

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

4825/2-81

28/9-81
10-81-483

Н.П. Алексеева, Н.Б. Богданова, В.Ф. Завьялов,
Г.А. Ососков

ЗАДАЧА КАЛИБРОВКИ
ДЛЯ БЕСФИЛЬМОВОЙ СИСТЕМЫ
СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ
СО СТРИМЕРНОЙ КАМЕРЫ

1981

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ЛВТА Объединенного института ядерных исследований ведутся работы по созданию системы бесфильмового съема данных со спектрометра РИСК, основой которого является пятиметровая стримерная камера^{/1/}. Бесфильмовый съем информации позволяет повысить скорость регистрации событий, исключить трудоемкий и дорогостоящий этап измерения и обработки фотографий, расширить класс доступных к изучению задач, осуществить контроль за качеством регистрируемых событий и ходом эксперимента, обрабатывать часть событий в реальном времени, сократить время обработки данных.

В качестве регистратора событий при бесфильмовом съеме используются телевизионные передающие трубки, сочлененные с двухкаскадными электростатическими усилителями яркости света^{/2/}.

С 1979 года на установке РИСК в ИФВЗ /Серпухов/ работает телевизионная система контроля стримерной камеры^{/3/}. Система состоит из двух телекамер, связанных через КАМАК-интерфейс с ЭВМ ЕС-1040, что позволяет записывать на магнитную ленту оцифрованную картину событий вместе с изображениями реперных крестов, имеющих в стримерной камере. Кадры, записанные в отсутствие пучка, содержат информацию только о реперных крестах и могут быть использованы для исследований по калибровке системы бесфильмового съема данных со стримерной камеры. Фотография такого кадра представлена на рис.1.

Дополнительно для этих же целей была использована стендовая телевизионная установка, описанная в^{/4/}. Эта установка работает на линии с ЭВМ М-6000 и предназначена для отработки некоторых узлов системы бесфильмового съема данных. С помощью телевизионной камеры без усилителя яркости света была просканирована специальная калибровочная пластина с 36 крестами, расположенными в узлах равномерной сетки с шагом 7,4 мм. На рис.2 приведена распечатка данных сканирования пластины, полученная на ЭВМ CDC-6600.

Как и любая высокоточная измерительная система, телевизионная система съема данных со стримерной камеры предполагает определенный комплекс калибровочных процедур для определения ее точностных характеристик и устранения вносимых ею погрешностей в измерениях, основными источниками которых являются не-

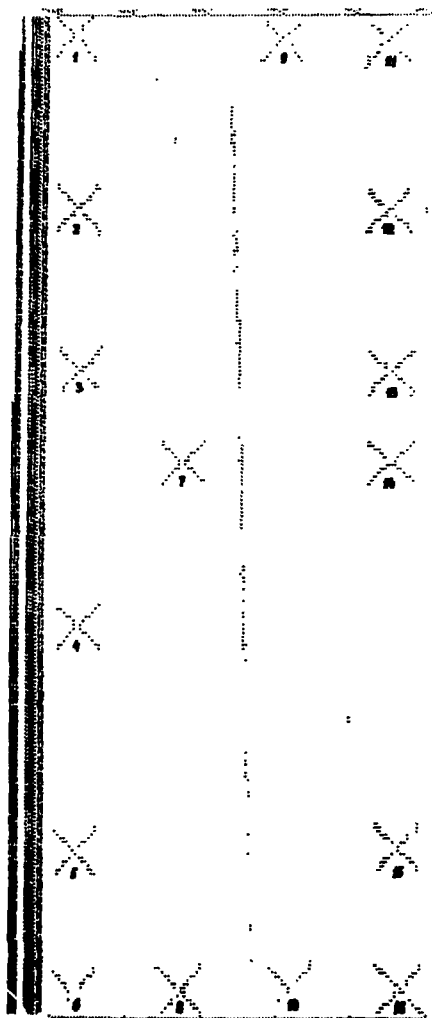


Рис. 1

линейность развертки электронного луча телевизионных трубок, дисторсии усилителей яркости света, нестабильность электронных схем сканирования изображения и дисторсии оптической системы.

Целью настоящей работы является:

1. Разработка математических алгоритмов как для нахождения центров крестов /I этап/, так и для определения коэффициентов калибровочных преобразований /II этап калибровки/.

2. Создание соответствующих программ на базе разработанных алгоритмов и отработка методики калибровки телевизионной системы по двум вышеупомянутым наборам экспериментальных данных.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ЦЕНТРОВ КРЕСТОВ

Данные сканирования, полученные от телевизионной системы контроля, распаковываются, выделяются x и y координаты всех точек. Для каждого креста определяется прямоугольная область, в которую попадают все точки данного креста. В дальнейшем эти точки разделяются по плечам креста путем подгонки к известному образу креста так, как это описано в работах /5,6/. Крест здесь рассматривается не как совокупность двух

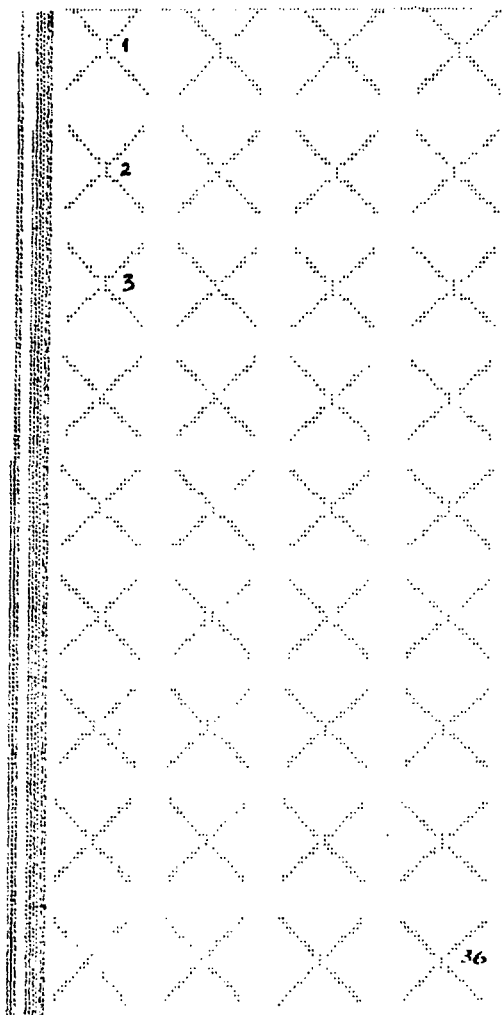


Рис. 2

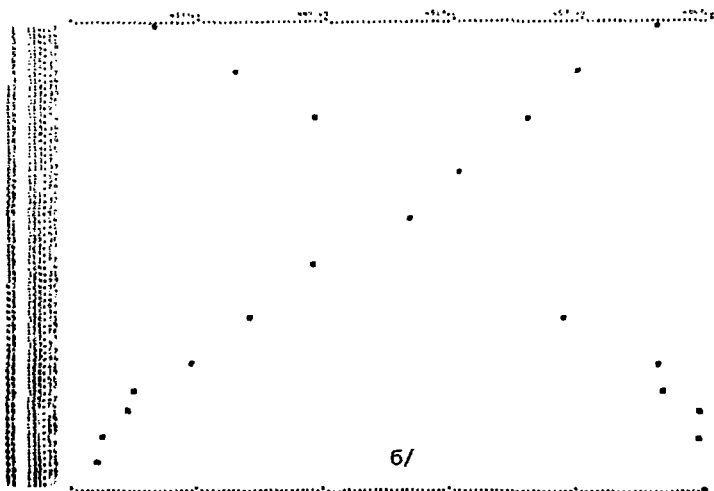
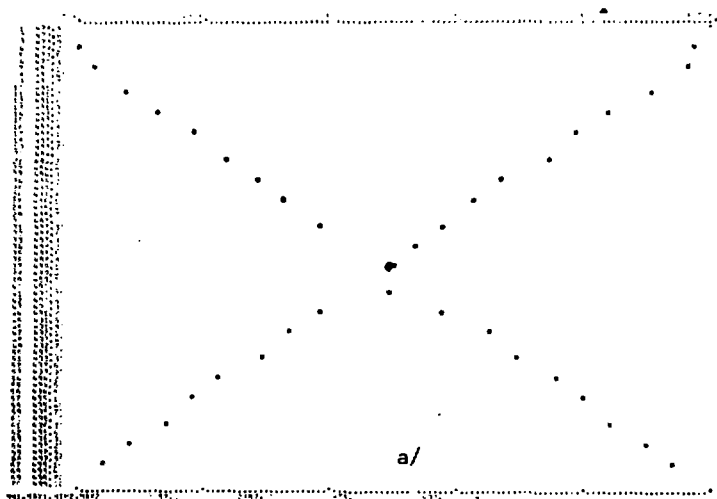


Рис. 3

независимых прямых, а как вырожденная кривая второго порядка. Важным параметром является ширина коридора, в котором находятся плечи, так как он определяет принадлежность точек к каждой из групп. Исследование данных сканирования, представленных на рис. 1 и 2, показало, что направление коридора можно считать приблизительно равным 45° , а в качестве начального приближения для центра креста можно выбрать центр тяжести всех его точек. Если крест сильно искажен из-за пропусков точек на плечах /рис. 3б/, то первоначальное положение центра креста задается извне с помощью уже найденных x, y координат крестов соседних крестов.

По точкам каждого плеча методом наименьших квадратов проводятся две прямые $y^{(k)} = A_k x^{(k)} + B_k$, $k = 1, 2$ с выбросом далеко отстоящих точек, а центры крестов находятся как точки пересечения этих прямых по известным формулам:

$$\begin{aligned} x_c &= (y_c - B_1) / A_1, \\ y_c &= (B_1 \cdot A_2 - B_2 \cdot A_1) / (A_2 - A_1). \end{aligned} \quad /1/$$

Среднеквадратические ошибки σ_{x_c} и σ_{y_c} определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{x_c}^2 &= \sqrt{\sigma_{x^{(1)}}^2 + \sigma_{x^{(2)}}^2}, \\ \sigma_{y_c}^2 &= \sqrt{\sigma_{y^{(1)}}^2 + \sigma_{y^{(2)}}^2}, \\ \sigma_{x^{(1)}}^2 &= \sigma_{y^{(1)}}^2 / A_1^2, \\ \sigma_{x^{(2)}}^2 &= \sigma_{y^{(2)}}^2 / A_2^2, \\ \sigma_{y^{(1)}}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^{N_1} (y_i^{(1)} - (A_1 x_i^{(1)} + B_1))^2}{N_1 - 2}, \\ \sigma_{y^{(2)}}^2 &= \frac{\sum_{i=1}^{N_2} (y_i^{(2)} - (A_2 x_i^{(2)} + B_2))^2}{N_2 - 2}. \end{aligned} \quad /2/$$

N_1 - число точек на первом плече, N_2 - на втором плече, $(x_i^{(1)}, y_i^{(1)})$, $(x_i^{(2)}, y_i^{(2)})$ - координаты точек обоих плеч.

Выходом работы алгоритма являются четыре массива данных: два из них - координаты центров и два - среднеквадратические ошибки этих координат.

ОПИСАНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ NIGEN

Назначение пакета программ NIGEN состоит в опознавании крестов и определении их центров. Он реализован на языке Фортран для IBM CDC-6500. Структура пакета представлена рис.4.

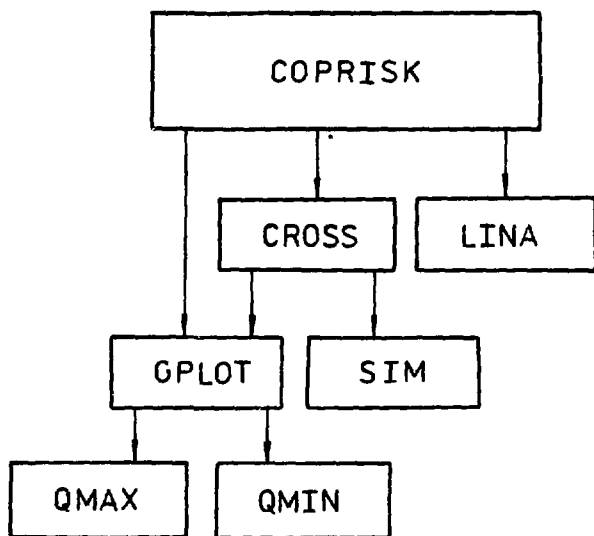


Рис.4

Программа COPRISK является основной и организующей. Она производит распаковку данных сканирования, выделяет x и y координаты, определяет область нахождения точек для каждого плеча, организует поиск центров всех крестов.

Программа GPLOT выдает на широкую печать картину зависимости массива y от массива x с нормировкой координаты, идущей поперек страницы.

Программа CROSS классифицирует точки каждого креста по двум группам, определяет координаты центра креста (x_c, y_c) и их ошибки (σ_x, σ_y) .

Программа SIM методом наименьших квадратов проводит прямую в области каждого плеча, вычисляет ее параметры A_k и B_k ($k=1,2$), находит дисперсии $\sigma_{x_k}^2$, $\sigma_{y_k}^2$ ($k=1,2$).

На рис.5 представлена общая логическая блок-схема NIGEN.

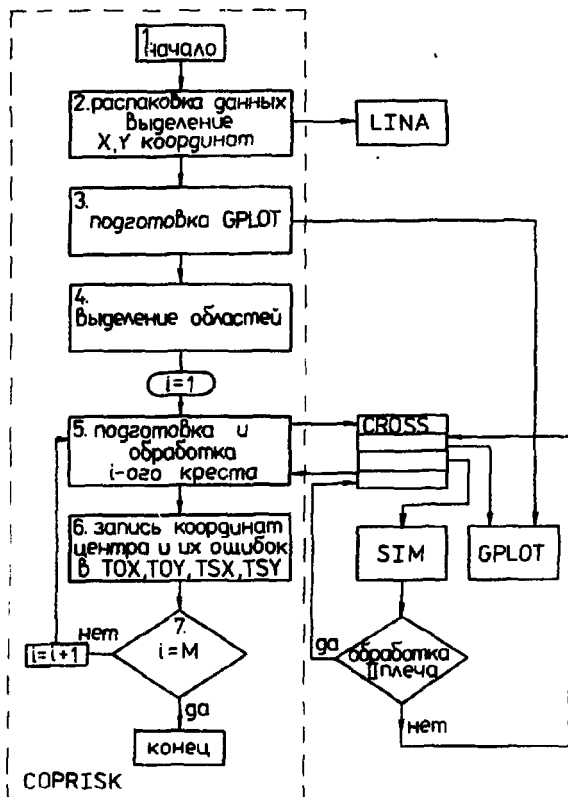


Рис. 5

Обращение к подпрограммам: GPlot, CROSS, SIM:

CALL GPlot (X, Y, K, N);

CALL CROSS (CX, CY, I1, XC, YC, SIGXC, SIGYC, C);

CALL SIM (X1, Y1, K, A1, B1, SX1, SX2, IBAD);

Значение параметров GPlot:

X - массив x -координат;

Y - массив y -координат;

K - число строк сканирования;

N - размерность массивов X и Y.

Значение параметров CROSS:

CX, CY - массивы x и y данного креста;
N - размерность массивов CX и CY;
XC, YC - координаты центра креста;
SIGXC, SIGYC - среднеквадратические ошибки.
Выходными параметрами здесь являются XC, YC, SIGXC, SIGYC.

Значение параметров SIM:

X1, Y1 - массивы x и y ;
K - размерность X1, Y1;
A1, B1 - оценки для параметров A, B прямой $y = Ax + B$;
SX1, SY1 - дисперсии σ_x^2, σ_y^2 ;
IBAD - параметр, определяющий режим работы. При этом, если он равен единице - плохой режим работы /мало точек/, равен нулю - нормальный режим.
Выходными параметрами являются A1, B1, SX1, SY1, IBAD.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

- а. Ширина коридора плеча в CROSS определяется параметром C.
- б. В SIM важными параметрами являются:
 1. SLIM, ограничивающий стандартное отклонение σ_y .
 2. DMX служит для ограничения максимального отклонения $\max |y_i - (Ax + B)|$.
- в. COPRISK связана с GPLOT через COMMON/XC/, где хранятся координаты центра XC, YC и параметр C. При C=1 определенным символом рисуется центр креста, вычисленный по формулам /1/, при C=0 - не рисуется.
- г. COPRISK связана с CROSS через COMMON/YL/, где находится значение ключа KYLIM, с помощью которого вычисляется первоначальное положение центра. При обработке хорошего креста задается KYLIM = 1, а при обработке искоженного KYLIM = 2, и первоначальное положение центра определяется в COPRISK.
- д. Значения параметров YLIM и SLIM задаются в программе CROSS, которая передает значение SLIM через COMMON/SL/ в SIM.
- е. Параметры KLBf, KLD, KLPR определяют режим печати в COPRISK.

ТРЕБУЕМЫЕ РЕСУРСЫ

Для чтения входных данных нужен магнитофон типа EC-5012 или системный диск. Объем оперативной памяти ЭВМ CDC-6500, необхо-

димый для COPRISK, составляет 28734 восьмеричных слов, GPLOT-466₈, CROSS - 575₈ и SIM - 267₈ слов.

Объем оперативной памяти для NIGEN и время счета зависят от количества обрабатываемых крестов и от значений параметров в COPRISK. Например, для девяти крестов объем памяти составляет приблизительно 45000₈ слов, а время счета вместе с распаковкой данных, подробной печатью и вызовом GPLOT для каждого плеча составляет 31 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПО АЛГОРИТМУ ПОИСКА ЦЕНТРОВ

а. На рис.1 показана часть реперных крестов стримерной камеры РИСК, зарегистрированных телевизионной системой. На каждом плече имеется приблизительно 18-20 точек. Из 16 крестов, изображенных на рисунке, надежно были обработаны 13 крестов /кроме 6,10,11/.

На рис.3а показан хороший крест, а на рис.3б - плохой, т.е. искаженный.

Таблица 1

Номер креста	x_c	y_c	σ_x	σ_y
1.	2184,7644	8,2256	118,7510	,5419
2.	2227,6592	11,9328	107,2792	,7542
3.	2264,0135	13,7573	271,1976	,8271
4.	2263,2896	7,9145	386,6719	,4643
5.	2234,0878	7,1415	488,9005	,4813
7.	3008,3624	9,7161	312,5790	,5757
8.	3015,5786	7,6857	550,9256	,5422
9.	3710,3943	16,9817	121,0508	1,0646
12.	4514,5983	10,5436	198,0072	,6038
13.	4533,6344	13,1969	271,2647	,7373
14.	4640,0391	9,2183	312,3104	,5139
15.	4601,6116	10,1424	486,6824	,6542
16.	4624,1780	8,3639	549,9591	,5692

Вычисленные координаты центров крестов x_c , y_c и их ошибки σ_{x_c} , σ_{y_c} даны в табл.1 в отсчетных единицах /Одна отсчетная единица для x - координаты равна 0,25 мм, а для y - координа-

Таблица 2

номер креста	X	Y	X _c	Y _c
1.	2660,868313	62,314899	9,527495	,830319
2.	2668,235147	119,306156	11,394830	1,125348
3.	2667,055644	174,816814	13,613076	1,252107
4.	2658,682742	229,269587	10,962842	1,010987
5.	2658,418524	282,203927	10,123594	,915187
6.	2652,640194	354,801649	8,200170	,741116
7.	2645,106358	387,7730088	9,216668	,8008489
8.	2626,964161	442,460693	11,206877	1,096860
9.	2616,450754	449,801428	9,296956	,902461
10.	3307,552058	62,330881	7,679469	,734923
11.	3296,638934	120,335343	7,819268	,698545
12.	3293,507338	175,869783	6,499282	,569736
13.	3288,959388	229,860030	7,478343	,636421
14.	3284,738990	283,115690	5,287372	,442792
15.	3276,743718	335,174056	10,488029	,881929
16.	3084,526006	338,366912	11,730352	,992774
17.	3255,090719	442,720966	12,461408	1,091803
18.	3245,026147	499,051447	8,854341	,809608
19.	3952,877005	62,564006	6,194334	,745813
20.	3938,419479	120,692377	8,486508	,744076
21.	3930,016483	176,578561	9,044692	,774776
22.	3923,375168	230,356978	10,480340	,875985
23.	3917,709298	282,956302	7,569785	,627441
24.	3910,631867	335,640020	5,445382	,440982
25.	3903,738172	388,774461	7,358127	,612818
26.	3892,625331	443,024980	5,525697	,477931
27.	3888,194433	499,700259	7,285908	,658495
28.	4612,420060	62,375322	9,193079	,843625
29.	4598,323048	120,700217	8,064795	,694644
30.	4588,580769	176,521239	6,992094	,744017
31.	4578,148327	230,4690331	6,706400	,711724
32.	4571,991514	283,167592	7,309307	,889321
33.	4564,404182	335,559507	6,136687	,656549

ты - 4,5 мм/. Из таблицы видно, что с наименьшей точностью найден центр девятого креста, так как этот крест оказался искаженным. Ниже приведены максимальные и средние значения остаточных ошибок в плоскости стримерной камеры РИСК:

$$\bar{R}_{x_c} = \frac{\sum_{i=1}^M |x_{c_i} - x_{c_i}^{ид}|}{M} = 12,49 \text{ мм},$$

$$R_{x_c}^{\text{макс}} = \max_i |x_{c_i} - x_{c_i}^{ид}| = 24,17 \text{ мм},$$

$$\bar{R}_{y_c} = \frac{\sum_{i=1}^M |y_{c_i} - y_{c_i}^{ид}|}{M} = 10,94 \text{ мм},$$

$$R_{y_c}^{\text{макс}} = \max_i |y_{c_i} - y_{c_i}^{ид}| = 21,75 \text{ мм}.$$

где $x_c^{ид}$, $y_c^{ид}$ - эталонные координаты центров крестов установки РИСК.

б. Результаты обработки данных сканирования эталонной решетки с 36 крестами, приведенными в табл.2, показывают, что алгоритм надежно работает, если кресты не сильно искажены и имеют достаточное количество точек /1 отсч.ед. по $x = 1,36 \cdot 10^{-2}$ мм, по $y = 1,14 \cdot 10^{-2}$ мм/.

Сравнивая результаты обработки экспериментальных данных в обоих случаях, следует сделать вывод о том, что предложенную методику /алгоритм и программы/ нахождения центров реперных крестов возможно использовать для калибровки телевизионной системы, если потери точек в плече креста составляют не более 40%. Для некоторых сильно искаженных крестов необходимо разработать отдельный алгоритм, например, на основе нахождения формы плеч программами, разработанными в /7/.

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ КАЛИБРОВочНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Пусть $X_i = (x_i^{ид}, y_i^{ид})$ - пара координат точки P_i измеряемой плоскости в некоторой идеальной системе декартовых координат, а $X_i^{изм.} = (x_i^{изм.}, y_i^{изм.})$ - пара координат этой же точки, полученная в результате измерения телевизионной системой.

Для количественных оценок точности таких измерений необходимо найти преобразования перехода ϕ от измеренных центров решетки к идеальным /прямая задача калибровки/ и ϕ^{-1} - от идеаль-

ных к измеренным /обратная задача/. Эти преобразования определяются как операторные уравнения первого рода

$$\begin{aligned} X &= \Phi X^{\text{изм.}}, \\ X^{\text{изм.}} &= \Phi' X, \end{aligned} \quad /3/$$

где отыскивается вид операторов Φ и Φ' .

Следует заметить, что такие задачи, как показано в монографии /8/, могут оказаться некорректными по Адамару.

Задача нахождения любого преобразования сводится к двум отдельным задачам теории линейной аппроксимации функции, относящимся к двум множествам координат.

Обозначим $\{a_{x_i}\}$ $\{a_{y_i}\}$ - элементы неизвестных векторов A_x и A_y , а $\{\phi_i\}$ - линейно независимые, непрерывные функции от двух переменных. Для прямой задачи требуется найти наилучшие линейные аппроксимирующие функции

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \sum_{i=1}^{n_p} a_{x_i} \phi_i(x, y) \\ \Phi_y &= \sum_{i=1}^{n_p} a_{y_i} \phi_i(x, y) \end{aligned} \quad /4/$$

конечного множества $\{x_i\}$ и $\{y_i\}$, которые являются значениями некоторых функций $F_x(x, y)$ и $F_y(x, y)$ от двух переменных, заданных в конечном числе точек $X_i^{\text{изм.}}$ с весами W_{x_i}, W_{y_i} в дискретной L_2 - норме.

Находя минимумы функций расстояния

$$\begin{aligned} L_2(W_x, \Phi_x - F_x) &= \sum_{i=1}^M (\Phi_x(x, y; A_x) - x_i)^2 W_{x_i}, \\ L_2(W_y, \Phi_y - F_y) &= \sum_{i=1}^M (\Phi_y(x, y; A_y) - y_i)^2 W_{y_i}, \end{aligned}$$

прямую задачу калибровки сводим к нахождению параметров калибровочных преобразований A_x, A_y . Очень важен выбор аппроксимирующих функций, в качестве которых, как правило, используются полиномы от двух переменных. Здесь возможна некорректность задачи, которая состоит в появлении плохо обусловленной матрицы систем нормальных уравнений. Если система $\{\phi_i\}$ содержит полиномы, ортогональные на конечном множестве $\{X_i\}$ матрица системы нормальных уравнений становится диагональной, и искомые коэффициенты линейной аппроксимации получаются простым путем. Тогда решение системы нормальных уравнений сводится к задаче поиска коэффициентов ортогональных полиномов.

В последнее время для калибровки измерительных систем широко применяются известные системы полиномов

$\{\phi_1\}$: $\{1, x, y, x^2, xy, \dots, y^n\}$
и $\{\phi_2\}$ - ортогональные на единичном квадрате $\langle -1, 1 \rangle \times \langle -1, 1 \rangle$. На-

пример, в работ^{/9/} для калибровки сканирующего автомата используется $\{\phi_1\}$, в^{/10/} $\{\phi_1\}$ предлагается для обратной калибровочной задачи, а для прямой задачи, где количество измеренных точек велико из-за многократных измерений, наиболее целесообразно применять $\{\phi_2\}$ полиномы, так как при этом получается приблизительно диагональная матрица, что облегчает решение системы нормальных уравнений. Так как центры реперных крестов стримерной камеры РИСК расположены в узлах неравномерной сетки /см. рис.1/, нам необходима такая система полиномов $\{\phi_3\}$, для которой существуют ортогональность на дискретном множестве точек, разные веса W_{x_i} , W_{y_i} и неравномерный шаг по x и y осям. Если расположение реперных крестов в дальнейшем на РИСКе будет иметь вид равномерной сетки, то для калибровки телевизионной системы можно использовать системы полиномов $\{\phi_1\}$, $\{\phi_2\}$.

Всем этим условиям удовлетворяют ортонормированные полиномы от двух переменных с произвольными весами на дискретном множестве точек, описанные в^{/11/}. Здесь ортонормировка осуществляется при помощи рекурсивных формул, аналогично трехчленному рекуррентному соотношению Форсайта для одной переменной^{/7/}. В^{/11/} также описан n -мерный алгоритм, а для двумерного случая приведены его основные параметры и дано краткое описание программной реализации. Здесь мы остановимся более подробно на свойствах этих ортонормированных полиномов применительно для нашей задачи.

Представим x, y координаты в виде разложения по системе полиномов:

$$x_j = \sum_{i=1}^{n_p} a_{x_i} \phi_i(x_j^{ИЗМ.}, y_j^{ИЗМ.}),$$

$$y_j = \sum_{i=1}^{n_p} a_{y_i} \psi_i(x_j^{ИЗМ.}, y_j^{ИЗМ.}),$$

$$x_j^{ИЗМ.} = \sum_{i=1}^{n_p} a'_{x_i} \psi_i(x_j, y_j),$$

$$y_j^{ИЗМ.} = \sum_{i=1}^{n_p} a'_{y_i} \phi_i(x_j, y_j),$$

/6/

где n_p - число членов разложений для каждой степени n полиномов, а $\{\phi_i\}$ и $\{\psi_i\}$ - полиномы типа $\{\phi_3\}$ соответственно для прямой и обратной задач. Эти системы удовлетворяют следующим условиям ортонормировки на дискретном двумерном множестве $\{x_j^{ИЗМ.}\}$ или $\{X_i\}$, $i = 1, \dots, M$.

$$\sum_{j=1}^M \phi_i(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}) W_{x_j} \phi_k(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}) = \delta_{ik},$$

$$\sum_{j=1}^M \phi_i(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}) W_{y_j} \phi_k(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}) = \delta_{ik},$$

$$\sum_{j=1}^M \psi_i(x_j, y_j) W_{x_j} \psi_k(x_j, y_j) = \delta_{ik},$$

$$\sum_{j=1}^M \psi_i(x_j, y_j) W_{y_j} \psi_k(x_j, y_j) = \delta_{ik},$$

/7/

где δ_{ik} - символ Кронекера.

Тогда искомые коэффициенты аппроксимации получаются по следующим формулам:

$$a_{x_i} = \sum_{j=1}^M x_j W_{x_j} \phi_i(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}),$$

$$a_{y_i} = \sum_{j=1}^M y_j W_{y_j} \phi_i(x_j^{\text{ИЗМ.}}, y_j^{\text{ИЗМ.}}),$$

$$a'_{x_i} = \sum_{j=1}^M x_j^{\text{ИЗМ.}} W_{x_j} \psi_i(x_j, y_j),$$

$$a'_{y_i} = \sum_{j=1}^M y_j^{\text{ИЗМ.}} W_{y_j} \psi_i(x_j, y_j).$$

/8/

Если системы $\{\phi_j\}$ и $\{\psi_j\}$ созданы, то коэффициенты калибровочных преобразований получаются посредством суммирования выражений /8/.

На рис.6 представлена блок-схема работы алгоритма поиска калибровочных преобразований при сканировании реперных крестов, расположенных в узлах сетки с неравномерным шагом.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА НАХОЖДЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Применение $\{\phi_1\}$, $\{\phi_2\}$, $\{\phi_3\}$ обусловило определенный набор программ. Для отработки методики по $\{\phi_1\}$ и $\{\phi_2\}$ использовалась программа GENCAL, описанная в /10/ с внесением некоторых изме-

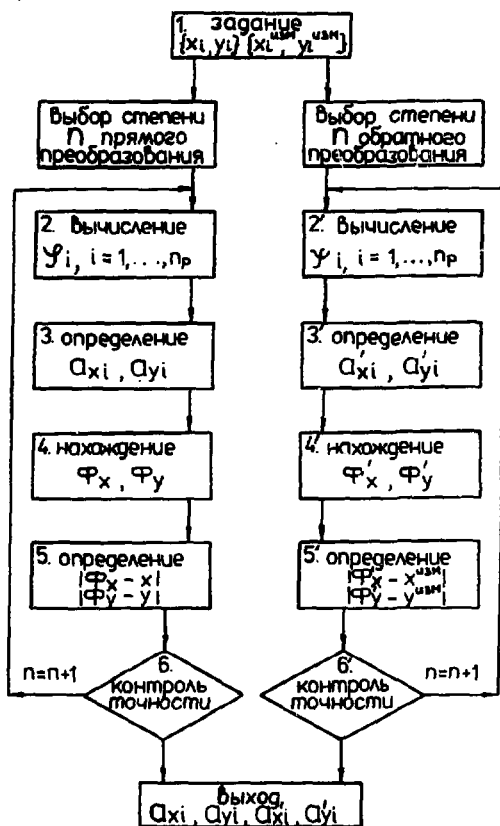


Рис. 6.

нений в построение идеальной решетки. Была создана главная организующая программа, которая определяет основные параметры для вызова GENCAL; видоизмененный GENCAL получил название NGENCAL.

Для построения $\{\phi_3\}$ /блок 2 на рис.6/ использованы программы PRETWO, ORTTWO, DEGREE, FUNCTION NUMBER, аналогичные опубликованным в работе¹¹. Для реализации части данного алго-

ритма, которая касается блоков 1,3÷6, на рис.6 создана программа NITWO.

Таким образом, для нахождения калибровочных коэффициентов с использованием системы полиномов $\{\phi_3\}$ создан необходимый пакет программ, получивший название NIVA2, подробное описание которого будет опубликовано позднее.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

а. Для данных, полученных с установки РИСК, калибровочные коэффициенты вычисляются с помощью $\{\phi_3\}$ как для прямого, так и для обратного преобразования с весами $W_{x_i} = \frac{1}{\sigma_{x_i}^2}$, $W_{y_i} = \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}$, где σ_{x_i} и σ_{y_i} получены в процессе поиска центров крестов по

13 точкам. Максимальная степень полиномов могла быть только $n=4$, так как более высокие степени требуют больше, чем 13 точек. Аппроксимация для определения коэффициентов проводилась по нормализованному χ^2 и максимальному отклонению $R^{\text{макс}} = \max |F_i - F_i^i|$. В табл.3 представлены результаты для $F=x^{\text{ид}}$, $F=y^{\text{ид}}$, $F=x^{\text{изм}}$,

$F=y^{\text{изм}}$. Из таблицы видно, что результат вычисления по обратному преобразованию получен более точный, так как в этом случае используются эталонные x, y координаты центров крестов, в то время как для прямой задачи мы используем данные, имеющие погрешности от измерения /табл.1/. Сравнивая максимальные отклонения, приведенные в табл.3, с результатами максимальных отклонений $R_{x_e}^{\text{макс}}$, $R_{y_e}^{\text{макс}}$ на стр. 5, видим, что аппроксимация через $\{\phi_3\}$ существенно улучшает точность измерений даже при небольшом количестве исходных точек /в данном случае 13/.

б. Для данных на рис.2 необходимые идеальные координаты центров крестов эталонной решетки были получены на ПУОС. В процессе вычисления калибровочных коэффициентов использовались независимые пакеты NCENCAL и NIVA2.

На рис.7 показаны гистограммы расстояний $R = \sqrt{DX^2 + DY^2}$ между идеальными и преобразованными точками для прямой и обратной задач, полученные по NCENCAL с помощью $\{\phi_1\}$ и $\{\phi_2\}$ для пятой степени полиномов.

Гистограммы и результаты вычислений показывают, что системы $\{\phi_1\}$ и $\{\phi_2\}$ могут быть использованы для нашей задачи калибровки. Для проверки применимости $\{\phi_3\}$ полиномов были вычислены калибровочные преобразования для $F=x^{\text{ид}}$ для 4,5 и 6 степени. Результаты даны в табл.4. Значения $R^{\text{макс}}$ и R показывают, что необходимо выбрать степень $n=8$. Однако очень близкие значения χ^2 для $n=5$ и 6, а также число членов /соот-

Таблица 3

Преобразования				
Прямое			Обратное	
F	Y	X	Y ^{ИЗМ.}	X ^{ИЗМ.}
Число членов	12	12	12	12
Макс. степень	4	4	4	4
Макс. отклонение /мм/	0,201	0,623	0,064	0,144

Таблица 4

Макс. степень полиномов	Число членов	Норм. χ^2	Номер креста с макс. отклонением	$R^{\text{макс.}}$, мм	\bar{R} , мм
4	7	$0,456 \cdot 10^{-2}$	7	$0,425 \cdot 10^{-1}$	$0,147 \cdot 10^{-1}$
5	20	$0,422 \cdot 10^{-2}$	17	$0,211 \cdot 10^{-1}$	$0,977 \cdot 10^{-2}$
6	26	$0,409 \cdot 10^{-2}$	22	$0,171 \cdot 10^{-1}$	$0,515 \cdot 10^{-2}$

ветственно 20 и 26/ указывает на то, что более подходящей является пятая степень.

Таким образом, первые результаты применения $\{\varphi_3\}$ показывают целесообразность их применения при калибровке телевизионных измерительных систем как с вычислительной точки зрения, так и для достижения заданной точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием двух наборов экспериментальных данных, полученных на телевизионной системе контроля стримерной камеры РИСК и стендовой телевизионной установке, проведены методические исследования по калибровке телевизионной бесфильмовой системы съема данных со стримерных камер.

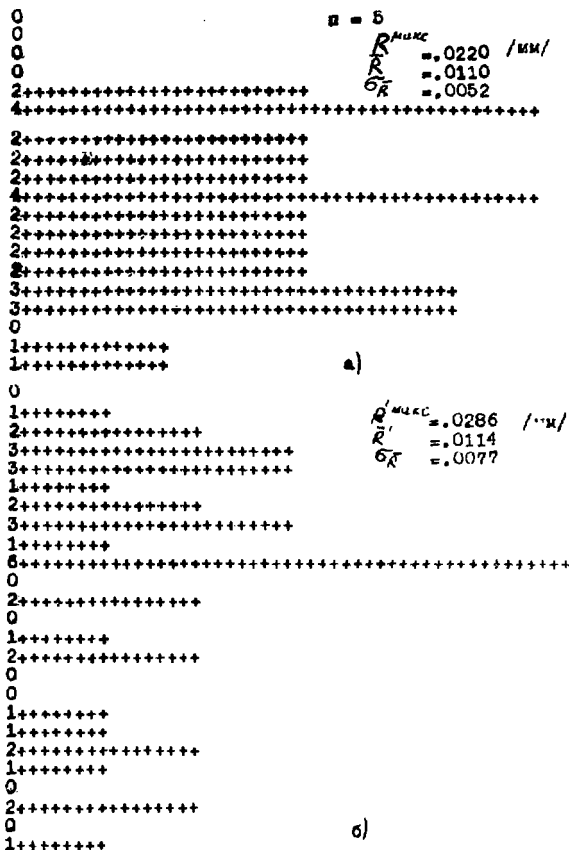


Рис. 7

Калибровка телевизионной системы состоит из двух этапов. На первом работает алгоритм поиска центров реперных крестов. Описан пакет программы NIGEN, реализующий данный алгоритм.

Результаты вычислений, приведенные в табл. 1 и 2, показывают, что нахождение координат центров крестов по данному алгоритму проводится надежно, если плечи крестов имеют потери точек не более 40%. Для сильно искаженных крестов необходимо разработать отдельный алгоритм.

На втором этапе калибровки определяются калибровочные коэффициенты. С этой целью рассматриваются системы полиномов $\{\phi_1\}$, $\{\phi_2\}$, $\{\phi_3\}$, из которых $\{\phi_2\}$ и $\{\phi_3\}$ являются ортогональными. Для построения $\{\phi_3\}$ используется метод ортонормированных полиномов, описанный в работе [11], что позволяет отказаться от решения системы нормальных уравнений.

Основные точностные параметры, такие, как максимальное отклонение, среднее и среднеквадратичное отклонения, приведены в табл. 3, 4, гистограммы остаточных ошибок по полю на рис. 7 показывают, что выбранные системы $\{\phi_2\}$ и $\{\phi_3\}$ можно с успехом использовать для калибровки телевизионной системы, имея в распоряжении калибровочную сетку как с равномерным, так и с неравномерным шагом.

Проведенные исследования не ставили целью определения точностных характеристик телевизионной системы. Это является дальнейшей задачей в наших исследованиях по калибровке ТВ-системы бесфильмового съема данных с установки РИСК.

Авторы выражают благодарность В.А.Бутенко, В.А.Дроздову, А.А.Меньшикову, В.А.Приходько за полезные обсуждения, а также И.Байле, В.Гаджикову за помощь и А.А.Карлову за интерес к работе и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bohm G. et al. Five Meter Magnetic Spectrometer Based on a Streamer Chamber. Proc. of the First Int. Conf. on Streamer Chamber Technology, September 1972, p.117.
2. Алексеева Н.П. и др. ОИЯИ, 61-13-80-133, Дубна, 1980.
3. Бечер Ю. и др. В кн.: Материалы Второго всесоюзного семинара по обработке физической информации. Ереван, сентябрь, 1977, с.428.
4. Алексеева Н.П. и др. В кн.: Материалы семинара по обработке физической информации. Агверан, сентябрь, 1975, с.420.
5. Ососков Г.А. ОИЯИ, P5-9787, Дубна, 1976.
6. Ососков Г.А., Комолова В. ОИЯИ, P10-11290, Дубна, 1978.
7. Гаджиков В.И., Богданова Н.Б. ОИЯИ, P11-80781, Дубна, 1979.
8. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Метод решения некорректных задач. "Наука", М., 1979.
9. Карлов А.А., Сенченко В.А. ОИЯИ, P10-11155, Дубна, 1977.
10. Байла И., Ососков Г.А. ОИЯИ, P10-11834, Дубна, 1978.
11. Gadjokov V. JINR, E11-80782, Dubna, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 июля 1981 года.