

УДК 621.384.601(075.8)

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛНС МЕТОДОМ ИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Хлестков Ю.А., Шестак В.П., Воронцов В.А.

*Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ” (НИЯУ МИФИ),
Москва, Россия (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31) yhlestkov@inbox.ru qprsq@yandex.ru*

Приводятся методика и результаты по определению поперечного профиля сгустка пучка Большого Адронного коллайдера (БАК) по данным его зондирования ленточным ионным пучком и сравнение полученного профиля с профилем, полученным аналитически. В качестве экспериментальных данных были использованы кривые отклонения ленточного протонного пучка, полученные численным моделированием. В качестве зондирующего пучка был выбран пучок протонов с энергией равной 200 кэВ, начальный шаг сканирования равен 2 мк. На плоскости регистрации был получен набор эллипсоидных кривых, каждая из которых соответствует своему прицельному параметру. По максимуму этих кривых была построена кривая отклонения. Сравнение этого профиля с профилем, полученным аналитически, показало их хорошее совпадение. Полученные результаты показывают перспективность применения метода корпускулярного зондирования для диагностики отдельных сгустков пучка ЛНС.

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

THE POSSIBILITY OF THE LHC BEAM TRANSVERSE PROFILE DETERMINATION BY THE ION BEAM PROBE METHOD

Khlestkov Yu.A., Shestak V.P., Vorontsov V.A.

*National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI), Moscow,
Russia (115409, Moscow, Kashirskoe shosse, 31) yhlestkov@inbox.ru qprsq@yandex.ru*

The methodic and results for the Large Hadron Collider (LHC) beam single bunch transverse profile determination on its ribbon ion beam probing data are presented and the comparison of this profile with the calculated one is made. The simulated deviation curves for the ribbon ion beam were used as the experimental data. The 200 keV proton beam was used as the investigated beam probe, the 2 micron initial scanning step was used. The set of the ellipsoidal curves for the individual deviation parameters was simulated on the registration plane. The deviation curve was calculated on the ellipsoidal curve maximums. The comparison of the simulated profile with analytical one showed that their coincidence was good enough. The results show the good perspectives of the corpuscular beam probe method for the LHC beam single bunch diagnostic.

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

В ряду проблем эксплуатации ЛНС находится и проблема диагностики сгустков ЛНС, имеющая наибольшее значение в области встречного столкновения сгустков. Ввиду особой малости поперечных размеров сгустков измерение их можно отнести к разряду крайне сложных технологических задач, зачастую требующих принципиально новых решений, поиском которых занимаются крупнейшие ускорительные центры мира. Известны несколько перспективных

направлений разработки диагностического оборудования для пучков коллайдеров. Так по классификации CERN набор методов для измерения поперечного профиля пучка LHC включает в себя несколько групп методов.

Один из них [1] выглядит многообещающе по полученным результатам. В нём используется ионная пушка, ускоряющая пучок ионов Хе или Кг до энергии 2 кэВ, который направляется под прямым углом на исследуемый протонный пучок. Угол отклонения ионного пучка измеряется как функция положения ионного пучка, и производная этой функции даёт профиль протонного пучка. Средний размер пучка при наивысшей энергии будет составлять около 400 микрон, и для того чтобы почувствовать рост эмиттанса пучка в несколько процентов, размер пучка должен быть измерен с относительной точностью 1–2 %.

В ходе проведенных исследований были показаны широкие возможности этого метода. Основой для проведения расчётов послужила программа по численному моделированию корпускулярного зондирования пучков заряженных частиц, применяемых в ускорительной технике в широком диапазоне изменения их параметров. Алгоритм расчета динамики зондирующего пучка в поле исследуемого пучка учитывал эллипсоидальное представление пучка заряженных частиц, позволяющее получить выражение для его электрического поля в аналитическом виде, либо в виде несобственного интеграла и делающее целесообразным проведение интегрирования уравнения движения зондирующей частицы в системе отсчета, связанной с пучком. Очевидная трудность, возникающая при этом – значительное увеличение продольного размера сгустка для сильнорелятивистского пучка. Так, например, для сгустка протонов в LHC, имеющего поперечные размеры $32 \cdot 10^{-6}$ м, энергию 7 ТэВ и продольные размеры $7.5 \cdot 10^{-2}$ м, величина продольного размера в собственной системе отсчета сгустка составляет примерно 50 м. Ввиду того, что траектория зондирующей частицы в подавляющем большинстве практически важных случаев незначительно отличается от прямой, в качестве метода интегрирования был выбран модифицированный метод Эйлера, точность которого, как показало предварительное тестирование, оказалась достаточно высокой при сравнительно малом времени счета на ЭВМ. При необходимости модифицированный метод Эйлера может быть заменен на другой метод интегрирования уравнения движения по времени с постоянным шагом, например, на метод Рунге-Кутты. Имеется возможность изменения координат инжектора электронов в поперечной плоскости. Ввиду заметной погрешности, возникающей из-за скачков в расположении инжектора при обычном циклическом переборе поперечных координат, предусмотрен иной перебор, при котором длина вектора, определяющего положение инжектора в

поперечной плоскости, не претерпевает больших скачков.

Метод корпускулярной диагностики, в частности, был использован для определения поперечного профиля пучка SPS [2]. Полученные результаты были положены в основу проекта применения его для диагностики сгустка LHC. Различие параметров пучков SPS и LHC приводит к необходимости разработки для LHC иной диагностической модели. Поперечный размер пучка SPS составляет 4–6 миллиметров при длине сгустка 150 мм и расстоянии между сгустками, равном 1.5 м, что даёт возможность применить в качестве зондирующих частиц тяжёлые ионы Ar Xe Kr, которые «нанализуются» на несколько сгустков и позволяют измерить средний поперечный профиль пучка SPS. В случае LHC это практически неосуществимо ввиду того, что поперечный размер сгустка в этом коллайдере составляет всего 30 мк, при длине 75 мм и расстоянии между сгустками, равном 7.5 м. Энергия пучков и число частиц в сгустке для SPS и LHC также значительно отличаются, составляя 450 ГэВ, $5 \cdot 10^9$ и 7 ТэВ, $1 \cdot 10^{11}$ соответственно. Выбрать тип ионов, которые бы «нанализывались» на несколько сгустков и позволяли бы измерить средний поперечный профиль пучка, не представляется возможным ввиду малости поперечного размера сгустка. Однако особенности пучка LHC таковы, что появляется возможность измерить поперечно-продольный профиль сгустка, для чего необходимы достаточно быстрые частицы (для протонов это энергия 40 кэВ), которые успевают бы пересечь узкую зону сгустка и собрать информацию о её профиле. Но предварительные оценки показывают, что в этом случае угол отклонения частиц в поле исследуемого пучка становится слишком мал, что вызывает трудности в его измерении. Выход видится в уменьшении массы зондирующих частиц, но это, в свою очередь, приводит к необходимости использовать электроны, что нежелательно ввиду их малой помехоустойчивости. Тогда нужно делать их достаточно «жёсткими» и поднимать их энергию, скажем, до 10 МэВ, что в свою очередь вызывает технические проблемы, связанные с созданием для зондирующего пучка специального ускорителя вместо использования электронной пушки. Ещё одна возможность заключается в понижении энергии зондирующего пучка до такой величины, чтобы зондирующая частица успевала бы за время пересечения сгустка пройти его целиком в продольном направлении. В этом случае может быть измерен интегральный продольно-поперечный профиль сгустка и одновременно получен достаточно большой угол отклонения зондирующего пучка ввиду максимально возможного времени нахождения частицы в поле сгустка. Оценки показывают, что в этом случае могут быть использованы протоны с энергией 200 кэВ. Это достаточно тяжёлые частицы и они движутся с такой скоростью, которая позволяет получить максимальный импульс от исследуемого сгустка, в то же время они проходят через весь сгусток в продольном направлении и тем самым собирают информацию о

горизонтальном профиле всего сгустка. При зондировании ленточным пучком необходимо, чтобы угол отклонения был достаточно велик, для того, чтобы фоновые зондирующие частицы не попадали в активную область, в которой находятся частицы, получившие отклонение от сгустка. Это позволяет отделить пространственно полезный сигнал от фона и обработать его. Временной импульс полезного сигнала равен примерно длительности сгустка и составляет примерно сотую часть от временного импульса фона, равного периоду следования сгустков. Соответственно, величина полезного сигнала составляет примерно один процент от величины фонового сигнала, поэтому их пространственное разделение крайне желательно.

Таким образом, для определения поперечного профиля сгустка ЛНС может быть применена схема нормального зондирования с ленточным пучком. Определение профиля по результатам зондирования может быть проведено по методике, использованной при корпускулярно-лучевой диагностике пучка SPS.

Для проведения численного эксперимента была сконфигурирована программа корпускулярного зондирования, основанная на базовой версии основной программы. В качестве модели сгустка был применен равномерно заряженный эллипсоид вращения или сфероид. Уравнения динамики зондирующего луча решались в системе отсчёта сгустка для того, чтобы избежать расчёта влияния магнитного поля. Интегрирование их проводилось модифицированным методом Эйлера, так как траектории частиц практически прямолинейны. Результаты интегрирования пересчитывались в лабораторную систему отсчёта с помощью преобразований Лоренца. Отклонение зондирующего луча составило примерно 5 мм на базе 10 см. Если вертикальные размеры ленты составят около 1 мм, то фоновые зондирующие частицы не окажут существенного влияния на точность определения профиля исследуемого пучка. Запись результатов проводилась в файл, который затем обрабатывался с помощью пакета программ по реконструкции профиля по квазикривой отклонения для случая ленточного пучка. Критерием точности восстановления профиля сгустка служило сравнение реконструированного профиля сгустка с его полученным аналитически значением.

На рис. 1 показан профиль сгустка пучка ЛНС, рассчитанный аналитически. Отрицательные значения добавлены для сравнения его с профилем, полученным при численном моделировании.

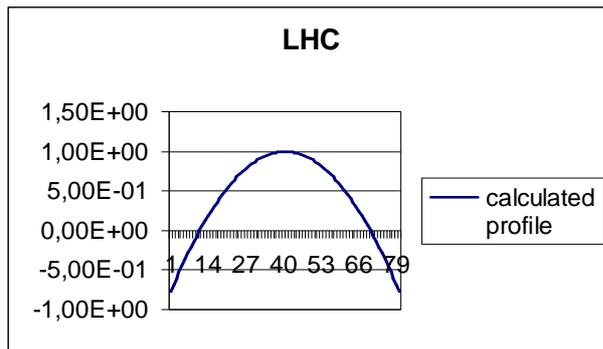


Рис. 1. Аналитический профиль сгустка пучка LHC

На рис. 2 приведена кривая отклонения для сгустка пучка LHC, полученная при численном моделировании.

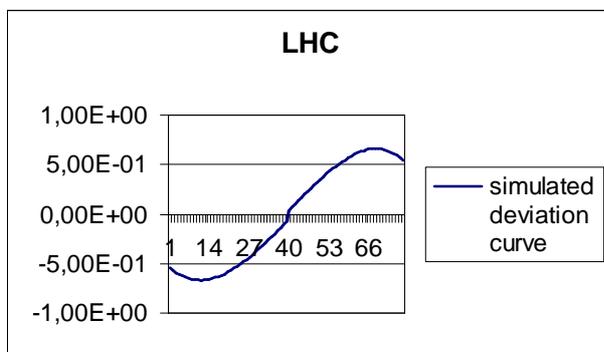


Рис. 2. Кривая отклонения для сгустка пучка LHC, полученная при численном моделировании

На рис. 3 изображён поперечно-продольный профиль сгустка пучка LHC, рассчитанный дифференцированием кривой отклонения. Отрицательные части профиля нефизичны, они возникают из-за спада кривой отклонения вне исследуемого пучка.

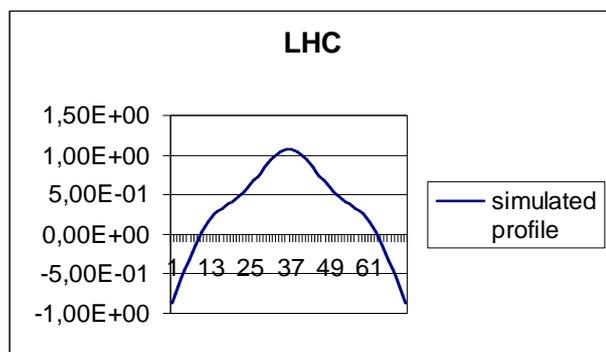


Рис. 3. Профиль сгустка пучка LHC, полученный по кривой отклонения

Как видно из рисунков, отличие двух профилей по эллиптичности не превышает десяти процентов.

Таким образом, как показывают приведенные результаты, метод корпускулярного зондирования [3, 4, 5] после применения его для определения профиля пучка SPS может быть также успешно применён и для определения профиля пучка LHC. При этом погрешность метода не превышает нескольких процентов. Наиболее приемлемой представляется схема нормального зондирования с ленточным пучком. Другие модификации схемы корпускулярного зондирования, такие, например, как curtain, pencil, shadow методы, выглядят менее перспективно.

Список литературы

-
1. J. Bosser, A. Feschenko, R. Maccaferri
Ion profilometer for the SPS and LHC accelerators. Unpublished.
 2. J. Bosser, E. Chevally, C. Dimopoulou, A. Feschenko, R. Maccaferri
Ion curtain profilometer // Preprint CERN. – 1999. – PS / BD / Note 99-15.
 3. Гуторов Д.А., Шестак В.П. Анализ базы экспериментальных данных корпускулярной Диагностики // Научная сессия МИФИ–2001. – Сб. науч. тр. – Т. 7. – С.33.
 4. Воронцов В.А., Гуторов Д.А., Шестак В.П. Метрологическая аттестация метода корпускулярной диагностики // Научная сессия МИФИ–2002. – Сб. науч. тр. – Т. 7. – С. 185.
 5. Воронцов В.А., Гуторов Д.А., Шестак В.П. Перспективы развития корпускулярной диагностики пучков УЗЧ. Научная сессия МИФИ–2003. – Сб. науч. тр. – Т.7. – С. 145.

Рецензенты:

Собенин Н.П., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.

Шиканов А.Е., д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва.
