

Н - 957

10-81-450

**НЭРГУЙ
Баасангийн**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
РЕЗУЛЬТАТОВ СПИРАЛЬНОГО СКАНИРОВАНИЯ
СТЕРЕОСНИМКОВ С ТРЕКОВЫХ КАМЕР**

**Специальность: 01.01.10 - математическое обеспечение
вычислительных машин и систем**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Г.А. ОСОСКОВ.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук

И.М. ГРАМЕНИЦКИЙ,

кандидат физико-математических наук

А.В. ГУЛЯЕВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва.
Автореферат разослан " " _____ 1981 года.

Защита диссертации состоится " " _____ 1981 года
в " " час на заседании Специализированного совета
Д047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ, г. Дубна, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

И.В. = З.М. ИВАНЧЕНКО

Актуальность проблемы. Современная физика элементарных частиц исследует все более тонкие физические эффекты и закономерности, происходящие с очень малыми вероятностями. Для их обнаружения необходимо проводить дорогостоящие эксперименты с такими сложными детекторами, как пузырьковые камеры и магнитные спектрометры с фотографической регистрацией актов взаимодействия частиц. При этом получают сотни тысяч и миллионы стереофотографий в год. Обработка подобных высокостатистических экспериментов немислима без автоматизации процессов измерения и анализа полученных данных с помощью ЭВМ.

В Советском Союзе в 70-х годах было впервые разработано устройство "спиральный измеритель" (СИ) для автоматического измерения фоновой информации методом спирального сканирования от вершины события, измеряемой оператором*. Была выпущена партия из 10 "спиральных измерителей", рассчитанных на управление от современной малой ЭВМ "электроника-100". Головной образец был установлен в ОИЯИ, ответственном как за разработку прибора, так и за создание его полного типового математического обеспечения, пригодного для работы во всех физических институтах, решивших использовать СИ. В качестве большой ЭВМ для *off-line* - обработки данных сканирования была выбрана ЭВМ БЭСМ-6, имевшаяся во всех этих физических институтах, объединившихся в коллаборацию пользователей СИ.

На момент создания СИ в ОИЯИ несколько подобных устройств уже находились в эксплуатации в некоторых физических центрах за рубежом, в том числе в Беркли (США) и ЦЕРНе. Однако в силу ряда обстоятельств мы не могли в условиях ОИЯИ использовать их математическое обеспечение в чистом виде. К этим обстоятельствам можно отнести худшее качество снимков (большая зашумленность, меньшая контрастность), более высокую энергию первичных частиц, меньшую разрешающую способность СИ ОИЯИ, наконец, ограничения, налагаемые тем обстоятельством, что математическое обеспечение СИ ОИЯИ должно было стать типовым, пригодным для использования во всех отдельных физических центрах, снабженных только ЭВМ БЭСМ-6. Таким образом, не могли быть использованы ни программы, ни преимущества больших ЭВМ, таких, как СДС-6600 или ICL-1906A. В то же самое время было необходимо выдержать минимальные требования по надежности и скорости работы программ фильтрации и калибров-

* Астахов А.Я. и др. ОИЯИ, Р10-4945, Дубна, 1970.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

БИБЛИОТЕКА

ки *off-line*. Поэтому разработка новых алгоритмов и программ, учитывающих вышеперечисленные требования и особенности, явилась весьма актуальной задачей.

Цель работы - создать прикладное математическое обеспечение для *off-line* - калибровки и фильтрации данных, поступающих со спирального измерителя ОИИИ, достаточно эффективное для обеспечения высоких темпов физических исследований при массовых измерениях стереоснимков. Для этого необходимо было решить следующие проблемы, имеющие самостоятельное значение:

- разработать методику и алгоритмы фильтрации данных спирального сканирования стереоснимков с 1-метровой водородной камеры ЛВЭ применительно к ($d-p$)-эксперименту при импульсе первичных частиц от 8,5 ГэВ/с и выше;

- разработать математическое обеспечение интерактивной системы анализа результатов фильтрации данных спирального сканирования с целью спасения событий, отвергнутых геометрической программой, без повторных измерений;

- разработать алгоритмы компенсации нелинейных искажений СИ программным путем, адаптировать калибровочную программу *SCALP*.

Научная новизна. Создано математическое обеспечение *off-line* обработки данных спирального сканирования, включающее в свой состав программу фильтрации, допускающую ручное измерение отдельных проекций треков события на X-, Y- столах СИ, и программу калибровки СИ с предварительной корректировкой данных калибровочных измерений с помощью оценок параметров ложной кривизны, полученных в результате обработки данных измерения специального тестового объекта.

На базе стандартного математического обеспечения для графической системы ЭВМ СДС-6500 впервые создана интерактивно-диалоговая система анализа результатов измерения с последующим спасением событий, отвергнутых программой геометрической реконструкции.

Предложен и реализован быстрый алгоритм поиска трековых элементов (коротких сегментов треков) методом поворотных гистограмм, дающий значительную экономию памяти ЭВМ и времени счета. Этот алгоритм может найти применение для *on-line*- фильтрации данных сканирования на малой ЭВМ, поскольку алгоритм может быть полностью выполнен с помощью средств целой арифметики: операций сложения, вычитания и сдвига.

Разработана методика предварительной фильтрации данных, дающей примерно 4-кратное сокращение объема исходной информации.

В рамках программы фильтрации автором были разработаны способ распределения памяти ЭВМ, динамическая настройка параметров фильт-

рации в процессе распознавания треков события, а также программные средства получения различных статистических характеристик обрабатываемой информации, необходимые для анализа работы как программы в целом, так и отдельных ее частей. Эти программные средства придают большую гибкость программе при ее настройке в зависимости от конкретных требований и особенностей данных этого эксперимента.

Разработанная методика компенсации ложной кривизны, вносимой СИ в данные в процессе измерений, более экономична с точки зрения памяти ЭВМ по сравнению со способом компенсации с помощью таблицы искажений¹⁷⁷ и более приспособлена для использования другими разработчиками аналогичных измерительных систем на базе СИ.

Реализация. Созданное математическое обеспечение было успешно опробовано в ходе методического эксперимента по обработке материалов, полученных при измерении стереоснимков ($\alpha-p$)-эксперимента при импульсе первичных частиц 8,5 ГэВ/с на СИ, и за последние два года, когда оно было усовершенствовано и модернизировано в ходе методических работ по созданию измерительной системы на базе СИ ОИИИ. В настоящее время разработанное математическое обеспечение входит в состав этой системы как ее неотъемлемая часть.

Практическая ценность. Разработанное автором математическое обеспечение для *off-line*-обработки данных спирального сканирования может быть использовано в качестве типового математического обеспечения измерительных систем на базе аналогичных СИ, которые находятся на стадии разработки в других физических центрах СССР, без особых переделок, позволяя тем самым ускорить процесс ввода этих систем в эксплуатацию. Кроме того, отдельные разработки и алгоритмы, хотя они предназначены для *off-line*-обработки данных спирального сканирования, могут быть использованы для обработки данных сканирования в *on-line* -режиме.

Объем работы. В диссертации излагаются методика, алгоритмы и программы, которые легли в основу математического обеспечения *off-line*- обработки данных спирального сканирования, созданного автором за последние 7 лет. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 70 наименований.

В первой главе диссертации после краткого обсуждения наиболее распространенных сканирующих устройств и способов измерения стереоснимков с трековых камер рассмотрены особенности распознавания образов в физике высоких энергий и его специфика применительно к фильтрации данных сканирования. Отмечается, что возрастающая сложность обработки результатов современных экспериментов по мере роста энергии первичных частиц требует не только высокой степени автоматизации из-

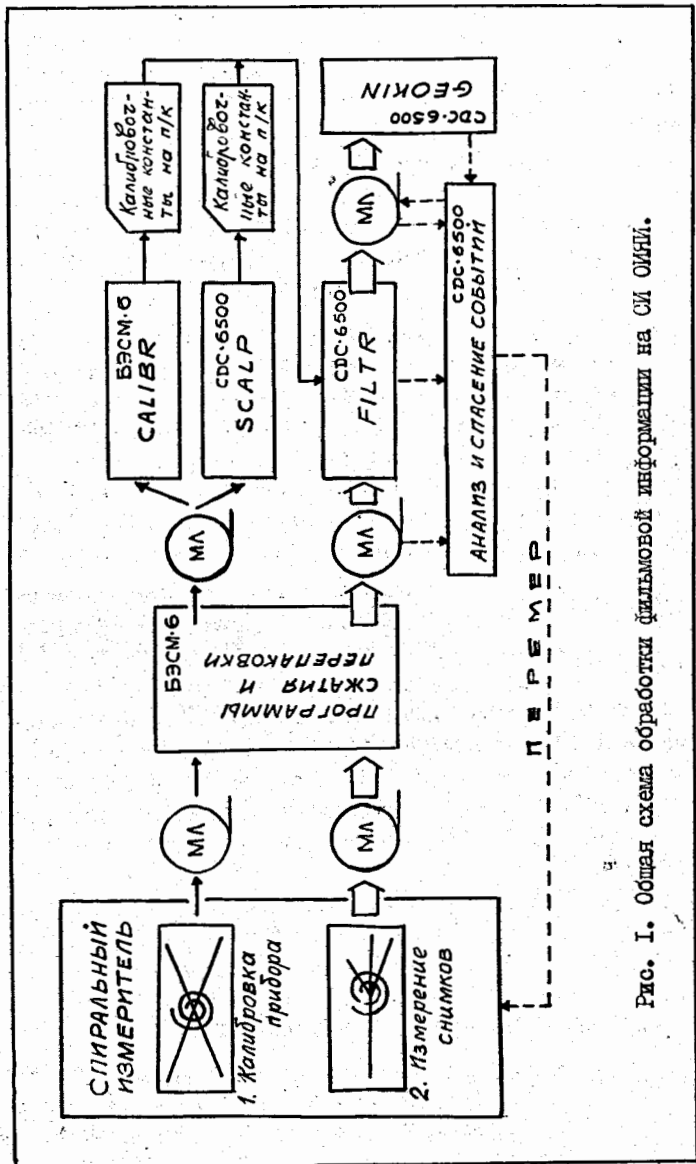


Рис. 1. Общая схема обработки фильмовой информации на СИ ОИНИ.

мерительных систем, но и одновременно их гибкости, т.е. возможности человеческого вмешательства в особо сложных ситуациях. Примером такой сравнительно дешевой, но достаточно производительной и эффективной системы может служить "спиральный измеритель". Рассмотрены принципы осуществления спирального сканирования и приведены сравнительные характеристики известных программ фильтрации данных спирального сканирования.

Рассмотрены основные характеристики СИ ОИНИ, этапы обработки камерных снимков и структура его математического обеспечения (рис. 1).

В конце главы сформулированы выводы, объясняющие необходимость создания специального математического обеспечения СИ ОИНИ для обработки результатов высокоэнергетических экспериментов, о которых уже упоминалось выше. А также рассмотрены основные характеристики созданного математического обеспечения, такие, как надежность, эффективность, адаптируемость и мобильность.

Во второй главе описаны используемые методы фильтрации и структура программы *FILTR*. Для того, чтобы обеспечить достаточную скорость обмена с внешним устройством во время фильтрации все данные предварительно копируются с магнитной ленты на диск.

Далее изложена методика проверки качества как входных, так и выходных данных и рассмотрен вопрос распределения памяти ЭВМ между основными массивами информации.

Одной из наиболее важных функций программы *FILTR* является контроль входных данных, так как это позволяет оперативно обнаружить сбой в работе СИ, предохраняет программу от ошибок, сокращает объем вычислений и, главное, позволяет избежать опасности внесения искажений в выходные физические параметры. В программе предусмотрены три типа проверок:

1. Контроль паспортов событий, позволяющий браковать некачественные измерения на стадии ввода данных.
2. Проверка качества измерений реперных крестов, состоящая в сравнении расстояний между вершиной события и измеренными реперными крестами с соответствующими эталонными расстояниями.
3. Проверка монотонности радиусов и шага спирали, что позволяет обнаруживать кольцеобразные пропуски данных, вызванные сбоями СИ. Также производится некоторая предварительная проверка качества фильтрации (наличие пучковых треков, отсутствие их параллельности оптической базе и т.д.).

Затем рассмотрены особенности основных массивов данных и опера-

ции над ними, в результате чего предложен оптимальный вариант хранения данных в памяти ЭВМ, основанный на идее их размещения в одном массиве без промежутков.

В третьей главе описаны основные алгоритмы распознавания трековых элементов, их прослеживания, получения мастер-точек и метод идентификации треков-кандидатов.

В качестве основной модели трека в программе *FILTR* используется приближенное полярное уравнение окружности следующего вида:

$$\theta = \theta_0 + \alpha \cdot R + \beta / R + \gamma \cdot R^3, \quad (1)$$

где θ_0 — угол, под которым трек выходит из вершины события;

$\alpha = \frac{1}{2Z}$ — половина кривизны окружности с радиусом Z ; а $\gamma = \alpha^3/6$. В процессе фильтрации, точнее, при прослеживании, модель трека меняется от простейшей линейной модели

$$\theta = \theta_0 + \alpha \cdot R \quad (2)$$

до более сложной, включающей коэффициенты β, γ в зависимости от направления прослеживания или кривизны трека.

В параграфе 3.2 рассмотрен быстрый алгоритм реализации метода поворотных гистограмм для распознавания трековых элементов. Формальное представление данных СИ в прямоугольной системе координат (R, θ) дает методу поворотных гистограмм преимущество при поиске трековых элементов, так как при таком представлении точки на треках образуют почти прямые линии с различными наклонами в зависимости от кривизны соответствующих треков (см. рис. 2).

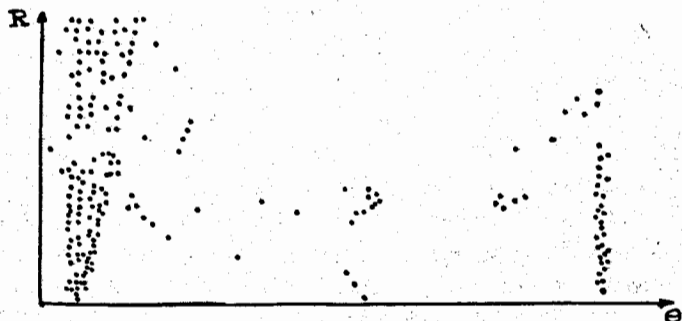


Рис. 2

Функциональная схема быстрого алгоритма достаточно проста и состоит в проектировании всех точек (R_i, θ_i) $i = \overline{1, n}$, принадлежащих области гистограммирования, на прямую $R = R_{min}$ под разными углами α_k ($k = 0, \pm 1, \dots, \pm N$ — номер наклона проектирования) и в пересортировке результатов проектирования для построения гистограмм, соответствующих полосам одинаковой ширины $\Delta \theta$.

Показано, что процедура проектирования точки (R_i, θ_i) j -й скан-линии осуществляется последовательным переходом от одного значения к другому путем прибавления константы $j \frac{\Delta \theta}{N}$ к значению предыдущей проекции (j — номер скан-линии, $j = 1, 2, \dots, 10$).

По окончании процесса гистограммирования с k -м наклоном все значения гистограммы сравниваются с некоторым пороговым значением, и в случае превышения порога формируется соответствующий элемент трека. Поскольку гистограммирование с постоянным порогом может дать отрицательный результат при наличии реального трека, особенно в случае поиска вблизи опорных точек, то предусмотрено динамическое изменение порога P в пределах $[P_{min}, P_{max}]$, выбираемых в зависимости от места поиска.

Применение описанного алгоритма позволило в полтора раза повысить точность гистограммирования и в то же время сократить рабочую память для хранения массива гистограмм с 4000 слов до 360 слов ЭВМ, почти в 3 раза ускорить процесс поиска. Кроме этого, использование косвенной адресации ячеек гистограммы позволило осуществлять гистограммирование с шириной интервала, равной $0,5^\circ$, в отдельных участках области гистограммирования (в которых в один карман гистограммы попадают точки сразу двух близких треков).

Далее в главе 3 изложен метод нахождения треков, которые не поддаются обнаружению обычным путем (например, треки, входящие в "узкую" пару). Метод основан на переносе полуса спиральной развертки в опорную точку $(X_{опт}, Y_{опт})$, измеренную оператором на искомом треке.

В параграфе 3.2.2 описана методика измерения отдельных проекций треков события на X -, Y -столах СИ в режиме ручного сопровождения в случаях, когда автоматическое их измерение или распознавание невозможно (слабая контрастность, большая кривизна, полное наложение следов). Приведены также результаты исследования эффективности измерения опорных точек и отдельных проекций треков на X -, Y -столах СИ.

В параграфе 3.3 рассмотрена задача прослеживания найденных трековых элементов. Прослеживание осуществляется подгонкой по найденным точкам трека кривой вида (1) методом наименьших квадратов с последующим пред-

сказанием положения точки трека на следующей скан-линии и после нахождения ее в прогнозируемой области - повторной подгонкой, новым прогнозированием и т.д. На каждом этапе выбрасываются точки трека, отстоящие от него более чем на утроенную величину среднеквадратичного отклонения. При прослеживании в качестве меры близости точек была выбрана декартова метрика, в которой, например, расстояние точки (R_i, θ_i) от кривой (I) измеряется по дуге

$$S_i = R_i | \theta_i - \theta_0 - \alpha \cdot R - \beta / R_i - \gamma R_i^3 |$$

Качество предсказания очередной точки трека удалось существенно улучшить за счет использования выдаваемой СИ ОИЯИ информации об окончании каждого оборота спирали.

Размещение координат точек трека в рабочем массиве в порядке, соответствующем номерам скан-линий, существенно облегчило организацию процесса прослеживания и позволило исключить процедуру обратного перерасположения точек трека в убывающем или возрастающем порядке их радиусов в зависимости от направления прослеживания.

Следует отметить важность правильности критериев отсеивания ложных отсчетов и особенно динамического изменения модели в ходе прослеживания трека или при его обрыве. В параграфе 3.4. рассмотрены методы поиска треков вблизи опорных точек.

В конце главы рассмотрена проблема исключения дубликатов трека. На основе исследования влияния различных параметров трека на его качество были сформулированы требования, которым одновременно должен удовлетворять "хороший" трек.

В четвертой главе рассмотрены проблемы анализа и спасения событий, отвергнутых геометрической программой, и методика предварительной фильтрации (префильтрации) данных спирального сканирования.

Даны краткие характеристики терминального устройства ЭВМ СДС-6500 на базе интерактивного графического дисплея "Тектроникс 4012/4014", позволяющего высвечивать до 1023×781 точек и обеспечивающего обратную связь с ЭВМ, которая осуществляется с помощью курсора, выполненного в виде перекрестия, перемещаемого по экрану. Рассмотрены особенности его математического обеспечения, на базе которых создана рассматриваемая система анализа и спасения треков.

Созданная система обеспечивает анализ $10-12$ событий в час и позволяет работать с двумя типами данных:

- с результатами сканирования,
- с результатами фильтрации.

Рассмотрена методика префильтрации данных спирального сканирования. Необходимость в разработке реализующей ее программы для сокращения объема высвечиваемых данных была вызвана малым быстродействием канала связи терминального устройства с ЭВМ СДС-6500. Разработанная методика префильтрации, основанная на отслеживании по методу шпуров, позволяет сократить объем данных спирального сканирования в 4 раза без потери полезной информации (рис. 3,4) и может быть применена для использования в *on-line* - режиме.

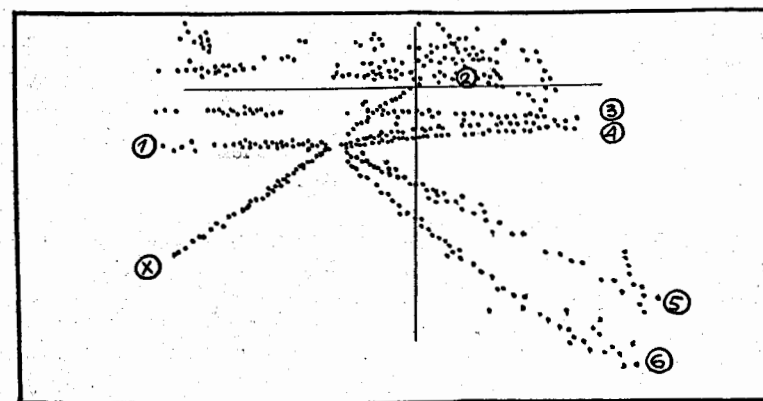


Рис.3. Представление в декартовых координатах. Перекрестье курсора указывает на трек 2. Прямая (X) образована множеством служебных точек θ_{full} , разделяющих витки спирали.

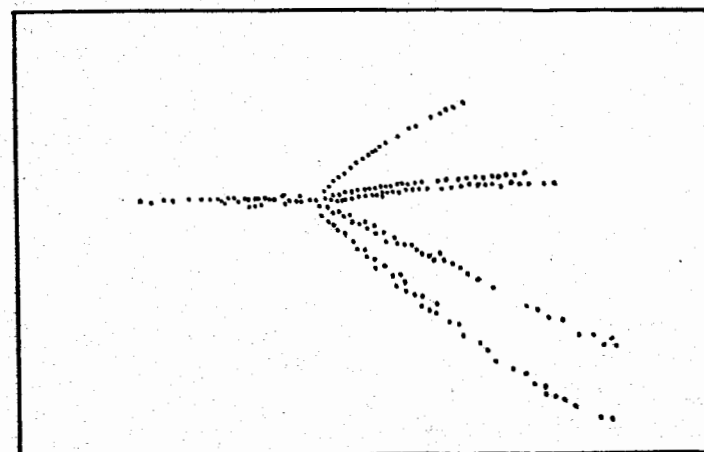


Рис.4. Результаты префильтрации.

В пятой главе диссертации рассмотрена проблема калибровки СИ и описана программа калибровки *SCALP*. Рассмотрена методика определения и учета систематических искажений результатов измерения стереоснимков на СИ.

В процессе измерений на СИ камерных снимков 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, величина прогиба достигает 10-15 мкм на длине 40 мм (см. рис. 5). Исследование ¹⁷⁷ показало, что такие искажения достаточно стабильны во времени и мало зависят от угла разворота прямой по отношению к полюсу спиральной развертки. В итоге предложен простой алгоритм компенсации следующего вида:

$$\bar{\theta}_i = \theta_i - \alpha R_i - \beta / R_i, \quad (5)$$

где (R_i, θ_i) – полярные координаты i -й точки на прямой или треке,
 $(R_i, \bar{\theta}_i)$ – новые значения координаты после компенсации,
 α, β – параметры, которые находятся путем аппроксимации точек, измеренных на прямой с помощью кривой вида (1) при $\gamma = 0$.

Компенсация с помощью формулы (5) позволяет свести ложную кривизну к пренебрежимо малым значениям. Как следует из рис. 5, радиус лож-

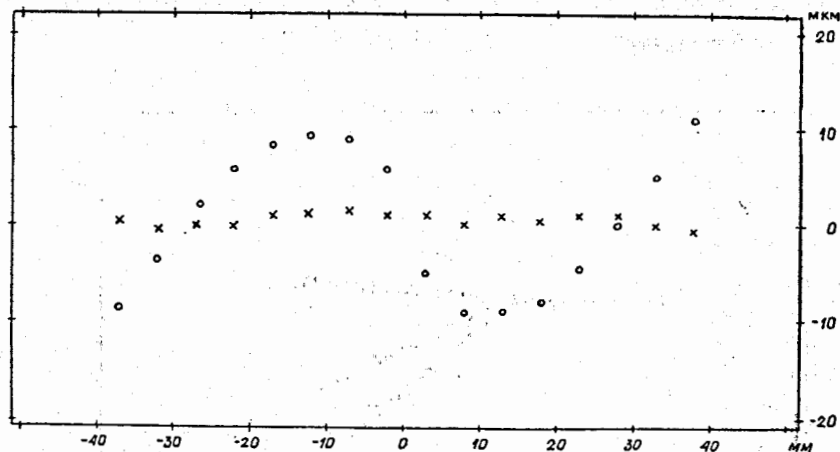


Рис. 5

○ – мастер – точки до компенсации,
 × – мастер – точки после применения компенсации.

ной кривизны треков в пространстве камеры стал больше 4 км (вместо 1,5 км).

Программа *SCALP* была адаптирована для обработки данных калибровочных измерений СИ с учетом новых формул параметризации преобразований между системами координат. Кроме того, в конце главы 5 описаны все изменения, введенные в программу *SCALP* для учета особенностей СИ ОИЯИ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации. Основным результатом диссертации является разработка и создание математического обеспечения *off-line*-фильтрации и калибровки для "Спирального измерителя" ОИЯИ, а также ввод этой системы в эксплуатацию при обработке результатов массового измерения стереоснимков с 1-метровой пузырьковой камеры ОИЯИ.

В процессе создания математического обеспечения автором был решен ряд проблем, имеющих самостоятельное значение:

1. На основе метода поворотного гистограммирования разработан быстрый алгоритм распознавания трековых элементов, дающий большую экономию машинного времени и памяти по сравнению с традиционной реализацией этого метода.
2. Разработана интерактивно-диалоговая система анализа результатов фильтрации с последующим спасением событий, отвергнутых геометрической программой.
3. Исследована возможность предварительного сокращения данных спирального сканирования и разработана программа префильтрации, дающая примерно 4-кратное сокращение исходного материала.
4. Предложен компенсирующий алгоритм, создана программа определения и учета величины систематического искажения типа ложной кривизны измеренных треков.
5. На основе созданной программы проведено экспериментальное исследование точности измерения сканирующим автоматом СИ тестового объекта – прямой линии. Результаты исследования определили характер искажений, программа включена в состав калибровочной программы *SCALP* для предварительного определения величины искажения и его компенсации.
6. Найден оптимальный вариант хранения основных массивов данных с учетом минимизации операций над ними в процессе фильтрации и разработан соответствующий способ распределения памяти ЭВМ между данными, позволяющий значительно сократить объем рабочего массива.

ва и эффективно управлять его длиной в зависимости от объема обрабатываемой информации.

7. Кроме того, исследована эффективность ручного измерения отдельных проекций треков на X-, Y- столах СИ, разработана соответствующая программа их обработки, которая включена в состав программы фильтрации.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались на Международном совещании по программированию и математическим методам решения физических задач в Дубне (сентябрь 1978 г.) /3,4/, на Всесоюзном совещании по автоматизации научных исследований в ядерной физике в Алма-Ате (октябрь 1978 г.) /5/ и научных семинарах Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ /1,2,6,7/.

Литература

1. Нергуй Б., Ососков Г.А. Инструкция по использованию программы *FILTR* на СДС-6200. Депонированная публикация ОИЯИ, БИ-Ю-8964, Дубна, 1976.
2. Нергуй Б., Ососков Г.А. Сегментация программы *FILTR*. Депонированная публикация ОИЯИ, БИ-Ю-Ю0370, Дубна, 1977.
3. Нергуй Б., Ососков Г.А. Использование стандартного математического обеспечения интерактивного графического терминала СДС-6500 для представления данных спирального сканирования и спасения событий. В кн.: Совещание по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, ДЮ, II-II264, Дубна, 1978, с.460.
4. Аладшвили Б.С., Глаголев В.В., Косарева В.М., Котов В.М., Кулюкина Л.А., Мещеряков М.Г., Нергуй Б., Ососков Г.А., Селиванов А.Е. Методика сравнения результатов измерений двухлучевых событий в α - ρ - эксперименте на спиральном измерителе. В кн.: Совещание по программированию и математическим методам решения физических задач. ОИЯИ, ДЮ, II-II264, Дубна, 1978, с. 277.
5. Косарева З.М., Кулюкина Л.А., Нергуй Б., Ососков Г.А. Алгоритмы фильтрации данных спирального сканирования (α - ρ)-взаимодействий. В кн.: II Всесоюзное совещание по автоматизации научных исследований в ядерной физике. Алма-Ата, 1978, с. 153.
6. Нергуй Б. Быстрый алгоритм нахождения трековых элементов. ОИЯИ, Ю-80-302, Дубна, 1980.
7. Абдурахимов А.У., Буров А.С., Котов В.М., Мещеряков М.Г., Нергуй Б., Ососков Г.А., Пенев В.Н., Селиванов А.Е. О компенсации нелинейных искажений в спиральном измерителе. Сообщение ОИЯИ, Ю-80-831, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
3 июля 1981 года.