УДК 535.421:53.043 EDN: ACMKJS

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ В ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ТАЛЬБОТА С ЛИНЕЙНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

А.Т. Гармаев a_garmayev@list.ru
В.Е. Стригалев vstrglv@mail.ru
А.С. Васильев a_s_vasilev@itmo.ru
В.Н. Кузнецов vtoes652@yandex.ru
Д.Е. Кукушкин dekukushkin@itmo.ru

НИУ ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация

Исследован метод опроса фотоприемного модуля в оптическом инкрементном преобразователе линейных перемещений открытого типа, основанный на использовании эффекта Тальбота. В качестве фотоприемного модуля использована линейная КМОП-матрица GL3504. Разработан метод формирования квадратурных сигналов с помощью выбора областей опроса, состоящих из таких групп пикселей, дистанция между областями опроса A_+^* и A_-^* которых кратна половине периода изображения кодирующей структуры и размеру пикселя матрицы. Такой подход позволил существенно снизить уровень периодической составляющей погрешности, характерной для инкрементных преобразователей перемещений. На базе теории скалярной дифракции построена модель распределения облученности в плоскости фотоприемного устройства и реализована цепь преобразования полученного перемещающегося изображения кодирующей структуры в сигналы устройства. Вычислена погрешность преобразования при использовании предложенного метода опроса фотоприемного модуля. Размах погрешности преобразования в компьютерной модели составляет 0,2 мкм. Проведены экспериментальные исследования с использованием лабораторного макета инкрементного преобразователя перемещений и стеклянной кодирующей структурой с периодом следования штрихов 40 мкм. Полученные резуль-

Ключевые слова

Дифракция, эффект Тальбота, оптические измерения, оптические преобразователи перемещений, квадратурные сигналы

таты подтверждают эффективность разработанной схемы опроса: размах периодической составляющей погрешности при реальных измерениях 0,3 мкм

Поступила 26.06.2025
Принята 17.08.2026
© Автор(ы), 2026

Введение. Инкрементные преобразователи перемещений открытого типа применяют в системах точного позиционирования, например, в станках с ЧПУ или робототехнике [1]. Такие преобразователи перемещений характеризуются отсутствием жестких механических креплений считывающей головки с кодирующей структурой, с которой считывается информация о перемещении [2]. В настоящий момент на российском рынке основным производителем преобразователей перемещений является ОАО «СКБ ИС» (Санкт-Петербург), выпускающее оптические преобразователи перемещений закрытого типа ЛИР-7В.01 и ЛИР-9В.01 с пределами допускаемой основной абсолютной погрешности ±3 мкм и 6,5 мкм на 1 м перемещения. В качестве преобразователей открытого типа приведены только магнитные преобразователи перемещений со специальной магнитной шкалой, которая уязвима перед электромагнитными помехами в условиях промышленного производства. Магнитные преобразователи перемещений также характеризуются меньшей разрешающей способностью по сравнению с другими преобразователями перемещений.

Наиболее перспективными преобразователями считаются оптические преобразователи перемещений вследствие высокой разрешающей способности и меньшей уязвимости к внешней среде. В инкрементных оптических преобразователях перемещений принцип действия основан на считывании кодирующей структуры и преобразовании ее перемещения в электрический сигнал [3]. Считывание реализуется с помощью системы фотоприемных датчиков, расположенных специальным образом относительно сформированного изображения кодирующей структуры или комбинационных полос в случае использования анализирующей структуры. Неточность расположения фотоприемников и искажения формы сигнала приводят к погрешности измерения оптического преобразователя. Такая погрешность имеет периодический характер и ее период кратен периоду структуры, из-за чего ее называют погрешностью разбиения шкалы или SDE (Sub-Divisional Error). Для снижения влияния SDE применяются различные методы: фильтрация цифрового сигнала [4], вычисление корректирующих коэффициентов методом исправления фигуры Лиссажу [5], использование линеаризованных алгоритмов преобразования перемещения [6, 7]. Применение полосовых фильтров значительно улучшает качество входных сигналов, уменьшая SDE, однако такое решение ограничивает максимально возмож-

ную скорость перемещения. Фильтр также вносит задержку в выдачу данных. Для исправления фигуры Лиссажу необходима предварительная калибровка, в ходе которой преобразователь перемещений проходит несколько периодов структуры. Алгоритмы линеаризации, напротив, способны преобразовывать перемещение в реальном времени, однако также имеют погрешность метода преобразования.

В настоящей работе приведены моделирование эффекта Тальбота в инкрементном оптическом преобразователе перемещений открытого типа, разработка метода опроса и моделирование работы алгоритма преобразования. Эффект Тальбота — явление, при котором возникает самоизображение кодирующей структуры [8]. Преимущество использования данного эффекта заключается в значительной глубине резкости самоизображения, что позволяет уменьшить погрешность позиционирования и увеличить устойчивость к вибрационным воздействиям, что актуально для преобразователей открытого типа [9, 10]. Актуальность исследований инкрементного оптического преобразователя перемещений открытого типа на основе эффекта Тальбота обусловлена высоким спросом и невысокой доступностью открытых преобразователей перемещений.

Цель настоящей работы — уменьшить периодическую составляющую погрешности в разрабатываемом оптическом преобразователе перемещений на основе эффекта Тальбота, формирующего самоизображение кодирующей структуры. В ходе работы выполнены следующие задачи: компьютерное моделирование эффекта Тальбота и оптической системы прибора; разработка алгоритма преобразования перемещений; реализация в экспериментальном макете и оценка периодической составляющей погрешности.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Эффект Тальбота возникает при дифракции в области Френеля, которая описана в рамках скалярной теории дифракции интегралом Кирхгофа — Зоммерфельда [11]. Рассмотрим плоский экран с амплитудной функцией пропускания $t(x_0, y_0)$, освещаемый когерентным монохроматическим источником с длиной волны λ. Толщина экрана пренебрежимо мала. $E_0(x_0, y_0)$ — распределение амплитуды поля непосредственно перед экраном. Тогда выражение для определения электрического поля в плоскости наблюдения, параллельного экрану, имеет вид

$$\mathrm{E}(x, y) = \frac{z}{i\lambda}\iint t(x_0, y_0)\mathrm{E}_0(x_0, y_0)\frac{\exp(ikr)}{r^2}d\sigma, \qquad (1)$$

где x, y, z — координаты в плоскости наблюдения; i — мнимая единица; x_0, y_0 — координаты в плоскости экрана; $\mathrm{E}_0(x_0, y_0)$ — распределение

амплитуды поля непосредственно перед экраном; k — модуль волнового вектора; r — расстояние между точками $(x_0, y_0, 0)$ и (x, y, z). Интеграл из (1) можно представить как свертку $\mathrm{E}'_0(x_0, y_0)$ с импульсной характеристикой:

$$\mathrm{E}(x, y) = \iint \mathrm{E}'_0(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0) dx_0 dy_0; \tag{2}$$

$$h(x, y) = \frac{z}{i\lambda} \frac{\exp\left(ik\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right)}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)}. \tag{3}$$

Здесь $\mathrm{E}'_0(x_0, y_0)$ — распределение поля сразу после периодической структуры. Применив теорему о свертке, можно записать выражения (2) и (3) так:

$$\mathrm{E}(x, y) = F^{-1}\left\{F\left\{\mathrm{E}'_0(x_0, y_0)\right\} H(f_X, f_Y)\right\}; \tag{4}$$

$$H(f_X, f_Y) = \exp\left(ikz\sqrt{1 - (\lambda f_X)^2 - (\lambda f_Y)^2}\right), \tag{5}$$

где $F\{\cdot\}$ — преобразование Фурье; $H(f_X, f_Y)$ — передаточная функция; (f_X, f_Y) — пространственные частоты вдоль X и Y. Такой подход позволяет значительно сократить вычислительные ресурсы при моделировании распространения излучения [12].

С помощью формул (4), (5) можно смоделировать эффект Тальбота на кодирующей структуре инкрементного преобразователя перемещений, которая фактически является амплитудной дифракционной решеткой, представляющей собой меандр, который принимает значения от нуля до единицы. Период дифракционной решетки P = 40 мкм. На дифракционную решетку падает плоский монохроматический волновой фронт с длиной волны λ = 520 нм. Скриншот картины распределения интенсивности после амплитудной дифракционной решетки в результате моделирования с вышеуказанными параметрами приведен на рис. 1.

Самоизображения кодирующей структуры возникают на расстоянии Тальбота Z_T, при котором наблюдается максимальный контраст изображения [13]:

$$Z_\mathrm{T} = \frac{mP^2}{\lambda}, \tag{6}$$

m = 1, 2, …, ∞. При нечетных m самоизображение кодирующей структуры смещается на половину периода. При параметрах P = 40 мкм, λ = 520 нм, m = 1, расстояние Тальбота Z_T = 3,07 мм (см. рис. 1).

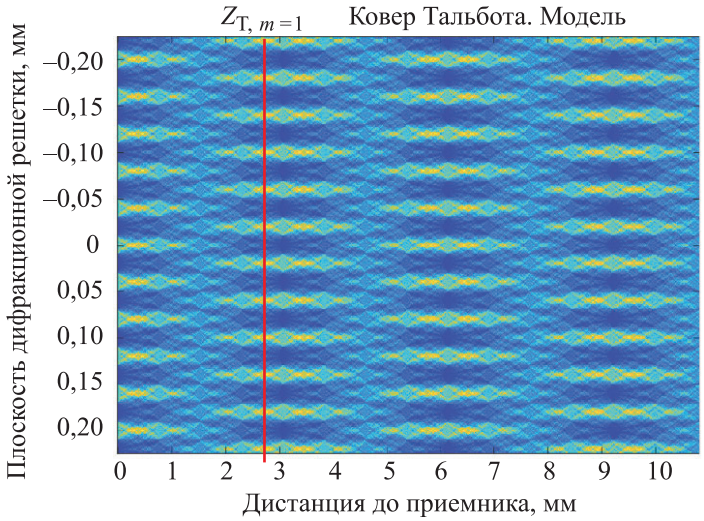


Рис. 1. Скриншот картины распределения интенсивности после амплитудной дифракционной решетки в результате моделирования (P = 40 мкм, λ = 520 нм)

Оптическая система разрабатываемого преобразователя перемещений состоит из полупроводникового лазера, стеклянной кодирующей структуры, приемника оптического излучения и КМОП-матрицы (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor — комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) (рис. 2).

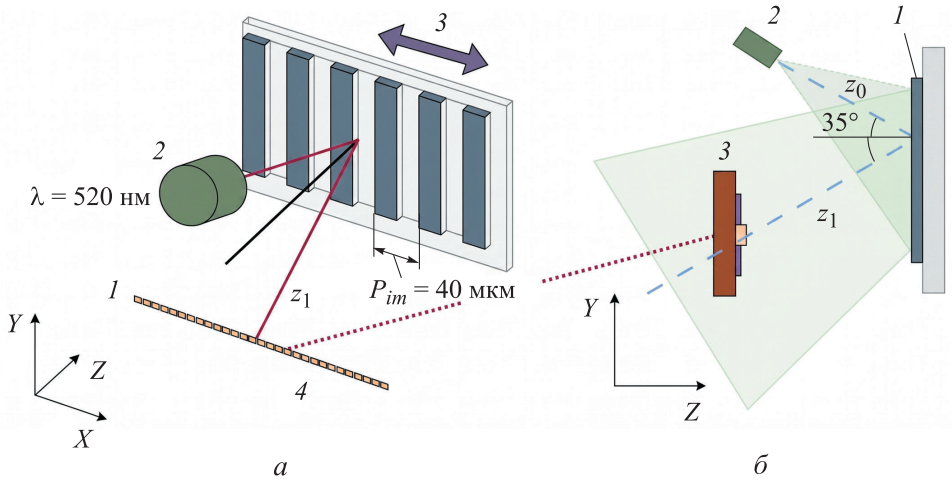


Рис. 2. Оптическая система разрабатываемого преобразователя перемещений:
а — в изометрии (*1* — КМОП-матрица; *2* — лазерный диод;
3 — кодирующая структура на стеклянной подложке; *4* — пиксели);
б — в плоскости *Y*–*Z* (*1* — штрихструктура; *2* — лазерный диод;
3 — КМОП-фотоприемник)

Преимущество данной схемы заключается в минимальном использовании оптических элементов, что положительно сказывается на требованиях к сборке и установке прибора. Однако для искривленного волнового фронта расстояния Тальбота и период самоизображения изменятся. Для лазерных источников на расстояниях много больших чем расстояние Рэлея волновой фронт можно считать сферическим [14]. Тогда увеличение периода и положения плоскостей самоизображений можно вычислить следующим образом [15]:

$$V = \frac{z_0 + z_1}{z_0}; \tag{7}$$

$$\frac{1}{\overline{Z}_{\mathrm{T}}} = \frac{1}{Z_{\mathrm{T}}} - \frac{1}{z_0}, \tag{8}$$

где V — коэффициент увеличения периода структуры; z_0 — расстояние от источника освещения до кодирующей структуры; z_1 — расстояние после кодирующей структуры; $\overline{Z}_{\mathrm{T}}$ — расстояние до плоскости Тальбота.

В оптической системе используется одномодовый лазерный диод GH0521DE2G с центральной длиной волны $\lambda = 520$ нм. Согласно паспорту, его угловая расходимость по двум осям равна $\theta_X = 22°$, $\theta_Y = 8°$.

В качестве фотоприемного устройства в составе считываемой головки используется высокоскоростной линейный КМОП-фотоприемник (линейная матрица GL3504 mono) с периодом следования пикселей $\Delta x = 3{,}5$ мкм. Максимальная кадровая частота достигает 172 кГц. Данные с фотоприемного устройства передаются на программируемую логическую интегральную схему, в которой происходит последующая обработка и формирование сигналов перемещения.

Вычисление перемещения реализовано на основе арктангенсного алгоритма [16]. Регулярно опрашивая четыре сформированные области пикселей на линейном фотоприемнике, формируются четыре сигнала (A_+, B_+, A_-, B_-) со смещением по фазе на четверть периода относительно друг друга. Синусоидальные зависимости сигналов фотоприемников при перемещении кодирующей структуры с постоянной скоростью и схема расположения областей опроса $A = A_+ - A_-, B = B_+ - B_-$ приведены на рис. 3.

Смещение по фазе достигается пространственным размещением областей опроса таким образом, чтобы расстояние между ними было равно четверти периода изображения кодирующей структуры P_{im}. Вычитая из A_+ сигнал A_- и из B_+ сигнал B_-, получаем два сигнала A и B, сме-

щенных по фазе относительно друг друга на $\pi/2$. Такие сигналы называют квадратурными [17]. Тогда искомую фазу можно найти по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left[\frac{A}{B}\right]. \tag{9}$$

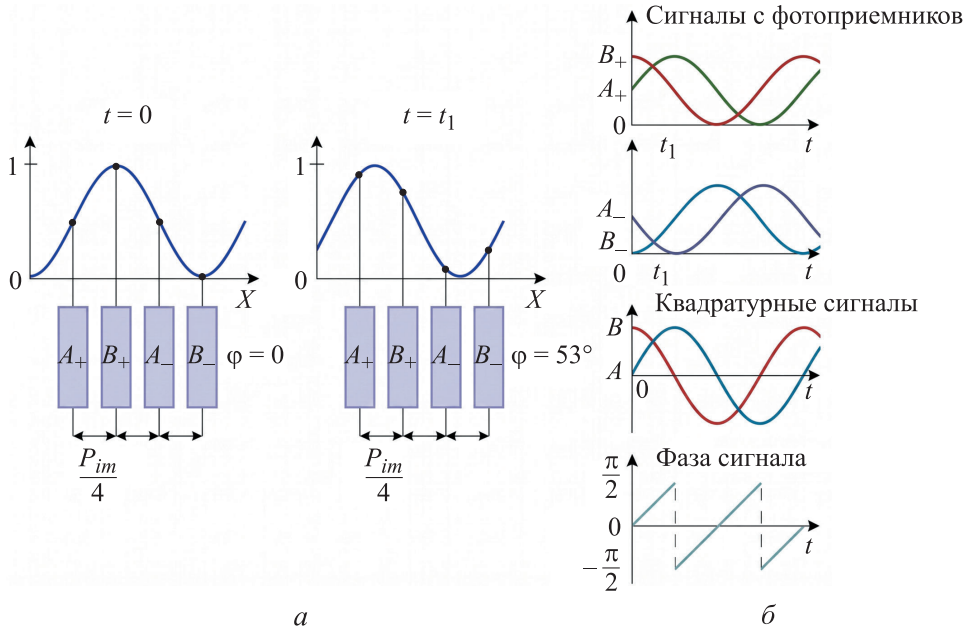


Рис. 3. Синусоидальные зависимости сигналов фотоприемников при перемещении кодирующей структуры с постоянной скоростью (*а*) и схема расположения областей опроса $A = A_+ - A_-$, $B = B_+ - B_-$ (*б*)

Поскольку математическая функция арктангенса принимает значения $(-\pi/2;\ \pi/2)$, при перемещении на один период кодирующей структуры будет сформировано два периода сигнала арктангенса. Чтобы доопределить арктангенс в диапазонах $(-\pi;\ \pi]$ используется функция atan2 [18]. Перемещение в устройстве преобразуется по формуле

$$x = P\left(\frac{\varphi}{2\pi} + N\right), \tag{10}$$

где N — целое число пройденных периодов, которое подсчитывается с помощью реверсивного счетчика, срабатывающего на перепаде фазы [19].

Для определения фазы необходимо опрашивать пиксели приемника, находящиеся строго на расстоянии четверти периода изображения, однако несоответствие расположения опрашиваемых пикселей будет вносить

погрешность определения фазы, что приведет к возрастанию периодической составляющей погрешности [20].

Результаты. Проведено моделирование распределения облученности лазерным диодом на дистанции 11 мм. Угол падения излучения на плоскость кодирующей структуры составляет 35°. Выбор расстояния обусловлен формулой (8) и ограничениями конструкции макета. Скриншоты результатов моделирования источника, картины распределения облученности на пропускание при освещении лазерным диодом приведены на рис. 4.

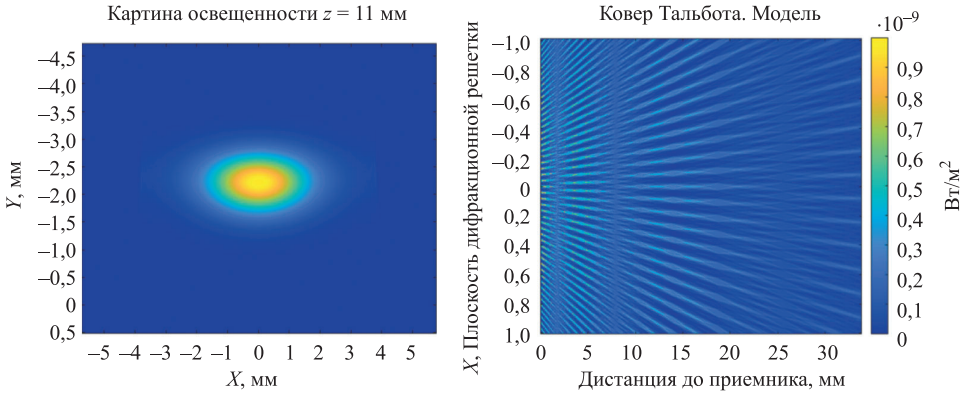


Рис. 4. Скриншоты результатов моделирования источника и картины распределения облученности на пропускание при освещении лазерным диодом:

а — облученность измерительной шкалы лазерным диодом GH0521DE2G, λ = 520 нм; *б* — распределение облученности вдоль оси X в зависимости от расстояния до плоскости наблюдения при освещении кодирующей структуры лазерным диодом GH0521DE2G

В результате моделирования картины освещенности после кодирующей структуры выявлено, что увеличение периода изображения штрихов линейно возрастает с увеличением расстояния от плоскости кодирующей структуры до приемника, что соотносится с выражением (7). Так, для z_0 = 11 мм и z = 14 мм V = 2,27 период штрихов на изображении P_{im} = = 90,9 мкм. Для второго расстояния Тальбота, согласно (8), $\overline{Z}_{\text{T}}$ = 13,96 мм.

С помощью MATLAB (R2021a) реализован алгоритм детектирования фазы с преобразованием в линейное перемещение. Для уменьшения периодической составляющей погрешности предложен следующий метод. Устройство использует четыре области матрицы $A^*_+, B^*_+, A^*_-, B^*_-$ (аналогично схемам на рис. 3). При равномерном перемещении изображения коди-

рующей структуры из этих областей формируются четыре периодических сигнала. В таком случае основные гармоники сигналов будут иметь циклическую частоту ω, которая зависит от скорости движения:

$$\begin{aligned} A_+^* &= U\sin(\omega t + \varphi_0); \\ B_+^* &= U\sin(\omega t + \Delta\varphi + \varphi_0); \\ A_-^* &= U\sin(\omega t + \psi + \varphi_0); \\ B_-^* &= U\sin(\omega t + \Delta\varphi + \psi + \varphi_0). \end{aligned} \tag{11}$$

Области A_+^* и B_+^* расположены на расстоянии $l\Delta x$, что соответствует смещению по фазе $\Delta\varphi = 2\pi/(P_{im} l\Delta x)$ (l — целое число пикселей). Сигналы A_+^* и B_+^* будут иметь соответствующую разность фаз; U — амплитуда сигнала; ψ — разность фаз между сигналами A_+^* и A_-^*; φ_0 — неизвестная начальная фаза. Между сигналами A_-^* и B_-^* разность фаз также равна $\Delta\varphi$. Для формирования квадратурных сигналов необходимо найти расстояние в пикселях от A_+^* до A_-^*, соответствующее фазе, кратной π:

$$\psi = \frac{2\pi}{P_{im}} \Delta x l' = (2k-1)\pi, \tag{12}$$

l' — число пикселей между A_+^* и A_-^*. Тогда при определении l' получим

$$\begin{aligned} A^* &= A_+^* - A_-^* = 2U\sin\left(\omega t + \varphi_0\right); \\ B^* &= B_+^* - B_-^* = 2U\sin\left(\omega t + \Delta\varphi + \varphi_0\right). \end{aligned} \tag{13}$$

Применяя тригонометрическую формулу синуса суммы двух аргументов, можно выделить сигнал, смещенный на $\pi/2$ относительно A^*:

$$2U\cos(\omega t + \varphi_0) = \frac{B^* - A^*\cos(\Delta\varphi)}{\sin(\Delta\varphi)}. \tag{14}$$

Для улучшения формы квадратурных сигналов ширина областей опроса A_+^*, B_+^*, A_-^*, B_-^* приближена к трети периода изображения. Такой размер области опроса обеспечивает фильтрацию третьей гармоники, которая оказывает негативное влияние на алгоритм преобразования [21] в пространственном спектре изображения. Скриншоты примера расположения областей опроса с фотоприемника GL3504 относительно изображения измерительной шкалы, диаграмм сигналов от каждой области опроса и сформированных квадратурных сигналов приведены на рис. 5.

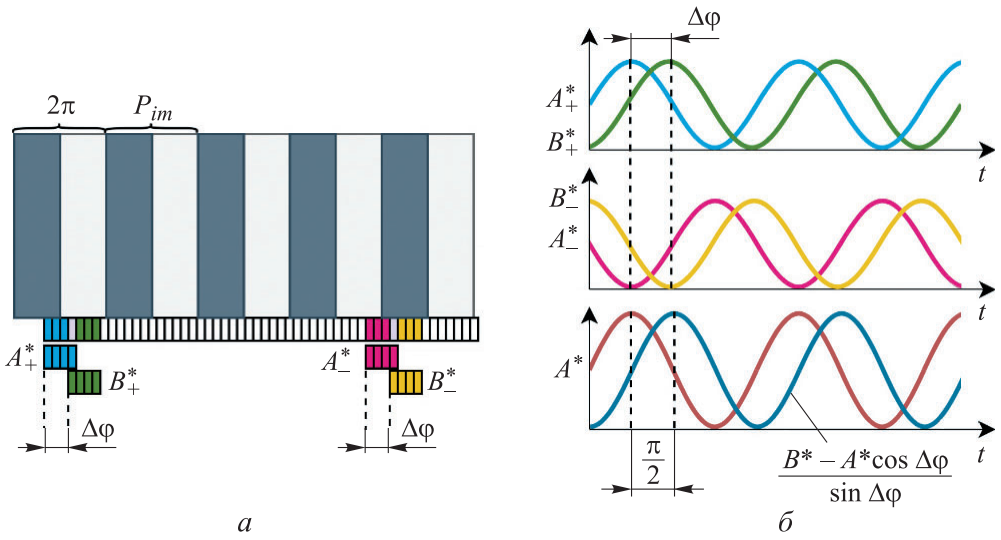


Рис. 5. Скриншоты примера расположения областей опроса с фотоприемника GL3504 относительно изображения измерительной шкалы (*а*) и диаграмм сигналов от каждой области опроса и сформированных квадратурных сигналов (*б*)

Отметим, что исходя из формулы (12) период изображения должен быть кратен размеру пикселя, чтобы добиться кратности, можно изменять коэффициент увеличения, изменяя расстояние до источника или приемника. Пусть P_{im} = 91 мкм, тогда l' = 13 пикселей, V = 2,275, z_0 = 10,98 мм, z = 14 мм. Выберем l' = 5 и сравним предложенную схему опроса со стандартным вариантом, при котором четыре области опроса равноудалены относительно друг друга на расстояние четверти периода изображения. Для оценки погрешности преобразования описанного метода реализовано моделирование равномерного перемещения кодирующей структуры на основе построенной ранее модели распределения облученности. Дистанция перемещения структуры составила 240 мкм или шесть периодов кодирующей структуры. Результаты моделирования приведены на рис. 6. Сформированные предложенным методом опроса квадратурные сигналы приведены на рис. 6, *а*, результаты вычисления погрешности преобразования и сравнение со стандартным методом опроса — на рис. 6, *б*.

Размах погрешности преобразования составил 0,2 мкм против 0,5 мкм у стандартного метода опроса квадратурных сигналов.

Для оценки точностных характеристик разрабатываемого прибора собран макет преобразователя перемещений и экспериментальный стенд (рис. 7).

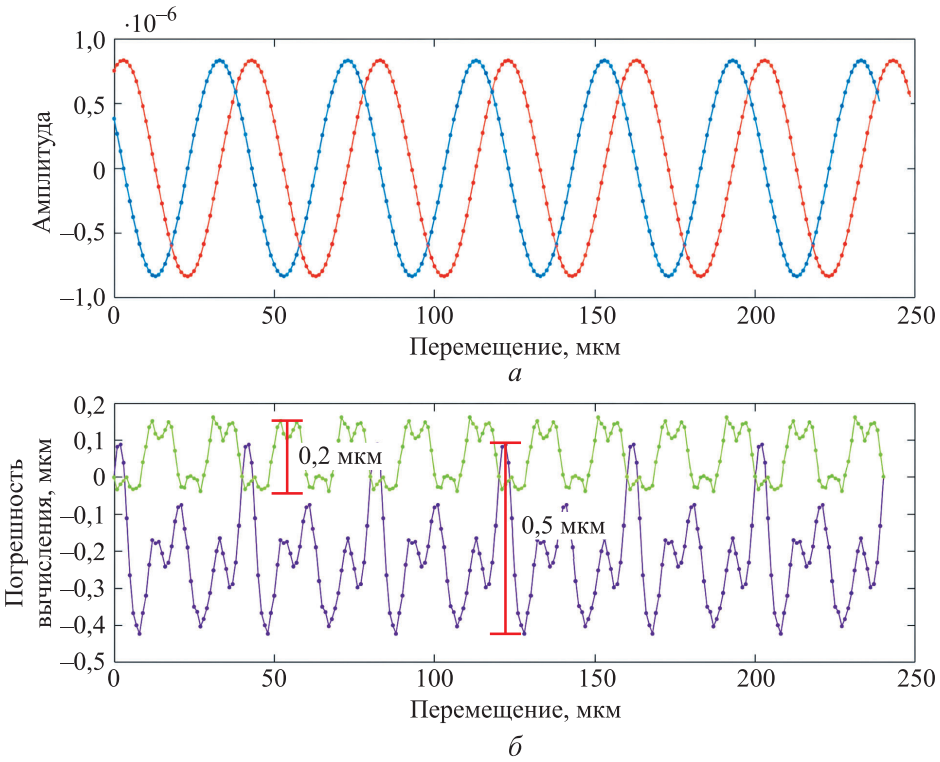


Рис. 6. Результат работы алгоритма:
а — квадратурные сигналы (—, — sin, cos); *б* — погрешность вычисления по стандартному (—) и предложенному (—) методам опроса

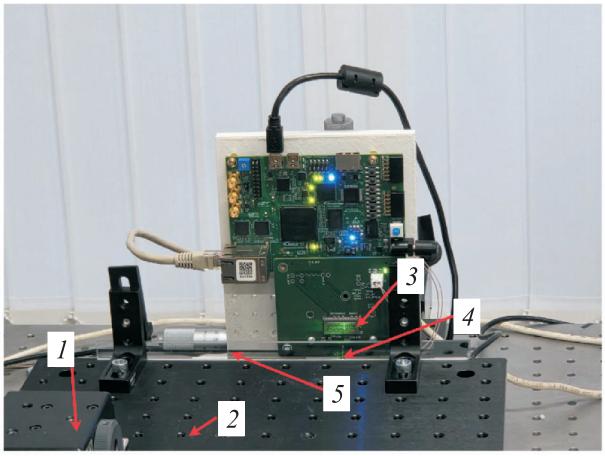


Рис. 7. Экспериментальный стенд для работы с макетом оптического преобразователя перемещений:
1 — API XD6 Laser Interferometr; *2* — Standa 8MT295X-520-2.5; *3* — GL3504 mono; *4* — GY0521DE2G; *5* — кодирующая структура, период 40 мкм (ОАО «СКБ ИС»)

Эксперимент состоял из перемещения считывающей головки оптического преобразователя относительно кодирующей структуры на расстояние 15 мм и записи сигнала, приходящего на матрицу. Перемещение осуществлялось с помощью линейного транслятора Standa 8MT295X-520-2.5 с шагом 10 мкм, после чего происходил захват кадра и фиксировалось текущее положение по эталонному средству измерения — интерферометру API XD6 Laser Interferometer (API, США). Снятие данных происходило в двух направлениях движения. Таким образом, получено шесть серий измерений. Эксперимент проводился двумя методами обработки. Усредненная периодическая составляющая погрешности измерений перемещения макета оптического преобразователя перемещений приведена на рис. 8.

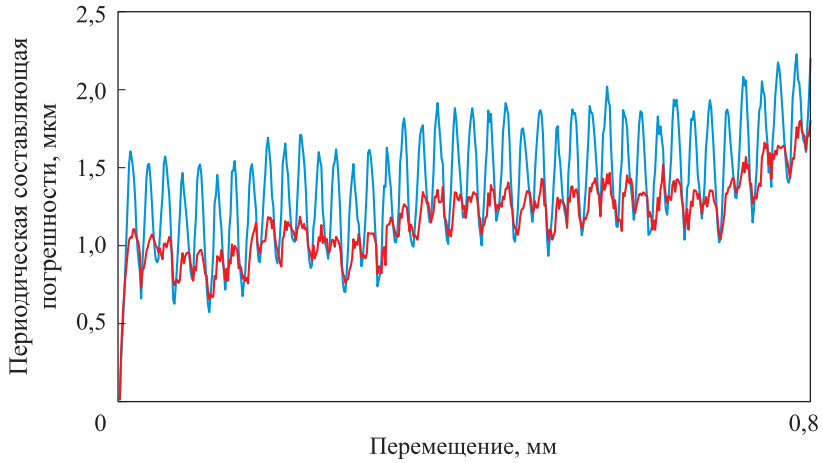


Рис. 8. Усредненная периодическая составляющая погрешности измерений перемещения макета оптического преобразователя перемещений по стандартному (—) и предложенному (—) методам опроса

Согласно рис. 8, предложенный метод уменьшает периодическую составляющую погрешности на 0,7 мкм от 1,0 мкм до 0,3 мкм.

Обсуждение результатов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем позиционирования для станков с ЧПУ, робототехнических комплексов и оборудования, которому необходимы повышенные требования к точности измерения перемещений. Предложенный метод можно применять для модернизации существующих оптических преобразователей перемещений.

Фрагмент усредненной абсолютной погрешности перемещения макета относительно показаний интерферометра приведен на рис. 8 — небольшой участок графика не отражает погрешности, обусловленные конструкцией экспериментального стенда.

Моделирование с целью упростить расчетную схему проводилось в приближении проходящих лучей, несмотря на то, что в реальной оптической системе периодическая структура работает в отраженном свете. В рамках принятых допущений такое приближение не оказывает существенного влияния на характер проявления эффекта Тальбота. Однако в реальных оптических системах следует учитывать снижение контрастности изображения кодирующей структуры, обусловленное частичным отражением излучения от поверхности стеклянной подложки. Как видно на рис. 4, *б*, при освещении кодирующей структуры сферическим волновым фронтом плоскости Тальбота приобретают искривленную форму, приближенную к сферической. В результате наблюдается пространственная неоднородность периода изображения в плоскости регистрации: период изменяется от центра к краям фотоприемного устройства. При моделировании разность между значением периода в центральной и краевой областях составила 5 мкм. В условиях эксперимента количественная оценка данного эффекта затруднена из-за ограничения разрешающей способности, связанного с фиксированным размером пикселя фотоприемного устройства.

Для изображения периодической структуры с фиксированным периодом всегда может быть выбрана область опроса, при которой периодическая составляющая погрешности будет минимальна. Предложенный метод позволяет снизить периодическую составляющую погрешности для преобразователей перемещений, использующих многоэлементные фотоприемники для формирования сигналов. При вычислении результата применяется только линейная комбинация сигналов, полученная из заранее сформированных областей опроса, что обеспечивает простоту вычислений.

Предложенный метод оптического считывания имеет ряд ограничений. В частности, в формуле (12) $l' \sim \Delta x / P_{im}$ должна принимать целочисленные значения. Нарушение этого условия ведет к изменению фазового смещения между сигналами A и B, что в свою очередь приводит к росту погрешностей определения фазы и перемещения. Для обеспечения требуемого P_{im} необходимо точно подобрать увеличение оптической системы, которое зависит от расстояния между кодирующей структурой и плоскостью регистрации. Изменение этого расстояния ухудшает согласование с приемником. Также метод чувствителен к изменению длины волны источника излучения. Качество формируемых квадратурных сигналов зависит от выбора ширины областей опроса, предлагаемая ширина приблизительно равна трети периода изображения, однако при изменении периода изображения эффективность фильтрации может снижаться. Для достижения

высокой точности измерений необходимо соблюдать стабильность геометрических параметров фотоприемного устройства, а также размер пикселя должен быть много меньше периода штрихов в самоизображении.

Полученные результаты соотносятся с характеристиками ведущих зарубежных аналогов из класса инкрементных оптических преобразователей перемещений открытого типа. Модель LIDA473 (Германия), работающая с измерительной шкалой с периодом 20 мкм и максимальной длиной до 3 м, имеет погрешность ±5 мкм/м. Модель Quantic (Великобритания), работающая с измерительной шкалой RTLC40 с периодом 40 мкм и максимальной длиной до 10 м, имеет погрешность ±5 мкм/м. Текущая реализация макета преобразователя уступает рассмотренным аналогам по показателям скорости и интерполяционной погрешности. Вместе с тем достигнутые на данном этапе результаты позволяют предположить, что дальнейшее усовершенствование позволит достичь лучших метрологических характеристик.

Дальнейшее направление настоящей работы связано с улучшением фильтрации гармоник высших порядков — третьей, пятой и выше. С помощью взвешенного суммирования внутри областей опроса можно реализовать фильтр, способный убрать гармоники высших порядков и уменьшить периодическую составляющую погрешности.

Заключение. Проведено компьютерное моделирование оптической схемы инкрементного преобразователя линейных перемещений открытого типа на основе эффекта Тальбота. Предложен метод опроса фотоприемного устройства (GL3504), заключающийся в правильном выборе областей опроса для выделения квадратурных сигналов в арктангенсном алгоритме, который способствует уменьшению периодической составляющей погрешности по сравнению с классическим методом опроса с равноудаленными областями. По результатам моделирования перемещения размах периодической составляющей погрешности составил 0,2 мкм против 0,5 мкм у стандартного метода опроса. Собран макет оптического инкрементного преобразователя перемещений и проведены измерения перемещения двумя методами опроса. В результате экспериментов выявлено, что предложенный метод уменьшает в 3 раза размах периодической составляющей погрешности по сравнению со стандартным методом опроса.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yu H., Chen X., Liu C., et al. A survey on the grating based optical position encoder. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 143, art. 107352.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352

[2] Zhao J., Ou W., Cai N., et al. Measurement error analysis and compensation for optical encoders: a review. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2024, vol. 73, art. 1006230. DOI: https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3417589

[3] Жердев А.Ю., Ковалев М.С., Шишова М.В. и др. Настройка фазового сдвига измерительных сигналов в оптическом энкодере по параметрам анализирующей шкалы. *Измерительная техника*, 2019, т. 62, № 6, с. 31–36. DOI: https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-6-31-36

[4] Zhao G., Ban Y., Zhang Z., et al. Improving the interpolation accuracy of optical encoders via noise suppression and signal correction. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2024, vol. 368, art. 115122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115122

[5] Heydemann P.L.M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. *Appl. Opt.*, 1981, vol. 20, no. 19, pp. 3382–3384. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.20.003382

[6] Ye G., Wu Z., Xu Z., et al. Development of a digital interpolation module for high-resolution sinusoidal encoders. *Sens. Actuators A: Phys.*, 2019, vol. 285, pp. 501–510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.021

[7] Ye G., Liu H., Wang Y., et al. Ratiometric-linearization-based high-precision electronic interpolator for sinusoidal optical encoders. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2018, vol. 65, no. 10, p. 8224–8231. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2798568

[8] Patorski K. I the self-imaging phenomenon and its applications. In: *Progress in optics*. Vol. 27. Elsevier, 1989, pp. 1–108. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70084-2

[9] Ye G., Liu H., Fan S., et al. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders. *Opt. Commun.*, 2015, vol. 354, pp. 21–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023

[10] Lu X., Kilikevičius A., Yang F., et al. A method to improve mounting tolerance of open-type optical linear encoder. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 4, art. 1987. DOI: https://doi.org/10.3390/s23041987

[11] Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. Greenwood Village, Roberts and Company, 2005.

[12] Voelz D.G. Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial. Bellingham, SPIE, 2011.

[13] Milla F.J.T. Rough diffraction gratings: applications to linear optical encoders. Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 2009.

[14] Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. Norwood, Artech house, 2014.

[15] Tepichin-Rodriguez E., Rodríguez-Montero P., Muñoz-Potosi A.F., et al. Talbot effect based tunable setup for the measurement of stepped surfaces: plane and spherical wavefront illumination. *Opt. Commun.*, 2020, vol. 473, art. 126044. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126044

[16] Кирьянов В.П., Кирьянов А.В. Повышение точности угловых измерений с помощью фотоэлектрических преобразователей комбинированного типа. *Автометрия*, 2012, т. 48, № 6, с. 84–91.

[17] Cosijns S.J., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers. In: *Smart sensors and MEMS*. Woodhead Publ., 2018, pp. 245–290. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3

[18] De Dinechin F., Istoan M. Hardware implementations of fixed-point Atan2. *IEEE 22nd ARITH*, 2015, pp. 34–41. DOI: https://doi.org/10.1109/ARITH.2015.23

[19] Benammar M., Khattab A., Saleh S., et al. A sinusoidal encoder-to-digital converter based on an improved tangent method. *IEEE Sens. J.*, 2017, vol. 17, no. 16, pp. 5169–5179. DOI: https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2723619

[20] Sanchez-Brea L.M., Morlanes T. Metrological errors in optical encoders. *Meas. Sc. Technol.*, 2008, vol. 19, no. 11, art. 115104.
DOI: https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/11/115104

[21] Ye G., Liu H., Ban Y., et al. Development of a reflective optical encoder with submicron accuracy. *Opt. Commun.*, 2018, vol. 411, pp. 126–132.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.10.032

Гармаев Аюр Тумэнович — аспирант, инженер НИЦ СФ института «Высшая инженерно-техническая школа» НИУ ИТМО (Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А).

Стригалев Владимир Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НИЦ СФ института «Высшая инженерно-техническая школа» НИУ ИТМО (Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А).

Васильев Александр Сергеевич — канд. техн. наук, научный сотрудник НИЦ СФ института «Высшая инженерно-техническая школа» НИУ ИТМО (Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А).

Кузнецов Владимир Николаевич — аспирант, инженер НИЦ СФ института «Высшая инженерно-техническая школа» НИУ ИТМО (Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А).

Кукушкин Дмитрий Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент института «Высшая инженерно-техническая школа» НИУ ИТМО (Российская Федерация, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр-т, д. 49, лит. А).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гармаев А.Т., Стригалев В.Е., Васильев А.С. и др. Метод уменьшения погрешности в оптическом преобразователе перемещений на основе эффекта Тальбота с линейным фотоприемником. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 3 (156), с. 28–46. EDN: ACMKJS

METHOD OF ERROR REDUCTION IN AN OPTICAL ENCODER BASED ON THE TALBOT EFFECT WITH A LINEAR PHOTODETECTOR

A.T. Garmaev a_garmayev@list.ru
V.E. Strigalev vstrglv@mail.ru
A.S. Vasilev a_s_vasilev@itmo.ru
V.N. Kuznetsov vtoes652@yandex.ru
D.E. Kukushkin dekukushkin@itmo.ru

ITMO, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

The article examines the method of interrogating a photodetector scanning module in an open-type optical incremental linear displacement encoder based on the Talbot effect. The GL3504 linear CMOS array is used as the photodetector module. A method for generating quadrature signals is being developed by selecting sampling regions consisting of groups of pixels, the distance between the sampling regions A_+^* and A_-^* which is a multiple of half the period of the encoded structure image and the size of the sensor's pixel. This approach has significantly reduced the level of the periodic error component, which is typical for incremental displacement encoders. Based on scalar diffraction theory, a model of the irradiance distribution in the plane of the photodetector device is constructed, and a signal conversion the resulting moving image of the encoding structure into device signals is implemented. The conversion error is calculated when using the proposed scanning method of the photodetector module. The error amplitude in the computer model amounted to 0.2 μm. Experimental studies are being conducted using a laboratory prototype of an incremental displacement encoder and a glass encoding structure with a grating pitch of 40 μm. The obtained results confirm the effectiveness of the developed scanning scheme: the amplitude of the periodic error component in real measurements was 0.3 μm

Keywords

Diffraction, Talbot effect, optical measurements, optical displacement transducers, quadrature signals

Received 26.06.2025
Accepted 17.08.2026
© Author(s), 2026

REFERENCES

[1] Yu H., Chen X., Liu C., et al. A survey on the grating based optical position encoder. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 143, art. 107352.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107352

[2] Zhao J., Ou W., Cai N., et al. Measurement error analysis and compensation for optical encoders: a review. *IEEE Trans. Instrum. Meas*., 2024, vol. 73, art. 1006230. DOI: https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3417589

[3] Zherdev A.Yu., Kovalev M.S., Shishova M.V., et al. Adjustment of phase shift of measurement signals in an optical encoder from the parameters of an analyzing scale. *Meas. Tech*., 2019, vol. 62, no. 6, pp. 511–518. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-019-01654-6

[4] Zhao G., Ban Y., Zhang Z., et al. Improving the interpolation accuracy of optical encoders via noise suppression and signal correction. *Sens. Actuators A: Phys*., 2024, vol. 368, art. 115122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115122

[5] Heydemann P.L.M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers. *Appl. Opt*., 1981, vol. 20, no. 19, pp. 3382–3384. DOI: https://doi.org/10.1364/AO.20.003382

[6] Ye G., Wu Z., Xu Z., et al. Development of a digital interpolation module for high-resolution sinusoidal encoders. *Sens. Actuators A: Phys*., 2019, vol. 285, pp. 501–510. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.11.021

[7] Ye G., Liu H., Wang Y., et al. Ratiometric-linearization-based high-precision electronic interpolator for sinusoidal optical encoders. *IEEE Trans. Ind. Electron*., 2018, vol. 65, no. 10, p. 8224–8231. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2798568

[8] Patorski K. I the self-imaging phenomenon and its applications. In: *Progress in optics*. Vol. 27. Elsevier, 1989, pp. 1–108. DOI: https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70084-2

[9] Ye G., Liu H., Fan S., et al. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders. *Opt. Commun*., 2015, vol. 354, pp. 21–27. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.05.023

[10] Lu X., Kilikevičius A., Yang F., et al. A method to improve mounting tolerance of open-type optical linear encoder. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 4, art. 1987. DOI: https://doi.org/10.3390/s23041987

[11] Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. Greenwood Village, Roberts and Company, 2005.

[12] Voelz D.G. Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial. Bellingham, SPIE, 2011.

[13] Milla F.J.T. Rough diffraction gratings: applications to linear optical encoders. Madrid, Universidad Complutense de Madrid, 2009.

[14] Lefevre H.C. The fiber-optic gyroscope. Norwood, Artech house, 2014.

[15] Tepichin-Rodriguez E., Rodríguez-Montero P., Muñoz-Potosi A.F., et al. Talbot effect based tunable setup for the measurement of stepped surfaces: plane and spherical wavefront illumination. *Opt. Commun*., 2020, vol. 473, art. 126044. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126044

[16] Kiryanov V.P., Kiryanov A.V. Increasing of accuracy of angular measurements by using hybrid photoelectric converters. *Optoelectron. Instrument. Proc*., 2012, vol. 48, no. 6, pp. 605–611. DOI: https://doi.org/10.3103/S8756699012060088

[17] Cosijns S.J., Jansen M.J., Haitjema H. Advanced optical incremental sensors: encoders and interferometers. In: *Smart sensors and MEMS*. Woodhead Publ., 2018, pp. 245–290. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102055-5.00010-3

[18] De Dinechin F., Istoan M. Hardware implementations of fixed-point Atan2. *IEEE 22 ARITH*, 2015, pp. 34–41. DOI: https://doi.org/10.1109/ARITH.2015.23

[19] Benammar M., Khattab A., Saleh S., et al. A sinusoidal encoder-to-digital converter based on an improved tangent method. *IEEE Sens. J.*, 2017, vol. 17, no. 16, pp. 5169–5179. DOI: https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2723619

[20] Sanchez-Brea L.M., Morlanes T. Metrological errors in optical encoders. *Meas. Sc. Technol.*, 2008, vol. 19, no. 11, art. 115104.
DOI: https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/11/115104

[21] Ye G., Liu H., Ban Y., et al. Development of a reflective optical encoder with submicron accuracy. *Opt. Commun.*, 2018, vol. 411, pp. 126–132.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.10.032

Garmaev A.T. — Post-Graduate Student, Engineer, Research Center of Light-Guided Photonics, Higher School of Engineering and Technology, ITMO (Kronverkskiy prospekt 49, lit. A, St. Petersburg, 197101 Russian Federation).

Strigalev V.E. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research, Research Center of Light-Guided Photonics, Higher School of Engineering and Technology, ITMO (Kronverkskiy prospekt 49, lit. A, St. Petersburg, 197101 Russian Federation).

Vasilev A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Research, Research Center of Light-Guided Photonics, Higher School of Engineering and Technology, ITMO (Kronverkskiy prospekt 49, lit. A, St. Petersburg, 197101 Russian Federation).

Kuznetsov V.N. — Post-Graduate Student, Engineer, Research Center of Light-Guided Photonics, Higher School of Engineering and Technology, ITMO (Kronverkskiy prospekt 49, lit. A, St. Petersburg, 197101 Russian Federation).

Kukushkin D.E. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Higher School of Engineering and Technology, ITMO (Kronverkskiy prospekt 49, lit. A, St. Petersburg, 197101 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Garmaev A.T., Strigalev V.E., Vasilev A.S., et al. Method of error reduction in an optical encoder based on the Talbot effect with a linear photodetector. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 3 (156), pp. 28–46 (in Russ.). EDN: ACMKJS