

07.3

## Повышение точности позиционно-чувствительного датчика с широким полем зрения

© Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.Г. Оболенсков, А.А. Сухарев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Bgp@holo.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2020 г.

В окончательной редакции 5 июня 2020 г.

Принято к публикации 10 июля 2020 г.

Рассмотрена концепция улучшения линейности координатной характеристики и точности координатоуказания позиционно-чувствительного датчика при расширении его поля зрения. Анализируется диагонально-сегментная топология датчика с учетом влияния неоднородностей оптического сигнала и пространственного распределения фоточувствительности на его поверхности.

**Ключевые слова:** позиционно-чувствительный датчик, диагональная топология, точность.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.19.50046.18411

Повышение точности и разрешающей способности позиционно-чувствительных детекторов (ПЧД), несмотря на значительные достижения в этой области, остается актуальной проблемой. В настоящее время эти приборы представлены тремя основными типами датчиков [1]: латеральными ПЧД [2], ПЧД-Мультискан [3] и сегментными ПЧД [4]. Основными недостатками первых двух приборов является то, что и в том и в другом случае линейность координатных характеристик определяется равномерностью резистивных слоев, обеспечивающих пропорциональность разделения фототоков в латеральных ПЧД или высокую однородность распределенной шкалы измерений в случае ПЧД-Мультискан.

Отсюда становится ясно, что аппаратная функция прибора, которая устанавливает связь измеренной величины на выходе позиционно-чувствительного датчика с ее истинным значением на входе прибора, должна жестко задаваться его топологией. Такой подход к решению проблемы используется в сегментных ПЧД, где формирование фототоков  $I_1$  и  $I_2$  производится с помощью разделительного зазора, формирующего на фоточувствительной поверхности датчика изолированные сегменты. Эти датчики обладают высокими разрешением и быстродействием, однако имеют крайне малое поле зрения и ограниченные размеры оптического пятна [5]. Их координатная характеристика в принципе нелинейна и зависит от динамического изменения формы падающего на них оптического сигнала. Все это ограничивает область применения сегментных ПЧД системами центрирования и слежения [4,5].

Задача расширения поля зрения сегментного датчика решается в ПЧД такого типа с диагональным разделением сегментов [6,7]. Однако точность измерений положения светового пятна (определения направления на источник сигнала) при использовании этих приборов также оказалась неприемлемо низкой вследствие зависимости результатов позиционирования от параметров

светового сигнала, что сводило на нет их потенциальные преимущества.

В настоящей работе рассмотрены принципы построения сегментных ПЧД диагонального типа для случаев, в которых оптический сигнал, попадающий на ПЧД, формируется с помощью „щелевой“ оптики. Такие задачи возникают при необходимости точной ориентации объектов в замкнутом пространстве, при прецизионных измерениях на промышленных конвейерах, в научном приборостроении.

В случае щелевой оптики оптический сигнал на поверхности фотодетектора формируется с помощью щели, вырезающей из падающего рассеянного светового потока узкую линию  $f(x, y)$ , перпендикулярную оси  $X$  прибора. Для решения задач, требующих определения положения светового сигнала с высокой точностью, необходимо рассмотреть совместное влияние формы светового сигнала  $f(x, y)$  и чувствительности прибора  $\alpha(x, y)$  на линейность его координатной характеристики.

В качестве базовой модели принята модель датчика, представленная на рис. 1. В этом случае прямоугольная поверхность фотодетектора разделяется на две изолированные фоточувствительные области переменной ширины с помощью технологического разделительного зазора, сформированного в виде диагонали. Оптический сигнал, образующий на поверхности датчика штрих, делится этим диагональным зазором на части  $S_1$  и  $S_2$ , длины  $Y_1$  и  $Y_2$  которых являются функцией координаты  $x_i$ .

Отношение величин токов двух фоточувствительных областей датчика соответствует отношению фототоков, снимаемых с освещенных площадей  $S_1$  и  $S_2$ . Таким образом, метод базируется на формировании относительной разности фототоков  $I_1$  и  $I_2$  в их зависимости от изменения соотношения освещенных площадей  $S_1$  и  $S_2$ , и координата положения медианы оптического

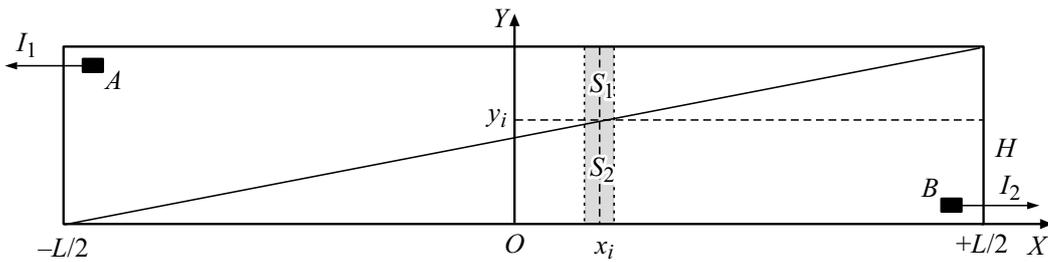


Рис. 1. Базовая модель диагонального датчика. Пояснение в тексте.

сигнала  $X_{out}$  вычисляется как

$$X_{out} = \frac{L}{2} \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина датчика,  $I_1, I_2$  — величины фототоков двух фоточувствительных областей датчика  $A$  и  $B$  соответственно.

Важной особенностью таких датчиков является то, что соотношение площадей участков датчика, на которых формируются фототоки, определяется жестко заданной топологией датчика, т.е. тангенсом угла  $\beta = H/L$  (где  $H$  — ширина датчика), под которым проведена диагональ, разделяющая датчик на две зоны чувствительности.

Таким образом, на выходных контактах прибора формируются два фототока:

$$I_1 = \int_0^{y_i} \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) f(x, y) dx dy, \quad (2)$$

$$I_2 = \int_{y_i}^H \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) f(x, y) dx dy, \quad (3)$$

где  $f(x, y)$  — распределение мощности оптического сигнала на его поверхности,  $\alpha(x, y)$  — чувствительность датчика.

Распределение освещенности оптического сигнала вдоль горизонтальной оси  $X$  (поперек оптической щели) может быть неравномерным, но при этом сохранять постоянство своего распределения вдоль оси  $Y$  по всей ширине датчика ( $H < L$ ). Тогда интегрирование по оси  $Y$  эквивалентно умножению внутреннего интеграла по  $x$  из выражений (2) на  $y_i$  и интеграла (3) на  $(H - y_i)$ . Соответственно

$$I_1 = y_i \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) f(x, y) dx, \quad (4)$$

$$I_2 = (H - y_i) \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) f(x, y) dx. \quad (5)$$

Неравномерность распределения мощности света вдоль оптической щели (ось  $Y$ ) длиной 10 mm при несфокусированном свете составляет  $\leq 1\%$ , причем величина этой неравномерности быстро снижается при уменьшении ширины датчика  $H$ .

Таким образом, проинтегрированная по  $X$  освещенность вдоль оси  $Y$  в пределах указанной точности является величиной постоянной. Это обстоятельство позволяет избежать искажения пропорциональности сравниваемых фототоков при смещении сигнала вдоль измеряемого направления  $X$ . Таким образом, можно записать

$$I_1 = y_i P_x(y) \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) dx, \quad (6)$$

$$I_2 = (H - y_i) P_x(y) \int_{-L/2}^{L/2} \alpha(x, y) dx, \quad (7)$$

что определяет линейность зависимости величин  $I_1$  и  $I_2$  от координаты  $y_i$ .

Рассмотрим теперь пространственное распределение чувствительности по поверхности фотоприемника  $\alpha(x, y)$ , неравномерность которой может вносить существенный вклад в точность определения координаты сигнала. Нами была экспериментально исследована неравномерность чувствительности типичного сегментного кремниевого  $p-i-n$ -фотодиода ФД342М (рис. 2). Измерения показали, что величина  $\alpha(x)$  вдоль одной из координат сегментного фотоприемника изменяется в существенных пределах. Для данного прибора величина неравномерности  $\alpha(x)$  составила 4.7%.

Проведенный пространственно-частотный анализ этих результатов показал, что наибольшая величина отклонения от среднего значения находится в низкочастотной области спектра, а при пространственных частотах, соответствующих сдвигу сигнала на 1.5–2 mm, эта величина становится пренебрежимо малой. Отсюда следует важный вывод, что для наиболее эффективного подавления влияния неравномерности чувствительности прибора, равно как и возможных неравномерностей освещенности по оси  $Y$ , площадь фотоприемника следует разбить на  $n$  пар треугольников с помощью набора

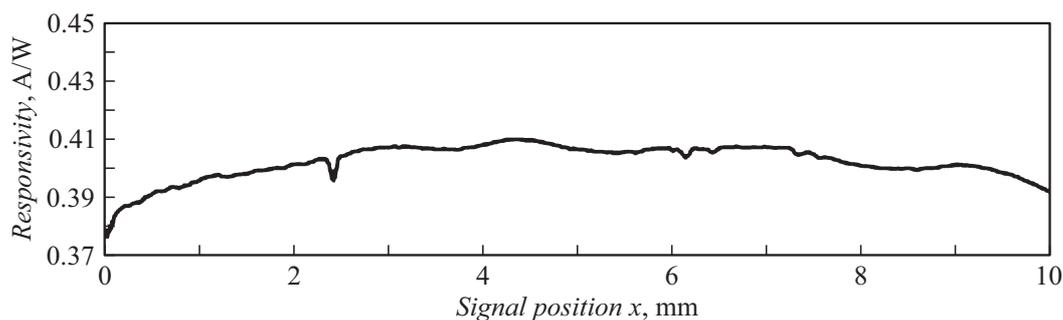


Рис. 2. Неравномерность фоточувствительности фотодиода ФД342М по оси X.

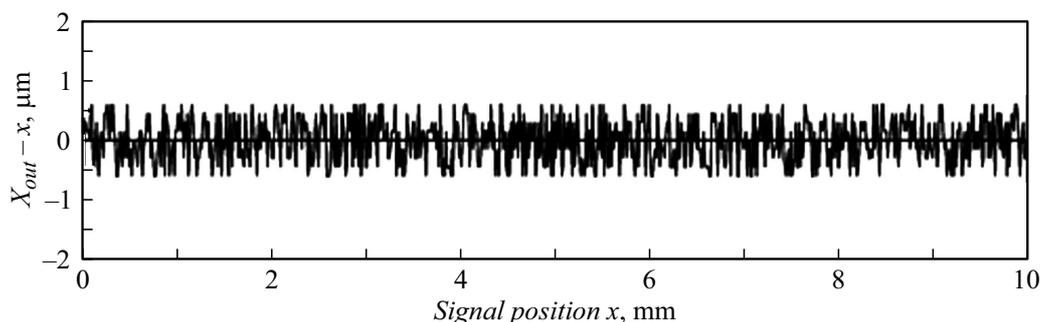


Рис. 3. Ошибка измерения координаты сигнала.

изолирующих диагоналей, тангенс угла наклона которых равен  $\operatorname{tg} \gamma = h/L$ , где  $h$  — высота треугольников.

Нами был проведен эксперимент, моделирующий свойства диагонального ПЧД с помощью оптической щели, диагонально наложенной на границу раздела двух квадрантов четырехквадрантного ПЧД. Параметры этого модельного датчика приближены к требованию  $\operatorname{tg} \gamma = h/L$ . Оптическая щель шириной 1 mm располагалась на расстоянии 10 mm от поверхности ПЧД. Засветка производилась от рассеянного лазерного света с расстояния 1 m. Сканирование осуществлялось с помощью прецизионной наноподвижки с шагом  $10 \mu\text{m}$ . Сигнал регистрировался с помощью стандартного логарифмического усилителя фирмы Хамамацу с полосой пропускания  $\Delta F = 100 \text{ kHz}$  и обрабатывался 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем. На рис. 3 приведен график координатной характеристики устройства в виде отклонения результатов от прямой линии, соответствующей нулевой ошибке. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют высокую линейность координатной характеристики ПЧД, при которой точность регистрации положения сигнала определяется мощностью оптического сигнала и шумами усилительного тракта в заданной полосе частот.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Andersson H.* Position sensitive detectors — device technology and applications in spectroscopy. Ph.D. Thesis. Mid Sweden University, 2008. 92 p.
- [2] *Mäkynen A., Ruotsalainen T., Rahkonen T., Kostamovaara J.* // *Sensors Actuators A.* 2003. V. 105. N 3. P. 261–270.
- [3] *Podlaskin B.G., Guk E.G., Obolenskov A.G., Sukharev A.A.* // *JINST.* 2018. V. 13. N 8. P. P08005. DOI: 10.1088/1748-0221/13/08/P08005
- [4] *Fontani D., Sansoni P., Francini F., Jafrancesco D., Mercatelli L., Sani E.* // *Int. J. Photoenergy.* 2011. V. 2011. P. 806518 (1–9). DOI: 10.1155/2011/806518
- [5] *Shirinzadeh B.* // *Industrial Robot.* 1998. V. 25. N 1. P. 35–41.
- [6] *Roy B., Bera S.K., Mjndal A., Banerjee A.* A new technique for high sensitive detection of rotational motion in optical tweezers by a differential measurement of backscattered intensity // *Proc. of the SPIE. Optical trapping and optical micromanipulation XI.* San Diego, CA, USA, 2014. V. 9164. P. 916414 (1–6).
- [7] *Patent US6750953.* Publ. 2004.