

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 539.12; 539.1.08

**ПРИМЕНЕНИЕ KFParticle ПАКЕТА
ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРВИЧНОЙ ВЕРШИНЫ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В SPD ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

В. Ф. Андреев

В статье рассматривается возможность использования KFParticle пакета, разработанного для реконструкции короткоживущих частиц, также для реконструкции первичной вершины взаимодействий в SPD эксперименте на коллайдере НИКА. Приведено сравнение с алгоритмом реконструкции первичной вершины, используемом в настоящее время в SPD эксперименте.

Ключевые слова: реконструкция первичной вершины, фильтр Калмана, фитирование вершины, Монте-Карло моделирование, коллайдер НИКА, SPD эксперимент.

Введение. Первичная вершина взаимодействия является одной из важнейших характеристик исследуемых событий в физике высоких энергий, точность определения которой определяется не только соответствующими детекторами, но и программным обеспечением, используемым для ее реконструкции. Исследование различных алгоритмов реконструкции первичной вершины и выбор оптимального представляет собой важную задачу в развитии программного обеспечения эксперимента.

Трековая система SPD эксперимента, подробное описание которой приведено в [1], состоит из двух основных элементов: вершинного и трекового детекторов. Вершинный детектор представляет собой несколько слоев чувствительных элементов, симметрично расположенных вокруг z -оси. В SPD эксперименте рассматриваются две опции вершинного детектора: двухсторонние кремниевые микростриповые детекторы (DSSD) и кремниевые пиксельные детекторы (MAPS). На первом этапе работы эксперимента вместо вершинного детектора будет использоваться более простой внутренний трековый детектор на основе микроструктурных газовых координатных детекторов (MicroMegas).

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: andreevfv@lebedev.ru.

Трековый детектор в центральной своей части также является симметричным относительно оси столкновения и разделен на 8 равных частей по азимутальному углу, каждая из которых содержит 62 слоя тонкостенных дрейфовых трубочек. Дополнительно 16 слоев дрейфовых трубочек установлены в передней и задней частях трекового детектора.

Система координат, используемая в SPD эксперименте, является стандартной системой координат для экспериментов на сталкивающихся пучках, в которых ось z направлена вдоль номинального направления встречных пучков частиц, ось y вертикальна, ось x перпендикулярна к z и y осям и направлена к центру кольца коллайдера, а началом системы координат считается центр установки. Согласно проекту НИКА столкновение пучков частиц в SPD эксперименте будет происходить под нулевым углом. Планируется, что магнитное поле в SPD эксперименте будет соленоидального типа с величиной до 1.2 Тесла, и при этом неоднородность B_z компоненты поля в центральной части вершинного детектора не будет превышать нескольких процентов.

Описание пакета KFParticle. Пакет программ KFParticle [2] был разработан для реконструкции короткоживущих частиц и определения их характеристик: импульса, энергии, массы, времени жизни, длины распада и некоторых других. В настоящее время данный пакет применяется в экспериментах ALICE, CBM, STAR [3], а также он используется в SPD эксперименте для реконструкции короткоживущих частиц. KFParticle пакет содержит более двухсот каналов распада различных короткоживущих частиц, таких как: J/ψ , D -мезонов (D^0 , D^{+-} , D_s), векторных мезонов (ρ , Ω , φ) и некоторых других. Пакет основан на математике фильтра Калмана [4] и характеризуется следующими основными свойствами:

- для описания первичной (короткоживущей) частицы и вторичных частиц (продуктов распада) используется один и тот же набор параметров;
- вторичные частицы добавляются к первичной частице или вычитаются независимо друг от друга с использованием математики фильтра Калмана;
- пакет позволяет восстановить всю цепочку распада для случая последовательного распада нескольких короткоживущих частиц;
- пакет не зависит от геометрии установки.

Для описания состояния короткоживущей частицы и продуктов ее распада используются следующие восемь параметров: три координаты (x, y, z) в точке, которая является или точкой рождения короткоживущей частицы, или первой точкой измерения

трека, три компоненты импульса (p_x, p_y, p_z) в данной точке, энергия частицы (E) и, в том случае, если известна точка рождения короткоживущей частицы, время между точкой рождения и точкой распада частицы, измеренное как расстояние, нормированное на импульс частицы ($s = l/p$). При этом ковариационная матрица оценивается вместе с вектором состояния частицы, что позволяет получить не только параметры частицы, но и оценить их точность. Этот набор параметров не зависит от геометрии эксперимента и обычно используется во многих экспериментах для описания реальных физических объектов.

Надо отметить, что в SPD эксперименте используются следующие шесть параметров, то есть x, y, z – координаты точки в пространстве и p_x, p_y, p_z – компоненты импульса трека в данной точке с соответствующей ковариационной матрицей. Данное представление удобно для процедуры экстраполяции трека численным методом Рунге–Кутты–Нюстрём [5], который учитывает как реальную карту магнитного поля, так и многократное рассеяние и энергетические потери заряженной частицы при прохождении вещества.

В общем виде процедура реконструкция вершины в пакете KFParticle выглядит следующим образом – находится приближение вершины, которое определяется как точка в пространстве, являющаяся ближайшей для первых двух треков. Далее применяется стандартная итерационная процедура фильтра Калмана: трек экстраполируется к данной точке, параметры трека оцениваются в окрестностях этой точки, проводится линеаризация измерений и параметры вершины уточняются при последовательном добавлении одного трека за другим. Для каждой новой итерации вершина, оцененная на предыдущем шаге, используется как точка линеаризации.

Важная особенность рассматриваемого KFParticle пакета состоит в том, что он реализован только для двух версий магнитного поля: постоянного магнитного поля и неоднородного магнитного поля, используемого в СВМ эксперименте. В последнем случае используется специальное параметрическое описание как самого магнитного поля, так и траектории заряженной частицы в неоднородном магнитном поле [6]. Поэтому для использования данного пакета в условиях неоднородного магнитного поля SPD эксперимента будет применяться следующая процедура, которая была опробована в работе [7]: трек с помощью метода Рунге–Кутты–Нюстрём экстраполируется к первоначальному приближению вершины, далее в малой окрестности данной точки магнитное поле рассматривается как постоянное и, таким образом, используется версия KFParticle пакета для постоянного магнитного поля.

Программа реконструкции первичной вершины взаимодействия состоит из двух основных частей: нахождение кандидатов первичной вершины и процедуры фитирования этих кандидатов с использованием известных параметров треков.

Нахождение кандидатов первичной вершины взаимодействия. Одной из важных особенностей SPD эксперимента, которая осложняет нахождение первичной вершины, является большой диапазон области столкновения пучков вдоль оси z , составляющий несколько десятков сантиметров. Согласно проекту коллайдера НИКА [8] область взаимодействия будет иметь форму Гауссовского распределения с величиной σ_z не менее 30 см вдоль z -координаты и $\sigma_x = \sigma_y = 0.1$ см для x -, y -координат, соответственно.

В SPD эксперименте для нахождения кандидатов первичной вершины взаимодействия в настоящее время применяется одномерный метод кластеризации, описание которого приведено в работе [7] и который обеспечивает точность первого приближения вершины на уровне ~ 0.5 мм для Minimum Bias событий, включающих в себя дифракционные и неупругие взаимодействия. В данном исследовании предлагается использовать KFParticle пакет не только для реконструкции первичной вершины, но и для нахождения кандидатов первичной вершины. При этом процедура нахождения кандидатов вершины будет выглядеть следующим образом:

- отбираются хорошо реконструированные треки, далее треки экстраполируются к оси столкновения пучков ($x = y = 0.0$) и при этом отбрасываются треки, далеко отстоящие от z -оси в поперечной плоскости;
- проводится реконструкция вершины взаимодействия с помощью KFParticle пакета при постоянном магнитном поле, значение которого определено в точке координат $x = y = z = 0.0$ см;
- далее находится “плохой” трек, то есть трек с максимальной величиной параметра χ^2 , который определен следующим образом:

$$\chi^2 = \Delta r^T (C_{\text{track}} + C_{\text{PV}})^{-1} \Delta r, \quad (1)$$

где Δr – вектор минимального расстояния трека до вершины, C_{track} и C_{PV} – ковариационные матрицы трека и вершины, соответственно. Для “плохого” трека величина χ^2 должна быть также больше некоторого порогового значения;

- на следующем шаге происходит удаление “плохого” трека из реконструированной вершины с использованием математики фильтра Калмана и определение нового положения вершины;
- повторение вышеописанной процедуры (нахождение “плохого” трека, удаление трека из процедуры реконструкции и определение нового положения вершины) проводится

до тех пор, пока или все “плохие” треки не будут удалены из процедуры реконструкции вершины, или в процессе реконструкции останется всего 2 трека;

– на завершающем этапе проводится оценка координат найденной вершины взаимодействия с использованием только оставшихся треков.

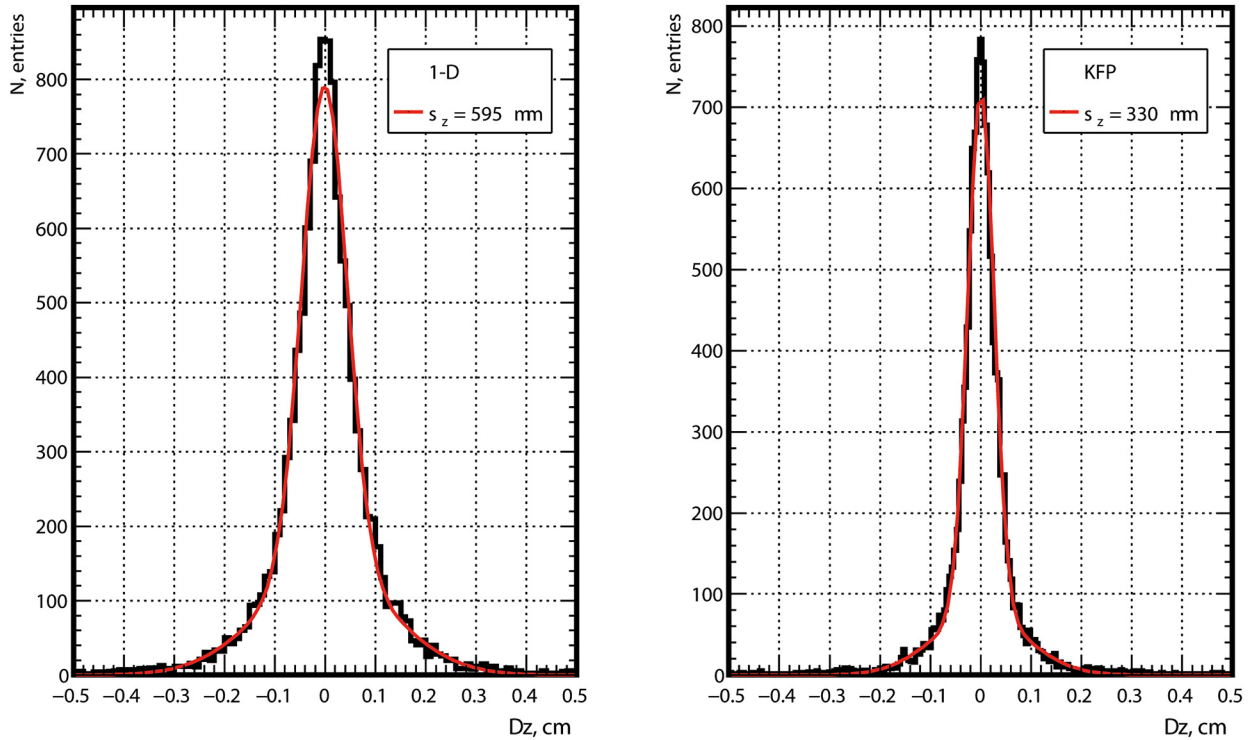


Рис. 1: Точность нахождения первичной вершины взаимодействия (z -координаты) для двух алгоритмов: одномерного алгоритма кластеризации (1-D) и алгоритма, основанного на *KFP* пакете (*KFP*). Результаты получены для конфигурации с внутренним трековым детектором с одним слоем *MicroMegas*.

На рис. 1 приведена разность между генерированным и реконструированным положением вершины для определения точности нахождения первичной вершины взаимодействия для Minimum Bias событий и двух алгоритмов поиска: одномерного алгоритма кластеризации и алгоритма, основанного на *KFP* пакете. Эти распределения фитировались суммой двух функций Гаусса, а значение σ_z определялось как сумма σ_1 и σ_2 с весами, соответствующими площади под кривой. Надо отметить существенное улучшение точности нахождения вершины (~ 1.8 раза) при использовании *KFP* пакета.

Процедура фитирования первичной вершины на основе KFParticle пакета. В алгоритме фитирования первичной вершины взаимодействия на основе KFParticle пакета используется последовательная процедура, которая во многом похожа на процедуру нахождения кандидатов первичной вершины, описание которой было приведено в предыдущем разделе:

– отбираются хорошо реконструированные треки, а затем треки экстраполируются к первоначальному приближению вершины, найденному с использованием KFParticle пакета;

– далее процедура фитирования первичной вершины повторяет алгоритм нахождения кандидатов первичной вершины (реконструкция вершины, нахождение “плохого” трека, удаление “плохого” трека из процедуры реконструкции, определение нового положения вершины и окончательная реконструкция вершины).

Надо особо отметить, что при фитировании первичной вершины используется значение магнитного поля, равное величине поля в точке первого приближения вершины взаимодействия.

Моделирование событий. Для проверки алгоритма реконструкции первичной вершины взаимодействия на основе KFParticle пакета в качестве входных данных используются параметры треков, полученные в пакете программ SPDroot [9], который был разработан для описания геометрии и моделирования отклика различных детекторов SPD эксперимента. С помощью Монте-Карло генератора PYTHIA 8 [10] при энергии сталкивающихся протонов $\sqrt{s} = 27$ ГэВ было смоделировано по 10000 Minimum Bias событий для каждой из следующих опций вершинного детектора: геометрия без вершинного детектора (nVtx), четыре слоя MAPS детекторов, три слоя DSSD детекторов, один слой (Mvd1) или три слоя (Mvd3) MicroMegas детекторов. Данный объем смоделированных событий позволяет оценить точность σ_z реконструкции первичной вершины взаимодействия со статистической точностью $\sim 2.5\%$.

При моделировании координаты первичной вершины были распределены по Гауссу с величиной сигма, равной $\sigma_z = 30$ см вдоль z -координаты, и $\sigma_x = \sigma_y = 0.1$ см для x -, y -координат, соответственно. Далее из всего набора треков для последующей реконструкции первичной вершины отбирались хорошо реконструированные треки, то есть треки, у которых было восемь и более Монте-Карло хитов в трековых детекторах, и для которых значение χ^2/Ndf , полученное при определении параметров трека (фитировании), не превышало 12. Среднее число таких отобранных треков для Minimum Bias событий составило ~ 7.5 – 8.0 (данное число зависит от опции вершинного детектора), из

которых примерно ~ 1.5 составляют вторичные треки, образованные или от распадов короткоживущих частиц, или от вторичных взаимодействий, и которые могут влиять на точность реконструкции первичной вершины.

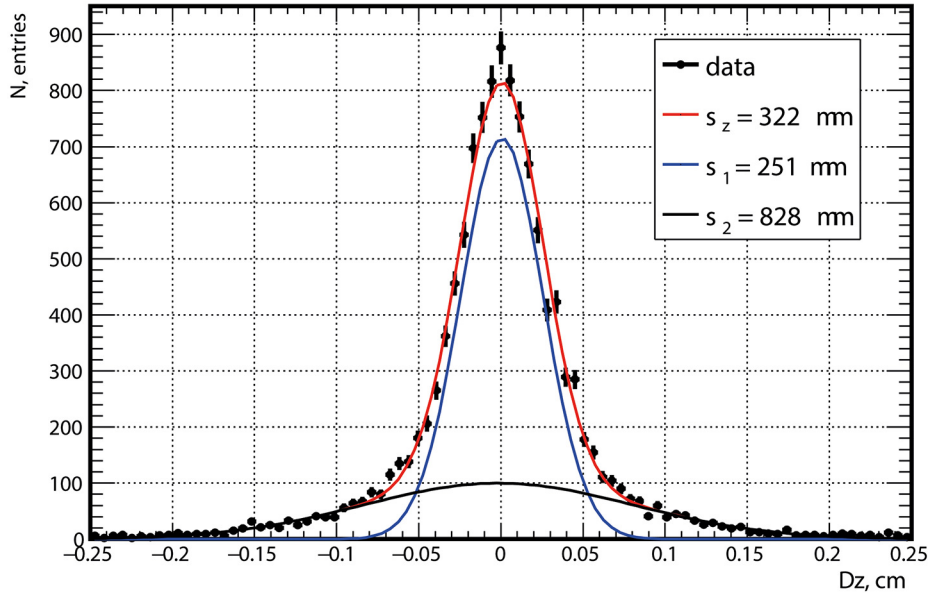


Рис. 2: Разность между генерированным и реконструированным положением z -координаты первичной вершины взаимодействия и результат фитирования полученного распределения суммой двух функций Гаусса.

В качестве оценки точности реконструкции вершины взаимодействия, как и для случая нахождения кандидатов первичной вершины, была использована разность между генерированным и реконструированным положением вершины. Далее полученные распределения фитировались суммой двух функций Гаусса, а точность реконструкции вершины σ_z оценивалась как сумма двух сигм σ_1 и σ_2 с соответствующими весами. Пример такого распределения приведен на рис. 2 для z -координаты и опции с одним слоем MicroMegas детекторов. В табл. 1 приведена точность реконструкции первичной вершины взаимодействия для различных опций вершинного детектора и двух алгоритмов реконструкции: алгоритма, используемого в SPD эксперименте в настоящее время (Present), и алгоритма на основе KFParticle пакета (KFP).

Приведенные в табл. 1 результаты позволяют сделать вывод, что оба алгоритма в пределах статистической ошибки обеспечивают одинаковую точность реконструкции первичной вершины взаимодействия для всех рассмотренных опций вершинного детектора. Исключение составляет конфигурация трековой системы без вершинного де-

тектора, для которой алгоритм на основе KFParticle пакета демонстрирует небольшое улучшение точности (менее 10%) по сравнению с используемым алгоритмом. Также следует подчеркнуть, что использование KFParticle пакета для нахождения кандидатов первичной вершины показало существенное улучшение точности при нахождении вершины.

Т а б л и ц а 1

Точность реконструкции x - и z -координат первичной вершины взаимодействия для различных опций вершинного детектора и двух алгоритмов реконструкции вершины.

Статистическая точность приведенных величин σ составляет $\sim 2.5\%$

Vertex detector		nVtx	Mvd1	Mvd3	DSSD	MAPS
$\sigma_x, \mu\text{m}$	Present	615	287	280	92.0	75.3
	KFP	564	283	276	91.6	75.4
$\sigma_z, \mu\text{m}$	Present	1011	324	297	114.7	79.7
	KFP	976	322	295	112.5	80.9

Проведенное исследование показало, что KFParticle пакет может быть использован как для нахождения кандидатов первичной вершины, так и как новый алгоритм реконструкции первичной вершины взаимодействия в SPD эксперименте.

Надо также отметить, что KFParticle пакет позволяет добавлять или удалять треки из вершины взаимодействия и, таким образом, определять новое положение первичной вершины без реконструкции всего события. Данная возможность является полезной, например, при поиске распадов короткоживущих частиц (D -мезонов или других), когда идентифицированные вторичные частицы могут быть исключены из процедуры реконструкции первичной вершины и, тем самым, улучшить точность реконструкции самой первичной вершины.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. Abazov, V. Abramov, (on behalf of SPD Collaboration). Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. 28 May 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.08317>.
- [2] I. Kisel, EPJ Web of Conferences **108**, 01006 (2016). <https://doi.org/10.1051/epjconf/201610801006>.

- [3] V. Akishina, KFParticle meeting. 13 Oct. 2023. <https://indico.gsi.de/event/18341/>
- [4] R. Fruhwirth, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A262**, 444 (1987). [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90887-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90887-4).
- [5] E. Lund, L. Bugge, I. Gavrilenko, A. Strandlie, Journal of Instrumentation **4**, P04001 (2009). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/4/04/P04001>.
- [6] S. Gorbunov, I. Kisel, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. **A559**, 148 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.11.133>.
- [7] В. Ф. Андреев, Краткие сообщения по физике ФИАН **50**(12), 22 (2023). <https://doi.org/10.3103/S1068335623120035>.
- [8] Z. Igamkulov, M. Cruceru, A. B. Kurepin, et al., Phys. Part. Nucl. Lett. **16**(6), 744 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1547477119060190>.
- [9] SPDroot program. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
- [10] T. Sjostrand, S. Ask, J. R. Christiansen, et al., Computing Physics Communications **191**, 159 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2015.01.024>.

Поступила в редакцию 14 июня 2024 г.

После доработки 14 июля 2024 г.

Принята к публикации 15 июля 2024 г.