

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, зам. директора НИИ “Радио-электроника и лазерная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области квантовой электроники и экологии.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of “Radio Electronics and Laser Technology” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the field of quantum electronics and ecology.

Игорь Степанович Потапцев родился в 1939 г., окончил в 1966 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент, и.о. зав. кафедрой “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области приборостроения.



I.S. Potaptev (b. 1939) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1966. Ph. D. (Eng.), assoc. professor, acting head of “Elements of Instrument Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of instrumental engineering.

УДК 535.8+658.512.2

Ю. Н. Самарин

(Московский государственный университет печати)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ ДЕФЛЕКТОРОВ ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Предложена математическая модель, описывающая функцию сканирования изображения в лазерных выводных устройствах в зависимости от точности изготовления и установки зеркальных дефлекторов. Приведен пример расчета допустимых погрешностей в изготовлении зеркального дефлектора.

Одна из наиболее сложных проблем, возникающих при создании вращающихся дефлекторов для лазерных выводных устройств, — установка зеркальных граней с высокой точностью и выбор высокоточных опор вращения, не допускающих люфта дефлектора. При больших оптических рычагах даже малый разброс ошибок в углах наклона граней и малые осевые биения дефлектора вызывают заметное нарушение прямолинейности сканируемой растровой строки записываемого изображения [1].

Для определения влияния ошибок в углах наклона зеркальных граней дефлектора на прямолинейность растровых строк найдем функцию

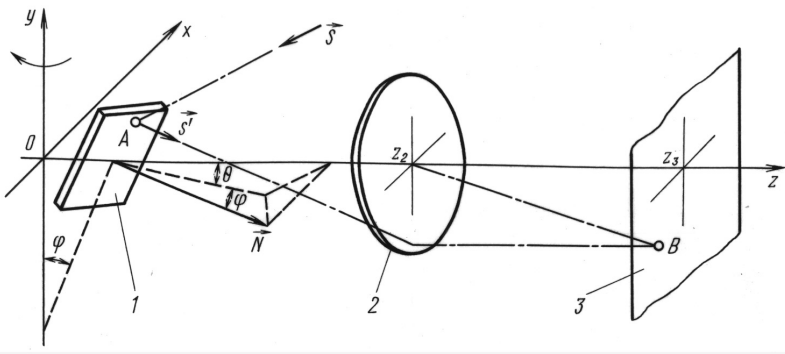


Рис. 1. Схема одномерной развертки растровой строки вращающейся зеркальной гранью дефлектора

сканирования, т.е. зависимость координат x и y сканирующего светового пятна в плоскости светочувствительного материала от угла поворота θ зеркальной грани дефлектора. На рис. 1 представлена схема одномерной развертки изображения плоской вращающейся зеркальной гранью дефлектора (показана только одна грань). Падающий на зеркальную грань 1 световой пучок отражается от нее в точке A и фокусируется объективом 2 в точке B плоскости светочувствительного материала. При непрерывном изменении угла θ точка B перемещается по плоскости 3 и осуществляет запись точечно-растровой строки изображения по линии сканирования, которая в общем случае является кривой. Определим координаты точек линии сканирования с помощью методов матричной оптики [2].

Пусть S — орт падающего лазерного луча. Тогда орт S' луча, отраженного от зеркальной грани 1, определяется выражением

$$S' = MS, \quad (1)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} 1 - 2N_x^2 & -2N_xN_y & -2N_xN_z \\ -2N_xN_y & 1 - 2N_y^2 & -2N_yN_z \\ -2N_xN_z & -2N_yN_z & 1 - 2N_z^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

— матрица действия плоского зеркала; N_x , N_y и N_z — проекции нормали N к зеркальной грани дефлектора на оси x , y и z . В соответствии с рис. 1 имеем

$$N_x = -\cos \varphi \sin \theta, \quad N_y = -\sin \varphi, \quad N_z = \sin \varphi \cos \theta.$$

Тогда из выражения (1) с учетом формулы (2) найдем проекции на оси координат орта S' луча, отраженного от грани:

$$\begin{aligned} S'_x &= m_{11}S_x + m_{12}S_y + m_{13}S_z, \\ S'_y &= m_{21}S_x + m_{22}S_y + m_{23}S_z, \\ S'_z &= m_{31}S_x + m_{32}S_y + m_{33}S_z, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} m_{11} &= 1 - 2 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta, \quad m_{22} = \cos 2\varphi, \quad m_{33} = 1 - 2 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta, \\ m_{12} &= m_{21} = -\sin 2\varphi \sin \theta, \quad m_{13} = m_{31} = \cos^2 \varphi \sin 2\theta, \\ m_{23} &= m_{32} = \sin 2\varphi \cos \theta. \end{aligned}$$

В соответствии с рис. 1 оптическая ось фокусирующего объектива совпадает с осью z . Если принять, что объектив отстоит от начала координат на расстояние z_2 , то координаты точки B могут быть получены из выражения

$$\frac{x}{S'_x} = \frac{y}{S'_y} = \frac{z - z_2}{S'_z} = p. \quad (4)$$

Первые равенства в выражении (4) представляют собой записанные в параметрическом виде уравнения прямой, определяемой ортом S' в пространстве и проходящей через центр фокусирующего объектива (точку z_2). Последнее равенство является уравнением плоскости светочувствительного материала, т.е. плоскости, проходящей через точку z_3 перпендикулярно оси z . Параметр p определяет длину отрезка прямой между плоскостями объектива и светочувствительного материала. При взаимодействии дефлектора с параллельным лазерным пучком для того, чтобы плоскость светочувствительного материала являлась плоскостью наилучшей фокусировки, расстояние между объективом и светочувствительным материалом должно быть равно абсолютной величине фокусного расстояния объектива f , т.е. $z_3 - z_2 = f'S'_z$.

Полагая, что орт S образует с осями x, y, z углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ соответственно, т.е. что $S = \{\cos \alpha_1; \cos \alpha_2; \cos \alpha_3\}$, из формул (1)–(3) получим соотношения, определяющие функцию одномерного сканирования (траекторию перемещения точки B) вращающимся отражательным дефлектором (при использовании в оптической системе безабберационного фокусирующего объектива), которые в общем случае имеют вид

$$\begin{aligned} x_B &= \\ &= \frac{(1 - 2 \cos^2 \varphi \sin^2 \theta) \cos \alpha_1 - \sin 2\varphi \sin \theta \cos \alpha_2 + \cos^2 \varphi \sin 2\theta \cos \alpha_3}{\cos^2 \varphi \sin 2\theta \cos \alpha_1 + \sin 2\varphi \cos \theta \cos \alpha_2 + (1 - 2 \cos^2 \varphi \cos^2 \theta) \cos \alpha_3} f', \\ y_B &= \\ &= \frac{-\sin 2\varphi \sin \theta \cos \alpha_1 + \cos 2\varphi \cos \alpha_2 - \sin 2\varphi \cos \theta \cos \alpha_3}{\cos^2 \varphi \sin 2\theta \cos \alpha_1 + \sin 2\varphi \cos \theta \cos \alpha_2 + (1 - 2 \cos^2 \varphi \cos^2 \theta) \cos \alpha_3} f'. \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициент нелинейности строчной развертки характеризует изменение скорости перемещения светового пятна вдоль растровых строк и определяется выражением

$$K = \frac{v(\theta)}{v(\theta_0)} - 1, \quad (6)$$

где $v(\theta)$ — скорость строчной развертки при угле поворота дефлектора $\theta = \theta_0 + \omega t$; $v(\theta_0)$ — скорость строчной развертки при угле поворота θ_0 , принятом за начало отсчета.

Стрелка прогиба траектории сканирования характеризует отклонение растровых строк от прямолинейности в плоскости светочувствительного материала и определяется выражением

$$\Delta y = y(\theta) - y(\theta_0), \quad (7)$$

где $y(\theta)$ — отклонение линии развертки от оси x при текущем значении угла поворота дефлектора θ ; $y(\theta_0)$ — отклонение линии развертки от оси x при угле θ_0 .

Рассмотрим применение пирамидального и призмного отражательных дефлекторов в оптической системе лазерного сканирующего устройства с линзовым фокусирующим объективом (см. рис. 1).

Пусть зеркальная пирамида с углом наклона граней $\varphi = -\pi/4$ вращается с постоянной угловой скоростью ω , а орт S образует с осями координат углы $\alpha_1 = \pi/2$, $\alpha_2 = \pi$, $\alpha_3 = 3\pi/2$. Тогда $S = \{0; -1; 0\}$. Если за начало отсчета угла поворота зеркальной грани принять угол $\theta_0 = 0$, то из соотношений (5) получим

$$\begin{aligned} x_B &= -f' \operatorname{tg} \theta, \\ y_B &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Для призмного дефлектора, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω , угол φ равен нулю. Пусть орт S образует с осями координат углы $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 = \alpha_3 = \pi/2$. Тогда $S = \{1; 0; 0\}$. Если принять за начало отсчета угла поворота зеркальной грани угол $\theta = \pi/4$, то из соотношений (5) получим

$$\begin{aligned} x_B &= -f' \operatorname{tg} 2\theta, \\ y_B &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Знак “минус” в выражениях (8) и (9) указывает на то, что направление развертки растровой строки противоположно направлению оси x .

Коэффициент нелинейности строчной развертки в соответствии с выражением (6) для пирамидального дефлектора имеет вид

$$K_{\text{пир}} = \frac{1}{\cos^2 \theta} - 1 = \text{tg}^2 \theta,$$

а для призмного дефлектора —

$$K_{\text{пр}} = \text{tg}^2 2\theta.$$

Стрелки прогиба траектории сканирования в соответствии с выражением (7) для пирамидального и призмного дефлекторов имеют вид $\Delta y_{\text{пир}} = \Delta y_{\text{пр}} = 0$.

Таким образом, в рассматриваемых случаях наблюдается нелинейность закона строчной развертки, а развертываемые растровые строки прямолинейны. При этом коэффициенты $K_{\text{пир}}$ и $K_{\text{пр}}$ зависят от угла θ и с его увеличением возрастают. Эта особенность оптической системы лазерного сканирующего устройства из-за переменной скорости сканирования приводит, во-первых, к различной экспозиции отдельных элементов записываемой растровой строки, т.е. к разноплотности изображения, а во-вторых, к погрешности позиционирования отдельных элементов строки при их записи. Оба отмеченных фактора ухудшают качество получаемого изображения.

Для устранения недостатков в качестве изображения, связанных с нелинейностью строчной развертки, в лазерных устройствах применяются фокусирующие $f\theta$ -объективы, в которых для линеаризации нелинейности искусственно введена соответствующая дисторсия. Такие объективы обеспечивают высокую точность линеаризации закона строчной развертки.

Поскольку создать идеальный $f\theta$ -объектив не представляется возможным, то непостоянство скорости строчной развертки может быть компенсировано путем синхронизации сканирования.

С учетом допустимой разноплотности ΔD_{max} (обычно $\Delta D_{\text{max}} < 0,1$) изображения фотоформы можно сформулировать требование к линеаризации сканирования $f\theta$ -объективом. Действительно, изменение плотности почернения обработанной фотопленки при постоянной энергии, переносимой световым пучком, определяется из соотношения

$$\Delta D_{\text{max}} < \gamma \lg \frac{v_{\text{max}}}{v_{\text{ср}}},$$

где γ — коэффициент контрастности для данного фотоматериала и конкретных условий его проявления; v_{max} и $v_{\text{ср}}$ — соответственно максимальная и средняя скорости строчной развертки.

Рассмотрим влияние ошибок в углах наклона зеркальных граней дефлекторов на прямолинейность растровых строк. Пусть пирамидальный и призмный дефлекторы имеют угол наклона граней $\varphi = \varphi_n + \Delta\varphi$, где φ_n — номинальное значение угла наклона граней, $\Delta\varphi$ — ошибка в угле наклона. Тогда для пирамидального дефлектора в соответствии с ранее принятым направлением орта S и значением φ_n , т.е. при $\alpha_1 = \pi/2$, $\alpha_2 = \pi$, $\alpha_3 = 3\pi/2$ и $\varphi_n = -\pi/4$, из соотношений (5) получим

$$y_{\text{пир}} = -\frac{\text{tg } 2\Delta\varphi}{\cos \theta} f'. \quad (10)$$

Как видно из выражения (10), при ошибке в угле наклона граней $\Delta\varphi$ при записи растровой строки нарушается ее прямолинейность. При этом прогиб растровой строки увеличивается от центра записываемого изображения к его краям. Вследствие этого появляется ошибка в величине межстрочного расстояния, равная $\Delta y_{\text{пир}}$. Поскольку для каждой грани существует своя ошибка угла наклона $\Delta\varphi$, то нарушение прямолинейности растровых строк и отклонение от заданного межстрочного расстояния приводят к недопустимому с точки зрения качества записи наложению или расхождению растровых строк.

Задавая допуск $\Delta y_{\text{доп}}$ на возможное отклонение межстрочного расстояния, из выражения (10) найдем допустимую ошибку в угле наклона граней пирамидального дефлектора [3]:

$$\Delta\varphi_{\text{доп}} = -\frac{1}{2} \text{arctg} \left(\frac{\Delta y_{\text{доп}}}{f'} \cos \theta \right).$$

В связи с малостью величины $\Delta\theta$ можно полагать

$$\Delta\varphi_{\text{доп}} \approx -\frac{\Delta y_{\text{доп}}}{2f'} \cos \theta. \quad (11)$$

Для призмного дефлектора при $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \alpha_3 = \pi/2$ и $\varphi_n = 0$, т.е. при $\varphi = \Delta\varphi$, из выражений (6) и (8) получим

$$y_{\text{пр}} = -\frac{\sin 2\Delta\varphi}{2(1 - \sin^2 2\Delta\varphi) \cos \theta} f'. \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что при ошибке в углах наклона граней для призмного дефлектора так же, как и для пирамидального, нарушается прямолинейность растровых строк.

Решая уравнение (12) относительно $\Delta\varphi$ с учетом допуска $\Delta y_{\text{доп}}$, получим допустимую ошибку в угле наклона граней призмного дефлектора:

$$\Delta\varphi_{\text{доп}} = \frac{\Delta y_{\text{доп}}}{f'} \cos \theta. \quad (13)$$

Для примера проведем расчет допустимых ошибок в углах наклона граней дефлекторов. Пусть фокусное расстояние объектива составляет $f = 500$ мм, а допуск на отклонение межстрочного расстояния по абсолютной величине составляет $\Delta y = 0,0125$ мм, что соответствует примерно половине диаметра сканирующего светового пятна при разрешении 1200 dpi. С учетом выражений (11) и (13) максимально возможная ошибка в угле наклона граней появится при $\theta = 0$ и составит для пирамидального дефлектора

$$\Delta\varphi_{\text{доп}} = \frac{0,0125}{2 \cdot 500} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ рад},$$

или в градусной мере $\Delta\varphi = 2,6''$, а для призмного дефлектора эта ошибка составит $\Delta\varphi_{\text{доп}} = 30 \cdot 10^{-6} \text{ рад} = 6,2''$.

Таким образом, для обеспечения качественной записи изображения в лазерном сканирующем устройстве ошибка в угле наклона пирамидальных и призмных зеркальных дефлекторов должна составлять несколько угловых секунд.

Используя представленную методику, можно оценить влияние на процесс записи изображения ошибки в других плоскостях за счет неточности установки углов α_1 , α_2 и α_3 , а также определить суммарную погрешность в отклонении растровой строки от заданного положения по формуле

$$\Delta y_{\Sigma} = f \left(\frac{\partial \Delta y_B}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial \Delta y_B}{\partial \alpha_1} \Delta \alpha_1 + \frac{\partial \Delta y_B}{\partial \alpha_2} \Delta \alpha_2 + \frac{\partial \Delta y_B}{\partial \alpha_3} \Delta \alpha_3 \right), \quad (14)$$

где $\Delta \alpha_1$, $\Delta \alpha_2$, $\Delta \alpha_3$ — ошибки в углах направления орта S , связанные с неточностью установки дефлектора.

Применение в лазерных фотонаборных автоматах систем коррекции пространственного положения луча ослабляет требования к точности изготовления многогранных дефлекторов.

В настоящее время существуют лазерные фотонаборные автоматы, обеспечивающие запись изображения с очень высоким разрешением порядка 4000–5000 dpi, при этом размер сканирующего пятна составляет около 5 мкм, а запись соседних точечно-растровых строк происходит с перекрытием примерно в 1 мкм. Идеальная траектория сканирования в этом случае представляет собой прямую линию (рис. 2, а).

Расчеты функции сканирования при разрешении 5000 dpi, выполненные в соответствии с формулами (5), показывают, что отклонение угла наклона от зеркальной грани всего на 1-2 угловые секунды приводит к недопустимому схождению растровых строк (рис. 2, б). Отклонение положения каждой из двух соседних граней в разные стороны на

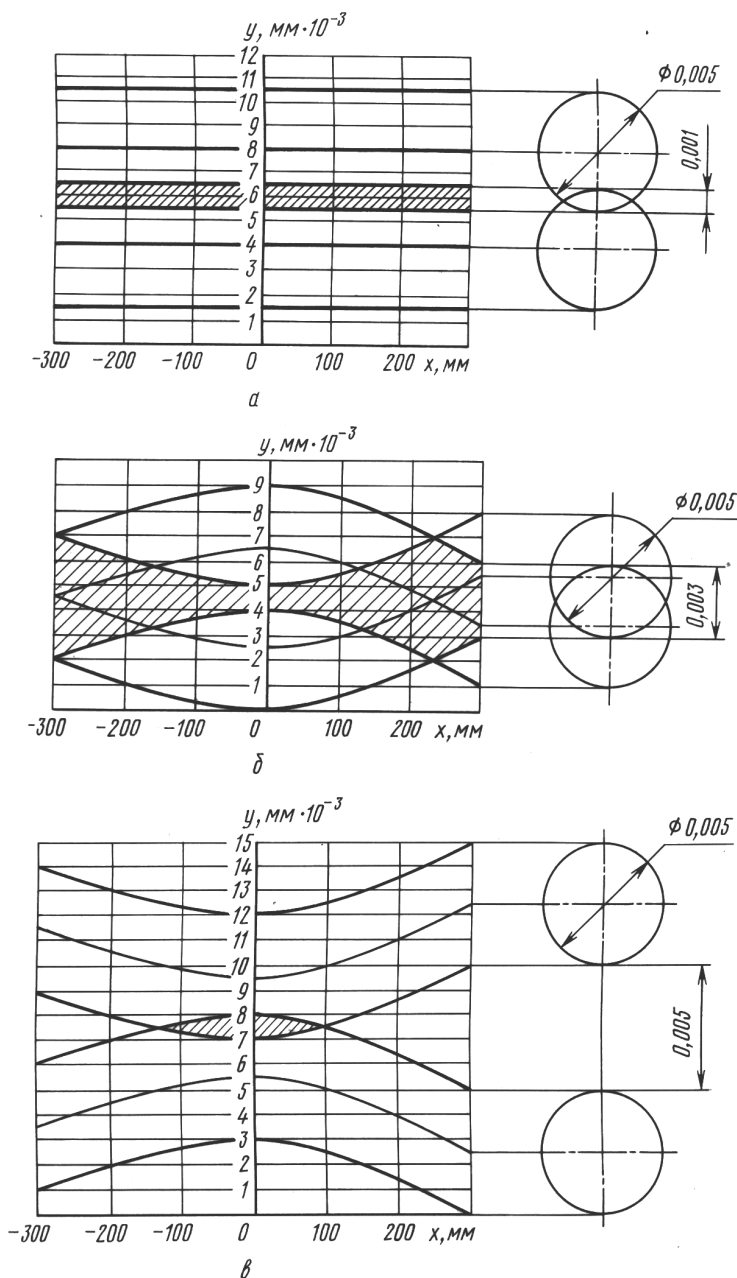


Рис. 2. Идеальная траектория сканирования (а), траектории сканирования при сходимости (б) и расхождении (в) растровых строк

1-2 угловые секунды приводит к недопустимому расхождению растровых строк (рис. 2, в).

Схождение и расхождение растровых строк существенно искажают получаемое изображение, особенно на краях формата, где схождение

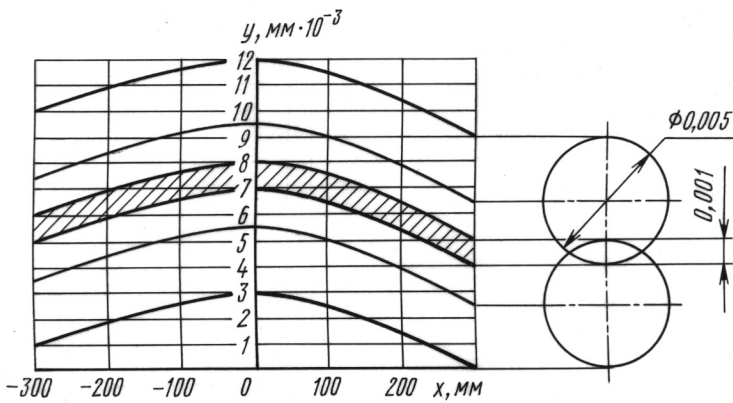


Рис. 3. Траектория сканирования одногранным плоским зеркалом

и расхождение строк больше, чем в центре. В связи с этим в фотонаборных автоматах с высокой линиатурой записи не рекомендуется применять многогранные зеркальные дефлекторы, а следует использовать качающееся или вращающееся зеркало. Ошибка в угле наклона одногранного зеркала приводит к нарушению прямолинейности растровых строк так же, как и в случае использования зеркального многогранника, но схождения и расхождения растровых строк не происходит (рис. 3).

В последних моделях лазерных фотонаборных автоматов с высокой линиатурой записи в качестве одногранного вращающегося дефлектора используется пентапризма, которая значительно менее чувствительна к неточности в установке, чем зеркало или прямоугольная призма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З е н к и н С. С. Оптико-механическая строчная развертка в лазерных записывающих устройствах // Оборудование и системы обработки текста: Сб. науч. трудов. – М.: ВНИИполиграфмаш, 1987.
2. Д ж е р р а р д А., Б е р г Д ж. М. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978.
3. С а м а р и н Ю. Н. Конструирование и расчет формного оборудования. – М.: Изд-во МГУП, 1999.

Статья поступила в редакцию 25.05.2004

Юрий Николаевич Самарин родился в 1949 г., окончил в 1972 г. Московский полиграфический институт. Зав. кафедрой автоматизации полиграфического производства Московского государственного университета печати. Автор более 170 научных работ в области разработки устройств ввода и вывода систем обработки текстовой и изобразительной информации.

Yu.N. Samarin (b. 1949) graduated from the Moscow Polygraphic Institute in 1972. Head of department for automation of printing process of the Moscow State University of Printing Trades. Author of more than 170 publications in the field of input/output devices for systems of processing textual and graphic information.