УДК 621. 384.601(075.8)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С НУЛЕВЫМ ЭМИТТАНСОМ

Воронцов В.А., Шестак В.П.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ»), Москва, Россия (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31), vva@inbox.ru

Приводятся результаты теоретических исследований по определению одномерного фазового распределения пучка заряженных частиц на двумерной фазовой плоскости методом корпускулярного зондирования. Разработан общий подход к моделированию динамики зондирующего пучка в поле исследуемого пучка, основанный на эллипсоидальном представлении последнего. В рамках этого подхода предложена методика измерения таких характеристик пучка заряженных частиц, как двумерная фазовая плотность и функция распределения в фазовом пространстве. В работе рассматривается диагностическая модель одномерного фазового распределения пучка заряженных частиц с нулевым эмиттансом на двумерной фазовой плоскости. Описан алгоритм отслеживания трансформации кривой фазовой плотности пучка. Он состоит из ряда последовательных этапов. Вначале выполняется представление кривой в виде ломаной, далее определяется количество отрезков ломаной и их расположение на двумерной фазовой плоскости, затем находится количество заряда в них. В основу реализации алгоритма положена алгебра многочленов.

Ключевые слова: ускорители заряженных частиц, диагностика пучков заряженных частиц, электронно-лучевое и корпускулярное зондирование.

THE PHASE DISTRIBUTION DETERMINATION FOR THE ZERO EMITTANCE CHARGED PARTICLE BEAM

Vorontsov V.A., Shestak V.P.

National Research Nuclear University MEPHI (NRNU MEPHI), Moscow, Russia (115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31) vva@inbox.ru

The theoretical investigation results of the charged beam one dimensional phase distribution on the two dimension phase plane determination by the corpuscular beam probe are given. The general approach for the probe beam dynamics in the investigated beam field is developed. It is based on the ellipsoidal investigated beam presentation. Due to this approach the measurement methodic for such beam parameters as two dimension phase density and phase space distribution function is proposed. The diagnostic model for the one dimensional phase distribution with the zero emittance on the two dimension phase plane is considered. The algorithm of the beam phase density curve transformation searching is given. It consists from the number of stages. The first one is the curve broken line presentation, the second one is the broken line sections and their disposition on the two dimension phase plane determination, the third one is the charge amount finding in them. The algorithm realization is based on the polynomial algebra.

Key words: the charged particle accelerators, the charged particle beam diagnostic, electron and corpuscular beam probing.

Одной из наиболее сложных задач диагностики пучков ускорителей заряженных частиц является измерение фазовой плотности [1–3]. В связи с этим поиск новых методов измерения фазовой плотности пучка представляется достаточно актуальным [4].

Один из общих подходов к моделированию динамики зондирующего пучка в поле исследуемого пучка основан на эллипсоидальном представлении последнего. В рамках этого подхода предложена методика измерения таких характеристик пучка заряженных частиц, как двумерная фазовая плотность и функция распределения в фазовом пространстве.

В данной работе рассматривается диагностическая модель одномерного фазового распределения пучка заряженных частиц с нулевым эмиттансом на двумерной фазовой плоскости. Описан алгоритм отслеживания трансформации кривой фазовой плотности пучка. Он состоит из ряда последовательных этапов. Вначале выполняется представление кривой в виде ломаной, далее определяется количество отрезков ломаной и их расположение на двумерной фазовой плоскости, затем находится количество заряда в них. В основу реализации алгоритма положена алгебра многочленов.

Основным приближением проекции фазового объема пучка можно считать часть фазовой плоскости, которую занимают на ней частицы пучка. Площадь проекции, равная эмиттансу пучка, может быть определена и по функции распределения частиц на фазовой плоскости [1–3].

Рассмотрим методику расчета распределения частиц пучка на поперечной фазовой плоскости по набору известных профилей пучка, измеренных в различных сечениях канала транспортировки [5].

При расплывании пучка в дрейфовом промежутке скорости частиц остаются постоянными, если влияние пространственного заряда пренебрежимо мало. Изменение распределения частиц на фазовой плоскости $(x, \dot{x})$ во времени представляет собой независимое перемещение отдельных слоев $\rho(x, \dot{x})$ по оси x со скоростями $\dot{x}$. Распределение заряда в слоях не изменяется. Это обстоятельство позволяет применить следующую методику определения $\rho(x, \dot{x})$.

На плоскости $(x, \dot{x})$ вводятся две сетки, одна из которых неподвижна и имеет узлы в точках с координатами $(x_i, \dot{x}_j)$, а другая, подвижная, связана с зарядами q_k, которые в начальный момент времени расположены в ряде узлов неподвижной сетки и пропорциональны значениям плотности распределения частиц пучка ρ_k в этих узлах. Перемещение горизонтальных слоев, состоящих из зарядов, приводит к тому, что подвижная сетка, связанная с зарядами, становится косоугольной. Накладывая подвижную сетку на неподвижную в произвольный момент времени и применяя тот или иной алгоритм «размазывания» зарядов по узлам неподвижной сетки, можно определять профиль пучка в узлах неподвижной сетки, расположенных в сечениях. Фиксируя моменты времени t_l, можно получить систему алгебраических линейных уравнений

(1)

$$P_i^{(l)} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik}^{(l)} \cdot \rho_k$$

относительно ρ_k. Вопрос о разрешимости системы (1) и о выборе оптимального количества уравнений рассмотрен в работе [5].

Однако модель пучка в виде непрерывно распределённого заряда на фазовой плоскости подходит не для всех пучков ускорителей заряженных частиц. В некоторых случаях, например, в протонных ускорителях заряженных частиц пучок может быть представлен на фазовой плоскости в виде длинной нити с переменной или постоянной плотностью. Тогда не удаётся выделить горизонтальные заряженные слои, плотность которых бы оставалась неизменной, и перемещение по нити приводит к перемещению по горизонтальным слоям. Следовательно, методика определения фазовой плотности, применённая в работе [5], к такой модели пучка не подходит. Поэтому кривую фазовой плотности пучка на фазовой плоскости можно представить в виде ломаной, плотность заряда на отрезках которой постоянна. Изменение фазовой плотности пучка в этом случае представляет собой смещение отрезков ломаной, происходящих одновременно с их растяжением или сжатием. Отрезки ломаной – это элементы кривой фазовой плотности пучка. Вначале следует рассмотреть поведение только лишь одного элемента и определить его параметры. Затем, рассматривая их движение на фазовой плоскости, можно определить трансформацию кривой фазовой плотности в целом. Таким образом, можно совершить переход от модели пучка с непрерывно распределённой двумерной фазовой плотностью к модели пучка с непрерывно распределённой одномерной фазовой плотностью.

Параметры отрезка – координаты его концов и его заряд. Если разделить величину заряда отрезка на модуль его проекции на горизонтальную ось, то можно получить линейную плотность заряда отрезка. Рассмотрим принципиальную возможность определения фазовой плотности. Если записать выражения для профилей в различных сечениях пучка, то получится система нелинейных алгебраических уравнений, сходная с (1), относительно начальных плотностей заряда и наклонов отрезков, количество которых априори неизвестно. Так как плотность заряда является дробно-рациональной функцией, зависящей от времени и равной отношению многочлена n-1 степени к многочлену n степени после приведения левой части системы к общему знаменателю, можно получить систему линейных уравнений относительно параметров отрезков. Из системы необходимо определить 2 n неизвестных, представляющих собой отношения разностей скоростей и концов отрезка или, что то же самое, тангенсы углов их наклона по отношению к горизонтальной оси и начальные плотности их зарядов.

Суть метода решения полученной системы заключается в следующем.

Система уравнений приводится к общему знаменателю. Получается система линейных уравнений относительно 2n+1 промежуточных неизвестных с коэффициентами, зависящими от времени. Сначала выбирается второй порядок системы и делается попытка определить в различные моменты времени коэффициенты системы вплоть до её переопределения. Если коэффициенты переопределённой системы таковы, что она имеет решение, то второй порядок системы можно считать установленным. Если это не так, то порядок системы повышается на единицу и процесс определения порядка и коэффициентов системы повторяется. Повышение порядка системы уравнений происходит до тех пор, пока переопределённая система не будет оставаться разрешимой при продолжающемся процессе увеличения степени её переопределённости. После нахождения количества уравнений системы или, что то же самое, количества отрезков, пересекающих вертикальное сечение на фазовой плоскости, определяем начальную плотность заряда в этих отрезках и наклон каждого отрезка по отношению к горизонтальной оси, решая вспомогательную систему перехода от промежуточных неизвестных к основным неизвестным.

Таким образом, на первом этапе находятся количества отрезков, пересекающих вертикальное сечение на фазовой плоскости, начальные плотности заряда в этих отрезках и наклоны каждого отрезка по отношению к горизонтальной оси.

На втором этапе необходимо определить координаты концов каждого отрезка, которые можно назвать узлами ломаной линии. Если узел уходит из зоны между двумя вертикальными сечениями или приходит в неё, то происходит изменение количества уравнений и скачок производной зависимости количества заряда от времени в данном сечении. Фиксируется момент его выхода, и так как он остаётся либо слева, либо справа, что определяется по непрерывности плотности заряда, то можно определить направление его движения, а именно влево или вправо движется ушедший конец отрезка и находится ли он вверху или внизу на фазовой плоскости. Тангенсы углов наклона определены со знаком, что позволяет определить, какой конец отрезка, верхний или нижний, уходит из зоны.

Возможно совпадение отрезков по их углу наклона и по плотности заряда, но «развязывание» их наступает в процессе движения, отрезки нужно различать и нумеровать по скорости изменения плотности заряда. Фиксация момента ухода пронумерованного отрезка, точнее его верхнего или нижнего конца из одного сечения и приход его в другое сечение, позволяет определить его координаты и фазовую скорость. Аналогично рассматривается движение другого конца отрезка. Нужно дождаться, когда он пересечёт границы сечения, зафиксировать время, за которое он пересечёт два сечения и зафиксировать его координаты и рассчитать фазовую скорость. После этого кинематика отрезка на фазовой плоскости становится определённой, и он исключается из системы уравнений, понижая её порядок. Дальнейшее его движение рассчитывается автономно.

В конце концов кинематика всех отрезков на фазовой плоскости будет рассчитываться автономно по простым формулам. Наиболее сложным представляется начальный период, связанный с определением количества отрезков в каждом сечении, их наклонов и плотностей, нумерацией и «развязыванием» их в случае одновременного совпадения их наклонов и плотностей. Затем нужно дождаться скачков производной плотности заряда от времени, позволяющих определить моменты перехода концов отрезков через границы сечений, и по фиксированным моментам времени их перехода через сечения определить их координаты и скорости.

Список литературы

1. Власов А.Д. Теория линейных ускорителей. – М. : Атомиздат, 1965. – С. 41.

2. Капчинский И.М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. – М. : Атомиздат, 1986. – С. 57.

3. Лебедев А.Н., Шальнов А.В. Основы физики и техники ускорителей. – 2-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – С. 82.

4. Гуторов Д.А., Шестак В.П. Анализ базы экспериментальных данных корпускулярной диагностики // Научная сессия МИФИ–2001 : сб. научных трудов. – Т. 7. – С. 33.

5. Воронцов В.А., Шестак В.П. О возможности определения двумерной фазовой плотности пучка заряженных частиц методом электронно-лучевого зондирования : аннотации докладов 11 Всесоюзного семинара по ускорителям заряженных частиц. – Харьков : ХФТИ, 1989. – С. 57.

Рецензенты:

Жижин Е.Д., д.ф.-м.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Школьников Э.Я., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.