

10. Magnitskiy S., Frolov D., Firsov V., Gostev P., Protsenko I., Saygin M. A SPDC-Based Source of Entangled Photons and its Characterization // J. Russian Laser Res. 2015. V. 36. No. 6. P. 618—629.

11. D'Ariano G. M., Paris M. G., Sacchi M. F. Quantum Tomography // Adv. Imaging Electron. Phys. 2003. V. 128. P. 206.

12. Клышко Д. Н. Когерентный распад фотонов в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. 1967. № 6. С. 490.

13. Einstein A., Podolsky B., Rosen, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? // Phys. Rev. 1935. V. 47. No. 10. P. 777.

14. Kwiat P. G., Waks E., White A. G., Appelbaum I., Eberhard P. H. Ultrabright source of polarization-entangled photons // Phys. Rev. A. 1999. V. 60. P. R773.

15. Jozsa R. Fidelity for mixed quantum states // J. Mod. Opt. 1994. V. 41. P. 2315.

16. Wootters W. K. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. No. 10. P. 2245—2248.

17. Bouwmeester D., Ekert A., Zeilinger A. The physics of quantum information. Berlin: Springer, 2000.

18. Smithey D. T., Beck M., Cooper J., Raymer M. G. Measurement of number-phase uncertainty relations of optical fields // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. No. 4. P. 3159.

19. James D. F. V., Kwiat P. G., Munro W. J., A.G. White A. G. Measurement of qubits // Phys. Rev. A. 2001. V. 64. No. 5. P. 052312.

20. Kravtsov K. S., Straupe S. S., Radchenko I. V., Houlsby N. M. T., Huszar F., Kulik S. P. Experimental adaptive Bayesian tomography // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. No. 6. P. 062122.

Дата принятия: 26.10.2016.

531.742:62.791

Использование информационной избыточности в оптических цифровых измерительных системах с 2D-сенсором

А. Н. КОРОЛЁВ¹, А. Я. ЛУКИН², Г. С. ПОЛИЩУК³

¹ ООО «Оптические цифровые измерительные системы», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: a.korolev@optotech.ru

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ ОАО «ЛОМО», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен единый подход к организации измерений в оптических цифровых измерительных системах с 2D-сенсором. Предложенный подход основан на более полном употреблении информационной избыточности, а именно, применении координатной информации об объекте, распределённой по всему полю изображения. На примере автоколлимационных приборов показана эффективность этого подхода. Приведены результаты модельных и экспериментальных исследований, подтверждающих возможность повышения точности приборов при использовании многоэлементной марки и координатной информации по всему информационному полю. Сформулированы основные проблемы развития и внедрения данного подхода.

Ключевые слова: светочувствительная матрица, оптическая марка, координаты изображения марки, обработка изображений, математическая модель.

In article is reviewed uniform method of the organization of measurements in optical digital measuring systems with a 2D-sensor, based on full use of information redundancy, namely, use of coordinate information on the object, distributed on all of an image field. Efficiency of the reviewed method is shown on the example of autocollimators. Results of the simulation and experiments confirm possibility to increase accuracy of devices to ten times which use multi-element mark and coordinate information on all information field. The main problems of development and using of the reviewed method are formulated.

Key words: optical sensor, optical mask, mask image coordinates, image processing, mathematical model.

Оптические цифровые измерительные системы с 2D-сенсорами предназначены для измерений координат изображения, формируемого на фотоприёмной матрице, например изображения некоторой марки, конфигурация которой адекватна измерительной задаче.

Цель данной статьи — анализ возможностей повышения метрологической эффективности, т. е. точности измерений в системах с 2D-сенсорами при максимальном использовании степеней свободы информационного поля. В рам-

ках метрологической эффективности кроме точности можно рассматривать и другие параметры, например область или диапазон измерений и пр.

Матрица светочувствительных элементов современных цифровых фотоаппаратов и телевизионных камер представляет двухмерную решётку. Погрешность топологии матриц составляет десятки нанометров и обеспечивается современными интегральными технологиями. При этом определяющим параметром является размер минимального элемен-

та, который за последние 10 лет в процессе развития технологий постоянно уменьшался от 65 до 22 нм [1]. Количество светочувствительных элементов матрицы может составлять миллионы и даже десятки миллионов, при этом размеры элементов составляют единицы микрометров. Учитывая ортогональную топологию и высокие точности таких структур, эффективность их использования для решения прецизионных измерительных задач не вызывает сомнений. С точки зрения метрологии фотоприёмная матрица — уникальный прибор, который одновременно формирует информационный сигнал и является двухмерной измерительной шкалой [2]. Это свойство фотоприёмной матрицы широко применяется для линейных и угловых измерений [3—7]. На основании изложенного выше рассмотрим задачу повышения метрологической эффективности измерений в оптических цифровых измерительных системах.

В качестве примера использования информационного поля для повышения эффективности измерений приведём штангенциркуль с нониусом. Подвижная часть штангенциркуля перемещается на расстояние, равное измеряемому размеру. Следовательно, все точки шкалы, нанесённой на подвижную часть, тоже перемещаются на это расстояние, т. е. содержат информацию об измеряемом размере. С помощью нониуса можно проанализировать некоторую зону подвижной шкалы, определив точку совпадения штрихов

основной шкалы и нониуса. Таким образом, используется избыточность информационного поля для повышения точности измерений.

Концепцию применения информационной избыточности информационного поля в оптических цифровых измерительных системах удобно проследить на примере разработки линейки цифровых автоколлиматоров ОПТРО-АК [8]. В [9] авторы исследовали проблему оптимизации формы оптической марки в цифровых измерительных системах с помощью алгоритмов вычисления центра её изображения. Использование в цифровых измерительных технологиях марки в форме штриха или перекрестья [10—12] является рудиментом визуальных измерительных технологий, когда форма марки соответствует возможностям глаза наилучшим образом определять момент совмещения штрихов. В то же время выполнение вычислений при измерениях координат изображения обуславливает необходимость проведения поиска оптимальной формы марки, соответствующей другим критериям. С информационной точки зрения, в данном случае главные ограничители при анализе изображения, формируемого 2D-сенсорами, — эффекты дискретизации и квантования.

Матричный фотоприёмник имеет следующие недостатки и дефекты, ограничивающие точность измерений: неравномерность чувствительности, «битые» пиксели, нелинейность зависимости сигнала от освещённости, неравномерность освещения и т. д. Эти недостатки распространяются и на фотометрические процедуры анализа изображения. Например, при вычислении центра тяжести изображения марки фотометрические погрешности в каждом пикселе влияют на результат измерения координаты центра её изображения. В то же время при большом числе пикселей в изображении марки происходит значительное статистическое выравнивание этих погрешностей.

Если требуется определить геометрический центр изображения марки в форме круга, то его вычисляют по совокупности точек, лежащих на границе изображения. Координаты точек вычисляют путём дифференцирования изображения по осям X , Y с использованием сплайнов, помогающих более точно находить экстремумы. В этом случае указанные выше дефекты матричного фотоприёмника и системы освещения практически не влияют на погрешность измерения, и их можно не учитывать.

Для конкретных условий цифровой модели были рассчитаны погрешности измерения центра тяжести в зависимости от фазового сдвига изображения марки относительно решётки отсчётов светочувствительных элементов 2D-сенсора [9]. При одинаковых условиях (размытие изображения, уровень шума и число уровней квантования) предложенная авторами марка круглой формы диаметром 50 пикселей позволяет получить точность измерений в три раза выше, чем для штриха размерами 7×240 пикселей. Такое повышение точности определяется избыточностью информационного поля: если в случае штриха измерения выполняют по нескольким пикселям (длина штриха влияет только на усреднение шумов), то для марки круглой формы вычисления производят для поля размером около 2000 пикселей.

Дальнейшие исследования показали, что точность измерений можно многократно повысить, если выбрать марку в форме матрицы, элементом которой является круг. Такая марка представлена на рис. 1, а. Для указанной марки почти

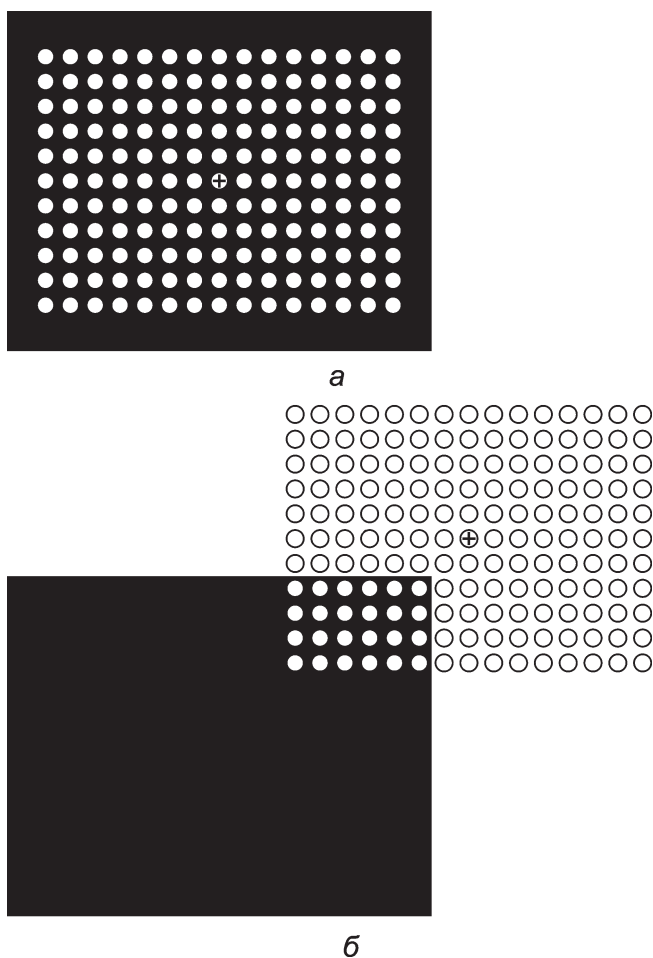


Рис. 1. Изображение многоэлементной марки в центре (а) и на краю (б) поля; ⊕ — элемент $A_{6,8}$

всё поле матрицы размером в один мегапиксел задействовано при вычислениях координат центра изображения [9]. При использовании подобной марки, например, в автоколлиматоре, с помощью программных средств можно выделить область локализации отдельных элементов изображения, определить координаты их центров, распознать порядковые номера элементов в матрице $A_{n,m}$ и определить средневзвешенные координаты положения центра изображения вблизи элемента $A_{6,8}$. Для рассматриваемой марки $n = 1, \dots, 11$, $m = 1, \dots, 15$, включая случай выхода этой точки за пределы поля матричного фотоприёмника. При вычислениях средневзвешенной координаты положения центра изображения происходит усреднение детерминированных случайных погрешностей вычисления координат каждого элемента в этом изображении. Такие погрешности неизбежны и обусловлены процессами дискретизации и квантования при формировании цифровых массивов видеоданных. Усреднение координат большого числа элементов в изображении марки позволяет значительно уменьшить окончательную погрешность измерений.

На рис. 1, б представлена часть изображения марки, попадающей на фотоприёмную матрицу (чёрное поле). Виртуальное положение за пределами матрицы остальных элементов изображения марки обозначено кольцами на белом фоне. Поскольку программа может анализировать изображение марки и вычислять результат измерений даже в случаях, когда в поле зрения остаётся только одна строка или один столбец изображения или вообще только один элемент, то положение измеряемого центра марки становится виртуальным по отношению к полю зрения, так как находится вне его. Применение такой измерительной технологии обеспечивает почти двукратное увеличение диапазона измерений.

Таким образом, можно выделить основные преимущества многоэлементной марки по сравнению с одноэлементной:

уменьшение случайной составляющей погрешности измерений приблизительно в $N^{1/2}$ раз, где N — число видимых элементов. Для марки, содержащей 15×11 элементов и находящейся в центре поля зрения, случайная составляющая погрешности снижается в 10—12 раз, а для марки, смещённой к краю поля по вертикали или горизонтали, — в 3—4 раза; расширение диапазона измерений почти в 2 раза.

Анализ случайной детерминированной погрешности при использовании одно- и многоэлементных марок авторы выполнили с помощью математической модели, основанной на использовании фазового сдвига в спектре изображения с последующим преобразованием Фурье для формирования изображения с заданным пространственным сдвигом [9, 13]. Модель позволяет «рассчитать» погрешности определения координат марки при малых перемещениях в пределах 1 пиксела с шагом 0,01 или 0,001 пиксела. При стандартном размере светочувствительного элемента фотоприёмника (пиксела) порядка 5 мкм это соответствует смещениям на 50 или 5 нм. В реальном эксперименте подобные измерения провести невозможно.

В рассмотренной модели шаг между элементами марки составляет 80 пиксела, диаметр единичного элемента — 60 пиксела. Общий размер анализируемого поля соответ-

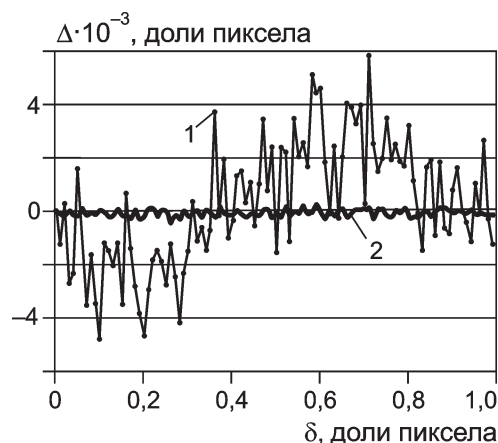


Рис. 2. График детерминированной погрешности измерения координаты единичного центрального элемента (1) и многоэлементной марки (2) при перемещениях в пределах одного пиксела

ствует стандартному размеру фотоприёмной матрицы цифровой телевизионной камеры 1280×1024 пиксела. Модель предполагает использование 8-битового аналого-цифрового преобразователя для квантования видеосигнала. Среднее квадратическое отклонение (СКО) шума принято равным трём уровням квантования. Размытие изображения соответствует оптической передаточной функции (ОПФ) дифракционно ограниченной системы с предельным разрешением 80 мм^{-1} .

На рис. 2 приведён график детерминированной погрешности измерений координат центра для одно- и многоэлементных марок при перемещениях в пределах одного пиксела. График построен на основании результатов моделирования. По оси X отложено смещение δ в долях пиксела от 0 до 1, по оси Y — отклонение координаты Δ вычисленного центра марки от истинного значения. Размах детерминированной погрешности составляет порядка $\pm 0,0005$ пиксела для многоэлементной марки (кривая 2), в то время как для единичной марки этот размах соответствует $\pm 0,008$ пиксела (кривая 1), т. е. имеет место более чем 10-кратное уменьшение детерминированной случайной погрешности измерений. Однако наряду с детерминированной погрешностью, которую оценивали авторы, также важными факторами, влияющими на результаты измерений, являются локальные дисторсии объектива и гравитационно-температурные деформации несущей конструкции.

На рис. 3 приведено изображение векторов сдвига элементов марки, вызванных дисторсией. Точками обозначены виртуальные координаты регулярной матрицы, а отрезками прямой — вектора сдвига. При этом масштаб векторов сдвига в 100 раз больше масштаба матрицы элементов. Сдвиг вычисляют как разность между измеренным положением элемента и его положением в «идеальном» изображении марки — регулярной матрице, позицию и шаг которой определяют методом наименьших квадратов по найденным координатам элементов. Именно смещение этой матрицы является объектом измерений для данного прибора.

Реальную оценку локальной дисторсии можно выразить через среднее отклонение действительной координаты от

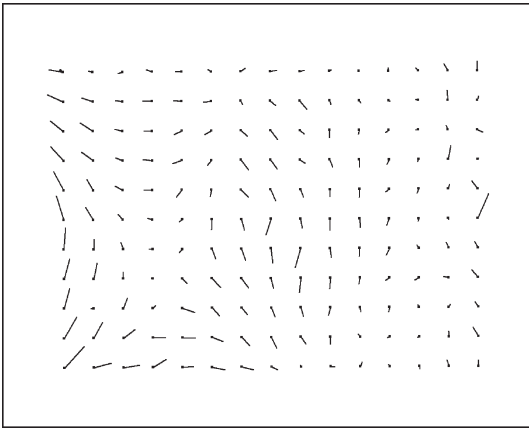


Рис. 3. Изображение векторов сдвигов, вызванных дисторсией в точках, соответствующих матрице элементов марки, в масштабе 100:1 по отношению к масштабу матрицы элементов

истинной. Для данного объектива отклонение составляет порядка 0,5 мкм. Это значение находится в пределах допустимого для автоколлиматора с погрешностью $\pm 0,1''$, но не позволяет использовать такой объектив для создания более точного прибора. Следует уточнить, что речь идет не о классической дисторсии, а о дисторсионном шуме, формируемом в результате двойного прохождения, что существенно ограничивает возможности программной коррекции указанных искажений.

Для экспериментального подтверждения авторской концепции был проведен измерительный эксперимент, исключаяющий влияние дисторсии и деформации несущей конструкции прибора. Для этого выполнили две серии измерений в одной точке с трипель-призмой в качестве отражателя. В таблице приведен протокол указанных измерений для многоэлементной марки и центрального элемента.

В соответствии с данными таблицы среднее значение СКО по оси X для 10 измерений (выделены жирным шриф-

том) при использовании многоэлементной марки составляет 0,00005", а при применении только одного центрального элемента — 0,0007". В каждом отдельном измерении среднее значение X, Y вычисляли для 12 изображений за 2 с. Таким образом, среднее значение СКО для серии измерений с многоэлементной маркой уменьшилось в 14 раз по сравнению с единичной. Различия СКО для направлений X, Y в таблице связаны, очевидно, с разным количеством строк и столбцов в многоэлементной марке. Результаты измерений существенно лучше, чем у описанных в [10, 14] образцов.

Таким образом, максимально возможное применение информационной избыточности показывает потенциал в повышении метрологической эффективности оптических цифровых измерительных систем с 2D-сенсором за счёт полного использования степеней свободы информационного поля. Значение 0,00005" настолько мало, что его трудно сопоставить с физическими реалиями. Для образного представления можно предложить следующую версию: если длина экватора Земли составляет 40 тыс. км, то угловой мере 0,00005" соответствует дуга на линии экватора длиной 1,5 мм.

Применение информационной избыточности является универсальным средством повышения метрологической эффективности измерений в оптических цифровых измерительных системах с 2D-сенсором. Примеры использования приборов, соответствующих концепции эффективного внедрения информационной избыточности, приведены в [13, 15]. В [13] описан измеритель угла, в котором используется марка в виде матрицы элементов в форме круга. Все точки поля анализируемого изображения марки отображают угловое движение объекта. Изображение марки заполняет все поле фотоприёмника. Измерение координат каждого из нескольких сотен элементов позволяет определить угол ориентации матрицы. Данная технология обеспечивает высокую метро-

Измерения угловых координат для многоэлементной марки и единичного элемента

Номер измерения	Многоэлементная марка				Единичный элемент			
	X	Y	СКО по X	СКО по Y	X	Y	СКО по X	СКО по Y
1	-2,81608	-0,34663	0,00008	0,00026	-2,14274	-0,00473	0,00083	0,00098
2	-2,81649	-0,34711	0,00006	0,00023	-2,14090	-0,00054	0,00055	0,00092
3	-2,81568	-0,34699	0,00007	0,00021	-2,14420	-0,00119	0,00068	0,00075
4	-2,81595	-0,34641	0,00004	0,00008	-2,14250	-0,00596	0,00075	0,00096
5	-2,81652	-0,34638	0,00008	0,00027	-2,14053	-0,00031	0,00059	0,00140
6	-2,81605	-0,34678	0,00002	0,00008	-2,14291	-0,00302	0,00054	0,00113
7	-2,81671	-0,34566	0,00002	0,00026	-2,14159	-0,00645	0,00062	0,00057
8	-2,81627	-0,34717	0,00006	0,00016	-2,14135	0,00513	0,00067	0,00096
9	-2,81609	-0,34658	0,00001	0,00011	-2,14038	-0,00637	0,00091	0,00124
10	-2,81622	-0,34640	0,00008	0,00022	-2,13997	0,00145	0,00102	0,00102

логическую эффективность не только в части высокой точности измерений угла на уровне долей угловой секунды, но и позволяет реализовать переход от стандартных для 2D-сенсоров координатных измерений к угловым. В [15] рассмотрен оптический цифровой автоматизированный измеритель отклонений от прямолинейности, в котором задействована марка в форме концентрических колец. Назначение прибора — измерение координаты центра изображения марки и смещения марки относительно некоторой базовой линии. Высокая метрологическая эффективность определяется тем, что при каждом измерении программа анализирует изображение значительного числа элементов марки, занимающих всё поле фотоприёмника. Информация о смещении имеется в каждой точке изображения и максимально применяется для измерений. Высокий уровень усреднения результатов для всех элементов позволяет получить значение координаты центра изображения марки с точностью до сотых долей микрометра.

Заключение. Использование информационной избыточности приводит к повышению точности измерений, так как позволяет не только обнаружить, но и исключить возможные ошибки, а при наличии случайной погрешности — уменьшить дисперсию окончательного результата за счёт усреднения большого числа полученных одновременно отсчётов. Применение принципа информационной избыточности в оптических цифровых измерительных системах с 2D-сенсором обеспечивает высокую точность линейных и угловых измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Бельский А. Б., Ган М., Миронов И., Сейсян Р. П. Перспективы развития оптических систем для нанолитографии // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 8. С. 59—69.
2. Королёв А. Н., Гарцуев А. И. Исследование точности позиционирования изображения на ПЗС матрице // Измерительная техника. 2004. № 5. С. 20—22.
3. Geckeler R., Krause M., Just A., Kranz O., Bosse H. New frontiers in angle metrology at the PTB // Measurement. 2015. V. 73. P. 231—238.
4. Chen Z., Huang P. S. A vision-based method for planar position measurement // Meas. Sci. Technol. 2016. No. 27. P. 125018.
5. Suzuki T., Endo T., Sasaki O., Greivenkamp J. E. Two-dimensional small-rotation-angle measurement using an imaging method // Opt. Eng. 2006. No. 45(4). P. 043604.
6. Hsu C. J., Lu M., Lu Y. Distance and angle Measurement of objects on an oblique plane based on pixel number variation of CCD images // IEEE Trans. Inst. & Meas. 2011. V. 60. No. 5. P. 1779—1794.
7. Feng C., Kajima M., Gonda S., Minoshima K., Fujimoto H., Zeng L. Accurate measurement of orthogonality of equal-period, two-dimensional gratings by an interferometric method // Metrologia. 2012. V. 49. P. 236—244.
8. Королёв А. Н., Гарцуев А. И., Полищук Г. С., Трегуб В. П. Цифровой двухкоординатный автоколлиматор // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 42—47.
9. Королёв А. Н., Гарцуев А. И., Полищук Г. С., Трегуб В. П. Метрологические исследования и выбор формы оптической марки в цифровых измерительных системах // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 6. С. 25—27.
10. Гончаров Н. В. Обзор современной углоизмерительной техники // Фотоника. 2014. № 1. С. 64—72.
11. Харитоновна Е. Н. Определение оптимальных формы и размера маркера цифрового автоколлиматора // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 22—25.
12. Geckeler, R. D., Just, A., Krause, M., Yashchuck, V. V. Autocollimators for deflectometry: Current status and future progress // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. 2010. A. 616. P. 140—146.
13. Королёв А. Н., Лукин А. Я., Полищук Г. С. Новая концепция измерения угла; модельные и экспериментальные исследования // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 6. С. 52—58.
14. Eves B. J. The NRC autocollimator calibration facility // Metrologia. 2013. V. 50. P. 433—440.
15. Королёв А. Н., Лукин А. Я., Полищук Г. С., Трегуб В. П. Оптический цифровой автоматизированный измеритель отклонений от прямолинейности // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 9. С. 45—50.

Дата принятия: 22.06.2016.