

Матричная технология измерений. Путь к нанометрам

А.Н. Королев¹, А.Я. Лукин², Ю.В. Филатов¹, В.Ю. Венедиктов¹

¹ Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ»,
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д.5;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29

Аннотация

Новая технология измерения линейных и угловых координат использует оптическую марку с очень большим количеством элементов (десятки и сотни тысяч). Одновременное измерение положения всех элементов изображения марки с помощью цифровой камеры повышает точность измерения положения марки в сотни и более раз. Для новых измерителей прогнозируемая разрешающая способность находится на уровне долей нанометра в линейной шкале и тысячных долей угловой секунды в угловой шкале. Разрешающую способность реального измерителя ограничивает случайная погрешность измерения, вызванная ограниченной разрядностью и тепловыми шумами цифровой камеры. Исследование этой составляющей погрешности и является целью данной работы. Авторами были проведены длительные измерения координат, угла поворота и периода неподвижной марки в условиях медленно изменяющейся температуры. Анализ полученных данных позволил определить случайную составляющую погрешности измерений, отделив ее от изменений, вызванных тепловыми деформациями. При размерах марки и матрицы цифровой камеры менее 10 мм стандартное отклонение результата угловых измерений составило 0,005 угловых секунд, линейных измерений – порядка 0,1 нм, а значения периода элементов марки – менее 0,01 нм. Полученные оценки стандартного отклонения результатов измерений хорошо согласуются с аналитическими оценками, приведенными в статье. Экспериментально доказана высокая разрешающая способность матричной технологии линейных и угловых измерений.

Ключевые слова: двумерная шкала, угловые измерения, линейные измерения, оптическая марка, случайная погрешность измерения.

Цитирование: Королев, А.Н. Матричная технология измерений. Путь к нанометрам / А.Н. Королев, А.Я. Лукин, Ю.В. Филатов, В.Ю. Венедиктов // Компьютерная оптика. – 2025. – Т. 49, № 1. – С. 67-75. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1486.

Citation: Korolev AN, Lukin AY, Filatov YV, Venediktov VY. Matrix technology of measurements. Computer Optics 2025; 49(1): 67-75. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1486.

Введение

В современной фотолитографии используются методы прямой записи без маски, которые позволяют обойти дифракционный предел и достичь разрешения менее 10 нм. Для реализации этих методов необходимо измерять линейные перемещения на уровне нанометров и угловые повороты на уровне сотых долей угловой секунды. Чаще всего используются различные гомодинные и гетеродинные интерферометры, которые позволяют достичь субнанометровой точности при измерении линейных перемещений [1–3] и до тысячных долей угловой секунды при измерении угловых перемещений [4]. Однако на схемы измерения интерференции влияют различные факторы, которые приводят к существенным ошибкам. К таким погрешностям следует отнести влияние изменения параметров среды, через которую световые пучки в плечах интерферометра, а также нелинейность характеристики, обусловленная нежелательными отражениями. Применение двухчастотных схем не позволяет полностью исключить указанные погрешности [5–7].

Применение КМОП- и ПЗС-камер для решения задач измерения линейных и угловых координат широко распространено в различных областях техники [8]. При этом часто используется измерение смещений естественных объектов [9], но наилучшие результаты достигаются при применении специальных меток [10–12]. Регистрация с помощью КМОП-камер звездного неба создала возможность и привела к широкому использованию приборов звездной ориентации и развитию астрокорректоров космических аппаратов [13]. Точность таких приборов находится на уровне единиц и долей угловой секунды. Измерение длин объектов с помощью видеокамер производится в оптических экстензометрах с погрешностью на уровне 0,1 мкм [14].

Технология матричных измерений угловых и линейных перемещений в фиксированной плоскости, предложенная авторами [15–17], основана на использовании измерительной марки с десятками тысяч элементов. Простейшая измерительная марка представляет собой множество элементов круглой формы в виде двумерной периодической структуры. Конфигурация марки вклю-

часть также 3 опорных элемента большого диаметра (рис. 1), позволяющих обеспечить как измерения углов поворота марки в диапазоне $0-360^\circ$, так и ее смещение в пределах поля зрения видеокамеры.

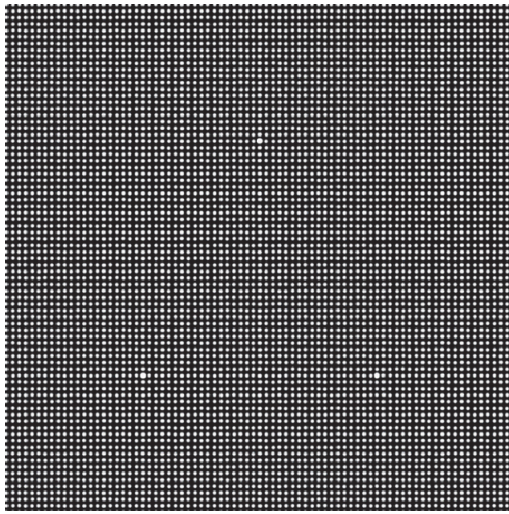


Рис. 1. Фрагмент изображения марки с опорными элементами

Видеокамера с объективом располагается так, чтобы движение марки происходило в плоскости, перпендикулярной его оптической оси, то есть параллельно фотоприемной матрице.

В процессе обработки изображения марки, полученного помощью цифровой видеокамеры, определяются координаты ее элементов, по которым вычисляется смещение марки и ее угол поворота. Также вычисляется масштабный коэффициент (период марки). При вращении или перемещении плоскость марки может наклоняться относительно оптической оси, вызывая искажение ее изображения. Эти искажения, как и искажения, связанные с дисторсией объектива и ошибками изготовления марки, корректируются [18]. Изменение масштаба, связанное с перемещением марки вдоль оптической оси, и искажения, вызванные наклоном марки, также позволяют измерять соответствующие координаты марки. Однако в этой статье мы ограничимся плоским движением.

Для новых измерителей прогнозируемая погрешность находится на уровне долей нанометра в линейной шкале и тысячных долей угловой секунды в угловой шкале. Очевидно, что получение такой высокой точности является непростой задачей, поскольку требует высочайшего уровня температурной стабилизации и деформационной стойкости конструкции прибора. Подобные измерители находятся в настоящее время в стадии исследований и разработок.

Важным фактором, также влияющим на точность измерений, является наличие шумов на получаемом с камеры изображении. Ограниченная разрядность изображения (шум квантования) приводит к ошибкам в определении координат элементов. Однако тепловой шум, присущий всем фотоприемным матрицам,

превращает эти ошибки в случайно изменяющиеся во времени.

Экспериментальному и теоретическому исследованию случайной составляющей погрешности и посвящена данная работа.

1. Теория

При отсутствии конвекции и вибраций основное влияние на СКО (стандартную неопределенность типа А) результата измерения оказывает погрешность определения координат элементов марки и число этих элементов. Случайный характер этой погрешности определяется погрешностью вычисления координат элемента вследствие пространственной дискретизации и яркостного квантования изображения марки и шумами камеры. При этом шумы камеры в разумных пределах играют полезную роль: каждый кадр оказывается независимой реализацией случайного процесса, и усреднение позволяет нивелировать влияние квантования.

Рассмотрим, как параметры марки и камеры влияют на погрешность измерения угла поворота, координат и периода марки.

1.1. Угол поворота

Пусть изображение марки на матрице камеры образует сетку пятен с шагом H . Тогда координаты пятен марки, повернутой на угол φ , будут

$$\begin{aligned}x_n &= a_x i - a_y j + b_x, \\y_n &= a_y i + a_x j + b_y,\end{aligned}\quad (1)$$

где i, j – номера строки и столбца n -го элемента марки, x_n, y_n – его координаты на матрице камеры, $a_x = H \cos \varphi$, $a_y = H \sin \varphi$. Уравнения (1) удобно записать в комплексном виде

$$r_n = a k_n + b, \quad r_n = x_n + i y_n, \quad k_n = i_n + j_n, \quad a = H e^{i\varphi}.$$

В дальнейшем удобно использовать центрированные переменные

$$\tilde{r}_n = r_n - \langle r \rangle, \quad \tilde{k}_n = k_n - \langle k \rangle,$$

где $\langle \rangle$ обозначает усреднение по всему множеству обрабатываемых пятен. В дальнейшем будут использованы только центрированные переменные, поэтому тильду в обозначении опускаем.

Все r_n и k_n можно рассматривать как компоненты комплексных N -мерных векторов $\mathbf{r}$ и $\mathbf{k}$, тогда система (1) может быть записана как

$$a \mathbf{k} + b = \mathbf{r}. \quad (2)$$

Переопределенная система (2) может быть решена методом наименьших квадратов.

$$a = (\mathbf{k} \mathbf{r}) / (\mathbf{k} \mathbf{k}), \quad b = 0. \quad (3)$$

Здесь

$$(\mathbf{kr}) = \sum_n k_n^* r_n$$

– скалярное произведение векторов, звездочка * обозначает комплексное сопряжение. Здесь и далее суммирование предполагается по всем значениям указанной переменной. Решение (3) получается с учетом того, что $\langle r_n \rangle = \langle k_n \rangle = 0$, или, что то же самое, $(\mathbf{1r}) = (\mathbf{1k}) = 0$. Очевидно, что (3) на самом деле является решением уравнения

$$a\mathbf{k} = \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \quad (4)$$

где $\Delta\mathbf{r}$ – погрешность определения координат пятен. Тогда погрешность определения a будет равна

$$\Delta a = (\mathbf{k}\Delta\mathbf{r}) / (\mathbf{k}\mathbf{k}). \quad (5)$$

Угол φ можно найти как $\varphi = \arctg(a_y/a_x) = \arg a = \text{Im}(\ln a)$. Его погрешность в линейном по Δa приближении можно найти, как

$$\Delta\varphi = \text{Im}\left(\frac{\Delta a}{a}\right) = \frac{a^* \Delta a - a \Delta a^*}{2i a^* a}. \quad (6)$$

Подставляя (3) и (5) в (6), с учетом того, что $a^* a = H^2$, получаем

$$\Delta\varphi = \frac{(\mathbf{kr})^* (\mathbf{k}\Delta\mathbf{r}) - (\mathbf{kr})(\mathbf{k}\Delta\mathbf{r})^*}{2i H^2 (\mathbf{k}\mathbf{k})^2}.$$

$$(\mathbf{k}\mathbf{k}) = \sum_n (i_n^2 + j_n^2) \approx \iint (i^2 + j^2) di dj = \int_0^{R/H} r^2 2\pi r dr = \frac{\pi R^4}{2H^4}, \quad \sigma_\varphi^2 = \frac{H^2}{\pi R^4} \sigma^2. \quad (8)$$

Общее число пятен, используемых для обработки, можно вычислить делением всей площади измеряемой области на площадь одной ячейки сетки $N = \pi R^2/H^2$, тогда

$$\sigma_\varphi = \frac{H}{\sqrt{\pi} R^2} \sigma = \frac{\sqrt{\pi}}{NH} \sigma = \frac{\sigma}{R\sqrt{N}}. \quad (9)$$

$$(\mathbf{k}\mathbf{k}) = \sum (i_n^2 + j_n^2) \approx \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} (i^2 + j^2) di dj = \frac{ab(a^2 + b^2)}{12H^4},$$

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{6H^2}{ab(a^2 + b^2)} \sigma^2 = \frac{6\sigma^2}{N(a^2 + b^2)}, \quad \sigma_\varphi = \frac{\sigma}{L^* \sqrt{N}}, \quad L^* = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{6}}. \quad (10)$$

Для камеры с соотношением сторон кадра 3×4 использование всей площади матрицы вместо вписанного круга уменьшает СКО примерно на 30 %.

1.2. Линейные координаты

Линейные координаты марки X, Y определяются через усредненное положение ее элементов

$$X = \langle x \rangle, \quad \sigma_X^2 = \sigma^2/2N, \quad Y = \langle y \rangle, \quad \sigma_Y^2 = \sigma^2/2N, \\ \sigma_X = \sigma_Y = \sigma/\sqrt{2N}. \quad (11)$$

Ограничиваясь первым порядком $\Delta\mathbf{r}$, можем считать, что $a\mathbf{k} = \mathbf{r}$, тогда

$$(\mathbf{kr})^* (\mathbf{k}\Delta\mathbf{r}) = a^* (\mathbf{k}\mathbf{k})^* (\mathbf{k}\Delta\mathbf{r}) = (\mathbf{k}\mathbf{k})^* (\mathbf{r}\Delta\mathbf{r}),$$

и, так как $(\mathbf{k}\mathbf{k})^* = (\mathbf{k}\mathbf{k})$, имеем

$$\Delta\varphi = \frac{(\mathbf{r}\Delta\mathbf{r}) - (\mathbf{r}\Delta\mathbf{r})^*}{2i H^2 (\mathbf{k}\mathbf{k})} = \frac{(\mathbf{x}\Delta\mathbf{y}) - (\mathbf{y}\Delta\mathbf{x})}{H^2 (\mathbf{k}\mathbf{k})}, \quad (7)$$

где $\mathbf{x}, \Delta\mathbf{x}, \mathbf{y}, \Delta\mathbf{y}$ – вещественные вектора координат пятен и их погрешностей. Оценим погрешность измеренного угла в предположении отсутствия геометрических искажений, когда все Δx и Δy имеют случайный характер с нулевым средним значением. Тогда, предполагая равенство погрешностей по обеим координатам, имеем

$$\langle (\Delta x)^2 \rangle = \sigma_x^2 = \langle (\Delta y)^2 \rangle = \sigma_y^2 = \frac{\sigma^2}{2},$$

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{(\mathbf{x}\mathbf{x}) + (\mathbf{y}\mathbf{y})}{2 H^4 (\mathbf{k}\mathbf{k})^2} \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{2 H^2 (\mathbf{k}\mathbf{k})}.$$

При достаточно больших значениях числа пятен знаменатель может быть легко вычислен приближенно. Если считать, что область анализа изображения марки представляет собой круг радиуса R (пикселей), то максимальные центрированные значения номеров пятен равны R/H . Тогда

Для камеры с матрицей 5 Мпикс возможный радиус $R = 1000$, тогда для пятен с шагом $H = 15$ пикс и СКО координат пятен $\sigma = 0,01$ пикс погрешность угла оказывается равной $8,5 \cdot 10^{-8}$ рад = $0,017''$.

Если для определения угла поворота использовать всю матрицу камеры размером $a \times b$, то в формуле для погрешности R заменяется на приведенный размер L^* :

Этот очевидный результат тем не менее показывает, что при СКО координат пятен $\sigma = 0,01$ пикс, $N = 20000$ и размере пикселя $3,5$ мкм СКО усредненных координат марки составляет $0,18$ нм.

1.3. Период марки

Оценим теперь погрешность периода марки H . Так как

$$H^2 = a^* a = \frac{(\mathbf{kr})^* (\mathbf{kr})}{(\mathbf{k}\mathbf{k})^2},$$

$$\Delta H = \frac{(\mathbf{k}\Delta\mathbf{r})^*(\mathbf{k}\mathbf{r}) + (\mathbf{k}\mathbf{r})^*(\mathbf{k}\Delta\mathbf{r})}{2H(\mathbf{k}\mathbf{k})^2} = \frac{a(\mathbf{k}\Delta\mathbf{r})^* + a^*(\mathbf{k}\Delta\mathbf{r})}{2H(\mathbf{k}\mathbf{k})} = \frac{(\mathbf{r}\Delta\mathbf{r})^* + (\mathbf{r}\Delta\mathbf{r})}{2H(\mathbf{k}\mathbf{k})} = \frac{(\mathbf{x}\Delta\mathbf{x}) + (\mathbf{y}\Delta\mathbf{y})}{H(\mathbf{k}\mathbf{k})},$$

$$\sigma_H^2 = \frac{(\mathbf{x}\mathbf{x}) + (\mathbf{y}\mathbf{y})}{2H^2(\mathbf{k}\mathbf{k})^2} \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{2(\mathbf{k}\mathbf{k})} = \frac{H^4 \sigma^2}{\pi R^4}, \quad \sigma_H = \frac{H^2 \sigma}{\sqrt{\pi} R^2} = \frac{\sqrt{\pi} \sigma}{N}. \quad (12)$$

Для рассмотренного примера ($\sigma = 0,01$ пикс, $N = 20000$, $3,5$ мкм) СКО усредненного периода марки составляет немыслимые $0,003$ нм.

1.4. Координаты элементов

Координаты отдельных элементов марки могут определяться разными способами, в нашем случае мы

использовали «центр тяжести» – средневзвешенное значение координат пикселей (ξ_k, η_k) с учетом его отсчета (яркости) p_k .

$$x = \langle \xi \rangle = \left(\sum_k \xi_k p_k \right) / P, \quad P = \sum_k p_k.$$

Тогда погрешность координат элемента марки

$$\Delta x = \sum_k \frac{\partial x}{\partial p_k} \Delta p_k = \frac{1}{P} \sum_k \xi_k \Delta p_k - \frac{1}{P} \langle \xi \rangle \sum_k \Delta p_k = \frac{1}{P} \sum_k (\xi_k - \langle \xi \rangle) \Delta p_k. \quad (13)$$

Если считать флуктуации отсчета для пикселей независимыми, то СКО координаты элемента марки будет определяться СКО отсчета σ_p . Для большинства камер флуктуация отсчета пропорциональна его величине $\sigma_p^2 = \alpha p$, и тогда

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{1}{P^2} \sum_k (\xi_k - \langle \xi \rangle)^2 \sigma_p^2 = \\ &= \frac{1}{P^2} \sum_k (\xi_k - \langle \xi \rangle)^2 \alpha p_k = \frac{\alpha \sigma_\xi^2}{P}, \quad (14) \\ \sigma_\xi^2 &= \frac{1}{P} \sum_k (\xi_k - \langle \xi \rangle)^2 p_k = \text{const}. \end{aligned}$$

Здесь σ_ξ – среднеквадратичная ширина элемента марки. Суммарная яркость элемента P в общем случае пропорциональна его площади, то есть квадрату размера, и максимальному значению величины отсчета $P = \beta p_{\max} \sigma_\xi^2$. Поэтому

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{P^2} \sum_k (\xi_k - \langle \xi \rangle)^2 \sigma_p^2 = \frac{1}{2P^2} \sum_k \left((\xi_k - \langle \xi \rangle)^2 + (\eta_k - \langle \eta \rangle)^2 \right) \sigma_p^2 \approx \frac{\pi \rho^4}{4P^2} \sigma_p^2, \quad (17)$$

где ρ – радиус зоны усреднения. И в этом случае $P = \gamma p_{\max} \pi \rho^2$ (γ – коэффициент пропорциональности),

$$\sigma_x^2 \approx \frac{\sigma_p^2}{\pi \gamma^2 p_{\max}^2}. \quad (18)$$

При цифровом накоплении кадров $p_{\max}$ и σ_p^2 растут пропорционально N_f , поэтому зависимость (16) по-прежнему выполняется.

2. Эксперимент

Измерения проводились на трех камерах с CMOS-сенсором, 8-битной глубиной (256 уровней яркости). Параметры камер приведены в табл. 1.

Измерительная марка с периодом 50 мкм и диаметром элементов 30 мкм была изготовлена методом фотолитографии, погрешность координат элементов не превышает $0,5$ мкм.

$$\sigma_x^2 = \frac{\alpha}{\beta p_{\max}}, \quad (15)$$

то есть практически не зависит от размеров марки, а только от свойства матрицы камеры (коэффициент α) и формы изображения элемента марки в относительных координатах (коэффициент β).

Увеличение $p_{\max}$ возможно как путем увеличения разрядности АЦП видеокамеры и времени экспозиции, так и путём цифрового накопления кадров. В последнем случае $p_{\max}$ пропорционально числу суммируемых кадров N_f , а СКО координат элементов марки убывает с ростом числа кадров как

$$\sigma_x \sim \frac{1}{\sqrt{N_f}}. \quad (16)$$

Если же дисперсия отсчета не зависит от его величины $\sigma_p^2 = \text{const}$, то для круглого элемента марки

Табл. 1. Параметры видеокамер

Камера	Размер поля, Мпикс	Кадр	Размер пикселя, мкм
A	1,4	1360×1040	5,2
B	5,1	2464×2056	3,45
C	26,2	5120×5120	4,3

2.1. Шумы камеры

Шумовые характеристики различных камер отличаются, зависят от температуры и часто никак не декларируются производителем. Поэтому было проведено независимое исследование шума использованных камер. Для этого использовалось изображение марки, содержащее необходимый диапазон градиаций серого. Для каждого пикселя в течение заданного времени вычислялись среднее значение и дисперсия отсчета. Поскольку средние значения прини-

мают произвольное (не целое) значение, результаты затем группировались с привязкой к ближайшему целому значению и вычислялась средняя по всем пикселям с близким отсчетом дисперсия. Количество пикселей, по которым проводилось усреднение, со-

ставляло десятки тысяч. Анализ производился как для введенных одиночных кадров, так и для суммы их фиксированного числа (цифрового накопления).

На рис. 2 показана зависимость дисперсии шума D от отсчета p для камеры А и линия тренда.

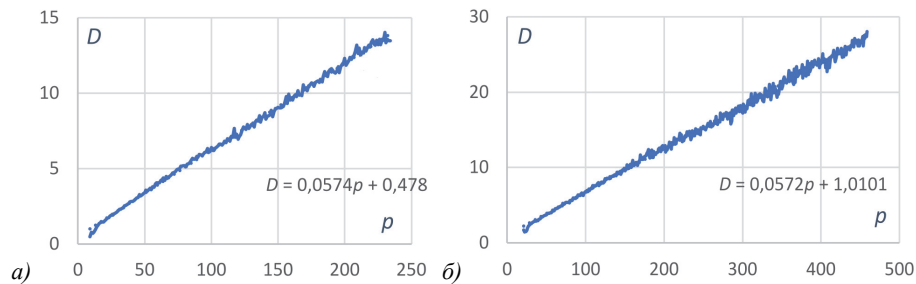


Рис. 2. Дисперсия шума D в зависимости от отсчета p для камеры А для одного (а) и двух (б) накопленных кадров

Видно, что при цифровом накоплении двух кадров дисперсия удваивается, что свидетельствует об отсутствии корреляции и справедливости формулы (16).

Для камеры С (рис. 3) зависимость носит аналогичный характер, но при цифровом накоплении дисперсия растет несколько быстрее, чем сумма диспер-

сий, что свидетельствует о наличии корреляции шумов для соседних кадров.

Шумы камеры В (рис. 4) носят принципиально иной характер. Однако и в этом случае цифровое накопление приводит к суммированию дисперсий и справедливости формулы (16).

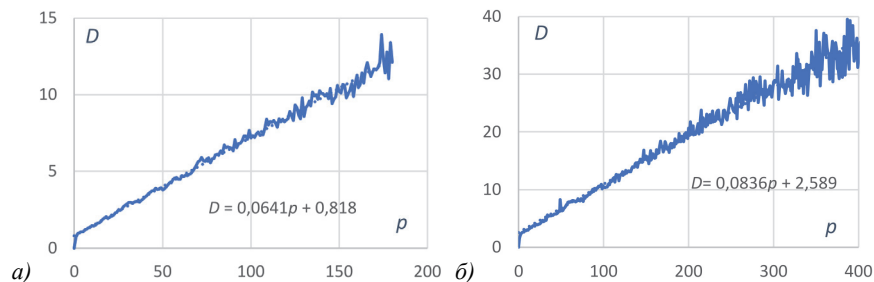


Рис. 3. Дисперсия шума D в зависимости от отсчета p для камеры С для одного (а) и двух (б) накопленных кадров

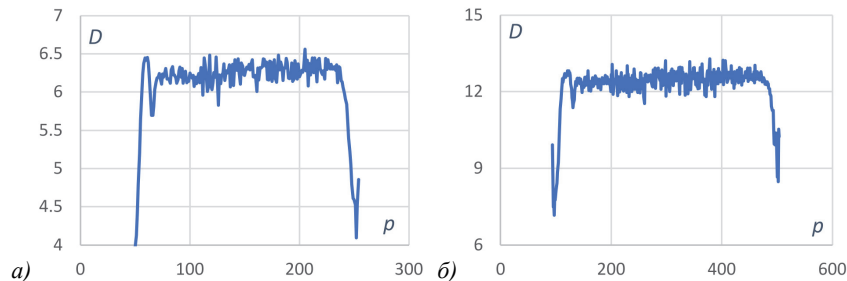


Рис. 4. Дисперсия шума D в зависимости от отсчета p для камеры В для одного (а) и двух (б) накопленных кадров

Полученные зависимости для камер А и С объясняются стохастической природой образования электронно-дырочных пар при попадании фотонов в элементы сенсора. Снимаемый с сенсора сигнал определяется числом поглощенных фотонов с учетом квантовой эффективности. Это случайная величина, дисперсия которой пропорциональна среднему значению.

Отсутствие такой зависимости у камеры В связано со встроенной гамма-коррекцией – сигнал пропорционален квадратному корню из числа поглощенных фотонов. Простейший расчет показывает, что в этом случае дисперсия не зависит от отсчета. Если учесть, что скорректированный отсчет можно записать как $p_\gamma = \sqrt{p_{\max} p}$, то

$$\sigma_{p_\gamma} = \frac{\sqrt{p_{\max}}}{2\sqrt{p}} \sigma_p, \quad \sigma_{p_\gamma}^2 = \frac{p_{\max}}{4p} \sigma_p^2 = \frac{\alpha p_{\max}}{4}. \quad (19)$$

Используя (19), данные рис. 4 и учитывая, что $p_{\max} = 256$, находим $\alpha = 0,098$. Это значение больше, чем у камер А и С, так как размер пикселя у камеры В значительно меньше.

2.2. СКО координат элементов

Определения СКО случайной погрешности координат элементов марки производилось для различных чисел цифрового накопления. Результаты измерений приведены в табл. 2.

Непосредственное измерение СКО также подтверждает зависимость (16). На рис. 5 показаны зависимости $\ln D$ от $\ln N_f$ для камер А и С. Коэффициент линейной регрессии с высокой точностью равен $1/2$.

Таким образом, простое цифровое накопление кадров позволяет существенно уменьшить случайную погрешность измерения.

2.3. Случайная погрешность измерения положения марки

Высокая разрешающая способность матричной технологии позволяет получить важную измерительную информацию при анализе длительных треков

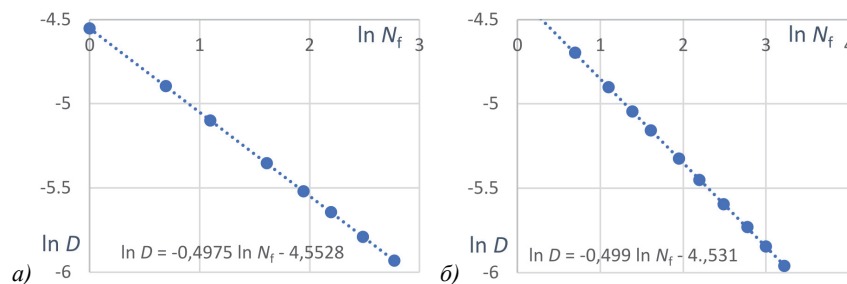


Рис. 5. Зависимость логарифма дисперсии координат элемента D от логарифма количества накопленных кадров N_f для камер А(а) и С(б)

В течение трех и более часов, за которые температура изменялась на несколько градусов, измерялись значения угла поворота, координат и периода неподвижной марки. Их изменения в результате теплового дрейфа описываются гладкими функциями, что позволило исключить тренд и выявить случайную погрешность измерения.

На рисунках ниже показаны зависимость изменения угла (рис. 6), координаты X (рис. 7) и периода марки от времени (рис. 8) и их отклонение от линии тренда, аппроксимированной дробно-рациональной функцией. Измерения выполнены камерой А с шагом по времени 2 минуты, полное время измерений – 200 минут, перепад температуры за время эксперимента – около $2,5^\circ\text{C}$.

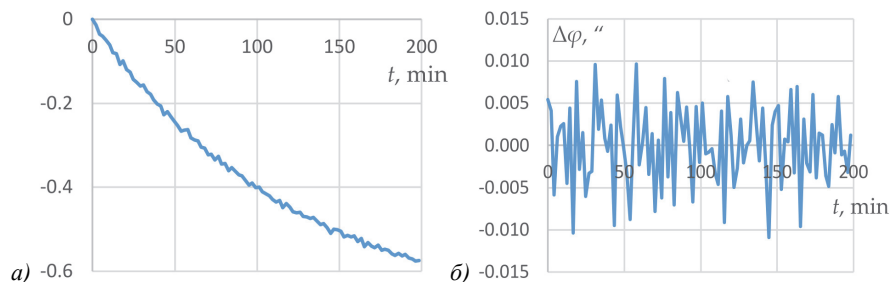


Рис. 6. Изменение угла (а) и его случайные отклонения от линии тренда (б) в зависимости от времени

Изменение координаты центральной (условно) точки марки за время эксперимента (рис. 7) составило 50 нм при разрешающей способности измерений порядка 0,2 нм. СКО измерения координаты X составляет 0,068 нм, для Y – 0,070 нм. Формула (11) с учетом уменьшения погрешности в результате усреднения по 10 отсчетам дает близкое, но немного меньшее значение 0,050 нм.

измерений при дестабилизирующем влиянии окружающей среды, включая тепловое воздействие компонентов системы.

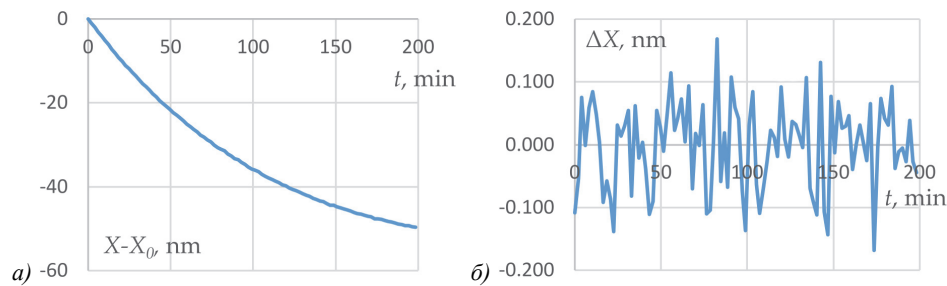
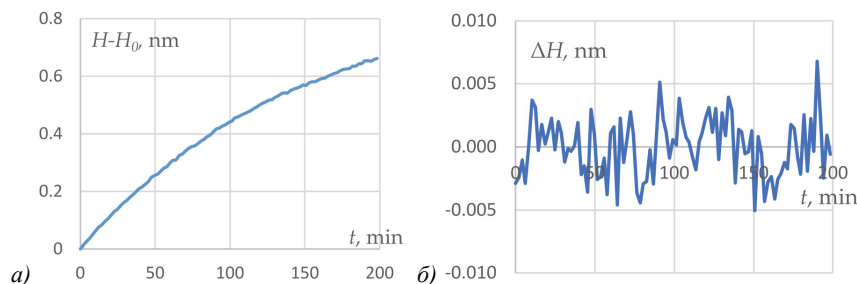
Табл. 2. СКО координат элементов для различного количества накопленных кадров N_f

N_f	СКО камера А, пикс	СКО камера В, пикс	СКО камера С, пикс
1	0,01053	0,01129	0,01287
2	0,00748	0,00813	0,00912
3	0,00609	0,00665	0,00743
5	0,00473	0,00518	0,00575
9	0,00354	0,00387	0,00429
16	0,00266	0,00290	0,00325

Каждый отсчет получен усреднением 10 измерений, выполненных с цифровым накоплением 5 кадров. Количество элементов марки, участвующих в обработке, равно 12000; период марки на ее изображении в камере составляет 9,34 пикселя, что соответствует увеличению объектива $0,971\times$.

Изменение угловой координаты за время эксперимента (рис. 6) составило более $0,5''$ при разрешающей способности измерений порядка $0,01''$. СКО измерения угла составляет $0,0047''$. Применение формулы (9) для СКО элементов марки 0,0047 пикс (табл. 1) с учетом уменьшения погрешности в результате усреднения по 10 отсчетам дает оценку погрешности $0,0048''$.

Изменение периода элементов марки за время эксперимента (рис. 8) составило доли нм при разрешающей способности измерений менее $0,01$ нм. СКО периода составляет 0,0023 нм. Формула (12) с учетом уменьшения погрешности в результате усреднения по 10 отсчетам дает в 2 раза меньшее значение 0,0011 нм.

Рис. 7. Изменение координаты X (а) и ее случайные отклонения от линии тренда (б) в зависимости от времениРис. 8. Изменение периода марки H (а) и его случайные отклонения от линии тренда (б) в зависимости от времени

В табл. 3 приведен фрагмент протокола, содержащий средние значения, рассчитанные по 10 измерениям, и соответствующие СКО. Эти СКО включают в себя не только случайную ошибку, но и дрейф, поэтому они немного больше, чем рассчитано выше.

Все три камеры были протестированы в ходе экспериментов. По времени обработки уменьшалось количество накопленных кадров и измерений. В табл. 4 приведены параметры – период H в пикселях и нано-

метрах, количество обработанных элементов марки N_e , количество усредненных измерений N_m и количество накопленных кадров N_f .

В табл. 5 приведены СКО, рассчитанные по экспериментальным данным после вычитания аппроксимации тренда (Эксперимент), и СКО, рассчитанные по формулам (9–12) и данным табл. 1, 4 (Теория). Оба значения достаточно близки, если иметь в виду простые допущения при выводе формул.

Табл. 3. Фрагмент протокола

№	СКО φ ,''	H , нм	СКО H , нм	X , нм	СКО X , нм	Y , нм	СКО Y , нм
70	0,0015	48623,6417	0,0014	3480121,695	0,057	2735359,498	0,080
71	0,0041	48623,6469	0,0017	3480121,661	0,046	2735359,519	0,074
72	0,0040	48623,6505	0,0024	3480121,903	0,153	2735359,486	0,124
73	0,0034	48623,6516	0,0014	3480121,886	0,082	2735359,648	0,148
74	0,0049	48623,6553	0,0018	3480121,691	0,122	2735359,174	0,091

Табл. 4. Параметры, использованные в экспериментах

Камера	H , пикс	H , нм	N_e	N_m	N_f
А	9,34	48568	12144	10	5
В	14,89	51370	21786	5	3
С	12,20	54900	122253	2	2

Табл. 5. Экспериментальные и теоретические значения СКО угла поворота, координат центра и периода марки

Камера		СКО φ ,''	СКО X , нм	СКО Y , нм	СКО H , нм
А	Эксперимент	0,0047	0,070	0,12	0,0023
	Теория	0,0048	0,050	0,050	0,0011
В	Эксперимент	0,0020	0,084	0,057	0,0010
	Теория	0,0033	0,049	0,049	0,00084
С	Эксперимент	0,0017	0,14	0,11	0,0015
	Теория	0,0016	0,082	0,082	0,00042

Измерение динамики величины периода при изменении температуры позволяет выполнить оценочную проверку полученных результатов. Будем считать, что изменение периода связано с температурной

деформацией марки, выполненной из стекла. При температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) стекла, равном $7 \cdot 10^{-6}$, изменение периода для номинала 50 мкм при перепаде температуры на 2,5

градуса составит порядка единиц нм, что хорошо совпадает с результатами измерений.

Заключение

Важность полученных оценок случайной погрешности измерений заключается в том, что нам необходимо было показать реальность и достижимость измерений на уровне нанометров. В обычной измерительной системе это кажется невозможным, поскольку ее метрология определяется разрешающей способностью объектива и фотоприемной матрицы, составляющей единицы микрометров. Теоретический анализ и реальные измерения в рамках проведенных исследований подтверждают возможность измерения угловых координат со случайной погрешностью 0,005" и измерения линейных координат со случайной погрешностью менее 0,1 нм. При этом речь идет о минимальной конфигурации матричного измерителя. Еще более удивительная оценка получена для измерения периода элементов марки. Случайная погрешность этих измерений составила тысячные доли нм.

Подчеркнем, что полученные результаты не имеют однозначного отношения к точности. Есть много проблем со стабильной средой, температурой камеры и так далее. С другой стороны, измерения, сделанные в изменяющихся условиях, позволяют надеяться, что наши оценки не являются результатом «измерения одной и той же картины» и показывают реальные возможности матричной технологии.

Отдельную ценность представляют оценки статистики шумов в разных цифровых камерах, позволяющие разделить их на аддитивный и мультипликативный. Они дают реальный критерий для выбора камер для матричных измерителей.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ № 20-19-00412.

References

- [1] Pisani M, Yacoot A, Balling P, Bancone N, Birlikseven C, Çelik M, Flügge J, Weichert C. Comparison of the performance of the next generation of optical interferometers. *Metrologia* 2012; 49(4): 455-467. DOI: 10.1088/0026-1394/49/4/455.
- [2] Bridges A, Yacoot A, Kissinger T, Humphreys DA, Tatam RP. Correction of periodic displacement nonlinearities by two-wavelength interferometry. *Meas Sci Technol* 2021; 32(12): 125202. DOI: 10.1088/1361-6501/ac1dfa.
- [3] Peggs GN, Yacoot A. A review of recent work in sub-nanometer displacement measurement using optical and X-ray interferometer. *Philos Transact R Soc A Math Phys Eng Sci* 2002; 360(1794): 953-968. DOI: 10.1098/rsta.2001.0976.
- [4] Wang X, Su J, Yang J, Miao L, Huang T. Investigation of heterodyne interferometer technique for dynamic angle measurement: Error analysis and performance evaluation. *Meas Sci Technol* 2021; 32(10): 105016. DOI: 10.1088/1361-6501/ac0d77.
- [5] Kang HJ, Chun BJ, Jang Y-S, Kim Y-J, Kim S-W. Real-time compensation of the refractive index of air in distance measurement. *Opt Express* 2015; 23(20): 26377-26385. DOI: 10.1364/OE.23.026377.
- [6] Meiners-Hagen K, Abou-Zeid A. Refractive index determination in length measurement by two-colour interferometry. *Meas Sci Technol* 2008; 19(8): 084004. DOI: 10.1088/0957-0233/19/8/084004.
- [7] Wu H, Zhang F, Liu T, Li J, Qu X. Absolute distance measurement with correction of air refractive index by using two-color dispersive interferometry. *Opt Express* 2016; 24(21): 24361-24376. DOI: 10.1364/OE.24.024361.
- [8] Xu Y, Brownjohn JMW. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *J Civ Struct Health Monit* 2018; 8: 91-110. DOI: 10.1007/s13349-017-0261-4.
- [9] Feng D, Feng MQ, Ozer E, Fukuda Y. A vision-based sensor for noncontact structural displacement measurement. *Sensors* 2015; 15(7): 16557-16575. DOI: 10.3390/s150716557.
- [10] Cheng F, Zhou D, Yu Q, Tjahjowidodo T. New image grating sensor for linear displacement measurement and its error analysis. *Sensors* 2022; 22(12): 4361. DOI: 10.3390/s22124361.
- [11] Liu B, Zhang D, Guo J, Zhu C. Vision-based displacement measurement sensor using modified Taylor approximation approach. *Opt Eng* 2016; 55(11): 114103. DOI: 10.1117/1.OE.55.11.114103.
- [12] André N, Sandoz P, Mauzé B, Jacquot M, Laurent GJ. Robust phase-based decoding for absolute (X, Y, Θ) positioning by vision. *IEEE Trans Instrum Meas* 2021; 70: 5001612. DOI: 10.1109/TIM.2020.3009353.
- [13] Bessonov RV, Belinskaya EV, Brysin NN, Voronkov SV, Kurkina AN, Forsh AA. Star trackers in astrodynamics systems of flying vehicles. Current problems in remote sensing of the Earth from space 2018; 15(6): 9-20. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-9-20.
- [14] Davis JR, ed. Tensile testing. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International; 2004: 77-82.
- [15] Korolev AN, Lukin AYa, Filatov YV, Venediktov VYu. Matrix technology of linear-angular measurements. *J Opt Technol* 2022; 89(12): 733-739. DOI: 10.1364/JOT.89.000733.
- [16] Korolev AN, Lukin AYa, Polishchuk GS. New concept of angular measurement. Model and experimental studies. *J Opt Technol* 2012; 79(6): 352-356. DOI: 10.1364/JOT.79.00035212.
- [17] Bokhman ED, Venediktov VYu, Korolev AN, Lukin AYa. Digital goniometer with a two-dimensional scale. *J Opt Technol* 2018; 85(5): 269-274. DOI: 10.1364/JOT.85.000269.
- [18] Korolev AN, Lukin AYa, Filatov YV, Venediktov VY. Reconstruction of the image metric of periodic structures in an opto-digital angle measurement system. *Sensors* 2021; 21(13): 4411. DOI: 10.3390/s21134411.

Сведения об авторах

Королёв Александр Николаевич окончил оптический факультет Ленинградского института точной механики и оптики (ЛИТМО) по специальности «Оптик-физик» в 1962 году. В 1968 году получил ученую степень кандидата технических наук, в 1989 году – ученую степень доктора технических наук. Работал в Государствен-

ном Оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ) и во ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ) в должности руководителя лаборатории. Основными областями деятельности и научных интересов являются оптико-цифровые системы формирования изображения, обработка изображений, линейно-угловые измерительные системы, разработка новых измерительных технологий и оптико-цифровых измерительных систем.

E-mail: al_korolev@mail.ru

Лукин Александр Яковлевич окончил радиофизический факультет Ленинградского политехнического института в 1975 году, кандидат физико-математических наук (1983). В настоящее время – профессор кафедры физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Участвовал в разработке ряда государственных эталонов (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева), автоматизированных измерительных приборов и экспериментальных установок. Область научных интересов – линейно-угловые измерения, разработка новых измерительных технологий и оптико-цифровых измерительных систем. E-mail: lukin_aya@spbstu.ru

Филатов Юрий Владимирович окончил Ленинградский политехнический институт в 1968 году. В 1977 году он получил степень кандидата наук, а в 1992 году – степень доктора наук (D.Sc.). В 1997 году он стал профессором Санкт-Петербургского электротехнического университета. В течение этих десятилетий его основными научными интересами были физика и применение лазерных гироскопов; лазерные методы и средства измерения перемещений; физика и применение волоконно-оптических гироскопов; прецизионные лазерные системы измерения углов для метрологии. E-mail: yvfilatov@etu.ru

Венедиктов Владимир Юрьевич окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1983 году. В течение многих лет он работал в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова. В 2003 году он получил ученую степень кандидата наук, а в 2011 году – доктора наук. С 2006 года работает в Санкт-Петербургском электротехническом университете. Основными областями научных интересов являются голография и адаптивная оптика, распространение света, оптические резонаторы и различные лазерные системы. E-mail: vlad.venediktov@mail.ru

ГРНТИ: 90.03.03, 90.27.27

Поступила в редакцию 20 декабря 2023 г. Окончательный вариант – 27 мая 2024 г.

Matrix technology of measurements. Path to nanometers

A.N. Korolev¹, A.Y. Lukin², Y.V. Filatov¹, V.Y. Venediktov¹

¹ Laser Measurement and Navigation Systems Department, Electrotechnical University "LETI",
197376, St. Petersburg, Russia;

² Department of Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, St. Petersburg, Russia

Abstract

The new technology for measuring linear and angular coordinates uses an optical pattern with a very large number of elements (tens/hundreds of thousands). A simultaneous measurement of the position of all elements of the pattern image using a digital camera increases the accuracy of measuring the position of the pattern by hundreds of times or more. For the new meters, the predicted resolution is fractions of a nanometer on the linear scale and thousandths of an arc second on the angular scale. The resolution of a real meter is limited by a random measurement error caused by a limited bit depth and thermal noise of a digital camera. The study of this component of the error is the purpose of this work. The authors carried out long-term measurements of the coordinates, the angle of rotation and the period of the stationary pattern in conditions of slowly changing temperature. The analysis of the data obtained made it possible to determine a random component of the measurement error, separating it from the changes caused by thermal deformations. With the dimensions of the pattern and the matrix of the digital camera of less than 10 mm, the standard deviation of angular measurements was 0.005 angular seconds, of linear measurements - about 0.1 nm, and the random error in measuring the period value of the pattern elements was less than 0.01 nm. The obtained estimates of the standard deviation of the measurement results are in good agreement with the analytical estimates given in the article. The high resolution of the matrix technology of linear and angular measurements has been experimentally proven.

Keywords: 2D scale, angle measurements, linear measurements, optical pattern, random measurement error.

Citation: Korolev AN, Lukin AY, Filatov YV, Venediktov VY. Matrix technology of measurements. Path to nanometers. Computer Optics 2025; 49(1): 67-75. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1486.

Acknowledgements: This research is financially supported by The Russian Science Foundation, Agreement N 20-19-00412.

Authors' information

Alexander N. Korolev graduated from Optical faculty of Leningrad Institute of Precision Mechanics and Optics with a degree in Optician-physics in 1962. In 1968 he received the degree of Candidate of Technical Sciences, in 1989 - the degree of Doctor of Technical Sciences. He worked at the Vavilov State Optical Institute and at the D.I. Mendelev Institute for Metrology as the head of the laboratory. Main areas of activity and research interests are optical-digital imaging systems, image processing, linear-angular measuring systems, development of new measurement technologies and optical-digital measurement systems. E-mail: al_korolev@mail.ru

Alexander Y. Lukin graduated from Radiophysics faculty of Leningrad Polytechnic Institute in 1975, Candidate of Physical and Mathematical Sciences (1983). Currently, he is a professor of Physics department of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. He participated in the development of several national standards (D.I. Mendelev Institute for Metrology), automated measuring instruments and experimental installations. His research interests include linear-angular measurements, development of new measurement technologies and optical-digital measuring systems. E-mail: lukin_aya@spbstu.ru

Yuri V. Filatov graduated from Leningrad Polytechnic Institute in 1968. He received Candidate of Science (Ph.D.) in 1977 and Doctor of Science (D.Sc.) degree in 1992. In 1997 he became Professor of St.Petersburg Electrotechnical University. During these decades, his main research interests have been ring laser gyro physics and application; laser method and means of displacement measurement; fiber optic gyro physics and application; precision laser angle measurement systems for metrology.

Vladimir Y. Venediktov graduated from Physics faculty of Leningrad State University in 1983. For many years he was working with the Vavilov State Optical Institute. In 2003 he has got his Candidate of Science (Ph.D.) degree, and in 2011 – the Doctor of Science (D.Sc.) degree. Since 2006 is working with the St.Petersburg Electrotechnical University. Main areas of scientific interests are holography and adaptive optics, beam propagation, optical resonators and various laser systems.

Received December 20, 2023. The final version – May 27, 2024.
