

# СУБПИКСЕЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Бачило С.А., Итенберг И.И., Калашников В.А., Сипиев В.А., Сивцов С.А.

Научно-конструкторское бюро вычислительных систем  
347900, г. Таганрог, ГСП - 25 А, ул. Шевченко, 2, НКБ ВС  
тел., fax(8634) 310-925; E-mail:root@nkbvs.ttn.ru; Телетайп: УРАН

**Реферат.** В докладе рассматриваются средства получения оценок перемещения дискретных изображений для условий, когда перемещение объекта за период смены полей телевизионного изображения меньше размеров элементарного фрагмента изображения.

**Введение.** В задачах наблюдения за удаленными или медленно движущимися объектами возникает необходимость получения оценок текущих координат дискретных изображений с погрешностью, существенно меньшей размеров элементарного фрагмента изображения – дискретного элемента (д.э.). Оценки координат с такими свойствами далее условно называются субпиксельными. Принципиальная возможность получения субпиксельных оценок координат перемещающихся изображений следует из того, что даже при малых перемещениях непрерывного распределения яркостей изображения объекта по дискретной матрице элементов фотоприемного устройства (ФПУ) распределение уровней сигналов элементов ФПУ изменяется. Из-за относительно малой величины указанных изменений следует ожидать, что субпиксельные оценки координат могут обладать приемлемыми свойствами при достаточно больших отношениях сигнал/шум.

**1 Субпиксельные оценки координат, получаемые на основе максимума отношения правдоподобия.** Пусть процесс формирования изображения фотоприемным устройством сопровождается воздействием аддитивного гауссова белого шума. Оценка  $\theta^*$  перемещения  $\theta$  известного изображения (для упрощения одномерного)  $S(x)$  вдоль координаты  $x$  может быть найдена из уравнения правдоподобия [1]:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dS(x-\theta)}{d\theta} [L(x) - S(x-\theta)] dx = 0 \quad (1)$$

где  $L(x)$  – текущее изображение,  $S(x-\theta)$  – прогнозируемое изображение.

Оценка  $\theta^*$  может быть получена из (1) в замкнутой форме, если предположить, что при малых перемещениях  $\theta$  прогнозируемое изображение  $S(x-\theta)$  может быть представлено первыми двумя членами ряда Маклорена. Учитывая это представление, переходя к дискретным изображениям  $S(x_i-\theta)$ ,  $L(x_i)$ , из (1) получим выражение линеаризованной оценки максимального правдоподобия (ЛМП):

$$\theta^* = \frac{\sum_{i=1}^N S'(x_i) [L(x_i) - S(x_i)]}{\sum_{i=1}^N [S'(x_i)]^2} \quad (2)$$

ЛМП оценка (2) в силу сделанных предположений является асимптотически несмещенной, однако с ростом оцениваемого параметра  $\theta$  и увеличением широкополосности изображения объекта ее свойства быстро ухудшаются вследствие нарастания смещения, зависящего от неизвестных характеристик изображения. Кроме того, в практических приложениях точное изображение  $S(x)$  объекта, как правило, неизвестно, а в качестве него используется его оценка  $S^*(x)$ , например, в виде изображения объекта в одном из предыдущих кадров. Вследствие этого, свойства ЛМП оценок существенно зависят от формулы численного дифференцирования для получения производных  $S'(x_i)$ .

**2 Субпиксельные оценки, получаемые на основе аналитической аппроксимации функции сходства изображений.** В задачах определения координат дискретных изображений широко распространен корреляционно – экстремальный подход, заключающийся в определении координат объекта по положению экстремума  $\theta_s$  функции сходства  $E(x-\theta_s)$  эталонного  $S(x_i)$  и текущего  $L(x_i)$ , изображений объекта. Непосредственное применение оценок  $\theta_s^*$  дает возможность определения координат с дискретностью в 1 д.э., что не соответствует поставленной задаче. Тем не менее, использование этого подхода для получения субпиксельных оценок координат является привлекательным ввиду наличия хорошо отработанных программно-аппаратных средств, реализующих процедуры оценки сходства изображений.

С этой целью корреляционно – экстремальные (КЭ) оценки координат могут быть модифицированы следующим образом. Между этапами определения функции сходства и определения положения ее экстремума вводится процедура аналитической аппроксимации функции сходства  $E(x-\theta_0)$  в окрестности ее главного экстремума полиномом  $F(x)$ :

$$F(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4$$

Аппроксимация функции сходства  $E(x-\theta_0)$  может быть выполнена, например, методом наименьших квадратов, приводящим к решению системы 5 линейных уравнений относительно 5 неизвестных коэффициентов  $b_i$  ( $i = 0...4$ ).

В качестве оценки  $\theta^*$  координат изображения принимается положение минимума аппроксимирующей функции, которое находят в явном виде решением кубического уравнения

$$b_1 + b_2x + b_3x^2 + b_4x^3 = 0,$$

например, тригонометрическим методом. Полученные таким образом модифицированные корреляционно – экстремальные (МКЭ) оценки позволяют определять координаты дискретных изображений с субпиксельной точностью и не накладывают на изображение объекта дополнительных по сравнению с КЭ оценками ограничений.

**3. Реализация МКЭ оценок.** Вычислительный процесс получения МКЭ оценок координат в системах, функционирующих в реальном масштабе времени, целесообразно разделить на 2 части. К первой части относится вычисление двумерной функции сходства, требующее большого количества однотипных вычислений, которые выполняются в формате с фиксированной точкой с данными небольшой разрядности (как правило, 8-разрядными). Для удовлетворения требований по допустимой задержке получения МКЭ оценок координат необходимая производительность таких вычислений составляет  $(2-3) \cdot 10^3$  MOPS. Ко второй части относятся процедуры аналитической аппроксимации функции сходства и вычисления координат ее экстремума. В этой части предпочтительно представление данных и выполнение вычислений в формате с плавающей точкой. Требуемая производительность составляет  $(50-70)$  MFLOPS. С учетом этих особенностей вычислительного процесса получения МКЭ оценок, его реализация целесообразна на вычислителе, имеющем комбинированную архитектуру, включающую DSP процессор с плавающей точкой и модуль аппаратного ускорителя, выполняющий вычисления функции сходства с фиксированной точкой. В качестве перспективного для таких задач может быть использован DSP процессор фирмы Texas Instruments типа TMS320C6701, пиковая производительность которого достигает 1 GFLOPS на тактовой частоте 167 МГц. Модуль аппаратного ускорителя может быть реализован на базе ПЛИС фирмы ALTERA семейства Arx II, на которых при объеме 600 тыс. вентилях и тактовой частоте 150 МГц можно достичь производительности порядка 15000 MIPS, что вполне достаточно.

**4. Экспериментальные результаты.** ЛМП и МКЭ оценки исследовались экспериментально средствами полунатурного моделирования. Изображение объекта формировалось на экране монитора ПЭВМ1, параметры яркости и перемещения изображения задавались программно. Изображение объекта с экрана монитора ПЭВМ1 записывалось на цифровую видеокамеру, а затем вводилось в ПЭВМ2, использовавшуюся для моделирования и определения свойств ЛМП и МКЭ оценок. Расстояние между монитором ПЭВМ1 и фокусное расстояние видеокамеры выбирались таким образом, чтобы минимальное перемещение изображения на мониторе ПЭВМ1 соответствовало 0,025 д.э. видеокамеры. Отношение сигнал/шум на изображениях от видеокамеры составляло около 40. Для исследования оценок при более низких отношениях сигнал/шум на изображения программно накладывался пространственно некоррелированный гауссов шум.

Результаты экспериментов иллюстрируются рис. 1 - 3.

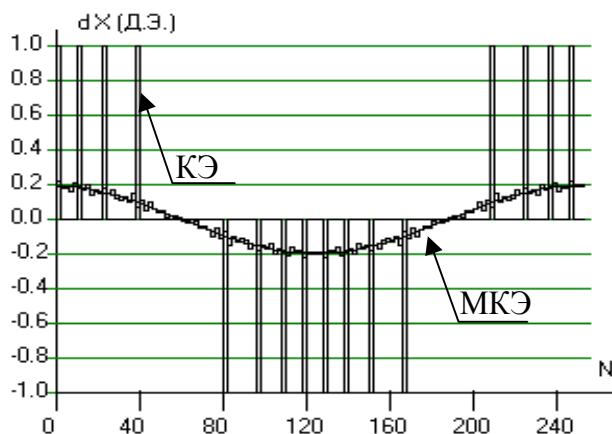


Рис.1

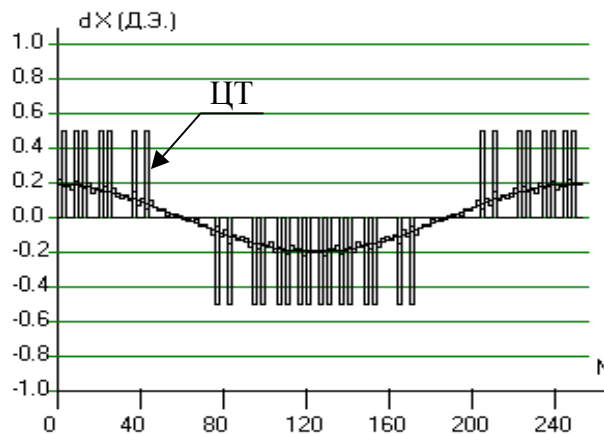


Рис.2

На рис.1 представлены графики оценок перемещения изображения объекта, движущегося по синусоидальной траектории с амплитудой 4 д.э. с частотой 0,2 Гц (отношение сигнал/шум – 40). Как видно из рис.1, в МКЭ оценке практически не проявляются эффекты, обусловленные дискретностью изображений, в то время как дискретность КЭ оценок очевидна. Для сравнения на рис.2 представлен график оценки положения центра тяжести (ЦТ) бинарного изображения объекта, полученного разделением всех точек изображения на точки объекта и окружающего фона с помощью пороговой процедуры. Изображение объекта и параметры его движения такие же, как и на рис.1. Дискретность ЦТ оценок, как правило, меньше, чем у КЭ оценок, зависит от формы бинарного изображения объекта и проявляется в большей степени у сильно вытянутых вдоль одной из координат бинарных изображений.

Влияние шумов на свойства МКЭ и ЦТ оценок перемещения изображения за время смены полей изображения иллюстрируется рис.3, на котором представлены зависимости максимальных ошибок от отношения сигнал/шум  $q$  на изображении объекта.

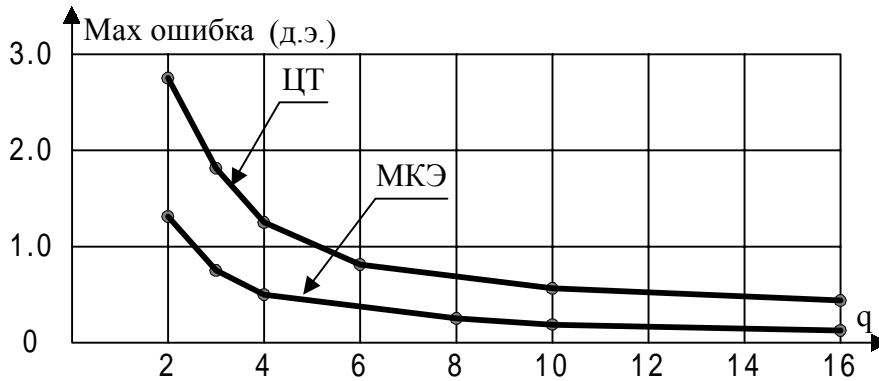


Рис.3

Из графиков рис.3 видно, что максимальная погрешность МКЭ оценки значительно меньше, чем ЦТ оценки, и при отношениях сигнал/шум, больших 6-8, оказывается значительно меньше 1 д.э., что и обуславливает целесообразность ее использования в практических приложениях.

#### Литература

1. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции, т. I Пер. с англ. Под ред. В.И.Тихонова. М., "Сов.радио", 1972.



THE SUBPIXEL ESTIMATION OF THE DISCRETE IMAGE DISPLACEMENT

Bachilo S., Itenberg I., Kalashnikov V., Sipiyou V., Sivcov S.

Scientific-designer bureau of computing systems  
347900, Taganrog, ГСП - 25 A, street. Shevchenko, 2, NKB VS  
Ph., fax (8634) 310-925; E-mail: root@nkbvs.ttn.ru; the teletype: УРАИ

**Abstract.** In the article are considered the deriving means of displacement estimations of the discrete image for conditions, when the object displacement for period of fields change of the television image is less than sizes of an elementary fragment of the image.

In the tasks of observation of the distant or slowly moved objects is emerge a necessity of deriving of estimations of current coordinates of the discrete images with an essential smaller error than sizes of elementary fragment of the image - discrete unit (d.u.). The estimations of coordinates with such properties further conditionally are named subpixel.

One of the most widely spread approaches to definition of coordinates of the discrete images is the correlation-extreme approach, which consist in definition of object coordinates according to the extremum locations of  $\square_e$  of the function of a likeness  $E(\tilde{x} \square_e)$  standard  $S(x_i)$  and flowing  $L(x_i)$ , maps of object is . The immediate application of estimations  $\square_e$  enables definitions of coordinates with a discretization in 1 d.u., that does not correspond(meet) to the posed task. Nevertheless, usage of this approach for deriving subpixel of estimations of coordinates is attractive in view of presence of the well completed hardware-software tools realizing procedure of an estimation of a likeness of the maps.

With this purpose is correlative - extreme (CE) estimations of coordinates can be modified as follows. Between stages of the likeness function definition and its extremum position definition the procedure of analytical approximating of the likeness function  $E(\tilde{x} \square_e)$  in a neighbourhood of its(her) principal extremum by a polynomial  $F(x)$  is introduced:

$$F(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4$$

The approximating of the likeness function  $E(\tilde{x} \square_e)$  can be carried out, for example, least squares method in a solution a systems 5 simple equations relatively 5 unknown coefficients  $b_i$  ( $i = 0... 4$ ).

The minimum of the approximating function is accepted as an estimation  $\square$  of the image's coordinates which is defined by a solution of a cubic equation

$$b_1 + b_2x + b_3x^2 + b_4x^3 = 0,$$

trigonometrical method, for example. Obtained modified is correlative - extreme (MCE) of an estimation allow to define coordinates of the discrete images with subpixel accuracy and do not superimpose on the image of object extra in comparison with CM by estimates(estimations) of restrictions.

MCE estimations, and also the estimations of a center of mass (CM) position of the object binary image obtained by separation of all points on object's points and an background's points by the threshold procedure, were researched experimentally.

The analysis of errors of MCE and CM estimations has shown, that the maximum error of MCE estimation is much less, than CM estimation, and at the signal noise ratio large 6-8 is much less than 1 d.u., and this cause to expediency of its usage in practical applications.