

Регистрация и обработка оптических сигналов для диагностики пучка протонов на ускорителе ИЯИ РАН

А. И. Титов

Институт ядерных исследований РАН, Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Институт ядерных исследований РАН, Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация

Одним из типов диагностики пучка на линейном ускорителе ИЯИ РАН является диагностика на основе регистрации различных оптических изображений, формируемых пучком: люминесцентные экраны, ионизационные мониторы, мониторы свечения остаточного газа. Для защиты используемых устройств видеосъема от радиационного фона из-за потерь пучка требуется система, которая сможет передать изображение на расстояние в несколько метров, за локальную защиту, без существенных потерь светового потока. В данной работе представлена модель подобной оптической системы и отдельные варианты ее реализации, а также предложен метод коррекции получаемого изображения.

Введение

Основная проблема диагностики оптического типа на сильноточных ускорителях заряженных частиц, в том числе и на линейном ускорителе ИЯИ РАН, заключается во влиянии радиационного фона работающей установки на компоненты системы видеорегистрации (ССD-матрицы, фотодиоды, оптоволокно и т. п.). Решением этой проблемы может быть использование радиационно стойких материалов и электроники или перенос стандартных устройств съема за радиационную защиту, что требует использования дополнительной системы передачи оптического изображения на расстояние в несколько метров. Пример такой системы, используемой на выходе ускорителя ИЯИ РАН для нужд ионизационного монитора поперечного сечения пучка [1], приведен на рис. 1. Изображение передается по зеркально-линзовому тракту на расстояние порядка 6 м на видеокамеру, расположенную вне туннеля ускорителя.

Подобный оптический перенос необходим на данный момент в нескольких различных точках ускорительного комплекса. Таким образом, нужна масштабируемая система, соответствующая следующим требованиям:

- отсутствие траекторных потерь светового потока вдоль системы;
- максимально возможный коэффициент захвата светового потока с учетом размера излучающей области $10 \div 100$ мм;
- набор легких базовых секций с защитой оптических элементов от пыли и влаги;
- жесткая фиксация компонентов системы друг с другом и возможность крепления секций к внешним опорным стойкам;
- возможность изменения положения линз вдоль отдельной секции.

Модель оптического тракта

Для получения параметров будущей схемы и для изучения эффектов, связанных с прохождением оптического потока через систему, было создано несколько моделей в пакете COMSOL Multiphysics



Рис. 1: Действующий зеркально-линзовый тракт на выходе ускорителя ИЯИ РАН. Зеленой линией показан ход лучей.

[2]. Так как одним из начальных условий является наличие у системы плоскости симметрии, модель может быть двумерной, что ускоряет численный расчет. Сначала был изучен вопрос о количестве света, который попадает напрямую в объектив видеокамеры, расположенной на расстоянии $L = 500$ мм от источника, в зависимости от расстояния источника до оптической оси. Источник диаметром $d = 1$ мм располагался на расстоянии от -50 до $+50$ мм от оптической оси. В результате было получено, что на объектив диаметром $D = 50$ мм попадает порядка 3.1% света от того потока, который был изотропно испущен источником (рис. 2).

Следующий этап – расчет потока, попадающего в объектив после прохождения зеркально-линзового тракта. Базовым вариантом при этом является размещение элементов по принципу прожекторной оптики, для чего первая линза находится на своем фокусном расстоянии от источника.

Свет от точечных источников, расположенных в фокусе линзы и на расстоянии x от оптической оси линзы, будет преобразован в пучок параллельных лучей, который идет под углом к оптической оси:

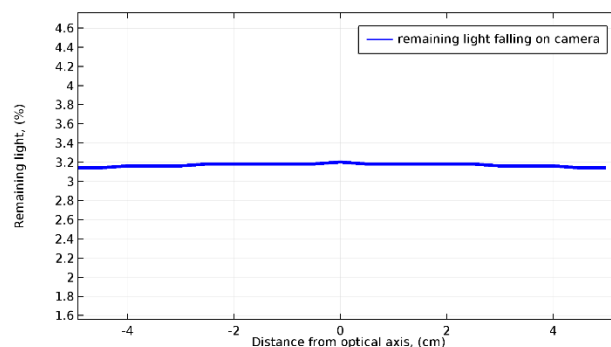


Рис. 2: Поток света, попадающий в объектив $D = 50$ мм от источника $d = 1$ мм с $L = 500$ мм.

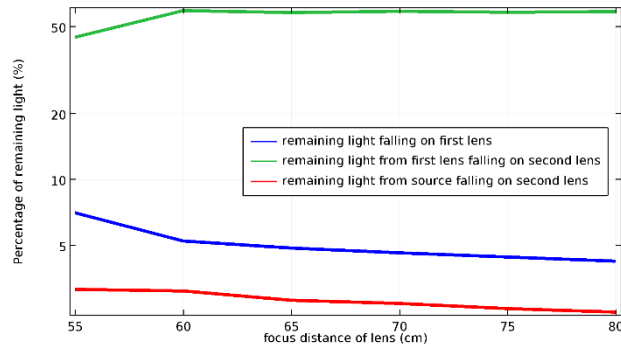


Рис. 3: Зависимость потока света от фокусного расстояния (источник в 25 мм от оси).

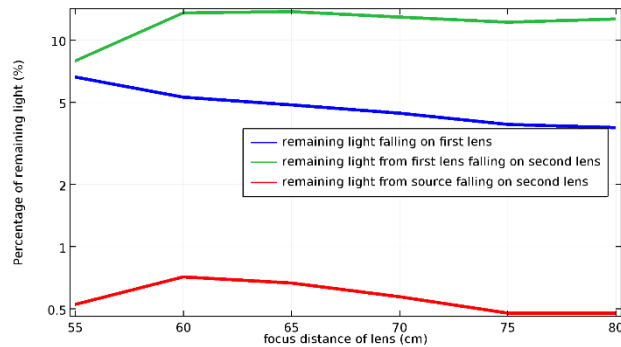


Рис. 4: Зависимость потока света от фокусного расстояния (источник в 50 мм от оси).

$$\alpha = \frac{x}{f}. \quad (1)$$

Из этого следует, что если взять диаметр корпуса примерно равным диаметру линз, то после первой линзы, которая расположена на фокусном расстоянии от источника, поток света от областей, которые расположены не на оптической оси, будет частично попадать на стенки. Далее возможно провести поток света без потерь. Выбор фокусного расстояния основывается на том, что чем больше фокусное расстояние, тем, согласно (1), меньше потерь на стенках после первой линзы. Однако чем больше фокусное расстояние, тем дальше от источника надо ставить первую линзу, а следовательно, уменьшится приходящий на нее поток от фиксированного источника.

Расчет проводился при размещении источника на расстоянии 25 мм (рис. 3) и 50 мм (рис. 4) от оптической оси, так как требуется передавать сигнал от области с максимальным радиусом до 50 мм, хотя наибольший интерес представляет область радиусом до 25 мм. Диаметр линз был выбран 100 мм. Следующая линза расположена на двойном фокусном расстоянии, чтобы система работала по выбранному принципу. В соответствии с (1) угол наклона параллельного пучка тем больше, чем дальше от оптической оси находится источник.

Оптимальным фокусным расстоянием является $f = 600 \text{ mm}$, так как данное расстояние наилучшее для дальних областей (на расстоянии больше 25 мм) и практически (отличие менее чем на 0.2 %) наилучшее для ближних.

При расчете не учитывается тот факт, что любой оптический элемент не является идеальным. В подобных системах потери связаны с неполным отражением от зеркал и потерей части света на линзах. В нынешней схеме коэффициент отражения равен 75 %, а коэффициент пропускания линз – 99.5 %. Уменьшить эти потери можно, лишь улучшив характеристики оптических элементов, в первую очередь зеркал. Линзы, которые используются в текущем варианте тракта, покрыты специальными просветляющими составами. Чтобы получить величину потока с учетом потерь в элементах, можно применить следующую формулу:

$$F_f = t^{n1} * r^{nr} * F_i, \quad (2)$$

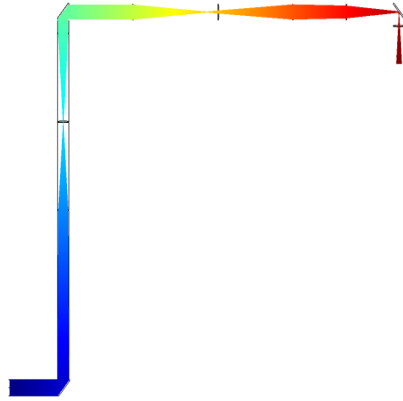


Рис. 5: Модель перископической системы.

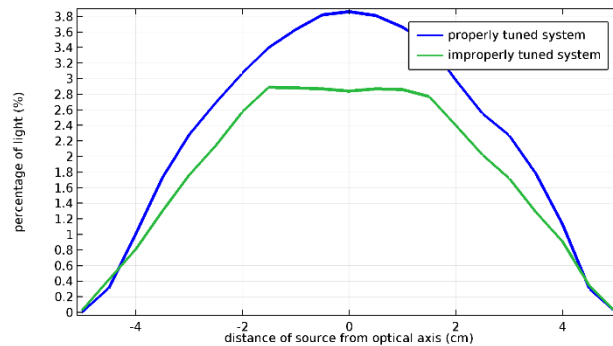


Рис. 6: Поток после системы из шести линз.

где F_f – итоговый световой поток, t – коэффициент пропускания линз, nl – число линз в системе, r – коэффициент отражения зеркал, nr – число зеркал, F_i – поток, прошедший через идеальную систему [3].

На основе полученных результатов была создана модель зеркально-линзового тракта (рис. 5), максимальное количество элементов в которой ограничено девятью линзами и тремя зеркалами.

Аккумулятор, который выступает в качестве объектива видеокамеры, может передвигаться вдоль всей системы, для чего требуется выбрать линзу, у которой будет стоять объектив, и расстояние до этой линзы. Программа выдает результат о количестве света, попавшего на объектив в зависимости от положения источника.

Варианты конфигурации тракта

В данной модели была проведена оптимизация тракта для различных конфигураций. Так как размер наиболее важной для наблюдения области ограничен диаметром 50 мм, целью оптимизации тракта была передача света из этой области без потерь после первой линзы. Это допущение уменьшает поток, переданный от дальних областей, но увеличивает длину оптического пути. Поток, переданный через оптимизированную схему, приведен на рис. 6. В этом случае используется шесть линз, длина оптического пути равна 4500 мм. Для сравнения на этом же графике представлен график для потока, который остался после прохождения ненастроенной системы.

Так как система должна работать для разных случаев расположения видеокамеры относительно источника света, были рассмотрены варианты разной компоновки системы. На рис. 7 показан процент света, оставшийся после прохода через систему из четырех линз (оптический путь – 3600 мм).

Эти схемы были выбраны в связи с тем, что похожие схемы уже были реализованы на работаю-

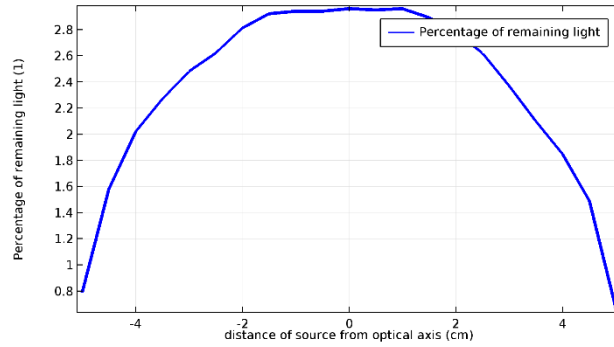


Рис. 7: Поток после системы из четырех линз.

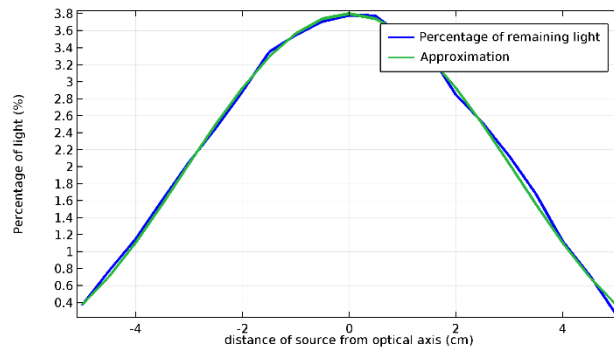


Рис. 8: Пример аппроксимации потока.

щем сейчас тракте. Изначальная существующая схема использовала пять линз, но при моделировании было замечено улучшение результата при добавлении еще одной линзы. В дальнейшем при моделировании систему следует оптимизировать именно для пяти линз. Система из четырех линз используется сейчас для передачи светового потока.

Рассмотренные схемы однозначно показывают, что изначально равномерный поток света от большой излучающей области передается неравномерно. Значит, при обработке сигнала необходимо учитывать эту неоднородность передачи.

Коррекция изображения

Из пространственного распределения потока можно сделать вывод, что зависимость количества переданного света от расстояния от оси напоминает полином, составленный из четных степеней, поэтому была проведена такая аппроксимация света. Как оказалось, она приближает данные, полученные при моделировании с разницей не более 0.05 %, что видно на рис. 8.

Аппроксимирующая кривая задается формулой

$$F = A + Bx^2 + Cx^4, \quad (3)$$

где A , B , C – параметры аппроксимации, а x – расстояние от оптической оси.

Соответственно, при передаче сигнала от дальних областей полученный сигнал отличается от действительного в k раз, где k вычисляется по формуле

$$k = (A + Bx^2 + Cx^4)/F_{\max}, \quad (4)$$

где F_{\max} – максимальный поток, переданный системой.

Подставляя параметры интересующей нас системы и основываясь на результатах моделирования, при помощи (4) можно корректировать полученное изображение. На данный момент остается

открытым вопросом о коррекции изображения при источнике, расположенном под углом к перископической системе. Также необходимо будет учитывать реальную геометрию системы и оптических элементов, что, возможно, приведет к необходимости изменить методику коррекции изображения.

Результаты

На данный момент для создания перископической системы подобраны параметры тракта на основе результатов моделирования, создана модель самой системы с возможностью варьировать число и положение элементов системы, предложен метод коррекции полученного сигнала. В дальнейшем планируется составить программу по обработке сигналов для любого положения источника относительно системы.

Список литературы

- [1] S. Gavrilov et al., “Two-dimensional non-destructive diagnostics for accelerators by Beam Cross Section Monitor”, 2014 JINST 9 P01011.
- [2] <https://www.comsol.com/>.
- [3] Г. С. Ландсберг, “Оптика.” / Г. С. Ландсберг. – 6-е издание, стереот. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с. – ISBN 5-9221-0314-8.