

# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ТРЕКОВ И ПЕРВИЧНОЙ ВЕРШИНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD

*В. Ф. Андреев* \*, *С. Г. Герасимов* \*\*, *А. Р. Теркулов* \*\*\*

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Приводятся результаты разработки специального программного обеспечения для определения параметров заряженных частиц и реконструкции первичной вершины взаимодействия для проектируемого эксперимента SPD на строящемся коллайдере NICA в Дубне. Использование данных программ позволяет оперативно моделировать различные конфигурации как магнитного поля, так и трековой системы эксперимента SPD и, таким образом, определять оптимальную структуру для лучшей реконструкции треков. Также приводятся предварительные результаты разработки программы по реконструкции треков заряженных частиц.

The software development for charged tracks and primary vertex reconstruction for the SPD experiment at the future NICA collider (JINR, Dubna) is described. The use of these programs makes it possible to quickly simulate various configurations of both the magnetic field and the track system of the SPD experiment and, thus, determine the optimal experimental setup for better track reconstruction. Preliminary results of the program for the reconstruction of charged particle tracks are also presented.

PACS: 29.40.Gx; 29.20.db; 24.10.Lx

## ВВЕДЕНИЕ

Реконструкция треков заряженных частиц и первичной вершины взаимодействия является важной частью большинства экспериментов в области физики высоких энергий. В общем виде программу реконструкции треков можно разделить на две основные части: нахождение кандидатов в треки

---

\*E-mail: Vladimir.Andreev@cern.ch

\*\*E-mail: Sergei.Gerassimov@cern.ch

\*\*\*E-mail: Adel.Terkulov@cern.ch

(track finding) и определение параметров треков с помощью программ фитирования (track fitting). Задача нахождения кандидатов в треки начинается с отбора из всего комплекса измерений только тех, которые, предположительно, принадлежат к конкретному треку. Далее для определения параметров трека применяется программа фитирования с использованием уже отобранных измерений. В существующих экспериментах используются различные алгоритмы для определения параметров треков, но наиболее распространенным из них является метод фильтра Калмана [1] с различными его модификациями [2]. Данный метод является эффективным рекурсивным алгоритмом, с помощью которого оценивается вектор состояния динамической системы, при этом используются ряд последовательных измерений и их матрицы ошибок. Метод фильтра Калмана предлагается применять и в проектируемом эксперименте SPD [3] для определения параметров треков.

Разработка программного обеспечения для таких больших экспериментов, как SPD, требует большого количества времени и усилий, поэтому на начальном этапе исследования потенциальных возможностей SPD-детекторов были разработаны специальные (standalone) программы, которые позволяют оперативно определять параметры треков и первичной вершины взаимодействия. Дополнительно были созданы программные средства визуализации карты магнитного поля, материалов и траекторий заряженных частиц внутри установки SPD.

## 1. ПРОЦЕДУРА НАХОЖДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕКОВ (ФИТИРОВАНИЕ)

Для разработки программы фитирования разумно использовать существующие пакеты программ для фитирования треков. Одной из таких программ, созданной на основе открытого программного обеспечения (open-source framework), является Genfit (Generic Track-Fitting Toolkit) [4], элементы которой были адаптированы и использованы в этой работе. В качестве входных данных разработанная программа фитирования использует результаты моделирования методом Монте-Карло трековой системы эксперимента SPD с помощью пакета программ SPDroot [5]. Для чтения полученных результатов и преобразования их в формат программы фитирования треков был написан специальный интерфейс. На рис. 1 приведена общая схема обмена данными

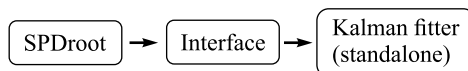


Рис. 1. Схема обмена данными между SPDroot-пакетом моделирования отклика детекторов эксперимента SPD и специальной программой фитирования треков

между пакетом SPDRoot, применяемым для моделирования отклика детекторов эксперимента SPD, и специальной программой фитирования треков.

Предполагается, что трековая система эксперимента SPD будет состоять из вершинного и трекового детекторов. Вершинный кремниевый детектор будет содержать пять цилиндрических слоев в центральной части (barrel) и пять дисков в каждой из торцевых (endcap) частей установки. Толщина каждого слоя кремниевого детектора будет составлять 300 мкм. Основная трековая система в центральной части установки будет состоять из нескольких слоев соломенных трубочек — строу (straw-tube detector), расположенных вокруг центральной части вершинного детектора. Предполагается, что диаметр каждого строу детектора будет равен 10 мм. Необходимое количество слоев в центральной части трековой системы будет оптимизировано на основе моделирования методом Монте-Карло и требования наилучшей реконструкции заряженных треков. Торцевая часть трековой системы будет состоять из трех станций, каждая из которых будет содержать восемь слоев строу-детекторов в передней и задней частях установки SPD.

Дополнительно к параметрам хитов, полученных при моделировании методом Монте-Карло (МК-хитов) в программе SPDRoot, было добавлено пространственное разрешение для трекового и вершинного детекторов 150 и 50 мкм соответственно. Таким образом, данная процедура позволяет учитывать влияние как вещества, из которого состоят различные детекторы, так и пространственного разрешения трековых детекторов при определении параметров реконструированных треков.

На рис. 2 приведена зависимость импульсного разрешения для заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла  $\theta$  (результаты усреднены по азимутальному углу  $\varphi$ ) при различных конфигурациях трековой системы эксперимента SPD и гибридной конфигурации магнитного поля, когда в центральной части установки оно является тороидальным, а в ее тор-

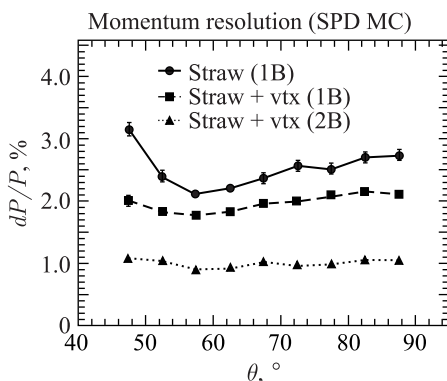


Рис. 2. Зависимость импульсного разрешения для заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла  $\theta$  при различных конфигурациях трековой системы: ● — только строу-детектор; ■ — строу- и вершинный детекторы; ▲ — строу- и вершинный детекторы при удвоенной величине магнитного поля

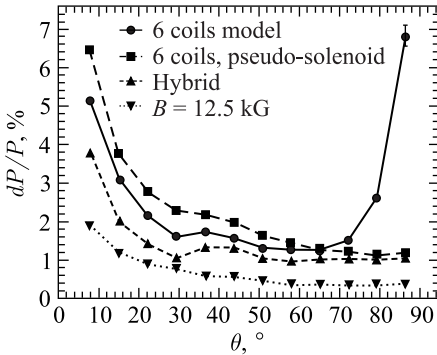


Рис. 3. Импульсное разрешение для заряженных частиц с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла  $\theta$  и различных конфигураций магнитного поля: ● — специальный вариант магнитного поля с шестью катушками; ■ — псевдосоленоидальное поле с шестью катушками; ▲ — гибридная конфигурация магнитного поля; ▼ — постоянное магнитное поле вдоль  $z$ -оси величиной 12,5 кГс

цевых частях — соленоидальным. Как видно из представленных результатов, увеличение магнитного поля позволяет существенно улучшить импульсное разрешение, но максимальное значение магнитного поля будет определяться конструкцией и типом магнитной системы.

На этапе оптимизации геометрии трековых детекторов исследовалось влияние различных конфигураций магнитного поля на точность определения параметров треков. Рассматривались следующие конфигурации:

- постоянное магнитное поле вдоль  $z$ -оси величиной 12,5 кГс (используется для сравнения);
- гибридная конфигурация магнитного поля;
- псевдосоленоидальное поле, создаваемое шестью катушками;
- специальный вариант магнитного поля, когда три катушки создают поле в одном направлении, а другие три катушки — поле в противоположном направлении.

На рис. 3 приведена зависимость импульсного разрешения для заряженных частиц с импульсом 1 ГэВ/с как функция полярного угла  $\theta$  и рассмотренных конфигураций магнитной системы эксперимента SPD. Полученные результаты позволяют понять влияние различных конфигураций магнитной системы на точность определения параметров заряженных частиц и учесть данные исследования при выборе окончательной конфигурации как магнитной системы, так и геометрии самой трековой системы планируемого эксперимента SPD.

## 2. РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕРВИЧНОЙ ВЕРШИНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Следующим важным шагом при реконструкции событий является разработка программы реконструкции первичной вершины взаимодействия. Для решения данной задачи была разработана специальная программа на основе алгоритма фильтра Калмана, в которой были использованы элементы про-

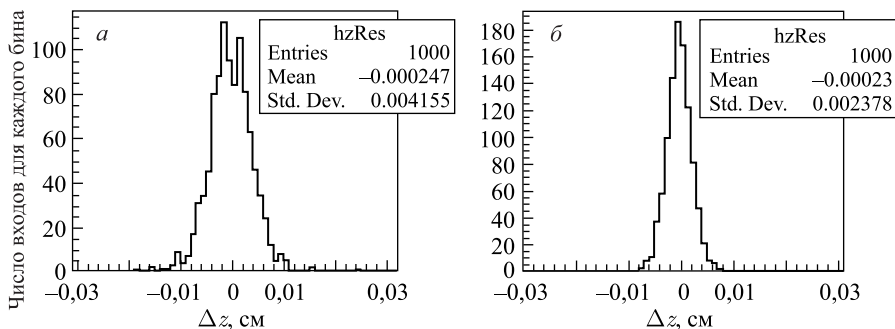


Рис. 4. Зависимость точности реконструкции  $z$ -координаты первичной вершины взаимодействий от импульса первичной частицы: а) 1 ГэВ/с; б) 3 ГэВ/с

граммы реконструкции первичной вершины эксперимента СВМ [6]. В программе реконструкции вершины в качестве входных данных используются показания параметров треков заряженных частиц, полученных после фитирования треков с помощью метода фильтра Калмана. Точность реконструкции координат первичной вершины взаимодействия была определена следующей процедурой:

1) в первичной вершине с координатами  $x = 0,0$ ,  $y = 0,0$ ,  $z = 0,0$  генерировались шесть заряженных частиц с импульсом 1 или 3 ГэВ/с, равномерно распределенных в диапазонах полярного ( $45 < \theta < 135^\circ$ ) и азимутального ( $0 < \varphi < 360^\circ$ ) углов;

2) с использованием программы SPDroot моделировался отклик в вершинном и трековом строу-детекторах;

3) с использованием специальной программы фита Калмана определялись параметры треков заряженных частиц;

4) на финальном этапе полученные данные параметров треков использовались в разработанной программе реконструкции первичной вершины взаимодействия.

Результат работы данной программы реконструкции приведен на рис. 4, где показана точность реконструкции  $z$ -координаты первичной вершины для двух значений импульсов сгенерированных частиц — 1 и 3 ГэВ/с. Полученные данные указывают на значительное улучшение точности реконструкции  $z$ -координаты с увеличением импульса первичных частиц ( $\sim 42$  мкм при 1 ГэВ/с до  $\sim 24$  мкм при 3 ГэВ/с). Также было проверено влияние разрешения в самом вершинном детекторе на точность реконструкции первичной вершины. Результаты моделирования и реконструкции показали, что точность реконструкции  $z$ -координаты также улучшается с  $\sim 42$  до  $\sim 20$  мкм при изменении точности в вершинном детекторе с 50 до 25 мкм при импульсе первичных частиц, равном 1 ГэВ/с.

### 3. РЕКОНСТРУКЦИЯ ТРЕКОВ

Реконструкция треков начинается с нахождения кандидатов в треки или набора измерений, которые, как мы предполагаем, должны принадлежать выбранному треку. Общая схема программы реконструкции треков содержит следующие шаги:

- на первом шаге с помощью программы SPDroot моделируется отклик в трековых детекторах (вершинном и строу) и производятся МК-хиты при прохождении заряженных частиц;
- на втором шаге (digitization) учитываются тип и пространственное разрешение самих детекторов;
- следующий шаг (pattern recognition) начинается с нахождения трековых кандидатов (track seed) в вершинном детекторе, а затем последовательно добавляются МК-хиты в строу-детекторе слой за слоем;
- на последнем шаге применяется процедура фита Калмана к каждому трековому кандидату, который может содержать МК-хиты как вершинного, так и строу-детекторов.

Нахождение трековых кандидатов начинается с рассмотрения всех возможных двухточечных комбинаций между МК-хитами, находящимися на различных слоях вершинного детектора. Так как в настоящее время в качестве основной конфигурации магнитного поля для эксперимента SPD рассматривается псевдосоленоидальная конфигурация с направлением магнитного поля вдоль  $z$ -оси, то проекция траектории движения заряженной частицы на плоскость  $x$ - $y$ -координат будет представлять собой окружность. Для описания траектории частицы в вершинном детекторе предлагаем использовать параболическую функцию  $y = a + bx + cx^2$ , параметры которой могут быть определены с использованием координат МК-хитов. Чтобы упростить процедуру нахождения точек трекового кандидата, мы предположили, что  $x$ -координата имеет точное значение, и в этом случае учитывалась только погрешность измерения  $y$ -координаты. Процедура начинается с двухточечных трековых кандидатов, а новая точка добавляется на основании критерия  $\chi^2$ , определенного следующим образом:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N \frac{(y_n - a - bx_n - cx_n^2)^2}{\sigma_{y_n}^2},$$

где  $x_n$  и  $y_n$  — координаты МК-хитов на  $x$ - $y$ -плоскости;  $\sigma_{y_n}$  — ошибка измерения  $y$ -координаты. В результате выполнения данной процедуры получаем набор трековых кандидатов, содержащих 3, 4 или 5 хитов вершинного детектора.

Далее с использованием параметров трековых кандидатов, полученных в вершинном детекторе, трек экстраполируется к ближайшему от первичной вершины слою строу-детектора. Затем все МК-хиты в данном слое проверя-

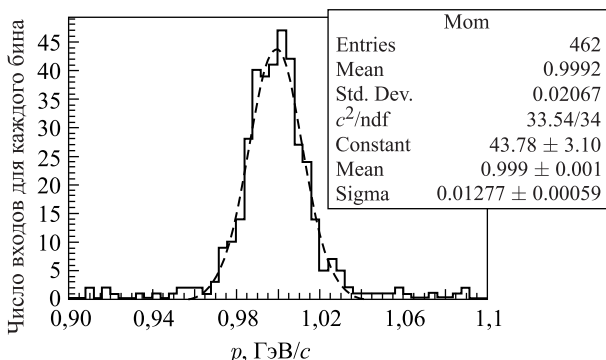


Рис. 5. Распределение реконструированного импульса для заряженной частицы с импульсом 1 ГэВ/с

ются на возможную принадлежность к данному треку с использованием критерия  $\chi^2$ . МК-хиты, удовлетворяющие определенным условиям, добавляются к точкам трекового кандидата, после чего проводится обновление параметров трека с учетом нового измерения и трек экстраполируется к следующему слою строу-детектора. Если два или более измерения (МК-хита) удовлетворяют критерию принадлежности к данному трековому кандидату, то создается один или более дополнительных трековых кандидатов и в дальнейшем процедура экстраполяции и обновления трековых параметров применяется ко всем вновь созданным кандидатам. В результате данной процедуры будет сформировано большое количество трековых кандидатов, к которым на конечном этапе применяется процедура фитирования треков методом фильтра Калмана.

Для тестирования данной процедуры реконструкции треков были смоделированы события с различной множественностью первичных частиц и импульсом каждой частицы, равным 1 ГэВ/с. Далее определялась эффективность нахождения и точность реконструкции параметров трека. На рис. 5 в качестве примера приведено распределение реконструированного импульса для частиц с импульсом 1 ГэВ/с.

На основе созданного специального программного обеспечения было проведено предварительное исследование точности определения параметров треков заряженных частиц в зависимости от конфигурации магнитного поля и характеристик трековой системы эксперимента SPD. Далее разработанные программы были включены в систему программ для моделирования и реконструкции эксперимента SPD. В настоящее время ведется разработка программ реконструкции треков, получены первые предварительные результаты.

Авторы выражают благодарность коллективу эксперимента SPD в ОИЯИ (Дубна) за обсуждение результатов работы и полезные замечания, а также

отдельную благодарность Артуру Ткаченко за внедрение разработанных программ в систему программного обеспечения эксперимента SPD.

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-02-40061 («Мегасайенс–NICA»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kalman R. E.* Transcription of ASME // J. Basic Eng. D. 1960. V. 82. P. 35.
2. *Fruhvirth R.* Application of Kalman Filtering to Track and Vertex Fitting // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 262. P. 444–450.
3. *Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., Kovalenko A., Teryaev O., Shevchenko O., Nagajcev A., Guskov A., Kukhtin V., Topilin N.* Spin Physics Experiments at NICA-SPD with Polarized Proton and Deuteron Beams // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 215.
4. *Rauch J., Schlüter T.* GENFIT — A Generic Track-Fitting Toolkit. arXiv:1410.3698 [physics.ins-det].
5. SPDroot program. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
6. *Gorbunov S., Kisel I.* Primary Vertex Fit Based on the Kalman Filter: CBM-SOFT-note-2006-001. 2006.