

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА И РАСХОДИМОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

А.В.Гришанов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Аннотация

Произведена оценка погрешностей измерения пространственно-энергетических характеристик лазерных излучателей: координат энергетического центра освещенности, энергетической расходимости, вызванных различными дестабилизирующими факторами на программной модели оптико-электронного прибора с матричным фотоприемником. Реализован алгоритм расчета энергетической расходимости методами обработки изображений.

Математическое моделирование сложных технических систем, к которым относятся оптико-электронные приборы (ОЭП) с матричными фотоприемными устройствами (МФПУ), позволяет прогнозировать их технические характеристики на ранних стадиях проектирования и тем самым оптимизировать состав, структуру и алгоритм функционирования систем. В работе [1] была предложена модель ОЭП с МФПУ (см. рис. 1) для оценки погрешностей координатных измерений, а в настоящем исследовании демонстрируются ее предсказательные возможности и способность к наращиванию базы моделируемых ситуаций.

Наращивание базы моделируемых ситуаций произведено путем дополнения пуассоновскими распределениями фона и сигнала, а также вводом реальных распределений фона, сигнала и чувствительности, как с помощью графических редакторов, так и посредством телекамеры и блока ввода-вывода изображений. Пуассоновское распределение имеет место при небольшом числе фотонов, попадающих на каждый элемент матричного фотоприемника. Оно записывается в виде:

$$p(Y = m) = (a^m / m!)e^{-a} \text{ для } m = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где a - математическое ожидание пуассоновской случайной величины.

Моделирование пуассоновской случайной величины проводилось следующим образом: исходя из условий поставленной задачи определяется параметр a затем рассчитываются вероятности $p(Y=m)$ для $m=0, 1, 2$ и т.д. до какого-то достаточно большого числа фотонов. В данной модели $m_{\max}=100$, для которого достигается вполне приемлемая точность вычислений при сравнительно высоком быстродей-

ствии алгоритма. Так как $\sum_{m=0}^{m_{\max}} p(Y = m) \approx 1$

(знак " \approx " вследствие того, что $m_{\max} < \infty$), то следующий шаг моделирования состоит в разбиении отрезка прямой от 0 до 1 на части в соответствии с полученными вероятностями и генерации равномерно распределенного случайного числа от 0 до 1. В зависимости от того, на какую часть отрезка попало это число, и выбирается значение искомой случайной величины. Очевидно, что она будет распределена по пуассоновскому закону.

Блок обработки сигнала МФПУ был дополнен алгоритмом измерения энергетической расходимости методом фокального пятна [4]. Он состоит из следующих шагов:

- 1) рассчитываются координаты энергетического центра освещенности (ЭЦО);
- 2) вычисляется начальный радиус круга с центром в ЭЦО как наименьшее из расстояний от ЭЦО до каждой границы матричного фотоприемника (МФПУ);
- 3) вычисляется среднее значение сигнала и СКО от среднего значения сигнала в кольце с начальным радиусом и с единичной толщиной;
- 4) значение начального радиуса уменьшается на единицу. Повторяется операция (3) для нового радиуса. Если среднее значение для данного радиуса значимо (то есть более чем на СКО) отличается от среднего значения для предыдущего радиуса, то считается, что в кольцо с данным радиусом попадает уже энергия пучка, а не только энергия фона, то есть принимаем данный радиус за радиус пучка R_p . Если средние значения при данном и предыдущем радиусе не отличаются или отличаются не значимо, то считается, что в кольцо попала только энергия фона, и поэтому повторяется операция (4);
- 5) рассчитываются суммарные мощности излучения в кругах с радиусами $1, 2, \dots, R_p-1, R_p$;

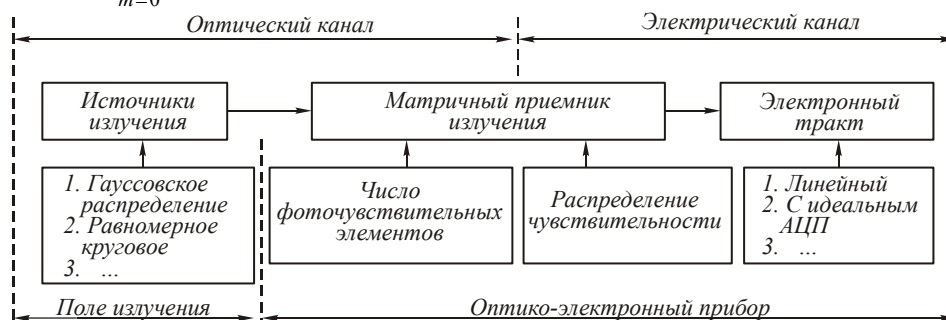


Рис. 1. Структурная схема модели ОЭП с МФПУ

5) полная мощность пучка, то есть суммарная мощность излучения в круге с радиусом R_n нормируется на 1, в результате суммарные мощности излучения в кругах с радиусами 1, 2, ..., R_n-1 получают значения от 0 до 1;

6) энергетическая расходимость определяется по формуле: $\theta_m = 2 \arctg(r_m/f)$, где r_m – радиус, соответствующий доле суммарной мощности m ($0 < m < 1$); f – фокусное расстояние линзы, собирающей излучение на ПЗС-матрице.

Правильность работы подпрограммы по измерению энергетической расходимости проверялась на таких распределениях плотности мощности по сечению пучка, как гауссовское распределение и равномерно освещенный круг. Аналитически рассчитывался радиус r_m , затем это значение сравнивалось с r_m , полученным в результате работы программы. Выяснилось, что разница между этими значениями не превышает 1 пикселя. Эта разница объясняется тем, что при аналитическом расчете учитывается абсолютно вся энергия пучка, а на самом деле очень незначительная доля энергии излучения не попадает на МФПУ. При работе программы это обстоятельство и вносит погрешность в расчеты. Однако путем подбора элементов оптической части схемы можно добиться оптимального радиуса пучка (30-40 пиксел), при котором погрешность не будет превышать 1%.

В рамках созданной модели с помощью вычислительных экспериментов получены ограничения величин дестабилизирующих факторов, при которых погрешности измерения координат энергетического центра освещенности (ЭЦО) составляют доли размера одного фоточувствительного элемента МФПУ.

В модели с синусоидальным распределением чувствительности: $G(i,j) = G_1 \sin((2\pi(i \cos A + j \sin A)/T) + F_0) + G_0$, где G_0, G_1, T, A, F_0 – параметры распределения, задаваемые в вычислительном эксперименте; i и j – дискретные координаты по осям Ox и Oy , соответственно, максимальная глубина модуляции чувствительности достигается при $G_1 = G_0$, что и обусловило выбор параметров модели. Вычислительный эксперимент проводился для $G_1/G_0 = 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05$. Если причиной синусоидального распределения чувствительности выступают интерференционные явления, то для лазерных источников излучения, в силу их высокой когерентности, случаи $G_1/G_0 = 1$ встречаются довольно часто.

Синусоидальное распределение чувствительности можно интерпретировать как пространственный фильтр, отклик которого на внешнее воздействие будет экстремальным при совпадении его пространственного периода с характерным размером изображения, поступающего на вход этого фильтра. Поэтому результаты вычислительного эксперимента представлялись в координатах: по оси абсцисс D/T , где D – диаметр пучка, а T – пространственный период изменения чувствительности; по оси ординат отложен модуль абсолютной погрешности измерения координат ЭЦО Δx в пикселях (см. рис. 2).

Из представленных результатов видно, что предположение о пространственной фильтрации подтверждается, так как кривые носят немонотонный характер и имеют максимум при $D/T = 1$. Вели-

чина погрешности прямо пропорциональна отношению амплитуды осциллирующей чувствительности к ее среднему значению G_1/G_0 .

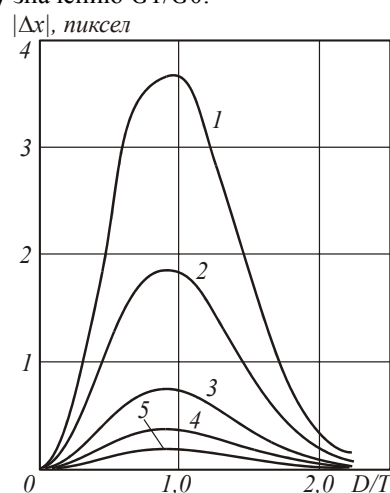


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения координат энергетического центра освещенности при синусоидальном распределении чувствительности и гауссовском сигнале. 1 - 5 - $G_1/G_0 = 1; 0,5; 0,2; 0,1; 0,05$ соответственно.

В случае равномерно освещенного круга на кривой $|\Delta x| = f(D/T)$ появляется и второй локальный пик погрешности на удвоенном пространственном периоде ($D/T = 2$), хотя и меньшей амплитуды (см. рис. 3).

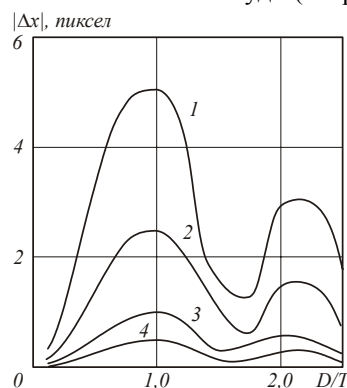


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения координат энергетического центра освещенности при синусоидальном распределении чувствительности и сигнале в виде равномерно освещенного круга. 1 - 4 - $G_1/G_0 = 1; 0,5; 0,2; 0,1$ соответственно.

Сравнение погрешностей для гауссовского пучка и равномерно освещенного круга представлено на рис. 4. При резких перепадах освещенности, которые имеют место на границе равномерно освещенного круга, погрешности приблизительно в 1,5 раза выше, чем для пучков с плавными переходами от максимальной яркости к неосвещенным участкам поля зрения. Этими резкими границами обусловлен второй локальный пик для диаметра пятна вдвое большего пространственного периода синусоиды, так как резкие перепады расширяют спектральный диапазон сигнала и являются источником дополнительных гармонических составляющих заметной амплитуды.

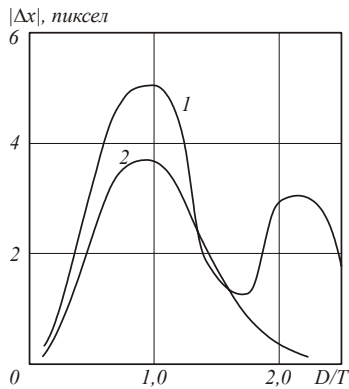


Рис. 4. Сравнительные характеристики погрешностей измерения координат энергетического центра освещенности при синусоидальном распределении чувствительности и сигналах в виде равномерно освещенного круга и гауссовском. $G1/G0 = 1$; 1 - равномерно освещенный круг; 2 - гауссовский пучок.

Как в случае гауссовского сигнала, так и для сигнала в виде равномерно освещенного круга при глубокой ($G1/G0 = 1$) модуляции чувствительности погрешности измерения координат ЭЦО могут достигать нескольких пиксел. Поэтому синусоидальные вариации чувствительности следует отнести к наиболее опасным дефектам МФПУ.

Пути устранения интерференционных полос в поле зрения ОЭП следующие:

- а) просветление оптических элементов, уменьшающее коэффициенты отражения;
- б) применение клиновидных пластин, разделяющих направления распространения основного и паразитных пучков;
- в) контроль качества клееных многокомпонентных оптических систем и МФПУ.

Приемы, с помощью которых снижается влияние синусоидальной неоднородности чувствительности на погрешности, заключаются в оптимизации профиля интенсивности и характерного размера пучка, то есть $D/T \neq n$, где $n=1,2 \dots$

В другом вычислительном эксперименте исследовалось влияние неоднородной чувствительности МФПУ, изменяющейся по линейному закону: $G(i,j) = |Di + Bj + C|$, где D, B, C - параметры распределения, задаваемые в вычислительном эксперименте; i и j - дискретные координаты по осям Ox и Oy , соответственно. В качестве интегральной характеристики линейной неоднородности введена величина $k = (G_{\max} - G_{\min}) / (G_{\max} + G_{\min})$, где G_{\max}, G_{\min} - соответственно максимальное и минимальное значения чувствительности в поле зрения ОЭП. В эксперименте исходное распределение сигнала - гауссовское.

Результаты вычислительного эксперимента при линейной обработке сигнала представлены в графической форме на рис. 5, из которых видно, что погрешность измерения координат ЭЦО монотонно возрастает с увеличением радиуса сигнального пучка r и неоднородности чувствительности k . Включе

ние АЦП с числом уровней квантования 2, то есть бинаризация изображения, увеличивало Δx не более чем на 10%. Последний факт позволил обойтись без исследования влияния вида сигнального распределения на погрешность, так как бинаризация сигнала и равномерно освещенный круг эквивалентны.

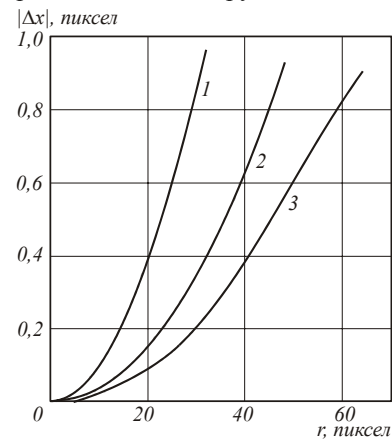


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения координат энергетического центра освещенности при линейной неоднородной чувствительности и гауссовском сигнале. 1 - $k=0,5$; 2 - $k=0,2$; 3 - $k=0,1$.

С качественной стороны полученные результаты физически легко интерпретируемы:

- а) с увеличением неоднородности чувствительности погрешности измерения координат ЭЦО растут;
- б) уменьшение радиуса пучка приводит к снижению Δx , так как близко расположенные фоточувствительные элементы МФПУ при общем их числе 256×256 мало отличаются друг от друга значениями G даже для $k = 0,5$.

Эксперименты с хаотическим равномерным распределением чувствительности ячеек ПЗС-матрицы строились статистически. Они проводились как с гауссовским распределением сигнала, так и с распределением в виде равномерно освещенного круга. Обработка сигнала - линейная. Набор радиусов пучков от 2 до 64 пиксел диктовался двумя соображениями:

- а) для малых радиусов $r \leq 1$ не имеет смысла говорить о субэлементном разрешении в измерении координат ЭЦО;
- б) для больших радиусов существует опасность, особенно при перемещении пучка, получить вклад в погрешность от выхода края пучка за МФПУ.

С программным блоком АЦП эксперименты не проводились, так как равномерно освещенный круг сам по себе является бинарным сигналом и представляет собой эквивалент обработки гауссовского сигнала с подключением двухуровневого АЦП.

С каждым из выбранных радиусов ($r=2, 5, 8, 10, 13, 16, 20, 24, 27, 32, 40, 51, 64$ пиксела) вычислялись координаты энергетического центра при перемещении центра пучка по 10 точкам МФПУ. Центр пучка в серии из десяти экспериментов перемещался либо по координате X , либо по координате Y . Для каждой серии вычислялась средняя квадра

тичная погрешность единичного измерения координат ЭЦО (SKO_x и SKO_y). Затем, для каждого r из четырех значений выбирались SKO_x и SKO_y максимальная и минимальная величины, а для модуля погрешности лишь максимальные значения, которые и представлены в графической форме на рис. 6.

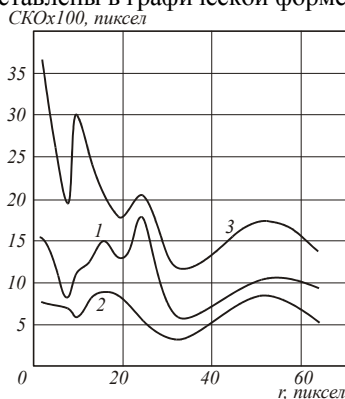


Рис. 6. Границы средней квадратичной погрешности единичного измерения координат энергетического центра освещенности для сигнала в виде равномерно освещенного круга. 1 - верхняя граница SKO; 2 - нижняя граница SKO; 3 - максимальное значение модуля погрешности $\delta G = 50\%$.

Предварительно в вычислительном эксперименте выяснилось, что как SKO, так и погрешности отдельного измерения пропорциональны величине относительной неоднородности чувствительности, то есть $SKO/\delta G = \text{const}$. Поэтому основной объем экспериментов выполнен с $\delta G = 50\%$, так как именно при таком значении δG $SKO \approx 0,1$ пиксела, и неоднородность чувствительности может внести заметный вклад в погрешность измерения координат ЭЦО.

Из приведенных на рис. 6 результатов видно, что лишь очень неоднородные по своей чувствительности МФПУ приводят к средней квадратичной погрешности измерения координат ЭЦО, превышающей 0,1 пиксела. Однако результаты отдельных вычислительных экспериментов дают в 2 - 3 раза большую погрешность. Поскольку и погрешности отдельных экспериментов также пропорциональны величине δG , то для серийных фоточувствительных ПЗС-матриц, относительная неоднородность чувствительности которых не превышает (по крайней мере, по паспортным данным) 20%, вряд ли следует ожидать появления погрешностей, больших 0,1 пиксела, то есть больших 0,1 от размера или периода расположения одной фоточувствительной ячейки.

Правда, результаты проведенных экспериментов оставляют открытым вопрос о влиянии самого закона распределения чувствительности на величину SKO. Для $\delta G = 50\%$ при $G_{\text{ср}} = 1$ длина отрезка равномерно распределенной чувствительности тоже равна 1 и $SKO_G = 1/(2 \cdot 3^{0.5}) = 0,29$. Поэтому желательно расширить диапазон исследований на иных, отличных от равномерного, распределениях чувствительности. Продолжая обсуждение результатов, представленных на рис. 6 и 7, сравнивая верхние границы максимальных погрешностей и SKO, вид-

но, что для сигнала, моделируемого равномерно освещенным кругом, они приблизительно в 2 раза больше, чем для гауссовского. В этом смысле сигнал с резкими перепадами интенсивности менее выгоден, по сравнению с плавными переходами от света к тени.

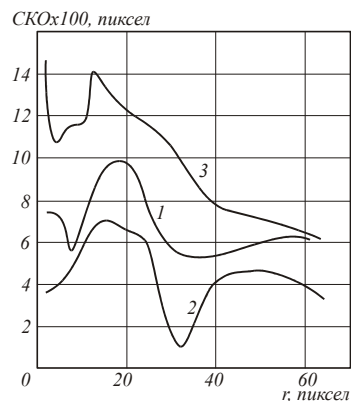


Рис. 7. Границы средней квадратичной погрешности единичного измерения координат энергетического центра освещенности для гауссовского сигнала. 1 - верхняя граница SKO; 2 - нижняя граница SKO; 3 - максимальное значение модуля погрешности $\delta G = 50\%$.

Были проведены вычислительные эксперименты по оценке погрешностей измерения координат ЭЦО при наличии фонового излучения. Рассмотрим случай нормального распределения фонов. Вычислительные эксперименты проводились как с гауссовским сигналом, так и с равномерно освещенным кругом. В основном использовалась линейная обработка сигнала, но был проведен эксперимент и с подключением АЦП. Отношение полной энергии сигнала к полной энергии фона выбиралось с учетом рекомендаций для измерительных систем [2] 5:1; 10:1; 20:1, в то время как системы обнаружения работают и при меньших отношениях сигнал/шум (3...1):1[3].

Первый эксперимент состоял в вычислении погрешности измерения ЭЦО при смещении гауссовского сигнального пучка от центра ($x_0=128$; $y_0=128$) МФПУ к его периферии ($x_0=200$, $y_0=128$). Для исключения краевых эффектов радиус пучка выбирался небольшим ($r_0=24$ пиксела). Отношение полной энергии сигнала к полной энергии фона 5:1; 10:1; 20:1. Результаты представлены в графической форме на рис. 8. По мере отклонения центра пучка от центра МФПУ l погрешность линейно возрастает.

Угол наклона прямой пропорциональной зависимости между $|\Delta x|$ и l определяется отношением сигнал/шум.

Полученные результаты просто интерпретируются, если представить изображение сигнала с фоном, как сумму изображений сигнала, ЭЦО которого задается оператором, и фона с ЭЦО расположенным приблизительно в центре поля зрения МФПУ. Тогда координата ЭЦО суммарного изображения определяется по аналогии с центром масс системы двух тел, что и подтверждается непосредственными вычислениями.

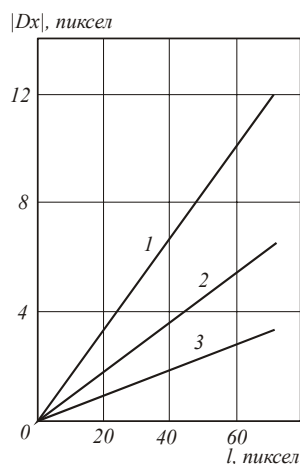


Рис. 8. Зависимость погрешности измерения координат ЭЦО освещенности, обусловленных фоновой засветкой: 1 - сигнал/шум 5:1, 2 - 10:1, 3 - 20:1.

Другие вычислительные эксперименты:

а) с радиусами гауссовского сигнала $r=48$ и 12 пикселов;

б) с сигналом в виде равномерно освещенного круга;

в) с перемещением сигнального пучка по оси y и одновременно по обеим осям - подтвердили с точностью до сотых долей пиксела решающий вклад отношения сигнал/шум в линейное возрастание погрешности по мере смещения центра сигнального пучка от центра МФПУ. Поэтому получение погрешностей в доли пиксела по всему полю зрения ОЭП в режиме линейной обработки сигнала возможно лишь на пути увеличения отношения сигнал/шум, что не всегда осуществимо и поэтому не может быть признано оптимальным.

Практически полностью исключить влияние фона на погрешность в модели ОЭП с МФПУ удалось применением пороговой обработки. Пороговая обработка имитировалась путем включения АЦП для промежуточного преобразования электрического сигнала. При отношении сигнал/шум 20:1 и выборе числа уровней квантования электрического сигнала АЦП, равным 8, эффект смещения оценки координат ЭЦО из-за наличия фона полностью подавлялся. Число уровней квантования 8 соответствует числу градаций освещенности, разрешаемому серийными фоточувствительными ПЗС-матрицами.

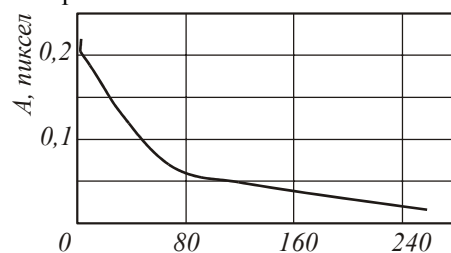
В результате анализа результатов экспериментов с нормальным и пуассоновским распределением фона выяснилось, что погрешность вычисления координат ЭЦО не зависит от характера и параметров распределения, таких, как среднее значение числа фоновых фотонов и дисперсия (разброс значений) интенсивности фона, а решающее влияние на погрешность оказывает соотношение сигнал/шум, то есть отношение полной энергии сигнала к полной энергии шума.

Также в модели можно задавать гауссовское распределение освещенности на МФПУ, но в качестве числа фотонов, попадающих на каждый фоточувствительный элемент ПЗС-матрицы брать не детерминированное число фотонов, а некоторое случайное число, которое генерировалось по пуассоновскому закону с математическим ожиданием, равным рассчитанному

числу фотонов. При таком распределении освещенности выявилась обратная зависимость погрешности координат ЭЦО от суммарной интенсивности освещения фотоприемника (см. рис. 9), то есть при увеличении суммарной освещенности меньше сказывается случайность распределения освещенности отдельных элементов МФПУ на погрешности вычисления координат ЭЦО. Эксперимент проводился при радиусе пучка 32 пиксела, центр пучка находился в центре МФПУ. Значение погрешности измерения координат ЭЦО A определялось в серии, состоящей из пяти измерений. Погрешность A рассчитывалась по следующей формуле:

$$A = \left(\sum_{i=1}^5 \sqrt{\Delta^2 x_i + \Delta^2 y_i} \right) / 5, \text{ где } \Delta x_i - \text{ погрешность по оси } x \text{ } i \text{ измерения, } \Delta y_i - \text{ погрешность по оси } y \text{ } i \text{ измерения.}$$

погрешность по оси x i измерения, Δy_i - погрешность по оси y i измерения.



Суммарная интенсивность/1000 (фотонов)

Рис. 9. Зависимость погрешности измерения координат ЭЦО при пуассоновской статистике числа фотонов.

В рамках созданной модели с помощью вычислительных экспериментов получены ограничения величины дестабилизирующих факторов, при которых погрешности измерения координат ЭЦО составляют доли размера одного фоточувствительного элемента МФПУ. Внутри границ этой области достижимо субэлементное разрешение в измерении координат ЭЦО.

Ограничения по неравномерности чувствительности и интенсивности фоновых засветок вполне выполнимы на серийной элементной базе для ОЭП с МФПУ, что является предпосылкой успешной реализации опытно-конструкторских работ в этой области.

Предусмотрено расширение модели путем введения новых двумерных распределений освещенности, чувствительности, фона, а также включение новых способов обработки сигнала. В целом работа проведена при поддержке ГНТП "Научное оборудование".

Литература

1. Гришанов В.Н., Мордасов В.И., Гришанов А.В. Математическая модель оптико-электронного прибора с матричным фотоприемником для оценки погрешностей координатных измерений // Сб., Применение лазеров в науке и технике. В. 9, Иркутск: ИФ ИЛФ СО РАН. 1997. С. 19-33.
2. Аксененко М.Д., Баранчиков М.Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства // М., Энергоатомиздат. 1984. 208 с.
3. Эклз М., Сим Э., Триттон К. Детекторы слабого излучения в астрономии // М., Мир, 1986. 200 с.
4. ГОСТ 24453 - 80. Измерения параметров и характеристик лазерного излучения // М., И-во стандартов, 1981. 38 с.