

Ц 845

M-608

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

10 - 5972

344/1-11



ЛАБОРАТОРИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И АВТОМАТИЗАЦИИ

В.П. Милюткин, В.Н. Шигаев

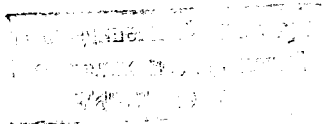
КАЛИБРОВКА ОТСЧЕТНОЙ СИСТЕМЫ
СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА ТИПА НРД

1971

10 - 5972

В.П. Милюткин, В.Н. Шигаев

**КАЛИБРОВКА ОТСЧЕТНОЙ СИСТЕМЫ
СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА ТИПА НРД**



Математическое обеспечение системы измерений снимков с пучковых камер на базе сканирующего автомата (СА) типа *HPD /I/* включает в себя как составную часть программный комплекс, обеспечивающий калибровку отсчетной системы сканирующего автомата. В процессе калибровки определяются значения ряда параметров (калибровочные константы), используемые для преобразования систем координат при различных направлениях сканирования.

В данной работе выводятся формулы преобразования, кратко излагается метод определения калибровочных констант и его программная реализация. Всюду, где это возможно, мы будем придерживаться системы обозначений, принятых в работе */5/*, в которой описан процесс калибровки сканирующего автомата *HPD Mark - 1*.

§ I. Система координат СА

Для формального описания отсчетной системы СА и вывода формул преобразования нам потребуются основные сведения о методе сканирования фотоснимков на СА.

В сканирующих автоматах типа *HPD* применен оптико-механический способ формирования двух растров различной ориентации */I/*, */4/*, соответствующих поперечному и продольному сканированию фильма. Измеряемый фотоснимок вакуумным прижимом фиксируется на боковой поверхности призмы, которая является частью фильмового канала и покоится на измерительном столе - системе из двух кареток, с помощью гидропривода перемещающихся в двух взаимно перпендикулярных направлениях *OX* и *OY*. Вместе с датчиками на дифракционных решетках, регистрирующими перемещения измерительного стола по *OX* и *OY*, эти два направления задают прямоугольную систему координат *XOY* с единицей отсчета, в нашем случае равной 2 мкм. Начало координат выбирается при крайнем положении кареток, где по команде ЭВМ произ-

2.5 мкм
с 1973
1973

водится обнуление реверсивных счетчиков X и Y , тем самым обеспечивая положительность координат во всей рабочей области перемещений измерительного стола CA .

Для получения движущегося светового пятна используется вращающийся диск с радиальными щелями, помещенный между источником света и неподвижной щелью. Оптическая схема с разделительной призмой формирует изображение пятна одновременно на фотоснимке и штриховой измерительной решетке с шагом $25,4$ мкм. Траектория пятна в плоскости фотоснимка — отрезок прямой, ориентированный поперек фильма. Другая неподвижная щель и аналогичная оптическая схема со штриховой решеткой формируют второе пятно, траектория которого параллельна краю фильма. Быстрое перемещение пятна в сочетании с равномерным поступательным движением измерительного стола вдоль оси OX образует в плоскости фильма поперечный растр телевизионного типа. Продольный растр образуется при движении измерительного стола вдоль оси OY .

Положение светового пятна вдоль строчной развертки в текущий момент времени отображается с точностью до периода решетки быстрым счетчиком w , на котором с момента начала движения пятна по строке суммируются опорные импульсы от штриховой решетки. Для более точного определения координат середины объекта (с единицей отсчета $\sim 1,5$ мкм) используется интерполяционный генератор постоянной частоты $/1/3/4/$. Всюду в дальнейшем координату светового пятна вдоль строчной развертки будем обозначать при поперечном сканировании через wX , а при продольном — wY .

При 3000 оборотах в минуту сканирующего диска период следования строк равен $2,5$ мсек, при этом длительность рабочего хода развертки пятна составляет ~ 2 мсек (так называемый светлый период), длительность паузы $\sim 0,5$ мсек (темный период). Через d обозначим отношение темного периода к светлому.

Показание счетчика X при поперечном сканировании фотоснимка считывается в конце каждого светлого периода, тем самым всем координатам wX , поступившим при сканировании строки раstra, ставится в соответствие одна и та же координата измерительного стола, за которой мы сохраним обозначение X . Аналогично при продольном сканировании совокупности координат wY , зарегистрированных на одной и той же строке раstra, соответствует общая координата Y . При

нормальной работе СА одна из декартовых координат остается постоянной (Y при поперечном и X при продольном сканировании). Эту координату мы будем именовать неподвижной координатой измерительного стола, а ее значение, при котором осуществляется сканирование, будем соответственно обозначать Y_{STAGE} , X_{STAGE} . Для обеспечения возможности программного контроля за работой автомата эта координата также считывается в конце светлого периода в буферную память СА. Помимо координат измерительного стола, в конце светлого периода считывается показание счетчика W - величина, которая при идеальной работе СА остается постоянной от начала до конца сканирования фотоснимка. Последовательность координат, передаваемая в память вычислительной машины CDC-1604A, выглядит следующим образом:

при поперечном сканировании -

... $WX, WX, WX, WX, FG CX, X, Y_{STAGE}, WX, WX, \dots$

и при продольном сканировании -

... $WY, WY, WY, WY, FG CY, X_{STAGE}, Y, W, W, \dots$,

где $FG CX$, $FG CY$ - показания счетчика W в конце светлого периода при поперечном и продольном сканировании.

При измерении на СА фотоснимков с пузырьковых камер часто возникает необходимость в сканировании зон фотоснимка как в поперечном, так и в продольном направлении. Результаты анализа, полученные соответственно в системах отсчета (X, WX) и (Y, WY) , должны быть затем выражены в единой системе отсчета, как этого требует формат входных данных для программы геометрической реконструкции событий. Приведение результатов измерений к единой системе отсчета мы будем в дальнейшем называть сшиванием результатов поперечного и продольного сканирования или просто сшиванием снимка. Конструкция оптико-механической части СА позволяет ограничиться линейными преобразованиями систем отсчета, при этом линейный характер преобразований наряду с малостью допусков на ошибки сшивания снимка накладывает ряд функциональных ограничений на СА, выполнение которых проверяется программой в процессе сканирования снимка.

При формальном описании системы отсчета СА и всюду в дальнейшем мы будем рассматривать эквивалентную схему сканирования, где не строка растра, а фотоснимок остается во время сканирования неподвижным в координатной системе XOY . Рис. I иллюстрирует связь координатных систем XOY , (X, WX) и (Y, WY) . Поясним используемые обозначения.

$DELTX$ и $DELTY$ - расстояния между соседними строками растра в направлении кадровой развертки для поперечного и продольного растров.

$(0, YZERO)$ и $(XZERO, 0)$ - координаты начала поперечной и продольной строк при покоящемся в начале координат измерительном столе СА.

$STGLC$ - цена отсчета координат X, Y .

$SPTXLC$ и $SPTYLC$ - цена отсчета координат WX и WY .

В общем случае строки растра не ортогональны направлению кадровой развертки. Наклон строк складывается из двух компонент: 1) динамической составляющей, обусловленной перемещением измерительного стола во время отклонения светового пятна вдоль строки, 2) постоянной составляющей - наклоном строки при неподвижном столе, обусловленным погрешностью юстировки оптико-механической части СА. Наклон строки будем измерять величиной проекции полной длины строки (от начала светлого до конца темного периода) на ось, вдоль которой движется при сканировании измерительный стол СА. Динамический наклон суть величины $DELTX$ и $DELTY$. Постоянные составляющие наклона (статический наклон) обозначим соответственно $CFDLTX$ и $CFDLTY$. Динамический наклон при сканировании снимка вычисляется как фактическая плотность строк растра.

На рис. I ABC , DEF - $(i-1)$ -я и i -я строки растра. X - координата измерительного стола - считывается в точках В и Е. Чтобы вычислить X -координату точки Р, зарегистрированной на i -ой строке растра, необходимо X -координату измерительного стола откорректировать на динамический и статический наклоны строки, добавив величину ΔX :

$$\Delta X = (DELTX + CFDLTX) \cdot LONLD \cdot (WX - FG CX) / FG CX, \quad (I)$$

Handwritten notes and calculations:

2.0
 2.0
 7
 2
 2.5

Arrows point from the equation to these numbers.

где $LONLD = I/(I+d)$ - отношение светлого периода к полному периоду строк раstra.

Аналогично для продольного сканирования фотоснимка находим поправку ΔY :

$$\Delta Y = (DELTY + CFDLTY) \cdot LONLD \cdot (WY - F6CY) / F6CY, \quad (I')$$

Значение статического наклона определяется во время калибровки отсчетной системы СА.

Пусть (X, WX) и (Y, WY) - координаты одной и той же точки фотоснимка, зарегистрированные при поперечном и продольном сканировании. Для этих пар координат справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} X^* &= XSTAGE + XZERO - WY \cdot SPTYLC / ST6LC, \\ Y^* &= YSTAGE + YZERO + WX \cdot SPTXLC / ST6LC, \end{aligned} \quad (2)$$

где X^* и Y^* - откорректированные на динамический и статический наклон координаты X и Y . Из (1), (I') и (2) следует, что системы координат (X, WX) и (Y, WY) связывает преобразование, зависящее от шести параметров:

$$XZERO, YZERO, CFDLTX, CFDLTY, SPTXLC, SPTYLC.$$

Значения этих шести параметров определяются в процессе калибровки отсчетной системы СА и используются в рабочих циклах обработки фотоснимков с пузырьковых камер. Значение $ST6LC$, являющееся общим масштабным множителем, предполагается известным.

§ 2. Калибровка отсчетной системы СА

Методика калибровки состоит в определении координат центров заданного множества крестов при сканировании специального фотоснимка в поперечном и продольном направлениях и последующем решении системы алгебраических уравнений, связывающих координаты крестов, полученные при различных направлениях сканирования. Фотоснимок содержит пакет штрихов, два служебных креста (аналог служебной

информации фотоснимков с пузырьковых камер) и 50 крестов, центры которых располагаются в узлах правильной решетки (рис.2).

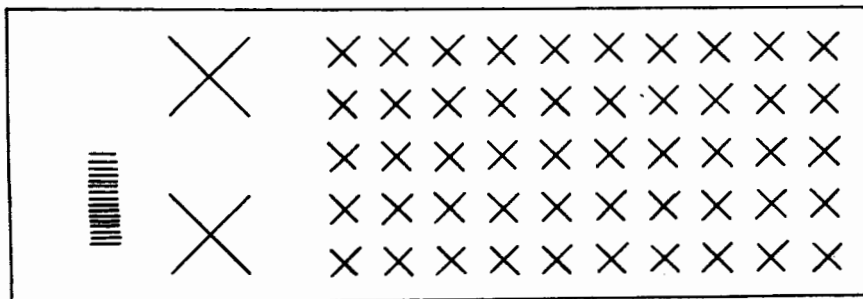


Рис. 2.

Чтобы просканировать все кресты в продольном направлении, необходимо сделать два продольных скана, т.к. длина строки раstra меньше длины решетки. Кресты в 1-5 столбцах измеряются в первом продольном скане, а кресты в 6-10 столбцах - во втором. В стандартную версию подпрограммы *GATE* ^{12/} внесены изменения, обеспечивающие опознавание крестов при продольном сканировании снимка. В поперечном направлении фотоснимок сканируется один раз, причем программа не декодирует код номера кадра, ограничиваясь локализацией пакета штрихов (бит) для предсказания координат центров служебных крестов в координатной системе СА. Для процедуры опознавания крестов решетки программа использует эталонные константы снимка и найденные координаты центров служебных крестов.

Информация, полученная при поперечном сканировании фотоснимка, используется трижды, чтобы определить центры всех 50 крестов решетки. Обусловлено это тем, что в калибровочном комплексе используется стандартная для *HAZE1* процедура поиска реперных крестов, которая носит однопроходный характер и допускает одновременное опознавание не более 2 крестов в столбце. Аналогично информация продольного скана также используется трижды, чтобы определить центры соответствующей группы из 25 крестов.

После того, как весь фотоснимок просканирован в двух направлениях и найдены координаты центров крестов, решается методом наименьших квадратов система алгебраических уравнений:

$$X_i + (DELTX + CFDLTX) \cdot LONLD \cdot (WX_i - FG CX) / FG CX = \\ = XSTAGE + XZERO - WY_i \cdot SPTYLC / STGLC,$$

$$Y_i + (DELTY + CFDLTY) \cdot LONLD \cdot (WY_i - FG CY) / FG CY = \\ = YSTAGE + YZERO + WX_i \cdot SPTXLC / STGLC$$

$$i = 1, 2, \dots, N \leq 50$$

Соответствующая система нормальных уравнений решается методом итераций, при этом за первые приближения $CFDLTX$, $CFDLTY$ принимаются значения этих параметров, полученные в предыдущем цикле калибровки. Система нормальных уравнений решается относительно $XZERO$, $SPTYLC$, $YZERO$, $SPTXLC$, и найденные значения этих параметров используются для вычисления поправок $STFDLX$, $STFDLY$ к значениям параметров $CFDLTX$, $CFDLTY$. Итерационный процесс заканчивается, если на очередном шаге сумма $STFDLX^2 + STFDLY^2$ меньше заданной константы. Если критерий сходимости не удовлетворяется за заданное число итераций, программа переходит к следующему циклу калибровки, приняв за исходные значения калибровочных констант результаты предыдущего цикла.

§ 3. Основные подпрограммы комплекса и их функции

Общее представление о структуре комплекса дает изображенная на рис. 3 схема.

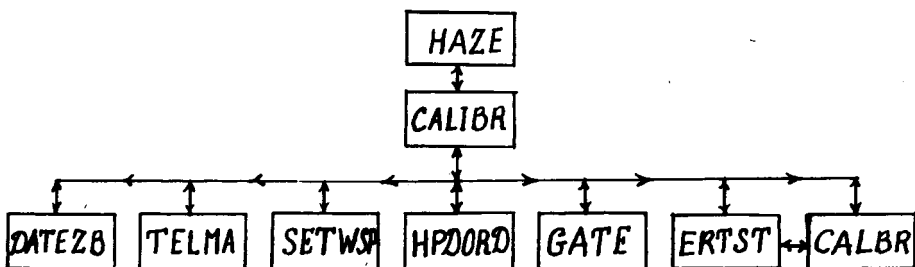


Рис. 3.

1. Программа *HAZE* служит для задания в общих массивах многочисленных констант, необходимых для работы подпрограмм комплекса.

2. Подпрограмма *CALIBR*, выполняя функции диспетчера комплекса, организует работу остальных подпрограмм в процессе калибровки отсчетной системы СА.

Для процедуры опознавания крестов эта подпрограмма указывает подмножества крестов решетки, центры которых подлежат определению, и задает константы фотоснимка: расположение служебных крестов относительно пакета штрихов, положение первого креста решетки относительно нижнего служебного креста, положение заданного подмножества крестов решетки относительно первого креста решетки и тангенсы угла наклона плеч крестов, которые уточняются от цикла к циклу.

Для программы управления сканирующим автоматом (*HPDORD*) подпрограмма *CALIBR* задает параметры сканирования: начальное и конечное значение одной координаты измерительного стола СА и начальное значение другой, направление сканирования, скорость движения измерительного стола, уровень дискриминации сигналов, плотность строк сканирования.

CALIBR предполагает, что пленка с калибровочным фотоснимком жестко закреплена на измерительном столе СА. Если в предыдущем цикле калибровки были найдены все 50 крестов при сканировании в обоих направлениях, *CALIBR* использует найденные координаты

центров крестов в следующем цикле для более точного предсказания положения крестов в процедуре их опознавания, что влечет за собой снижение погрешностей вычисления координат центров крестов. Наиболее координаты запоминаются в массивах памяти и по желанию оператора выдаются на широкую печать. По мониторному флагу 8 *CALIBR* завершает работу калибровочного комплекса и выдает на широкую печать результаты всех циклов калибровки.

Для подпрограммы *CALBR* и других *CALIBR* вычисляет среднее за скан значение неподвижной координаты измерительного стола и среднее значение плотности строк раstra.

3. *DATEZB* - небольшая подпрограмма, запоминающая дату работы комплекса, указанную на первой управляющей карте задачи. С помощью подпрограммы *TELMA* дата выдается на телетайп и широкую печать.

4. *TELMA* - подпрограмма, обеспечивающая двустороннюю связь оператора ЭВМ с калибровочным комплексом через пультевой телетайп *CDC-1604A*. Каждая инструкция оператора может содержать несколько приказов, которые выполняются в порядке следования приказов в инструкции. *TELMA* используется для просмотра и изменения целых и действительных переменных в основных массивах, ряда логических переменных (флагов) и для оперативного вмешательства в процесс калибровки.

5. Подпрограмма *SETWSP* задает первые приближения калибровочных констант и, используя константы программы *HAZE*, формирует переменные в общих массивах, необходимые для других подпрограмм в ходе калибровки отсчетной системы СА. При единичном значении мониторного флага I *SETWSP* считывает начальные приближения калибровочных констант с перфокарты.

6. *HPDORD* - управляющая подпрограмма СА. Описание этой подпрограммы приведено в работе /3/.

7. Подпрограмма *GATE* и ряд других подпрограмм (*FIDUC*, *KHIS*, *KXSYS4*, *NXFID*) опознают кресты и вычисляют координаты их центров. Описание этой группы подпрограмм приведено в /2/, /5/.

8. *ERTST* - подпрограмма диагностики ошибок в работе системы. Подпрограмма контролирует точность вывода измерительного стола СА в заданную точку перед сканированием фотоснимка (± 0.6 мм), по-

стоянство плотности растра на протяжении всего скана, стабильность неподвижной координаты измерительного стола, постоянство показаний счетчика w в конце светлого периода на протяжении всего скана, монотонность координат w_i в пределах каждой строки растра. Если нарушение хотя бы одного из этих условий превышает значение соответствующего допуска, а также если не был опознан пакет штрихов или оба служебных креста, на телетайп выдается сообщение об ошибке и сканирование повторяется. В *ERTST* предусмотрен контроль младших 5 двоичных разрядов счетчика w (разрядов интерполяционного счетчика) с выдачей диагностики на широкую печать. При единичном значении мониторингового флага 3 *ERTST* контролирует работу счетчиков X, Y, w , вычисляя для центра каждого креста две величины, которые при нормальной работе счетчиков остаются инвариантными: $YSTAGE + wx \cdot \frac{SPTXLC}{STGLC}$ в случае поперечного сканирования и $XSTAGE - wy \cdot \frac{SPTYLC}{STGLC}$ в случае продольного сканирования. Если установлен в I мониторинговый флаг 9, эти счетчики *ERTST* контролирует, используя информацию одного определенного креста.

Количественной оценкой качества калибровочных констант являются ошибки шивания для каждого креста калибровочного фотоснимка. Ошибки шивания очень чувствительны ко всем неполадкам в работе СА и являются для оператора сигналом включения тестов, имеющих в комплексе.

Ошибка шивания по радиусу-вектору $XERR$ для i -го креста равна

$$XERR(I) = \sqrt{ERX(I)^2 + (ERWX(I) \cdot SPTXLC / STGLC)^2}, \quad (4)$$

где $ERX(I)$ - составляющая по X в единицах $STGLC$
и $ERWX(I)$ - составляющая по Y в единицах $SPTXLC$:

$$ERX(I) = X^*(I) - [XSTAGE(I) + XZERO - WY(I) \cdot SPTYLC / STGLC],$$

$$ERWX(I) = WX(I) - [Y^*(I) - YSTAGE(I) - YZERO] \cdot STGLC / SPTXLC. \quad (5)$$

В формулах (5) $X^*(I)$ и $Y^*(I)$ - откорректированные на динамический и статический наклоны координаты X, Y I-го креста.

При единичном значении мониторингового флага 6 ошибки сшивания для всех крестов выдаются на широкую печать. В программе вычисляются максимальная и средняя по всем крестам ошибки сшивания по радиусу-вектору - $EMAXRX$ и $F1$, их значения выдаются на телетайп.

При наличии дефектов на фотоснимке и низком пороге дискриминации сигналов на СА отдельные кресты могут сшиваться значительно хуже остальных. В *ERTST* предусмотрена возможность выброса нескольких таких крестов с пересчетом калибровочных констант.

9. Подпрограмма *CALBR*, включая ряд небольших подпрограмм, предназначена для решения методом наименьших квадратов системы алгебраических уравнений (3). В ней непосредственно определяются шесть калибровочных констант и их статистические ошибки. Полученные значения констант и их ошибки печатаются на телетайпе и могут выдаваться на широкую печать и перфокарту.

§ 4. Некоторые результаты

Имеется много причин, приводящих к изменениям калибровочных констант отсчетной системы СА ^{/4/}. Влияние различных причин на нестабильность констант может быть предметом самостоятельного исследования, которое авторами не проводилось. Мы приведем лишь некоторые результаты, которые характеризуют реальные ошибки сшивания снимка и свидетельствуют о необходимости проведения калибровки СА непосредственно перед измерением снимков с пузырьковых камер.

Коридор изменений калибровочных констант за два месяца (апрель-май 1971 г.) приводится в следующей таблице.

Константы	<i>XZERO</i>	<i>YZERO</i>	<i>SPTXLC</i>	<i>SPTYLC</i>	<i>CFDLTX</i>	<i>CFDLTY</i>
Ширина коридора в мкм	50	30	$6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	10	10

В этот период было проведено 19 сеансов калибровки, каждый сеанс включал от 3 до 10 циклов калибровки. Результаты лучшего цикла выдавались на перфокарту, а критерием лучшего цикла было наименьшее значение средней ошибки сшивания. В течение этого периода времени средняя ошибка сшивания снимка в лучших циклах была 2-3 мкм. Для 9 сеансов калибровки нами составлена следующая таблица 9x9, в которой приведены средние ошибки сшивания крестов, измеренных в N-ом сеансе, при использовании калибровочных констант, полученных в K-ом сеансе калибровки (ошибки даны в мкм).

N \ K	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2,16	30,30	18,82	15,24	34,52	8,76	41,70	41,02	17,40
2	28,40	<u>2,40</u>	7,92	15,34	11,80	24,20	16,34	16,40	42,72
3	26,34	6,86	<u>2,20</u>	15,00	14,64	23,06	18,96	19,18	40,40
4	20,46	16,26	9,72	<u>2,76</u>	17,14	13,38	25,24	23,96	35,28
5	37,36	10,02	18,40	21,12	<u>2,36</u>	30,90	8,84	6,98	52,18
6	15,44	21,54	12,62	3,40	22,94	<u>2,34</u>	31,06	29,80	30,08
7	45,18	13,86	24,88	29,70	9,92	39,44	<u>2,72</u>	4,12	59,82
8	44,80	14,06	24,80	29,06	9,00	38,86	4,28	<u>2,62</u>	59,52
9	15,36	47,02	35,42	32,52	52,02	24,02	58,84	58,36	<u>2,80</u>

Из таблицы хорошо видно, что измерение снимков с использованием констант, полученных в другие дни, может сопровождаться ошибкой сшивания результатов поперечного и продольного сканирования до 60 мкм.

В заключение выражаем глубокую благодарность И.И.Шелонцеву за постоянную помощь в работе, персоналу группы эксплуатации СА и ее руководителю Ю.Войтенко.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Я.Алмазов и др. Установка для скоростной автоматической обработки снимков с трековых камер на базе механического сканирующего устройства типа "Бегущий луч". Сообщение ОИЯИ, IO-4513, Дубна, 1969.
2. Л.Л.Закамский. Первоначальный отбор полезной информации в системе ЭВМ - сканирующий автомат типа HPD . Программирование и вычислительные методы, II-4655, Дубна, 1969.
3. И.И.Шелонцев, В.Н.Шигаев. Программа управления сканирующим автоматом (HPD) и возможные пути оптимизации режима измерения фотоснимков с пузырьковых камер. Сообщение ОИЯИ, IO-5728, Дубна, 1971.
4. M. Benot a.o. *The HPD mark-2 Flying-Spot Digitizer at CERN. CERN 68-4, 6 February 1968.*
5. *FSD Bubble Chamber Programs Manual, DD, CERN, 1967.*

Рукопись поступила в издательский отдел
29 июля 1971 года.