

Система измерителя поперечных параметров пучка с оптическим преобразователем

А.М.Вишнеvский, А.М.Козодаев, Р.П.Куйбида, Д.А.Лякин, В.С.Скачков
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

Измерение поперечных параметров пучка заряженных частиц традиционно входит в ряд задач, связанных с настройкой ускорителей заряженных частиц. На сегодня существует большое количество методов проведения этих измерений. В ИТЭФ на линейном ускорителе протонов ИСТРА, начиная с 1990 г., применяется и развивается метод, основанный на использовании протонно-оптического преобразователя в качестве датчика поперечного распределения пучка заряженных протонов. Данный способ имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с традиционными способами измерений. Сам метод в совокупности с приборной обвязкой обладает исключительно высоким показателем производительность/цена, тем не менее обеспечивая при этом достаточную точность измерений. К числу полезных особенностей описываемого подхода следует также отнести практическую нечувствительность результатов измерения к наличию вторичных частиц с меньшими энергиями, в частности электронов, которые могут создавать определенные трудности при использовании гальванометрических измерителей.

Структурная схема измерителя

На рис. 1 показана структурная схема регистрирующей части измерительной системы.

В зависимости от решаемой задачи по ходу пучка устанавливается модулирующий экран, представляющий собой пластину из тугоплавкого металла с набором отверстий, с параметрами модуляции наиболее точно отвечающими ожидаемым свойствам пучка частиц и требуемой точности измерений. В более ранних модификациях прибора вместо отверстий использовались узкие щели, что более отвечало возможностям имеющейся на тот момент электроники. Отверстия расположены в узлах регулярной прямоугольной сетки. Такая геометрия наиболее технологична как с точки зрения изготовления, так и со стороны проведения калибровочных измерений, хотя на данный момент рассматривается возможность более оптимального распределения отверстий по поверхности экрана (задача о максимально плотной упаковке на плоскости). Большинство измерений (за исключением статистических) проводится за один импульс работы ускорителя, однако при необходимости получения более точных результатов возможно более подробное исследование пучка при различных положениях модулирующего экрана, позиционирование которого выполняется с помощью высокоточного привода.

Одним из основных узлов системы является сцинтиллирующий экран, преобразующий ток частиц в пропорциональный световой поток. В ИТЭФ был проведен ряд работ по изучению возможности использования различных типов сцинтилляторов на разных диапазонах токов и энергий протонных пучков. Ряд результатов был также получен на пучках тяжелых ионов.

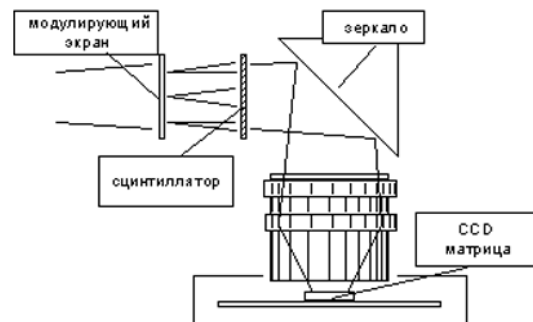


Рис. 1: Структурная схема регистрирующей части измерителя.

Основными требованиями, предъявляемыми к сцинтилляторам, являются их достаточная светимость в требуемом диапазоне параметров пучка, отсутствие выраженной нелинейности передаточной характеристики, радиационная стойкость, доступность и технологичность. На данном этапе характерные времена высвечивания сцинтилляторов не принимались во внимание, однако существуют перспективы использования “быстрых” сцинтилляторов в измерениях со стробированием или при исследовании продольных параметров пучка. Интересны также материалы со значительным (0.1–1 с) временем послесвечения, дающие дополнительные возможности по увеличению точности измерений.

Изображение, сформированное сцинтиллятором, передается через зеркало и объектив (иногда через световод) на фоточувствительный элемент — ССD матрицу. Параметры измерительной системы позволили ограничиться умеренными требованиями к оптическому тракту как по равномерности освещения, так и по разрешающей способности, составившей 150–200 лин/мм.

Принципиальным элементом системы является преобразователь изображения на базе ССD (ПЗС) матрицы. Электронная промышленность на сегодняшний день освоила выпуск широкого ассортимента изделий на основе этого класса приборов. ССD матрицы классифицируются по размеру и цветности. Оптимально для получения максимального разрешения в измерителе желательно использовать крупноформатную черно-белую матрицу. Использование цветного прибора приводит к удорожанию системы и оправдано лишь в случае отсутствия черно-белого аналога или при возможности многофункционального использования. Среди доступных преобразователей изображения следует отметить черно-белые малоформатные TV камеры и цифровые фотоаппараты. Разрешение по амплитуде при их использовании достигает 6–8 бит. Для высокоточных измерений, в частности в астрономии, применяются значительно более дорогие, как правило, исполняемые на заказ телекамеры с охлаждаемой матрицей. В этих системах достигается разрешение 12 бит на пиксел. В системе измерения эмиттанса на ускорителе ИСТРА на данный момент используется стандартная черно-белая малоформатная камера (0.25”) с отключенной системой автоподстройки.

Так как дистанционная электронная регулировка яркости изображения потребовала бы дополнительных калибровочных работ, измерения проводились с фиксированной максимальной освещенностью пикселов ССD матрицы. Уровень освещенности при этом варьировался изменением диафрагмы объектива и включением в оптический тракт дополнительных светофильтров. При этом почти на два порядка перекрывался динамический диапазон токов пучка без потери точности преобразования. Используемый в TV камере усилитель сигнала с матрицы имеет несколько режимов работы. Для проведения измерений наиболее подходящим оказался режим с λ -коррекцией сигнала, обладающий шумоподавляющими свойствами. Основной особенностью характеристики усилителя в данном режиме является расширение динамического диапазона в районе малых амплитуд и сжатие (компрессия) сигналов с большим размахом. Используя калибровочные данные, программа обработки получаемого изображения проводит декомпрессию полученного сигнала.

Для ввода данных в ЭВМ может быть использовано практически любое устройство, созданное для захвата телевизионного изображения, например многочисленные платы типа TV Tuner или VideoBlaster. Лучшие результаты получаются при использовании специализированных электронных схем, имеющих возможность внешней синхронизации запуска и частоты выборки сигнала, но такое решение, как правило, затрудняет последующую модернизацию системы. Исходя из того, что описываемый измеритель не является штатным постоянно действующим узлом ускорителя, наиболее целесообразным на данный момент представилось использование в качестве интерфейсной схемы цифрового осциллографа.

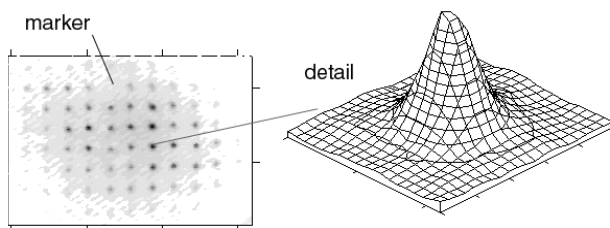


Рис. 2: Массив данных до его обработки.

Таким образом, исходные данные о пучке, поступающие в ЭВМ, представляют собой набор точек, каждая из которых определяется тремя параметрами — горизонтальная и вертикальная координаты и амплитуда сигнала. Так как в настоящей конфигурации системы сбора информации отсутствует синхронизация выборки сигнала с TV строками CCD камеры данные, не могут быть представлены в виде прямоугольной матрицы без дополнительной обработки. Вместо этого для каждой точки определяется ее положение на плоскости, исходя из временной задержки по отношению к кадровому импульсу.

Обработка результатов

При отработке методов обработки данных измерений использовался пакет прикладного анализа данных системы MATLAB, что дало в результате высокую устойчивость конечных алгоритмов, которые были реализованы в автономной программе, обеспечивающей максимальное быстродействие комплекса.

Программа обработки позволяет получить по результатам измерений оценку четырехмерной проекции шестимерного фазового объема пучка, двумерные проекции XY , XX' , YY' , значения среднеквадратичных эмиттансов и пр. В интерактивном режиме позволяет выделить частоту периодической помехи и фильтровать частотный спектр сигнала. Элементы кластерного анализа позволяют с высокой эффективностью проводить привязку результатов эксперимента к данным калибровки.

Основные модули программы включают в себя графический интерфейс пользователя, процедуры преобразования входных данных, спектральный анализ и фильтрацию рядов на базе быстрого преобразования Фурье, утилиты регрессионного анализа изображений от отдельных отверстий, функции интегрирования двумерных распределений.

Графический интерфейс и визуализация данных облегчают работу с программой. Для работы требуется Windows95, процессор не ниже I486 и 16 Мбайт оперативной памяти.

Тестирование и калибровка

Калибровка системы проводится с помощью источника света с нормированным угловым распределением. При распушенном с помощью линзы лазерном луче определяются общие оптические коэффициенты системы. Затем узким лучом производится привязка координат к оси ускорителя и калибруются коэффициенты преобразования координата-угол. При использовании маски с 0.1-мм отверстиями приходится дополнительно учитывать волновую природу света. Дифракция на отверстиях приводит к расплыванию световых пятен на сцинтилляторе до размеров, зачастую превышающих след от протонного пучка. Исследование формы световых пятен, полученных с помощью измерительной системы, показало их хорошее соответствие теоретическому распределению для дифракции света с данной длиной волны на идеально круглом отверстии.

Полученные результаты

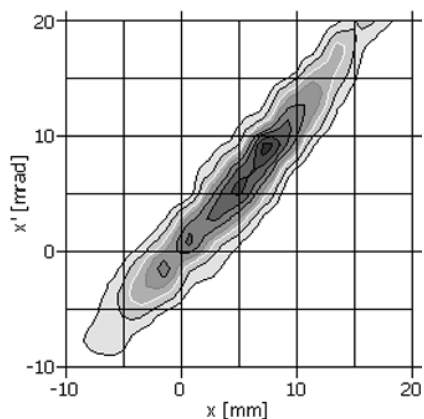


Рис. 3: Распределение фазовой плотности пучка в одной из плоскостей, полученные в результате измерений.

Проведенные с помощью описываемой системы измерения дали полную информацию о параметрах протонного пучка с энергией 3 МэВ на выходе начальной части ускорителя ИСТРА. Благодаря высокой производительности метода удалось в короткие сроки снять большое число зависимостей поперечного распределения плотности пучка от основных параметров режима ускорителя.

Список литературы

1. А.М. Вишнеvский, Р.П. Куйбида, Н.И. Рекуха. Использование ПЗС матриц для определения профиля пучка заряженных частиц. // Вопросы атомной науки и техники. Харьков, 1984. Вып. 2, с.56.
2. В. Яншин, Г. Калинин. Обработка изображений. — М.: Мир, 1994.