

ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭМИТТАНСА ПУЧКА (РЕРРЕР-РОТ МЕТОД ДЛЯ ИСТОЧНИКА КРИОН)

*В. С. Александров¹, Е. Е. Донец, Е. В. Нюхалова, А. К. Каминский,
С. Н. Седых, А. В. Тузиков, А. В. Филиппов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дано описание разработанных на платформах Wolfram Mathematica и Origin программ для первичной обработки фотоснимков изображения пучка на маске. При формировании файла координат изображения учитываются углы поворотов вокруг оси и в вертикальной плоскости. Приведены результаты вычисления эмиттанса с помощью программы `Per_emit`, написанной в Visual Basic, по сформированному файлу в тестовом режиме.

The description of the codes for preprocessing of pictures of the image of a beam on a mask developed on the Wolfram Mathematica and Origin platforms is given. At forming the file of coordinates of the image, angles of turns round an axis and in the vertical plane are considered. Results of computation of an emittance by means of the `Per_emit` program written in Visual Basic for the created file are given in the test mode.

PACS: 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований продолжается разработка проекта и создание ионного коллайдера NICA [1]. При расчете каналов транспортировки и других узлов ускорительного комплекса используются эмиттанс пучка и параметры Твисса. Наиболее привлекательным представляется оперативный и точный метод `rerreg-pot` [2], позволяющий проводить необходимые измерения за один «выстрел». Конструкция источника КРИОН [3] позволяет также использовать и метод уравнения огибающей [4], дающий приемлемую точность за 3–4 измерения. Ожидаемое значение среднеквадратичного эмиттанса — порядка $20\text{--}40\pi$ мм·мрад, диаметр пучка ~ 10 мм.

1. УСТАНОВКА И МЕТОД

Схема установки `rerreg-pot` показана на рис. 1. После прохождения сквозь отверстия маски `rerreg-pot` пучок разделяется на фрагменты, для которых влияние собственного заряда на динамику незначительно. Расстояние между маской и экраном-мишенью выбирается достаточным для разделения пятен от фрагментов пучка на мишени. Таким

¹E-mail: aleks@jinr.ru

образом, пространственные профили на мишени являются прямой мерой углового распределения пучка на маске. Эмиттанс легко получить из изображения репер-пот в случае гауссовского распределения (см., например, [2, 5]). В работе [6] предложен метод, основанный на вычислении среднеквадратичных параметров пучка в плоскости маски репер-пот, пригодный в общем случае.

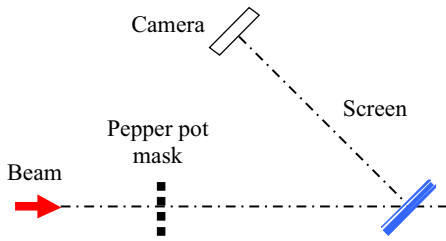


Рис. 1. Схема установки репер-пот

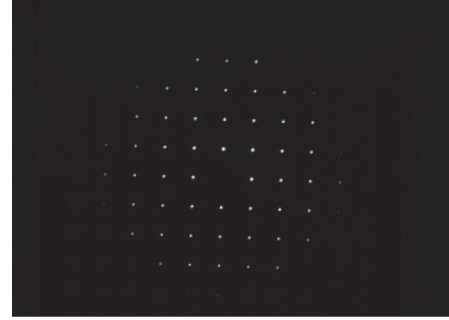


Рис. 2. Фото маски

Маска (рис. 2) имеет 11×11 отверстий диаметром 0,2 мм, шаг $h = 3$ мм. Центрального отверстия нет. Для обработки изображения используется пакет Wolfram Mathematica. По результатам обработки формируется текстовый файл в виде таблицы ($3 \times M$), строки которой содержат координаты и значение интенсивности m -й точки (пикселя) изображения. M — количество точек. Для определения соответствия между положением отдельных пятен и геометрией маски перед проведением измерений производится калибровка установки с помощью параллельного светового пучка (например, как в [7]). Вычисляется центр тяжести изображения, и координаты отсчитываются относительно этого центра.

При вычислении горизонтального эмиттанса применим следующую процедуру [6]. Разобьем изображение на вертикальные ряды, в которые целиком входят изображения отверстий маски или фрагментов пучка (аналог вертикальных щелей, см. рис. 3). Для расчета вертикального эмиттанса выделяют горизонтальные ряды. Координаты центра тяжести изображения:

$$x_c = \left(\sum_{k=1}^{K_{\max}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj} \cdot x_{kj} \right) / A_{\text{tot}}, \quad y_c = \left(\sum_{k=1}^{K_{\max}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj} \cdot y_{kj} \right) / A_{\text{tot}},$$

$$A_{\text{tot}} = \sum_{k=1}^{K_{\max}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj}.$$

Здесь K_{\max} — число точек по горизонтали; J_{\max} — по вертикали ($M = K_{\max} J_{\max}$).

Средняя x -координата изображения i -й вертикальной «щели»:

$$\bar{x}_i = \left(\sum_{k=K_{\min i}}^{K_{\max i}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj} \cdot (x_{kj} - x_c) \right) / A_i, \quad A_i = \sum_{k=K_{\min i}}^{K_{\max i}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj},$$

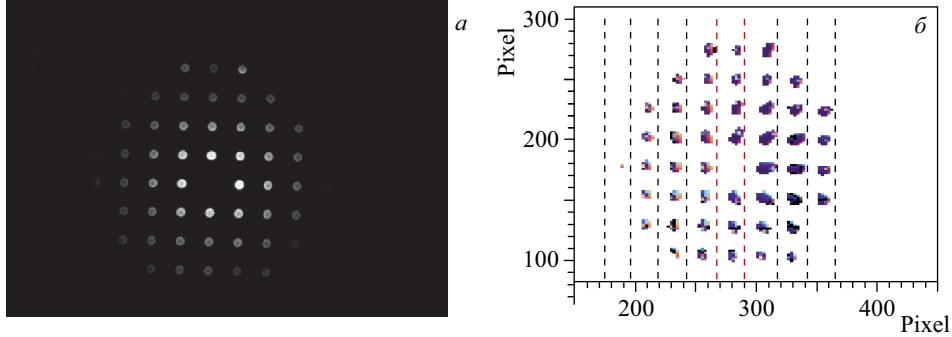


Рис. 3. Фото «пучка» (а) и фрагмент его изображения после обработки в пакете Wolfram Mathematica (б). Пунктиром показано разбиение на «щели»

где $K_{\max i}$ и $K_{\min i}$ выбираем так, чтобы не перекрывались соседние вертикальные «щели».

Среднеквадратичную ширину изображения щели определим как

$$\sigma_i^2 = \left(\sum_{k=K_{\min i}}^{K_{\max i}} \sum_{j=1}^{J_{\max}} A_{kj} \cdot (x_{kj} - x_i - x_c)^2 \right) / A_i.$$

Тогда горизонтальный среднеквадратичный эмиттанс: $\text{rms } \varepsilon_x^2 = \bar{x}_0^2 \cdot \bar{x}_0'^2 - \overline{x x_0'}^2$, где

$$\begin{aligned} \bar{x}_0^2 &= \frac{1}{A_{\text{tot}}} \sum_i x_{0i}^2 A_i + \frac{h^2}{3}, & \bar{x}_0'^2 &= \frac{1}{A_{\text{tot}} L^2} \sum_i A_i \left[(\bar{x}_i - x_{0i})^2 + \sigma_i^2 \right] + \frac{h^2}{3L^2}, \\ \overline{x x_0'} &= \frac{1}{A_{\text{tot}} L} \sum_i A_i (\bar{x}_i - x_{0i}) x_{0i}. \end{aligned}$$

Здесь \bar{x}_i и σ_i переведены в миллиметры согласно \bar{x}_i (мм) = \bar{x}_i (пиксель) · D . Масштабный коэффициент D определяется из текстового файла для изображения маски. Координаты центров отверстий x_{0i} и y_{0i} маски отсчитываются от ее центра.

2. ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Первичная обработка включает в себя следующие операции.

2.1. Уменьшение изображения (в смысле объема занимаемой памяти) до $M = 150000 - 200000$ точек (например, в Microsoft Office Picture Manager) для получения приемлемого времени вычислений. Характерные времена обработки уменьшенного изображения в пакете Wolfram Mathematica для компьютеров, использованных в работе, приведены в таблице.

Intel Core i7-2600, CPU 3,4 ГГц, RAM 8 Гб	~ 1–2'
AMD Athlon™ Processor 3200 + 2,01 ГГц, 1,00 ГБ ОЗУ	10–15'
Intel Pentium III, Dual CPU 1 ГГц, RAM 512 Мб	~ 1/2 сут

2.2. Обработка изображения и формирование текстового файла координат в пакете Wolfram Mathematica. Сначала убирается наклон изображения: ψ — угол наклона экрана к маске (обычно это 45°). Далее корректируется угол поворота ϕ фотокамеры относительно оси экран–камера. Такая операция необходима, если перекрываются ряды изображений отверстий маски. Эта цепочка операций иллюстрируется рис. 4 для тестовой маски, показанной на рис. 5.

Интенсивности нормируются на максимальную (так называемая нормализация изображения). Фон отрезается введением подходящего порога. Для фото рис. 3 порог составил $\sim 10\%$, для рис. 4 его значение $\sim 50\%$ (см. рис. 6).



Рис. 4. Преобразования изображения



Рис. 5. Маска для тестов преобразования изображения

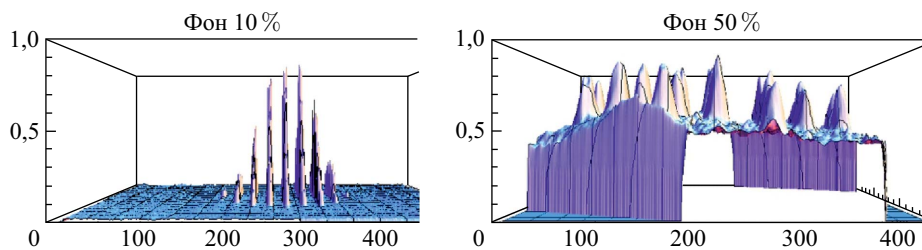


Рис. 6. Изображения с разным уровнем фона

3. ТЕСТ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для тестирования алгоритма и программы вычисления эмиттанса и методики промежуточной обработки были использованы снимки подсвеченной маски: сфокусированное (рис. 2) и расфокусированное изображения (рис. 3).

Масштабный коэффициент D , определяемый из файла координат для рис. 2 как отношение шага отверстий маски ($h = 3$ мм) к соответствующему числу пикселей, имеет значение $D = 3/24 = 0,125$ мм/пиксель.

Файл изображения расфокусированной маски, уменьшенного приблизительно в 100 раз, содержит 518×346 строк, $K_{\max} = 518$, $J_{\max} = 346$.

Результаты вычисления эмиттанса программой `Per_emit` по файлу координат для рис. 3 приведены ниже. На рис. 7, а показано распределение плотности в «пучке». Отсутствие центрального отверстия вносит ошибки в распределение и значение эмиттанса. Поэтому при обработке корректируют полученное распределение, аппроксимируя его гауссианами левой и правой ветвей распределения. Скорректированное распределение приведено на рис. 7, б.

Фазовый эллипс (рис. 8) получим из инварианта Куранта–Снайдера

$$\beta x'^2 + 2\alpha x x' + \gamma x^2 = \varepsilon_x,$$

где параметры Твисса $\alpha = -\overline{xx'_0}/\varepsilon_x$, $\beta = \overline{x_0^2}/\varepsilon_x$, $\beta\gamma = \alpha^2 + 1$.

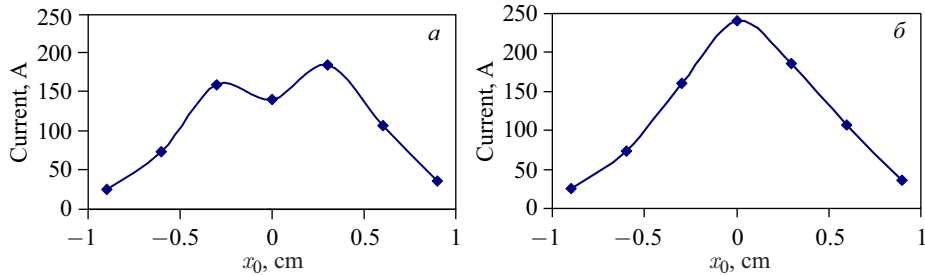


Рис. 7. Распределения плотности: измеренное (а) и скорректированное (б)

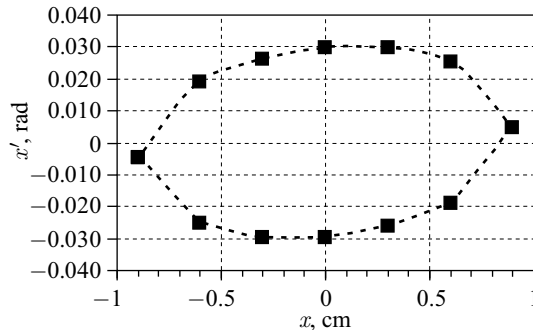


Рис. 8. Фазовый портрет «пучка» на маске

В результате обработки получили, что пучок, соответствующий рис. 2 и 3, имеет небольшую расходимость $\alpha = -0,16$, среднеквадратичный эмиттанс $\varepsilon_x = 65\pi$ мм · мрад и диаметр 18 мм.

ВЫВОДЫ

Подготовлен пакет программ для определения эмиттанса и параметров Твисса пучка источника КРИОН по результатам измерений. Дано описание алгоритма обработки результатов измерений, представленных в виде изображений, реализованного с учетом особенностей установки. Проведено тестирование на изображениях, моделирующих слабо расходящийся пучок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ускорительно-накопительный комплекс NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility): Техн. проект / Под ред. И. Н. Мешкова и А. О. Сидорина. Дубна, 2009; <http://nucloweb.jinr.ru/nica/index1.htm>.
2. Domke M. et al. DIPAC 1997. LNF-INFN Frascati, 1997. P. 141.
3. Donets D. E. et al. // Rev. Sci. Instr. Am. Inst. Phys. 2012. V. 83. P. 02A512.
4. Капчинский И. М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М.: Атомиздат, 1966.
5. Dolinska M. et al. Emittance Measurements at the New UNILAC Pre-Stripper Using a Pepper-Pot with a PC-Controlled CCD Camera // Proc. of the 4th Eur. Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerators, 1999.
6. Казаринов Н. Ю. и др. Методики измерения поперечного эмиттанса ионного пучка в канале инжекции циклотрона ДС-72. Препринт ОИЯИ Р9-2002-120. Дубна, 2002.
7. Долинская М. Э. и др. Диагностика пучков pepper-pot методом. Препринт КИЯИ-02-3. Киев, 2002. 12 с.