

УДК 681.78, 004.932

## Оценка погрешности измерения координат маркеров на изображениях, регистрируемых стереоскопической системой

© 2020 г. **А. В. Горевой\***, \*\*, \*\*\*; **В. Я. Колючкин\*\***, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;  
**А. С. Мачихин\***, \*\*\*, ДОКТОР ТЕХН. НАУК

\*Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва

\*\*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

\*\*\*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

E-mail: machikhin@ntcup.ru

Поступила в редакцию 26.12.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-05-18-30

Предложен метод оценки погрешности измерения координат маркеров (углов клеток) на изображениях, регистрируемых стереоскопической системой. Решение этой задачи необходимо для определения погрешности трехмерных геометрических измерений, проводимых с помощью таких систем. На этапе проектирования метод применяется к фрагментам изображения, синтезированным на основе абберационных характеристик оптической системы. На этапе эксплуатации метод дополнен оценкой параметров шума на регистрируемых изображениях. Эффективность предложенного подхода подтверждена компьютерным моделированием и экспериментами. Результаты работы позволяют объединить проектирование оптической системы и разработку алгоритмов обработки данных при создании стереоскопических измерительных приборов в единую процедуру, а также оценивать погрешности трехмерных геометрических измерений при эксплуатации этих приборов

**Ключевые слова:** стереоскопические приборы, измерение геометрических параметров, калибровка, обработка изображений.

**Коды OCIS:** 120.0120, 330.1400, 230.0230

### ВВЕДЕНИЕ

Стереоскопические системы широко используются для трехмерной визуализации поверхности и измерения геометрических параметров объектов в биометрии, эндоскопии, машинном зрении и других областях [1–4]. Измерительные возможности таких систем определяются как параметрами оптико-электронной системы, так и применяемыми алгоритмами обработки данных [5–7].

Для достижения наилучшего результата при проектировании таких систем следует применять совместный подход [8], который позво-

ляет оптимизировать параметры оптической системы (ОС) с учетом последующей обработки изображений и использовать на стадии проектирования погрешность трехмерных измерений при формировании оценочной функции [9]. Это особенно важно для катадиоптрических и призмочно-линзовых ОС, где параметры отдельных элементов влияют как на качество изображения, так и на базовое расстояние стереопары и, как следствие, на погрешность измерений. Применение совместного подхода к проектированию позволяет в процессе математического моделирования оценить погрешность

трехмерных измерений при использовании различных математических моделей [9] и алгоритмов калибровки [10]. Кроме этого, интеграция такого моделирования с системами автоматизированного проектирования (САПР) ОС (Zemax/OpticStudio, CODE V и др.) открывает возможности для анализа допусков, температурных режимов работы и других факторов, оказывающих влияние на погрешность измерений [9–11].

Для полноценной реализации такого подхода необходимо осуществить переход от параметров ОС к погрешностям калибровки и трехмерных измерений. Как правило, для калибровки стереоскопических систем используются объемные и плоские тест-объекты с маркерами в виде шахматных клеток [7, 9–13]. В этом случае необходимым промежуточным этапом является оценка погрешности измерения координат углов этих клеток на изображении. Аналогичную задачу требуется решить при использовании таких маркеров для стереоскопических измерений в фотограмметрии, а также при измерениях по границам объектов, автоматически детектированным на стереоскопических изображениях [1, 13–16].

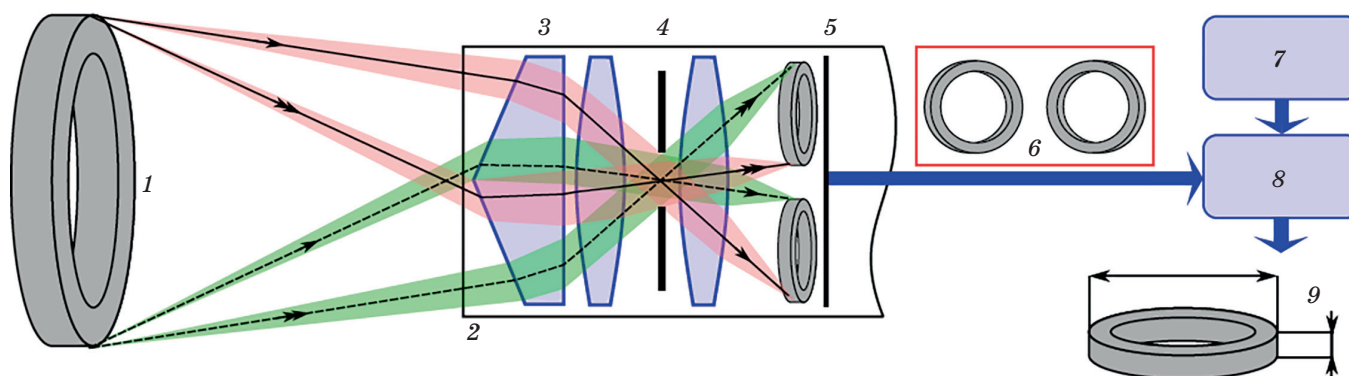
В данной работе предложен метод оценки погрешности измерения координат углов клеток, применимый как на этапе проектирования, так и при эксплуатации стереоскопических систем. При проектировании ОС метод позволяет использовать САПР ОС для синтеза фрагментов изображений с учетом реальных aberrаций ОС. Работоспособность метода проверена математическим моделиро-

ванием и экспериментально на примере призмочно-линзовой эндоскопической системы (рис. 1).

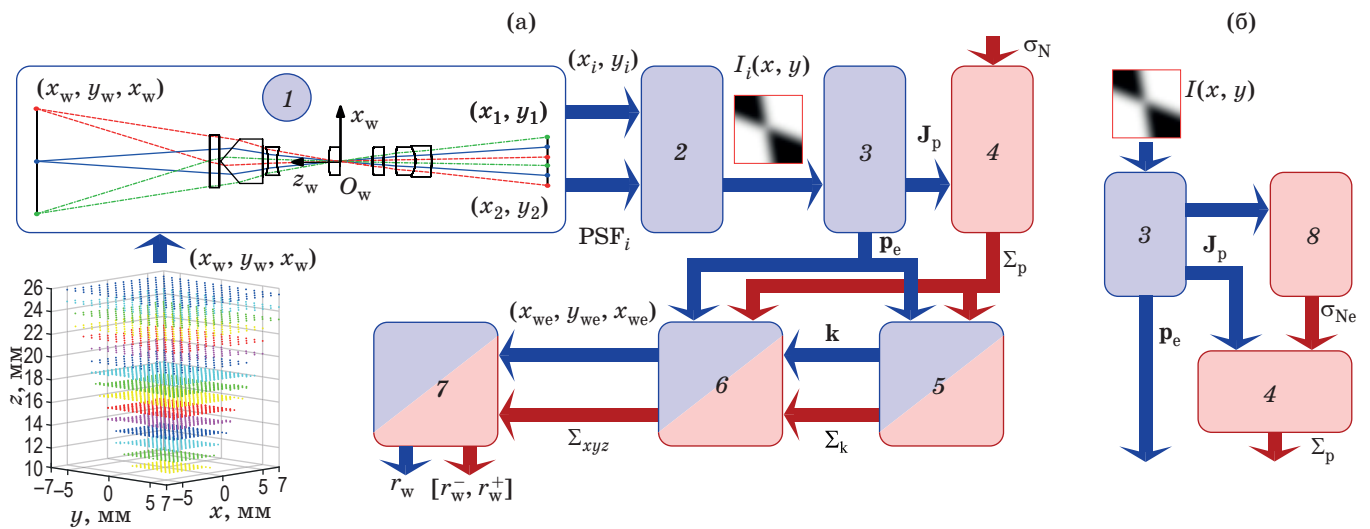
## ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Основной задачей при проектировании стереоскопических измерительных систем является обеспечение заданной точности измерений трехмерных координат и геометрических параметров объектов. Общий алгоритм оценки погрешности таких измерений на этапе проектирования представлен на рис. 2а.

Исходными данными для расчета являются трехмерные координаты точек ( $x_w, y_w, z_w$ ) в глобальной системе координат (СК) и среднеквадратическое отклонение (СКО) шума на изображении  $\sigma_N$ . На рис. 2 синим цветом обозначены данные и блоки обработки, относящиеся к вычислению самих измеряемых величин, а красным — к оценке погрешности этих величин. Для каждой точки объекта с использованием модели ОС в САПР типа Zemax (блок 1 на рис. 2) вычисляются координаты ( $x_i, y_i$ ) на изображении и функция рассеяния точки (ФРТ, PSF<sub>*i*</sub>). При проектировании призмочно-линзовой стереоскопической системы эти вычисления проводятся для обеих половин изображения ( $i = 1, 2$ ). Если ОС является симметричной относительно оптической оси (для рассматриваемой призмочной системы это соответствует номинальному расположению элементов без учета допусков), то достаточно выполнить расчет для одной половины изображения. Аналогично проводятся вычисления для других типов стереоскопических ОС.



**Рис. 1.** Схема призмочно-линзовой эндоскопической системы. 1 — объект измерений, 2 — дистальная часть зонда, 3 — призма, 4 — объектив, 5 — МПИ, 6 — полученное изображение, 7 — данные калибровки, 8 — обработка, 9 — результаты измерений.



**Рис. 2.** Схема алгоритма оценки погрешности измерения трехмерных координат и геометрических параметров объекта на этапе проектирования (а) и модификация этого алгоритма для этапа эксплуатации (б). 1 — модель ОС, 2 — синтез фрагмента изображения, 3 — вычисление координат угла клетки, 4 — оценка погрешности координат угла клетки, 5 — алгоритм геометрической калибровки, 6 — вычисление трехмерных координат, 7 — измерение геометрических параметров, 8 — оценка уровня шума на изображении.

На основе этих данных проводится синтез фрагмента изображения  $I_i(x, y)$ , в данном случае — угла клетки (блок 2 на рис. 2). К фрагменту применяются описанные ниже методы вычисления координат угла клетки  $\mathbf{p}_e$  (блок 3) и оценки погрешности этих координат (блок 4) при заданном значении  $\sigma_N$ . Полученные значения используются для моделирования геометрической калибровки [9] (блок 5) и оценки погрешности трехмерных измерений (блоки 6 и 7), например, матрицы ковариации  $\Sigma_{xyz}$  измеренных трехмерных координат  $(x_{we}, y_{we}, z_{we})$  и доверительного интервала  $[r_w^-, r_w^+]$  длины измеряемого отрезка  $r_w$  [17]. Таким образом, обеспечивается полный цикл расчетов от заданных параметров ОС в САПР до оценки погрешности измерений, что может быть использовано как для анализа погрешности измерений в различных точках рабочего объема и оптимизации параметров ОС, так и для более сложных процедур, например, оценки устойчивости алгоритмов калибровки [9, 10].

На этапе эксплуатации (рис. 2б) для регистрируемых изображений дополнительно требуется оценить значение СКО шума  $\sigma_{Ne}$  (блок 8). Дальнейшая оценка погрешности трехмерных измерений проводится аналогично, но при коррекции алгоритмов под конкретные условия регистрации изображений. Это позволяет повысить надежность калибровки системы и атте-

станции ее метрологических параметров. Кроме этого, появляется возможность оценки погрешности каждого проводимого измерения и выдачи соответствующей информации оператору.

### МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ УГЛОВ КЛЕТОК НА ИЗОБРАЖЕНИИ

Для определения координат углов шахматных клеток на изображении (блок 3 на рис. 2) используется метод подгонки под изображение параметрической модели, в котором ФРТ принимается подобной функции Гаусса [12]. Таким образом, перепад яркости на изображении представляется подобным функции ошибок (erf). Для ускорения вычислений вместо функции ошибок используются экспоненциальные сигмоиды [12, 15] или гиперболический тангенс [13]. В данной работе принято, что фрагмент изображения описывается следующей моделью:

$$\begin{aligned}
 I_M(\mathbf{p}, x, y) &= Af(x', \beta_x)f(y', \beta_y) + B, \\
 x' &= (x - x_0)\cos\alpha_x + (y - y_0)\sin\alpha_x, \\
 y' &= -(x - x_0)\sin\alpha_y + (y - y_0)\cos\alpha_y, \quad (1) \\
 f(t, \beta) &= \tanh\left(\frac{1,2t}{\beta\sqrt{2}}\right),
 \end{aligned}$$

где  $x, y$  — координаты на изображении. Отличием модели, использованной в нашей работе, является наличие двух параметров  $\beta_x, \beta_y$  для описания ширины ФРТ вместо одного. Это позволяет учесть асимметрию ФРТ, обусловленную aberrациями призмочно-линзовой ОС. Таким образом, вектор параметров  $\mathbf{p}$  имеет вид

$$\mathbf{p} = (x_0, y_0, a_x, a_y, b_x, b_y, A, B)^T. \quad (2)$$

Для вычисления вектора параметров требуется решить нелинейную задачу минимизации вида

$$\mathbf{p}_e = \arg \min_{\mathbf{p}} \left[ \sum_{(x,y) \in W(S_x, S_y)} (I(x,y) - I_M(\mathbf{p}, x, y))^2 \right], \quad (3)$$

где  $I(x, y)$  — обрабатываемое изображение,  $W$  — область интереса размером  $S_x \times S_y$  на этом изображении. Для учета дисторсии требуется модифицировать модель, используя локальную аппроксимацию параболой,

$$I_{MQ}(\mathbf{p}_Q, x, y) = Af(x' + \xi_x(y')^2, \beta_x) f(y' + \xi_y(x')^2, \beta_y) + B, \quad (4)$$

$$\mathbf{p}_Q = (x_0, y_0, \xi_x, \xi_y, \alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y, A, B)^T. \quad (5)$$

Аналогичный подход используется при измерениях геометрических параметров по автоматически детектированным границам объектов [14, 15]. В этом случае перепад яркости на границах описывается формулами, определенными в модели (1), но для одной прямой линии или кривой второго порядка. Все рассмотренные в данном разделе методы также применимы к решению этой задачи.

### Оценка погрешности определения координат

Воспользовавшись приближением первого порядка [18] в задаче минимизации (3) (блок 4 на рис. 2), получим следующее выражение для матрицы ковариации  $\Sigma_p$  вектора параметров  $\mathbf{p}$ , описывающей погрешности определения координат

$$\Sigma_p = (\mathbf{J}_p \mathbf{J}_p^T)^{-1} \mathbf{J}_p \Sigma_N \mathbf{J}_p^T (\mathbf{J}_p \mathbf{J}_p^T)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{J}_p$  — матрица первых производных элементов вектора  $\mathbf{p}$  по значениям пикселей изображения,  $\Sigma_N$  — матрица ковариации шума пикселей изображения. При этом, если шум имеет нулевое математическое ожидание, то математическое ожидание отклонения вектора параметров  $\mathbf{p}$  от «истинного» значения также будет нулевым. Если считать шум некоррелированным и СКО шума равным  $\sigma_N$  в каждом пикселе, то выражение (6) упрощается до  $\sigma_N (\mathbf{J}_p \mathbf{J}_p^T)^{-1}$ . Далее используются СКО только координат угла клетки  $\sigma_x, \sigma_y$ , вычисленные как квадратные корни из двух первых диагональных элементов  $\Sigma_p$ .

### Оценка уровня шума на изображении

Для оценки шума на регистрируемом изображении (блок 8 на рис. 2) используются остаточные ошибки  $I(x, y) - I_M(\mathbf{p}, x, y)$ . Предполагается, что ошибки, вызванные несопадением ФРТ реальной и модели, не имеют значительной высокочастотной составляющей. Поэтому можно применить метод, основанный на свертке с фильтром размера  $3 \times 3$  [19], и вычислить дисперсию шума по формуле

$$\sigma_{Ne}^2 = \frac{1}{36 S_x S_y} \times$$

$$\times \sum_{(x,y) \in W(S_x, S_y)} [(I(x,y) - I_M(\mathbf{p}, x, y)) \otimes F(x,y)]^2,$$

где  $F(x, y) = (1, -2, 1; -2, 4, -2; 1, -2, 1)$ .

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Целью моделирования в настоящем исследовании является проверка эффективности предложенного метода оценки погрешности определения координат углов клеток на изображении в различных условиях. Вначале метод был апробирован на синтезированных фрагментах изображения, для которых ФРТ задана в виде функции Гаусса, т.е. когда условия моделирования совпадают с допущениями метода. Затем было выполнено моделирование для фрагментов изображений, синтезированных при использовании САПР для призмочно-линзовой эндоскопической системы. Общий алгоритм проведенных

моделирования методом Монте-Карло следующий:

1. Синтезировать изображение  $I(x, y)$

2. Повторить  $N$  раз

2.1. Получить «зашумленное» изображение  $I_N(x, y)$ : добавить к каждому пикселу случайную величину с нулевым средним и СКО  $\sigma_{Nvar}(I)$ , зависящим от значения сигнала

2.2. Применить предложенный метод к  $I_N(x, y)$ : вычислить значение координат угла  $x_{0e}, y_{0e}$ , оценку СКО шума на изображении  $\sigma_{Ne}$  и оценку СКО координат  $\sigma_{xe}, \sigma_{ye}$

3. Для  $N$  вычисленных значений  $x_{0e}, y_{0e}$  найти средние значения  $x_{0m}, y_{0m}$  и СКО  $\sigma_{xm}, \sigma_{ym}$ , а также доверительные интервалы для средних значений и СКО (см. формулу (7) далее)

4. Для  $N$  вычисленных значений  $\sigma_{xe}, \sigma_{ye}$  найти средние значения и 95%-ые интервалы

5. Применить предложенный метод к изображению  $I(x, y)$ , вычислить значение координат угла  $x_{0p}, y_{0p}$ , а также вычислить СКО координат  $\sigma_{xp}, \sigma_{yp}$ , используя для этого известное СКО шума  $\sigma_{Nvar}(I)$  или усредненное  $\sigma_N$  (см. формулы (8) и (9) далее).

### Доверительные интервалы при моделировании

Доверительные интервалы для математического ожидания и дисперсии, полученные по выборке из  $N$  измерений в приближении для большого  $N$ , можно найти по формулам [20]

$$\mu \in \left[ \mu_e - \left| z_{\alpha/2} \right| \frac{s}{\sqrt{N}}, \mu_e + \left| z_{\alpha/2} \right| \frac{s}{\sqrt{N}} \right], \quad (7)$$

$$\sigma^2 \in \left[ s^2 - \left| z_{\alpha/2} \right| \frac{s^2 \sqrt{2}}{\sqrt{N}}, s^2 + \left| z_{\alpha/2} \right| \frac{s^2 \sqrt{2}}{\sqrt{N}} \right],$$

где  $\mu_e$  и  $s^2$  — оценки математического ожидания  $\mu$  и дисперсии  $\sigma^2$  по выборке,  $z_{\alpha/2}$  — квантиль нормального распределения для вероятности  $(1 - \alpha)$ . Обычно используют  $z_{0,025}$  и получают 95%-ый доверительный интервал.

### Модель шума на изображении

Пусть дисперсия шума, имеющего две составляющие — аддитивную и коррелированную с сигналом, в каждом пикселе описывается зависимостью

$$\sigma_{Nvar}^2(I) = \sigma_{Nd}^2 + I / G, \quad (8)$$

где  $\sigma_{Nd}$  — СКО аддитивного шума,  $I$  — среднее значение сигнала,  $G$  — параметр, зависящий от усиления видеокамеры [16]. Тогда, усредняя по фрагменту изображения  $W$ , получим

$$\sigma_N^2 = \left\langle \sigma_{Nd}^2 + I / G \right\rangle_W = \sigma_{Nd}^2 + \langle I \rangle_W / G. \quad (9)$$

Из данного выражения при заданных  $\sigma_N$  и  $\sigma_{Nd}$  и известном среднем значении сигнала по фрагменту изображения можно найти требуемое значение параметра  $G$  и далее, используя формулу (8), вычислить  $\sigma_{Nvar}(I)$  в каждом пикселе.

### Моделирование 1

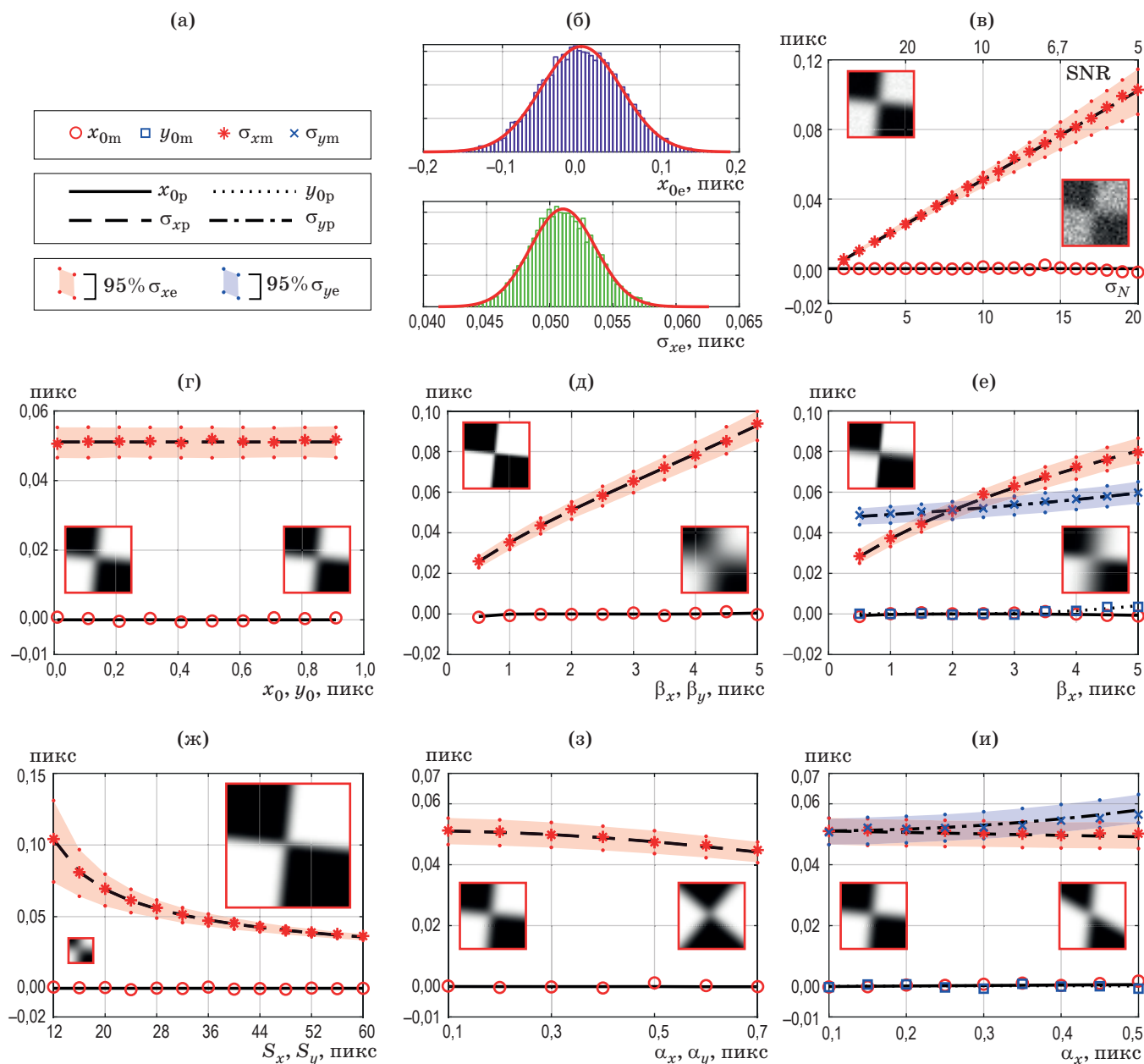
При проведении моделирования по методу Монте-Карло синтезированные изображения вычислялись путем свертки «идеального» изображения с заданными параметрами  $S_x, S_y, x_0, y_0, \alpha_x, \alpha_y, A, B$  и функции Гаусса с параметрами  $\beta_x$  и  $\beta_y$ . Исходными значениями параметров были: размер  $S_x = S_y = 32$  пикс,  $\beta_x = \beta_y = 2$  пикс, поворот линий  $\alpha_x = \alpha_y = 0,1$  рад, амплитуда сигнала  $A = 100$ , СКО шума  $\sigma_N = 10$ , среднее квадратическое отклонение аддитивного шума  $\sigma_{Nd} = 0,5$ . Количество измерений при анализе методом Монте-Карло  $N = 10000$ . Таким образом, при СКО, равном 0,1, доверительные интервалы математического ожидания и дисперсии, вычисленные по формуле (7) для 95%-го доверительного интервала, составят  $\pm 0,002$  и  $\pm 0,0003$  соответственно. На графиках эти интервалы для  $x_{0m}, y_{0m}$  и  $\sigma_{xm}, \sigma_{ym}$  не показаны, поскольку в принятом масштабе не превышают размеров маркеров.

Результаты анализа зависимостей смещения  $x_0, y_0$  и СКО  $\sigma_x, \sigma_y$  погрешности от параметров модели приведены на рис. 3. На рис. 3г–и приведены значения смещения и СКО только по  $x$ -координате. Для  $y$ -координаты получены такие же значения ввиду симметрии. Результаты оценки при известном СКО шума ( $x_{0p}, y_{0p}, \sigma_{xp}, \sigma_{yp}$ ) представлены для случая, когда при оценке использовалось одинаковое СКО  $\sigma_N$  для всех пикселей. Было установлено, что если при оценке использовать  $\sigma_{Nvar}(I)$ , имеющее различные значения в каждом пикселе, то результаты отличаются менее чем на 0,001 пикс.

При заданных условиях моделирования вычисленные координаты углов клеток  $x_{0e}, y_{0e}$

имеют распределение, близкое к нормальному закону. Поэтому для описания этого распределения далее использовано смещение и СКО. Вычисленные предложенным методом оценки СКО  $\sigma_{xe}$ ,  $\sigma_{ye}$  также имеют распределение, близкое к нормальному закону (рис. 3б). Использование приближения первого порядка приемлемо, а зависимости  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  от  $\sigma_N$  близ-

ки к линейной (рис. 3в). Изменение исходных координат углов клеток практически не влияет на погрешность их вычисления (рис. 3г). Поэтому далее принято, что погрешность не зависит от сдвига. Изменение угла наклона линий в диапазоне, используемом на практике, мало влияет на  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  (рис. 3з, и). Отметим, что при использовании метода калибровки [10]



**Рис. 3.** Результаты анализа методом Монте-Карло зависимостей смещения и СКО погрешности измерений от параметров модели. Используемые обозначения на рис. (в-и) – а. Гистограммы и кривые плотности вероятности нормального распределения для вычисленных значений  $x_{0e}$  (б) и для оценок  $\sigma_{xe}$  при вычислении  $\sigma_{Ne}$  по изображению (б), результаты моделирования методом Монте-Карло оценки смещения  $x_0$ ,  $y_0$  и СКО  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  при изменении  $\sigma_N$  и различных параметров (в-и). На каждом графике приведены примеры синтезированных изображений, соответствующие крайним значениям по оси абсцисс.

тест-объект не поворачивается и угол наклона линий меняется только из-за дисторсии. Таким образом, основными параметрами, которые влияют на погрешность вычисления координат углов клеток, являются размер области интереса  $S_x$ ,  $S_y$  и ширина ФРТ  $\beta_x$ ,  $\beta_y$ .

Далее был проведен анализ эффективности метода при наличии дисторсии. Для этого синтезировались «идеальные» изображения с учетом радиальной дисторсии 3-го порядка, а преобразованные координаты  $(x', y')$  вычислялись по формулам

$$x' = x + k(x - x_c)r^2, \quad y' = y + k(y - y_c)r^2,$$

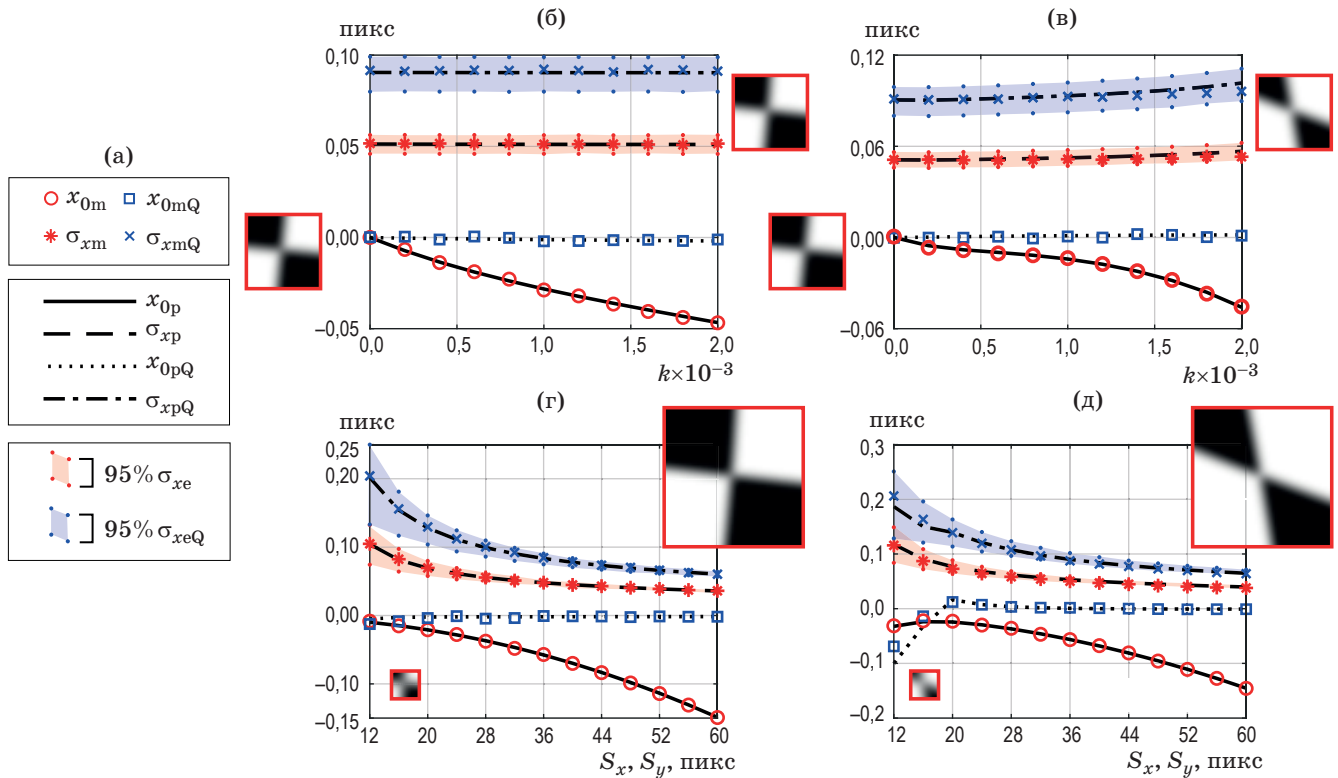
$$r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2,$$

$$r^2 = (x - x_c)^2 + (y - y_c)^2,$$

где  $(x_c, y_c)$  — координаты центральной точки изображения,  $k$  — коэффициент дисторсии.

Результаты анализа при использовании аппроксимации прямыми линиями (формулы (1, 2)) и кривыми второго порядка (формулы (4, 5)) приведены на рис. 4. Для кривых второго порядка везде использован индекс  $Q$ . На рис. 4б, г принято  $x_0 - x_c = -440$  пикс,  $y_0 - y_c = 0$  пикс, т.е. дисторсия проявляется только по одной координате. На рис. 4в, д принято  $x_0 - x_c = -440$  пикс,  $y_0 - y_c = -380$  пикс. При изменении размера области интереса на рис. 4г, д принято  $k = 0,002$ . Остальные параметры имели исходные значения, указанные выше. Стоит отметить, что на представленных синтезированных изображениях изгиб линий визуально практически не различим, но заметно, что на краях изображения дисторсия приводит к изменению углов наклона линий (рис. 4в, д).

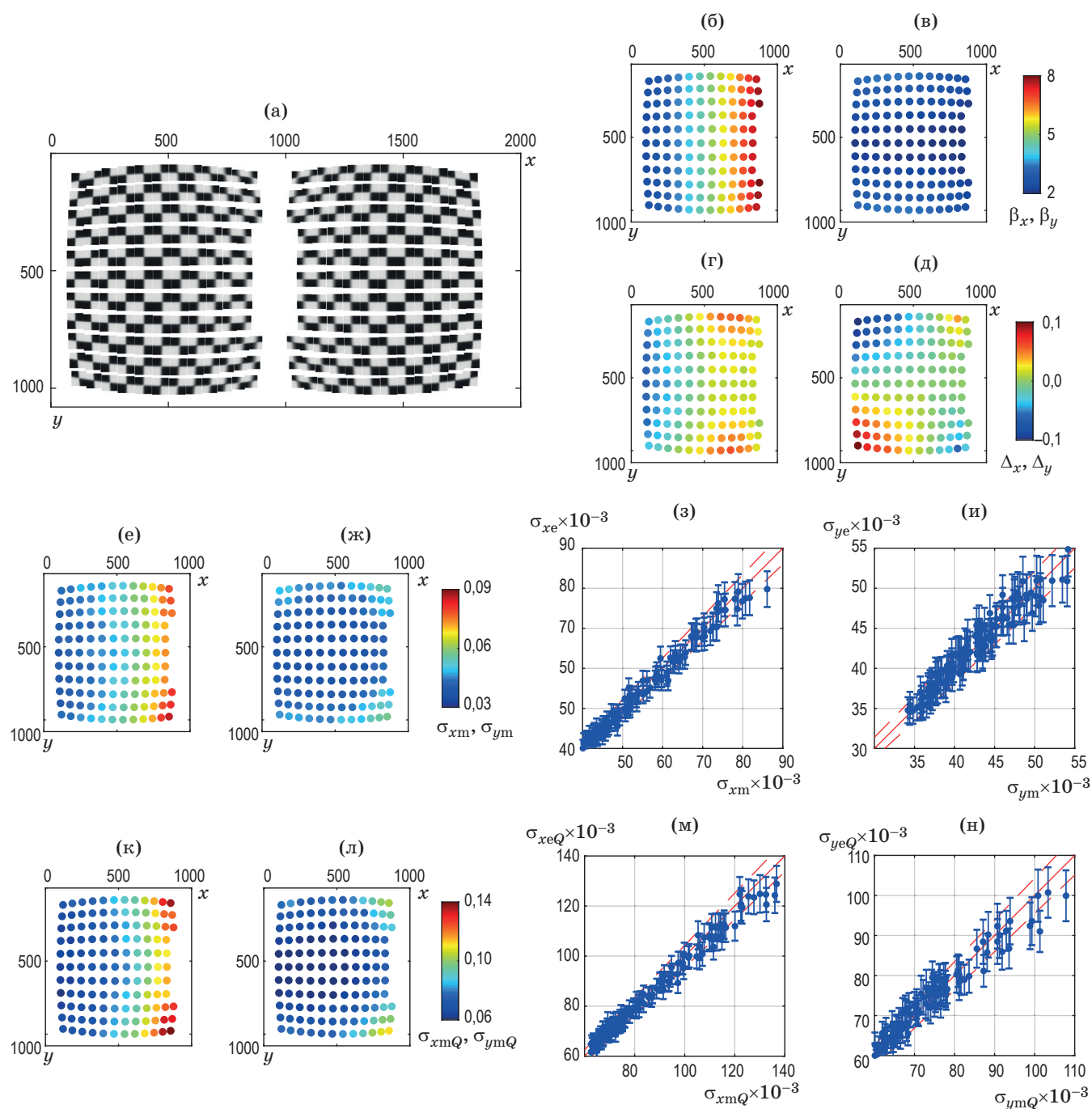
Из графиков следует, что при наличии сильной дисторсии использование аппроксимации прямыми линиями приводит к замет-



**Рис. 4.** Результаты анализа методом Монте-Карло зависимостей смещения и СКО погрешности измерений от параметров модели при наличии дисторсии. Используемые обозначения на рисунках (б–д) — а. Результаты моделирования методом Монте-Карло и оценки смещения  $x_0$  и СКО  $\sigma_x$  при изменении коэффициента дисторсии  $k$  (б, в) и размера окна (г, д) для двух точек изображения. На каждом графике приведены примеры синтезированных изображений, соответствующие крайним значениям по оси абсцисс.

ному смещению вычисленных координат  $x_0$ ,  $y_0$ , которое также возрастает при увеличении размера области интереса. Аппроксимация кривыми второго порядка позволяет избежать

смещения, но приводит к увеличению СКО  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  из-за большего количества параметров, и, следовательно, меньшей устойчивости к шуму. Кроме того, в этом случае метод может



**Рис. 5.** Результаты анализа зависимостей смещения и СКО погрешности измерений в САИР Zemax от параметров модели при наличии дисторсии. Синтезированные фрагменты изображения — а. Найденные значения ширины ФРТ  $\beta_x$  (б) и  $\beta_y$  (в), разности координат, вычисленных при разных аппроксимациях  $\Delta_x$  (г) и  $\Delta_y$  (д), СКО измеренных при аппроксимации прямыми линиями координат углов клеток по осям  $x$  (е, з) и  $y$  (ж, и), СКО измеренных при аппроксимации кривыми второго порядка координат углов клеток по осям  $x$  (к, м) и  $y$  (л, н). Все значения указаны в пикселах. Графики (б, в), (г, д), (е, ж) и (к, л) имеют общую цветовую шкалу.



нестабильно работать при малых размерах области интереса (рис. 4д). Таким образом, окончательный вывод о предпочтительном использовании той или иной аппроксимации для конкретной ОС нужно делать на основании моделирования с учетом дисторсии и размера области интереса  $S_x, S_y$ .

## Моделирование 2

Для моделирования в САПР Zemax использована та же оптическая призмочно-линзовая схема стереоэндоскопа, что и в работе [9] (см. блок 1 на рис. 2). Объект был расположен перпендикулярно оси  $z$  на расстоянии 14 мм от первой поверхности. Для каждой точки объекта (угла клетки) вычислены координаты на изображении (для главного луча на опорной длине волны) и полихроматическая ФРТ (относительно главного луча). Размер фрагментов изображений  $S_x, S_y$  был определен как расстояние от данной точки до ближайшей на изображении. Для синтеза «идеальных» изображений линии раздела клеток были определены с помощью кривых, аппроксимированных сплайнами третьего порядка, которые были проведены через углы клеток. Итоговые изображения получены сверткой с ФРТ. Прочими параметрами, которые использованы при моделировании являются амплитуда сигнала  $A = 100$ , СКО шума  $\sigma_N = 10$ , СКО аддитивного шума  $\sigma_{Nd} = 0,5$ . Размер фрагментов изображения составил от 54 до 78 пикселей.

Результаты моделирования при использовании аппроксимации прямыми линиями и кривыми второго порядка приведены на рис. 5. Поскольку ОС симметрична относительно плоскости, параллельной  $yOz$  и проходящей через середину изображения везде, кроме рис. 5а, представлена только левая половина изображения. Количество измерений при анализе методом Монте-Карло —  $N = 1000$ . На рис. 5з, и пунктирной линией отмечен доверительный интервал по уровню 95% для  $\sigma_{xm}$  и  $\sigma_{ym}$  в соответствии с формулой (7) при  $N = 1000$ . Точками обозначены значения  $\sigma_{xp}$  и  $\sigma_{yp}$ , а вертикальным отрезком — симметричный интервал, в который укладываются 95% значений  $\sigma_{xe}$  и  $\sigma_{ye}$  для каждого фрагмента изображения. Аналогичным образом эти значения обозначены для величин с индексом  $Q$  на рис. 5м, н.

В отличие от предыдущих примеров моделирования, где использовалась свертка с функ-

цией Гаусса, в данном случае смещение вычисленных координат угла могло быть оценено только относительно главного луча. Поэтому, во-первых, оценивались разности  $x_{0m} - x_{0p}$ ,  $y_{0m} - y_{0p}$ ,  $x_{0mQ} - x_{0pQ}$ ,  $y_{0mQ} - y_{0pQ}$ , которые, как показал анализ, не превышают 0,01 пикселя, и, во-вторых, — разности  $\Delta_x = x_{0pQ} - x_{0p}$ ,  $\Delta_y = y_{0pQ} - y_{0p}$ , которые представлены на рис. 5г, д. Поскольку разности между двумя аппроксимациями  $\Delta_x, \Delta_y$  велики, то для данной ОС и выбранных размеров областей интереса дисторсия достаточно велика. Поэтому использовалась аппроксимация кривыми второго порядка, несмотря на то, что при этом возрастает СКО измеренных координат. Из-за наличия призмы в анализируемой ОС значение параметра  $\beta_x$ , характеризующего размер ФРТ в направлении оси  $x$ , значительно превышает  $\beta_y$ . Максимальное значение  $\beta_x$  приходится на область вблизи перекрытия двух частей изображения и в основном обусловлено хроматической аберрацией. При сравнении рис. 5е, к и рис. 5б хорошо видна зависимость  $\sigma_x$  от  $\beta_x$ .

Результаты показывают хорошее совпадение между СКО, полученными при моделировании методом Монте-Карло, и СКО, предсказанными предложенным методом (см. рис. 5з, и, м, н). Таким образом, подтверждена применимость метода совместно с САПР ОС на этапе проектирования.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

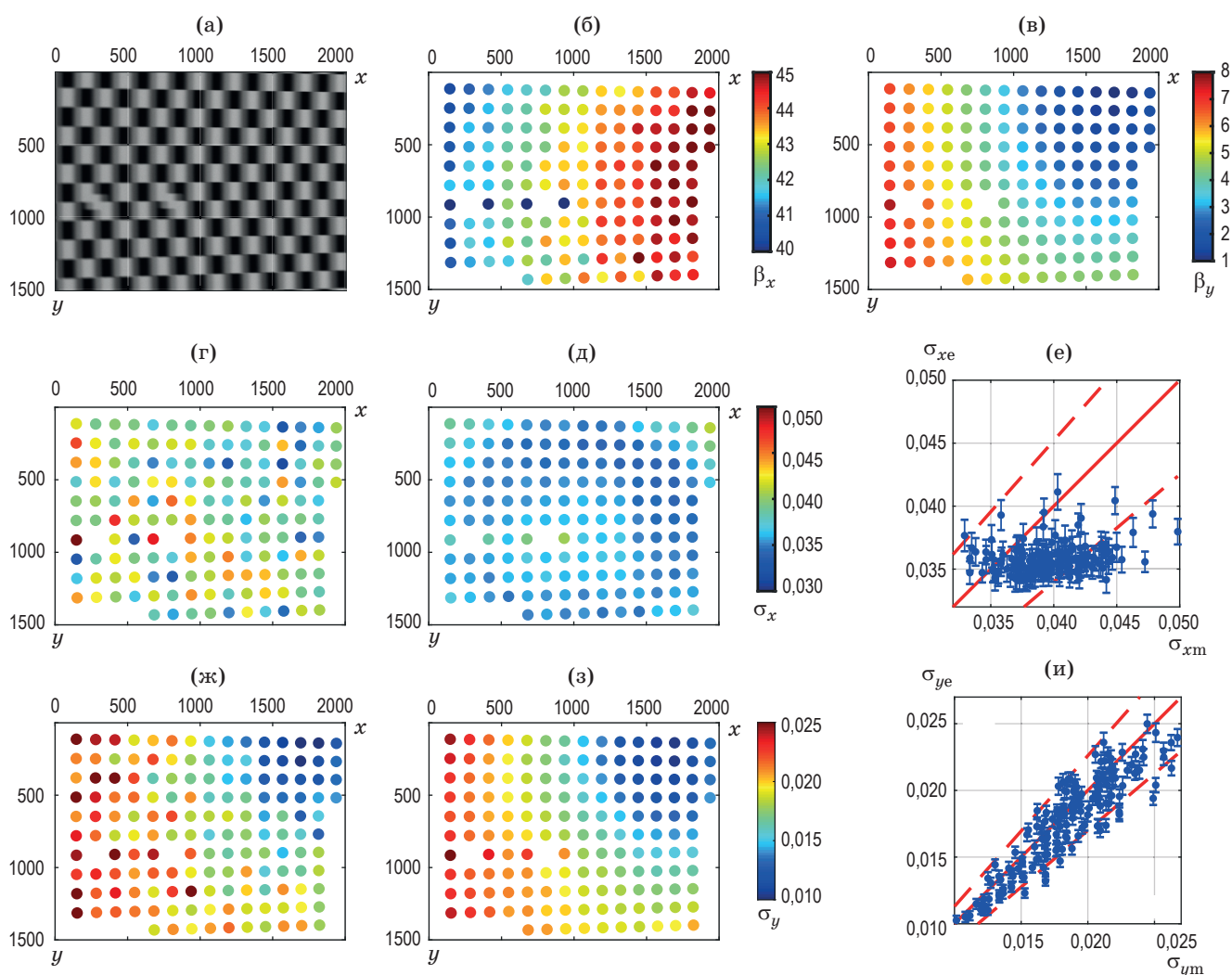
Для проверки результатов компьютерного моделирования были проведены эксперименты с опытным образцом призмочно-линзовой стереоскопической системы, оптическая схема которой использовалась для моделирования. Поскольку установленная в образце миниатюрная видеокамера не дает возможности управлять временем экспонирования и получать необработанные изображения, были проведены дополнительные эксперименты с призмой больших размеров и видеокамерой для машинного зрения с полностью управляемыми параметрами. В обоих случаях в качестве тест-объекта использовалась стеклянная плоскопараллельная пластина с рисунком в виде шахматных клеток, образованных напыленным хромом, размером 0,5, 1 и 2 мм. Для равномерной засветки за тест-объектом были установлены молочное стекло и белый светодиод.

### Эксперимент 1

Для проведения экспериментов использована монохромная видеокамера *The Imaging Source DFK 33UJ003* с размерами пиксела  $1,67 \times 1,67$  мкм при разрешении  $2048 \times 1536$  и объектив с фокусным расстоянием 25 мм. Для создания несимметричной ФРТ перед объективом установлена призма из стекла К8. Полученная ОС позволила оценить работоспособность метода в условиях, когда размер ФРТ по одной оси значительно больше, чем по другой. Были сняты серии из 100 кадров при усилении 5 дБ и времени экспонирования  $1/107$  с. Измеренное по 100 кадрам согласно работе [16] значение СКО шума  $\sigma_{Nvar}$  соответствовало зависимости (8) при  $\sigma_{Nd} \approx 0$ ,  $G = 2,67$ .

Усредненное по всему изображению  $\sigma_N$  составило 6. Оцененное предложенным методом  $\sigma_{Ne}$  в разных областях интереса на изображении находилось в пределах от 6 до 7. Размеры областей интереса составляли 130–140 пикселей по каждой стороне.

В каждом кадре для всех углов клеток тест-объекта были найдены координаты  $x_{0e}$ ,  $y_{0e}$  и по 100 кадрам вычислено их СКО ( $\sigma_{xm}$  и  $\sigma_{ym}$ ) при аппроксимации прямыми линиями. Эти значения представлены на рис. 6г, ж. Для каждого угла клетки в каждом кадре предложенным методом было оценено СКО шума и предсказаны СКО координат углов клеток ( $\sigma_{xe}$  и  $\sigma_{ye}$ ). Усредненные по 100 кадрам значения  $\sigma_{xe}$  и  $\sigma_{ye}$  приведены на рис. 6д, з. На рис. 6е, и



**Рис. 6.** Результаты исследований в эксперименте 1. Изображение (а). Найденные значения ширины ФРТ  $\beta_x$  (б) и  $\beta_y$  (в), СКО измеренных координат углов клеток по осям  $x$  (г–е) и  $y$  (ж–и), вычисленные по 100 кадрам (г, ж), предсказанные предложенным методом (д, з), и их сравнение (е, и). Все значения указаны в пикселах. Графики (г, д) и (ж, з) имеют общую цветовую шкалу.

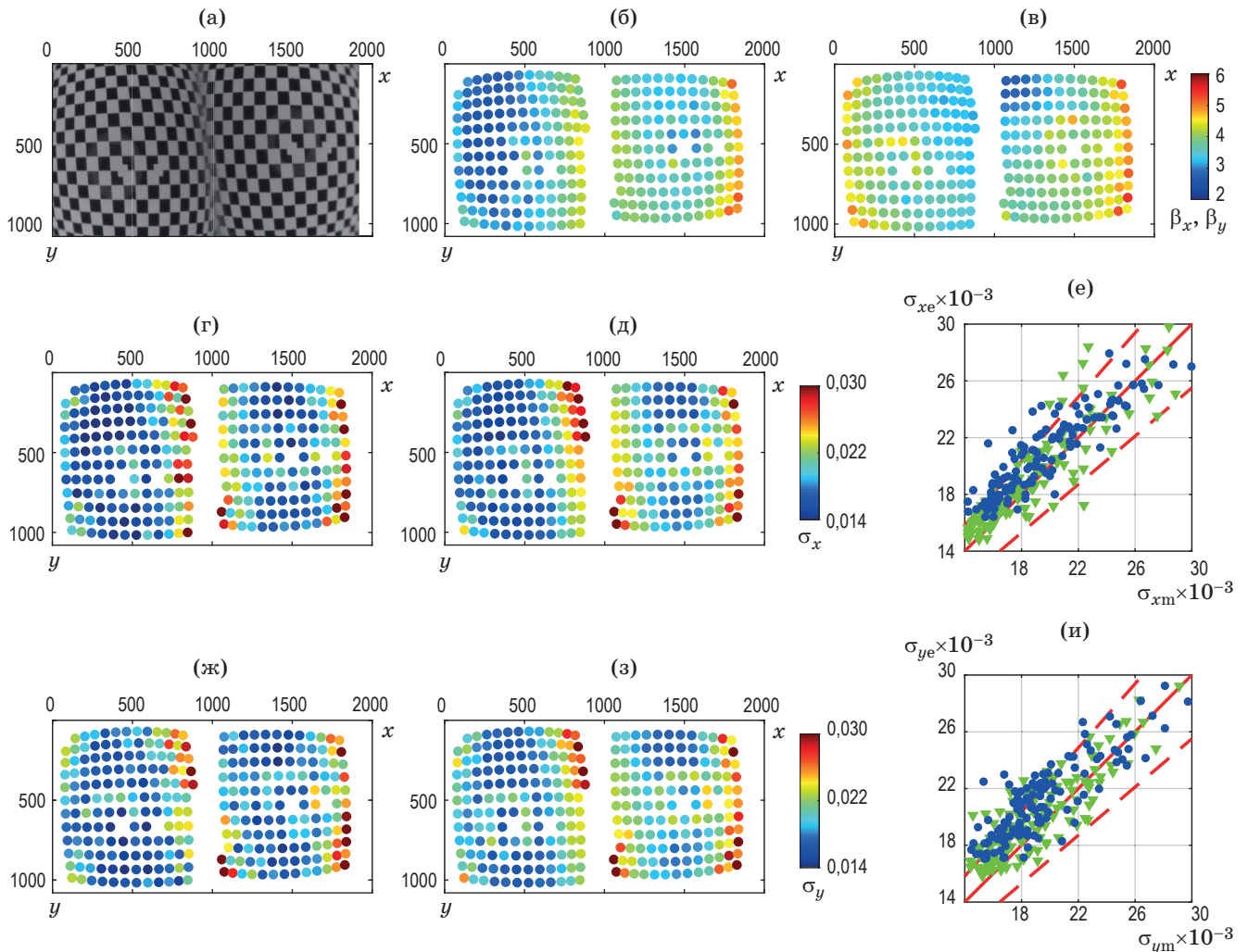
пунктирной линией обозначен 95%-ый доверительный интервал  $\sigma_{xm}$  и  $\sigma_{ym}$  в соответствии с формулой (7) при  $N = 100$ . Величины  $\sigma_{xe}$  и  $\sigma_{ye}$  имеют разные значения на каждом кадре, так что точками обозначены их средние значения по 100 кадрам, а вертикальным отрезком – симметричный интервал, в который укладываются 95%.

Поскольку наклон линий и размер области интереса практически не изменяются в пределах кадра, основными параметрами, приводящими к разной погрешности измерения координат углов клеток в разных точках изображения, являются размеры ФРТ по осям  $x$  и  $y$  ( $\beta_x$  и  $\beta_y$ ), приведенные на рис. 6б, в. Из-за наличия призмы  $\beta_x$  в 5–10 раз превышает  $\beta_y$ , что

приводит к большей погрешности измерений по оси  $x$ , чем по оси  $y$ . При сравнении рис. 6ж, з и 6в хорошо видна зависимость  $\sigma_y$  от  $\beta_y$ , поскольку в пределах кадра  $\beta_y$  изменяется почти в 8 раз. Относительное изменение  $\beta_x$  в пределах кадра сравнительно мало (около 10%), поэтому  $\sigma_x$  также практически не меняется.

## Эксперимент 2

Эксперимент проводился с разработанным и изготовленным образцом миниатюрной призмочно-линзовой стереоскопической системы. Видеокамера с приемником излучения 1/6" и разрешением 1920×1080 позволяла использовать только автоматическое изменение экспозиции и формат MJPEG для сжатия изо-



**Рис. 7.** Результаты исследований в эксперименте 2. Изображение (а). Найденные значения ширины ФРТ  $\beta_x$  (б) и  $\beta_y$  (в), СКО измеренных координат углов клеток по осям  $x$  (г–е) и  $y$  (ж–и), вычисленные по 100 кадрам (г, ж), предсказанные предложенным методом (д, з), и их сравнение (е, и). Все значения указаны в пикселях. Графики (б, в), (г, д) и (ж, з) имеют общую цветовую шкалу.

бражений. Измеренное по 100 кадрам согласно работе [16]  $\sigma_{N_{\text{var}}}$  мало зависело от значения сигнала и находилось в пределах 0,3–0,8. Оцененное предложенным методом  $\sigma_{N_e}$  находилось в пределах от 0,25 до 0,35. В итоге для предсказаний СКО координат углов клеток предложенным методом было взято  $\sigma_{N_e} = 2$ . Расстояние до тест-объекта (в калиброванной СК) составляло 18 мм, что приблизительно совпадает с расстоянием 14 мм от первой поверхности, использованным при моделировании. Размеры областей интереса находились в пределах от 40 до 70 пикселей по каждой стороне. При этом использовалась аппроксимация кривыми второго порядка.

Среднее квадратическое отклонение измеренных значений координат углов клеток по 100 кадрам ( $\sigma_{x_m}$  и  $\sigma_{y_m}$ ) и СКО, предсказанные предложенным методом ( $\sigma_{x_e}$  и  $\sigma_{y_e}$ ) при заданном  $\sigma_{N_e} = 2$ , представлены на рис. 7. На рис. 7е, и зелеными треугольниками обозначены точки левой половины изображения, синими кружками — правой. Поскольку СКО шума  $\sigma_{N_e}$  было задано, значения  $\sigma_{x_e}$  и  $\sigma_{y_e}$  в каждой точке практически не изменяются от кадра к кадру. Поэтому вертикальные отрезки для 95%-ых интервалов на рис. 7е, и не представлены. Как и в предыдущем случае, основными параметрами, приводящими к различной погрешности измерения координат углов клеток в разных точках изображения, являются размеры ФРТ по осям  $x$  и  $y$ . Но в данном случае  $\beta_x$  и  $\beta_y$  имеют схожие значения. Кроме того, заметную роль играет уменьшение размеров областей интереса, а также наклон линий из-за дисторсии, что наиболее сильно проявляется около краев каждой половины изображения. В отличие от моделирования результаты для двух половин изображения отличаются из-за допусков на изготовление компонентов и сборку ОС.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Принятое допущение о некоррелированном шуме в каждом пикселе изображения ограничивает применение метода оценки шума для видеокамер со встроенной обработкой изображений (например, со сжатием в JPEG). Учет данного фактора на этапе проектирования требует значительных временных затрат, так как погрешность определения координат углов клеток зависит от сдвига и требуется

использовать моделирование методом Монте-Карло. Но на этапе эксплуатации это невозможно. По итогам дополнительно проведенных исследований в данной работе принято решение использовать СКО шума, вычисленное как  $\max(\sigma_{N_e}, 2 \dots 3)$ .

В рассмотренном примере для вычисления полихроматической ФРТ с помощью САПР Zemax использовалось 10 длин волн излучения в диапазоне 0,4–0,65 мкм, имитирующих источник с равномерным спектром излучения. При проведении подобного расчета на этапе проектирования следует учесть спектральную чувствительность приемника излучения, а при моделировании процедуры калибровки — спектральные характеристики тест-объекта, которые обычно известны, если оборудование для калибровки разрабатывается совместно с прибором. При проектировании эндоскопических систем также следует учитывать тип используемого источника излучения.

Наиболее затратным по времени этапом при вычислении погрешности являются вычисление ФРТ в каждой точке и синтез изображения. Это ограничивает применение предложенного метода для оптимизации параметров ОС. Предпочтительным было бы отказаться от этих этапов и получать  $\mathbf{p}$  и  $\mathbf{J}_p$  напрямую из параметров ОС с помощью САПР ОС. Наиболее простым решением является использование СКО геометрического пятна рассеяния по двум осям для оценки  $\beta_x$ ,  $\beta_y$ , однако такое решение не точно и не подходит для дифракционно ограниченных ОС.

Кроме того, при моделировании с ФРТ, полученной относительно главного луча, смещение вычисленных координат угла клетки может быть оценено только относительно главного луча. В общем случае это не гарантирует отсутствие смещения при сопоставлении произвольных фрагментов изображений корреляционным методом. Возможным решением этой проблемы является сравнение координат, вычисленных для углов клеток, и координат, полученных при сопоставлении ФРТ корреляционным методом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод оценки погрешности измерения координат маркеров (углов клеток) восполняет пробел в общем алгоритме оценки

погрешности измерений при проектировании стереоскопических измерительных приборов. Результаты работы позволяют объединить процессы проектирования ОС и разработку алгоритмов обработки данных. Такое объединение заключается в выполнении совместной оптимизации параметров ОС и алгоритмов при использовании в качестве оценочной функции погрешности трехмерных измерений. За счет

применения предложенного метода на этапе эксплуатации может быть повышена надежность калибровки и аттестации стереоскопических измерительных приборов, а также оценена погрешность каждого проводимого измерения в режиме, близком к реальному времени.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 17-29-03469).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J.* Close-range photogrammetry and 3D imaging. 2 ed. Berlin, Boston: De Gruyter, 2013. 702 p.
2. *Zhou S., Xiao S.* 3D face recognition: A survey // *Human-centric Computing and Information Sciences.* 2018. V. 8. P. 35.
3. *Schwab K., Smith R., Brown V., et al.* Evolution of stereoscopic imaging in surgery and recent advances // *World J. Gastrointest. Endosc.* 2017. V. 9 № 8. P. 368–377.
4. *Geng J., Xie J.* Review of 3-D endoscopic surface imaging techniques // *IEEE Sensors J.* 2014. V. 14. № 4. P. 945–960.
5. *Mait J.N., Euliss G.W., Athale R.A.* Computational imaging // *Adv. Opt. Photonics.* 2018. V. 10. № 2. P. 409–483.
6. *Chen Z., Wong K.-Y.K., Matsushita Y., et al.* Depth from refraction using a transparent medium with unknown pose and refractive index // *Int. J. Comput. Vis.* 2013. V. 102. № 1–3. P. 3–17.
7. *Wu L., Zhu J., Xie H., et al.* Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bi-prism: Systematic error analysis and correction // *Opt. Lasers Eng.* 2016. V. 87. P. 129–138.
8. *Stork D.G., Robinson M.D.* Theoretical foundations for joint digital-optical analysis of electro-optical imaging systems // *Appl. Opt.* 2008. V. 47. № 10. P. B64–B75.
9. *Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Batshev V.I., et al.* Optimization of stereoscopic imager performance by computer simulation of geometrical calibration using optical design software // *Opt. Exp.* 2019. V. 27. P. 17819–17839.
10. *Gorevoy A.V., Machikhin A.S., Khokhlov D.D., et al.* Optimization of a geometrical calibration procedure for stereoscopic endoscopy systems // *Proc. SPIE.* 2019. V. 11061. P. 110610B.
11. *Poulin-Girard A.-S., Dallaire X., Thibault S., et al.* Virtual camera calibration using optical design software // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. № 13. P. 2822–2827.
12. *Krüger L., Wöhler C.* Accurate chequerboard corner localisation for camera calibration // *Pattern Recognit. Lett.* 2011. V. 32. P. 1428–1435.
13. *Yang T., Zhao Q., Wang X., et al.* Sub-pixel chessboard corner localization for camera calibration and pose estimation // *Appl. Sci.* 2018. V. 8. P. 2118.
14. *Malassiotis S., Strintzis M.G.* Stereo vision system for precision dimensional inspection of 3D holes // *Machine Vision and Applications.* 2003. V. 15. № 2. P. 101–113.
15. *Lee S.W., Lee S.Y., Pakk H.J.* Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for TFT-LCD 2D critical dimension measurement // *Curr. Opt. Photon.* 2018. V. 2. P. 69–78.
16. *Rosenberger M., Zhang C., Votyakov P., et al.* EMVA 1288 camera characterisation and the influences of radiometric camera characteristics on geometric measurements // *Acta IMEKO.* 2016. V. 5. № 4. P. 81–87.
17. *Горевой А.В., Колючкин В.Я., Мачихин А.С.* Оценка погрешности измерения геометрических параметров объектов при проектировании стереоскопических систем // *Компьютерная оптика.* 2018. Т. 42. № 6. С. 985–997.
18. *Zhang Z.* Determining the epipolar geometry and its uncertainty: A review // *Int. J. Comput. Vis.* 1998. V. 27. № 2. P. 161–195.
19. *Immerkaer J.* Fast noise variance estimation // *Comput. Vis. Image Underst.* 1996. V. 64. № 2. P. 300–302.
20. *Krishnamoorthy K.* Handbook of statistical distributions with applications. Chapman & Hall/CRC, 2006. P. 133.