

УДК 539.12, 539.1.08

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРВИЧНОЙ ВЕРШИНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ДЛЯ SPD ЭКСПЕРИМЕНТА

В. Ф. Андреев

В статье приводится сравнение различных алгоритмов реконструкции первичной вершины взаимодействий применительно к геометрии трековой системы проектируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА, строящемся в Дубне.

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

Введение. Основной целью планируемого SPD эксперимента на коллайдере НИКА в Дубне является изучение спин-зависимых структурных функций нуклонов и других спиновых эффектов в протон-протонных и дейтрон-дейтронных взаимодействиях с поляризованными и неполяризованными пучками частиц [1]. Определение характеристик исследуемых событий с наилучшей точностью является одним из основных требований, предъявляемым к детекторам SPD эксперимента. Одной из таких важнейших характеристик исследуемых событий является первичная вершина взаимодействий.

В данной работе проведено сравнение нескольких алгоритмов реконструкции первичной вершины взаимодействий, используемых в экспериментах по физике высоких энергий, применительно к трековой системе SPD эксперимента. Трековая система SPD эксперимента, подробное описание которой приведено в [1], состоит из 2-х основных элементов: вершинного кремниевого детектора и самого трекового детектора, состоящего из так называемых соломенных трубочек (straw-tube detector). Так как параметры вершинного детектора вносят основной вклад в точность определения вершины первичного взаимодействия, то на этапе проектирования SPD эксперимента рассматриваются две возможные конфигурации данного детектора, которые также были исследованы в данной работе:

– вся чувствительная часть кремниевого детектора состоит из 5-ти слоев двухсторонних микростриповых детекторов (DSSD) толщиной в 300 мкм и с расстоянием между

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: andreevv@mail.cern.ch.

стрипами в 95 мкм для p^+ слоя и 281.5 мкм для n^+ слоя;

– ближайšie к точке взаимодействия три чувствительных слоя состоят из пиксельных детекторов (MAPS) толщиной 50 мкм и размером пикселя 29×27 мкм, а остальные два внешних слоя будут состоять из двухсторонних микростриповых детекторов.

Алгоритмы реконструкции первичной вершины взаимодействий. Программу реконструкции первичной вершины взаимодействий в общем виде можно разделить на две основные части: нахождение кандидатов первичной вершины взаимодействий и процедуру фита этих кандидатов с использованием уже известных параметров треков в событии. Задача фитирования первичной вершины при данном наборе треков состоит в определении наилучшей оценки координат вершины и ее ковариационной матрицы.

Все обсуждаемые здесь алгоритмы фитирования первичной вершины взаимодействий основаны на фильтре Калмана [2], который является рекурсивным алгоритмом, состоящим из последовательности четко определенных шагов. Если начальное значение вершины не определено, например, из профиля точки взаимодействий, то первичное грубое приближение, называемое точкой линеаризации, вычисляется с использованием определенных алгоритмов, и которые могут отличаться в различных экспериментах. Далее применяется стандартная итерационная процедура. Сначала параметры трека оцениваются в окрестностях этой точки и проводится линеаризация измерений. Затем параметры вершины взаимодействий оцениваются методом последовательного уточнения при добавлении одного трека за другим. Для каждой новой итерации вершина, оцененная на предыдущей итерации, используется как точка линеаризации. В конце процедуры фитирования вершины, если требуется, уточняются импульс и полная ковариационная матрица треков, участвующих в реконструкции вершины взаимодействия.

Наиболее часто используемый алгоритм для восстановления вершин – это классический алгоритм фильтра Калмана (Kalman Vertex Filter (KVF)) [3]. Данный алгоритм математически эквивалентен минимизации методом наименьших квадратов, который является оптимальной оценкой в случае, когда модель линейна и случайный шум имеет гауссовское распределение, а также нет выпадающих измерений (в нашем случае треков, не связанных с данной вершиной). Так как этот алгоритм использует все треки в событии, то он достаточно чувствителен к наличию треков от вторичных взаимодействий или распадов короткоживущих частиц, которые могут приводить к смещению в оценке параметров первичной вершины взаимодействий.

Усеченный фильтр Калмана (Trimmed Kalman Filter (TVF)) [4] представляет собой естественное расширение классического фильтра Калмана, при котором треки, несовме-

стимые с данной вершиной, поочередно удаляются из процесса реконструкции вершины. Первоначально все треки фитируются в вершину и далее трек, который наименее совместим с данной вершиной удаляется из процедуры фита и фитирование вершины повторяется вновь. Совместимость трека с вершиной определяется нормализованным расстоянием трека от вершины χ^2 с учетом ковариационных матриц трека и вершины согласно выражению (1):

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

где $\Delta\vec{r}$ – вектор минимального расстояния трека до вершины, C_{track} и C_{PV} – ковариационные матрицы трека и первичной вершины взаимодействий. Эта процедура повторяется до тех пор, пока не останется некоторое минимальное число связанных с данной вершиной треков или все треки будут корректно связаны с вершиной.

Адаптивный вершинный фильтр (Adaptive Vertex Filter (AVF)) представляет собой еще один алгоритм, который используется для фитирования первичной вершины взаимодействий в коллаборациях CMS [5] и ATLAS [6] на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН. Это итерационный алгоритм, в котором вес трека является переменной величиной и определяется согласно его нормализованному расстоянию χ^2 до вершины по формуле (2):

$$w(\chi^2) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\chi^2 - \chi_{\text{cutoff}}^2}{2T}\right)}, \quad (2)$$

где χ_{cutoff}^2 – расстояние, при котором вес трека равен 0.5, T – глобальная температура, определяющая скорость изменения веса трека в зависимости от χ^2 (рис. 1). Чтобы алгоритм не попал в локальный минимум, применяется специальная процедура (annealing), при которой, начиная с определенной величины, температура в формуле веса для трека уменьшается при каждой итерации согласно определенной схеме до тех пор, пока не достигнет значения, равного единице.

Эти три алгоритма (KVF, AVF, TVF) для нахождения первичного грубого приближения вершины взаимодействия используют специальный алгоритм FSMW (Fraction-of-Sample Mode with Weights-estimator) [7]. В данном алгоритме, на первом этапе формируется набор точек, которые определяются как точка в пространстве, для которой расстояние между двумя треками является минимальным и данной точке присваивается определенный вес, а затем этот набор пространственных точек используется в процедуре нахождения грубого приближения вершины.

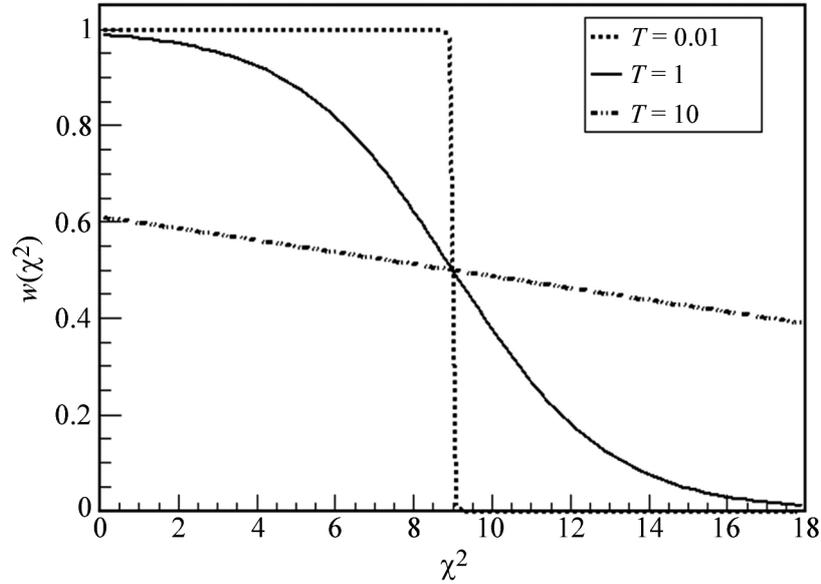


Рис. 1: Пример поведения весовой функции $w(\chi^2)$ трека в зависимости от χ^2 трека для различных значений температуры T и параметра $\chi_{cutoff}^2 = 9$.

Следующий алгоритм, который был рассмотрен в данной работе – это алгоритм, реализованный в специальном пакете программ KFParticle (KFP). Данный пакет был разработан для реконструкции короткоживущих частиц в экспериментах ALICE и CBM [8] и который также планируется использовать в SPD эксперименте. В этом алгоритме для определения первичного грубого приближения вершины на первом этапе используется упрощенный фильтр Калмана, далее определяется вес каждого трека для этого приближения вершины с последующей кластеризацией треков вокруг трека с максимальным весом.

Последний из рассмотренных алгоритмов – это алгоритм, используемый в настоящее время в SPD эксперименте для реконструкции первичной вершины взаимодействий. Процедура реконструкции в данном SPD-алгоритме, как и в предыдущем KFP-алгоритме, осуществляется по стандартной методике: оценка первоначального приближения вершины и последующий итерационный фит вершины с удалением из процедуры треков, которые отклоняются от данной вершины более некоторого порогового значения χ_{cut}^2 . За основу процедуры фитирования вершины в SPD-алгоритме взята процедура, реализованная в CBM эксперименте [8]. Для оценки первичного грубого приближения вершины данный алгоритм вначале определяет положение точки в пространстве, для которой расстояние между треком и первичным пучком является минимальным, при-

сваивая каждому треку определенный вес, и далее используется метод кластеризации треков вокруг трека с максимальным весом.

Моделирование Монте-Карло событий. В качестве входных данных во всех исследуемых алгоритмах используются параметры треков, полученные после процедуры фитирования в пакете SPDroot [9], который был разработан для описания геометрии и моделирования отклика различных детекторов SPD эксперимента. Так как алгоритмы KVF, TVF и AVF реализованы в отдельном пакете программ реконструкции вершин RAVE (Reconstruction in an Abstract, Versatile Environment) [10], то был написан специальный интерфейс, позволяющий использовать параметры треков из SPDroot пакета также и в программе RAVE.

Для сравнения различных алгоритмов реконструкции были смоделированы следующие три набора Монте-Карло событий с использованием генератора частиц и программы моделирования событий PYTHIA 6 [11]:

- набор из 8-ми заряженных мюонов с импульсом 1 ГэВ/с, равномерно распределенных по азимутальному и полярному углу;
- так называемые Minimum Bias (MB) события, включающие в себя дифракционные и неупругие взаимодействия;
- глубоконеупругие события (DIS) с рождением открытого чарма (D^0 -мезонов).

Здесь надо отметить, что рассматриваемые алгоритмы используют как различные параметры для представления треков, так и различные алгоритмы для нахождения кандидатов первичной вершины взаимодействий. Также необходимо учесть, что одни алгоритмы используются при постоянном магнитном поле, а другие при неоднородной конфигурации магнитного поля и, поэтому, для корректного сравнения алгоритмов данное исследование было проведено для постоянного магнитного поля в 1 Тесла, направленного вдоль z -оси, совпадающего с направлением сталкивающихся первичных пучков. При моделировании также предполагалось, что первичная вершина взаимодействий находится в точке с координатами: $x = 0.0$ см, $y = 0.0$ см, $z = 0.0$ см.

Далее для определения параметров первичной вершины взаимодействий использовалась следующая последовательная процедура:

- моделирование отклика и получение Монте-Карло (МК) хитов в вершинном и трековом детекторах SPD эксперимента при помощи программы SPDroot;
- определение параметров заряженных треков на основе фильтра Калмана с использованием SPDroot пакета;
- из всего набора полученных треков для последующей реконструкции первичной

вершины отбирались только те треки, которые имели четыре и более МК хита в вершинном детекторе и восемь и более МК хитов в трековом детекторе. Среднее число таких отобранных треков составило: 5.5 для набора из 8-ми мюонов, 5.9 – для Minimum Bias событий и 8.6 – для глубоконеупругих событий с рождением D^0 -мезонов соответственно;

– на конечном этапе этот набор отобранных треков использовался в программах реконструкции первичной вершины взаимодействий.

В проведенном исследовании также были использованы следующие параметры для адаптивного алгоритма (AVF): $\chi_{\text{cutoff}}^2 = 9.0$, начальная температура $T = 256$ и коэффициент, на который уменьшается температура при каждой последующей итерации был равен 0.25. Для усеченного фильтра Калмана порог вероятности совместимости треков с вершиной взаимодействия составлял 1%, а для KFP и SPD алгоритмов пороговое значение χ_{cut} было равно 3.5. При моделировании также учитывалось, что предполагаемое эффективное разрешение для кремниевого детектора типа DSSD равно $\sigma_\varphi = 11$ мкм для азимутального угла и $\sigma_z = 23$ мкм для z -координаты, а для пиксельного детектора разрешение равно $\sigma_{\varphi,z} = 4$ мкм. При моделировании отклика детекторов на данном этапе использовался так называемый “идеальный” отклик без учета шумов и имитации оцифровки данных.

Результаты реконструкции первичной вершины взаимодействий. Основные свойства сравниваемых алгоритмов по реконструкции первичной вершины взаимодействий суммированы в табл. 1 для двух вариантов геометрии вершинного детектора. В качестве оценки точности реконструкции вершины были использованы результаты фита полученных распределений функцией Гаусса. Пример такого фита приведен на рис. 2 для DSSD опции вершинного детектора и глубоконеупругих событий с рождением D^0 -мезонов. Для оценки так называемых “хвостов” в распределениях использовалась полуширина симметричного интервала, в пределах которого находятся 95% реконструированных событий. В случае распределения Гаусса данный интервал в 95% соответствует удвоенному стандартному отклонению. Ошибка полученных результатов оценивается на уровне $\sim 3\%$.

Из результатов, приведенных в табл. 1, можно сделать следующие основные выводы:

– опция вершинного детектора (MAPS+DSSD), содержащая пиксельные детекторы в своем составе, позволяет получить существенно лучшую точность (~ 2.0 раза) при реконструкции первичной вершины взаимодействий для всех рассмотренных алгоритмов и наборов данных;

Т а б л и ц а 1

Точность реконструкции x - и z -координат первичной вершины взаимодействий и полуширина интервала, содержащего 95% процентов реконструированных событий, для двух вариантов геометрии вершинного детектора и различных алгоритмов реконструкции

		DSSD				MAPS+DSSD			
		σ_x	95%	σ_z	95%	σ_x	95%	σ_z	95%
		[мкм]				[мкм]			
8 мюонов	KVF	58.1	198	54.7	144	29.8	81.5	21.6	63.5
	AVF	55.5	169	52.9	119	28.3	71.7	19.7	47.3
	TKF	54.7	127	52.7	113	27.7	60.6	19.1	42.9
	KFP	55.9	122	52.4	111	28.4	61.2	20.1	45.5
	SPD	55.4	121	52.3	110	28.2	59.8	19.9	44.9
MB	KVF	165	638	150	607	88.8	408	73.3	386
	AVF	116	522	122	446	68.2	325	52.0	266
	TVF	106	320	113	384	54.4	176	46.9	213
	KFP	86.6	220	115	411	50.7	140	51.8	220
	SPD	87.3	246	114	410	48.9	161	51.3	250
DIS (D^0)	KVF	116	412	99.4	365	77.0	398	68.3	352
	AVF	88.8	340	85.1	258	58.6	289	51.2	200
	TVF	74.5	197	76.8	206	44.6	117	39.8	129
	KFP	64.1	149	78.0	202	40.7	108	44.8	153
	SPD	64.6	151	79.5	211	39.6	112	45.1	166

– все алгоритмы демонстрируют одинаковую точность реконструкции первичной вершины для набора из 8-ми мюонов, который можно рассматривать как некий идеальный набор для проверки работоспособности алгоритмов реконструкции вершины;

– также примерно одинаковая точность в реконструкции первичной вершины взаимодействий наблюдается при использовании TVF, KFP и SPD алгоритмов реконструкции вершины;

– применение AVF алгоритма приводит к некоторому ухудшению точности в реконструкции первичной вершины и при этом также возрастает вклад от “хвостов” в распределениях;

– классический алгоритм фильтра Калмана, использующий все треки в событии, как и ожидалось, демонстрирует худшее разрешение по сравнению с другими алгоритмами;

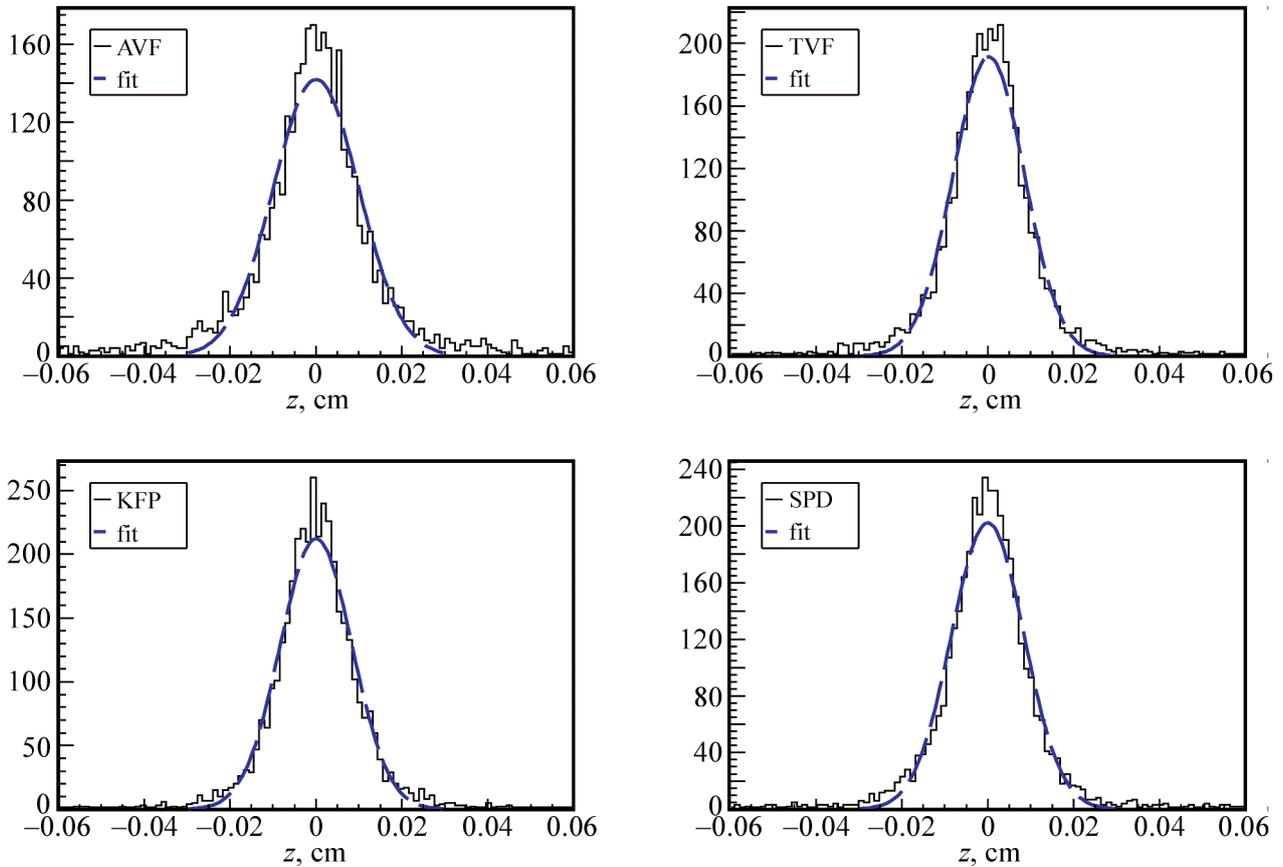


Рис. 2: Распределение z -координаты реконструированной вершины взаимодействий для различных алгоритмов (сплошная линия) и фит полученных распределений функцией Гаусса (штриховая синяя линия).

– среднее время реконструкции первичной вершины для событий с рождением D^0 -мезонов составляет несколько миллисекунд на процессоре Intel Core 7 с частотой 2.8 ГГц (KVF – 1.6 мс, TVF – 1.9 мс, AVF – 4.8 мс, KFP – 0.4 мс, SPD – 3.5 мс), в то время как общее время работы программы, которая также включает в себя фитирование треков, составляет ~ 2 с на событие.

Данное исследование также показало, что используемый в SPD эксперименте алгоритм позволяет получить сопоставимую точность в реконструкции первичной вершины взаимодействий по сравнению с другими рассмотренными алгоритмами.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. M. Abazov, V. Abramov, L. G. Afanasyev, et al., The SPD proto-collaboration. Conceptual design of the Spin Physics Detector. arXiv:2102.00442v1 [hep-ex] 31 Jan 2021.
- [2] R. E. Kalman, Journal of Basic Engineering **D82**, 35 (1960).
- [3] R. Fruhwirth, Nucl. Instrum. and Methods A **262**, 444 (1987). DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(87\)90887-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(87)90887-4).
- [4] T. Speer, K. Prokofiev, R. Fruhwirth, et al., Vertex Fitting in the CMS Tracker. CMS Note 2006-032 (2006).
- [5] S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A. M. Sirunyan, et al., JINST **9**, P10009 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/10/P10009>.
- [6] M. Aaboud, G. Ad, B. Abbott, et al., Eur. Phys. J. C **77**, 332 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4887-5>.
- [7] R. Fruhwirth, W. Waltenberger, Adaptive Vertex Fitting. CMS Note 2007-008 (2007).
- [8] I. Kisel, EPJ Web of Conferences **108**, 01006 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201610801006>.
- [9] SPDroot program. <https://git.jinr.ru/nica/spdroot>.
- [10] W. Waltenberger, W. Mitaroff, F. Moser, Nucl. Instrum. and Methods A **581**(1), 549 (2007). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.048>.
- [11] T. Sjostrand, S. Mrenna, P. Skands, JHEP **05**, 026 (2006). DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1126-6708/206/05/026>.

Поступила в редакцию 14 мая 2021 г.

После доработки 27 августа 2021 г.

Принята к публикации 28 августа 2021 г.