

АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ В УСТРОЙСТВЕ СОПРЯЖЕНИЯ ОСЕЙ

Крюкова К. А.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (105005, Москва, 2-ая Бауманская, д. 5), e-mail: ksenya.kryukova1994@yandex.ru

Статья «Анализ методологических погрешностей определения угловых координат в устройстве сопряжения осей» носит обзорный характер и посвящена анализу двух методов: энергетического центра тяжести и максимума отношения правдоподобия. В лазерных локационных системах, работающих на больших дальностях, используется мощное лазерное излучение. Для работы системы формирования пучка лазерных локационных систем и системы наведения положения пучка силового излучения необходимо контролировать с высокой степенью угловое положение оси диаграммы направленности пучка рабочего лазера. Одним из методов обеспечения соосности каналов многоканальных оптических систем является использование системы автоюстировки, позволяющей стабилизировать в заданных пределах угловое положение оси диаграммы направленности пучка излучения рабочего лазера, сформированной передающим каналом лазерной локационной системы, относительно базового положения оси приемного канала. Для определения угловых координат используются описанные выше два метода. Были установлены характеры зависимостей погрешности оценки положения центра пятна рассеяния при заданных смещениях для каждого метода. Сделаны выводы по полученным результатам. Ключевые слова: методологическая погрешность, угловые координаты, энергетический центр тяжести, максимум отношения правдоподобия.

THE ANALYSIS OF METHODOLOGICAL INACCURACIES OF DETERMINATION OF ANGULAR COORDINATES IN THE INTERFACE DEVICE AXES

Kryukova K. A.

Moscow state technical university named after Bauman (105005, Moscow, 2-ya Baumanskaya street, 5), e-mail: ksenya.kryukova1994@yandex.ru

The article "The analysis of methodological inaccuracies of determination of angular coordinates in the interface device axes" has survey character and is devoted to the analysis of the two methods: energy center of gravity and maximum probability ratio. The powerful laser radiation uses in laser radar systems operating at long range. For the beam shaping system of the laser radar systems and guidance systems provisions of the radiation beam power must be controlled with a high degree of angular position of the directivity pattern axis of the beam of the working laser. One method of ensuring the alignment of the multichannel optical systems channels is the use of automatic adjustment, which allows to stabilize within the specified limits the rotational orientation of the directional diagram axis of the radiation beam of the working laser generated by the transmitting channel of the laser radar system relative to the base position of the axis of the receiving channel. The above-described two methods use for determining the angular coordinates. The dependencies of inaccuracy estimates of the center position of the scattering spot were established for each method. Conclusions according to the obtained results were made.

Key words: methodological inaccuracy, angular coordinates, energy center of gravity, maximum probability ratio.

Погрешность наведения лазерного пучка на объект и погрешность взаимной выставки осей каналов лазерных локационных систем должны составлять единицы угловых секунд [5]. Одним из методов обеспечения соосности каналов многоканальных оптических систем является использование системы автоюстировки, позволяющей стабилизировать в заданных пределах угловое положение оси диаграммы направленности пучка излучения рабочего лазера, относительно базового положения оси приемного канала [2].

Устройство сопряжения осей (УСО) пучков излучения выполняет две функции: пространственное совмещение пучков излучения рабочего лазера и маркерного источника и отвод части излучения пучков в канал оптической системы устройства союстировки осей.

УСО состоит из плоскопараллельной пластины, зеркального объектива, построенного по системе Кассегрена, и приемного узла, состоящего из матричных фотоприемных устройств (ФПУ) ИК и видимого диапазонов спектра со светоделителем (см. рис. 1).

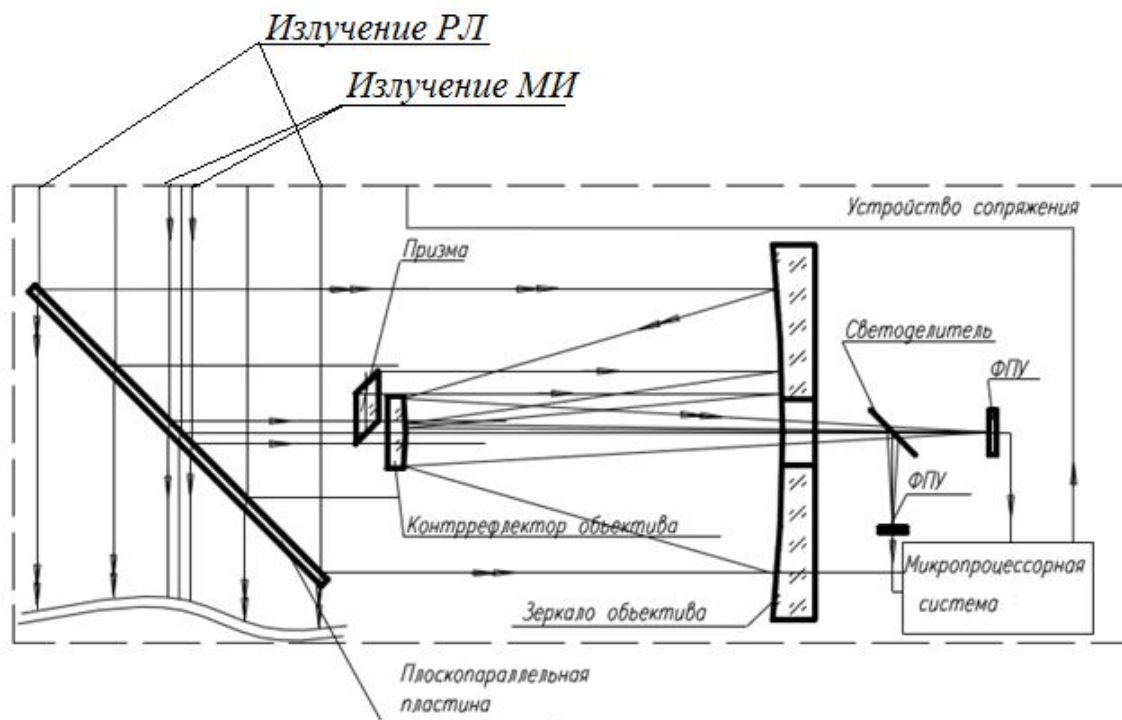


Рисунок 1 - Функциональная схема устройства сопряжения осей [3]

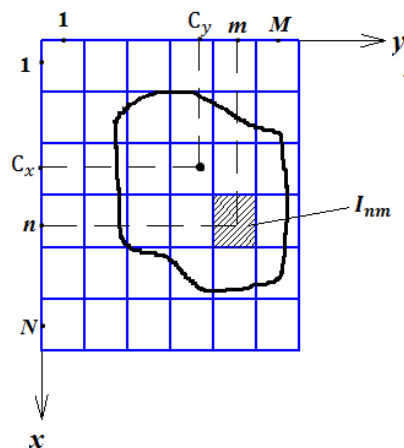
В УСО основным критерием качества является точность измерения угловых координат оптических осей пучков лазерного излучения [4]. Для оценки положения центра пятна рассеяния излучения рабочего лазера и маркерного источника могут быть использованы два метода: энергетического центра тяжести (ЭЦТ) и максимума отношения правдоподобия (МОП). Чтобы выбрать один из этих методов, нужно провести анализ методологической погрешности каждого метода.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода измерений, влиянием выбранного средства измерений на измеряемые параметры сигналов, некорректностью алгоритмов или расчетных формул, по которым производят вычисления, округлением результатов, отличием принятой модели объекта измерений от той, которая правильно описывает его свойство, определяемое путем измерения.

Отличительной особенностью методических погрешностей является то, что они не могут быть указаны в нормативно-технической документации на используемое средство

измерений, поскольку от него не зависят, а должны определяться оператором в каждом конкретном случае. В связи с этим оператор должен четко различать фактически измеренную им величину и величину, подлежащую измерению. Методическую погрешность можно уменьшить путем применения более точного метода измерения.

Точность измерения зависит от точности определения координат энергетических центров тяжести изображений (см. рис. 2) на ФПУ.



C_x, C_y – координаты центра тяжести распределения интенсивности в изображении на ПЗС - матрице; I_{nm} – величина сигнала в пикселе с координатами n, m ; N, M – число столбцов и строк матрицы; n, m – порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы

Рисунок 2 - Распределение интенсивности излучения на ПЗС – матрице

Метод энергетического центра тяжести (ЭЦТ)

Необходимо задать распределение Гаусса со смещением x_0 относительно середины пикселя, которое бы описывала нам в дальнейших вычислениях распределение пятна рассеяния по пикселям в матрице.

$$f(r, x, x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot r} e^{\left(\frac{-(x-x_0)^2}{2r^2}\right)} \quad (1)$$

где r – радиус рассеяния проекции изображения.

Координаты (в пикселях) центра тяжести распределения интенсивности в изображении на ПЗС - матрице определяются [6]:

$$C_x = \frac{\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} I_{nm} \cdot n}{\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} I_{nm}} ; C_y = \frac{\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} I_{nm} \cdot m}{\sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \sum_{m=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} I_{nm}}, \quad (2)$$

где I_{nm} – величина сигнала в пикселе с координатами n, m ;

N, M –число столбцов и строк матрицы;

n, m –порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы.

Истинное смещение центра пятна рассеяния относительно центра пикселя матрицы будет определяться следующей формулой:

$$C_{\text{хист}}(r, x_0) = \frac{\sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} (i \cdot a) \int_{ia-\frac{a}{2}}^{ia+\frac{a}{2}} f(r, x, x_0) dx}{\sum_{i=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \int_{ia-\frac{a}{2}}^{ia+\frac{a}{2}} f(r, x, x_0) dx}, \quad (3)$$

где a – размер пикселя матрицы.

Итоговая погрешность оценки положения пятна рассеяния будет определяться как разность вычисленного по формуле (3) истинного смещения пятна рассеяния и заданного значения x_0 :

$$\Delta(r, x_0) = C_{\text{хист}}(r, x_0) - x_0 \quad (4)$$

Ниже приведены графики, полученные с использованием формул (1) – (4).

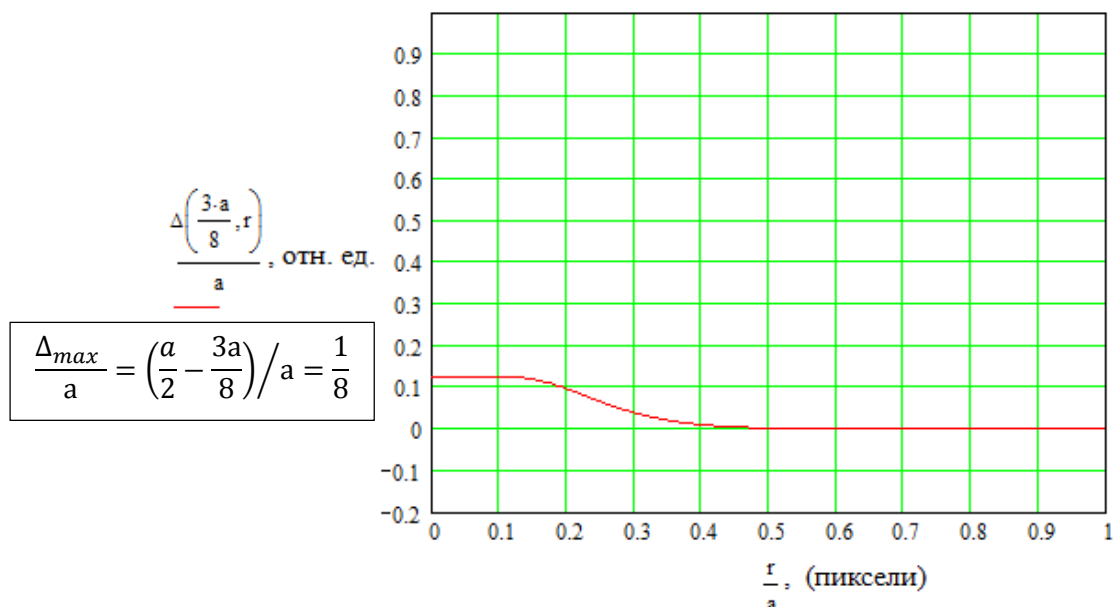


Рисунок 3 - Итоговое значение погрешности оценки положения центра пятна рассеяния при заданном смещении $x_0 = 3a/8$ при $r/a \leq 1$

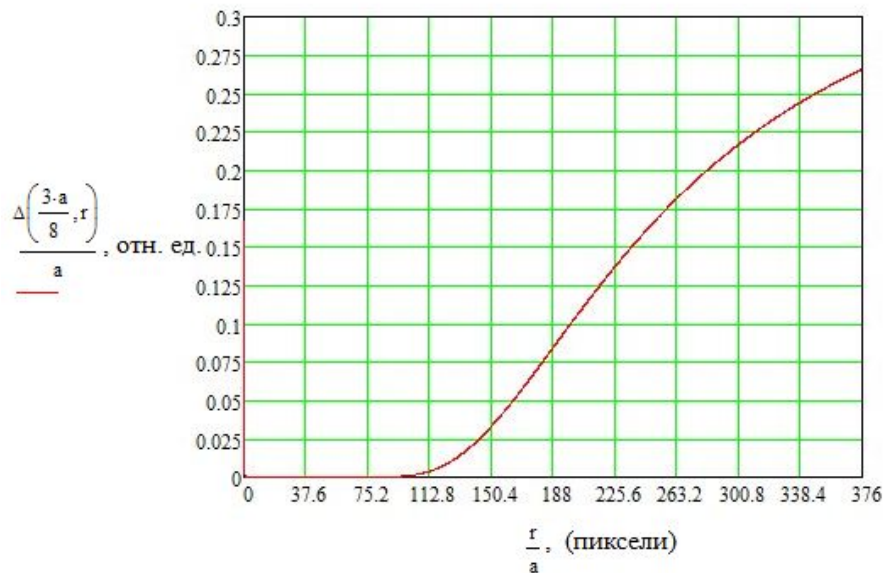


Рисунок 4 - Итоговое значение погрешности оценки положения центра пятна рассеяния при заданном смещении $x_0 = 3a/8$ при $r/a \leq 376$

Метод максимума отношения правдоподобия (МОП)

Интенсивность I_{ij} светового потока, падающего на пиксель (i, j) определяется выражением [1]:

$$I_{ij} = \iint I(x, y) dx dy, \quad (5)$$

где $I(x, y)$ - пространственная функция распределения интенсивности падающего на фотоприемник падающего потока, которая равна:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_0, \quad (6)$$

где I_0 - интенсивность помех на единицу площади фотоприемника;

$I_1(x, y)$ - плотность энергии светового потока от полезного сигнала.

$$I_1(x, y) = I_1 \cdot f(x - x_0, y - y_0), \quad (7)$$

где $f(x - x_0, y - y_0)$ - функция, определяющая пространственный характер распределения мощности энергии сигнала.

В случае небольшого отклонения лучей от оптической оси пространственная плотность распределения энергии падающего сигнала описывается нормальной кривой Гаусса:

$$f(x - x_0, y - y_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot r} e^{\left(\frac{-(x-x_0)^2}{2r^2}\right)} e^{\left(\frac{-(y-y_0)^2}{2r^2}\right)} \quad (8)$$

где r - радиус рассеяния проекции изображения;

(x_0, y_0) – координаты проекции источника излучения при прохождении лучей через оптическую систему.

Согласно [7], оценка дисперсии погрешности определения координат центра проекции методом МОП :

$$\sigma^2 = \left\{ \frac{I_1(x, y)^2 \cdot t}{I_0(x, y)} \cdot \sum_{i,j} \left[\iint \frac{d^2 f(x - x_0, y - y_0)}{dx_0 dy_0} dx dy \right]^2 \right\}^{-1}, \quad (9)$$

где t - время накопления.

При моделировании были приняты следующие значения параметров:

- $I_1 = 100$ квантов АЦП /с;
- $I_0 = 20$ квантов АЦП / пискель·с;
- $t = 20$ мс.

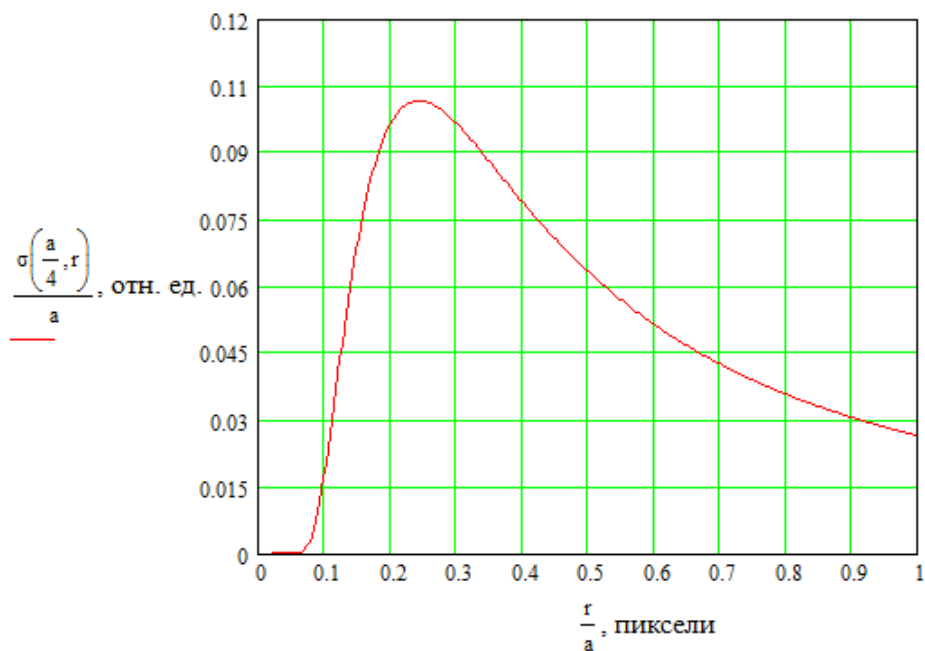


Рисунок 5 - Итоговое значение СКО (в пикселях) оценки положения центра пятна рассеяния при заданном смещении $x_0 = a/4$ при $r/a \leq 1$

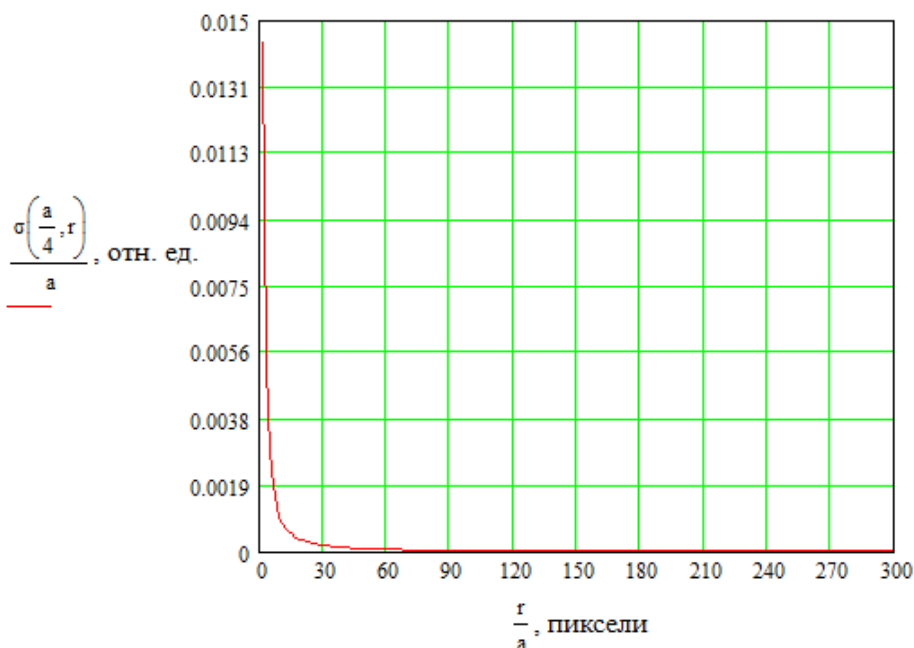


Рисунок 6 - Итоговое значение СКО (в пикселях) оценки положения центра пятна рассеяния при заданном смещении $x_0 = a/4$ при $r/a \leq 300$

Заключение

Проанализированы методические погрешности:

- Метод ЭЦТ: с увеличением размера r пятна рассеяния при $r \leq 0,5 \cdot a$ погрешность оценки положения центра пятна рассеяния уменьшается. Максимальное значение погрешности $\Delta_{max} = \frac{a}{2} - x_0$. При $0,5 \cdot a \leq r \leq 100 \cdot a$ погрешность оценки положения центра пятна рассеяния минимальна $\Delta_{min} < 0,005 \cdot a$. При $r > 100 \cdot a$ погрешность увеличивается в связи с тем, что размер пятна рассеяния превышает размер матрицы.

- Метод МОП: максимальное значение СКО σ оценки положения центра пятна рассеяния достигается при $r = \frac{a}{2} - x_0$. С увеличением размера r пятна рассеяния при $r > \frac{a}{2} - x_0$ значение СКО σ оценки положения центра пятна рассеяния уменьшается.

Список использованных источников

1. Андреев А. Л., Коротаев В. В. Особенности расчета оптико-электронных систем позиционирования на основе готовых телевизионных модулей. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-rascheta-optiko-elektronnyh-sistem-pozitsionirovaniya-na-osnove-gotovyh-televizionnyh-moduley> (дата обращения 19.11.2017).
2. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В. Система измерения углового рассогласования осей рабочего лазера и маркерного источника на основе дифракционных оптических элементов. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/sistema-izmereniya-uglovogo-rassoglasovaniya-osey-rabocheho-lazera-i-markernogo-istochnika-na-osnove-difraktsionnyh-opticheskikh> (дата обращения 16.10.2017).
3. Барышников Н.В., Карачунский В.В., Свигач О.А. Современные методы проектирования система автоюстировки высокоточных оптико-электронных приборов. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-metody-proektirovaniya-sistem-avtoyustirovki-vysokotochnyh-optiko-elektronnyh-priborov> (дата обращения 18.10.2017).
4. Барышников Н.В. Разработка методов и оптико-электронной аппаратуры автоюстировки бортовой локационной станции с мощным источником лазерного излучения. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005052668> (дата обращения 18.10.2017).
5. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 480с.
6. Кружилов И.С. О влиянии относительного размера изображения на погрешность определения координат // Компьютерная оптика. 2009. №2. С. 210 – 215.
7. Латыев С.М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 248 с.