

УДК 621.397.6

П. С. Баранов, А. А. Манцветов
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пиксела для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов

Определено оптимальное отношение кружка рассеяния объектива к размеру пиксела, обеспечивающее максимум точности оценки координат центров изображений малоразмерных объектов для широкого круга начальных условий – уровней сигнала и шума считывания. Проанализировано влияние начального смещения центра изображения малоразмерного объекта относительно центра пиксела на точность определения его положения. Показано, что если отношение кружка рассеяния объектива к размеру пиксела составляет менее 0,8, то ошибка оценки координат центра изображения малоразмерного объекта сильно зависит от начального смещения.

Кружок рассеяния, метод центра тяжести, малоразмерный объект, точность оценки координат

Задача точного определения координат центров изображений малоразмерных объектов, световая энергия от которых концентрируется в пределах нескольких пикселей, актуальна для таких областей техники, как астроориентация (звездные датчики) [1], [2], наземные телескопы с адаптивной оптикой (датчики гидирования) [3], системы анализа волнового фронта [4] и т. п.

Если угловой размер малоразмерного объекта исчезающе мал, его оптическое изображение в плоскости фотоприемника (ФП) определяется кружком рассеяния объектива (КРО), который в свою очередь задается функцией рассеяния точки (ФРТ).

Оптимизации соотношения между радиусом КРО и размером пиксела ФП, обеспечивающей максимальную точность оценки координат центров изображений малоразмерных объектов, посвящен целый ряд работ [5], [6].

В известных работах [1], [5], [6] не учитывается случайное смещение центра изображения малоразмерного объекта относительно центра пиксела ФП, что может привести к ошибке вычисления оптимального отношения радиуса КРО к размеру пиксела.

В настоящей статье для определения координат центра изображения малоразмерного объекта использован метод центра тяжести. В [7] показано, что ошибка определения центра изображения данным методом зависит от его смещения относительно пиксела ФП. В то же время в [7] не уточняется, при каком отношении радиуса КРО к размеру пиксела проводилось моделирование.

Целью настоящей статьи является определение оптимального отношения радиуса КРО к размеру пиксела по критерию минимума ошибки определения координат центра изображения с учетом его начального смещения относительно пиксела ФП.

Как правило, в качестве первого приближения к реальной ФРТ объектива принимается гауссовское распределение [1], [8], а для определения положения центра изображения малоразмерного объекта используется метод определения центра тяжести, характеризующийся высокой точностью и малыми вычислительными затратами [1], [6], [7].

Для дальнейшего анализа проведем нормировку геометрических величин на размер пиксела Δ и положим единичным максимальное значение сигнала. Пусть изображение малоразмерного объекта в плоскости ФП описывается двумерным гауссовским распределением

$$S(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднее квадратическое отклонение; x, y – текущие координаты в плоскости ФП; x_0, y_0 – начальное смещение центра изображения малоразмерного объекта в пределах пиксела (рис. 1, а). При этом считается, что начало координат x и y совпадает с центром пиксела. На рис. 1, б изображено сечение распределения изображения $S(x, y)$ вдоль оси x . Согласно [9], [10] радиус кружка гауссовского распределения определяется по

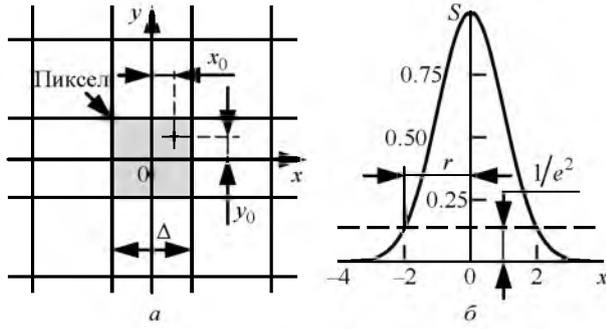


Рис. 1

уровню $1/e^2$ ($r = 2\sigma$), при этом в нем концентрируется примерно 86.5 % энергии.

Поскольку ФП производит дискретизацию изображения, а также его интегрирование в пределах пиксела, то для произвольного пиксела с позициями (i, j) значение сигнала в зависимости от начального смещения (x_0, y_0) определяется как

$$\alpha_{i,j}(x_0, y_0) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{\frac{i-1}{2}}^{\frac{2i+1}{2}} \int_{\frac{i-1}{2}}^{\frac{2i+1}{2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}} e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}} dx dy. \quad (1)$$

После математических преобразований (1) примет вид

$$\alpha_{i,j}(x_0, y_0) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{1+2i+2x_0}{2\sqrt{2}\sigma} \right) + \operatorname{Erf} \left(\frac{1-2i+2x_0}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \times \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{1+2j+2y_0}{2\sqrt{2}\sigma} \right) + \operatorname{Erf} \left(\frac{1-2j+2y_0}{2\sqrt{2}\sigma} \right) \right], \quad (2)$$

где $\operatorname{Erf}(\cdot)$ – функция ошибок.

Значения $\alpha_{i,j}(x_0, y_0)$ определяют долю полезного оптического сигнала при заданном начальном смещении (x_0, y_0) , приходящуюся на пиксел (i, j) .

Введем в рассмотрение радиус КРО $r = 2\sigma$. Тогда выражение (2) примет следующий вид:

$$\alpha_{i,j}(x_0, y_0) = \frac{1}{4} \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{1+2i+2x_0}{\sqrt{2}r} \right) + \operatorname{Erf} \left(\frac{1-2i+2x_0}{\sqrt{2}r} \right) \right] \times \left[\operatorname{Erf} \left(\frac{1+2j+2y_0}{\sqrt{2}r} \right) + \operatorname{Erf} \left(\frac{1-2j+2y_0}{\sqrt{2}r} \right) \right].$$

Помимо сигнала от изображения малоразмерного объекта при моделировании необходимо

учитывать сигнал фона. При этом среднее число образовавшихся в пикселе (i, j) фотоэлектронов определяется следующим образом:

$$N_{i,j}(x_0, y_0) = N_s \alpha_{i,j}(x_0, y_0) + N_b,$$

где N_s – общее число электронов, образовавшихся от точечного объекта заданной интенсивности; N_b – среднее значение числа накопленных электронов от фона (background). Фон при этом считаем локально постоянным.

Также необходимо учитывать шумы считывания ФП \bar{N}_{rd} , фотонные шумы сигнала $\bar{N}_s = \sqrt{N_{i,j}}$ и фотонные шумы фона $\bar{N}_b = \sqrt{N_b}$.

В [7] предложен новый метод, повышающий точность оценки координат центров малоразмерных объектов, а также показано, что использование метода взаимной корреляции (оптимальный прием) и метода центра тяжести приводит к ошибке в определении координат центра изображения, форма зависимости которой от начального смещения близка к синусоиде. Указанные результаты требуют дополнительного анализа.

В настоящей статье для оценки координат центра изображения малоразмерного объекта использован указанный ранее метод центра тяжести [1], [5]–[7]:

$$\hat{x} = \frac{\sum_i \sum_j i U_{i,j}}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}; \quad \hat{y} = \frac{\sum_i \sum_j j U_{i,j}}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}.$$

Процедура получения оценок координат по центру тяжести не зависит ни от вида, ни от масштаба реакции оптической системы на излучение точечного источника [11].

Ошибки оценок определения центра изображения малоразмерного объекта определим как

$$\varepsilon_x = |x_0 - \hat{x}|, \quad \varepsilon_y = |y_0 - \hat{y}|.$$

Рассмотрим зависимости ошибок от начального смещения. На рис. 2, а приведены сигналы при радиусах КРО $r = 0.2$ (1, 3) с координатами $x_0 = 2$ и $x_0 = 4.8$ соответственно. Кривые 2, 4 отображают сигналы на выходе ФП. Как следует из рис. 2, а, при указанном радиусе выходные сигналы локализируются полностью в пределах пикселов, в которых расположены центры изображений. Таким образом, если изображение малоразмерного объекта локализовано в пикселе,

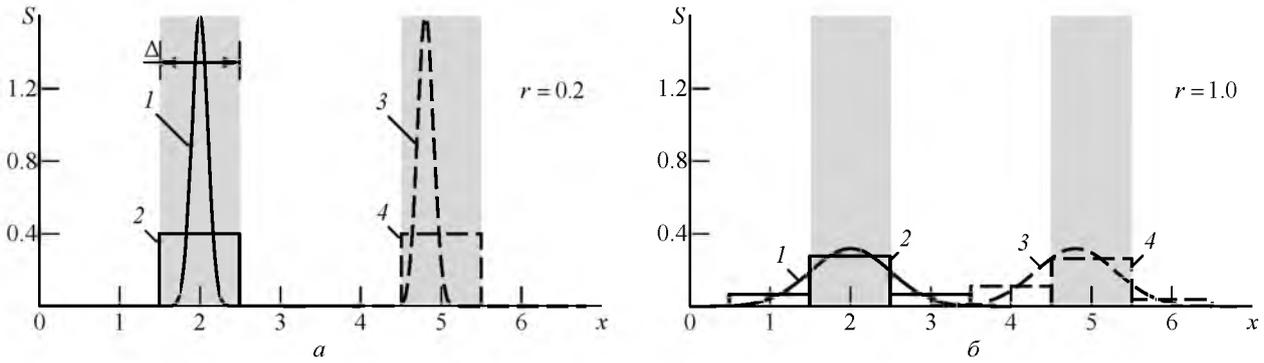


Рис. 2

его смещение не может быть зафиксировано с субпиксельной точностью.

Иная ситуация складывается, если нормированный радиус КРО соизмерим с размером пиксела (рис. 2, б, $r = 1.0$). При этом выходные сигналы присутствуют не только в ближайшем к центру оптического сигнала пикселе, но и в нескольких соседних, и по их соотношению становится возможным определение положения центра малоразмерного объекта с субпиксельной точностью.

На рис. 3 приведены результаты моделирования при $N_s = 10\ 000$, $\bar{N}_{rd} = 0$, $N_b = 0$ оценки точности определения координат центра малоразмерного объекта методом центра тяжести при различных значениях r в зависимости от смещения центра изображения относительно центра пиксела в пределах $0 \dots 0.5$ пиксела.

На рис. 3 приведены одномерные сечения результатов, полученных при двумерном моделировании. Значения ошибки приведены после операции сглаживания низкочастотным фильтром.

Как следует из результатов моделирования, при увеличении радиуса КРО r неравномерность ошибки определения центра в зависимости от начального смещения оптического сигнала значительно снижается. По результатам [7] можно сделать предположение, что моделирование сигнала на ФП выполнялось при $r \approx 0.5$ и привело к синусоидальной форме зависимости ошибки от смеще-

ния. В результате для повышения точности был разработан метод аппроксимации ФРТ функций более высокого порядка, нежели (1), что потребовало значительных вычислительных ресурсов.

При $r > 1.0$ ошибка практически постоянна для любого начального смещения, т. е. при рациональном выборе радиуса КРО не требуются дополнительные методы, учитывающие зависимость ошибки определения координат центра малоразмерного объекта от его начального смещения.

Наибольший интерес представляет определение оптимального радиуса r , обеспечивающего минимум ошибок оценки координат центра. Для этого выполнены следующие операции:

1. Для изменения радиуса КРО r в пределах $0.1 \dots 4.0$ с шагом 0.05 вычислялась ошибка оценки координат центра изображения малоразмерного объекта при изменении x_0 и y_0 в диапазоне $0 \dots 0.5$ с шагом 0.05 (в пределах одного квадранта пиксела определено 121 значение начального смещения).

2. Для каждого значения r производилось усреднение ошибки по значениям начального смещения. При этом учитывались только фотонные шумы сигнала $\bar{N}_s a_{i,j}(x_0, y_0)$.

На рис. 4 представлена зависимость ошибки определения положения центра изображения малоразмерного объекта от КРО, вычисленной по указанной методике для набора значений N_s при

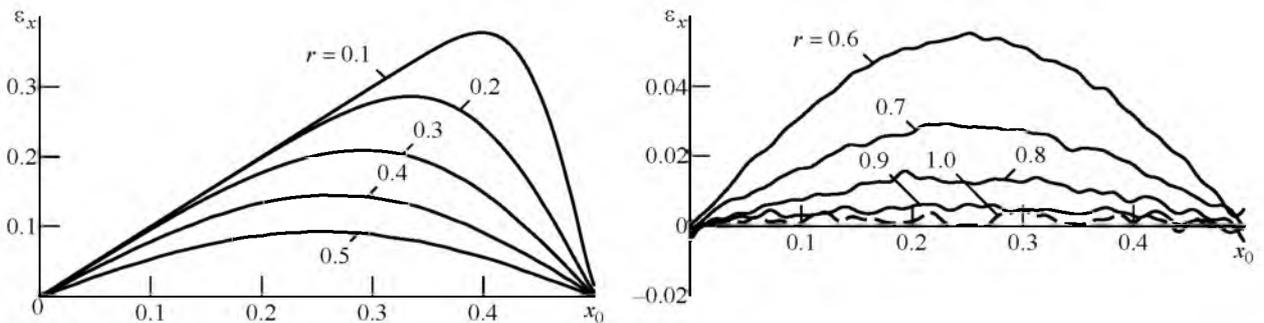


Рис. 3

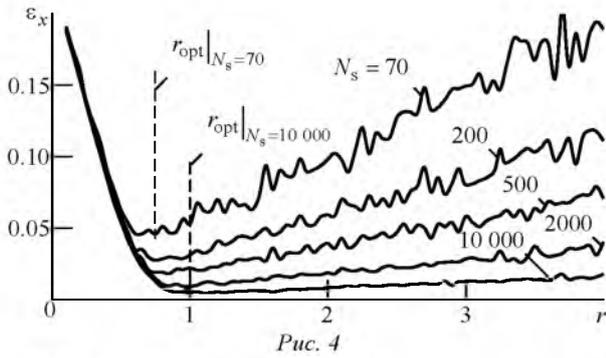


Рис. 4

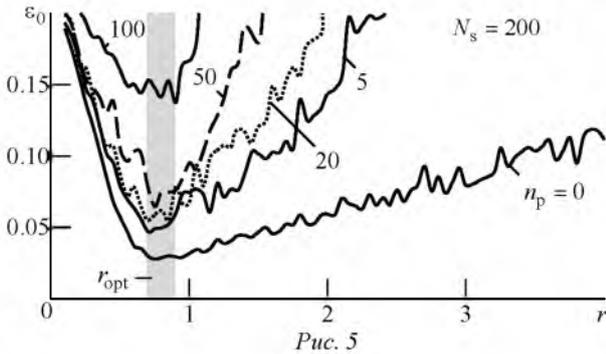


Рис. 5

$\bar{N}_{rd} = 0$, $N_b = 0$, т. е. при учете только фотонных шумов самого сигнала.

При уменьшении энергии сигнала оптимальное отношение КРО к размеру пиксела уменьшается с $r \approx 1.0$ при $N_s = 10\,000$ до $r \approx 0.7$ при $N_s = 70$.

Отметим, что при отклонении радиуса на ± 0.1 от оптимального значения ошибка увеличивается незначительно. В целом для широкого диапазона уровней сигнала оптимальное соотношение r лежит в диапазоне $0.8 \dots 0.9$.

Рассмотренный случай представляет собой идеальную ситуацию, когда шумы ФП $N_{rd} = 0$, а условия съемки и коэффициент подавления солнцезащитной бленды позволяет считать $N_b = 0$. В реальных условиях эксплуатации $\bar{N}_{rd} > 0$ и $N_b > 0$. Для современных КМОП и ПЗС ФП уровень шумов считывания может лежать в широком диапазоне от единиц электронов для охлаждаемых приборов до десятков в быстродействующих телевизионных системах.

Фон, возникающий от ярких объектов (Солнца, Луны, Земли и др.) или же вызванный высоким уровнем темнового тока, может привести к повышению уровня шумов. Подавление фона в основном определяется свойствами солнцезащитной бленды. Однако обеспечить необходимый уровень подавления удастся не всегда, и фоновая составляющая может достигать тысяч электронов [12].

Поскольку шумы считывания и фоновая составляющая не зависят друг от друга и носят

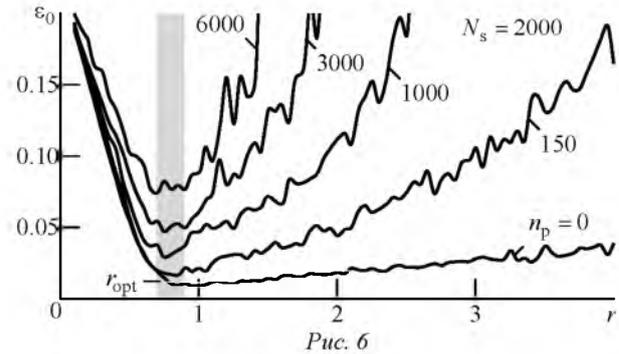


Рис. 6

аддитивный характер, будем их рассматривать как единый сигнал помехи $\bar{N}_i = \sqrt{\bar{N}_{rd}^2 + N_b}$.

На рис. 5 представлены зависимости ошибки оценки положения центра изображения малоразмерного объекта для $N_s = 200$ при различных \bar{N}_i , а на рис. 6 – зависимости ошибки положения центра для $N_s = 2000$ при тех значениях \bar{N}_i .

По полученным результатам можно сделать следующий вывод. В широком диапазоне уровней сигнала N_s и шумов считывания и фона \bar{N}_p зависимость ошибки определения координат центра изображения малоразмерного объекта от отношения КРО к размеру пиксела Δ имеет ярко выраженный минимум при $r_{opt} = 0.7 \dots 0.9$.

Показано, что при $r = 0.9$ усредненная по значениям начального смещения ошибка составляет менее 0.0036 поперечника пиксела.

Полученные результаты были использованы при разработке телевизионной камеры для малогабаритного звездного датчика [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыцулин А. К. Телевидение и космос. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2003. 228 с.
2. Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов / Г. А. Аванесов, С. В. Воронков, А. А. Форш, М. И. Куделин // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 4. С. 66–69.

3. Использование системы датчиков гида в задачах наведения и стабилизации телескопа Т-170М проекта "Спектр-УФ" / Г. А. Аванесов, Е. В. Белинская, С. В. Воронков, Н. А. Строилов, И. Ю. Катасонов, М. И. Куделин, А. В. Никитин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10, № 4. С. 16–23.

4. Быстродействующая телевизионная измерительная система для оценки искажений волнового фронта методом Гартмана / В. В. Войцехович, С. Н. Анкудинов, А. А. Манцветов, В. Э. Саволайнен, С. В. Коноглев, А. В. Переспелов, А. К. Цыцулин, В. В. Никитин, Д. Г. Долгов // Опт. журн. 2000. Т. 67, № 2. С. 113–119.

5. Березин В. В., Цыцулин А. К. Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики // Вестн. ТОГУ. 2008. Т. 1, № 8. С. 11–20.

6. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации / А. К. Цыцулин, Д. Ю. Адамов, А. А. Манцветов, И. А. Зубакин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014. 271 с.

7. Осадчий И. С. Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования // Журн. радиоэлектроники. 2015. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may15/1/text.pdf> (дата обращения 12.05.2016).

8. Fosu C., Hein G. W., Eissfeller B. Determination of Centroid of CCD Star Images // XXth ISPRS Congr. 12–23 July 2004, Istanbul, Turkey, 2004. URL: <http://www.isprs.org>

/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/341.pdf (дата обращения 12.05.2016).

9. Gaussian beam optics. URL: https://marketplace.idexop.com/store/SupportDocuments/All_About_Gaussian_Beam_OpticsWEB.pdf (дата обращения 12.05.2016).

10. Bahaa E. A. S., Malvin C. T. Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley & Sons, 1991. 1007 p.

11. Твердотельная революция в телевидении / под ред. А. А. Умбиталиева и А. К. Цыцулина. М.: Радио и связь, 2006. 300 с.

12. Филиппова О. В., Бессонов Р. В., Аванесов Г. А. Оптимизация конструкции светозащитной бленды прибора звездной ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 2. С. 165–174.

13. Телевизионная камера для малогабаритного звездного датчика / В. А. Иванов, Г. В. Левко, А. А. Манцветов, А. В. Степовой, П. С. Баранов, А. В. Морозов, Е. Ю. Пучка, Е. В. Письменный, Д. И. Сашин // Вопр. радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2014. Вып. 1. С. 43–51.

P. S. Baranov, A. A. Mancvetov

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Optimization of the relationship of Lens Dissipation Disk and Pixel Size to Improve the Precision of the Coordinates of a Small Object Image

The optimum relation of to the pixel size providing a maximum of accuracy of an estimates of coordinates of the image centers of small-sized objects for a wide range of entry conditions: of a signal, background and reading noise levels is defined. The analysis of influence of initial shift of small-sized object on the accuracy of definition of position of his center is carried out. It is shown that if the relation of lens dissipation disk to the pixel size less than 0.8 that the error of definition of the small-sized object center considerably depends on initial shift.

Circle of Confusion, Gravity Center Method, Small-Sized Object, Coordinates Estimate Accuracy

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2016 г.

УДК 681.007.51

Н. В. Лысенко, А. М. Мончак

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Информационные модели телевизионной системы

Рассмотрены первичные и вторичные информационные модели объекта, информация о котором передается к потребителю и воспринимается им. Приведено формальное описание информационных моделей. Для простых взаимно ортогональных отображений определена вероятность правильного обнаружения изображения объекта, представленного во вторичной информационной модели.

Информационная модель, вероятность опознавания изображений, изоморфизм

В настоящее время особый интерес проявляется к телевизионным системам (ТВС), параметры которых адаптируются к характеристикам объекта, под-

лежащего передаче. В связи с этим представляется необходимым описание информационных процессов, реализующихся в ТВС.