

ԵՐԵՎԱՆԻ ԶՐԶՐԿԱՅԻՆ ԻՆՏԻՏՈՒՏ  
ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ԳԻՏԱԿԱՆ ՀԱՂՈՐԴՈՒՄ ՆԱՍԿԻՆԵ ՏՈՅԵՑԻՄԵ

ЕФИ—139(75)

ՏՈՒՐԿՈՒՄ 400

И.Е.ВАСИНЮК, А.М.ЗВЕРЕВ

КАЛИБРОВКА НРД ЕФИ

ԱՐՄՍ

ԵՐԵՎԱՆ

1975



ЕРЕВАН

Scientific Report ЕФН-139(75)

I. E. VASSINIUK, A. M. ZVEREV

*Ref.*  
HPD CALIBRATION

A method of the HPD calibration based on the matching of the coordinates of the handled film fiducial crosses measured in orthogonal modes is described. The calibration is performed in two stages. Episodically are measured the scanline characteristics and regularly is executed the calibration for the determination of linear functions coefficients and for obtaining the corrections for coordinate normalization.

Yerevan Physics Institute  
Yerevan 1975

УДК. 621.398

Научное сообщение ЕФИ-139 (75)

И.Е.ВАСИНЮК, А.М.ЗВЕРЕВ

КАЛИБРОВКА НРД Ефи

Описывается способ калибровки НРД, основанный на согласовании координат реперных крестов обрабатываемого фильма, измеренных в ортогональных модах. Калибровка проводится в два этапа. Эпизодически измеряются характеристики сканирующих линий, и регулярно проводится калибровка для нахождения коэффициентов линейных функций и получения поправок для нормализации координат.

Ереванский физический институт  
Ереван 1975

**ЕРЕВАНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**Научное сообщение ЕФИ- 139(75)**

**И.Е.ВАСИНЮК, А.М.ЗВЕРЕВ**

**КАЛИБРОВКА НРД ЕФИ**

**Ереван 1975**

© *Ереванский физический институт, 1975*

Положение измеряемых точек снимка определяется на НРД при помощи двух систем координат: — базовой и системой сканирования. Базовая координатная система состоит из отсчетных устройств кареток  $X$  и  $W$ ; точность отсчета координат вдоль её осей, определяется точностью решеток фотоэлектрических головок, а перпендикулярность координатных осей — перпендикулярностью направлений перемещения кареток. При калибровке базовая система координат принимается в качестве базовой. Калибровка должна заключаться в согласовании системы координат сканирования с базовой системой.

Если сканирующие линии — прямые, параллельные соответствующим осям  $X$  и  $W$ ; цена отсчета, задаваемая опорными решетками, — постоянна вдоль сканирующей и равна отсчету базовой системы, а начало координат системы сканирования совпадает с началом отсчета по опорным решеткам, то координаты измеряемой точки относительно, произвольно выбранного начала координат могут быть записаны следующим образом:

а) при нормальном сканировании

$$\begin{aligned} x_n &= Y_n + W, \\ y_n &= X, \end{aligned} \tag{1a}$$

б) при ортогональном сканировании

$$\begin{aligned} x_o &= W, \\ y_o &= Y_o + X, \end{aligned} \tag{1б}$$

где  $X, W$  - координаты платформ в базовой системе  
 $Y_n, Y_0$  - координаты измеряемых точек в системе  
 сканирования.

В действительности, все три вышеперечисленные условия не имеют места. Сканирующая линия не является прямой, а цена отсчета вдоль её длины непостоянна; начала сканлиний смещены относительно точки их пересечения. Исходная ориентация сканлиний относительно осей базовой системы, а также установка средней цены отсчета, близкой к цене отсчета базовой системы, достигается путем регулировок, предусмотренных в НРД.

При таких условиях результаты измерений координат одной и той же точки, перемещающейся вдоль сканлинии, не совпадают, а являются функцией расстояния точки от начала сканлиний:

$$\begin{aligned} Y_n + W &= x_n + f_{cn}(Y_n), \\ X &= Y_n + f_{kn}(Y_n), \\ Y_0 + X &= Y_0 + f_{co}(Y_0), \\ W &= x_0 + f_{ko}(Y_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Указанные функции, как явствует из экспериментов, являются неизменными в части своей кривизны, происходящей, по-видимому, от искажений в оптических устройствах. Однако, с течением времени и изменением внешних условий происходят изменения, которые по совокупности воздействия на конечный результат можно трактовать как перекося сканлиний относительно осей базовой системы и изменение масштаба опорных решеток.

Поправки на такие изменения могут быть представлены в виде линейных функций расстояния измеряемой точки от начала сканлинии.

Таким образом, нормализованные координаты приобретают вид:

$$\begin{aligned}
 x_n &= Y_n + W - f_{cn}(Y_n) + (C_n - 1) \cdot Y_n + A, \\
 y_n &= X - f_{kn}(Y_n) + K_n \cdot Y_n, \\
 x_0 &= W - f_{c0}(Y_0) + K_0 \cdot Y_0, \\
 y_0 &= Y_0 + X - f_{co}(Y_0) + (C_0 - 1) \cdot Y_0 + B.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Физическая сущность параметров, входящих в выражение для нормализованных координат:

- $f_c(Y)$  - функция, характеризующая изменение цены отсчета опорной решетки вдоль сканлинии
- $f_k(Y)$  - функция, описывающая кривизну сканлинии
- $C$  - отношение средней цены отсчета сканирующей системы к цене отсчета базовой системы
- $K$  - тангенс угла между сканлинией и соответствующей осью базовой системы
- $A$  и  $B$  - расстояния от точек начала отсчета до точки пересечения сканлиний.

Задача калибровки - определение этих параметров - разбивается на два этапа:

- 1) Исходная и контрольная калибровка, при которой определяются коэффициенты функций  $f_c$  и  $f_k$ .
- 2) Регулярная калибровка, при которой определяются и оперативно вносятся в программу нормализации координат параметры  $C$ ,  $K$ ,  $A$  и  $B$ .

Для определения функций  $f_c$  и  $f_k$  выбрана следующая методика. В качестве измеряемой точки принимается центр креста с наклоном ветвей в  $45^\circ$  к координатным осям. Производится многократное сканирование этого креста различными участками сканлинии, для чего неподвижная платформа при каждом сканировании устанавливается в дискретные положения с заданным шагом. Центр

креста определяется статистическими методами обработки данных, причем для повышения достоверности выбирается довольно большое число точек для каждого сканирования (100-200) и производится жесткая отбраковка по их разбросу (менее 2 отсчетов).

В результате двух видов (нормального и ортогонального) многократных измерений получаются четыре совокупности координат:

- для нормального сканирования

$$Y_{ni} + W_i = F_{cn} (Y_{ni}), \quad (4a)$$

$$X_i = F_{kn} (Y_{ni})$$

- для ортогонального сканирования

$$Y_{oi} + X_i = F_{co} (Y_{oi}), \quad (4b)$$

$$W_i = F_{ko} (Y_{oi}).$$

Для выделения совокупности данных, характеризующих только кривизну соответствующих функций, из полученных совокупностей вычитаются линейные компоненты:

$$f(Y_i) = F(Y_i) - (a + b Y_i), \quad (5)$$

где  $a$  и  $b$  - коэффициенты прямой, аппроксимирующей соответствующую совокупность данных.

Вычисленное таким образом распределение отклонений носит регулярный характер и достаточно хорошо аппроксимируется тригонометрическими функциями или многочленом третьей или пятой степени. Ввиду сложности алгоритмов тригонометрических функций для аппроксимации выбран полином 5-ой степени.

Шаг платформы при обоих видах сканирования выбран

равным 0,5мм, что дает 100-120 точек на длине скани-  
нии. Разброс точек, вычисленных для центра креста, не  
превышает 1 отсчета базовой системы координат.

Функции  $f_c$  и  $f_k$  характеризуются размахом около  
5 отсчетов для нормального и около 10 отсчетов для ор-  
тогонального сканирования, что составляет соответствен-  
но 10 и 20 мкм. Игнорирование этих зависимостей воз-  
можно только при грубых измерениях.

Графики функций приведены на рис.2.

При регулярной калибровке используются реперные  
кресты обмеряемого фильма. Для ограничения потока  
данных, не используемых при калибровке, вводятся "элек-  
тронные маски", выделяющие зоны крестов [5]. Этим  
достигается повышение числа точек на каждом кресте, и,  
соответственно, достоверности определения координат их  
центров.

Измерения производятся в двух модах - нормальной и  
ортогональной. Сущность калибровки заключается в том,  
чтобы скорректированные координаты, определяемые сис-  
темой сканирования, наилучшим образом сходились с  
координатами, определяемыми базовой системой, принятой  
за образцовую.

В принципе, для определения 6 калибровочных коэффи-  
циентов достаточно 3 креста. Однако, чтобы повысить  
точность измерений и получить данные достоверности по-  
лученных коэффициентов, нами принято измерение 9 крес-  
тов, расположенных в двух смежных кадрах. При измере-  
нии в каждой моде кресты схватываются одной сканиру-  
ющей линией.

Измерение в двух модах даёт совокупности координат,  
нормализованных согласно выражениям (3), в которых  
коэффициенты  $K$  полагаются равными единице, а  $C$ ,  $A$   
и  $B$  - нулю. По полученным точкам вычисляются цент-  
ры всех крестов в нормальной и ортогональной модах:

$X_{3ni}$ ,  $Y_{3ni}$  и  $X_{3oi}$ ,  $Y_{3oi}$ .

Далее составляются выражения:

$$\begin{aligned}
 x'_{sni} &= x_{sni} + (C_n - 1) \cdot (x_{sni} - W) + A, \\
 y'_{sni} &= y_{sni} + K_n \cdot (x_{sni} - W), \\
 x'_{soi} &= x_{soi} + K_o \cdot (y_{soi} - X), \\
 y'_{soi} &= y_{soi} + (C_o - 1) \cdot (y_{soi} - X) + B,
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

где  $W$  или  $X$  - координата неподвижной платформы в соответствующей моде сканирования  
 $C, K, A$  и  $B$  - искомые калибровочные коэффициенты.

Критерием определения коэффициентов является минимальная дисперсия отклонений между значениями координат центров соответствующих крестов, полученными при различных модах сканирования: -

$$S = \sum_{i=1}^n (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2), \tag{7}$$

где

$$\Delta x_i = x'_{sni} - x'_{soi},$$

$$\Delta y_i = y'_{sni} - y'_{soi}.$$

Вычисление коэффициентов производится по программе минимизации. Показатель точности проведенной калибровки записывается в виде среднеквадратичного разброса

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_{min}}{n}}. \tag{8}$$

Реальное значение этого разброса колеблется в пределах 0,3 - 0,6 отсчета (приложение ).

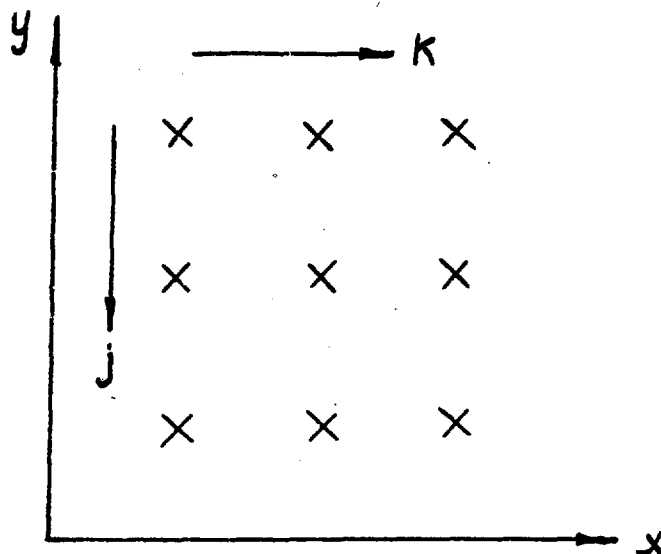


Рис.1

Проверка соответствия криволинейных функций, найденных при исходной калибровке, действительным значениям этих функций в момент регулярной калибровки делается путем анализа отклонения  $\Delta x_{jk}$  и  $\Delta y_{jk}$  в соответствующих направлениях (рис.1). Выражения для "прогибов" отклонений в данных направлениях определяют степень изменения кривизны соответствующих исходных функций:

$$\begin{aligned}
 \delta_{сн} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left( \Delta x_{j2} - \frac{\Delta x_{j1} + \Delta x_{j3}}{2} \right), \\
 \delta_{кo} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left( \Delta x_{2k} - \frac{\Delta x_{1k} + \Delta x_{3k}}{2} \right), \\
 \delta_{кн} &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 \left( \Delta y_{j2} - \frac{\Delta y_{j1} + \Delta y_{j3}}{2} \right), \\
 \delta_{сo} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 \left( \Delta y_{2k} - \frac{\Delta y_{1k} + \Delta y_{3k}}{2} \right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Индексы прогибов указывают функцию (2), изменение которой они определяют. Если какой-либо прогиб превышает заданный предел, например,  $\pm 1$  отсчет, это указы-

вает на необходимость проведения контрольной калибровки.

Калибровка завершается программой введения найденных функции и откорректированных коэффициентов в рабочую программу нормализации координат. Поскольку функции аппроксимированы полиномами третьей или пятой степени, то аналитическое их задание приводит к чрезмерным затратам машинного времени на нормализацию одной пары координат (около 50 мс на ЭВМ РДР-9). Табличное задание резко (на 2-3 порядка) снижает эти затраты.

Таблицы составляются для следующих выражений:

$$D_{xH} = -f_{cH}(Y) + (C_H - 1) \cdot Y + A,$$

$$D_{yH} = -f_{kH}(Y) + K_H \cdot Y,$$

$$D_{x0} = -f_{k0}(Y) + K_0 \cdot Y, \quad (10)$$

$$D_{y0} = -f_{c0}(Y) + (C_0 - 1) \cdot Y + B.$$

Шаг квантования выбран равным 1,024 мм с определением функций в середине интервала.

Процедура калибровки производится на любом кадре обрабатываемого фильма и занимает около 3 минут.

Авторы считают приятным долгом выразить признательность А.С.Нанасяну за полезные консультации и постоянную помощь в работе.

Приложение

CN	1.000575	CO	1.000065
KN	-0.000048	KO	-0.000187
A	-2967.78	B	10531.19

DX			DY			DR		
-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.0	0.4	0.3	0.1
0.8	0.4		0.4	-0.4		0.9	0.5	
-0.4	-0.3	0.2	-0.0	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.3

SR = 0.41

CN	1.000533	CO	1.000088
KN	-0.000046	KO	-0.000130
A	-2965.99	B	10531.26

DX			DY			DR		
0.0	-0.4	-0.1	0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.4	0.1
0.8	-0.0		0.2	0.1		0.8	0.1	
-0.5	-0.3	0.4	-0.3	-0.0	0.2	0.5	0.3	0.5

SR = 0.36

CN	1.000586	CO	1.000084
KN	-0.000020	KO	-0.000194
A	-2968.37	B	10531.95

DX			DY			DR		
-0.2	-0.3	0.1	0.1	0.0	-0.1	0.2	0.3	0.1
0.8	-0.1		0.3	-0.4		0.9	0.4	
-0.2	-0.4	0.3	-0.3	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4

SR = 0.38

SCN	1.000565	SCO	1.000079
SKN	-0.000038	SKO	-0.000170
A	-2967.38	B	10531.47

Пример распечатки результатов  
регулярной калибровки

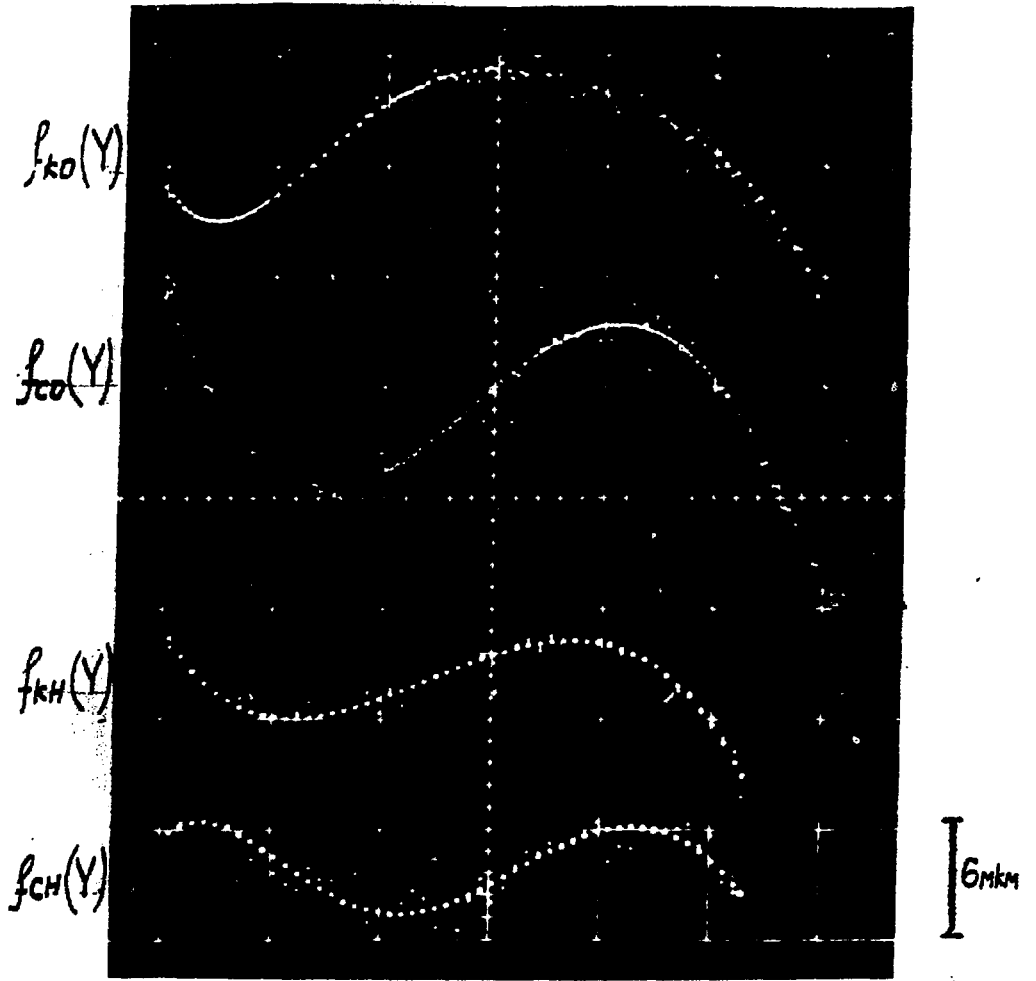


Рис. 2

## ЛИТЕРАТУРА

1. M. Benot, B. W. Evershed, R. Messerli, B. W. Powell. "The HPD Mark 2 Flying Spot Digitizer at CERN". CERN 68-4 1968.
2. В. П. Милюткин, В. Н. Шигаев. "Калибровка отсчетной системы сканирующего автомата типа НРД". ОИЯИ, 10-5972, (1971).
3. Э. А. Кнорин, Г. А. Эрлихман. "Калибровка сканирующего автомата НРД". Труды РТИ АН СССР, "Обработка информации", 13, (1973).
4. И. Е. Василюк, А. М. Зверев, А. С. Нанасян. "Калибровка проектора для обработки снимков трековых камер Лусик-2". ЕФИ-121(75).
5. И. Е. Василюк, А. С. Нанасян. "Фильтрация информации с установки для обработки камерных снимков НРД в реальном масштабе времени". ЕФИ-80(74).

Рукопись поступила 23 -го июня 1975г.



Редактор Л.П.Мухаян  
Тех.редактор А.С.Абрамян

Заказ 311

ВФ- 03418

Тираж 299

---

Подписано к печати 3/IX-75г.      Формат издания 30x40  
0,7 уч.изд.л. Ц. 5 к.

---

Отпечатано на роталпринте  
Ереванского физического института, Ереван, 36, пер.Мар-  
каряна 2