

Ющик О.В., Гаврыш Б.М.

Исследование функций передачи модуляции растровых сканирующих устройств записи в направлении быстрого сканирования

Ющик Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент,
Гаврыш Богдана Михайловна, старший преподаватель,
Украинская академия печати, г. Львов, Украина

Аннотация. В работе рассматриваются актуальные вопросы исследования функционирования растровых сканирующих устройств записи в направлении быстрого сканирования с помощью функций передачи модуляции.

Ключевые слова: растровое сканирующее устройство, сканирование, направление быстрого сканирования, функция передачи модуляции.

В растровых сканирующих устройствах (далее РСУ) записи, источник лазерного излучения разворачивается вдоль материала записи (фотопленка, светочувствительная бумага, заряженный фоторецептор или формный материал) вращающимся отклоняющим

устройством (дефлектором), который может быть многогранным, моногранным или гальванометрическим [1–2]. На рис. 1 представлена функциональная блок-схема типичного РСУ записи.



Рис. 1. Функциональная блок-схема РСУ записи

Источником лазерного излучения сканирует материал записи в направлении быстрого сканирования (х-направление), а материал записи перемещается в направлении медленного сканирования (у-направление) перпендикулярно к направлению быстрого сканирования. Допустим, что наша система изображения является линейной и, поэтому, рассмотрим характеристики системы, относительно слабых откликов.

В направлении быстрого сканирования основными ухудшающими эффектами функции передачи модуляции (далее ФПМ) являются [3]: временной отклик цифро-аналогового преобразователя (далее ЦАП) (включая любые блоки усиления); временной отклик модулятора; частотный отклик дефлектора; ошибки перемещения точки; ошибки расположения точки; ошибки фокусирования пикселя; частотный отклик материала записи.

Рассмотрим временной отклик ЦАП. ЦАП может рассматриваться как RC-цепочка, передаточная функция которой может быть представлена, как

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad (1)$$

где: $j = \sqrt{-1}$, а ω – угловая скорость ($\omega = 2\pi f$, f – временная частота); R – сопротивление и C – емкость эквивалентной цепочки. ФПМ ЦАП будет, в этом случае, амплитудой передаточной функции

$$\Phi_{ПМ_{ЦАП}}(\nu) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi\gamma_1 V_c \nu}{2,2}\right)^2}} \quad (2)$$

где ν является пространственной частотой; γ_1 является участком временного нарастания ЦАП от 10 до 90% и V_c является скоростью сканирования. С другой стороны, ФПМ ЦАП может быть аппроксимирована частотной функцией Гаусса

$$\Phi_{ПМ_{ЦАП}}(\nu) = e^{-3(\gamma_1 V_c \nu)^2}, \quad (3)$$

На рис. 2 приведены сравнительные ФПМ ЦАП рассчитанные с использованием двух различных моделей (уравнения 2 и 3).

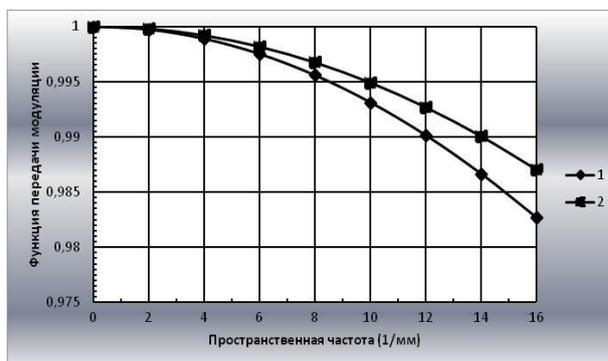


Рис. 2. Функция передачи модуляции цифро-аналогового преобразователя (1 – полученная согласно уравнения (2), 2 – полученная согласно уравнения (3))

Рассмотрим временной отклик модулятора. Предположим, что по отношению к входному источнику сигнала с импульсным откликом, определяемым интенсивностью I и случайным источником освещения, модулятор работает как линейная инвариантная система [4]. Для гауссового случайного луча светом радиусом r_1 , мы имеем

$$I_{1,вв} = I_0 \cdot e^{-2(V_m \cdot t / r_1)}, \quad (4)$$

где: I_0 – константа, V_m – быстродействие модулятора, t – время. ФПМ модулятора, поэтому, является Фурье-преобразованием $I_{1,вв}$, которое может быть выражено как

$$\Phi_{ПМ \text{ модулятора}}(\nu) = e^{-3(\gamma_2 V_c \nu)^2}, \quad (5)$$

где γ_2 – временной отклик модулятора, выражаемый как

$$\gamma_2 = \pi r_1 / (\sqrt{6} \cdot V_m), \quad (6)$$

На рис. 3 представлена ФПМ типичного модулятора с 53-нсек временным откликом для двух различных значений V_c . Как и ожидалось, с увеличением скорости сканирования, ФПМ модулятора уменьшается.

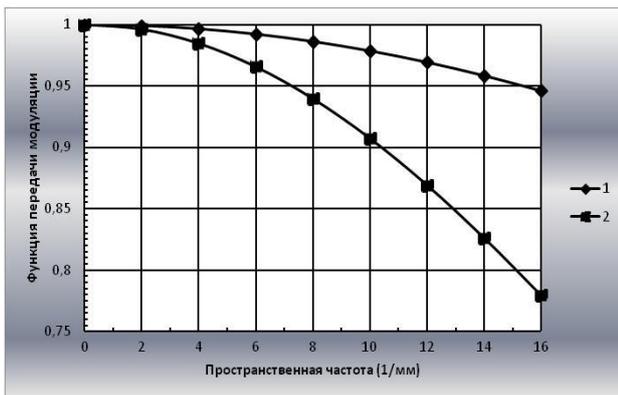


Рис. 3. Функция передачи модуляции модулятора

Рассмотрим частотный отклик дефлектора. В сканере с бегущим лучом и дообъективной оптикой, сканирующая точка, разворачиваемая вдоль материала записи, вначале преломляется апертурой дефлектора, а затем фокусируется в дифракционно ограниченный профиль интенсивности. Интенсивность сканирующей точки модулируется входными сигналами. Используя некогерентный анализ изображений [5, 6], ФПМ дефлектора может быть представлена, как автокорреляционная функция профиля амплитуды света появляющегося после дефлектора $A_{2,вых}$

$$\Phi_{ПМ \text{ дефлектора}}(\nu) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} A_{2,вых} \left(\eta - \frac{\lambda F \nu}{2} \right) \cdot A_{2,вых} \left(\eta + \frac{\lambda F \nu}{2} \right) d\eta}{\int_{-\infty}^{+\infty} |A_{2,вых}(\eta)|^2 d\eta}, \quad (7)$$

где: η – пространственная координата в дефлекторе, λ – длина волны света и F – эквивалентное фокусное расстояние фокусирующей оптики.

Для прямоугольной апертуры шириной W (как у полигонального зеркала), освещаемой гауссовским нормальным лучом радиусом r_2 , мы будем иметь

$$A_{2,вых}(\eta) = A_0 \cdot e^{-\left(\frac{\eta}{r_2}\right)^2} \cdot \text{rect}\left(\frac{\eta}{W}\right), \quad (8)$$

где: A_0 – константа, а $\text{rect}(\cdot)$ является прямоугольной функцией.

Подставляя уравнение (8) в уравнение (7) и выполнив интегрирование, мы получим

$$\Phi_{ПМ \text{ дефлектора}}(\nu) = \frac{e^{-\left(\sqrt{2} T_r \nu / v_{c0}\right)^2} \cdot \text{erf}\left[\sqrt{2} T_r (1 - \nu / v_{c0})\right]}{\text{erf}\left(\sqrt{2} T_r\right)}, \quad (9)$$

где: T_r – отношение ширины апертуры к диаметру луча

$$T_r = \frac{W}{2r_2}, \quad (10)$$

v_{c0} – предельная частота, определяемая как пространственная частота до или после которой ФПМ равна нулю

$$v_{c0} = \frac{W}{2r_2}, \quad (11)$$

$\text{erf}(\cdot)$ является функцией ошибок.

Рассмотрим граничные случаи уравнения (9).

При нулевой частоте, ФПМ единственна.

При предельной частоте (v_{c0}), ФПМ дефлектора равна нулю.

Для $T_r = 1$ (перекрываемая апертура), ФПМ дефлектора может быть аппроксимирована

$$\Phi_{ПМ \text{ дефлектора}}(\nu) = 1 - \nu / v_{c0}, \quad (12)$$

Это известная треугольная ФПМ для сплошной освещенной прямоугольной апертуры коллимированным лучом [5].

Для $T_r \gg 1$ (неперекрываемая апертура), ФПМ дефлектора будет равна

$$\Phi_{ПМ \text{ дефлектора}}(\nu) = e^{-\left(\sqrt{2} T_r \nu / v_{c0}\right)^2}, \quad (13)$$

Для дифракционно ограниченного гауссовского пятна, радиус луча у дефлектора (r_2) и радиус луча на изображении ($r_x = 2\sigma_x$) соотносятся как

$$r_x = \frac{\lambda F}{\pi r_2}, \quad (14)$$

Используя уравнения (10), (11) и (14) ФПМ дефлектора можно упростить до

$$\Phi_{ПМ \text{ дефлектора}}(\nu) = e^{-2(\pi \sigma_x \nu)^2}, \quad (15)$$

Этот результат идентичен ФПМ гауссовой точки радиуса $2\sigma_x$ в плоскости изображения.

Рассмотрим влияние ошибок перемещения точки. После разворачивания одной строки сканирования,

сканирующее пятно перемещается на расстояние p , (являющееся шагом растра, обратно пропорциональной величине разрешающей способности в направлении медленного сканирования $R_y, p=1/R_y$). ФПМ снижается из-за такого линейного перемещения и может быть представлена, как

$$\Phi_{ПМ}_{перемещения}(v) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{p}\right) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot x} dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{p}\right) dx} \quad (16)$$

Уравнение (16) можно упростить до

$$\Phi_{ВП}_{перемещения}(v) = \frac{\sin(\pi \rho v)}{(\pi \rho v)} = \text{sinc}(\rho v), \quad (17)$$

Это известная sinc-функция частотного отклика для линейно перемещающихся изображений [3]. Из уравнения (17) мы получим, что на растровой частоте v_s , равной удвоенной частоте Найквиста $v_N (v_s = 2 \cdot v_N = 1/p)$, ФПМ становится равной нулю. ФПМ для шести различных значений смещения пятна приведена на рис. 4.

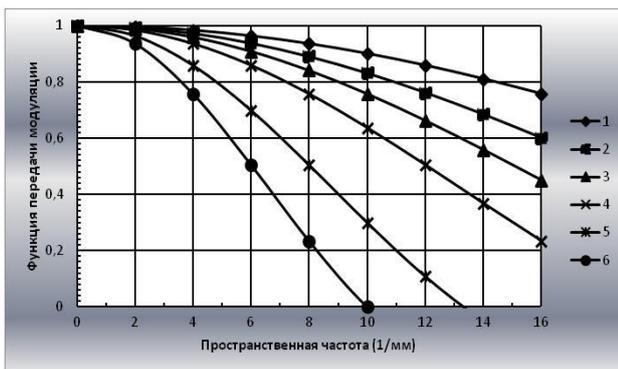


Рис. 4. Влияние смещения пятна на функцию передачи модуляции (1 – $p = 25$ мкм, 2 – $p = 33$ мкм, 3 – $p = 40$ мкм, 4 – $p = 50$ мкм, 5 – $p = 7$ мкм, 6 – $p = 100$ мкм)

Рассмотрим влияние ошибок расположения пикселей. Допустим, что все неточности расположения пикселей мы можем описать одиночным синусоидальным возмущением (вибрацией). Функция распределения линии под такой вибрацией может быть представлена как [3]

$$I(x) = \frac{2}{\pi a (1 - 4x^2/a^2)^{1/2}}, \quad (18)$$

где: a – амплитуда смещения пиков. Исходя из этого, ФПМ является Фурье-преобразованием функции распределения линии и может быть записана как

$$\Phi_{ПМ}_{расположения}(v) = J_0(\pi a v), \quad (19)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка первого вида

Понимание величины смещения a в уравнении (19) основано на том, что 50% потерь ФПМ может случиться на растровой частоте (или 14% потерь на частоте Найквиста). Поэтому из уравнения (19) мы имеем

$$a = \frac{1,521}{\pi(1/p)}, \quad (20)$$

где p – шаг растра. Это значит, что все пиксели должны быть позиционированы в пределах половины пикселя.

Рассмотрим влияние дефокусирования на ФПМ дефлектора для случая неперекрывающейся апертуры, используемой в большинстве РСУ вывода. Если размер лазерного луча значительно меньше ширины апертуры ($r_x \ll 1$), профиль интенсивности фокусируемого лазерного пятна в плоскости изображения может быть аппроксимирован функцией Гаусса. Предположим, что благодаря фокальному смещению, размер пятна увеличивается на величину фактора ρ_x , который определяется как

$$\rho_x = \frac{r'_x}{r_x}, \quad (21)$$

где r'_x и r_x (равное $2\sigma_x$) являются внефокусным и внутрифокусным радиусами лучей, соответственно. Поскольку, внефокусное пятно является также функцией Гаусса, ФПМ дефокусирования является просто Гауссовой функцией частоты

$$\Phi_{ПМ}_{дефокусирования}(v) = e^{-2(\pi \sigma_x v)^2 (\rho_x^2 - 1)}, \quad (22)$$

Рассмотрим частотный отклик материала записи. В большинстве РСУ записи используются высококонтрастные фототехнические материалы. На рис. 5 представлена ФПМ для высококонтрастных и сверхвысококонтрастных фототехнических пленок. Ухудшение ФПМ системы из-за материала записи можно считать незначительным, т.е.

$$\Phi_{ПМ}_{материала записи}(v) = 1, \quad (23)$$

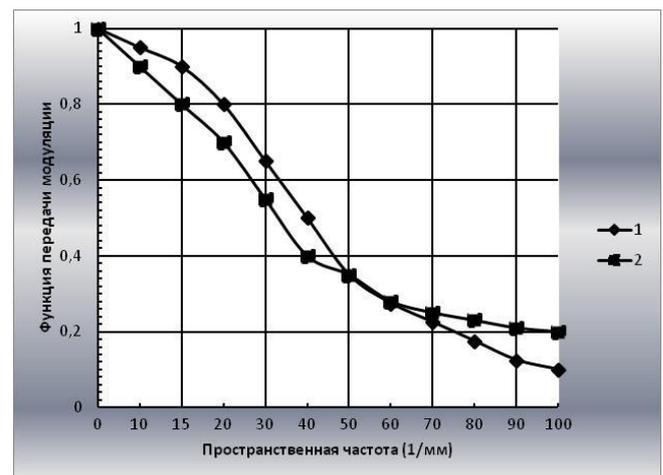


Рис. 5. Функции передачи модуляции фототехнических пленок (1 – высококонтрастной, 2 – сверхвысококонтрастной)

Рассмотрим теперь общую ФПМ системы в направлении быстрого сканирования. Каскадно соединяя приведенные выше основные эффекты ухудшения, можно записать общую ФПМ системы в

направлении быстрого сканирования $\Phi_{ПМ_x}(v)$, как производную ФПМ этих эффектов

$$\Phi_{ПМ_x}(v) = \Phi_{ПМ_{ЦАП}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{модулятора}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{дефлектора}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{перемещения}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{расположения}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{дефокусирующая}}(v) \cdot \Phi_{ПМ_{материала записи}}(v). \quad (24)$$

Выводы. Исследованы функции передачи модуляции составных устройств РСУ записи. Разработан метод определения оптимального режима функционирования РСУ записи в направлении быстрого сканирования.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Темников Ф.Е., Славинский В.Л. Математические развертывающие системы.- М.: Энергия, 1970, 120 с.
Temnikov F.Ye., Slavinskiy V.L. Matematicheskiye razvertvyayushchiye sistemy [Deploying of mathematical system].- M.: Energiya, 1970, 120 s.
2. Темников Ф.Е. Методы и модели развертывающих систем.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Энергоатомиздат. 1987.-136 с.
Temnikov F.Ye. Metody i modeli razvertvyayushchikh sistem [Methods and models for deploying systems].- 2-ye izd., pererab. i dop.- M.: Energoatomizdat. 1987.-136 s.
3. Firth R., Kessler D., Muka E., Naor M., Owens J. / A continuous-tone laser color printer.// Journal of Imaging Technology. v.14, 1988, P.78-89.
4. Johnson R.V. / Temporal response of the acousto-optic modulator: geometrical optics model in the low scattering limit// Applied Optics, v.16, 1977, P.507-514.63.
5. Goodman J.W./ Introduction to Fourier optics // McGraw-Hill, San Francisco, Chap.6, 1968, P.101-140.
6. Randolph J., Morrison J./ Modulation transfer characteristics of an acoustic to deflector. // Applied Optics, v.10, 1971, P.1383-1385.

Yushchyk O.V., Gavrysh B.M.

Modulation Transfer Functions in Fast Direction of Recording Raster Scanning Devices Investigation

Abstract. The paper deals to actual questions of quick scan recording raster scanning devices research with the help of the modulation transfer function.

Keywords: raster scanning device, scanning, fast direction scanning, modulation transfer function.