

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1385/2-81

10-80-831

А.У.Абдурахимов, А.С.Буров, В.М.Котов,
М.Г.Мещеряков, Б.Нэргуй, Г.А.Ососков,
В.Н.Пенев, А.Е.Селиванов

О КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ
В СПИРАЛЬНОМ ИЗМЕРИТЕЛЕ

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе рассматриваются результаты исследования нелинейных искажений в спиральном измерителе /СИ/¹ и методы их программной компенсации, приведены результаты сравнения данных обмера на СИ и полуавтоматах ПУОС событий альфа-протон рассеяния, зарегистрированных на снимках с однометровой водородной камеры при $P_\alpha = 8,5$ ГэВ/с.

В процессе измерений на СИ камерных стереофотографий появляется ложная кривизна, ведущая к небольшим, но систематическим искажениям физических параметров, что особенно сказывается при высоких энергиях. Наличие этих искажений отчетливо проявляется при сканировании тестового объекта, представляющего собой прямую линию. Если данные сканирования прямой линии, расположенной вдоль оси X, перевести из отсчетных единиц полярной системы координат (R, θ), в которой ведется сканирование, в декартову XY систему по формулам

$$X = M_R \cdot R \cdot \cos(M_\theta \cdot \theta)$$

$$Y = M_R \cdot R \cdot \sin(M_\theta \cdot \theta)$$

$M_R = 0,001856$ мм, $M_\theta = 2\pi \cdot 64800/$, то, растянув результат перевода по оси Y в 10^3 раз, мы получим S-образную фигуру, изображенную на рис.1а. Величина прогиба до-

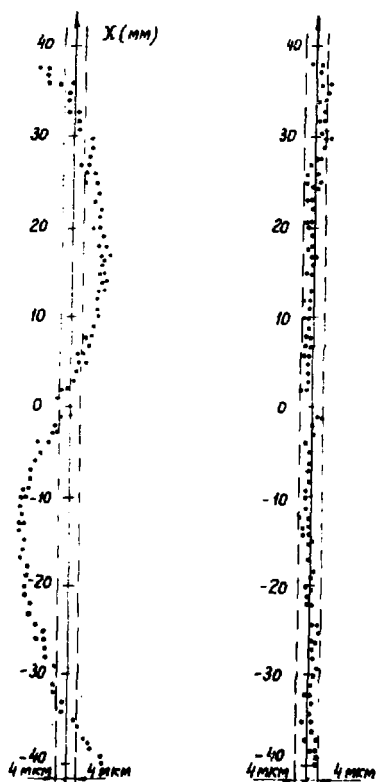


Рис.1. Изображение прямой на экране дисплея после измерения ее на СИ, а/ - до коррекции, б/ - после.

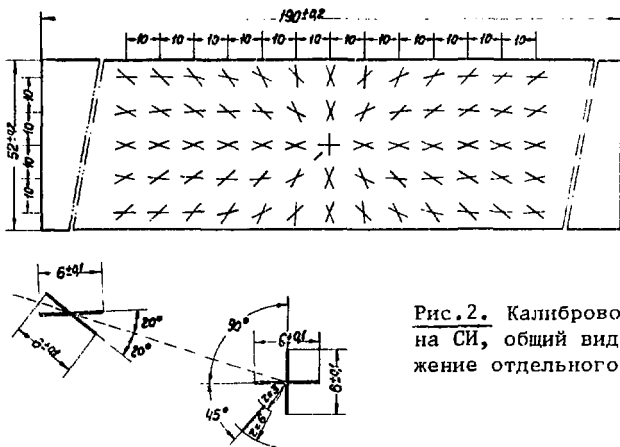


Рис.2. Калибровочная пластина СИ, общий вид и изображение отдельного креста.

стигает 10-15 мкм на длине 50 мм. Этот вид искажений определяется точностью сборки узла спиральной развертки и характерен для аналогичных сканирующих систем со спиральным сканированием /например, Spiral Reader ЦЕРН и SR SAAB^{2/}/. Как будет показано ниже, такие искажения достаточно стабильны во времени и мало зависят от угла разворота прямой по отношению к полюсу спиральной развертки. Компенсация этой ложной кривизны по результатам сканирования данной прямой не вызывает принципиальных трудностей и может быть значительно уменьшена в полярной системе координат простой линейной коррекцией вида

$$\theta = \theta_0 + a \cdot R, \quad /1/$$

где R в мм, а $a \approx 4 \times 10^{-5}$ /рис.16/, но полное ее устранение требует применения более сложных зависимостей.

В связи с этим проведены исследования для поиска возможности уменьшения искажений аппаратным способом. В результате было показано, что величина прогиба линии на рис.1а может быть уменьшена юстировкой конусного зеркала до 5-6 мкм, но при этом усложняется форма кривой, что значительно усложняет, в свою очередь, процедуру программной компенсации. Кроме того, при этом увеличивается зависимость формы кривой от точности центрирования полюса спиральной развертки и тестового объекта, что приводит к нарушению центральной симметрии искажений.

Определение величин искажений и параметров для их компенсации, установление точности и стабильности измерений, а также вычисление коэффициентов преобразований между двумя системами координат СИ - декартовой и полярной, - является целью калибровки системы СИ. Калибровка заключается в измерении в обеих системах координат специальной калибровочной пластины /рис.2 / с 65 крестами, вид и расположение которых известны с высокой степенью точности, и последующего анализа на ЭВМ результатов измерений с целью определения указанных величин - точностных характеристик и коэффициентов преобразований. Правильно вычисленные калибровочные параметры должны, в частности, обеспечивать компенсацию систематических нелинейных искажений.

Ниже описаны процедура калибровки, методы оценки и компенсации нелинейных искажений.

2. ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ

Поскольку в СИ^{1/} используются две системы координат: декартова (X, Y) /для измерений реперных меток, вершин и особых точек на треках/ и полярная (R, θ) /для сканирования треков события/, задача калибровки СИ усложняется. Помимо преобразования между декартовыми системами X, Y координат СИ и X, Y калибровочной пластины КП, требуется также определить значения коэффициентов преобразования

$$(X, Y)_{СИ} \leftrightarrow (R, \theta)_{СИ} .$$

В этой связи калибровочная пластина выполнена так, чтобы можно было вести на ней измерения в обеих системах координат /рис.2/, хотя это и приводит к определенным трудностям, так как крест даже с углом в 40° между его плечами является неудобным объектом для сканирования посредством радиально ориентированной щели.

Процесс калибровочных измерений производится в соответствии со стандартной процедурой измерений на СИ: вначале в качестве реперных крестов оператор измеряет в системе (X, Y) СИ 4 креста с координатами /-60;0/, /0; -20/, /60;0/, /0;20/ в том порядке, в каком они тут перечислены. Далее из центрального креста как из вершины проводится спиральное сканирование всей пластины. Для повышения точности измерений такие циклы калибровки повторяются несколько раз. Сеанс калибровки завершается измерением тестового события.

Обработка всех этих калибровочных измерений производится с помощью программы КАЛИБР, предусматривающей выполнение следующих четырех последовательных этапов обработки:

1. Определение коэффициентов преобразований между прямоугольной системой X, Y координат калибровочной пластины/КП/

и декартовой системой X, Y координат СИ и оценка величины косоугольности последней.

2. Нахождение полярных координат центров крестов, вошедших в зону спирального сканирования, и вычисление среднеквадратичных ошибок в определении положения их центров.

3. Вычисление коэффициентов преобразования между полярной и декартовой системами координат и определение карты остатков по полю сканирования.

4. Проверка качества калибровочных параметров по результатам восстановления с их помощью изображения тестового события, измеренного в процессе калибровки.

2.1. Измерения в прямоугольной XU -системе координат СИ

Чтобы исключить сомнения в точности нанесения крестов на калибровочной пластине и исследовать точность измерений в XU -системе, были проведены измерения калибровочной пластины на СИ, ПУОСах и микроскопе УИМ. Результаты измерения на ПУОСах и УИМе подтвердили паспортные данные фирмы изготовителя "HEIDEN HAIN", гарантирующей точность не хуже 2 мкм для каждого креста. На рис.3 приведена карта остатков в узлах /центрах крестов/ после измерения на ПУОСах. Анализ обмера данных и последующей обработки результатов калибровочных измерений в XU -системе показал наличие небольшой неортогональности XU -системы СИ /рис.4/.

Для оценки величины этой неортогональности измеренные координаты четырех реперных крестов и вершин переводились в систему координат, связанную с центром тяжести результата измерений /так называемая процедура центровки/, после чего вычислялись их средние значения и дисперсии. Далее осуществлялась проверка величин дисперсий по всем крестам. Циклы, в которых был недопустимый отход от среднего хотя бы для одного креста, исключался. Величина предельного разброса для реперных крестов принята равной 10 мкм, для вершины - 8 мкм, что соответствует статистической ошибке в 3 мкм /см. табл.1/ и совпадает с точностью центрирования оператором /см. также ^{1/2}/ стр.101/. Полученные данные о точности измерения положения реперных крестов позволяют ограничиться только их 10 координатами, чтобы потом методом наименьших квадратов вычислить 6 коэффициентов X_0, Y_0, A, B, C, D , аффинного преобразования от $XU_{СИ}$ к $XU_{КП}$, а также коэффициент косоугольности

$$S = \arcsin \frac{AC + BD}{\sqrt{(A^2 + B^2)(C^2 + D^2)}}$$

равный разности углов между осями и ≈ 2 .

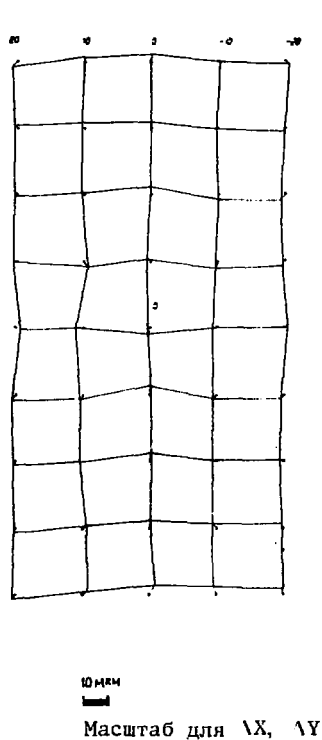


Рис.3. Карта остатков после измерения калибровочной пластины на ПУОСах.

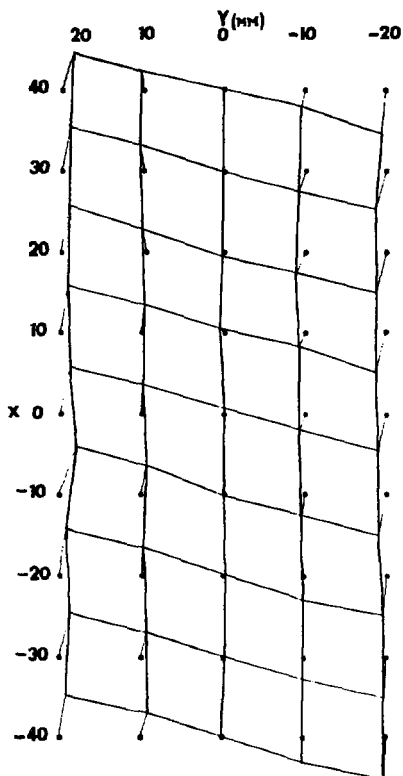


Рис.4. Карта остатков после измерения калибровочной пластины на XY-системе СИ.

2.2. Измерения в полярной системе координат СИ

Сканирование калибровочной пластины в полярной системе координат осуществлялось радиально расположенной щелью размерами 300x35 мкм с очень малым шагом /примерно 240 мкм/. Практически в процессе сканирования щель полностью покрывала всю область сканирования. С каждого плеча крестов на пластине снималось 15-20 отсчетов, которые затем переводились в локальную прямоугольную систему координат, где выделялись две группы точек, относящихся к каждому плечу креста. По точкам каждой группы методом наименьших квадратов строились прямые линии, пересечение которых и определяло центр креста.

Дата калибровки 10.12.79 г.

Таблица 1

Результаты измерений ХУ координат реперных крестов в отсчетных единицах
/1 отсчет - 2 мкм/

№ скана	Крест 1		Крест 2		Крест 3		Крест 4		Крест 5	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	51795	12860	21788	12786	51819	2861	81788	12931	51765	22855
2	51791	12860	21789	12787	51818	2861	81788	12933	51763	22858
3	51792	12863	21794	12786	51822	2857	81792	12930	51766	22859
4	51792	12859	21793	12785	51818	2862	81786	12930	51760	22858
5	51793	12861	21790	12785	51819	2857	81790	12932	51762	22857
6	51791	12858	21792	12787	51820	2859	81788	12933	51764	22856
7	51791	12860	21793	12785	51820	2859	81793	12931	51761	22857
8	51790	12859	21789	12785	51818	2858	81791	12933	51761	22856

Средние значения координат, приведенных в систему ХУ СИ (мм)

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
- 59.9997	-0.1459	0.0567	-19.9990	59.9972	0.1458	-0.0563	19.9965	0.0020	0.0026

Средние значения ошибок (мм)

0.00351	0.00126	0.00065	0.00330	0.00061	0.00258	0.00302	0.00207	0.00324	0.00277
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

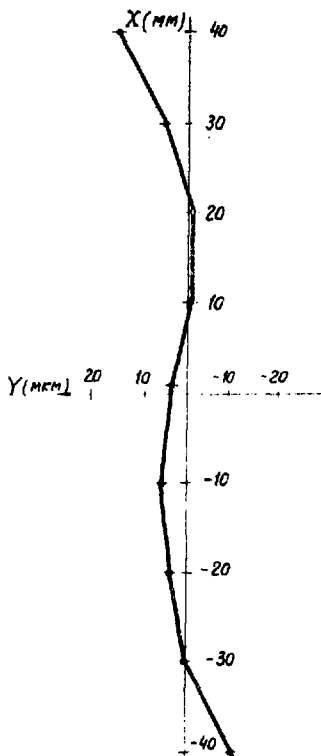


Рис.5. Линия, соединяющая вычисленные центры крестов, расположенных вдоль оси X калибровочной пластины.

В результате экспериментальных оценок было найдено оптимальное значение среднеквадратичного разброса $\sigma_{lim} = 4$ мкм, при превышении которого точка, максимально удаленная от прямой, выбрасывалась. Эта процедура выброса таких "плохих" точек повторялась, пока среднеквадратичный разброс не становился меньше σ_{lim} . Найденные значения 45 пар координат центров крестов с их среднеквадратичными ошибками после перевода в основную систему координат использовались затем на следующем этапе обработки данных сканирования для вычисления параметров перехода из полярной в декартову систему координат с учетом той информации о нелинейных искажениях, которая содержится в данных сканирования.

Поскольку прямая линия при сканировании превращается в некую кривую с максимальной стрелкой прогиба порядка ± 15 мкм, на такую же кривую должны лечь центры просканированных крестов, если на калибровочной пластине они расположены на одной линии. На рис.5 показаны координаты центров крестов, усредненных после 5-кратного сканирования и формального перевода в XY-систему.

Видно, что расположение крестов соответствует изображению просканированной прямой /рис.1/. Количественные оценки по параметру $\alpha = -4,1 \times 10^{-5}$ подтверждают это.

В данном случае не были проведены операции центровки и усреднения координат центров одних и тех же крестов, найденных в разных сканах, так как сканирование производилось из одной и той же точки.

Если каждый скан проводился независимо и полюс развертки совмещался с центральным крестом каждый раз заново, то появлялись различия в положении полюса, определяемые точностью цент-

ровки. При наличии нелинейных искажений, а также из-за разброса начала развертки применение указанных операций усреднения и центровки усложняется - требуется производить операции предварительного совмещения начала отсчета всех сканов. Отметим, что формальное проведение процедур усреднения и центровки без учета разброса полюса развертки и нелинейных искажений приводит к сильному смещению усредненных таким образом координат центров крестов, а также к потере имеющейся в действительности ложной кривизны.

Поэтому в принятой в настоящее время процедуре калибровки сканирование во всех циклах производится из одной точки, а в случае независимого сканирования данные обрабатываются по отдельным циклам и используются результаты только одного из них, параметры которого оказываются наилучшими.

2.3. Обработка данных о положении центров крестов

Если обозначить через M_R и M_θ масштабы по радиусу и углу, а через R_0 , θ_0 , X_0 , Y_0 - начальные значения соответствующих отсчетных систем, то для идеального прибора, не имеющего оптико-механических дисторсий, получилась бы следующая простая связь между полярными и декартовыми координатами:

$$X = M_R (R - R_0) \cdot \cos [M_\theta (\theta - \theta_0)] + X_0,$$

$$Y = M_R (R - R_0) \cdot \sin [M_\theta (\theta - \theta_0)] + Y_0.$$

Для учета дисторсий была введена зависимость угла от радиуса вида

$$\theta = \theta_0 + \alpha R, \quad /2/$$

а также зависимость масштаба по радиусу M_R от θ , учитывающая асимметрию по углу

$$M_R^* = M_R + P_1 \theta + P_2 \theta^3.$$

В результате общее выражение перехода из полярной в прямоугольную систему координат приобретает вид:

$$X = (M_R + P_1 \theta + P_2 \theta^3) (R - R_0) \cdot \cos (\theta - \theta_0 - \alpha R) + X_0, \quad /3/$$

$$Y = (M_R + P_1 \theta + P_2 \theta^3) (R - R_0) \cdot \sin (\theta - \theta_0 - \alpha R) + Y_0.$$

Масштаб по углу M_θ был фиксированной величиной и вычислялся заранее как $2\pi / 64800$ / 64800 - максимальное значение отсчетного устройства по углу/. Остальные 8 параметров определялись подгонкой с помощью минимизации в программе FUMILI функ-

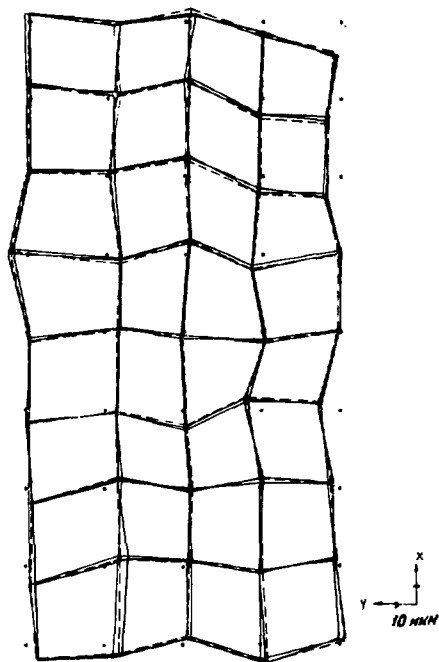


Рис.6. Карты остатков, полученные по трем последовательным циклам сканирования калибровочной пластины.



Рис.7. Тестовая прямая после коррекции программой КАЛИБР.

ционала ϕ , образованного суммированием квадратов невязок правой и левой части /3/ по результатам измерений 45 крестов в полярной и декартовой системах координат.

При подгонке особое значение имело корректное вычисление начальных, стартовых величин параметров.

Прежде всего это относится к величине параметра α , имеющего очень сильное влияние на искажения в центральной зоне /для

сравнения см. '2' /. Однако даже при аккуратной процедуре учета начальных величин параметров и получения высокой точности и повторяемости отсчетов координат на плечах крестов максимальные величины остатков составляют 15-20 мкм по полю сканирования /рис.6/. Эти остатки, характеризующие точность совмещения в программе калибровки двух систем координат - полярной и декартовой, могут быть использованы в дальнейшем в программе фильтрации для учета локальных искажений с помощью линейной интерполяции по значениям остатков в четырех узлах, ближайших к данной точке трека исследуемого события /см. работу '2' /.

Применение 8 калибровочных параметров для преобразования данных сканирования тестовой прямой линии в декартову систему XY улучшило вид прямой /рис.7/, однако не устранило искажения полностью.

Обсчет по программе ГЕОКИН событий, обработанных с использованием полученных калибровочных параметров, показал, что замеченное ранее систематическое занижение величин импульсов вторичных треков, составившее в среднем 2,2% от соответствующих значений, полученных при измерениях на ПУОСах, хотя и осталось после введения новой параметризации, но стало наблюдаться лишь для импульсов $P \cdot 4$ ГэВ/с и составляло в среднем не более 1%.

Отметим, что ни карта остатков, ни косоугольность, вычисленные в программе калибровки, не использовались при обсчете, так как их ввод не улучшал физических результатов СИ с точки зрения их близости к данным, полученным при измерениях на ПУОСах.

2.4. Предварительная коррекция ложной кривизны

Необходимость полной компенсации искажений и уменьшение остаточной кривизны до величин, соответствующих радиусу в 4-6 км в пространстве камеры, заставила искать новые способы коррекции искажений. Детальный анализ результатов обсчета как тестовых, так и реальных событий показал, что основные коэффициенты преобразований: R_0 , θ_0 , X_0 , Y_0 и M_R вычислялись программой калибровки достаточно точно и, более того, в процессе этих исследований их значения были доведены до величин в несколько отсчетных единиц: $R_0 = X_0 = Y_0 = 3-5$ мкм, $\theta_0 = 1,0$ мрад, $M_R = 0,9995$. Кроме того, эти параметры калибровки оказались стабильными во времени. Было проведено тщательное исследование временных и температурных зависимостей указанных выше параметров. Результаты обсчета одних и тех же данных измерения, проведенного 31.03.80 г. с параметрами калибровок от 31.03.80 и 03.12.79, практически совпали. В табл.2а приведены

Таблица 2а

Параметры калибровки от 31.03 80 г.

$R_0 = 0,44 \times 10^{-3} \pm 1,8 \times 10^{-3}$ мм;	$M_R = 0,999520 \pm 4,5 \times 10^{-5}$;
$\Theta_0 = 1,0 \times 10^{-3} \pm 6,7 \times 10^{-5}$ рад;	$\alpha = -3,64 \times 10^{-5} \pm 1,9 \times 10^{-6}$;
$X_0 = 6,4 \times 10^{-3} \pm 5,9 \times 10^{-4}$ мм;	$P_1 = 1,52 \times 10^{-4} \pm 6,1 \times 10^{-5}$;
$Y_0 = -9,6 \times 10^{-3} \pm 5,5 \times 10^{-4}$ мм;	$P_2 = -2,63 \times 10^{-5} \pm 7,9 \times 10^{-6}$;

СИ - ПУОС

Пучковые треки (124 трека)		Вторичные треки (318 треков)	
среднее	разброс	среднее	разброс
P (Мэв/с) 38	± 88	-6	± 87
λ , рад. $-0,9 \times 10^{-3}$	$\pm 2,0 \times 10^{-3}$	$-0,09 \times 10^{-3}$	$\pm 3,4 \times 10^{-3}$
φ , рад. $0,2 \times 10^{-3}$	$\pm 0,4 \times 10^{-3}$	$0,05 \times 10^{-3}$	$\pm 1,7 \times 10^{-3}$

Таблица 2б

Параметры калибровки от 03.12.79 г.

$R_0 = 2,0 \times 10^{-3} \pm 9,5 \times 10^{-4}$ мм;	$M_R = 0,999495 \pm 4,0 \times 10^{-5}$;
$\Theta_0 = 1,1 \times 10^{-3} \pm 6,9 \times 10^{-5}$ рад.;	$\alpha = -3,95 \times 10^{-5} \pm 1,9 \times 10^{-6}$;
$X_0 = 5 \times 10^{-3} \pm 5,6 \times 10^{-4}$ мм;	$P_1 = 1,9 \times 10^{-4} \pm 5,7 \times 10^{-5}$;
$Y_0 = 4 \times 10^{-3} \pm 5,6 \times 10^{-4}$ мм;	$P_2 = -2,9 \times 10^{-5} \pm 7,1 \times 10^{-6}$;

СИ - ПУОС

Пучковые треки (134 трека)		Вторичные треки (323 трека)	
среднее	разброс	среднее	разброс
P (Мэв/с) 32	± 90	-4	± 78
λ , рад. $-0,8 \times 10^{-3}$	$\pm 2,1 \times 10^{-3}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$\pm 3,4 \times 10^{-3}$
φ , рад. $0,08 \times 10^{-3}$	$\pm 0,4 \times 10^{-3}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$\pm 1,7 \times 10^{-3}$

результаты сравнения измерений на ПУОСах и на СИ с калибровкой от 31.03.80 г., а в табл.26 - с калибровкой от 03.12.79 г.; в этих же таблицах приведены значения параметров калибровок. Заметим, что в обоих случаях систематическое искажение параметров треков событий осталось на том же уровне.

Таким образом, хотя получаемые в программе калибровки параметры и позволяют осуществлять переход из полярной в декартову систему координат СИ, однако не дают полной компенсации нелинейных искажений. Поэтому была предложена методика предварительной коррекции искажений, в которой используется информация о ложной кривизне, получаемая путем сканирования тестового события, представляющего собой прямую линию. В этом случае значение параметра α , характеризующего ложную кривизну, может быть вычислено непосредственно по данным сканирования прямой, практически без корреляции с другими параметрами перехода. Такой прямой способ вычисления этого параметра, используемого для компенсации ложной кривизны, весьма удобен также и потому, что можно перейти к табличному заданию функции $\theta = \theta_0 + \alpha R$ и корректировать кривизну еще на входе в систему, в процессе сбора и накопления данных сканирования в оперативной памяти управляющей ЭВМ. В этом случае коррекция производится простым вычитанием табличных поправок в отсчетных единицах угловой координаты и может быть представлена как некоторая "программная" линза для коррекции искажений. Успеху такой простой процедуры коррекции способствовало то, что, как было установлено в процессе исследований, искажения, вызывающие ложную кривизну, имеют приблизительно центрально-симметричный вид. В табл.3 приведены значения параметра в выражении /1/, найденные для различных значений углов θ_0 поворота прямой вокруг полюса сканирования.

Видно, что в пределах ошибок величина параметра не зависит от угла. Это значительно упрощает не только процедуру коррекции, но и вычисление таблицы поправок. Наличие асимметрии хотя и усложняет коррекцию, но не вносит никаких принципиальных трудностей в проведение предварительной коррекции. Более того, разница в величинах параметра для разных углов поворота прямой может быть использована, особенно при наличии в системе обратной связи и выдачи данных сканирования на экран дисплея, для юстировки оптической системы СИ. Для проверки предельных возможностей коррекции кривизны была проведена компенсация искажений в плоскости (R, θ) полиномами от R высокой степени 5 по данным сканирования тестовой прямой. Наилучшее ее описание получено при степенях полиномов $11 \div 13$. На рис.8б показана разница между данными сканирования тестовой прямой и их аппроксимации полиномом 13 степени, проведенным по этому методу χ^2 подгонки равно 0,98%. Как видно из рисунка, систематические

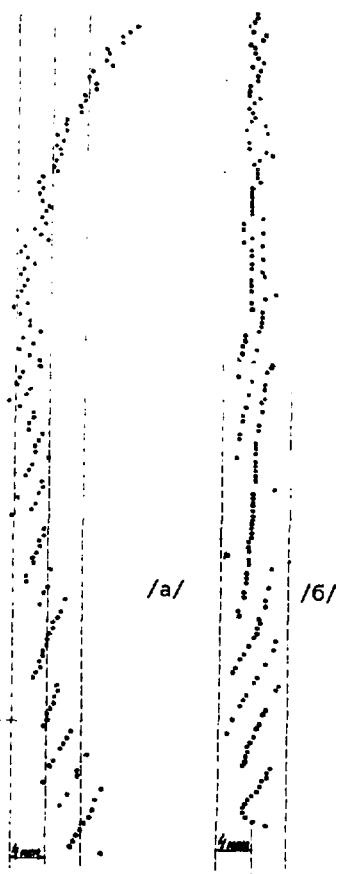


Рис.8. Тестовая прямая без коррекции /а/ и с коррекцией по программе POLFIT /б/.



Рис.9. Данные сканирования тестовой прямой с предварительной коррекцией по таблице.

искажения устраняются полностью. Все точки расположены в полосе ± 4 мкм. Разброс их демонстрирует измерительные погрешности прибора. Здесь же /рис.8а/ приведена тестовая прямая до введения поправок. Для сравнения на рис.9 дано изображение прямой после предварительной коррекции табличным способом и линейной аппроксимацией между витками спирали. Видно, что результаты сравнимы с представленными на рис.8б.

Таблица 3

Угол	0	45°	90°	135°	180°
$-\alpha \times 10^{-5}$	4,3	4,3	4,5	4,4	4,3
$\Delta \alpha$	$\pm 0,06$	$\pm 0,06$	$\pm 0,27$	$\pm 0,1$	$\pm 0,05$
$L, \text{мм}$	100	90	80	90	100

Таблица 4

Трек первичной частицы

	<u>ПУОС1 - ПУОС2</u> 307 треков		<u>СИ - ПУОС1</u> 132 трека	
	среднее	разброс	среднее	разброс
$P, \text{МэВ/с}$	-3	± 84	+ 31	± 90
$\lambda, \text{рад.}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$	$-0,8 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-3}$
$\varphi, \text{рад.}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-3}$	$+0,6 \times 10^{-3}$	$0,4 \times 10^{-3}$

Таблица 5

Вторичные треки

	<u>ПУОС1 - ПУОС2</u> 936 треков		<u>СИ - ПУОС1</u> 326 треков	
	среднее	разброс	среднее	разброс
$P, \text{МэВ/с}$	-4	± 55	+ 5	± 70
$\lambda, \text{рад.}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$-0,2 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$
$\varphi, \text{рад.}$	$-0,1 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$

3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СОБЫТИЙ НА СИ И ПУОС

Окончательные оценки качества компенсации ложной кривизны были получены путем сравнения результатов измерений на СИ и на измерительном полуавтомате ПУОС, принятом за эталонный прибор. Сравнение проводилось при помощи программы, подробно описанной в работе /4/. В табл.4 и 5 приведены средние значения и разброс основных физических параметров /импульсов, азимутального угла и угла погружения/, полученные при обработке одних и тех же событий, измеренных на СИ и ПУОСах. При обработке измерений, выполненных на СИ, были учтены все изменения в программах калибровки и фильтрации, введенные для устранения искажений, но без введения предварительной коррекции ложной кривизны.

Из приведенных данных видно, что между величинами углов наклона треков первичных частиц, вычисленных по данным измерений на СИ и ПУОС, наблюдается систематическое различие, достигающее примерно - 0,0008 рад. Видно также, что значение импульсов первичных частиц, полученное по данным измерений на СИ, систематически превышает на ~30 МэВ/с значение, найденное на ПУОСах /табл.4 /.

Для вторичных треков, если рассматривать их все безотносительно от величин импульсов, отклонения значительно меньше /табл.6/ и существенны лишь для частиц с импульсами $P < 4$ ГэВ/с /табл.7/.

Такие остаточные искажения параметров, отвечающие величинам ложной кривизны с радиусом в пространстве камеры порядка 1,0 км, находятся в полном соответствии с результатами восстановления тестовой прямой без применения предварительной компенсации.

В табл.7-9 приведены сравнения результатов обработки тех же событий, что и в табл.4-6, но после предварительного вычитания ложной кривизны. Видно, что различия в значениях импульсов и пространственных углов как первичных, так и вторичных частиц, практически исчезли /радиус ложной кривизны треков в пространстве камеры стал больше 4 км/.

Здесь важно также заметить, что и в случае использования метода предварительной коррекции искажения параметров треков соответствуют величинам остаточной ложной кривизны, вычисленной по данным измерений тестового события. Так, величина остаточной кривизны, вычисленной по тестовому событию, дает значения параметра $\alpha = -1,2 \times 10^{-8}$ на длине 50 мм, что соответствует радиусу ложной кривизны в камере 4 км и находится в соответствии с ошибками в вычислении величины импульсов вторичных частиц событий / $\Delta P = 11$ МэВ для $P < 4$ ГэВ/с/.

Таблица 6

Вторичные треки, СИ-ПУОС

	P < 4 ГэВ/с 265 треков		P > 4 ГэВ/с 51 трек	
	среднее	разброс	среднее	разброс
P, МэВ/с	1	± 48	- 38	± 150

Таблица 7

ПУОС - СИ

	Треки первичных частиц 333 трека		Треки вторичных частиц 874 трека	
	среднее	разброс	среднее	разброс
P, МэВ/с	5,6	± 91	1,9	± 75
λ , рад.	$-0,9 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-3}$
φ , рад.	$0,04 \times 10^{-3}$	$0,6 \times 10^{-3}$	$0,1 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-3}$

Таблица 8

Вторичные треки, ПУОС-ПУОС

	P < 4 ГэВ/с 681 трек		P > 4 ГэВ/с 161 трек	
	среднее	разброс	среднее	разброс
P, МэВ/с	- 3,6	± 74	- 15,3	± 142

Таблица 9

Вторичные треки, СИ-ПУОС

	P < 4 ГэВ/с 596 треков		P > 4 ГэВ/с 113 треков	
	среднее	разброс	среднее	разброс
P, МэВ/с	6,0	± 41	- 11,0	± 142

Таким образом, еженедельный контроль за изменением основных параметров / R_0 , θ_0 , X_0 , Y_0 , M_R / по результатам об-счета данных сканирования калибровочной пластины, а также предварительная компенсация ложной кривизны по результатам измерения тестового события с последующим контролем за оста-точной кривизной по параметру α , позволил полностью контроли-ровать точностные параметры СИ в режиме, необходимом для про-ведения мас-овых измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование описанных в настоящей работе методов измере-ний и обработки данных калибровки СИ привело к существенному уменьшению искажений физических параметров событий, измеренных на СИ. Полученные данные свидетельствуют также в пользу при-менения предварительной коррекции для устранения эффекта лож-ной кривизны в данных сканирования на СИ, позволяющей практи-чески полностью устранить эффекты нелинейных искажений.

Предлагаемая методика позволяет, кроме того, осуществлять достаточно надежный контроль за достоверностью данных сканиро-вания реальных камерных снимков по результатам измерений тесто-вого объекта в процессе калибровки. Дальнейшее уточнение пара-метров программ калибровки и фильтрации по результатам скани-рования на СИ большего статистического материала не должно встретить каких-либо принципиальных затруднений.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность всем сотрудникам сектора спирального измерителя за проделанную работу, В.Г.Иванову, З.Хоффману, Ю.И.Сусову и В.И.Морозу за обсуждения и помощь, В.Е.Комоловой - за помощь в расчетах. Мы признательны также Р.Позе за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов В.М. и др. ОИЯИ, 10-7939, Дубна, 1974.
2. European Spiral Reader Symposium, CERN, 72-16.
3. Гаджоков В., Богданова Н. ОИЯИ, P11-12860, Дубна, 1979.
4. Абдурахимов А.У. и др. ОИЯИ, P11-12694, Дубна, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 декабря 1980 года.