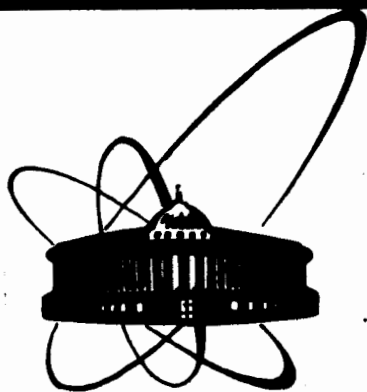


87-515

Одн. стр. сатт.



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

P10-87-515

А.Л.Меньшиков, В.Н.Поляков, В.И.Приходько

**ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ
ТОЧЕЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
С ПОМОЩЬЮ ОДНОСТРОЧНОЙ ПЗС-КАМЕРЫ**

1987

Фотоприемные ПЗС-приборы, благодаря своим преимуществам перед вакуумными приемниками изображения, находят всё более широкое применение в науке и промышленности. Основная область применения ПЗС-датчиков - это устройства, предназначенные для полуавтоматического или же полностью автоматического обнаружения объектов и измерения их координат. Часто в задачах измерения линейные размеры объектов в направлении измерения невелики и распределение освещенности в изображении имеет колоколообразную форму. Такие изображения принято называть точечными. В качестве примеров точечных изображений можно назвать изображения треков частиц, различные графические изображения и др. Настоящая работа посвящена проблемам измерения координат точечных изображений с помощью ПЗС-линейки.

Одной из особенностей фотоприемных ПЗС-приборов является их дискретная структура, что уже само по себе делает естественным использование методов цифровой обработки сигналов для извлечения информации из преобразованного ПЗС-приемником изображения. Для оцифровки изображения была разработана однострочная телевизионная камера^{1/1} на основе фоточувствительной линейки K1200ЦЛ2^{1/2/1}, представляющей собой двухрегистровый ПЗС-прибор с поверхностным каналом, имеющий 2000 фоточувствительных элементов. Конструктивно камера выполнена в виде оптической головки, соединенной кабелем длиной 1,5 м с крейтом. В оптической головке расположены полупрозрачное зеркало, разделяющее световой поток от объектива, окуляр и ПЗС-линейка с драйверами, источником напряжения и повторителями видеосигнала. В крейте расположены схема обработки видеосигнала, 6-разрядный АЦП для его оцифровки, ОЗУ емкостью 2Кх6 бит для промежуточного хранения дискретизованного сигнала. Оцифрованный сигнал из однострочной камеры передается в микроЭВМ ДВК-2 для обработки.

Для извлечения информации из сигнала необходимо знать как характеристики полезного сигнала, так и характеристики его искажений. Можно выделить несколько причин, приводящих к искажению видеосигнала ПЗС-камеры: наличие аддитивного темнового сигнала, неравномерности чувствительности, неэффективности переноса и хаотического шума. Первые три составляющие могут быть полностью устранены путем калибровки, т.е. предварительного измерения характеристик каждой из составляющих и внесения соответствующих поправок в сигнал при его обработке. После коррекции всех систематических ис-

кажений остается единственный источник искажений сигнала - хаотический шум, который определяет предельную точность измерительных устройств.

Задача измерения параметров сигналов /в частности, их координат / полностью решена для случая аддитивного нормального шума в теории оптимальных приемников. Измерения хаотического шума однострочной камеры показали, что он состоит из двух составляющих: аддитивной и мультипликативной, мощность которой пропорциональна амплитуде фотосигнала. Измерения аддитивного хаотического шума показали, что распределение его близко к нормальному /без учета шума дискретизации/, длина корреляции равна двум, а коэффициенты корреляции можно считать равными $\rho_1=0$, $\rho_2 = -0,3/1/$. Полученная "окраска" шума объясняется ненулевой неэффективностью переноса и двухрегистрационной организацией ПЗС-линейки K1200ЦЛ2.

Воспользуемся теорией оптимальных приемников для синтеза структуры измерителя. Измерение координаты точечного сигнала производится согласно теории в два этапа; сначала решается задача обнаружения, заключающаяся фактически в определении приближенного значения координаты, а следующим этапом обработки является непосредственно измерение. При измерении анализируется некоторая окрестность указанной обнаружителем точки, в которой на фоне аддитивного нормального шума присутствует сигнал. Измерение сводится к решению известной системы уравнений /3/, которое выполнить довольно сложно. Можно поступить таким образом: синтезировать упрощенные субоптимальные измерители и сравнить их по точности друг с другом. В случае фотоприемника без зазоров между фоточувствительными элементами и белого аддитивного шума измерение заключается в решении уравнения

$$\sum_i r_i \frac{d(m_i(\tau))}{d\tau}, \quad /1/$$

где r_i - отсчеты зашумленного сигнала, $m_i(\tau)$ - зависимость амплитуды i -го отсчета сигнала от истинного значения координаты τ точечного изображения с известным распределением освещенности. Распределение освещенности в изображении точечного объекта имеет колоколообразную форму и может быть представлено в виде косинус-квадратной функции. В таком случае и амплитуды отсчетов $m_i(\tau)$ могут быть представлены в виде косинус-квадратной функции

$$m_i(\tau) = \begin{cases} A \cos^2\left(\frac{\pi}{2T}(i + \tau)\right) & -T \leq i + \tau \leq T \\ 0 & i + \tau < -T; i + \tau > T, \end{cases} \quad /2/$$

где A - амплитуда, T - ширина сигнала /на полувысоте/. Тогда уравнение /1/ решается аналитически, и для координаты сигнала τ можно получить

$$\tau = -\frac{T}{\pi} \arctg\left(\frac{\sum_i r_i \sin \frac{\pi i}{T}}{\sum_i r_i \cos \frac{\pi i}{T}}\right), \quad /3/$$

где суммирование производится на интервале $(-T, T)$.

Колоколообразная функция может быть приближенно описана гладкой кривой, состоящей из трех отрезков парабол. Производная такой функции имеет пилообразную форму /рис.1/. Решение уравнения /1/ в этом случае принимает вид

$$\tau = \frac{\sum_{-T/2}^{T/2} r_i i - \sum_{T/2+1}^T r_i (i - T) - \sum_{-T}^{-T/2-1} r_i (i+T)}{\sum_{-T/2}^{T/2} r_i = \sum_{T/2+1}^T r_i - \sum_{-T}^{-T/2-1} r_i} \quad /4/$$

Более грубые приближения сигнала в виде треугольного импульса или в виде вершины параболы приводят соответственно к методу центра площади /4/ и методу центра тяжести /5/.

Представленные выше четыре субоптимальных алгоритма измерения различаются по степени приближения к идеальному измерителю и по вычислительным затратам. Интересно знать точностные характеристики этих алгоритмов, зависимость точности от параметров изображений и влияние коррекции систематических искажений, свойственных ПЗС-приборам /неэффективности переноса и неравномерности чувствительности/, на точность. Компенсация темнового сигнала рассматривается как обязательная из-за простоты измерения темнового сигнала, а также из-за того, что неравномерность темнового сигнала может быть принята за точечный сигнал.

Детально точностные характеристики субоптимальных измерителей были исследованы путем численного моделирования. Сигнал формировался интегрированием косинус-квадратного распределения, затем линейным фильтром третьего порядка имитировалось влияние неэффективности переноса. На полученный таким образом сигнал накладывался нормаль-

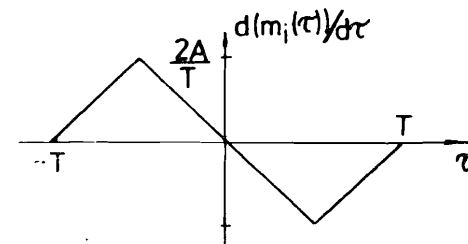


Рис.1. Приближенное представление производной колоколообразной функции.

ный шум единичной мощности с корреляционными коэффициентами $\rho_1 = 0$ и $\rho_2 = -0,3$, оцифровка амплитуды моделировалась как изменение представления суммы сигнала и шума с вещественного на целый. Исследования позволили выделить три составляющие погрешности измерения. Одна из составляющих, шумовая, вызвана хаотическим шумом, значение ее обратно пропорционально амплитудному отношению сигнал/шум. При фиксированном отношении сигнал/шум величина этой погрешности практически не зависит от ширины сигнала при изменении ее в диапазоне от одного до десяти. Вторая составляющая, погрешность квантования, вызвана квантованием изображения в пространстве, она уменьшается с увеличением ширины изображения, и величина ее не превышает $0,1$ при единичной ширине и снижается до 10^{-3} при увеличении T до 10 . Искажения точечного сигнала неэффективностью переноса приводят к некоторому увеличению погрешности квантования и к появлению систематической погрешности измерения /погрешности неэффективности/. Величина этой составляющей практически не зависит от ширины сигнала только для метода центра тяжести и равна удвоенному значению неэффективности переноса /из-за двухрегистровой организации линейки/. Для остальных методов измерения погрешность неэффективности имеет такую же величину при полуширине сигнала, большей четырех, а при уменьшении полуширины она резко падает.

Можно считать, что погрешность неэффективности пропорциональна величине неэффективности, а значит, и значению координаты изображения, поэтому она в какой-то мере может быть уменьшена калибровкой масштаба измерителя. Степень уменьшения погрешности неэффективности калибровкой масштаба зависит от диапазона значений ширины измеряемых сигналов. Оказалось, что при измерении узких сигналов с шириной $T \in [1,3]$ наименьшую погрешность обеспечивает метод центра тяжести, тогда как для более широких сигналов более высокая точность обеспечивается методом центра площади и алгоритмом /3/ /построенным в соответствии с выражением /3//. Зависимости среднеквадратичного отклонения суммарной погрешности измерения сигналов различной ширины в случае калибровки масштаба представлены на рис.2 /кривые 1, 2, 3/. При отношении сигнал/шум меньше 100 основной вклад в суммарную погрешность вносится шумовой составляющей, при большем отношении сигнал/шум преобладают погрешности квантования и неэффективности. Поэтому для больших значений сигнал/шум погрешность измерения значительно уменьшается с увеличением ширины сигналов. Часто существует возможность варьировать ширину сигнала, например, путем расфокусировки, сохраняя неизменной площадь сигнала, пропорциональную $A \cdot T$. Из полученных зависимостей следует, что при ма-

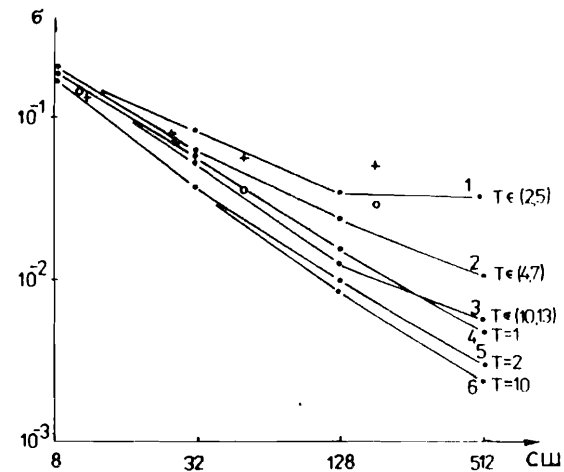


Рис.2. Зависимости суммарной погрешности измерения, полученные путем моделирования /кривые 1, 2, 3 — при калибровке масштаба, 4, 5, 6 — при коррекции неэффективности/ и экспериментально /+ — при калибровке масштаба, о — при коррекции неэффективности/ для $T = 2 \div 3$.

лых отношениях сигнал/шум оптимальное значение ширины сигнала T равно приблизительно $1 \div 2$,

а при больших отношениях сигнал/шум более высокая точность обеспечивается при расфокусированных изображениях. При калибровке масштаба может быть достигнута несколько большая точность, если учитывать зависимость погрешности неэффективности от ширины сигнала.

Радикальным решением повышения точности измерителей является коррекция неэффективности переноса путем линейной фильтрации. При этом полностью устраняется погрешность неэффективности переноса. Зависимости погрешности измерения в случае коррекции неэффективности переноса представлены на рис.2 /кривые 4, 5, 6/. При ширине изображения T , равной одному элементу, наивысшую точность обеспечивает метод центра тяжести, а при большей ширине — алгоритмы /3/ и /4/, точность которых с увеличением ширины с двух до десяти элементов практически не изменяется при отношении сигнал/шум, меньшем 100 ; если же сигнал/шум равен 500 , то точность незначительно увеличивается /примерно в $1,5$ раза/. Метод центра площади дает погрешность измерения в $1,3 \div 2$ раза большую, чем алгоритмы /3/ и /4/. Из полученных зависимостей следует, что при изменении ширины изображения путем расфокусировки оптимальное значение ширины равно приблизительно $1 \div 2$.

Отметим, что все приведенные выше зависимости погрешности измерения были получены путем численного моделирования. В модели учитывались неэффективности переноса, хаотический шум ПЗС-камеры, предполагалось распределение освещенности по косинус-квадратному закону, но не учитывалась неравномерность чувствительности. Была проведена экспериментальная проверка четырех представленных методов. Для этого изображение двух светлых линий на темном фоне преобразовывалось однострочной

ПЗС- камерой и передавалось в микрокомпьютер ДВК-2. Обработка производилась в следующем порядке. Сначала из оцифрованного видеосигнала вычиталась оценка темнового сигнала, предварительно полученная усреднением десяти его реализаций, и проводилось обнаружение точечных изображений программой-обнаружителем. Для указанных обнаружителем окрестностей проводилась /либо не проводилась/ коррекция неэффективности переноса, значение которой измерялось с погрешностью, меньшей 2%. Затем для этих же окрестностей осуществлялась /либо не осуществлялась/ коррекция неравномерности чувствительности /оценка неравномерности чувствительности формировалась предварительно по десяти реализациям/ и после этого программы-измерители находили координаты линий. Процедуры обнаружения и измерения повторялись много раз /20/ для различных положений изображений пары линий на ПЗС-линейке, полученных перемещением линейки относительно изображения линий для неизменности распределения освещенности. В результате была найдена оценка среднеквадратичного отклонения от среднего результата измерения расстояния между линиями, которая в $\sqrt{2}$ раз больше погрешности измерения координат каждой линии. На рис.2 экспериментально полученные значения суммарной погрешности измерения точечного изображения для случая калибровки масштаба представлены в виде "1+", а для случая коррекции неэффективности переноса в виде "10". Оказалось, что коррекция неэффективности переноса и неравномерности чувствительности не увеличивает точность, если отношение сигнал/шум не превышает приблизительно 30, при больших отношениях сигнал/шум коррекция неэффективности позволяет повысить точность приблизительно в 1,5 раза, а коррекция неравномерности чувствительности - приблизительно в 1,1 раза. Соотношение точностей различных алгоритмов совпадает с результатами, полученными путем численного моделирования. В случае калибровки масштаба наиболее точными являются алгоритм /3/ и алгоритм центра площади, а при коррекции неэффективности - алгоритмы /3/ и /4/, точность которых приблизительно в два раза выше точности метода центра площади. В отличие от зависимостей, полученных моделированием, уменьшение погрешности измерения /в случае коррекции неэффективности переноса/ с ростом отношения сигнал/шум прекращается при значении погрешности, равном приблизительно 0,04 от расстояния между элементами ПЗС-линейки, что составляет 0,4 мкм. Этот эффект объясняется конечным количеством разрядов АЦП /равным 6/, что ограничивает максимально достижимое отношение сигнал/шум в оцифрованном сигнале. На значении погрешности измерения сказываются также структура используемой ПЗС-линейки /погрешность изготовления ее элементов и ненулевые зазоры между ними/, отличие реального хаотического шума /1/

от шума, использованного при моделировании, и отличие распределения освещенности в точечном изображении от колоколообразного. Повышения точности измерения можно добиться увеличением разрядности АЦП, так как это позволит увеличить отношение сигнал/шум, кроме того, с увеличением разрядности должна возрасти степень влияния коррекций неэффективности переноса и неравномерности чувствительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Меньшиков А.Л. и др. ОИЯИ, Р10-87-516, Дубна, 1987.
2. Василевская Л.М., Костюков Е.В., Павлова З.В. Электронная промышленность, 1982, 7.
3. Вайнштейн Л.А., Зубаков В.Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов.радио, 1960.
4. Woschni H.G., Christoph R., Reinsch A. Feingerätetechnik, 1984, No.5, p.219.
5. Хромов Л.И. и др. Твердотельное телевидение. М.: Радио и связь, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июля 1987 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

- | | | |
|----------------|---|------------|
| Д7-83-644 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983. | 6 р.55 к. |
| Д2,13-83-689 | Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983. | 2 р.00 к. |
| Д13-84-63 | Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983. | 4 р.50 к. |
| Д2-84-366 | Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984. | 4 р.30 к. |
| Д1,2-84-599 | Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984. | 5 р.50 к. |
| Д10,11-84-818 | Труды V Международного совещания по проблемам математического моделирования, программирования и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1983. | 3 р.50 к. |
| Д17-84-850 | Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. /2 тома/ | 7 р.75 к. |
| Д11-85-791 | Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985. | 4 р.00 к. |
| Д13-85-793 | Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985. | 4 р.80 к. |
| Д4-85-851 | Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985. | 3 р.75 к. |
| Д3,4,17-86-747 | Труды V Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1986. | 4 р.50 к. |
| | Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. /2 тома/ | 13 р.50 к. |
| Д1,2-86-668 | Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. /2 тома/ | 7 р.35 к. |
| Д9-87-105 | Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. /2 тома/ | 13 р.45 к. |
| Д7-87-68 | Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986 | 7 р.10 к. |
| Д2-87-123 | Труды Совещания "Ренормгруппа-86". Дубна, 1986 | 4 р.45 к. |

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Меньшиков А.Л., Поляков В.Н., Приходько В.И.
Измерение координат точечных изображений с помощью однострочной ПЗС-камеры

P10-87-515

Сконструирована цифровая телевизионная камера на ПЗС-линейке K1200CL2, видеосигнал которой обрабатывается на микроЭВМ ДВК-2. Обычно при обработке видеосигнала ПЗС-линейки ограничиваются простейшей пороговой обработкой для обнаружения объектов и измерения их положения либо используют простые алгоритмы измерения /методы центра площади, центра тяжести/. Задача обнаружения и измерения с помощью ПЗС-камеры анализируется с позиций теории обнаружения и оценок. Синтезированы два квазиоптимальных алгоритма измерения координат точечных объектов. Предложенные алгоритмы измерения позволяют достичь точность, в два раза большую, чем традиционная, при минимальном увеличении вычислительных затрат.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1987

Перевод О.С.Виноградовой

Menshikov A.L., Polyakov V.N., Prikhodko V.I.
Measurement of Point-Like Images Coordinates Using a Linear CCD-camera

P10-87-515

A CCD-camera based on a linear 2000-elements charge-coupled light sensor K1200CL2 has been designed. The camera is used for digitizing images and transferring them to DVK-2 microcomputer. Detection of a point-like image is usually performed by simple thresholding, and its coordinate is calculated using simple procedures (center-of-gravity method or center-of-square method). The problem of measuring a point-like image is investigated using detection and estimation theory. Two procedures for estimating a point-like image coordinate are proposed. These procedures require few processing capabilities and allow to double the accuracy of measurement.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1987