

Ц 845

Ш-559

5003/2-76

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

13/ХII-76



10 - 10087

В.Н.Шигаев

ПАКЕТ ПОДПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ
ВЫДЕЛЕНИЯ СЕРЕДИНЫ ТРЕКОВОГО СИГНАЛА
В ОТСЧЕТНОМ КАНАЛЕ СКаниРУЮЩЕГО АВТОМАТА

1976

10 - 10087

В.Н.Шигаев

ПАКЕТ ПОДПРОГРАММ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ
ВЫДЕЛЕНИЯ СЕРЕДИНЫ ТРЕКОВОГО СИГНАЛА
В ОТСЧЕТНОМ КАНАЛЕ СКАНИРУЮЩЕГО АВТОМАТА



Одним из источников систематической ошибки в результатах измерений снимков на сканирующем автомате является систематическая ошибка в выделении координаты середины трекового сигнала в отсчетном канале автомата. Эта ошибка носит скрытый характер, т.к. обычно применяемые методы контроля качества измерений в рабочих программах в этом случае не работают: гладкость измеряемых треков не нарушается, дисперсия отсчетов остается на прежнем уровне, графическое представление результатов измерений не выявляет нарушения работоспособности отсчетного канала автомата. В то же время неточность выделения середины трекового сигнала может на практике приводить к значительной ошибке. Так, например, при отсчете координаты по переднему или заднему фронту трекового сигнала сдвиг координаты составит половину ширины трека (ширина большинства треков на снимках с пузырьковых камер находится в пределах 20–100 мкм). При сшивании трека из двух сегментов, измеренных при поперечном и продольном сканировании снимка, ошибка возрастает еще в $\sqrt{2}$ раз.

Для экспериментов, где фильм сканируется при одной ориентации раstra автомата, возникающая ошибка измерений систематического характера зависит от разброса толщин объектов на снимке. Максимальная ширина трекового сигнала при сканировании калибровочного снимка с крестами и снимков с искрового магнитного спектрометра МИС превышает 200 мкм. В этом случае даже небольшая относительная погрешность в работе схемы выделения середины трекового сигнала приводит к систематической ошибке, во много раз превосходящей статистический разброс измеренных точек объекта. В то же

время точная настройка схемы выделения середины сигнала только инженерными средствами является весьма деликатной операцией, точность выполнения которой количественно оценить трудно, тем более оперативно.

Первая и главная проблема, которую надо было решить, заключалась в разработке методики контроля точности выделения середины трекового сигнала, написании и отладке соответствующих подпрограмм. Контроль должен при этом быть оперативным, достаточно точным и не должен требовать проведения каких-либо дополнительных операций, помимо тех, которые ежедневно проводятся обслуживающим персоналом в процессе подготовки сканирующего автомата к сеансу измерений.

Вторая проблема заключалась в разработке программных средств контроля режима работы отсчетного канала, который исключал бы появление "духов" (многократных отсчетов координат в границах трекового сигнала, приводящих к эффекту дублирования трека при значительном отклонении режима от оптимального).

Третья проблема состояла в разработке программных средств обнаружения экзотической, но имевшей место на практике поломки интерполятора в отсчетном канале, при которой 4 младших двоичных разряда координат принимали случайное значение 0 или 1 с равной вероятностью.

Исследование точности выделения середины трекового сигнала принято проводить, анализируя данные измерений специально для этой цели созданных тестовых снимков. Чтобы удовлетворить поставленным выше условиям, разработан оригинальный метод, обеспечивающий получение оценки точности выделения середины трека в процессе обычной калибровки отсчетной системы автомата, когда мы сканируем стандартный калибровочный снимок, содержащий 50 косых реперных крестов (плечи крестов под углом 45°). В программе калибровки отсчетной системы НРД^{1/} было модифицировано несколько подпрограмм (CALIBR, GATE, FIDUC, NXFID). Модифицированные версии этих подпрограмм обеспечивают сопряжение прежней калибрующей программы с новым пакетом подпрограмм (CRSS, HISTOC, INIHIS, OUTHIS), решающих поставленные выше проблемы.

Для большей ясности изложения новых возможностей калибрующей программы мы будем следовать в своем описании за ходом ана-

лиза данных НРД в процессе калибровки отсчетной системы автомата, опуская то, что уже изложено в работах /1,2/.

1. Перед очередным циклом (серией сканирований калибровочного кадра в поперечном и продольном направлениях) подпрограмма CALIBR обращается к подпрограмме INIHIS для приведения в исходное состояние всех указателей, счетчиков и массивов, используемых новым пакетом подпрограмм.

2. Подпрограмма NXFID, подготавливающая процесс анализа очередной пары крестов, одновременно "обнуляет" рабочие массивы XGATE(400), YGATE(400) для хранения данных НРД, полученных в окрестности этой пары крестов.

3. Подпрограмма GATE, выполняя прежние операции обработки отсчетов НРД в окрестности крестов, запоминает в массивах XGATE(400), YGATE(400) все отсчеты НРД, попавшие в прямоугольные зоны вокруг каждого креста анализируемой пары, а также число этих отсчетов NUMX.

4. Подпрограмма FIDUC, завершающая распознавание пары крестов и вычисляющая координаты XFD, YFD их центров, затем обращается к новой подпрограмме CRSS. Напомним, что стандартный метод опознавания плеч крестов в основной версии калибрующей программы основан на гистограммировании величины отклонения отсчетов НРД от заданной вспомогательной прямой с последующим анализом гистограммы. Он эквивалентен способу нахождения прямой методом наименьших квадратов с фиксацией угла наклона прямой. Последний обычно известен с хорошей точностью, и в него вносятся поправки с учетом разворота кадра. Как показывает опыт работы с калибрующей программой и программами NAZE1, NAZE2 /2,3,4/, координаты центров крестов, найденные двумя методами - стандартным и МК, - различаются на величину, не превосходящую цену отсчета координаты сканирующего пятна (1.5 мкм).

5. Подпрограмма CRSS является главной в новом пакете подпрограмм, и мы на ней остановимся более детально.

А) Первый шаг анализа данных в CRSS - уточнение координат центра креста методом наименьших квадратов. Координаты XFD, YFD, найденные стандартной процедурой обработки крестов, и тангенсы углов наклона прямых T1U, T2U, использованные при гистограммировании в стандартной процедуре, служат в CRSS начальным приближением и используются для отбора из массивов XGATE, YGATE отсчетов НРД в окрестности плеч крестов.

Рабочие массивы $X(150)$, $Y(150)$ служат для хранения отсчетов НРД в окрестности анализируемого плеча креста. Плечо аппроксимируется прямой по методу МНК. При наличии точек, удаленных от прямой более чем на $2,5\sigma_g$, где σ_g - выборочная оценка среднеквадратического отклонения точек от прямой, выбрасывается одна наиболее удаленная точка и процесс аппроксимации по МНК повторяется для оставшихся точек.

Принципиальным моментом является классификация отсчетов автомата в окрестности креста. Отсчеты разбиваются на 3 класса. К первому отнесем отсчеты, удаленные по координате y от найденных плеч креста на величину более 16 отсчетов координаты пятна НРД (более 25 мкм). Ко второму классу отнесем отсчеты, лежащие в ближней окрестности плеч крестов (удаление менее 25 мкм). К третьему классу отнесем отсчеты в окрестности ядра креста. Под ядром креста, имеющего плечи конечной толщины, мы будем понимать фигуру, образованную на участке слияния плеч в районе центра креста. Согласно этой классификации, плечо креста представляется двумя отрезками прямых по обе стороны от ядра креста.

Для аппроксимации плеч методом МНК подпрограмма CR0SS из исходных данных в массивах XGATE(400), YGATE(400) отбирает и засылает в массивы $X(150)$, $Y(150)$ отсчеты НРД, принадлежащие первым двум классам и удовлетворяющие условиям

$$\begin{aligned} |x - XFD| &> DXVRTX, \\ |y - y_0(x)| &< DYMAX, \end{aligned} \quad (I)$$

где

XFD - координата центра креста, найденная стандартной процедурой обработки креста;
 $y_0(x)$ - координата y в точке x прямой линии, используемой в стандартной процедуре;
 $DXVRTX$ - константа, отделяющая (с некоторым запасом) ядро от плеч на всех крестах калибровочного кадра;
 $DYMAX$ - ограничение сверху для точек первого класса.
 В рабочей версии новой калибрующей программы $DXVRTX = 250$ мкм, $DYMAX = 115$ мкм (100 и 75 единиц отсчета координат X и Y на НРД). Везде в дальнейшем при указании численного значения констант будем подразумевать, что они выражены в единицах отсче-

та координат автомата (2,5 мкм по X , $\approx 1,53$ мкм по Y), если явно нет указания единицы измерения.

Уточненные по методу МНК значения координат центра креста $XFNW$, $YFNW$ и тангенсов угла наклона плеч $T1NW$, $T2NW$ передаются через параметры обращения к вызывающей программе FIDUC. Эти уточненные значения далее используются калибрующей программой при вычислении калибровочных констант. Так как плечи ориентированы под 45° , а полулучи крестов имеют одинаковую длину и расположены симметрично относительно центра креста, дисперсия X -координаты найденного центра креста $\sigma_x^2 \approx \sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2$, где σ_1^2 и σ_2^2 - оценки дисперсии отсчетов НРД на плечах креста, а n_1 , n_2 - число точек на первом и втором плечах. На широкую печать выдается диагностика, если σ_1 или σ_2 превышают величину SIGMAX (в рабочей версии она равна трем отсчетам НРД по y -координате, т.е. 4.6 мкм).

Б). Второй шаг анализа данных в CR0SS - получение количественной оценки точности выделения середины трекового сигнала на анализируемом кресте. Для получения этой оценки используются отсчеты НРД, попавшие в третий класс. Всего на каждом кресте для этого используются отсчеты с трех соседних строк раstra НРД, накрывающих центральную часть ядра креста. Три строки считаются годными, если в интервале ($YFNW-DYTCMX$, $YFNW + DYTCMX$) имеется единственный отсчет на каждой из этих строк. В рабочей версии $DYTCMX = 150$. Данный контроль необходим для исключения больших искажений анализируемых отсчетов, которые могут появиться за счет теневого эффекта в отсчетном канале автомата или из-за появления "духов". Координаты точек на тройке строк обозначим (X_L , Y_L), (X_C , Y_C), (X_R , Y_R).

Статистический анализ производится в предположении, что значения X -координат известны точно (они считываются с датчика линейных перемещений измерительного стола НРД). Учитывая прямолинейность границ ядра, мы принимаем гипотезу о наличии линейной регрессии среднего Y на x , при этом прямые регрессии слева и справа от центра креста могут в общем случае не совпадать. При таких нарушениях в работе схемы выделения середины трекового сигнала, как отсчет по переднему или заднему фронту сигнала, сдвиг координаты на постоянную величину, не зависящую от ширины сигнала, сдвиг координаты на определенную часть ширины трекового сигнала, или при комбинации этих нарушений кривые регрессии оста-

ются прямыми линиями. Постоянный сдвиг, не зависящий от ширины сигнала, не влияет на обработку данных измерений, т.к. при анализе результатов измерений используется всегда взаимное положение элементов снимка, а не их абсолютные координаты в отсчетной системе измерительного прибора. Случайный же групповой сдвиг на постоянную величину будет обнаружен при вычислении средней ошибки сшивания результатов измерений при поперечном и продольном сканировании калибровочного кадра $/I/$. Таким образом, лишь при точном (в среднем) срабатывании схемы выделения середины сигнала обе прямые регрессии слева и справа от центра креста совпадают. На проверке точности совпадения двух линий регрессии базируется метод контроля работы схемы выделения центра трекового сигнала в отсчетном канале сканирующего автомата.

Обе линии регрессии имеют всегда общую точку в центре креста. За меру расхождения этих линий мы берем величину DITS - расстояние по Y между двумя прямыми в точке $X = X_0 + \text{DELTX}$, где X_0 есть координата центра анализируемого креста, а DELTX - среднее расстояние по X между двумя соседними строками раstra. В общем случае центр креста находится между строками раstra, поэтому оценкой расхождения двух линий регрессии служит статистика

$$\text{DICUR} = (Y_L - 2 \cdot Y_C + Y_R) / (1 - \beta), \text{ где}$$

$$\beta = 2 \cdot \text{DIXC} / (X_R - X_L), \quad (2)$$

$$\text{DIXC} = \min \{ |X_{FNEW} - X_L|, |X_{FNEW} - X_C|, |X_{FNEW} - X_R| \}.$$

Статистика DICUR зависит от 4 независимых случайных величин: Y_L , Y_C , Y_R и X_{FNEW} . Независимость X_{FNEW} от других случайных величин следует из того, что при вычислении X_{FNEW} не использовались отсчеты HFD, попавшие в третий класс.

Статистики DICUR, вычисляемые на каждом из крестов калибровочного кадра, рассматриваются как независимые, несмещенные, но неравноточные измерения искомой величины DITS. Для получения минимальной погрешности в оценке DITS надо возможно точнее вычислить вес каждой статистики DICUR, являющейся функцией 4 случайных величин. Для вычисления веса оцениваем дисперсию DICUR, линеаризуя DICUR в окрестности математиче-

ских ожиданий случайных величин. Дисперсии величин Y_L , Y_C и Y_R одинаковы и полагаются равными полусумме дисперсий отсчетов на двух плечах креста (в пределах ядра креста передний фронт сигнала совпадает с краем одного плеча креста, а задний фронт - с краем другого плеча). Величину $X_R - X_L$ можно положить равной среднему расстоянию между соседними строками раstra, т.к. калибрующая программа контролирует равномерность движения стола HFD в процессе сканирования кадра. Дисперсия величины X_{FNEW} определяется выражением, данным в конце пункта А: $\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2$.

Оценка σ^2 дисперсии линеаризованной функции DICUR имеет вид

$$\sigma^2 = 3 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) / (1 - \beta)^2 + D \cdot (\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2), \quad (3)$$

где D - величина, пропорциональная квадрату математического ожидания ($Y_L - 2 \cdot Y_C + Y_R$). Следует ожидать, что при малых расстройках отсчетного канала второй член в выражении (3) будет существенно меньше первого и им можно будет пренебречь. Тем самым дисперсия σ^2 и вес статистики DICUR в этом случае могут быть получены в процессе обработки отсчетов креста и не потребуются запоминать параметры в дополнительных массивах данных, откладывая вычисления веса до момента, когда будет доступна оценка среднего от ($Y_L - 2 \cdot Y_C + Y_R$). Такая возможность оказывается полезной в условиях ограниченных резервов свободной памяти ЭВМ.

Для нашего случая типичные значения величин, фигурирующих в (3), таковы: $\sigma_1 \approx \sigma_2 \approx 2.5$ отсчетов Y - координаты, $n_1 \approx n_2 \approx 40$, $\text{DELTX} \approx 22$ отсчета X - координаты. Параметр β можно считать равномерно распределенным на $[0.5, 1]$ при оценке среднего вклада обоих членов в (3). В этих условиях среднее σ^2 приближенно оценивается выражением

$$\sigma^2 \approx 75 + 0.0025 \cdot (Y_L - 2 \cdot Y_C + Y_C)^2,$$

откуда следует, что даже при 50% ошибке в выделении середины трекового сигнала вклад второго члена в (3) составляет менее 4% от вклада первого ($|Y_L - 2 \cdot Y_C + Y_C|$ не превышает 67,5 и достигает этого значения при отсчете координаты по переднему или заднему фронту трекового сигнала).

Второй шаг работы программы CROSS завершается запоминанием значения статистики DICUR и ее веса $\text{PICUR} = 1/\sigma^2$ для обработанного креста.

В) Третий шаг работы программы CRSS - извлечение информации о распределении отсчетов в ближней окрестности плеч крестов (отсчетов 2-го класса) и о распределении отсчетов I класса. Особенности в распределении отсчетов могут прямо или косвенно свидетельствовать о тех или иных отказах в отсчетном канале автомата, которые трудно все предвидеть заранее. Поэтому средством обнаружения отказов, таких, как появление "духов" креста (многократные отсчеты на плечах) или наличие ошибок в каких-либо двоичных разрядах формируемых координат центра трековых сигналов, служат две гистограммы отклонений отсчетов автомата от плеч крестов. Первая гистограмма отражает детальную картину распределения отсчетов в окрестности ± 17 единиц отсчета координаты Y. Вторая гистограмма - обзорная и формируется из отсчетов первого класса, отстоящих от плеч вплоть до ± 150 единиц отсчета координаты Y (это ± 230 мкм для нашего автомата НРД). Один карман гистограммы соответствует интервалу длиной 0,25 и 5,0 единиц отсчета.

Полезным средством контроля отсчетного канала оказался анализ больших отклонений отсчетов в границах ядра креста. Их появление свидетельствует о выходе из строя одного из старших двоичных разрядов, что, как показала практика, не всегда обнаруживается на имеющихся тестовых программах. При отклонении Y-координаты от YFNEW более чем на 3 среднеквадратические ошибки, на широкую печать выдается подробная диагностика, в том числе восьмеричное представление абсолютной величины отклонения для обеспечения оперативного обнаружения номера двоичного разряда (или нескольких разрядов), ответственного за скачок Y-координаты.

6. В конце каждого цикла калибровки подпрограмма CALIBR вызывает подпрограмму HISTGG для подсчета суммарных результатов и выдачи их на печать вместе с гистограммами распределения отсчетов в окрестности плеч крестов.

Используя данные, накопленные подпрограммой CRSS о 50 крестах, просканированных в двух направлениях (поперечном и продольном), подпрограмма HISTGG для каждого способа сканирования вычисляет среднее значение среднеквадратических отклонений отсчетов по 50 крестам и его дисперсию, точечную оценку величины DTC и ее дисперсию, детальную и обзорную гистограммы. Масштаб изображения обзорной гистограммы автоматически выбирается так, чтобы даже при незначительном числе многократных отсчетов их можно было легко заметить. Выдачу гистограмм на широкую печать непосредствен-

но организует подпрограмма JUTNIS. Для целей дополнительного контроля и отладок, управляя с пульта телеайпа ЭВМ состоянием монитрных флагов, можно получать вспомогательную диагностику и распечатку массивов.

При калибровке по урезанному до 35 мм калибровочному кадру, содержащему 20 полукрестов и 30 полных крестов, обычно устанавливаем в "I" 24-й мониторный флаг. В этом случае программа производит обработку только полных крестов. Урезанный кадр используется при установке фильмового канала на 35 мм для измерений на НРД фильмов с 5-метрового искрового спектрометра ОИЯИ.

Полугодовой опыт эксплуатации новой версии калибрующей программы свидетельствует о том, что она является эффективным инструментом контроля функционирования сканирующего автомата НРД. Величина систематической ошибки в выделении середины трекового сигнала не превышает 1,5% полной ширины сигнала. Точность этой оценки по 10 циклам калибровки равна 0,5% ширины сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.П. Милоткин, В.Н. Шигаев. Калибровка отсчетной системы сканирующего автомата типа НРД. ОИЯИ, IO-5972, Дубна, 1971.
2. В.Н. Шигаев. Организация процесса измерения и обработки фильмовой информации в программном комплексе NAZE1. ОИЯИ, IO-5968, Дубна, 1971.
3. В.Н. Шигаев. Быстрая программа измерения фотоснимков на сканирующем автомате НРД с анализом информации в реальное время сканирования. ОИЯИ, IO-6799, Дубна, 1972.
4. В.Н. Шигаев. Структура математического обеспечения измерительной системы типа XEYZ (NAZE). Программирование и вычислительные методы, ОИЯИ, II-4655, Дубна, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 сентября 1976 года.