

УДК 535.44

*Г. Пашкевич, А. Шиховец, А. Ланчук,
А. Крючин, А. Богдан*

МИНИМИЗАЦИЯ СПЕКЛОВ В ЛАЗЕРНЫХ ПРОЕКТОРАХ ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ КОДА БАРКЕРА ИЛИ M-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В работе представлены результаты экспериментальных измерений эффективности подавления спекла при использовании предложенного авторами метода, основанного на линейном перемещении дифракционных элементов, созданных на базе 2D кода Баркера. Описана разработанная экспериментальная оптическая установка и использованные в работе оптические параметры. В эксперименте получены значения контраста спеклов C в пределах 4,4–5,3% и коэффициент подавления спеклов (коэффициент понижения контраста спеклов) $K > 8$. Однако экспериментально полученный коэффициент подавления спеклов примерно в 1,5 раза меньше, чем теоретически предсказанное значение. По мнению авторов, расхождение теоретических и экспериментальных данных происходит из-за неточного соответствия между оптимальными для подавления спеклов значениями параметров оптической установки и реальными, используемыми в эксперименте, параметрами метода. Анализ экспериментальных данных показывает, что реализация оптической установки с оптимальными параметрами позволит получить подавление спекловых шумов до уровня, близкого к предсказанному теорией.

Введение

Использование лазерного освещения в системах создания изображения позволяет получить малогабаритные устройства, обладающие большой оптической эффективностью и создающие изображение с высокой насыщенностью цвета. Таким образом, это оптимальное решение для многих оптических приборов [1–7]. Тем не менее, качество изображения, созданное с использованием лазерного излучения, сильно страдает из-за гранулированной модуляции интенсивности освещения, вызванной спеклами [8]. Спекл-шумы являются основным фактором, сдерживающим широкое внедрение лазерного освещения в технических устройствах [7–8]. Контраст спеклов C , который определяет глубину модуляции интенсивности света, обусловленную спеклами, является наиболее важным параметром для спеклов

$$C = \sigma_I / \langle I \rangle, \quad (1)$$

где σ_I и $\langle I \rangle$ стандартное отклонение и средняя интенсивность света на экране соответственно. Методы подавления спеклов основаны на усреднении спекловых шумов с использованием разнообразных длин волн, углов падения и поляризации лазерного излучения.

Одним из наиболее эффективных методов механизма подавления спеклов является усреднение, основанное на вибрации диффузора или специально изготовленного периодического дифракционного оптического элемента [9–17]. В предыдущих публикациях авторами был предложен метод подавления спекловых шумов на основе кода Баркера и M-последовательности и разработана соответствующая теория [18–20]. Разработанный метод основан на 2D-фазовой модуляции света, проходящего через дифракционный оптический элемент (ДОЭ) с кодом Баркера или M-последовательностью. Разработанная математическая модель дает следующую оценку для контраста метода [18–20]:

$$C = \alpha / N\sqrt{2}, \quad (2)$$

где N – длина кода Баркера, α – коэффициент (значение которого близко к единице), зависящий от параметров оптической схемы. Из уравнения (2) видно, что этот метод позволяет снизить контраст спеклов ниже чувствительности человеческого глаза (менее 5%) в случае применения код Баркера с $N = 13$ или на основе M -последовательностей длины $N \geq 13$. Было доказано, что этот метод широкополосный, и поэтому один ДОО с кодом Баркера может быть использован для красного, зеленого и синего лазерных пучков [18, 20]. Было также показано, что этот метод может быть реализован с помощью двух 1D ДОО с кодом Баркера, которые перемещаются в ортогональных направлениях [18] или одного 2D ДОО с кодом Баркера, который перемещается с заданной линейной скоростью в данном направлении [19]. Этот метод можно также реализовать на основе жидкокристаллических панелей и на основе микроэлектромеханических систем (MEMS). Возможны и смешанные реализации [20]. В случае реализации на панелях жидких кристаллов, MEMS или смешанной реализации, этот метод не требует никакой механической вибрации вообще.

В этой статье мы представляем экспериментальные измерения контраста спеклов и оптической эффективности 2D ДОО с кодом Баркера при его механическом перемещении с постоянной скоростью.

Экспериментальная установка

Оптическая схема для метода, предложенного в работе, показана на рис. 1. ДОО помещается в плоскости объекта. Однако, в общем случае ДОО может быть расположен в любой плоскости, сопряженной с плоскостью объекта [20]. ДОО с кодом Баркера был помещен на каретку плоттера. Для наилучшего подавления спекловых шумов предложено располагать ДОО под наклоном с определенным углом по отношению к направлению движения. Угол φ рассчитывается по формуле $\tan \varphi = 1/MN$ (см. рис. 1 (б)). Каретка плоттера может перемещаться только с тремя заданными скоростями. Оптическая схема сконструирована таким образом, что две скорости перемещения каретки плоттера близки к скорости, необходимой для достижения максимального эффекта подавления спеклов. Эффективность подавление спеклов в методе максимальна, если входное (NA_{1in}) и выходное (NA_{1out}) числовые значения апертуры проектора, входное (NA_{2in}) и выходное (NA_{2out}) числовые значения апертуры фотокамеры (или глаза), ширина элемента решетки кода Баркера (T) и его скорость (v_d) удовлетворяют следующим пяти условиям [18–20]:

$$NA_{1in} = d_1 / (2s_1) > \lambda / T; \quad (1)$$

$$NA_{1out} = d_1 / (2s_2) > N * NA_{2in} = N * d_2 / (2s_3); \quad (2)$$

$$\lambda / 2NA_{2in} > M * T_0; \quad (3)$$

$$\lambda / 2NA_{2out} > 3\Delta; \quad (4)$$

$$v_d \Delta t = K \cdot M \cdot NT; \quad (5)$$

где (см. рис 1.) λ – длина волны лазерного излучения; d_1 – диаметр апертуры объектива

проектора; S_1 – расстояние от плоскости объекта на объектив; S_2 – расстояние от объектива до экрана; d_2 – диаметр апертуры объектива фотокамеры, M – увеличение проектора; Δ – ширина одного фотоприемника камеры; $T_0 = NT$; Δt – время экспозиции; K – любое положительное целое число.

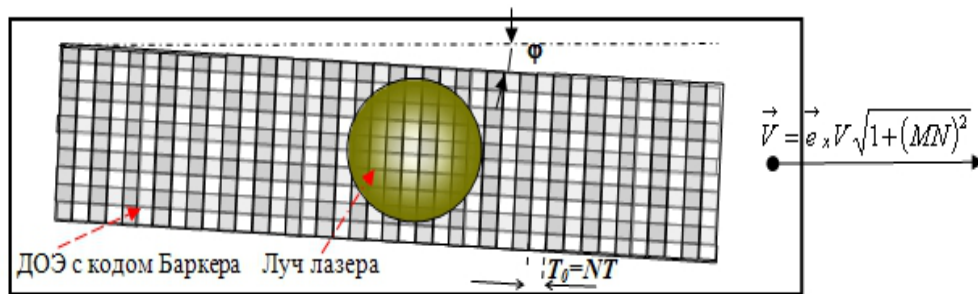
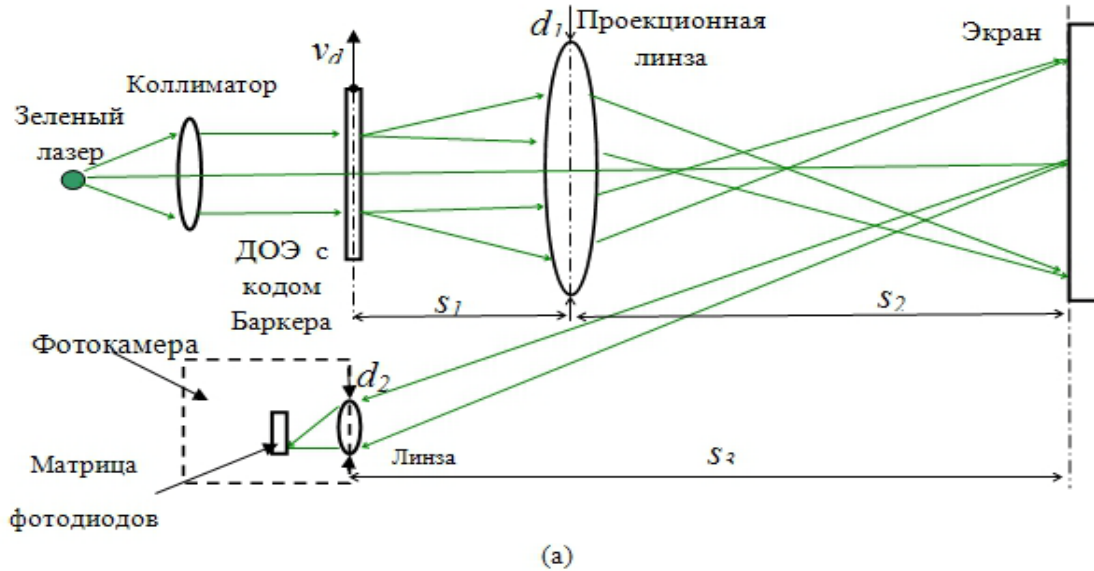


Рисунок 1 – (а) Принципиальная оптическая схема и (б) схема движения ДОЭ

Первое условие необходимо для максимального подавления спекл-эффекта и большой оптической эффективности, поскольку в этом случае почти все пространственные частоты рассеянного на дифракционной решетке света будут использоваться для создания образа и для усреднения спекловых шумов. Второе и третье уравнения обеспечивают условие того, что оптимальное подавление спеклов может быть получено только тогда, когда глаз (или фотокамера) не разрешает изображение одного периода решетки ДОЭ на экране ($M \cdot T_0$). Четвертое условие требуется, чтобы избежать усреднения спеклов в самой измерительной системе из-за конечного размера фотодиода камеры. Пятое условие важно для точного усреднения спеклового шума за интервал времени, равного экспозиции фотокамеры. Поскольку скорость каретки плоттера и время экспозиции камеры имеют конечное число дискретных значений, то последнее условие может быть реализовано только приблизительно.

2D ДОЭ на основе кода Баркера длиной $N=13$ с шириной элемент $T = 6$ мкм и

периодом решетки $T_0 = 7,8$ мкм была изготовлена с использованием электронно-лучевой литографии (для производства фотошаблонов) и фотолитографии (для получения ДОЭ из фотошаблонов). Глубина рельефа выбрана с учетом полуволнового фазового сдвига для зеленого лазера с длиной волны 532 нм.

В качестве источника когерентного света использовано излучение полупроводникового лазера (лазерная указка) с длиной волны 532 нм и мощностью излучения ~ 10 мВт. Оптическая система лазерной указки не идеальна, поскольку лазерный луч внутри указки испытывает сильное рассеяние на боковых стенках, и это приводит к созданию мелкой дифракционной картины на экране и, в конечном итоге, к завышенным значениям контраста спеклов в эксперименте. Чтобы минимизировать эффект влияния интерференционных полос на результаты измерения контраста спеклов, предложена следующая методика. Сначала измерялся контраст спеклов небольшой равномерно освещенной части экрана (достаточно большой, чтобы иметь большое количество декоррелированных областей в одной части). Результирующий контраст спеклов вычислялся как среднее от контраста спеклов малых областей. Изображение с экрана просматривалось фотокамерой с апертурой входного зрачка диаметром 1,5–2 мм. Для фотографирования использовалась цифровая фотокамера Canon PowerShot A630 с 8,0-мегапиксельной ПЗС-матрицей.

В эксперименте ДОЭ перемещался со скоростью 0,0018 м/с и время экспозиции фотокамеры составляло 0,6 с. Таким образом, во время экспозиции сдвиг ДОЭ составлял $\Delta L = 13,8 * T_0$, который немного выше, чем $\Delta L = 13 * T_0$ (почти на ширину одного элемента решетки T), что является условием для оптимального подавления спеклов. Поскольку временное разрешение глаза равно 0,04 с (примерно в 15 раз меньше, чем выдержка камеры) скорость ДОЭ в проекторе должна быть в 15 раз выше ($\sim 0,027$ м/с). Уменьшить длину периода ДОЭ позволяет пропорциональное уменьшение скорости ДОЭ. Параметры экспериментальной установки представлены в таблице 1. Во втором ряду представлены параметры, используемые для первого эксперимента, а третий ряд параметров используется для второго эксперимента. Из данных таблицы 1 следует, что почти все оптические параметры находятся в пределах желаемого диапазона для подавления спеклов предложенным в работе методом.

Таблица 1 – Параметры экспериментальной установки для измерения эффективности подавления спеклов

| N | S1 (мм) | D1 (мм) | S2 (мм) | D2 (мм) | S3 (мм) | N | M | NA1in | NA1out | NA2in | $\lambda/2$ NA2in (мм) |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|----|-----|-------|--------|--------|------------------------|
| 1 | 56 | 20 | 280 | 2 | 1100 | 13 | 5 | 0.17 | 0.0357 | 0.0009 | 0.29 |
| 2 | 60 | 20 | 260 | 1.6 | 1150 | 13 | 4.7 | 0.11 | 0.038 | 0.0065 | 0.41 |

Экспериментальные результаты и обсуждение

На рисунке 2 показаны фотографии фрагмента ДОЭ с кодом Баркера (а) и распределение интенсивности света в плоскости Фурье коллимированного зеленого лазерного пучка после его дифракции на ДОЭ (б), а также распределение интенсивности света в горизонтальном направлении вдоль центрального ряда дифракционной картины (в). Измерение интенсивности (рис. 2) получено в результате съемки изображения с экрана с помощью цифровой камеры и, следовательно, распределение интенсивности сильно модулируется спекл-шумами. Несмотря на сильные спекл-шумы, можно увидеть, что распределение интенсивности в плоскости Фурье (оггибающей дифракционной

решетки) имеет форму Sinc функции с шириной центрального максимума, определяемого шириной T элемента решетки. Это распределение интенсивности в плоскости Фурье хорошо согласуется с теорией и, следовательно, это подтверждает, что ДОЭ изготовлен правильно и имеет необходимые оптимальные параметры.

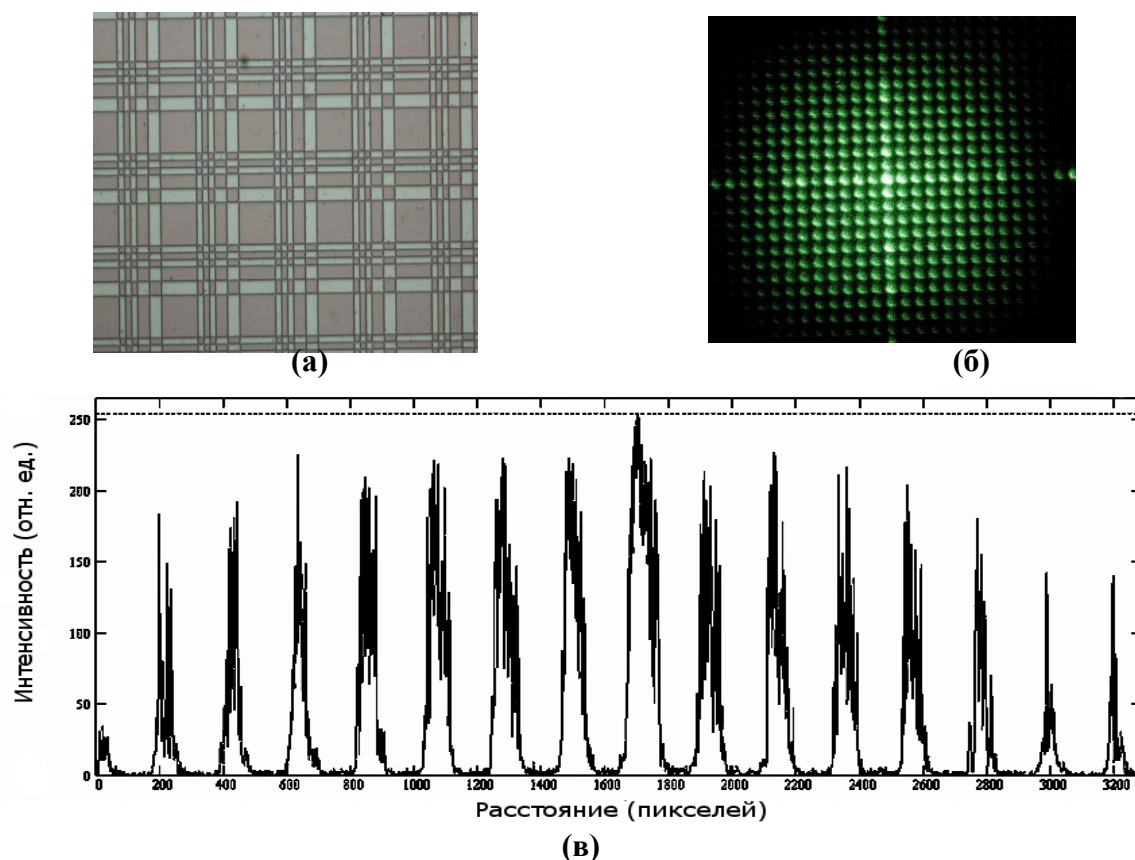


Рисунок 2 – ДОЭ с кодом Баркера: (а) фотография ДОЭ с кодом Баркера; (б) фотография интенсивности дифракционных максимумов коллимированного зеленого лазерного луча продифрагировавшего на ДОЭ с кодом Баркера; (в) распределение интенсивности дифракционных порядков вдоль центральной вертикальной линии

На рисунке 3 представлена фотография распределение интенсивности зеленого лазерного пучка, спроектированного на экран без (а) и с движущимся (б) ДОЭ (параметры экспериментальной установки приведены во второй строке табл.1). Данные для изображения взяты с фотодиодов зеленого света фотокамеры. Без ДОЭ (рисунок 4 (а)), интенсивность света на экране сильно модулируется спеклами и практически невозможно увидеть характер распределения интенсивности света на экране. Напротив, в изображении лазерного пятна, полученного с использованием движущегося ДОЭ (рисунок 4 (б)), спекл-шумы сильно подавлены и хорошо видно тонкую структуру распределения интенсивности света на экране, хотя все еще видна и слабая модуляция интенсивности света спеклами.

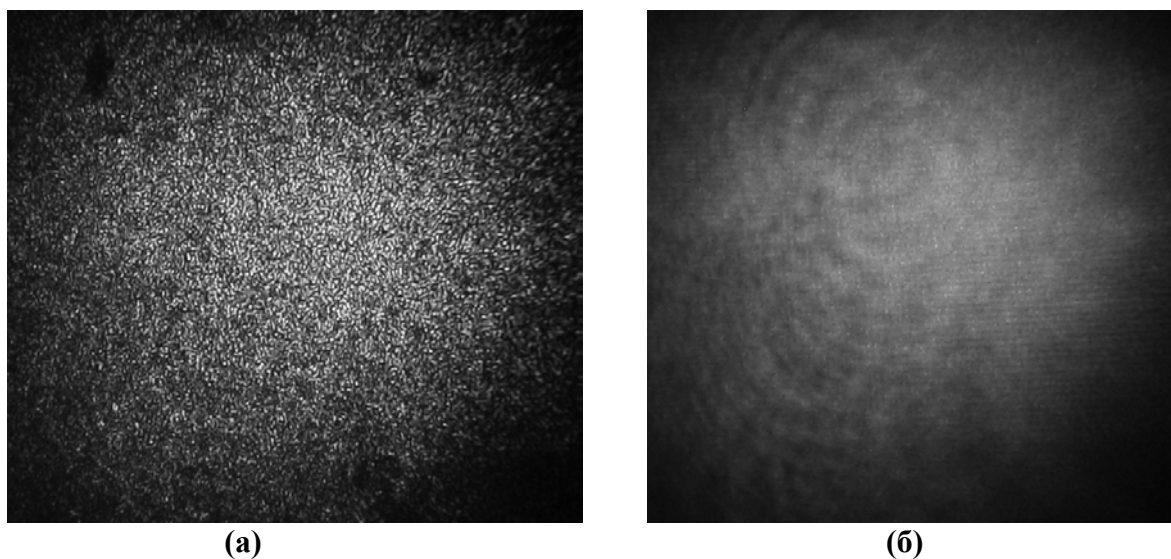
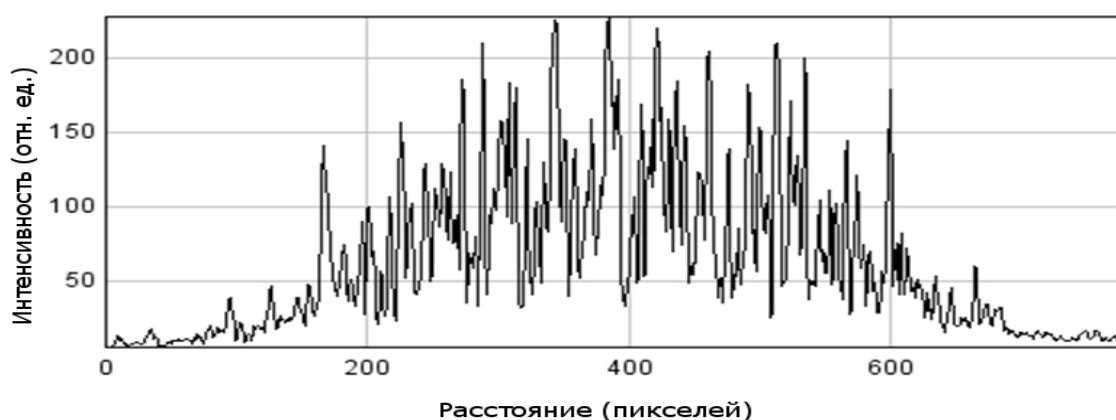


Рисунок 3 – Фотография распределения интенсивности в лазером пятне на экране без (а) и с подвижным ДОЭ с кодом Баркера (б)



(а)



(б)

Рисунок 4 – Распределение интенсивности в изображении лазерного пятна на экране вдоль вертикальной линии, проходящей через центр: (а) без ДОЭ; (б) с подвижным ДОЭ

В таблице 2 представлены измеренные значения контраста спеклов от разных небольших частей экрана и средний контраст спеклов (среднее значение по всем частям экрана) для двух случаев (первый эксперимент): без и с подвижным ДОЭ. Первоначальный контраст спеклов без ДОЭ был меньше ($C_b = 0,45$), чем предсказывает теория ($C_t = 0,707$, $K = 0,707 / 0,45 = 1,57$). Таким образом, в нашем методе измерения контраста спеклов существует начальное усреднение спекловых шумов. Это первоначальное усреднение может быть связано с конечными размерами фотодиода фотокамеры или обусловлено неполной когерентностью лазерного пучка. Данные в таблице 2 показывают, что контраст спеклов уменьшился с 0,45 до 0,054 с коэффициентом подавления спеклов $K = C_b / C_c = 8,3 \pm 1,5$. Хотя мы получаем большое подавление спеклов, коэффициент, предсказанный теорией, больше в 1,5 раза [18–20], чем получено в эксперименте. Есть несколько причин этого несоответствия: 1) не оптимальная скорость движения ДОЭ, так как $v\Delta t = 13,7\Gamma_0$, вместо $13\Gamma_0$; 2) не оптимальный угол наклона структуры ДОЭ, потому что $\tan \varphi = 17/200 = 1/11,76$ вместо $\tan \varphi = 1/13$; 3) вибрация ДОЭ в вертикальном направлении вследствие вибрации каретки плоттера; 4) изображение периода решетки определяется разрешением фотокамеры. Все четыре фактора сильно влияют на контраст спеклов и могут существенно уменьшить эффективность подавления спеклов.

Из данных, представленных в таблице 2, видно, что измеренный контраст спеклов значительно изменяется от области к области. Это можно объяснить небольшим значением площадей экрана, по которым проводились измерения (большая ошибка, связанная с небольшим числом декоррелированных областей в пределах одной области экрана), а также тем фактом, что свет на экран также модулируется дифракционной картиной лазерного освещения, связанной с рассеянием света боковыми стенками лазерного излучателя. Очевидно, что дифракционные полосы на экране увеличивают контраст спеклов больше (в относительных единицах) для освещения с использованием подвижного ДОЭ с кодом Баркера, потому что в этом случае интенсивность модуляции спеклами низкая, а интенсивность модуляции интерференционными полосами сохраняется неизменной. Таким образом, реальное значение снижения контраста спеклов в определенной степени является большим, чем полученное в нашем эксперименте.

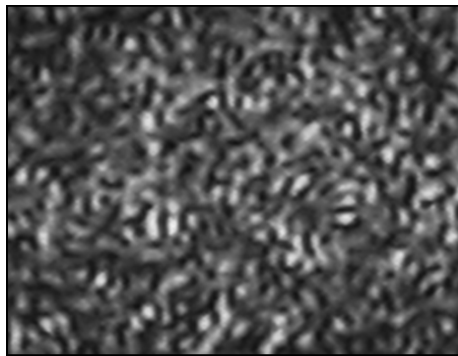
Таблица 2 – Контраст спеклов, измеренный без и с подвижным 2D ДОЭ с кодом Баркера длиной $N = 13$

| N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | Ср. | Откл. |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| без ДОЭ | 0.41 | 0.49 | 0.52 | 0.41 | 0.45 | 0.52 | 0.39 | 0.41 | 0.40 | 0.5 | 0.4 | 0.51 | 0.49 | 0.45 | 0.47 |
| с ДОЭ | 0.049 | 0.056 | 0.063 | 0.050 | 0.070 | 0.047 | 0.060 | 0.045 | 0.006 | 0.055 | 0.044 | 0.048 | 0.060 | 0.054 | 0.0076 |

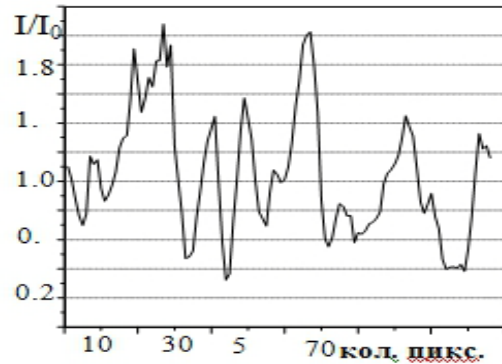
Сравнивая интенсивность света на экране без и при наличии ДОЭ с кодом Баркера, можно сделать вывод, что различия между ними незначительны и находятся в пределах ошибки измерений. Таким образом, практически весь рассеянный дифракционной решеткой свет собирается объективом проектора и оптическая эффективность в этом случае близка к 100%, если пренебречь светом, отраженным от пластины с ДОЭ.

В работе была проведена оптимизация оптических параметров экспериментальной установки для второго эксперимента для улучшения эффективности подавления спеклов (третий ряд табл. 1). Угол наклона ДОЭ был максимально приближен к оптимальному значению. Апертура фотокамеры была снижена с 2 до 1,5 мм, и расстояние от камеры до экрана было увеличено от 1100 до 1150 мм. Камера имеет относительно

высокий уровень шума при низкой интенсивности света и относительно низкую чувствительность фотодиодов. С учетом этого было снижено увеличение фотокамеры примерно в два раза для того, чтобы компенсировать снижение потока мощности света в связи с сокращением диаметра объектива фотокамеры и увеличением расстояния до экрана. Результаты этих экспериментов представлены на рисунке 5.



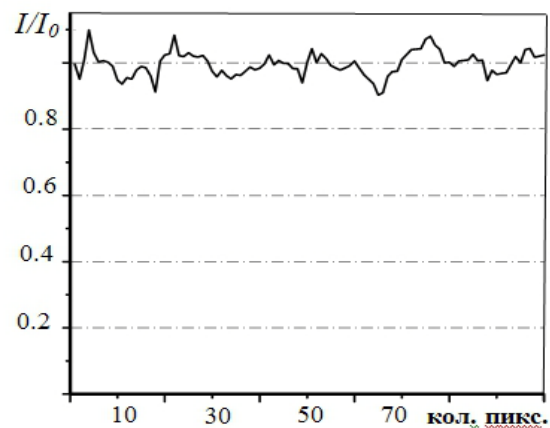
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 5 – Распределение интенсивности света с длиной волны 532 нм на экране вдоль вертикальной линии близко к центру: (а) и (б) без ДООЭ, (в) и (г) с движущимися ДООЭ с кодом Баркера; (а) и (в) 2D распределения, (б) и (г) распределение вдоль вертикальной линии; $S_{бдоэ} = 0,42$; $S_{сдоэ} = 0044$, $K = S_{бдоэ} / S_{сдоэ} = 8,5$

В новом эксперименте получен контраст спекла 0,044 (начальное значение 0,42) и коэффициент подавление спеклов $\sim 8,5$. Это заметно лучше, чем в первом эксперименте, но это по-прежнему ниже, чем теоретический прогноз. Предполагаем, что расхождение между теорией и экспериментом может быть объяснено не оптимальной скоростью ДООЭ и интерференционными полосами в осветительном лазерном пучке. Дальнейшая оптимизация метода ограничена нашими техническими возможностями.

Заключение

Измерена эффективность подавления контраста спеклов методом, основанным на перемещении 2D ДООЭ, созданного на основе кода Баркера с длиной $N = 13$. Получено высокое подавление контраста спеклов с коэффициентом подавления спеклов $K =$

Сбдоэ / Ссдоэ> 8. Экспериментально подтверждена высокая оптическая эффективность метода (близкая к 100%). Полученная в эксперименте эффективность подавление спеклов оказалась меньше, чем предсказанная теорией, с коэффициентом примерно 1,5, что, по мнению авторов, является следствием не оптимальной скорости ДОЭ, вибраций и интерференционных полос в осветительном лазерном пучке. Для проверки этих предположений требуется провести дополнительные экспериментальные исследования с оптимальными параметрами проектора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trisnadi, J.I. Overview and applications of Grating Light ValveTM based optical write engines for high-speed digital imaging / J.I.Trisnadi, C.B. Carlisle, V. Monteverde // MOEMS Display and Imaging Systems II, edited by Hakan Urey, David L. Dickensheets, Proc. SPIE 5348. – 2004. – P. 52–64.
2. Kowarz, M.W. Conformal grating electromechanical system (GEMS) for high-speed digital light modulation / M.W.Kowarz, J.C. Brazas, J.G. Phalen // IEEE, 15th Int. MEMS Conf. Digest. – 2002. – P. 568–573.
3. Mobile projectors using scanned beam displays / Sprague R. [et.al] // Mobile Displays, Technology and Applications.–Wiley. – 2008.
4. Davis, W.O. MEMS-based picoprojector display / W.O. Davis, R. Sprague, J. Miller // Proc. IEEE/LEOS Opt. MEMS & Nanophoton. – 2008. – P. 31–32.
5. Spatial optical modulator (SOM): high density diffractive laser projection display / Yun S.K. [et.al] // Proc. SPIE 6487, 648710. – 2007.
6. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications / Yun S.K. [et.al] // Proc. SPIE 6887, 688702. – 2008.
7. Chellappan, K.V. Laser-based displays: A review / K.V. Chellappan, E. Erden, H. Urey // Appl. Opt. – 2010. – Vol. 49, №25. – P. 79–98.
8. Goodman, J.W. Speckle Phenomena in Optics. Theory and Applications / J.W. Goodman // Roberts & Company, 2006.
9. Laser speckle reduction by multimode optical fiber bundle with combined temporal spatial and angular diversity / Mehta D.S. [et.al] // Appl. Opt. – 2012. – Vol. 51, № 12. – P. 1894–1904.
10. Janssens, P. Future prospects of high-end laser projectors / P. Janssens, K. Malfait // Proc. SPIE 7232. – 2009. – P. 723–234.
11. Speckle reduction in laser projection systems by diffractive optical elements / Wang L. [et.al] // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37. – P. 1770–1775.
12. Kubota, Sh. Very efficient speckle contrast reduction realized by moving diffuser device / Sh. Kubota, J. W. Goodman // Appl. Opt. – 2010. – Vol. 49, № 23. – P. 4385–4391.
13. Trisnadi, J.I. Hadamard speckle contrast reduction / J. I. Trisnadi // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29. – P. 11–13.
14. Replacing two-dimensional binary phase matrix by a pair of one-dimensional dynamic phase matrices for laser speckle reduction / Gao W. [et.al] // J. Display Technol. – 2012. – Vol. 8, № 5. – P. 291–295.
15. Speckle suppression in scanning laser display / Yurlov V. [et.al] // Appl. Opt. – 2008. – Vol. 47. – P. 179–187.
16. Speckle suppression in scanning laser displays: Aberration and defocusing of the projection system / Yurlov V. [et.al] // Appl. Opt. – 2009. – Vol. 48. – P. 80–90.
17. Akram, M.N. Speckle reduction in line-scan laser projectors using binary phase codes / M.N. Akram, V. Kartashov, Zh. Tong // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35, № 3. – P. 444–445.
18. Full speckle suppression in laser projectors using two Barker code-type optical dif-

fractive elements / Lapchuk A. [et.al] // J. Opt. Soc. Am. A. – 2013. – Vol. 30, № 1. – P. 22-31.

19. Optimal speckle suppression in laser projectors using a single two-dimensional Barker code diffractive optical element / Lapchuk A. [et.al] // J. Opt. Soc. Am. A. – 2013. – Vol. 30, № 2 – P. 227–332.

20. Optical schemes for speckle suppression by Barker code diffractive optical elements / Pashkevich G. A. [et.al] // J. Opt. Soc. Am. A. – 2013. – Vol. 30, № 9 – P. 1760–1767.

***G. Pashkevich, A. Shihovets, A. Lapchuk, A. Kryuchin, A. Bogdan* Minimization of Speckle in Laser Projector Linear Movement of the Diffractive Optical Element, Based on the Barker Code or M-sequence**

The paper presents the results of experimental measurements of the speckle suppression efficiency using a method based on the linear displacement of diffractive elements created on the basis of 2D Barker code. The experimental setup and optical parameters used in the method are described. The speckle contrast in the range of 4.4 -5.3% and the speckle suppression coefficient (speckle contrast reduction factor) $K > 8$ are obtained in the experiments. However, the experimentally obtained speckle suppression efficiency is approximately 1.5 times less than the theoretically predicted value. We suggest that the discrepancy between theory and experimental data is due to inexact matching between the optimal for speckle suppression parameters of optical setup and the actual used in our experiments.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 03.09.2013