

3-181

10-81-606

ЗАКАМСКИЙ
Леонид Леонидович

**СИСТЕМА ОБРАБОТКИ СНИМКОВ
С БОЛЬШИХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР ИФВЭ
НА БАЗЕ СПИРАЛЬНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ**

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

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

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Серпухов).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
кандидат физико-математических наук

П.Ф.ЕРМОЛОВ
А.Ф.ЛУКЬЯНЦЕВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
кандидат физико-математических наук

Е.А.ГРЕБЕНИКОВ
Г.А.ОСОСКОВ

Ведущее научное учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова (Москва).


Автореферат разослан "9" октября 1981 г.

Защита диссертации состоится "12" ноября 1981 г.

в 13.00 часов на заседании специализированного совета Д047.01.04:
при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного
института ядерных исследований (г.Дубна, Московской обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СИЯИ.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат физико-математических наук


З.М.Иванченко

Актуальность проблемы. В семидесятых годах в экспериментах на ускорителях начали применяться большие пузырьковые камеры. Еще во время создания этих камер было известно, что обработка их снимков значительно усложняется по сравнению со снимками классических камер по следующим причинам:

- уменьшился масштаб изображений,
- диапазон размеров пузырьков стал шире,
- уменьшилось отношение сигнал/шум,
- увеличился уровень фона,
- увеличился общий объем информации.

Эти особенности не позволили использовать ранее созданные системы обработки пленочной информации с камер без существенных изменений измерительной (сканирующей) техники и соответствующего математического обеспечения ЭВМ.

Цель работы. Ввод в действие больших пузырьковых камер "Мирабель" и СКАТ^М в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Серпухов) предполагал обработку получаемых снимков на ручных и автоматических устройствах тех типов, что применялись для классических камер. В этой связи перед автором стояла задача создания математического обеспечения, пригодного для обработки снимков камеры СКАТ в ручном и камерн "Мирабель" в ручном и автоматическом режимах на приборе спиральный измеритель (СИ) I/.

Реализация. Общая конфигурация системы в значительной степени была обусловлена требованиями, принятыми в ИФВЭ, в частности, вход и выход определены процедурами просмотра и геометрической реконструкции событий. Основные разработки связаны с фильтрацией треков на снимках камеры "Мирабель", установлением и улучшением точностных характеристик (калибровкой) СИ и просмотрово-измерительных проекторов.

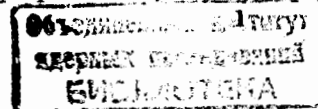
Калибровка проекторов входит в основную задачу, поскольку СИ и проекторы объединены в общую систему.

Научная новизна

1. Исследованы эффекты, возникающие из-за особенностей снимков больших пузырьковых камер, в частности, камеры "Мирабель" при их автоматической обработке на СИ.

2. Выведено общее уравнение изображений треков в полярной системе координат для камер с широкоугольной оптикой. Установлено, что при фитировании соответствующих кривых требуется большее число степеней свободы по сравнению с треками классических камер, что при высокой плотности информации на снимках приводит к созданию большого числа ложных треков (кривые, соответствующие общему уравнению, огибают фоновые точ-

I/ A.G.Frodell. Rev.Sci.Instr., 1965, vol.36, p.1174; Бараба-шев А.З. и др. Препринт ИФВЭ, 71-75, Серпухов, 1971.



ки). Предложен способ преодоления этого противоречия, который состоит в применении математических моделей треков классического типа, но с изменяющимся числом степеней свободы в ходе фильтрации.

3. Введена динамическая настройка в алгоритмах поиска и прослеживания треков.

4. Разработаны способы разделения систематических искажений различной природы, возникающих в ходе преобразования фильмовой информации в цифровую форму, что позволяет моделировать различные варианты настройки приборов и осуществлять эффективную аналитическую коррекцию результатов измерений.

Практическая ценность. Разработана общая структура матобеспечения для СИ с учетом специфики фильмовой информации, измерительно-вычислительной техники и общей организации обработки в ИФВЭ.

На СИ обеспечен режим измерений, в котором оператору прибора предоставлены широкие возможности: разрешен свободный порядок измерения проекций и вершин, предусмотрено использование СИ в режиме измерительного проектора для наиболее сложных случаев, обеспечены избирательность и оперативность браковки.

Обеспечено вычисление статистических величин, характеризующих процесс фильтрации в целом, осуществляется программное хронометрирование относительных затрат времени на работу основных процедур фильтрации. Все это дает возможность эффективной настройки программы.

Разработаны форматы данных, предусматривающие обмен как внутри системы, так и с сопряженными элементами (просмотром и геометрической реконструкцией событий).

СИ с созданным программным обеспечением использовался при обработке двух физических экспериментов:

- в K^p при 32 ГэВ/с на камере "Мирабель",
- в нейтринном на камере СКАТ.

В K^p - эксперименте обработано около 3000 взаимодействий до 6-лучевых вершин включительно, в нейтринном - около половины статистики всего эксперимента.

Программы калибровки явились эффективным инструментом контроля правильности работы приборов и позволили существенно повысить их точность как за счет регулировки (или даже конструктивных изменений), так и за счет аналитической коррекции измерений (данных сканирования). Разработанные автором способы устранения систематических искажений позволили на порядок уменьшить сумму квадратов остаточных отклонений для тестового набора точек на СИ.

Программное обеспечение СИ ИФВЭ не исключает возможности его использования и для классических камер. Например, учет эффектов широко-

угольной оптики в фильтрации лишь расширяет область применения соответствующих алгоритмов, так как аналогичные эффекты и для оптики классических камер имеют место, но не учитываются ввиду их малости. Подобным образом расширенные возможности оператора при измерениях, увеличенный объем обрабатываемой информации, контроль результатов фильтрации на основе данных просмотра и другие отличия от ранее созданных систем не противостоят требованиям, предъявляемым при обработке снимков с классических камер.

Содержание. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации 138 страниц, включая 13 страниц рисунков. Библиография содержит 62 наименования.

Во введении рассматриваются основные технические средства, на базе которых выполнена работа, проанализированы свойства СИ как измерительного прибора и особенности математической обработки получаемой о него информации, формулируется общая постановка задачи.

В первой главе обсуждается общая организация системы /1/, которая имеет конфигурацию, представленную на рис. 1.

Математическое обеспечение СИ подразделяется на две основные группы: *on-line* программы для ЭВМ PDP-9 и *off-line* программы для ЭВМ серии ICL-1900. Принцип разделения функций внутри системы определяется общей концепцией: максимум вычислений выполнять в режиме *off-line*, чтобы освободить управляющую ЭВМ PDP-9 для обеспечения наиболее быстрого и эффективного режима измерений, так как именно измерения определяют скорость обработки в целом.

Все работы по созданию, адаптации, переработке *off-line* программ, являющихся индивидуальными для данной системы, т.е. не входящих в другие системы измерительно-вычислительного комплекса, выполнены непосредственно автором. Личный вклад автора в математическое обеспечение *on-line* является определяющим в разработке общей идеологии режима измерений. Автором также реализованы программы обмена между *on-line* и *off-line* частями.

Особенности снимков, их последовательность на пленке накладывают ряд требований на процесс измерений /2/. Например, при частично перекрытых полях зрения объективов исключен общепринятый жестко заданный порядок обмера проекций и вершин стереокадра. Предложенный порядок измерений свободен по обоим индексам. Разрешена браковка о последующим перемером или без перемера для стереокадра и его частей (проекций и "плоских" вершин). На момент браковки в пределах текущего стереокадра ограничений не накладывается: она может быть произведена перед измерением объекта, в процессе измерения или после. В пределах измерения стереокадра допускается также перемер "плоских" вершин без

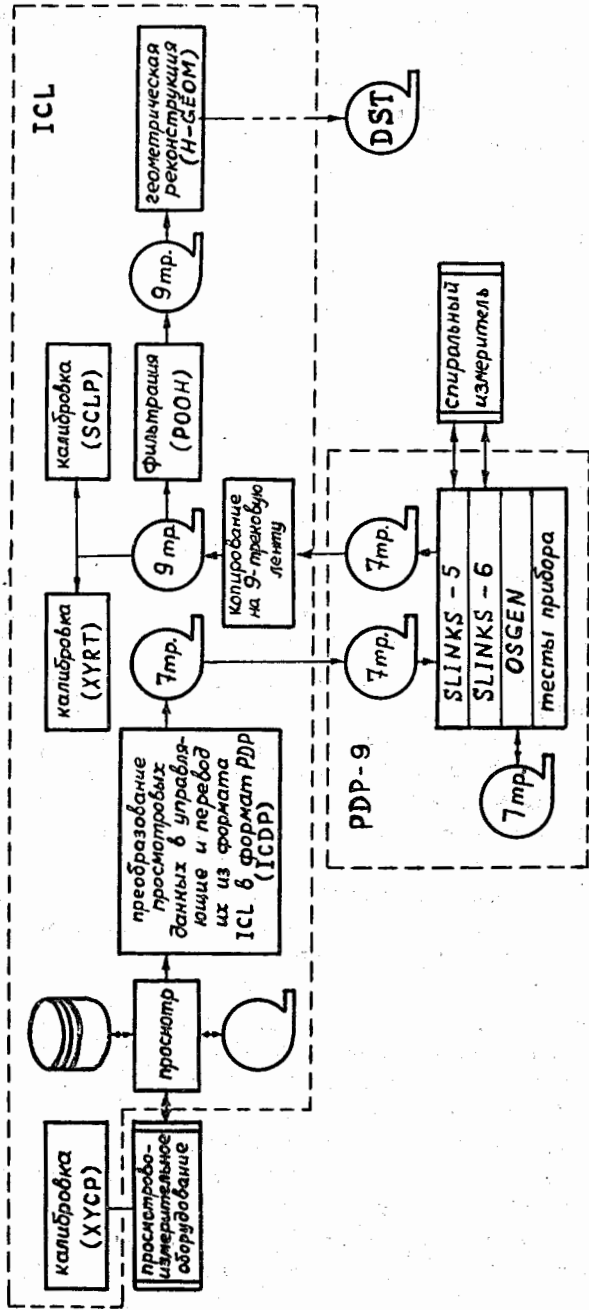


Рис. 1. Общая схема организации обработки снимков с больших лузньков камер ИФВЭ на спиральном измерителе.

предварительной браковки старых данных. В результатах фильтрации будут представлены только последние данные. Допускается даже перемещение пленки в лентопротяжном механизме между измерением разных вершин проекции при условии повторного обмера крестов. Все это обеспечивает минимальные потери полезной информации в случае ошибок оператора, что при большом числе проекций и вершин стереокадра дает значительную экономию рабочего времени.

Решение об измерении или домере трека, т.е. о переходе в режим измерительного проектора, оператор принимает либо по виду изображения на столе СИ, либо по результатам сканирования, представленным на экране графического дисплея, входящего в аппаратную базу СИ. Впоследствии эти данные ошиваются о автоматическими на этапе фильтрации.

Во второй главе анализируются алгоритмы созданной автором программы фильтрации POOH [3,4]. Предварительно проводится анализ особенностей снимков камеры "Мирабель" с точки зрения их обработки на СИ и исследуется семейство кривых - изображений траков в камере с широкоугольной оптикой.

Как известно, общее уравнение трека в полярных координатах для классических камер в представлении, удобном для алгоритмов фильтрации, имеет вид

$$\theta = \theta_0 + \alpha R + \frac{\beta}{R} + \gamma R^3, \quad (I)$$

причем выполняется приближенное соотношение

$$\gamma = \frac{1}{6} \alpha^3. \quad (I')$$

Эффект широкоугольной оптики проявляется в том, что изображения траков даже приближенно не могут быть представлены в виде окружности, т.е. коэффициент соотношения (I') становится функцией, зависящей от угла погружения трека и положения вершины в пространстве камеры. В диссертации выведено это соотношение. Указанный коэффициент должен принимать положительные значения, так как треки не имеют точек перегиба, но диапазон его изменения должен быть широким. Кроме того, из вывода общего уравнения для камеры с широкоугольной оптикой следует, что в него должен быть введен член с R^2 . Выполнение этих требований в математической модели трека, применяемой для фитирования, приводило к принятию большого числа ложных треков - кривые огибали точки, даже не относящиеся к непрерывным объектам.

Преодолеть эту трудность помогло динамическое изменение модели трека в процессе его прослеживания. Использовались два типа кривых при прослеживании трека от вершины ($\gamma = 0$ и $\gamma \neq 0$) и четыре типа кривых при прослеживании к вершине (разные варианты β и γ ,

равных и неравных нулю). Причины смены моделей трека:

- коэффициент β вводится, когда прослеживаемое окончание трека приближается к вершине на заданное расстояние;
- коэффициент γ может быть введен или убран (т.е. ему присвоено нулевое значение) по двум критериям:

- 1) по оценке предстории трека, т.е. с учетом кривизны и отслеженной длины;
- 2) по признаку ухода кривой от трека, когда программа не обнаруживает отсчетов в основной полосе фильтрации, но находит несколько отсчетов вблизи нее. Такая ситуация может возникнуть, если, например, отслеживаемый трек уходит в "тень" конкурирующего. (В данном случае имеется в виду тень не как свойство оптики камеры "Мирабель", а теневой эффект сканатора). Реализация этого критерия основана на использовании дискретно изменяемой пороговой величины, участвующей в оценке 1).

Применение динамически изменяемых параметров было одним из основных средств преодоления упоминавшихся выше трудностей. Приведем примеры.

При поиске кандидатов в треки вблизи вершин и вспомогательных точек применяется двумерное гистограммирование по углу выхода трека из вершины или вспомогательной точки и по кривизне. Использование переменных границ областей гистограммирования в зависимости от множественности событий позволило более эффективно выделять треки вблизи вершин. В аналогичном алгоритме для вспомогательных точек при анализе гистограмм применена переменная пороговая величина, так как в области вспомогательных точек предполагается различная контрастность снимка и другие особенности.

Ширина полос фильтрации (дороги) является также переменной величиной, зависящей от расстояния до вершины. По мере приближения трека к вершине полоса сужается по гиперболе. Это, с одной стороны, необходимо, так как возрастает вероятность появления отсчетов с соседних треков, с другой стороны, возможно, так как положение трека, приближающегося к вершине, становится все более определенным. Таковы основные приемы, позволяющие вести фильтрацию треков на снимках с больших пузырьковых камер.

После проведения апробации автоматического режима на трех тысячах взаимодействий был проведен статистический анализ обработанных событий, результаты которого приводятся в конце II главы диссертации.

О точности пространственной реконструкции треков можно судить из рис. 2, где представлены остаточные среднеквадратичные отклонения

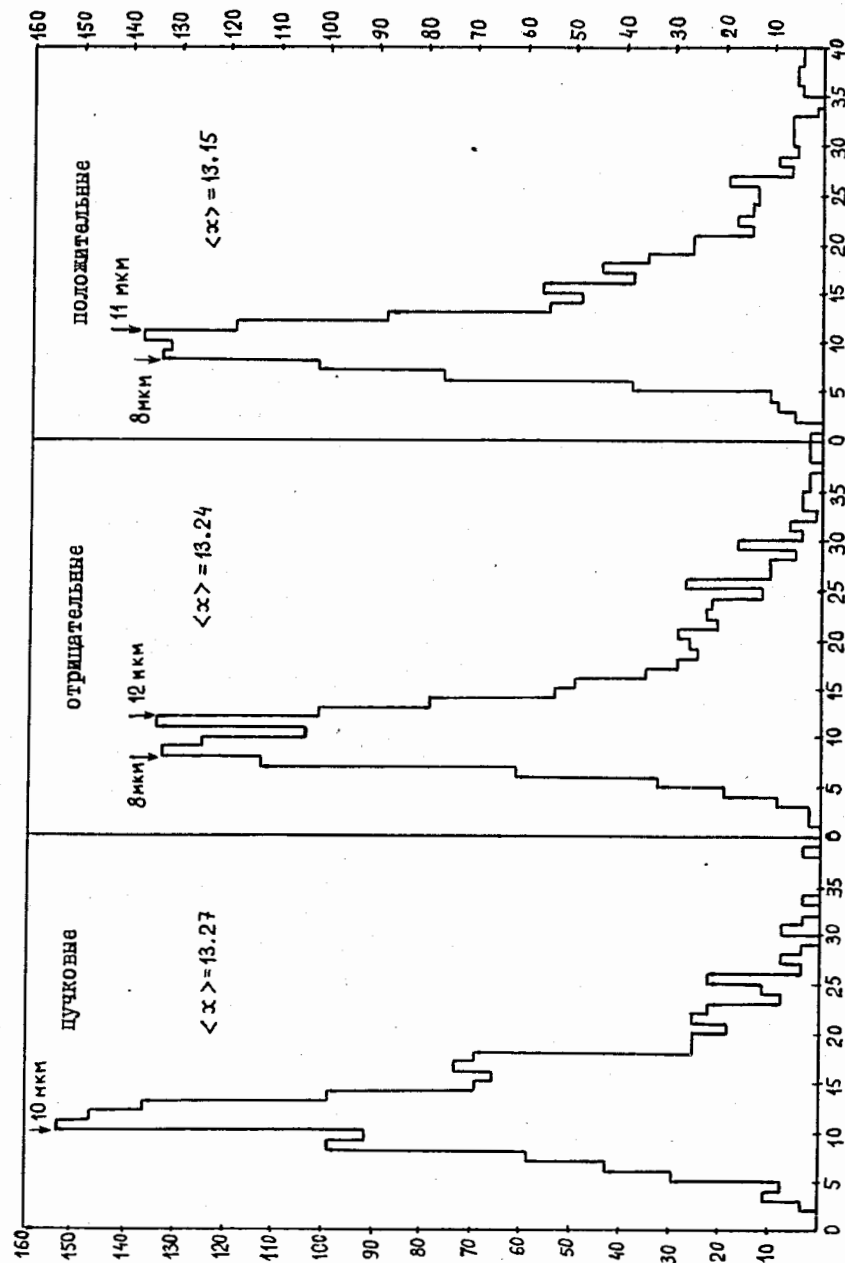


Рис. 2.. Гистограммы распределения остаточных среднеквадратичных отклонений.

в микронах от кривых (треков), восстановленных в пространстве камеры и спроектированных на пленку, до точек, найденных программой фильтрации (см. рис. 2).

Следует отметить, что эти величины определяются, по крайней мере, тремя факторами: погрешностями приборов, ошибками фильтрации за счет фона и ошибками геометрической реконструкции событий. О погрешности СИ можно судить по результатам его калибровки (III глава диссертации), фоновые же ошибки фильтрации неотделимы от дисторсионных искажений камеры, а последние устраняются на этапе геометрической реконструкции. По этим причинам для оценки точности фильтрации приходится использовать верхнюю границу ошибки, получаемую при геометрической реконструкции. С другой стороны, приведенная характеристика результатов обработки часто используется, что обеспечивает сопоставимость вновь создаваемой и работающих систем. В следующей таблице содержатся средние значения тех же величин, полученные на разных приборах.

Таблица средних значений остаточных среднеквадратичных отклонений на треках в микронах

Прибор	Пучковые треки	Треки отрицательных частиц	Треки положительных частиц
"Адам+Ева"*	14,2	17,4	16,9
HPD	10,9	15,0	14,9
СИ	13,3	13,2	13,2

Особенности прибора, которые могли бы неблагоприятно отразиться на результатах обработки, исследовались специально. Например, характерной ошибкой прибора является "скручивание" сканов - искажение радиальных направлений, что приводит к изменению импульсов частиц. Для 4-С - событий были построены гистограммы распределения проекций импульсов вторичных частиц на каждую из осей. Для осей y и z суммарные значения импульсов составляют, соответственно, 0,018 ГэВ/с и 0,012 ГэВ/с. Эти величины весьма чувствительны к систематическим ошибкам типа "скручивание". Экспериментально установлено, например, что если не применять аналитическую коррекцию данных спирального сканирования, то смещения составляют до 3 ГэВ/с при тангенциальных смещениях 15-17 мкм и первичном импульсе 32 ГэВ/с.

С точки зрения правильности избранной методики фильтрации показательна гистограмма распределения длин треков в пространстве камеры (см. рис. 3).

* Куркин Ю.Д. и др. В кн.: Материалы семинара по обработке физической информации (Агверан, 1975). Изд-во ЕРФИ, Ереван, 1976, с.339-344.

Четко выраженный срез распределения справа и предшествующий ему пик с учетом 30-кратного уменьшения на пленке соответствуют максимальному радиусу сканирования, равному 53 мм. Вследствие различных ненулевых значений кривизны и углов погружения треков получаются несколько большие длины, т.е. косой срез гистограммы. Таким образом, прослеживание треков ведется на всю доступную прибору длину, что подтверждает правильность работы наиболее важных алгоритмов фильтрации. В распределении представлены "висячие" и "двухточечные" треки, а также короткие треки, полностью измеряемые оператором.

В процессе разработки и отладки обрабатывающих программ используется ряд параметров, учитывающих требуемую точность, особенности проводимого эксперимента, качество фотоснимков, настройку прибора, квалификацию оператора и т.д. Подбор этих параметров, т.е. настройка программы на конкретные условия, является довольно сложной и ответственной задачей, так как в значительной степени определяет процент успешно обработанных событий. Наличие неявных зависимостей между параметрами делает процесс подбора параметров довольно сложным.

Для облегчения этой работы в программу фильтрации включены процедуры накопления статистики наиболее важных характеристик процесса: количество отказов различного рода, распределение специальных точек, выставленных оператором, по их видам и результаты их использования программой, распределение сформированных кандидатов в треки по числу отсчетов, из которых они состоят и т.п.

Другим важным показателем совокупности настроечных параметров является их оптимальность в смысле затрат машинного времени, поэтому в программе производится хронометраж общего времени обработки, средних затрат времени на вершину и относительной продолжительности работы отдельных процедур.

Все это в значительной степени облегчает подбор оптимальных настроечных констант, способствует повышению эффективности обработки.

В третьей главе рассматриваются вопросы калибровки СИ ^{1,5/}. Прибор имеет две координатные системы: ортогональную $(x, y)_{cu}$, подобную системе обычного проектора, и полярную $(R, \theta)_{cu}$, связанную с ортогональной соотношениями

$$\begin{aligned} x &= x_0 + (R \cdot R_c - R_0) \cos(\theta \cdot \theta_c - \theta_0) + \Delta x, \\ y &= y_0 + (R \cdot R_c - R_0) \sin(\theta \cdot \theta_c - \theta_0) + \Delta y, \end{aligned} \quad (2)$$

где

x_0, y_0 - суммарная ошибка оператора и прибора при наведении полюса полярной системы координат на заданную точку;

- R_c - единица отсчета по радиусу в масштабе ортогональной системы;
- R_o - параметр, позволяющий совместить начало отсчета радиальной координаты с центром сканирования;
- θ_c - цена единицы углового счетчика (в радианах) - величина постоянная;
- θ_o - угловое положение сканирующей щели при сбросе углового счетчика в ноль;
- $\Delta x, \Delta y$ - невязки, порождаемые систематическими и случайными ошибками прибора.

Эти формулы получаются из обычного преобразования полярной системы в ортогональную при замене полярных координат линейными функциями значений соответствующих счетчиков. Такая замена соответствует наличию неопределенностей в единицах измерений и в положениях нулей отсчетных систем.

Суть задачи калибровки СИ состоит в определении пяти параметров в формулах (2): $x_o, y_o, R_c, R_o, \theta_o$ - оптимальных в смысле метода наименьших квадратов. Калибровка производится с помощью эталона - специальной стеклянной пластины с радиально ориентированными крестами, расположенными симметрично относительно центра и удобными для спирального сканирования. Центры крестов в системе R, θ восстанавливаются статистическими методами ^{1/6}. Координаты эталона $(x, y)_{abc}$ могут входить в формулы (2) либо непосредственно вместо x, y , либо после их преобразований в ортогональную систему прибора (коэффициенты этого преобразования вычисляются также методом наименьших квадратов).

Первый способ более удобен при наладке прибора, так как привязка полярной системы осуществляется непосредственно к эталону. Ошибки $\Delta x, \Delta y$, единица измерения по радиусу R_c , смещения x_o, y_o будут выражены в абсолютных единицах эталона. В соответствии с этим типом преобразований автором была создана специальная программа XYRT, предназначенная именно для наладочных целей. В программу были включены также различные диагностические функции.

Для текущей калибровки автором была первоначально адаптирована, а впоследствии в значительной степени переработана калибровочная программа SCALP, используемая во многих зарубежных центрах. В этой программе привязка координат осуществляется последовательно:

$$(x, y)_{abc} \rightarrow (x, y)_{cu} \rightarrow (R, \theta)_{cu}$$

Изменения, внесенные в программу SCALP, были вызваны возросшими требованиями к точности преобразования информации в цифровую форму. Сначала было проведено тщательное исследование систематических ошибок. С этой целью в программу включены средства графического представления

остаточных отклонений, что позволило выделить и параметризовать искажения различной природы. Затем в основные формулы преобразований (2) были внесены изменения, соответствующие аналитической коррекции данных спирального сканирования. В первую очередь были устранены тангенциальные смещения путем пересчета координаты θ , которая стала зависимой от радиуса. Весьма удобной для вычисления скорректированного значения $\theta_{корр}$ является формула для подстановки вместо θ в (2)

$$\theta_{корр} = \theta + \alpha R + \beta/R + \gamma R^3,$$

т.е. функция того же типа, что и (1), но с разрешенными точками перегиба. Далее были устранены искажения, связанные со сжатиями полярной системы. Это достигается, если фиксировать в формулах (2) не общее для x и y значение коэффициента R_c , а два различных: R_{cx} и R_{cy} , что эквивалентно оптимальной установке зеркал оптической системы прибора.

В итоге сумма квадратов отклонений на эталонной сетке точек была уменьшена на порядок, а достигнутая точность составила около 2,4 мкм в тангенциальном направлении.

В четвертой главе рассматривается калибровка просмотрово-измерительных проекторов ⁷⁷.

Подчеркивается важность правильного перехода к плоской (математической) модели прибора, которая должна учитывать не только его принципиальные особенности, но и математический аппарат последующей обработки измерений. В диссертации приведен пример, когда предъявление требований к прибору, более жестких, чем это следует из способа дальнейшей обработки измерений, приводит лишь к снижению точности окончательных результатов (раздел 3.6 диссертации).

В созданной автором программе калибровки проекторов используются четыре вида преобразований. Шестипараметрическое линейное преобразование, коэффициенты которого определяются методом наименьших квадратов, позволяет определить в явном виде масштабы по осям прибора и косоугольность. Остаточные погрешности дают возможность судить о характере и величине нелинейных искажений.

Пятипараметрическое преобразование обеспечивает вычисление погрешностей прибора, если поставить условие строгой ортогональности осей его координатной системы.

Четырехпараметрическое преобразование порождается дополнительным требованием совпадения масштабов по осям.

И, наконец, трехпараметрическое - позволяет задать априорные значения масштабов по осям совместно с требованием ортогональности, что обеспечивает, например, сравнение проектных и фактических параметров прибора.

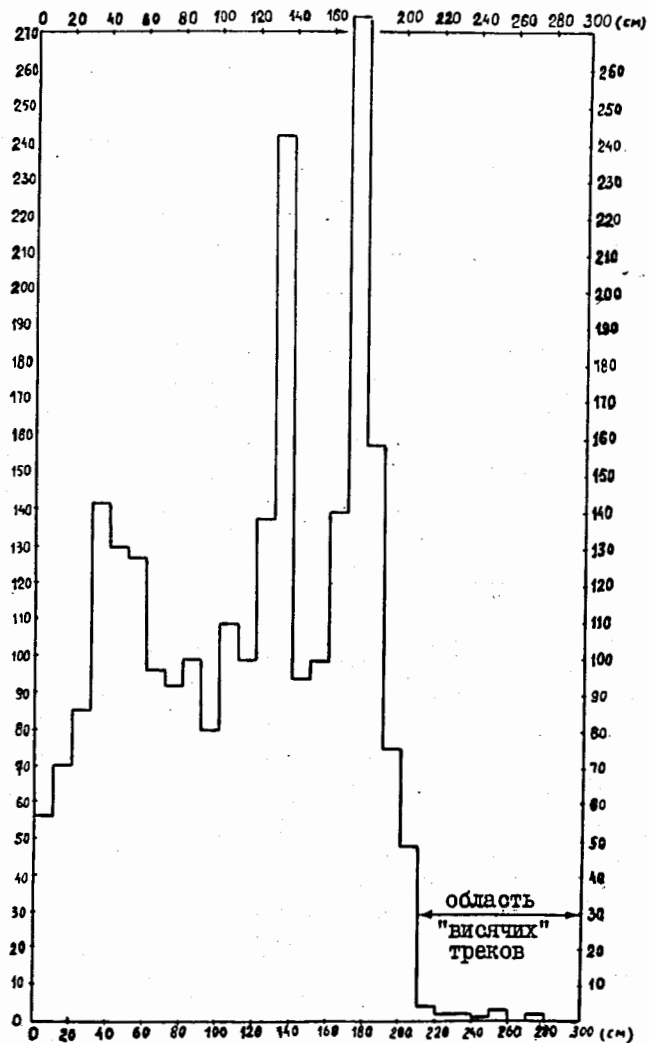


Рис. 3. Распределение пространственных длин треков.

Выбор варианта преобразований определяется в соответствии с ориентацией прибора на определенный вид измерений и предъявляет определенные требования к эталонному набору координат. Впрочем, эти требования весьма просты: наличие трех точек, не лежащих вблизи прямой, является достаточным условием для всех указанных видов преобразований.

При калибровке проектора возникает вопрос об отделении систематических ошибок прибора от случайных измерительных ошибок оператора. Последние удалось свести к минимуму путем многократного измерения каждой точки эталона и последующей обработки полученного набора оцифровок. Обработка включает несколько итераций, в каждой из которых определяются среднее значение и среднеквадратичное отклонение. На основе этих значений бракуются координаты, наиболее удаленные от центра распределения. Окончательные средние значения далее считаются непосредственно измерениями, среднеквадратичные же отклонения позволяют судить о практически достижимой точности прибора, т.е. задают стандартные отклонения для соответствующих точек измерительного поля и характеризуют величины ошибок оператора и случайных ошибок прибора.

Систематические ошибки в случае необходимости могут быть уменьшены аналитически либо с помощью интерполяции, либо за счет введения компенсирующих функций. В диссертации приводится пример, когда для устранения систематических искажений прибора потребовалось ввести функцию трех переменных, для чего в измерительную систему прибора была введена третья координата (раздел 4.5 диссертации).

Последние два раздела IV главы посвящены практическим вопросам — программной реализации и результатам, полученным с помощью программы калибровки. Основной итог эксплуатации программы — наладка и текущая калибровка проекторов и ортогональной системы СИ на протяжении нескольких лет. Отмечены также другие практические результаты, полученные с ее помощью.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертации.

Литература

1. Н.Е. Детиненко, Л.Л. Закамокий, А.А. Иванов, В.Г. Кузьменко, А.Ф. Лукьянцев, Ю.С. Нечаев, В.Е. Соловьев. Математическое обеспечение спирального измерителя для обработки фотоснимков с камеры "Мирабель". Препринт ИФВЭ, ШПК 76-168, Серпухов, 1976.
2. М.Ю. Боголюбовский, В.В. Брызгалов, П.А. Горичев, Л.Л. Закамокий, В.Г. Кузьменко, Л.Б. Соловьева, В.Е. Соловьев, Дж. Хупер. Управляющая программа спирального измерителя для обмера фотоснимков с камеры "Мирабель". Препринт ИФВЭ, ШПК 74-31, Серпухов, 1974.
3. Л.Л. Закамокий, Н.С. Иванова, А.Ф. Лукьянцев. Фильтрация результатов сканирования снимков камеры "Мирабель" на спиральном измерителе. Препринт ИФВЭ, ОГА 78-126, Серпухов, 1978.

4. Л.Л. Закамский, Н.С. Иванова, А.Ф. Лукьянцев. Программа фильтрации в системе обработки снимков с камеры "Мирабель" на спиральном измерителе. Труды семинара по обработке физической информации. Изд-во ЕрФИ, Ереван, 1978, с.315-319.
5. Л.Л. Закамский, В.Е. Ивченко, Л.Б. Соловьева, В.Е. Соловьев. Калибровка спирального измерителя. Препринт ИФВЭ, ОЭА 77-132, Серпухов, 1977.
6. Л.Л. Закамский. Первоначальный отбор полезной информации в системе ЭВМ - сканирующий автомат типа НРД. Материалы совещания по программированию и вычислительным методам решения физических задач (Дубна, 27-30 мая 1969 г.), ОИЯИ, II-4655, Дубна, 1969, ч. I, с.133-136.
7. П.А. Горичев, Л.Л. Закамский. Программа калибровки измерительных приборов с ортогональной системой координат. Препринт ИФВЭ, СПК 73-94, Серпухов, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 сентября 1981 года.