



УДК 04.353

А. С. Лапчук *, **В. И. Юрлов ****, кандидаты техн. наук,
В. В. Петров *, **А. А. Крючин ***, чл.-корреспонденты НАН Украины,
С. О. Шило *, канд. физ.-мат. наук

* Ин-т проблем регистрации информации НАН Украины
(Украина, 03113, Киев, ул. Шпака, 2,
тел. (044) 4542190, E-mail: alapchuk@yahoo.com),

** Samsung Electro-Mechanics
(314, Maetan3-Dong, Yeogtong-Gu, Suwon, Gyungi-Do, Korea 443-743;
phone: 82-10-5101-5941, E-mail: victor.yurlov@samsung.com)

Спеклы в сканирующем лазерном проекторе: абберации и дефокусировка объектива

Выполнено моделирование влияния aberrаций и дефокусировки объектива на уровень контраста спеклов в 1D сканирующем лазерном проекторе в приближении Френеля и тонкой линзы. Показано, что сдвиг экрана по отношению к плоскости изображения (расфокусировка) приводит лишь к изменению ширины автокорреляционной функции сканирующего пучка света, что соответствует перефокусировке изображения на новое положение экрана.

Виконано моделювання впливу аберацій і дефокусування об'єктива на рівень контрасту спеклів в 1D скануючому лазерному проекторі в наближенні Френеля і тонкої лінзи. Показано, що зміщення екрану відносно площини зображення (дефокусування) призводить лише до зміни ширини автокореляційної функції скануючого пучка світла, що відповідає перефокусуванню зображення на нове положення екрану.

Ключевые слова: лазерный проектор, сканирование, спеклы, абберации, дефокусировка.

В настоящее время одним из основных направлений в развитии технологий портативных проекторов является разработка лазерных проекторов. Портативный проектор должен иметь небольшой размер и высокую оптическую эффективность. Поэтому уменьшение размеров и веса — одна из наиболее важных целей при разработке портативных проекторов. Лазерные диоды имеют малые размеры и создают пучки света большой мощности с малым диаметром. Это позволяет создать на их основе оптические системы проекторов с малыми габаритами, весом и высокой оптической эффективностью. Кроме того, с использованием лазерных диодов можно создавать изображения со значительно большей насыщенностью цвета, чем в оптических системах на основе лампы накаливания.

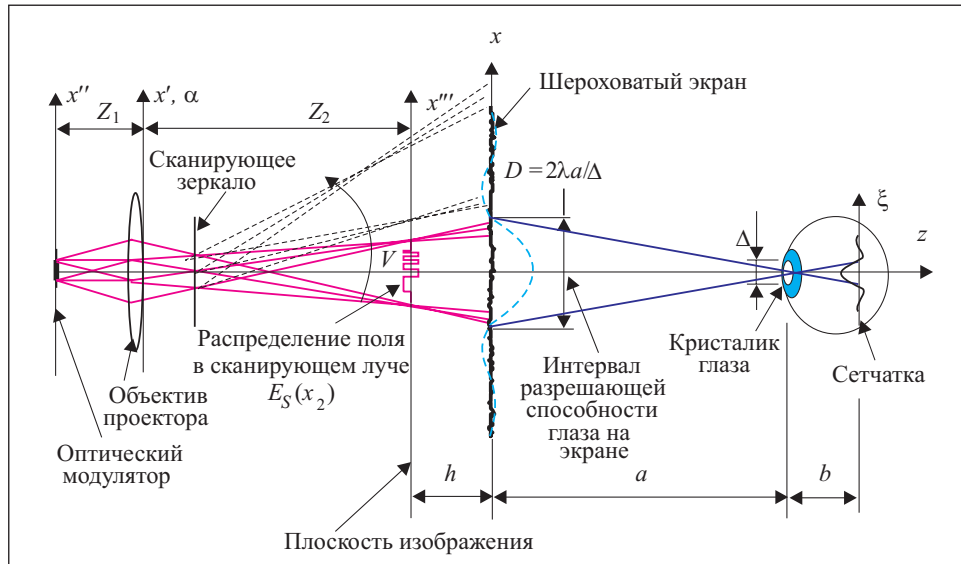


Рис. 1. Схема распространения лазерного пучка, размещения оптических элементов и зрителя в сканирующем лазерном проекторе (линейка пикселей размещена перпендикулярно к плоскости изображения)

Одним из перспективных направлений в развитии лазерных проекторов является 1D сканирующий лазерный проектор, в котором узкая линия света с помощью линейки (1D массива) пикселей перемещается по экрану и создает 2D-изображение (рис. 1). Для того чтобы обеспечить необходимую разрешающую способность на экране, сканирующий луч должен иметь на его поверхности ширину, равную или меньшую, чем ширина одного пикселя. Принцип работы 1D сканирующего лазерного проектора хорошо известен [1—5].

Первые 1D сканирующие лазерные проекторы Grating Light Valves (GLV) [1] и Grating Electromechanical Systems (GEMS) [2] разработаны соответственно компаниями Silicon Light Machine и Eastman Kodak. Спеклы в 1D сканирующем лазерном проекторе будем рассматривать на примере пространственного оптического модулятора (ПОМ), разработанного компанией Samsung Electro-Mechanics [3—5]. Однако все полученные результаты применимы к любому сканирующему лазерному проектору.

Известно, что использование лазерных источников в проекторах и дисплеях создает спеклы в глазах зрителя [6]. Этот эффект существенно снижает качество изображения, так как создает гранулированную модуляцию интенсивности света в человеческом глазу (субъективные спеклы). Статистика субъективных спеклов хорошо известна для статического лазерного пучка света [6]. В работе [7] исследована статистика спеклов в сканирующих

пучках когерентного света. Однако анализ проведен только для оптических устройств считывания штрих-кода, а влияние аберраций и дефокусировки объектива не рассмотрено. В работе [8] исследовано влияние аберраций оптической системы зрителя на параметры субъективных спеклов. Однако ни оптическая система проекционной системы, проецирующая луч на экран, ни его аберрации не учтены.

В работе [9] использована автокорреляционная функция когерентного луча для расчета спеклов в 1D сканирующем лазерном проекторе. Для лазерных проекторов наиболее важным параметром является контраст спеклов, определяющий уровень изменения интенсивности изображения равномерно освещенного экрана, обусловленный эффектом спеклов. В [9] получена формула для расчета контраста спеклов в 1D сканирующих лазерных проекторах. Для уменьшения спеклов предложено использовать дифракционный оптический элемент (ДОЭ), который модулирует фазу луча, используя последовательность кода Баркера—ДОЭ на основе кода Баркера. Для того чтобы ДОЭ не разрушал изображения, проецируемого на экран, он должен быть размещен в пространственной плоскости оптического модулятора [9, 10] или в промежуточной плоскости изображения (см. рис. 1, плоскость объекта x'') [11].

В работе [9] лазерный проектор имеет идеальную безаберрационную оптическую систему. Однако для практического применения важно знать влияние реальных параметров объектива на контраст спеклов. Наиболее интересными вопросами являются:

1. ДОЭ в плоскости объекта манипулирует фазой луча внутри каждого пикселя, создавая подпиксельную структуру электромагнитного поля, размеры которой намного меньше размера пикселя. Должна ли оптическая система иметь достаточно малый уровень аберраций, чтобы отображать на экране суб-пиксельную структуру?

2. Очень часто часть изображения или все изображение расфокусировано. В какой степени дефокусировка изображения влияет на контраст спеклов?

3. Система освещения имеет неоднородное распределение интенсивности поля в поперечном сечении пучка света. Насколько важна форма распределения интенсивности для уровня контраста спеклов?

Позиционирование экрана и зрителя. При позиционировании экрана точно в плоскости изображения, перемещение пучка света вдоль экрана при повороте сканирующего зеркала можно представить как его линейный сдвиг вдоль экрана [9]. В этом случае контраст спеклов зависит только от автокорреляционной функции пучка света и не зависит от аберраций оптической системы, так как аберрации изменяют фазу пространственных

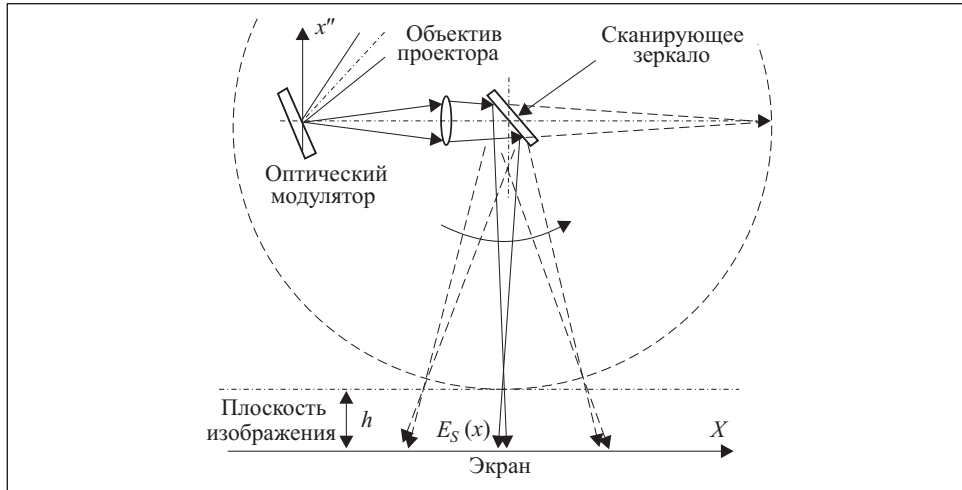


Рис. 2. Схема распространения луча вдоль экрана

частот поля, а не их амплитуду [9], а значит, не меняют модуль автокорреляционной функции. Но при сдвиге экрана из плоскости изображения (расфокусировке объектива) движение пучка света по экрану уже нельзя представить как его линейное смещение вдоль экрана. Оно представляет собой сложную суперпозицию линейного смещения и вращения, а значит, контраст спеклов не может быть рассчитан с использованием автокорреляционной функции пучка света. Для расчета контраста спеклов в этом случае следует применить более сложные корреляционные соотношения.

На рис. 1 видно, что плоскость изображения совпадает с плоскостью x''' , а плоскость экрана находится в плоскости x , и они сдвинуты относительно одна другой на расстояние h . Рассеянный свет с экрана попадает в глаз, расположенный на расстоянии a от экрана, и создает в нем изображение, модулированное спеклами.

На рис. 2 показан механизм сканирования лазерным лучом поверхности экрана. Луч движется вдоль экрана в результате отражения от сканирующего зеркала и совершает колебательные вращения.

Постановка задачи. В приближении Френеля комплексную амплитуду электромагнитного поля на сетчатке глаза можно записать так:

$$E_{\xi}(\xi, t) = \frac{\Delta}{\lambda \sqrt{jab}} e^{jk \frac{\xi^2}{2b}} \int_{\text{экран}} r(x) E_S(x, t) e^{jk \frac{x^2}{2a}} \text{sinc} \left\{ \frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x \right) \right\} dx, \quad (1)$$

где $E_S(x, t)$ — поле пучка света на поверхности экрана; $r(x)$ — комплексный коэффициент отражения от экрана; $D = 2\lambda a/\Delta$ — разрешающая спо-

собность глаза на экране; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; a — расстояние от глаза до экрана; Δ — размер зрачка; b — глубина глаза (см. рис 1). Здесь сделано предположение, что глаз сфокусирован точно на экране. Однако хорошо известно, что характеристики субъективных спеклов не зависят от позиции плоскости изображения объекта относительно плоскости размещения детекторов в оптической системе наблюдателя, и такое предположение сделано только для упрощения математических выкладок.

Из уравнения (1) легко получить формулу интенсивности света на сетчатке глаза:

$$I(\xi) = \frac{\Delta^2}{\lambda^2 ab} \iint r(x_1) r^*(x_2) \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x_1 \right) \right\} \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x_2 \right) \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -jk \frac{x_1^2 - x_2^2}{2a} \right\} \int_0^T E_S(x_1, t) E_S^*(x_2, t) dt dx_1 dx_2. \quad (2)$$

Используя общепринятое приближение шероховатой поверхности (коэффициент отражения от поверхности имеет нулевую автокорреляционную длину), формулу (2) можно записать в виде

$$\langle I(\xi) \rangle = R \frac{\Delta^2}{\lambda^2 ab} \int A(x_1, x_1) \operatorname{sinc}^2 \left\{ \frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x \right) \right\} dx_1, \quad (3)$$

где $A(x_1, x_2)$ — обобщенная автокорреляционная функция,

$$A(x_1, x_2) = \int_0^T E(x_1, t) E^*(x_2, t) dt; \quad (4)$$

$\langle \dots \rangle$ — усреднение по ансамблю; $R = \langle |r(x)|^2 \rangle$ — средний коэффициент отражения света от экрана по интенсивности. В уравнениях (1)–(4) интегрирование выполняется для всего экрана.

Момент второго порядка — среднюю величину квадрата интенсивности на сетчатке глаза — можно записать в виде

$$\langle I^2 \rangle = \left\langle \left\{ E_0^2 G_0 \iint r(x_1) r^*(x_2) \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} (x + x_1) \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} (x + x_2) \right] e^{-jk \frac{x_1^2 - x_2^2}{2a}} A(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \right\}^2 \right\rangle = \\ = E_0^2 G_0^2 \iiint \int F(x_1, x_2, x_3, x_4) A(x_1, x_2) A(x_3, x_4) \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} x_1 \right] \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} x_2 \right] \times$$

$$\times \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} x_3 \right] \operatorname{sinc} \left[\frac{2\pi}{D} x_4 \right] e^{-jk \frac{x_1^2 - x_2^2 + x_3^2 - x_4^2}{2a}} dx_1 dx_2 dx_3 dx_4.$$

Используя тот же подход, что и в [9], можно показать, что

$$\begin{aligned} \langle I^2 \rangle = & \langle I \rangle^2 + \left(\frac{\Delta^2}{\lambda^2 ab} R \langle |E(\xi)|^2 \rangle \right)^2 \times \\ & \times \iint |A(x_1, x_2)|^2 \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x_1 \right) \right] \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} \left(\frac{a}{b} \xi + x_2 \right) \right] dx_1 dx_2. \end{aligned} \quad (5)$$

Из уравнений (3) и (5) следует, что контраст спеклов имеет вид

$$C = \frac{\sqrt{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}}{\langle I \rangle} = \frac{\sqrt{\iint |A(x_1, x_2)|^2 \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x_1 \right] \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x_2 \right] dx_1 dx_2}}{\left[\int A(x_1, x_2) \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x_1 \right] dx_1 \right]^2}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что контраст спеклов зависит только от модуля автокорреляционной функции $A(x_1, x_2)$ поля лазерного пучка света и поэтому для расчета контраста спеклов достаточно вычислить только эту функцию. Следует также заметить, что для вычисления контраста спеклов достаточно знать только нормированную автокорреляционную функцию (см. (6)). Поэтому в дальнейшем не будем вычислять постоянные множители при выводе формулы для автокорреляционной функции, а обозначим их как константы K_1, K_2, \dots .

Известно, что аберрации оптической системы объектива изменяют только фазу поля в задней главной плоскости, т.е. их можно учесть с помощью формулы $E_A(x') = E_I(x') \exp\{i\Phi(x')\}$, где $E_A(x')$ и $E_I(x')$ — распределение поля в задней главной плоскости объектива с аберрациями и без них; функция $\Phi(x')$ задает аберрационный фазовый сдвиг объектива.

Для моделирования прохождения луча через объектив, как и в [9], используем приближение тонкой линзы и теорию дифракции Френеля (с учетом дефокусировки и аберраций). Применяя этот подход, запишем поле недвижимого пучка света на экране в виде

$$\begin{aligned} E_S(x) = & K_1 K_2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x'') \exp[i\Phi(x')] \times \\ & \times \exp \left[i \frac{k}{2} \left(\frac{x'^2}{F} - \frac{(x'' - x')^2}{Z_1} - \frac{(x' - x)^2}{Z_2 + h} \right) \right] dx'' dx', \end{aligned} \quad (7)$$

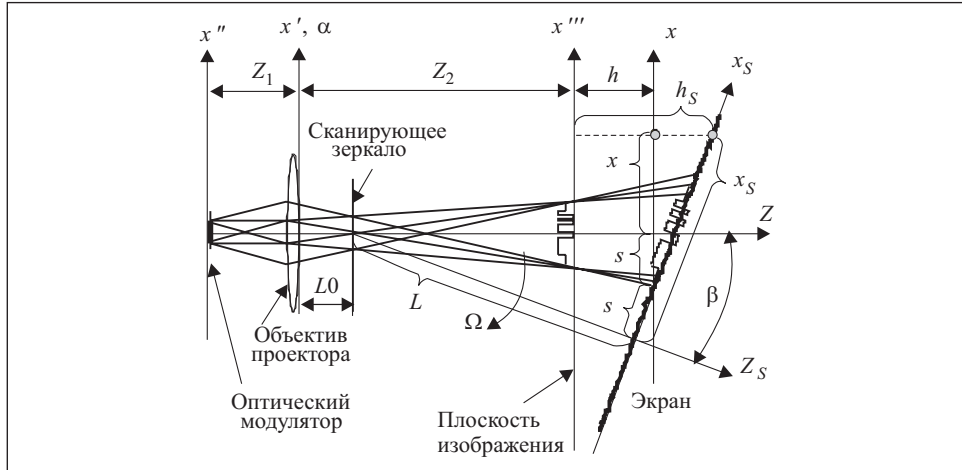


Рис. 3. Схема движения пучка света относительно экрана

где $K_1 = \exp(-ikZ_1)/\sqrt{\lambda Z_1}$, $K_2 = \exp(-ik(Z_2 + h))/\sqrt{\lambda(Z_2 + h)}$. Поскольку плоскости объекта и изображения находятся на расстояниях от объектива соответственно Z_1, Z_2 , для них можно записать (приближение тонкой линзы)

$$1/Z_1 + 1/Z_2 = 1/F, \quad (8)$$

где F — фокусное расстояние объектива. Подставляя уравнение (8) в (7), квадратичный член в экспоненте (7) можно преобразовать к следующему виду:

$$\frac{x'^2}{F} - \frac{(x'' - x')^2}{Z_1} - \frac{(x' - x)^2}{Z_2 + h} = \frac{hx'^2}{(Z_2 + h)Z_2} + 2x' \left(\frac{x''}{Z_1} + \frac{x}{Z_2 + h} \right) - \frac{x''^2}{Z_1} - \frac{x^2}{Z_2 + h}. \quad (9)$$

Используя (9), уравнение (7) можно переписать в виде

$$E_S(x) = \frac{K_1}{\sqrt{\lambda(Z_2 + h)}} \exp \left\{ -ik \left[Z_2 + h + \frac{x^2}{2(Z_2 + h)} \right] \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x'') \exp[i\Phi(x')] \times \\ \times \exp \{ 0,5ik [hx'^2 / ((Z_2 + h)Z_2) + 2x'(x'' / Z_1 + x / (Z_2 + h)) - x''^2 / Z_1] \} dx' dx''. \quad (10)$$

Уравнение (10) позволяет вычислить поле неподвижного лазерного пучка света, в которое следует включить эффект перемещения пучка света вдоль экрана для расчета автокорреляционной функции. Перемещение пучка света происходит в результате периодического изменения угла зеркала, от которого отражается луч, в рамках необходимого углового диапазона и по линейной зависимости угла сканирования от времени (см. рис. 2).

Представим движение пучка света относительно экрана, как показано на рис. 3, где лазерный луч является неподвижным и описывается уравнением (10) в неподвижной системе координат X, Z , а экран представлен во вращающейся системе координат X_S, Z_S . Для того чтобы вычислить поле на вращающемся экране, координату x неподвижной системы координат следует выразить через координату X_S экрана с учетом величины смещения изображения h_S . Из рис. 3 видно, что выполняются следующие соотношения:

$$x = x_S \cos\beta - L \sin\beta, \quad h_S = h + [x_S - L(1 - \cos\beta) / \sin\beta] \sin\beta,$$

где β — угол наклона пучка света (оси пучка света) к нормали поверхности экрана; L — расстояние от зеркала до экрана.

Поскольку в проекторе происходит значительное увеличение размера изображения и зеркало находится в фокальной плоскости объектива, выполняются соотношения между линейными размерами оптической системы $L_0 \ll L, L_0 \ll Z_2$ во всех случаях, за исключением одного, когда экран придвинут вплотную к зеркалу (не актуально для практического применения). Поэтому можно записать $L \approx Z_2 + h$, т.е. расстояние от зеркала до экрана приблизительно такое же, как расстояние от задней главной плоскости объектива до экрана. В этом случае для малых углов сканирования можно записать

$$x \approx x_S - \beta L, \quad h_S \approx h + \Delta_S, \quad (11)$$

где $\Delta_S = x_S \beta - 0,5\beta^2 L$.

В дальнейшем не будем учитывать малое изменение амплитуды поля при сканировании пучка света вдоль экрана, выраженное первым множителем в уравнении (10), и положим

$$\begin{aligned} \frac{K_1}{\sqrt{\lambda(Z_2 + h_S)}} &\approx \frac{K_1}{\sqrt{\lambda L}}; \\ Z_2 + h_S + \frac{x^2}{2(Z_2 + h_S)} &= L + \Delta_S + \frac{(x_S - \beta L)^2}{2(L + \Delta_S)} = \\ &= L + \Delta_S + \frac{x_S^2 - 2x_S \beta L + \beta^2 L^2}{2L(1 + \Delta_S / L)} \approx L + \Delta_S + \frac{x_S^2}{2L} - x_S \beta + \frac{\beta^2 L}{2} = L + \frac{x_S^2}{2L}. \end{aligned}$$

Используя такие же приближения, как в уравнениях (11), нетрудно получить следующие соотношения:

$$\frac{x}{Z_2 + h} \approx \frac{x_S - \beta L}{L}, \quad \frac{1}{Z_2 + h} \approx \frac{1}{L}.$$

Угол сканирования β является периодической функцией времени, однако, ограничиваясь одним циклом сканирования, можно записать его как линейную функцию

$$\beta(t) = \Omega t, \quad (12)$$

где Ω — угловая скорость перемещения пучка света.

После всех преобразований уравнение (12) можно записать в следующем виде:

$$E_S(x_S, t) = K_1 K_2 \exp \left\{ -ik \frac{x_S^2}{2L} \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x'') \exp[i\Phi(x')] \times \\ \times \exp \left\{ ik \left[\frac{hx'^2}{2LZ_2} + 2x' \left(\frac{x''}{Z_1} + \frac{x_S - L\Omega t}{L} \right) - \frac{x''^2}{Z_1} \right] \right\} dx' dx''. \quad (13)$$

Подставив уравнение (13) в (4), получим автокорреляционную формулу для пучка света:

$$A(x_1, x_2) = \int_0^T E_S(x_1, t) E_S^*(x_2, t) dt = \\ = K_1 K_1^* K_2 K_2^* \exp \left\{ -ik \frac{x_1^2 - x_2^2}{2L} \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_1'') E_0^*(x_2'') \exp \{ i[\Phi(x_1') - \Phi(x_2')] \} \times \\ \times \exp \left\{ ik \left[\frac{hx_1'^2 - x_2'^2}{2LZ_2} + \frac{x_1' x_1'' - x_2' x_2''}{Z_1} + \frac{x_1' x_1 - x_2' x_2}{L} - \frac{x_1''^2 - x_2''^2}{2Z_1} \right] \right\} \times \\ \times \exp \{ -ik\Omega(x_1' - x_2') t \} dx_1' dx_2' dx_1'' dx_2'' dt. \quad (14)$$

Выполнив интегрирование по времени (с использованием свойства δ -функции Дирака) с последующим интегрированием по x_2' в уравнении (14), автокорреляционную функцию запишем так:

$$A(x_1, x_2) = 2\pi \frac{|K_1 K_2|^2}{k\Omega} \exp \left\{ -ik \frac{x_1^2 - x_2^2}{2L} \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x_1'') E_0^*(x_2'') \times \\ \times \exp \left\{ ik \left[x_1' \left(\frac{x_1'' - x_2''}{Z_1} + \frac{x_1 - x_2}{L} \right) - \frac{x_1''^2 - x_2''^2}{2Z_1} \right] \right\} dx_1' dx_1'' dx_2''. \quad (15)$$

При выводе (15) использовано известное соотношение

$$\int_T \exp\{-ik\Omega(x'_1 - x'_2)t\} dt \approx 2\pi\delta[k\Omega(x'_1 - x'_2)] = \frac{2\pi}{k\Omega} \delta(x'_1 - x'_2).$$

Из уравнения (15) выпал абберрационный фазовый множитель $\exp\{i\Phi(x')\}$, а это означает, что автокорреляционная функция не зависит от абберраций оптической системы и поэтому абберрации объектива не влияют на величину контраста спеклов. После интегрирования по x'_1 с использованием свойства δ -функции Дирака уравнение (15) принимает вид

$$A(x_1, x_2) = 4\pi^2 Z_1 \frac{|K_1 K_2|^2}{k^2 \Omega} \exp\left\{i \frac{k}{2L} \left[\frac{(x_1 - x_2)^2}{M} - x_1^2 + x_2^2 \right]\right\} \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x''_1) E_0^* \left[x''_1 + \frac{x_1 - x_2}{M} \right] \exp\left\{i \frac{k}{Z_1} \left(\frac{x_1 - x_2}{M} \right) x''_1\right\} dx''_1,$$

где $M = L/Z_1 = (Z_2 + h)/Z_1$ — увеличение оптической системы с дефокусировкой. Нетрудно заметить, что выражение для модуля автокорреляционной функции оптической системы с дефокусировкой и абберрациями может быть записано в виде

$$|A(x_1, x_2)| = |A_0((x_1 - x_2)/\mu)|. \quad (16)$$

Здесь $|A_0(x_1, x_2)|$ — модуль автокорреляционной функции для безабберрационной оптической системы проектора и для случая, когда экран расположен точно в плоскости изображения ($h = 0$),

$$|A_0(x_1, x_2)| = K \left| \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x) E_0^* [x + (x_1 - x_2)/M_0] \exp\{ik(x_1 - x_2)x/(Z_1 M_0)\} dx \right|, \quad (17)$$

где $M_0 = Z_2/Z_1$ — коэффициент увеличения для системы с экраном в плоскости изображения; $\mu = (Z_2 + h)/Z_2$ — коэффициент дефокусировки; $K = 1/\Omega L$ — константа.

Уравнения (16) и (17) являются функциями разности координат $x_1 - x_2$ на экране, а значит, формула для контраста спеклов безабберрационной системы без дефокусировки может быть применена также и в случае дефокусированной абберрационной оптической системы, если учесть перенормировку аргумента автокорреляционной функции. Из уравнения (16) следует, что смещение экрана на расстояние h от плоскости изображения приводит к перенормировке аргумента автокорреляционной функции. Пе-

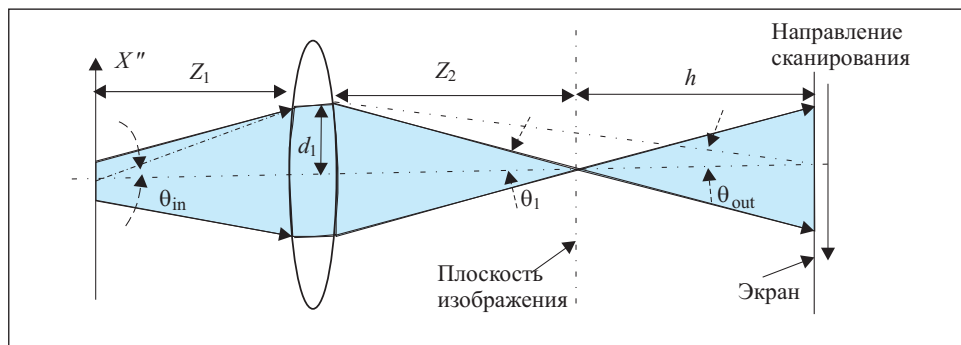


Рис. 4. Определение числовой апертуры: $NA_{in} = \sin\theta_{in} \approx d_1/Z_1$, $NA_{out} = \sin\theta_{out} \approx d_1/(Z_2+h)$

ренормировка в данном случае дает такой же результат, как и перефокусировка объектива на новую позицию экрана, т.е. модуль нормированной автокорреляционной функции не зависит от дефокусировки объектива.

Из сказанного следует, что контраст спеклов зависит только от числовой апертуры $NA_{out} = \sin(\theta_{out})$ объектива, где θ_{out} — половина углового размера выходного зрачка объектива от плоскости экрана (рис. 4).

Подставив уравнение (17) в (6), получим формулу для контраста спеклов:

$$C^2 = \iint \left| A_0 \left(\frac{x_1 - x_2}{\mu} \right) \right|^2 \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x_1 \right] \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x_2 \right] \times \\ \times dx_1 dx_2 / \left[\int |A_0(0)| \operatorname{sinc}^2 \left[\frac{2\pi}{D} x \right] dx \right]^2 = \\ = 4 \int_{-\infty}^{\infty} |A_0(D\nu/\mu)|^2 Q(\nu) d\nu / |A_0(0)|^2 = 4\mu \int_{-\infty}^{\infty} |A_0(Dx)|^2 Q(\mu x) dx / |A_0(0)|^2, \quad (18)$$

где $Q(x) = 1 - \operatorname{sinc}(4\pi x) / (8\pi^2 x^2)$. При использовании в оптической системе дифракционного элемента на основе кода Баркера [9] для понижения контраста спеклов автокорреляционная функция имеет острый максимум. В то же время, функция $Q(x)$ имеет широкий центральный максимум и незначительно изменяется в области центрального пика автокорреляционной функции. Поэтому при интегрировании (18) важна только узкая область пика автокорреляционной функции сканирующего пучка света, в которой (вследствие плавности изменения функции) выполняется равенство $Q(\mu x) \approx Q(x)$. В этом случае формула (18) упрощается к виду

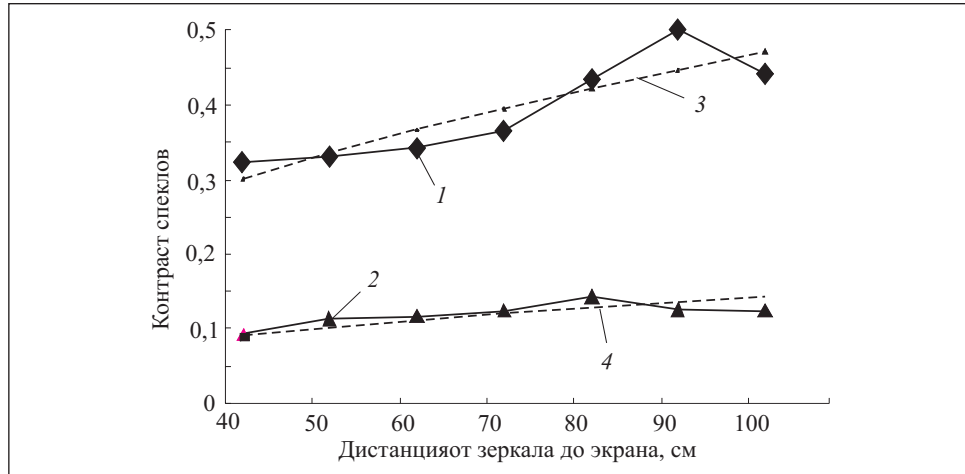


Рис. 5. Результаты расчетов и экспериментальные данные: 1 и 2 — эксперимент; 3 и 4 — численное моделирование

$C = C_0 \sqrt{\mu} = C_0 \sqrt{(Z_2 + h) / Z_2}$, где C_0 — контраст спеклов в случае несмещенного экрана,

$$C_0 = 2 \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |A_0(Dx)|^2 Q(x) dx / |A_0(0)|^2};$$

смещение h — положительная (отрицательная) величина при удалении (приближении) экрана проектора. Поэтому контраст спеклов будет плавно меняться при смещении экрана и не будет меняться при перефокусировке изображения линзой в случае фиксированного положения экрана, проектора и зрителя.

Результаты эксперимента. Для проверки теоретических результатов были проведены экспериментальные измерения контраста спеклов. При искусственном внесении aberrаций в объектив проектора измерениями не установлено изменений контраста спеклов, что согласуется с разработанной теорией.

На рис. 5 представлены экспериментальные и рассчитанные зависимости контраста спеклов от расстояния объектива проектора до экрана $L = Z_2 + h$ при перемещении последнего и фиксировании всех остальных параметров системы и расстояния измерительной системы до экрана. Кривые 1 и 3 соответствуют экспериментальным и теоретическим значениям контраста спеклов для проектора без дифракционного элемента, а кривые 2 и 4 — экспериментальным и теоретическим значениям контраста спеклов

для проектора с дифракционным элементом на основе кода Баркер. Из рис. 5 видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими результатами.

Выводы

При расчете спеклов в 1D сканирующем проекторе с использованием приближения Френеля и тонкой линзы установлено следующее:

1. Аберрации объектива не влияют на контраст спеклов.
2. Смещение экрана из плоскости изображения (дефокусировка) приводит к изменению масштаба автокорреляционной функции, а именно к изменению ее ширины.
3. При использовании в сканирующем лазерном проекторе для уменьшения контраста спеклов такой подпиксельной структуры, как ДОЭ, не требуется улучшение качества объектива для получения изображения этой подструктуры на экране, однако требуется увеличение числовой апертуры объектива.
4. Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические результаты.

Simulation of aberration and defocusing of speckle contrast in 1D laser projection displays was performed by using Fresnel and thin lens approximation. The analysis of numerical results has shown that aberrations have no effect on the speckle contrast. It is shown that a screen shift relative to the image plane (defocusing) results only in a rescaling of the scanning beam autocorrelation function, which is equivalent to a refocusing of objective lens to a new position of the screen.

1. Bloom D. The Grating Light Valve: Revolutionizing Display Technology. — Projection Displays III Symposium// Proc. SPIE. — 1997. — Vol. 3013. — P. 165—171.
2. Kowarz M. W., Phalen J. G. High-contrast display system with scanned conformal grating device// USA Pat 6678085. — 2002.
3. Yun S.-K. Open hole-based diffractive light modulator// USA Pat.7206118. — 2007.
4. Yun S. K., Song J. H., Yurlov V., Lapchuk A. S. Spatial optical modulator (SOM): high density diffractive laser projection display// Proc. SPIE. — 2007. — Vol. 6487. — P. 10—15.
5. Yun S.-K., Song J. H., Yurlov V., Lapchuk A. A novel diffractive micro-optical modulator for mobile display applications// Proc. SPIE. — 2008. — Vol. 6887. — P. 2—7.
6. Goodman J. W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications/ Goodman Joseph W. — Englewood. — Colorado:Roberts&Company Publishers, 2007. — 406 p.
7. Marom E., Kresic-Juric S., Bergstein L. Analysis of speckle in bar-code scanning systems // J. Opt. Soc. Am. A. — 2001. — V. 18, № 4.— P. 888 — 901.
8. Murphy P. K., Allebach J. P., Gallagher N. C. Effect of optical aberrations on laser speckle// Ibid. — 1986. — V. 3, № 2. — P. 215 — 222.
9. Yurlov V., Lapchuk A., Yun S.-K. et al Speckle suppression in scanning laser display//Appl. Opt. — 2008. — V. 47, № 2. — P. 179 — 187.

10. Yurlov V., Lapchuk A., Song J. H. Optical modulator and optical modulator module for reducing laser speckle// USA Pat. Appl. 20080055698 A1. — 2007.
11. Trisnad J. I. Method and apparatus for reducing laser speckle// USA Pat. 6323984. — 2001.

Поступила 25.03.11

ЛАПЧУК Анатолий Степанович, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин-та проблем регистрации информации НАН Украины. В 1977 г. окончил Киевский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко. Область научных исследований — исследование и разработка оптических средств записи и отображения информации.

ЮРЛОВ Виктор Иванович, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. фирмы Самсунг Электромеханикс. В 1971 г. окончил Новосибирский электротехнический ин-т. Область научных исследований — исследование и разработка оптических средств записи и отображения информации.

ПЕТРОВ Вячеслав Васильевич, чл.-кор. НАН Украины, директор Ин-та проблем регистрации информации НАН Украины. В 1962 г. окончил Харьковский политехнический ин-т. Область научных исследований — исследование и разработка оптических средств записи и отображения информации.

КРЮЧИН Андрей Андреевич, чл.-кор. НАН Украины, зам. директора Ин-та проблем регистрации информации НАН Украины. В 1971 г. окончил Киевский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко. Область научных исследований — исследование и разработка оптических средств записи и отображения информации.

ШИЛО Сергей Александрович, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Ин-та проблем регистрации информации НАН Украины. В 1986 г. окончил Киевский госуниверситет им. Т. Г. Шевченко. Область научных исследований — компьютерное моделирование физико-технических процессов и явлений, спектроскопия люминесцентных слоев красителей.