

Экспериментальное исследование датчика положения пучка для линейных коллайдеров

В.Е.Балакин, А.И.Бажан, П.Б.Жоголев, П.А.Лунев,

И.А.Скарин, Н.А.Соляк, В.Ф.Фогель

Филиал Института ядерной физики

Сибирского Отделения Академии Наук РФ, Протвино, Россия

В. Якименко

ATF BNL – Brookhaven, USA

А.А. Лисицын

НПО “Исток”, Москва, Россия

Прототип датчика положения пучка (ДПП) для использования в линейных коллайдерах, разработанный и изготовленный в Филиале Института ядерной физики, был испытан в марте 1998 года в ATF BNL на пучке электронов с энергией 45 МэВ и зарядом сгустка 0.5 нКл. Экспериментальная установка включала в себя три резонаторных ДПП, установленных на прецизионные подвижки для юстировки датчиков и калибровки их чувствительности. Подвижки позволяли перемещать в вертикальном и горизонтальном направлениях каждый датчик независимо в диапазоне 1.5 мм с дискретностью 0.3 мкм и точностью 0.05 мкм.

Схема обработки выходного сигнала ДПП обеспечивала регистрацию положения пучка при каждом импульсе во всех датчиках с учетом знака смещения. В условиях нестабильности пучка от импульса к импульсу (джиттера) порядка 25 мкм было достигнуто разрешение 1.9 мкм при динамическом диапазоне ± 150 мкм и 0.2 мкм — при динамическом диапазоне системы 15 мкм.

Введение

Одной из наиболее важных проблем при осуществлении проектов линейных коллайдеров является достижение высокой точности (порядка 0.1 мкм) выставки магнитных элементов и ускоряющих секций для сохранения малого эмиттansa пучка в процессе ускорения. Таким образом, разрешение ДПП, используемых в линейном коллайдере, должно быть лучше 0.1 мкм. Одним из наиболее эффективных и простым в изготовлении является ДПП на основе цилиндрического резонатора, возбуждаемого смещенным от оси пучком на аксиально-несимметричной E_{110} моде [1, 3, 7, 8]. Амплитуда колебаний этой моды пропорциональна смещению пучка и заряду сгустка, а фаза зависит от направления смещения.

Одной из важных проблем является подавление основной и других аксиально-симметричных мод, возбуждаемых пучком независимо от смещения [3]. Тепловые шумы и шумы электроники определяют другой предел в достижении минимального разрешения ДПП. Предварительные расчеты и лабораторные тесты прототипов ДПП и электроники показали, что потенциально достижимое разрешение датчика для пучка ATF BNL лучше 0.1 мкм.

Целью описываемого эксперимента являлось испытание ДПП на реальном пучке и определение разрешения системы в условиях джиттера (нестабильности от импульса к импульсу) пучка. Эксперимент был проведен на установке ATF BNL с энергией пучка (45 ± 1) МэВ, зарядом одиночного сгустка 0.25–0.5 нКл и продольным размером 5–10 псек [6].

1. Экспериментальная установка

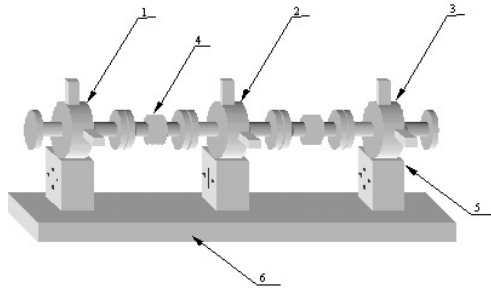


Рис. 1: Экспериментальная установка.

Рис. 1 схематически представляет экспериментальную установку. Три прототипа резонаторов ДПП (1 – UP, 2 – MIDDLE, 3 – DOWN) были установлены на прецизионные электромагнитные подвижки, позволявшие передвигать датчики независимо в X и Y направлениях в диапазоне ± 1 мм с шагом 0,3 мкм. Конструкция подвижек позволяла контролировать положение датчиков относительно стола (6) с точностью 0.05 мкм. Для обеспечения подвижности ДПП соединены между собой и с пролетным каналом через сильфоны (4). Подвижки и датчики были установлены на специальный стол и выставлены с использованием стандартной процедуры ATF.

Каждый ДПП имеет два выхода для сигналов горизонтального и вертикального смещений пучка, соединенных с размещенной вне защитного тоннеля электроникой с помощью СВЧ-кабелей длиной 4 м. Резонансная частота каждого датчика подстраивалась и стабилизировалась автоматически при помощи нагревателей.

2. Схема измерения сигналов ДПП

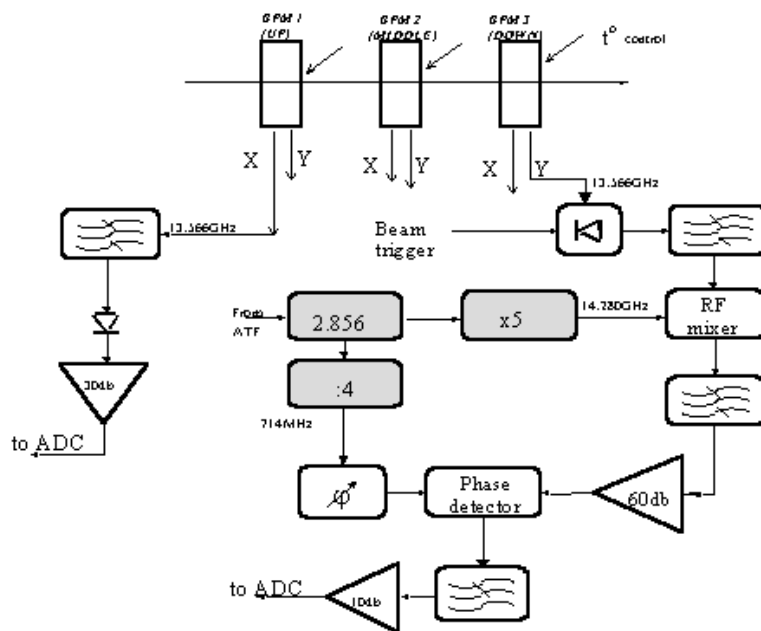


Рис. 2: Схема обработки сигналов ДПП.

Средства автоматизации, выполненные в стандарте КА-МАК, и специальное программное обеспечение позволяют измерять X-, Y-координаты каждого сгустка. В качестве опорного сигнала для смесителя и фазового детектора применялся сигнал линии опорной фазы ATF, что позволило избежать трудностей использования импульсного сигнала опорного датчика [1].

Схема измерения сигналов датчиков представлена на рис.2. Для измерения сигналов горизонтального (X) смещения пучка использовались ППФ, диодная головка и видеоусилитель (амплитудный метод). Для измерения отклонения в вертикальном (Y) направлении применялся так называемый фазовый метод с использованием смесителя, усилителя и фазового детектора на промежуточной частоте. Лабораторные тесты показали, что чувствительность данной схемы порядка 10^{-12} Вт и динамический диапазон около 40 дБ [4].

Средства автоматизации, выполненные в стандарте КА-МАК, и специальное программное

3. Измерения и результаты

Перед началом измерений пучок средствами АТФ проводился вблизи центров резонаторов. Затем при помощи подвижек оси датчиков совмещались с осью пучка более точно. Для измерения положения во время этих процедур использовался амплитудный метод во всех каналах. После окончания предварительной выставки вертикальные каналы ДПП переключались на фазовый метод. Во время выставки пучка был обнаружен и зафиксирован механический сдвиг датчиков от прямой (рис. 3).

Рис. 3 представляет типичные результаты измерений амплитудным методом. В измерительном канале X_{down} , в отличие от X_{up} и X_{middle} , использовалась более чувствительная диодная головка. Из графика видно, что амплитудный метод может использоваться для измерений положения пучка, не требующих высокой точности, но в очень широком диапазоне отклонений пучка от оси. Первоначальные измерения показали, что джиттер пучка по положению и углу настолько велик, что превышает динамический диапазон схемы измерений. Поэтому подаваемые на фазовый метод сигналы датчиков были ослаблены на 30 дБ, и все представляемые далее результаты получены в данных условиях.

Рис. 4 представляет данные, полученные для вычисления чувствительности. Все датчики плавно перемещались подвижками в известном направлении в пределах ± 200 мкм. Используя вычисленную из этих данных чувствительность и данные о шумах электроники можно оценить ожидаемое разрешение: около 0.9 и 1.7 мкм соответственно для лучшего и худшего измерительных каналов.

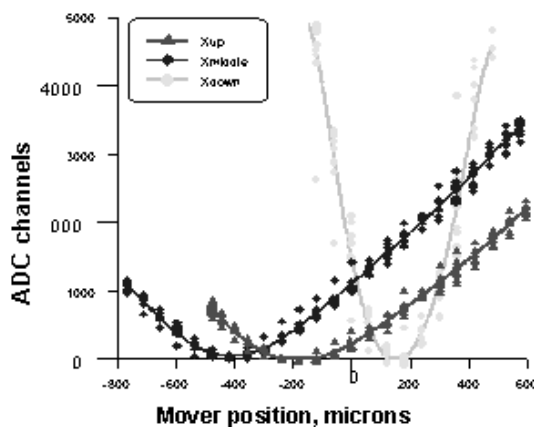


Рис. 3: Чувствительность амплитудного метода.

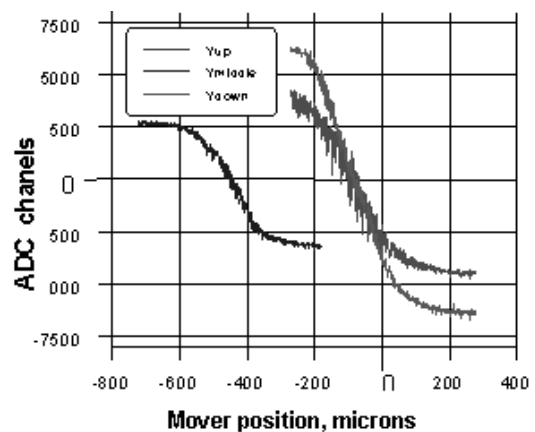


Рис. 4: Определение чувствительности фазового метода.

Рис. 5 поясняет, как можно определить в условиях джиттера пучка разрешение системы датчика положения, используя три ДПП [5]. Вычислив положение пучка в каждом датчике для данных, полученных без насыщения электроники, и построив зависимость, аналогичную показанной на рис. 5, мы получили разрешение системы — 1.9 мкм.

Часть измерений была проведена с ослаблением выходных сигналов датчиков только на 10 дБ. Однако в этом случае динамический диапазон электроники позволял измерять отклонения в пределах ± 15 мкм, что меньше диапазона джиттера пучка. Таким образом, схема измерений работала с насыщениями. Поэтому обработка этих данных довольно трудоемка. Результаты обработки, показанные на рис. 6, дают разрешение порядка 0.2 мкм.

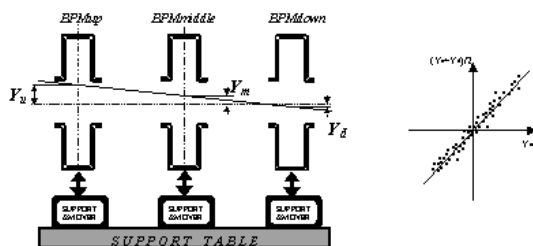


Рис. 5: Использование трех ДПП для определения разрешения.

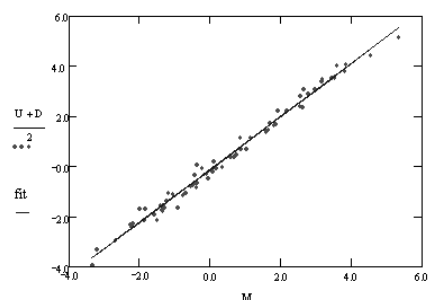


Рис. 6: Определение разрешения ДПП.

Заключение

Полная система резонаторного датчика положения пучка была протестирована в ATF BNL при использовании реального пучка, который имел джиттер по положению, углу, интенсивности и энергии. В данных условиях было получено разрешение системы в 0.2 мкм ($q=0.5$ нКл). Три независимых датчика использовались для исключения влияния джиттера пучка по положению и углу. Для абсолютной калибровки ДПП применялись прецизионные подвижки. Достигнутое разрешение определяется условиями проведения эксперимента и не является предельной величиной для данного ДПП.

Динамический диапазон электроники оказался недостаточным для работы в условиях существующего на ATF джиттера пучка. Поэтому выходной сигнал ДПП был ослаблен.

Нестабильность времени импульса лазера относительно ускоряющего напряжения в RF-пушке приводит к нестабильности “фазы пучка” относительно линии опорной фазы, которая использовалась в качестве опорного сигнала при фазовом детектировании. Это являлось причиной дополнительного джиттера выходного сигнала фазового метода.

Строго говоря, траектория пучка через систему датчиков не является прямой линией вследствие влияния магнитного поля. И даже в постоянном магнитном поле (например, поле Земли) отклонение от прямой не постоянно, а зависит от энергии частиц. Следовательно, энергетический разброс сгустков приводит к дополнительным ошибкам в определении разрешения методом трех датчиков.

В последующих экспериментах для улучшения разрешения системы мы планируем увеличить динамический диапазон электроники для согласования с джиттером пучка, добавить в установку опорный датчик для контроля “фазы пучка” относительно линии опорной фазы, попытаться исключить или учесть влияние магнитного поля.

Примечание

К моменту публикации статьи, в октябре 1998 года, был проведен следующий этап испытаний датчика положения. Был расширен динамический диапазон схемы обработки сигнала, изготовлена система контроля стабильности фазы по пучку, усовершенствовано программное обеспечение, приняты меры к экранизации магнитного поля между датчиками, коллективом ATF несколько улучшена стабильность пучка. Результаты, обработанные “on-line”, дали разрешение 150 нм. Результат окончательной обработки будет опубликован позднее.

Список литературы

- [1] V. Balakin. “ Concept BPM for VLEPP ”. Proc. 3rd Int. Workshop on Linear Colliders, v. 3, p. 155 (1991).
- [2] V. Balakin, V. Vogel, N. Solyak. “The Model of Beam Position Monitor for VLEPP ”. Proc. 3rd Int. Workshop on Linear Colliders, v. 3, p. 188 (1991).
- [3] W. Schnell. “Common-mode rejection in resonant microwave position monitors for linear colliders” CERN-LEP-RF/88-41, CLIC Note 70.
- [4] V. Balakin, A. Bazhan, P. Lunev et al. “Beam Position Monitor with nanometer resolution for Linear Collider”. Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 2, p. 1539 (1994).
- [5] T. Schintake. “Experimental Results from FFTB December 1995 run”, Brief Memo (1995).
- [6] K. Batchelor, M. Babzien, I Ben-Zvi and others. “Operational experience on the Brookhaven National Laboratory Accelerator Test Facility”. Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 1, p. 736 (1994).
- [7] J.P.H. Sladen, I. Wilson, W. Wuensch. “CLIC Beam Position Monitor Tests”, CERN-LEP-RF (1996).
- [8] R. Lorenz, K Yezza. “Test Results on Beam Position Monitor Prototype for the TTF”, Proc. Fourth European Particle Accelerator Conference, v. 2, p. 1536 (1994).