

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М. Разработка интеллектуальных машин, технологии и систем// Машиностроение.- Мн., 2000. - Вып. 16.- С.59-66.
2. The production and absorption of heat associated with electrical activity in nerve and electric organ by J. M. Ritchie and R. D. Keynes, Quarterly Review of Biophysics 18, 4 (1985), P. 451-476.
3. Von Neumann «The Computer and the Brain», Harvard University Press, 1994.
4. "How Much Do People Remember? Some Estimates of the Quantity of Learned Information in Long-term Memory", Cognitive Science 10, 477-493, 1986.

УДК 681.327.(0.88)

В.М. Колешко, М.А. Самошкин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНО – ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СЧИТЫВАНИИ ИНФОРМАЦИИ

Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Введение

Перспективной формой представления видеоданных в автоматизированных системах обработки информации, в рамках которой целесообразно вести разработку методов кодирования, являются рекурсивные структуры и структуры на основе регулярной декомпозиции [1]. В связи с этим были предложены способы и программно-технические средства с автоматическим выбором шага, размеров и траектории движения считывающего луча. Это в 3-5 раз снижает объемы передачи, хранения и обработки видеоданных и увеличивает быстродействие системы [1].

1. Модель формирования изображения.

Действие матрицы и процесс трансформации пространственных частот будем описывать с помощью следующей модели, в основу которой положено построение функции влияния [2]. Излучение коллимированного мононаправленного источника попадает на матрицу со стороны полупроводника n -типа, толщина n -слоя равна a . В фокальной матрице фотодетекторы расположены вплотную друг к другу, линейный размер фотодетектора составляет $2T_0$. Фототек детектора обусловлен диффузионным потоком дырок, генерированных в n -слое, через его границу $z = 0$ и темпом генерации носителей заряда в обедненной области. Сигнал чувствительных элементов (ЧЭ) матрицы представляет собой функцию с основанием $2T_0$ и

амплитудой, определяемой величиной фототока. Таким образом, оптическая передаточная функция находится как нормированная Фурье-трансформата отклика системы на пространственное импульсное воздействие.

2. Основные уравнения

Функция генерации носителей в n -области

$$G = \Phi_0 \alpha (1 - R) e^{\alpha(z-a)} \delta(x - x') \delta(y - y'), \quad (1)$$

где Φ_0 - поток падающих фотонов; α - коэффициент поглощения; R - коэффициент отражения; x', y' - координаты попадания излучения на матрицу.

Уравнение непрерывности

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\left(\frac{p}{\tau_p}\right) + D_p \Delta^2 p, \quad (2)$$

где p - концентрация неравновесных носителей;

D_p - коэффициент диффузии; τ_p - время жизни неравновесных носителей.

Граничные условия

$$D_p \frac{\partial p}{\partial N} = -S_p; \quad z = a; \quad p = 0; \quad z = 0, \quad (3)$$

где N - внешняя нормаль к поверхности; S - скорость поверхностной рекомбинации.

Диффузная компонента фототока

$$j = -D_p \frac{\partial p}{\partial z}; \quad z = 0. \quad (4)$$

Ток чувствительного элемента

$$I_m = \int_u j du, \quad (5)$$

где u - площадь элемента.

Фототок, обусловленный генерацией носителей в обедненной области,

$$I_0 = \eta \Phi_0 (1 - R) e^{-\alpha a}, \quad (6)$$

где η – квантовая эффективность преобразования фотонов.

Функция влияния

$$S_0 = I_0 \Pi(0) + \sum_M I_m \Pi_m(T_0), \quad (7)$$

где M определяет число детекторов, реагирующих на излучение; Π_m – функция отклика m -го чувствительного элемента.

3. Передаточные характеристики

В линейных системах связь входных и выходных данных описывается интегралом суперпозиции, при этом входная функция представляется в виде линейной комбинации взвешенных и смещённых δ -функций. Каждая составляющая входного сигнала обрабатывается системой, давая на выходе суперпозицию всех откликов в виде выходного сигнала. Обозначим через $h(x, t)$ отклик системы на импульсное воздействие, тогда передаточная функция T может быть представлена в виде соответствующей Фурье-трансформанты:

$$T(\omega, \omega) = \iiint h(x, t) \exp[-i(\omega x + \omega_t t)] dx dt, \quad (8)$$

где $x = (x, y)$ – пространственные координаты; t – временная переменная; $\omega = (\omega_x, \omega_y)$ описывает декартовы пространственные частоты; ω_t – временная частота.

Если объект движется со скоростью V и входной сигнал описывается функцией f , то выходной сигнал может быть записан следующим образом:

$$g(x', t') = \iiint f(x - Vt) h(x' - x, t' - t) dx dt. \quad (9)$$

Спектр определяется Фурье-трансформантой функции $g(x', t')$:

$$G(\omega, \omega) = \iiint g(x', t') \exp[-i(\omega x' + \omega_t t')] dx' dt'. \quad (10)$$

При разделяющихся переменных спектр описывается следующим выражением, имеющим прозрачный смысл:

$$G(\omega, \omega_t) = S(\omega_t)T(\omega)P(\omega)\delta(\omega_t - V\omega). \quad (11)$$

Здесь S интерпретируется как временная полоса пропускания системы; $T(\omega) = F\{h(x)\}$ — оптическая передаточная функция; $P(\omega)$ — спектр входного сигнала; множитель в виде δ — функции позволяет переходить от чисто временного спектра к чисто пространственному.

Разработанная спектральная теория матричного фотоприемника позволяет получить функцию Грина

$$G(x, x', t) = G(x, x'; y, y'; z, z', t), \quad (12)$$

которая является откликом системы на импульсное воздействие. Показано, что при этом реакция на мгновенный точечный источник, или так называемое фундаментальное решение, имеет вид:

$$p = \frac{\exp(-r^2/4t)}{4\pi t} \times \sum_{k=1}^{\infty} 2 \exp\{-\beta_k t\} \frac{(\alpha_k^2 + \lambda_0^2) \sin \alpha_k z \sin \alpha_k z'}{[a(\alpha_k^2 + \lambda_0^2) + \lambda_0]}, \quad (13)$$

где пространственные координаты и время нормированы на длину диффузии и время жизни неравновесных носителей соответственно; $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$; $\lambda_0 = SL_p / D_p$ и L_p — коэффициент и длина диффузии;

$\beta_k^2 = 1 + \alpha_k^2$; α_k — корни трансцендентного уравнения $tg \alpha = -\alpha / \lambda_0$.

Пусть источник движения в направлении оси x со скоростью U , начиная с момента времени $t=0$. Тогда решение для произвольного момента времени t , обусловленное генерацией носителей за время от 0 до t , может быть получено посредством интегрирования фундаментального решения с запаздывающим аргументом. Переходя далее к спектру, получаем для передаточной функции

$$G = (\omega, \omega) = \eta(1 - R)2\pi K \exp(-\alpha a) + \\ + D_p \alpha (1 - R) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\rho_k}{\omega_z^2 - iU\omega_x} \left\{ 2\pi K - \frac{1}{\omega_z^2 - i\omega_t} \right\}, \quad (14)$$

где $\omega_z^2 = \omega_x^2 + \omega_y^2 + \beta_k^2$; $k = \pi \delta(\omega_t + U\omega_x) + \frac{1}{i(\omega_t + U\omega_x)}$.

4. Эффекты дискретизации

Матричный фотоприемник преобразует двумерный оптический сигнал в электрический при выборке в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью массива дискретных ЧЭ. Выборка приводит к репликации исходного Фурье-спектра $G(\omega)$ в точках, отстоящих на значение, обратное шагу выборки T в направлениях соответствующих координатных осей. Для точного восстановления исходной информации с ограниченным спектром необходимо выполнение критерия Найквиста, или частоты наложения $\omega_N = \pi/T$, наблюдается редукция частот как результат перекрытия спектров-репликантов. Специфическая погрешность дискретного представления – эффект наложения является причиной шума искажений при выборке сигналов. По мере увеличения частоты в исходном изображении информация на первых порах сохраняется и низкочастотная информация передается практически без искажений. Однако затем можно наблюдать, что при увеличении частоты оригинала происходит уменьшение частоты изображения – выборки. Это объясняется наложением соседних спектров – двойников, у которых отрицательные составляющие пространственных частот инвертированы. Для частот, меньших частоты Найквиста, эффект выботки сводится к влиянию конечности апертуры элемента разложения. Если исходное распределение описывается функцией $g(x, y)$, то выходной сигнал детектора равен интегралу от этого распределения по апертуре:

$$g'(x', y') = \iint g(x, y) p(x - x', y - y') dx dy, \quad (15)$$

где $p(x, y)$ – апертурная функция детектора;

$g'(x', y')$ – измеренное значение в точке с координатами (x', y') .

Выражение (15) представляет собой свертку исходной функции $g(x, y)$ с апертурной функцией в инвертированных координатах $p(-x, -y)$. Таким образом, апертура действует как фильтр нижних частот с передаточной функцией $F\{p(-x, -y)\}$. Следовательно, для частот, меньших частоты Найквиста, влияние выборки приводит к умножению спектра на передаточную функцию $F\{p\}$, которая для прямоугольных элементов разложения имеет вид:

$$F\{\omega_x, \omega_y\} = \sin c \frac{\omega_x T_x}{2} \sin c \frac{\omega_y T_y}{2}, \quad (16)$$

где T_x и T_y – размеры элементов по соответствующим осям.

Важным эффектом дискретизации является неизопланатичность дискретных систем, которая начинает играть заметную роль, если не выполняется неравенство:

$$\omega \ll \omega_N. \quad (17)$$

В неизопланатичной системе передаточная функция T (16) принимает вид

$$F(\omega) = \sin c \frac{\omega_x T_x}{2} \sin c \frac{\omega_y T_y}{2} H(\theta), \quad (18)$$

где $H(\theta)$ описывает фазу входного изображения.

Если матрица детекторов используются для получения выборочных значений исходного распределения $g(x, y)$, то, используя (15), выходной сигнал можно представить в виде:

$$\begin{aligned} g_1(x, y) &= g'(x, y) \text{comb}(x) \text{comb}(y) = \\ &= [g(x, y) * p(-x, -y)] \text{comb}(x) \text{comb}(y). \end{aligned} \quad (19)$$

Из (19) следует, что выборка изображения с помощью детекторов конечной апертуры эквивалентна выборке отфильтрованного изображения с использованием набора δ -функций, при этом апертурная функция детектора представляет собой импульсный отклик фильтра.

5. Компьютерное моделирование ввода изображений

Рассмотрим методику компьютерного моделирования средств автоматического ввода изображений, в том числе и сенсора изображения (СИ) с матричным фотоприемником (МФ), позволяющую исследовать прохождение оптических сигналов через оптико-электронный тракт СИ при параллельно-последовательном считывании изображений с переменным шагом и апертурой сканирующего луча [3-6].

Компьютерное моделирование производится в три этапа. На первом этапе выполняется синтез входного сигнала - распределение спектральной лучистости. Косвенное задание входного оптического сигнала в виде матрицы кодов излучающих объектов позволяет представить информацию об объектах с различными излучательными свойствами и геометрической формой, сократить объем вычислений при пересчете спектральных характеристик и уменьшить требуемый объем памяти при помощи кодирования входного оптического сигнала матрицей целых чисел. Исходной информацией на первом этапе является описание излучательных свойств и геометрической формы объектов в плоскости предметов. При моделировании производится пересчет координат точек объектов с учетом их размеров,

геометрической формы, пересечений с другими объектами, формируется матрица входного оптического сигнала (СИ).

На следующем этапе моделирования определяется распределение эффективной (т.е. с учетом спектральной чувствительности МФ) облученности в плоскости изображения (ПИ). Это позволяет определить часть энергии оптического излучения, которая будет преобразована в электрический сигнал в МФ, и упростить пересчет чувствительности МФ. Оптический сигнал представляется в виде матрицы значений эффективной облученности в ПИ. Значения эффективной облученности вычисляются с учетом пропускания элементов оптико-электронного тракта и aberrаций оптической системы (ОС):

$$E_p(x^c, y^c) = \iint_{-\infty}^{+\infty} E(\xi, \zeta) h(x' - \xi, y' - \zeta) d\xi d\zeta,$$

где x', y' - координаты точки в ПИ; $E_p(x', y')$ - значение эффективной облученности в точке (x', y') ПИ с учетом aberrаций ОС; $h(\xi, \zeta)$ - функция рассеяния точки ОС; $E(x', y')$ - значение эффективной облученности в точке с координатами (x', y') в ПИ в случае идеальной (без aberrационной) ОС:

$$E(x', y') = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \left(\frac{\beta_{зр}}{\beta_{зр} - \beta} \right)^2 \int_0^{2\pi} L \left(\frac{x'}{\beta}, \frac{y'}{\beta}, \lambda \right) \tau_{ос}(\lambda) \tau_{оф}(\lambda) S_{мф}(\lambda) d\lambda,$$

где D, f - диаметр входного зрачка и фокусное расстояние ОС; $\beta, \beta_{зр}$ - соответственно линейное увеличение и линейное увеличение в зрачках ОС; $L(x, y, \lambda)$ - спектральная плотность лучистости в точке плоскости предметов; $\tau_{ос}(\lambda), \tau_{оф}(\lambda)$ - спектральные коэффициенты пропускания ОС и оптический фильтр (ОФ) соответственно, $S_{мф}(\lambda)$ - спектральная характеристика чувствительности МФ.

На завершающем этапе моделирования определяются значения электрического сигнала каждого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) МФ. Этот сигнал включает составляющие темнового сигнала, фотосигнала и шума

$$U(i, j) = U_r(i, j) + U_\phi(i, j) + U_\mu,$$

где i, j - номера ФЧЭ в МФ; $U(i, j)$ - выходной электрический сигнал i, j -го ФЧЭ; $U_r(i, j)$ - темновой сигнал i, j -го ФЧЭ, который задается пользователем или генерируется как случайная величина; $U_\phi(i, j)$ - значение фотосигнала i, j -го ФЧЭ; U_μ - шумовая составляющая, которая генерируется как случайная величина в зависимости от значения удельной обнаружительной способности МФ.

Значение фотосигнала $U_{\phi}(i,j)$ определяется методом численного интегрирования функции распределения эффективной облученности. Это дает возможность учесть большее количество факторов, включая влияние апертурной характеристики ФЧЭ, неравномерности чувствительности и темнового тока в МФ, а в случае ПЗС определить искажение электрического сигнала из-за потерь при переносах зарядов и растекания зарядов при переполнении потенциальных ям ФЧЭ. Можно добиться также повышения точности вычислений путем выбора соответствующего шага интегрирования

$$U_{\phi}(i,j) = \frac{S_u}{K_n} e(i,j) \iint_{A(i,j)} E_p(x',y') S_n(x' - x_n)(i,j) \cdot y' - y_n(i,j) dx' dy'$$

где S_u - интегральная чувствительность МФ; K_n - коэффициент использования излучения паспортного источника; $e(i,j)$ - коэффициент учета неравномерности чувствительности i,j -го ФЧЭ, который задается пользователем или генерируется как случайная величина; $A(i,j)$ - область ПИ, которую занимает i,j -й ФЧЭ; $S_n(i,j)$ - апертурная характеристика ФЧЭ; $x_n(i,j)$, $y_n(i,j)$ - координаты центра i,j -го ФЧЭ в ПИ.

В случае ПЗС при расчете $U(i,j)$ потери переноса задаются специальным коэффициентом, зависящим от числа переносов зарядового пакета, а растекание зарядов моделируется перераспределением части зарядового пакета ФЧЭ, превышающего уровень потенциальной ямы, между соседними ФЧЭ согласно весовым коэффициентам, заданным в исходных данных.

Предложена методика и получены математические выражения для моделирования процессов параллельно-последовательного считывания информации. Получены аналитические выражения для матричного фотоприемника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самошкин М.А. Автоматизация ввода-вывода и обработки данных на основе рекурсивного представления информации. – Мн.: Наука и техника, 1996. - 392 с. 2. Федосов В.П. Формирование оптического изображения с помощью матричного фотоприемника// Успехи современной радиоэлектроники.- 2001.- № 9.- С. 59-63. 3. Боровицкий В.Н., Чиж И.Г. // Управляющие системы и машины. - 1995. - № 4-5.- С. 45-47. 4. Самошкин М.А. Автоматизация параллельно-последовательного считывания графической информации и оценка эффективности иерархических систем // Цифровая обработка изображений. Вып. 5. – Минск: Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2001. – С.23-32. 5. Колешко В.М., Самошкин М.А. Математическое моделирование компьютерного зрения при считывании графической информации и фильтрации видеосигналов // Машиностроение. – Мн., 2001. – . Вып.

17.- С. 445-451. 6. Колешико В.М., Самошкин М.А. Modelowanie matematyczne widzenia komputerowego przy sczytywaniu informacji graficznej I filtrowaniu sygnal video // Technologiczne systemy informacyjne w inzynierii produkcji I ksztalceniu technicznym. Lubelskie Towarzystwo Naukowe Societas Scientiaru Lublinensis. – Liblin 2001. – С. 290-297.

УДК 621.88.084

В.М.Колешко, И.А.Таратын, А.В.Сергейченко

МАТРИЦА НЕСЕЛЕКТИВНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ ЭЛЕКТРОННОГО НОСА

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

На протяжении всего времени развития металлоксидных полупроводниковых сенсоров разработчики данного направления в газовом анализе прилагали огромные усилия для создания высокоселективных детекторов газов. Однако новое течение, направленное на создание интеллектуальных устройств, способных распознавать как качественный, так и количественный состав газовых смесей, предъявляет к газовым сенсорам уже несколько иные требования. Данные устройства получили название «электронный нос» и газовые сенсоры, составляющие его основу, должны уже обладать не селективной чувствительностью к одному газу, а перекрестной чувствительностью к различным газам, запахам и парам.

Принцип работы электронного носа заключается в анализе сигналов, поступающих от линейки или матрицы неселективных газовых сенсоров при воздействии газа или смеси газов на их активные элементы.

Для проведения исследований были разработаны и изготовлены четыре типа образца с различными характеристиками активных слоев (АС). При изготовлении сенсоров использовались хорошо известные технологические методы планарной микроэлектроники. Подложка представляет собой кремниевый кристалл пассивированный с одной стороны диэлектрическими слоями Si_3N_4 и SiO_2 суммарной толщиной $\sim 1,2$ мкм [1, 2]. На диэлектрике сформированы тонкопленочные платиновые терморезистор и сигнальный электрод. Причем, особенность топологии состоит в том, что нагревательный элемент одновременно является и вторым сигнальным электродом. К настоящему времени исследователями изучены на предмет чувствительности к газам практически все металлоксидные полупроводники [3]. Отработаны несколько методов формирования толстых полупроводниковых