

УДК 621.391.6

В. Я. Колючкин, Г. М. Мосягин,  
Н. Х. Ван

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

*Представлен метод математического моделирования информационных оптико-электронных приборов, позволяющий учесть взаимосвязь эффектов пространственной и временной дискретизации при сканировании и формировании выходного изображения. Приведен пример применения данного метода при решении задачи анализа оптико-электронных приборов наблюдения, в которых реализуются прогрессивный и чересстрочный законы сканирования и развертки изображения. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров законов сканирования и развертки изображения.*

Особенностью большинства информационных оптико-электронных приборов (ОЭП) является то, что преобразование сигналов в этих приборах осуществляется в процессе сканирования и сопровождается эффектами пространственной и временной дискретизации. Пространственно-временная дискретизация присуща как ОЭП, в которых реализуется оптико-механическое сканирование, так и ОЭП с фокальными матричными приемниками излучения (в последних осуществляется электронное мультиплексирование накопленных за время экспозиции сигналов, которое можно рассматривать как электронное сканирование).

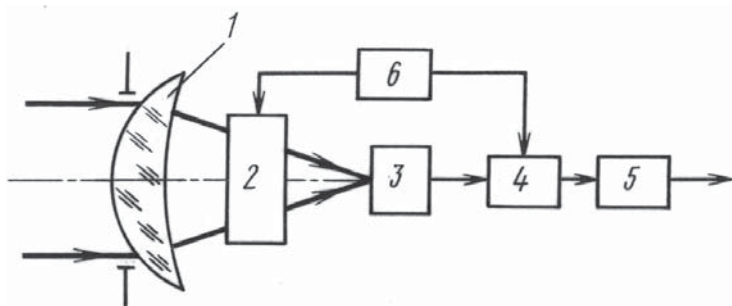
Указанная особенность обуславливает трудности модельного математического описания информационных ОЭП. Чтобы обойти эти трудности, обычно используют допущения, упрощающие решение задачи математического моделирования. Например, в работах [1–3] сканирование рассматривается как одномерный процесс при допущении об отсутствии пространственной дискретизации оптического сигнала. В работе [4] сканирование представляется как двумерный процесс, но не учитываются временные соотношения при сканировании. И тот, и другой методы модельного описания тракта первичной обработки сигналов информационных ОЭП не позволяют в полной мере учесть существующую пространственно-временную взаимосвязь сигналов и помех, что особенно важно для ОЭП наблюдения, в том числе для телевизионных и тепловизионных приборов.

Известно [4, 5], что в зрительной системе человека осуществляется пространственная и временная фильтрация сигналов. Поэтому пространственные и временные параметры закона сканирования могут оказывать значительное влияние на качество воспринимаемого оператором изображения.

В настоящей работе излагается метод модельного математического описания информационных ОЭП с системами оптико-механического и электронного сканирования, позволяющий учесть пространственно-временную связь процессов преобразования сигналов. Основное допущение, которое используется в данном методе, — это допущение о линейности звеньев тракта ОЭП. Кроме этого, не рассматривается преобразование аддитивного шума приемника излучения и электронного тракта. Согласно традиционной постановке задачи анализа, характеристики и параметры входного сигнала от объектов и фона, а также характеристики и параметры элементов функциональной схемы ОЭП считаются известными.

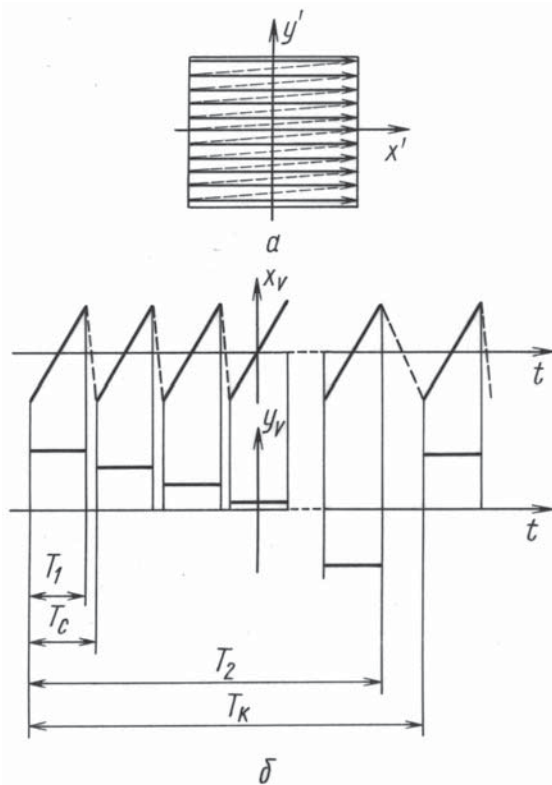
Рассмотрим преобразование сигнала в некотором обобщенном информационном ОЭП наблюдательного типа, в котором сканирование пространства осуществляется оптико-механическим способом в направлении строк и в направлении, перпендикулярном строкам, — по кадру. Функциональная схема такого ОЭП представлена на рис. 1.

В ОЭП подобного типа сканирование, обработка сигналов и развертка изображения на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ) может осуществляться различными способами [4, 5]. Пусть в приемной части ОЭП осуществляется циклическое построчное сканирование одноэлементным приемником излучения (ПИ) (рис. 2, а), и синхронно со сканированием осуществляется развертка на экране ВКУ телеви-



**Рис. 1. Обобщенная функциональная схема информационного ОЭП сканирующего типа:**

1 — оптическая система; 2 — блок оптико-механического сканирования; 3 — приемник излучения; 4 — электронный тракт; 5 — видеоконтрольное устройство; 6 — система синхронизации



**Рис. 2. Графики, иллюстрирующие  
построчный закон сканирования**

зионного типа. Закон сканирования, при котором осуществляется построчное сканирование и развертка изображения, называется прогрессивным. Прогрессивный закон сканирования и развертки описывается системой параметрических уравнений, которые в графическом виде представлены на рис. 2, б:

$$\begin{aligned}
 x_v(t) &= \left( \left( \text{rect} \left( \frac{t}{T_1} \right) V_x t \right) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb} \left( \frac{t}{T_c} \right) \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T_2} \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb} \left( \frac{t}{T_k} \right), \\
 y_v(t) &= \left( \left( \text{rect} \left( \frac{t}{T_2} \right) \frac{1}{T_c} \text{comb} \left( \frac{t}{T_c} \right) V_y t \right) \otimes \text{rect} \left( \frac{t}{T_1} \right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb} \left( \frac{t}{T_k} \right),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $T_1$  — интервал времени сканирования по строке;  $T_c$  — период сканирования по строке;  $T_2$  — интервал времени сканирования по кадру;  $T_k$  — период следования кадров;  $V_x$  — линейная скорость сканирования по строке;  $V_y = T_y/T_c$  — линейная скорость сканирования по кадру;  $T_y$  — расстояние между строками;  $\otimes$  — интегральная операция свертки.

В интервалы времени  $T_c - T_1$  и  $T_k - T_2$ , которые соответствуют обратному ходу сканирования, в электронном тракте производится обнуление сигнала. Таким образом, преобразование сигнала при построчно-кадровом сканировании сопровождается амплитудной модуляцией этого сигнала, что необходимо учитывать при математическом моделировании.

Для удобства математического описания процессов преобразования сигнала в тракте сканирующего информационного ОЭП, представленного на рис. 1, синтезируем структурную схему модели этого прибора на системотехническом уровне [6, 7]. В соответствии с постановкой задачи, рассматриваемой в настоящей работе, в этой структурной схеме модели информационного ОЭП не учтено действие аддитивных помех элементов тракта.

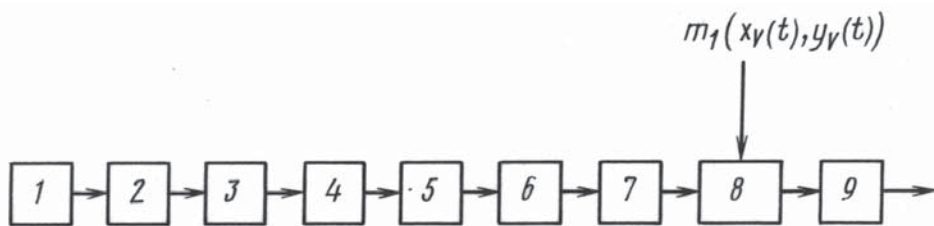
В структурной схеме, представленной на рис. 3, модель источника сигнала  $I$  описывает свойства излучения наблюдаемого объекта. Сигналом от объекта, наблюдаемого на равномерном фоне, в этой системе является приращение спектральной яркости объекта. Будем считать, что этот сигнал можно представить в виде

$$\Delta L_\lambda(x, y, t, \lambda) = \Delta L_\lambda(\lambda) L_n(x, y, t), \quad (2)$$

где  $\Delta L_\lambda(\lambda)$  — приращение спектральной яркости,  $L_n(x, y, t)$  — нормированное пространственно-временное распределение яркости наблюдаемого объекта.

Модели оптической системы 2 и фильтра 3 описывают преобразование входного оптического сигнала в распределение спектральной освещенности

$$\Delta E_\lambda(x', y', t, \lambda) = \pi \sin^2 \sigma'_{A'} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) s_{отн}(\lambda) \Delta L_\lambda(\lambda) \times \\ \times L_n\left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}, t\right) \otimes H_{\lambda o}(x', y'), \quad (3)$$



**Рис. 3. Структурная схема модели ОЭП, в котором реализуется построчный закон сканирования:**

1 — источник оптического сигнала; 2 — оптическая система; 3 — оптический фильтр; 4 — пространственный фильтр; 5 — ПИ; 6, 7 — временные фильтры; 8 — модулятор; 9 — пространственный фильтр

где  $x', y'$  — координаты в плоскости изображения оптической системы;  $\sigma'_{A'}$  — задний апертурный угол оптической системы;  $\tau_o(\lambda)$  и  $\tau_a(\lambda)$  — спектральные коэффициенты пропускания оптической системы и атмосферы соответственно;  $s_{\text{отн}}(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность ПИ;  $\beta$  — линейное увеличение оптической системы;  $H_{\lambda_0}$  — спектральный импульсный отклик оптической системы.

Если ввести понятие полихроматической функции рассеяния и использовать модельное представление ПИ в виде композиции пространственного фильтра с импульсным откликом  $H_{\text{ПИ}}(x_V, y_V)$  и временного апериодического звена с импульсным откликом  $H'_{\text{ПИ}}(t)$  [7], то сигнал на выходе линейного электронного тракта, линейные искажения которого характеризуются импульсным откликом  $H_s(t)$ , представляется в виде

$$U_2(x_V, y_V, t) = U_1(x_V, y_V, t) \otimes \frac{1}{V_x} H'_{\text{ПИ}}\left(\frac{x_V}{V_x}\right) \otimes \frac{1}{V_x} H_s\left(\frac{x_V}{V_x}\right); \quad (4)$$

здесь

$$U_1(x_V, y_V, t) = k_1 \Delta E_n(x_V, y_V, t) * H_{\text{ПИ}}(x_V, y_V) \quad (5)$$

— сигнал на выходе ПИ (поз. 5 на рис. 3);

$$\Delta E_n(x', y', t) = L_n\left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}, t\right) \otimes H_N(x', y') \quad (6)$$

— нормированная освещенность в плоскости изображения оптической системы;  $H_N(x', y')$  — нормированная полихроматическая функция рассеяния оптической системы;

$$k_1 = \pi \sin^2 \sigma'_{A'} A_{\text{ПИ}} s_{\lambda \text{max}} \int_0^{\infty} \Delta L_{\lambda}(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) s_{\text{отн}}(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

— коэффициент, численно равный амплитуде  $\Delta U_{\text{max}}$  полезного сигнала от объекта без учета линейных искажений, которые вносят звенья тракта ОЭП;  $A_{\text{ПИ}}$  — площадь чувствительного элемента;  $s_{\lambda \text{max}}$  — максимальное значение спектральной чувствительности элемента; \* — интегральная операция взаимной ковариации.

Представление сигнала на выходе электронного тракта функцией трех переменных  $x_V, y_V$  и  $t$  позволяет учесть существующую при сканировании взаимосвязь между пространственными и временными координатами, так как  $x_V$  и  $y_V$  являются функциями времени  $t$ . Однако анализ сигнала, описываемого функцией таких сложных аргументов, какими являются  $x_V$  и  $y_V$ , крайне затруднен. Поэтому при дальнейшем анализе предлагается воспользоваться тем, что в процессе сканирования сигнал модулируется по амплитуде. Амплитудная модуляция осуществляется таким образом, что отличный от нуля сигнал формируется

только в пересекающиеся интервалы времени  $T_1$  и  $T_2$ , когда происходит сканирование в пределах заданного поля. Из формул (1) и (2) следует, что в пределах этих интервалов координаты сдвига  $x_V$  и  $y_V$  линейно зависят от времени  $t$ . Следовательно, при выбранном методе описания сигнала в тракте ОЭП сканирующего типа необходимо учитывать то, что амплитудная модуляция сигнала осуществляется по каждой из координат сдвига  $x_V$  и  $y_V$  при сканировании. Поэтому модулирующую функцию  $m(t)$  можно представить в виде произведения модулирующих функций  $m_x(t)$  и  $m_y(t)$ :

$$m(t) = m_1(x_V(t), y_V(t)) = m_x(t)m_y(t), \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} m_x(t) &= \left( \left( \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right), \\ m_y(t) &= \left( \left( \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Модулирующие функции  $m_x(t)$  и  $m_y(t)$  определяются на основе соответствующих параметрических уравнений (1), описывающих закон сканирования.

Если учесть амплитудную модуляцию сигнала, то сигнал на выходе модулятора  $\delta$  (см. рис. 3) можно представить в виде

$$\begin{aligned} U_3(x_V, y_V, t) &= U_2(x_V, y_V, t)m_1(x_V, y_V) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_2(V_x\tau_1, V_y\tau_2, t) \text{rect}\left(\frac{\tau_1}{T_1}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t_1 - \tau_1}{T_c}\right) \times \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{t_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - t_1}{T_k}\right) d\tau_1 dt_1 \text{rect}\left(\frac{\tau_2}{T_2}\right) \times \\ &\quad \times \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{\tau_2}{T_c}\right) \text{rect}\left(\frac{t_2 - \tau_2}{T_1}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - t_2}{T_k}\right) d\tau_2 dt_2. \end{aligned} \quad (10)$$

Сигнал на выходе ОЭП формируется на экране ВКУ телевизионного типа в процессе модуляции видеосигналом (10) плотности тока пучка электронов, фокусируемых на экране и вызывающих его свечение. В линейном приближении яркость свечения экрана определяется коэффициентом передачи  $S_{\text{ВКУ}}$ , а распределение энергии в пятне рассеяния на экране описывается пространственным импульсным откликом

$H_{\text{ВКУ}}(x_2, y_2)$ , где  $x_2, y_2$  — координаты в плоскости выходного изображения (на экране ВКУ). С достаточной степенью точности функция рассеяния телевизионного монитора аппроксимируется двумерной функцией Гаусса

$$H_{\text{ВКУ}}(x_2, y_2) = \frac{1}{A_{\text{ВКУ}}} \exp\left(-\frac{x_2^2 + y_2^2}{2r_{\text{ВКУ}}^2}\right), \quad (11)$$

где  $A_{\text{ВКУ}} = 2\pi r_{\text{ВКУ}}^2$  — эффективная площадь пятна рассеяния,  $r_{\text{ВКУ}}$  — эффективный радиус пятна рассеяния ВКУ.

Пятно рассеяния перемещается по поверхности люминофора экрана ВКУ синхронно и в соответствии с законом сканирования (1). Если пренебречь масштабными соотношениями между плоскостью изображения оптической системы ОЭП и плоскостью изображения на экране ВКУ, то выходной сигнал можно представить в виде

$$L_{\text{ВКУ}}(x_2, y_2, t) = S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}} H_{\text{ВКУ}}(x_2 - x_V, y_2 - y_V) U_2(x_V, y_V) m_1(x_V, y_V). \quad (12)$$

С учетом соотношений, использованных при выводе выражения (10), формулу (12) можно представить в виде, более удобном для дальнейшего анализа:

$$\begin{aligned} L_{\text{ВКУ}}(x_2, y_2, t) = & \\ = S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_{\text{ВКУ}}(x_2 - V_x \tau_1, y_2 - V_y \tau_2) U_2(V_x \tau_1, V_y \tau_2, t) \times \\ & \times \text{rect}\left(\frac{\tau_1}{T_1}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t_1 - \tau_1}{T_c}\right) \text{rect}\left(\frac{t_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - t_1}{T_k}\right) d\tau_1 dt_1 \times \\ & \times \text{rect}\left(\frac{\tau_2}{T_2}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{\tau_2}{T_c}\right) \text{rect}\left(\frac{t_2 - \tau_2}{T_2}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - t_2}{T_k}\right) d\tau_2 dt_2. \quad (13) \end{aligned}$$

Если вычислить трехмерное преобразование Фурье для выражения (13), то получим следующее выражение для пространственно-временного спектра сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется сканирование по двум координатам:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{\text{ВКУ}}(\nu_x, \nu_y, \nu) = & \frac{\eta_c \eta_k S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}}}{T_y V_x T_k} \tilde{H}_{\text{ВКУ}}(\nu_x, \nu_y) \times \\ & \times \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \sum_{p,r=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\pi T_2 \left(\frac{p}{T_k} - \frac{m}{T_c}\right)\right) \text{sinc}\left(\pi r \frac{T_1}{T_k}\right) \times \\ & \times \tilde{U}_4\left(\nu_x + \frac{m}{V_x T_c}, \nu_y + \frac{r}{V_y T_k} - \frac{n}{T_y}, \nu - \frac{p+r}{T_k}\right), \quad (14) \end{aligned}$$

где  $\eta_c = T_1/T_c$  — коэффициент использования сканирующего устройства для сканирования по строке;  $\eta_k = T_2/T_k$  — коэффициент использования сканирующего устройства для сканирования по кадру;

$$\tilde{U}_4(\nu_x, \nu_y, \nu) = \mathfrak{F}_{xyt} \left\{ U_2(V_x \tau_1, V_y \tau_2, t) \operatorname{rect} \left( \frac{V_x \tau_1}{V_x T_1} \right) \operatorname{rect} \left( \frac{V_y \tau_2}{V_y T_2} \right) \right\} \quad (15)$$

— пространственно-временной спектр сигнала, ограниченного в пределах поля сканирования.

В формуле (14) связь между пространственными и временными составляющими сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется прогрессивный закон сканирования с прогрессивной разверткой изображения, выражена через соответствующие индексы суммирования. Несложно показать, что при достаточно высокой частоте следования кадров формула (14) может быть существенно упрощена, если учесть инерционность зрительного восприятия. Инерционные свойства зрительного восприятия человека принято описывать аperiodическим звеном с передаточной функцией

$$\tilde{H}_{зп}(\nu) = \frac{1}{1 + i2\pi\nu\tau_{зп}} \quad (16)$$

при постоянной времени  $\tau_{зп} = 0,1 \dots 0,2$  с [4, 8]. Если частота следования кадров составляет  $\nu_k = 1/T_k = 25$  Гц, то имеем  $|\tilde{H}_{зп}(\nu_k)| \leq 0,064$ , при этом человек практически не замечает мелькания кадров.

Если учесть инерционность зрительного восприятия, то в формуле (14) можно пренебречь составляющими спектра сигнала при значениях индексов суммирования  $p \geq 1$ ,  $r \geq 1$  и  $m \geq 1$ . Тогда формулу (14) приближенно можно представить в виде следующего выражения:

$$\tilde{L}_{ВКУ}(\nu_x, \nu_y, \nu) \approx \frac{\eta_c \eta_k S_{ВКУ} A_{ВКУ}}{T_y T_k V_x} \tilde{H}_{ВКУ}(\nu_x, \nu_y) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{U}_4 \left( \nu_x, \nu_y - \frac{n}{T_y}, \nu \right); \quad (17)$$

здесь

$$\begin{aligned} \tilde{U}_4(\nu_x, \nu_y, \nu) = \\ = k_1 \tilde{L}_{н1}(\beta\nu_x, \beta\nu_y, \nu) \tilde{H}_N(\nu_x, \nu_y) \tilde{H}_{ПИ}(\nu_x, \nu_y) \tilde{H}'_{ПИ}(\nu_x V_x) \tilde{H}'_3(\nu_x V_x); \end{aligned} \quad (18)$$

$$\tilde{L}_{н1}(\beta\nu_x, \beta\nu_y, \nu) = \mathfrak{F} \left\{ L_n \left( \frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta} \right) \operatorname{rect} \left( \frac{x'}{T_1 V_x}, \frac{y'}{T_2 V_x} \right) \right\}$$

— спектр сигнала, приведенного к плоскости изображения оптической системы и ограниченного в пределах поля обзора ОЭП.



При допущении о полной фильтрации временных составляющих сигнала в выражении (17) присутствуют только те дополнительные составляющие спектра, которые обусловлены дискретизацией сигнала по координате  $y'$  при прогрессивном законе сканирования.

Представленный метод математического моделирования может быть использован для анализа информационных ОЭП, в которых реализуются любые законы сканирования, в том числе параллельное сканирование линейкой ПИ [9] или электронное сканирование сигналов, накопленных в фокальных матричных приемниках излучения. Практический интерес представляет сравнительный анализ информационных ОЭП, в которых реализуются прогрессивный и чересстрочный законы сканирования. Целью такого анализа является определение условий, при которых использование одного из методов было бы предпочтительнее.

При чересстрочно-построчном законе сканирования полный кадр формируется из двух или большего числа неполных кадров (зон). В каждой зоне сканирование производится с разрежением строк, т.е. с увеличенным расстоянием между строками. Разрежение строк производится во столько раз, во сколько раз частота следования неполных кадров больше частоты следования кадров. Обычно в телевизионных системах полный кадр состоит из двух зон — полукадров. В некоторых тепловизионных системах используют методы чересстрочного сканирования, в которых полный кадр состоит из четырех и более разреженных зон [2].

Получим выражение, описывающее сигнал на выходе информационного ОЭП, в котором реализованы чересстрочно-построчный закон сканирования и развертки изображения за два полукадра. Структурная схема модели такого ОЭП ничем не отличается от структурной схемы модели ОЭП, в котором осуществляется прогрессивный закон сканирования (см. рис. 3). Различия модельного описания этих приборов обусловлены отличиями законов сканирования.

Указанный закон сканирования и, соответственно, развертки изображения описывается системой параметрических уравнений

$$\begin{aligned}x_V &= x_V(t), \\y_V &= y_{V1}(t) + y_{V2}(t),\end{aligned}\tag{19}$$

которые соответствуют графикам, представленным на рис. 4.

Уравнение, описывающее сканирование по строке (по оси  $x'$ ), имеет вид

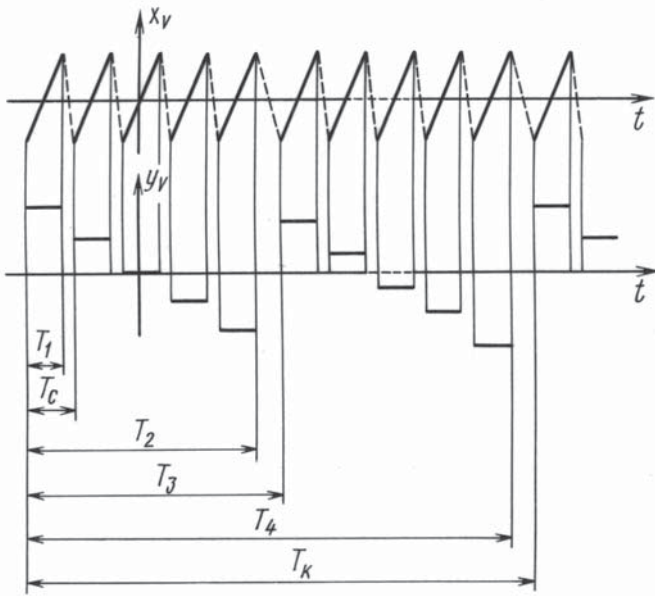


Рис. 4. Графики, иллюстрирующие чересстрочно-построчный закон сканирования

$$x_V(t) = \left( \left( \left( \left( \left( \text{rect} \left( \frac{t}{T_1} \right) V_x t \right) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb} \left( \frac{t}{T_c} \right) \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T_2} \right) \right) \otimes \frac{1}{T_3} \text{comb} \left( \frac{t}{T_3} \right) \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T_4} \right) \right) \otimes \frac{1}{T_K} \text{comb} \left( \frac{t}{T_K} \right), \quad (20)$$

где  $T_2$  — интервал времени сканирования полукадра;  $T_3$  — период следования полукадров;  $T_4$  — общее время сканирования полукадров в периоде следования кадров.

Уравнение сканирования по оси  $y'$  представляется в виде суммы двух уравнений

$$y_{V1}(t) = \left( \left( \left( \left( \left( \text{rect} \left( \frac{t}{T_2} \right) \frac{1}{T_c} \text{comb} \left( \frac{t}{T_c} \right) V_{y1} t \right) \otimes \text{rect} \left( \frac{t}{T_1} \right) \right) \otimes \frac{1}{T_3} \text{comb} \left( \frac{t}{T_3} \right) \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T_4} \right) \right) \otimes \frac{1}{T_K} \text{comb} \left( \frac{t}{T_K} \right), \quad (21)$$

$$y_{V2}(t) = \left( \left( \left( \left( \left( \text{rect} \left( \frac{t}{T_4} \right) \frac{1}{T_3} \text{comb} \left( \frac{t}{T_3} \right) V_{y2} t \right) \otimes \text{rect} \left( \frac{t}{T_1} \right) \right) \otimes \left( \frac{1}{T_c} \text{comb} \left( \frac{t}{T_c} \right) \text{rect} \left( \frac{t}{T_2} \right) \right) \right) \otimes \frac{1}{T_K} \text{comb} \left( \frac{t}{T_K} \right);$$

здесь  $V_{y1} = 2T_y/T_c$  — линейная скорость сканирования по оси  $y'$  в пределах каждого полукадра;  $V_{y2} = T_y/T_3$  — линейная скорость ска-

нирования по оси  $y'$  при смене полукадров;  $T_y$  — расстояние между строками в полном кадре.

Модулирующая функция при чересстрочно-построчном сканировании описывается соотношением

$$m_2(t) = m_x(x_V(t)) m_{y_1}(y_{V1}(t)) m_{y_2}(y_{V2}(t)), \quad (22)$$

где

$$m_x(x_V(t)) = \left( \left( \left( \left( \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \otimes \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{t}{T_3}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_4}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right), \quad (23)$$

$$m_{y_1}(y_{V1}(t)) = \left( \left( \left( \left( \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{t}{T_3}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_4}\right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right), \quad (24)$$

$$m_{y_2}(y_{V2}(t)) = \left( \left( \left( \text{rect}\left(\frac{t}{T_4}\right) \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{t}{T_3}\right) \right) \otimes \text{rect}\left(\frac{t}{T_1}\right) \right) \otimes \left( \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{t}{T_c}\right) \text{rect}\left(\frac{t}{T_2}\right) \right) \right) \otimes \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t}{T_k}\right). \quad (25)$$

Если теперь в формулу (15) вместо  $m_1(t)$  подставим  $m_2(t)$  в соответствии с выражениями (22)–(25), то сигнал на выходе ОЭП, в котором реализуется чересстрочно-построчное сканирование, представим в виде

$$\begin{aligned} L_{\text{ВКУ}}(x_2, y_2, t) &= S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}} H_{\text{ВКУ}}(x_2 - x_V, y_2 - y_V) \times \\ &\quad \times U_2(x_V, y_V, t) m_2(x_V, y_V) = S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} H_{\text{ВКУ}}(x_2 - V_x \tau_1, y_2 - (V_{y1} \xi_1 + V_{y2} \vartheta_1)) U_2(V_x \tau_1, V_{y1} \xi_1 + V_{y2} \vartheta_1, t) \times \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{\tau_1}{T_1}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{T_c}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau_2}{T_2}\right) \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{\tau_3 - \tau_2}{T_3}\right) \times \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{\tau_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - \tau_3}{T_k}\right) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \text{rect}\left(\frac{\xi_1}{T_2}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{\xi_1}{T_c}\right) \times \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{\xi_2 - \xi_1}{T_1}\right) \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{\xi_3 - \xi_2}{T_3}\right) \text{rect}\left(\frac{\xi_3}{T_4}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - \xi_3}{T_k}\right) d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3 \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \text{rect}\left(\frac{\vartheta_1}{T_4}\right) \frac{1}{T_3} \text{comb}\left(\frac{\vartheta_1}{T_3}\right) \text{rect}\left(\frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{T_1}\right) \frac{1}{T_c} \text{comb}\left(\frac{\vartheta_3 - \vartheta_2}{T_c}\right) \times \\ & \times \text{rect}\left(\frac{\vartheta_3}{T_2}\right) \frac{1}{T_k} \text{comb}\left(\frac{t - \vartheta_3}{T_k}\right) d\vartheta_1 d\vartheta_2 d\vartheta_3. \quad (26) \end{aligned}$$

Вычислив трехмерное преобразование Фурье от выражения (26), получим следующее выражение для пространственно-временного спектра сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется чересстрочный закон сканирования и развертки изображения:

$$\begin{aligned} \tilde{L}_{\text{ВКУ}}(\nu_x, \nu_y, \nu) &= \frac{\eta_x^2 \eta_y^2 \eta_k^3 S_{\text{ВКУ}} A_{\text{ВКУ}}}{2T_y V_x T_3} \tilde{H}_{\text{ВКУ}}(\nu_x, \nu_y) \times \\ & \times \sum_{k_1, n_1, p_1 = -\infty}^{\infty} \sum_{k_2, n_2, p_2 = -\infty}^{\infty} \sum_{k_3, n_3, p_3 = -\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\pi T_4 \left(\frac{m_3}{T_k} - \frac{m_2}{T_3}\right)\right) \times \\ & \times \text{sinc}\left(\pi T_2 \left(\frac{k_2}{T_3} - \frac{k_1}{T_c}\right)\right) \text{sinc}\left(\pi T_4 \left(\frac{n_3}{T_k} - \frac{n_2}{T_3}\right)\right) \times \\ & \times \text{sinc}\left(\pi T_1 \frac{n_2}{T_3}\right) \text{sinc}\left(\pi T_2 \left(\frac{p_3}{T_k} - \frac{p_2}{T_c}\right)\right) \times \\ & \times \text{sinc}\left(\pi T_1 \frac{p_2}{T_c}\right) \text{sinc}\left(\pi V_{y2} T_4 \left(\frac{p_2}{V_{y2} T_c} + \frac{p_1}{T_y} - \frac{n_2}{V_{y1} T_3} - \frac{n_1}{2T_y}\right)\right) \times \\ & \times \tilde{U}_4\left(\nu_x + \frac{k_1}{V_x T_c}, \nu_y + \frac{n_2}{V_{y1} T_3} - \frac{n_1}{2T_y}, \nu - \frac{k_3 + n_3 + p_3}{T_k}\right); \quad (27) \end{aligned}$$

здесь  $\eta_x = T_1/T_c$ ,  $\eta_y = T_2/T_3$  и  $\eta_k = T_4/T_k$  — коэффициенты использования системы сканирования по строке, в полукадре и в кадре соответственно; функция  $\tilde{U}_4(\nu_x, \nu_y, \nu)$ , как и в формуле (14), описывает пространственно-временной спектр сигнала на выходе электронного тракта с учетом ограничений поля сканирования по строкам и кадру.

На основе качественного анализа выражения (27) можно сделать следующие выводы. Составляющие спектра сигнала  $\tilde{U}_4(\nu_x, \nu_y, \nu)$  по оси  $\nu_x$  с индексами суммирования  $k_1$ , а также составляющие по оси  $\nu_y$  с индексами суммирования  $n_2$  практически не искажают спектр сигнала, так как их значения быстро убывают при возрастании соответствующих индексов. Поэтому при дальнейшем анализе этими составляющими спектра можно пренебречь.

Принципиальное отличие выражения (27) от выражения (14), полученного для пространственно-временного спектра сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется прогрессивный закон, заключается в том, что выражение (27) содержит дополнительные составляющие спектра по оси  $\nu_y$ , которые смещены относительно исходного спектра не

только на величину  $n_1/T_y$ , как в выражении (14), но также на величину  $n_1/2T_y$ . Эти дополнительные составляющие обусловлены пространственной дискретизацией (вдоль координатной оси  $y'$ ), которая в каждом полукадре осуществляется с периодом, равным  $2T_y$ . В то же время, за два полукадра период дискретизации составляет значение, равное  $T_y$ . Вследствие этого при чересстрочном законе сканирования можно ожидать возникновения помех пространственной дискретизации, больших, чем при прогрессивном законе. Однако при чересстрочном законе полукадры следуют с частотой, в два раза большей, чем при прогрессивном законе. Поэтому из-за инерционности зрительной системы действие этих помех ослаблено.

Чтобы количественно оценить описанный эффект, были приняты конкретные значения характеристик и параметров структурных элементов модели ОЭП, представленной на рис. 3. В частности, в качестве модели источника сигнала была принята модель точечного объекта, распределение спектральной яркости которого имеет вид

$$\Delta L_\lambda(x, y, t, \lambda) = \Delta J_\lambda(\lambda)\delta(x, y), \quad (28)$$

где  $\Delta J_\lambda(\lambda)$  — приращение спектральной силы излучения относительно силы излучения пространственно равномерного фона.

Полихроматическая функция рассеяния оптической системы аппроксимирована двумерной функцией Гаусса вида

$$H_N(x', y') = \frac{1}{2\pi r_o^2} \exp\left(-\frac{x'^2 + y'^2}{2r_o^2}\right); \quad (29)$$

здесь  $r_o$  — эффективный радиус пятна рассеяния оптической системы, который определялся в долях периода пространственной дискретизации:  $r_o = T_y/4$ , причем  $T_y = 0,05$  мм.

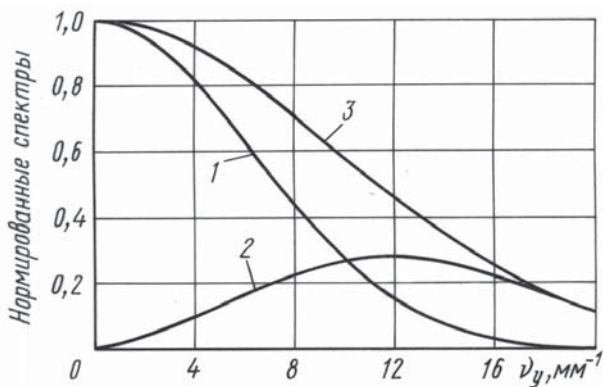
Пространственный импульсный отклик ПИ определялся следующим образом:

$$H_{\text{ПИ}}(x_V, y_V) = \frac{1}{A_{\text{ПИ}}} \text{rect}\left(\frac{x'}{a_{\text{ПИ}}}, \frac{y'}{b_{\text{ПИ}}}\right), \quad (30)$$

где  $a_{\text{ПИ}} = b_{\text{ПИ}} = T_y$  — размеры чувствительного элемента ПИ;  $A_{\text{ПИ}} = a_{\text{ПИ}}b_{\text{ПИ}}$  — площадь чувствительного элемента ПИ.

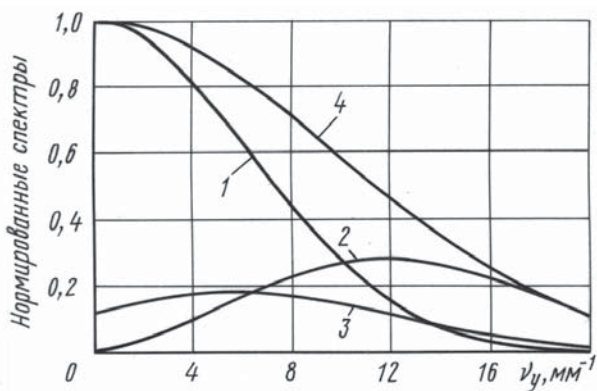
Импульсный отклик ВКУ аппроксимирован выражением (11), в котором параметр  $r_{\text{ВКУ}}$  был принят равным  $T_y/3$ .

Период следования кадров для прогрессивного и чересстрочного законов был одинаковым:  $T_k = 0,04$  с. Для прогрессивного закона были приняты значения  $\eta_c = 0,813$ ,  $\eta_k = 0,92$ , а для чересстрочного закона использованы значения параметров, соответствующие стандарту



**Рис. 5. Графики сечений нормированных спектров сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется прогрессивный закон сканирования и развертки изображения:**

1 — спектр полезной составляющей сигнала; 2 — спектр составляющей, обусловленной пространственной дискретизацией сигнала; 3 — передаточная функция ВКУ



**Рис. 6. Графики сечений нормированных спектров сигнала на выходе ОЭП, в котором реализуется чересстрочный закон сканирования и развертки изображения:**

1 — спектр полезной составляющей сигнала; 2 — спектр составляющей, обусловленной пространственной дискретизацией сигнала при частоте  $\nu_{y1} = 1/T_y$ ; 3 — спектр составляющей, обусловленной пространственной дискретизацией сигнала при частоте  $\nu_{y1} = 1/2T_y$ ; 4 — передаточная функция ВКУ

черно-белого телевидения, принятому в России:  $\eta_x = 0,813$ ,  $\eta_y = 0,92$ ,  $\eta_k = 0,96$  [10].

На рис. 5, 6 представлены графики сечений по оси  $\nu_y$  нормированных спектров сигналов, рассчитанных, соответственно, по формулам (14) и (27) с учетом временной фильтрации в зрительной системе человека-оператора. Инерционные свойства зрительной системы человека-оператора характеризовались передаточной функцией вида (16) при постоянной времени  $\tau_{зп} = 0,1$  с.

За счет временной фильтрации полукадров при чересстрочном законе сканирования (см. рис. 6) амплитуда спектральных составляющих, смещенных относительно основного спектра на значение  $1/2T_y$ , оказалась примерно в четыре раза меньше, чем амплитуда спектральных составляющих, смещенных на значение  $1/T_y$ . Однако за счет пространственной фильтрации, осуществляемой в ВКУ, амплитуда спектральных составляющих, смещенных на значение  $1/T_y$ , уменьшается сильнее, чем амплитуда составляющих, смещенных на значение  $1/2T_y$ . В результате те и другие дополнительные составляющие спектра при выбранных параметрах тракта ОЭП оказались соизмеримыми по амплитуде (см. рис. 6). Следовательно, в ОЭП, в котором реализуется чересстрочный закон сканирования, возникают помехи пространственной дискретизации в более широком диапазоне пространственных частот, чем в ОЭП, в котором реализуется прогрессивный закон.

Проведенные исследования показали, что помехи пространственной дискретизации, которые обусловлены составляющими спектра, смещенными на значение  $1/2T_y$ , уменьшаются при увеличении коэффициента использования  $\eta_y$  в полукадре. В частности, при увеличении  $\eta_y$  от принятого в стандарте значения  $\eta_y = 0,92$  до значения  $\eta_y = 0,96$  указанные помеховые спектральные составляющие уменьшаются примерно в два раза. Этот результат не является очевидным и представляет значительный интерес для практики создания информационных ОЭП. Естественно, он нуждается в экспериментальной проверке. Кроме этого, для более точного сравнительного анализа законов сканирования и развертки изображения и для количественной оценки возможных преимуществ того или иного закона необходима методика оценки зрительного восприятия изображений человеком-оператором с учетом помех пространственной дискретизации изображения. Как видно из публикаций, эта проблема пока не решена.

Тем не менее, представленный в настоящей работе метод математического описания преобразования сигналов в тракте информационных ОЭП с системами оптико-механического и электронного сканирования позволяет ставить и решать задачи разработки перспективных образцов информационных ОЭП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. П о р ф и р ь е в Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. – Л.: Машиностроение, 1989. – 387 с.
2. М и р о ш н и к о в М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Л е в ш и н В. Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. – М.: Сов. радио, 1971. – 200 с.
4. Л л о й д Д ж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с.

5. Г о с с о р г Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
6. К о л ю ч к и н В. Я. Иерархия модельного представления оптико-электронных систем в задачах автоматизированного проектирования // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. – 1991. – Т. 34. – № 5. – С. 52–59.
7. А в т о м а т и з а ц и я проектирования оптико-электронных приборов / Л.П. Лазарев, В.Я. Колучкин, А.Н. Метелкин и др. Под ред. Л.П. Лазарева. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
8. Б е н у н и А. А., К о л ю ч к и н В. Я. Модель зрительной системы человека-оператора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2002. – № 4. – С. 43–52.
9. К о л ю ч к и н В. Я., М о с я г и н Г. М. Тепловизионные приборы и системы. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 52 с.
10. Т е л е в и з и о н н а я техника: Справочник / Под ред. Ю.Б. Зубарева, Г.Л. Глориозова. – М.: Радио и связь, 1994. – 312 с.

Статья поступила в редакцию 27.05.2004

Василий Яковлевич Колучкин родился в 1948 г., окончил в 1972 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана и в 1986 г. Московский инженерно-физический институт. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Баумана. Автор более 100 научных работ в области системного проектирования оптико-электронных приборов.



V.Ya. Koluchkin (b. 1948) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972, and from Moscow Institute of Engineering Physics in 1986. DSc(Eng), head researcher of Research Institute for Electronics and Laser Technology of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in field of optoelectronic instruments designing.

Геннадий Михайлович Мосягин родился в 1932 г., окончил в 1956 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 125 научных работ в области проектирования оптико-электронных и лазерных приборов.



G.M. Mosyagin (b. 1932) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1956. DSc(Eng), professor of “Laser and Optoelectronic Control Devices” Department of Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 125 publications in field of optoelectronic and laser instruments designing.

Нгуен Хунг Ван родился в 1962 г., окончил в 1986 г. Пензенское высшее артиллерийское инженерное училище (ВАИУ) им. Н.Н. Воронова. Аспирант кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области проектирования оптико-электронных систем.



Nguyen Hung Van (b.1962) graduated from the Artillery Force Engineering Institute n.a. N.N. Voronov in 1986. Post-graduator of “Laser and Optoelectronic Devices” Department of Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of optoelectronic systems designing.