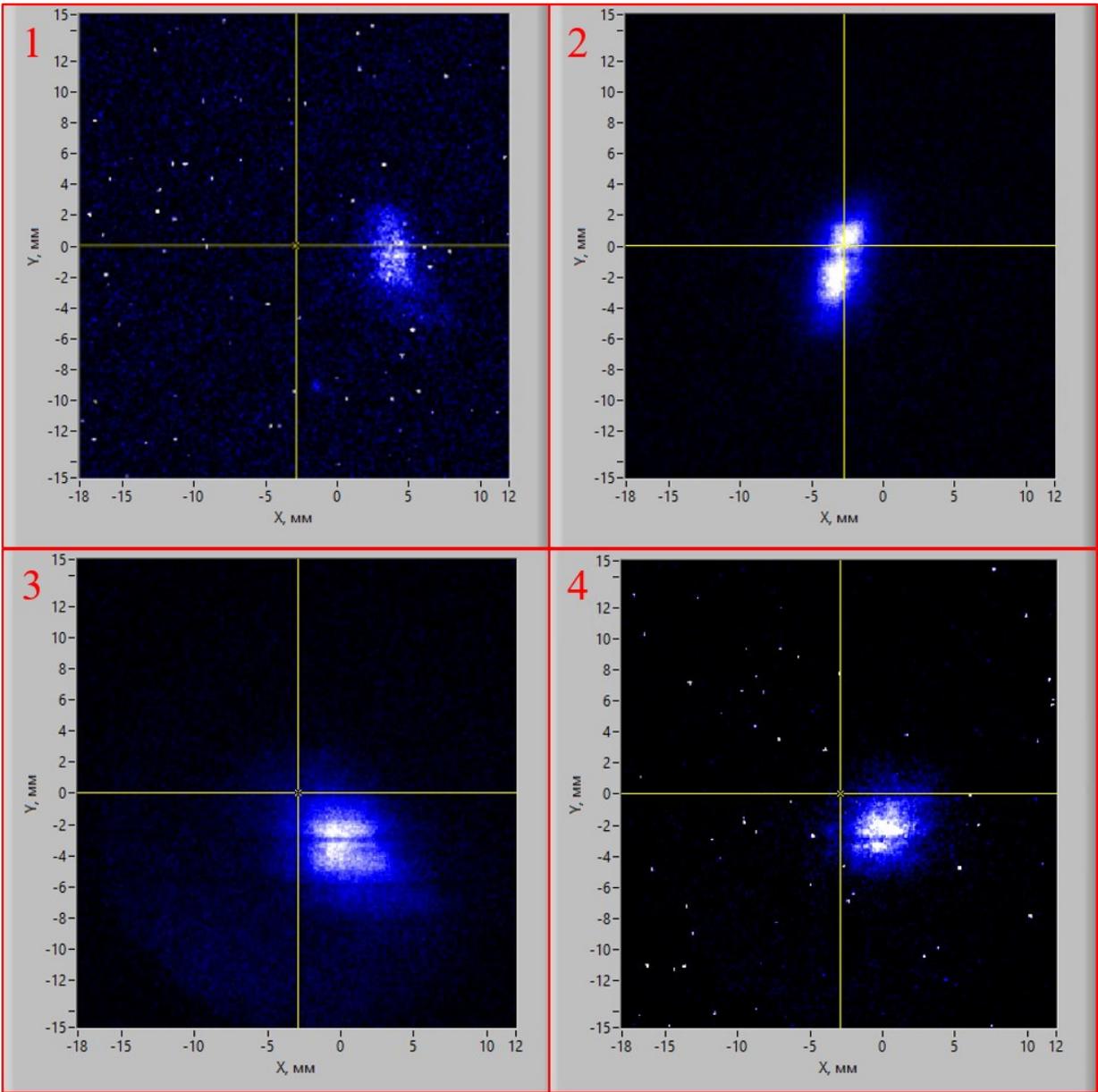


Рис. 5

Для связи с авторами:

Титов Александр

E-mail: alexander.i.titov@yandex.ru

Тел.: 8-915-041-89-06 (моб.)

Гаврилов Сергей

E-mail: s.gavrilov@gmail.com

Тел.: 8-919-770-81-53 (моб.)

Полоник Иван

E-mail: polonik.ii@phystech.edu

Для переводчика:

~~MULTIPURPOSE SOFTWARE FOR ACQUISITION AND PROCESSING OF OPTICAL SIGNALS FROM BEAM PROFILE MONITORS AT INR LINAC~~

~~During the past few years beam induced fluorescence monitor and several scintillation screens were implemented at INR-RAS linac to solve new beam diagnostics tasks. Multipurpose software for acquisition and processing of the beam images produced by these monitors and beam cross-section monitor was developed at INR. The software kernel for industrial cameras control, image acquisition and calibration is described in this paper. The features of software, which were developed for different beam monitors, and advantages of their use are discussed. Various experimental data from different profile monitors is presented.~~

~~1. Forck P. Lecture Notes on Beam Instrumentation and Diagnostics. Germany, Darmstadt: Joint University Accelerator School, January – March, 2006. P. 71.~~

~~2. Forck P., Andre C., Becker F., Haseitl R., Reiter A., Walasek-Höhne B., Krishnakumar R., Ensinger W. Scintillation screen investigations for high energy heavy ion beams at GSI // Proc. of DIPAC11. Hamburg, Germany. P. 170.~~

~~3. Titov A.I., Bragin S.E., Volodkevich O.M., Gavrilov S.A. // Instruments and Experimental Techniques. 2023. V. 66. Iss. 1. P. 1.~~

~~<https://doi.org/10.1134/S0020441222060185>~~