

# Применение пространственно-структурной модели видеосигнала с телевизионного сканистора в задачах контроля геометрических параметров малоразмерных объектов

И.О. Архипов<sup>1</sup>, Ю.К. Шелковников<sup>2</sup>, А.А. Метелева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Студенческая 7, Ижевск, Россия, 426069

<sup>2</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Татьяны Барамзиной 34, Ижевск, Россия, 426067

**Аннотация.** Предложена модель видеосигнала для определения размеров и координат контролируемой световой зоны на телевизионном сканисторе. Для этого профиль световой зоны представляется в виде вектора пространственно-структурных параметров, которые позволяют локализовать световую зону, восстановить её ширину и освещенность. Применение пространственно-структурной модели видеосигнала позволяет расширить область применения сканисторных оптико-электронных систем для задач контроля геометрических параметров малоразмерных объектов.

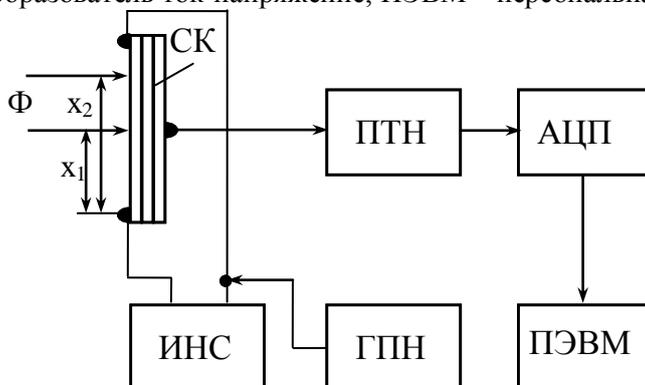
## 1. Введение

Развитие телевидения, робототехники, систем автоматического контроля и слежения, распознавание образов, создание зрительных рецепторов для систем с искусственным интеллектом непосредственно связаны с разработкой высокочувствительных быстродействующих систем технического зрения [1,2]. Телевизионный однострочный сканистор предназначен для преобразования пространственного распределения освещенности в электрические сигналы, используемые для контроля, обработки и передачи оптической информации в системах технического зрения, в частности, для автоматического бесконтактного контроля и измерения координат, размеров и перемещений различных объектов [3,4]. Сканисторные оптико-электронные системы (СОЭС) отличаются высокой точностью, быстродействием, надежностью, а также простотой технической реализации [5,6]. Однако остаются мало изученными некоторые вопросы, влияющие на точность линейных измерений и связанные с особенностями работы сканистора в качестве преобразователя «свет-сигнал» [7]. Целью данной работы является повышение точности измерения ширины узких световых зон с применением однострочного сканистора.

## 2. Пространственно-временное преобразование информации в сканисторе

В СОЭС регистрация светового рельефа (в виде контролируемых световых зон (СЗ) вдоль фоточувствительной поверхности) осуществляется непрерывно повышением амплитуды развертывающего пилообразного напряжения и соответствующим линейным движением вдоль сканистора эквипотенциальной линии нулевого потенциала. Для выделения видеосигнала (ВС)

с сканистора целесообразно использовать схему опроса, представленную на рис.1 (где СК – сканистор; ГПН – генератор пилообразного напряжения; ИНС – источник напряжения смещения; ПТН – преобразователь ток-напряжение; ПЭВМ – персональная ЭВМ).



**Рисунок 1.** Структурная схема СОЭС для измерения размеров и перемещений световых зон.

Можно показать, что при последовательном опросе элементарных фотодиодных ячеек сканистора СК формируется видеосигнал, который является сверткой входной функции СОЭС (в виде контролируемой СЗ) и аппаратной функции сканистора и описывается зависимостью [6]:

$$V(t) = \frac{L \cdot b \cdot l}{T} 2j_s \left[ \frac{1}{\exp[\alpha(E_s - E_k)] + 1} \right]_0^l + \frac{L \cdot b \cdot l}{T} 2j_{s\phi} (1 + K_n) \left[ \frac{1}{\exp[\alpha(E_s - E_k)] + 1} \right]_{x_1}^{x_2}, \quad (1)$$

где  $L$  – коэффициент, зависящий от способа дифференцирования;  $b$ ,  $l$  – ширина и длина сканистора, соответственно;  $\alpha = \left( A \frac{KT^\circ}{q} \right)^{-1}$ ;  $K$  – постоянная Больцмана;  $q$  – заряд электрона;

$A$  – коэффициент, отражающий степень неидеальности  $p-n$  перехода сканисторной структуры;  $T^\circ$  – температура в градусах Кельвина;  $E_s = E_0 \cdot \frac{x_0}{l}$  – потенциал эмиттера в точке

опроса  $x_0$ ;  $\frac{x_0}{l}$  – нормированная координата в точке опроса;  $E_0$  – постоянное напряжение

смещения эмиттера;  $E_k = E_0 \cdot \frac{t_0}{T}$  – значение пилообразного напряжения в момент опроса  $t_0$ ;  $T$

– период пилообразного напряжения;  $\frac{t_0}{T}$  – нормированное время в момент опроса;  $j_s$ ,  $K_n$  –

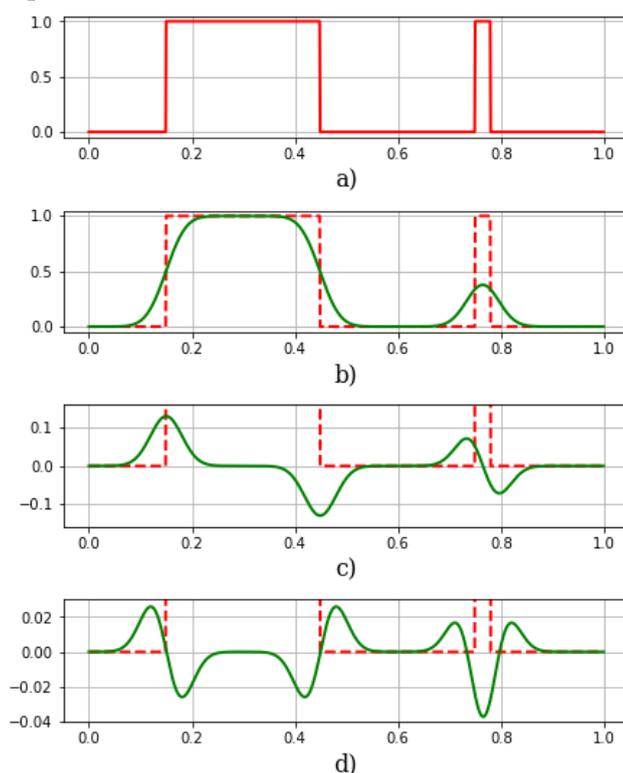
плотность темнового тока насыщения и коэффициент несимметрии вольтамперной характеристики фотодиодной ячейки, соответственно;  $j_{s\phi}$  – плотность приращения тока насыщения фотодиодной ячейки при освещении;  $x_1$ ,  $x_2$  – координаты начала и конца на сканисторе СК световой зоны СЗ (при этом длительность временного интервала от начала пилообразного напряжения до максимума видеосигнала пропорциональна расстоянию середины СЗ от начала сканистора).

При использовании в СОЭС актуальным становится обеспечение высокой линейности пространственно-временного преобразования информации, т.е. состоящего из двух этапов фотоэлектрического преобразования измеряемой координаты (или размера) во временной интервал. На первом этапе координата контролируемой световой зоны преобразуется в координатно задающее напряжение на резистивном делителе сканистора. Развертывающим пилообразным напряжением опроса осуществляется второе преобразование этого напряжения во время. Общая ошибка преобразования координаты  $x$  (или размера) СЗ во временной  $t$  интервал определяется линейностью зависимости координаты сканирующей границы

сканистора (эквипотенциальной линии нулевого потенциала) от величины развертывающего напряжения:

$$x = t \cdot \frac{l}{T}. \quad (2)$$

На рисунке 2 приведены зависимости световой составляющей видеосигнала  $v(\hat{x})$  (рис. 2b), его первой (рис. 2c), второй (рис. 2d) производных и соответствующие им видеоимпульсы для СЗ (рис. 2a) различной ширины и одинаковой освещенности.



**Рисунок 2.** Формы кривых видеосигнала, его первой, второй производных и соответствующие им видеоимпульсы для световых зон различной ширины.

Световой поток  $\Phi$  формирует на фоточувствительной поверхности сканистора световые зоны, профили которых соответствуют графику на рисунке 2a. Выходной видеосигнал сканистора (рис. 2b) соответствует выражению (1) и, по сути является размытым профилем световой зоны. Таким образом, задача анализа видеосигнала сканистора заключается в определении параметров световой зоны (координаты, ширины и освещенности) по размытому видеосигналу сканистора.

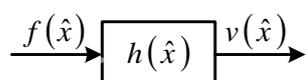
Рисунок 2 демонстрирует этапы традиционной обработки видеосигнала сканистора. В этом случае для определения границ световых зон видеосигнал сканистора дважды дифференцируют (рис. 2c – первая производная и рис. 2d – вторая производная), а моменты смены знака сигнала второй производной видеосигнала соответствуют границам световых зон, но только для широких световых зон. Для узких СЗ (когда их ширина  $\hat{x}_2 - \hat{x}_1$  не превосходит удвоенную величину зоны переключения сканисторной структуры  $2 \cdot \Delta x_{п} = \frac{8l}{E_0 \alpha}$ ) моменты смены знака

второй производной видеоимпульса сканистора не соответствуют границам СЗ, что хорошо видно на графике второго импульса на рисунке 2d. Это происходит из-за того, что сканисторная структура не способна фиксировать короткие видеоимпульсы световых зон, размывая их. Кроме этого, вследствие сильного размытия видеоимпульса узкой световой зоны,

амплитуда видеосигнала сканистора перестает быть пропорциональной величине освещенности СЗ, что не позволяет проводить измерение освещенности узких СЗ с помощью сканистора.

Следует отметить, что определение координат и размеров объектов в условиях производства является актуальной и сложной задачей [4-6]. Актуальность задачи обостряется в случае измерения геометрических параметров малоразмерных объектов в условиях размытия изображения [7,11] (например, при бесконтактном контроле диаметров волокон в процессе их изготовления в волоконной оптике, диаметров проводов в кабельной промышленности и др.[9,10]). При этом для выделения и обработки видеосигнала со сканистора целесообразно использовать структурную схему, представленную на рис. 1.

СОЭС является линейной системой с постоянными параметрами, и её можно представить в виде структурной схемы на рис. 3. В этом случае работа СОЭС описывается импульсной функцией  $h(\hat{x})$ , воздействием  $\Phi(\hat{x})$  является профиль световой зоны (штриховая линия на рис. 2b), а реакцией  $v(\hat{x})$  будет видеосигнал СОЭС (сплошная линия на рис. 2b).



**Рисунок 3.** Модель фотоэлектрического преобразования измерительной информации в СОЭС.

Импульсной функцией сканистора является видеосигнал от одной освещенной фотодиодной ячейки (при бесконечно узкой световой зоне) [8]:

$$h(\hat{x}) = k_A \frac{\exp\left(\hat{x} \frac{E_0}{U_0}\right)}{\left[\exp\left(\hat{x} \frac{E_0}{U_0}\right) + 1\right]^2}, \quad (3)$$

где  $k_A$  – постоянный коэффициент апертуры СОЭС;  $U_0 = \frac{1}{\alpha}$ ;  $\hat{x} = \frac{x_0}{l}$ .

Как и для любой линейной системы с постоянными параметрами для СОЭС справедливо соотношение свертки  $v(\hat{x}) = \int f(\tau)h(\hat{x} - \tau) d\tau$ . Свертка сигнала профиля световой зоны с импульсной функцией объясняет размытие фронтов видеоимпульса СОЭС. Величина размытия полностью определяется импульсной функцией СОЭС и не зависит от ширины световой зоны. Таким образом, сигналы воздействия от узких световых зон размываются настолько значительно относительно их ширины, что традиционный способ определения ширины световой зоны по первым или вторым производным от видеосигнала СОЭС перестаёт работать, (что иллюстрируют рис. 3с и 3d).

### 3. Результаты и их обсуждение

В данной работе для решения задачи определения размеров и координат световой зоны по размытому видеосигналу сканистора (рис. 2б) предложено использовать пространственно-структурные параметры (ПСП). В работах [12-16] показано, что ПСП дают возможность оценить ширину сигнала воздействия прямоугольной формы, локализовать его в пространстве, а также определить его амплитуду по размытой реакции тракта передачи сигнала.

В работе [13] определяются пять ПСП видеосигнала: масса ( $M$ ), центрост (  $C$  ), диссипация ( $D$ ), экстен (  $E$  ), и яркость ( $Y$ ). ПСП вычисляются с использованием одномерных моментов  $w_0, w_1, w_2$  по следующим выражениям:

$$M = W_0; \quad (4)$$

$$C = W_1 / M; \quad (5)$$

$$D = (W_2 / M) - C^2; \quad (6)$$

$$E = 2\sqrt{3D}; \quad (7)$$

$$Y = M / E . \quad (8)$$

Физический смысл ПСП в применении к видеосигналу СОЭС заключается в следующем [11]:

- «масса» описывает общую (интегральную) массу видеосигнала;
- «центр» является координатой его центра тяжести;
- «диссипация» описывает степень локализации массы видеосигнала в окрестности его центра тяжести;
- «экстент» численно равен ширине видеоимпульса СЗ прямоугольной формы;
- «яркость» характеризует амплитуду видеоимпульса СЗ и пропорциональна освещенности СЗ.

В работе [15] показано, что оценка длительности узких прямоугольных импульсов по их размытым видеоимпульсам вычисляется по ПСП с меньшей погрешностью, чем по производным.

Пространственно-структурная модель СОЭС предполагает описывать видеосигнал СОЭС в виде вектора ПСП  $S_v = (M_v, C_v, D_v, E_v, Y_v)$ , а импульсную функцию СОЭС в виде вектора  $S_a = (M_a, C_a, D_a, E_a, Y_a)$ . При этом вектора ПСП  $S_v$  вычисляется по видеосигналу СЭОС, а вектор  $S_a$  вычисляется по импульсной функции СЭОС (3). В этом случае с использованием свойств ПСП [13, 16] можно оценить ширину и освещенность световой зоны следующим образом:

- 1) «диссипация» профиля световой зоны [16]

$$D_l = D_v - D_a ; \quad (9)$$

- 2) «экстент» профиля световой зоны  $E_l = 2\sqrt{3D_l}$  ;

- 3) «яркость» профиля световой зоны  $Y_l = \frac{M_v}{E_l}$  .

При этом «экстент»  $E_l$  и «яркость»  $Y_l$  световой зоны соответствуют ширине и амплитуде прямоугольного сигнала профиля световой зоны.

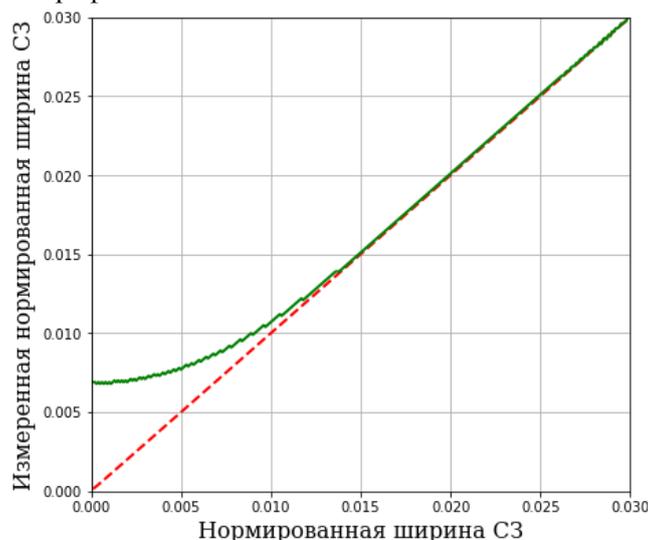


Рисунок 5. Результаты измерения ширины СЗ.

Предложенная методика восстановления параметров световой зоны (ширины и освещенности) основана на свойстве диссипации [14], заключающемся в способности учитывать «величину» размытия при выполнении вычислений по выражению (9).

Для проверки адекватности предложенной пространственно-структурной модели видеосигнала СОЭС был проведен эксперимент в котором ширина СЗ вычислялась традиционным способом по смене знака второй производной видеосигнала СОЭС (сплошная линия на рис. 5) и с применением ПСП (штриховая линия на рис. 5). При этом ширина СЗ изменялась от 0 до половины длины сканистора.

Анализ графиков на рис. 5 показал, что при значениях ширины СЗ более 1.5% длины сканистора традиционный способ измерения ширины СЗ дает результат близкий к линейному, однако результаты измерений параметров узких световых зон с шириной менее 1.5% длины сканистора дают завышенные значения, что хорошо согласуется с графиками на рис. 2d. Измерение ширины СЗ с использованием ПСП показывает линейную зависимость измеренных размеров относительно их истинных значений для всех значений ширины СЗ, в том числе и для узких СЗ.

#### 4. Выводы

1. В работе предложена пространственно-структурная модель описания видеосигнала с телевизионного сканистора, которая позволяет оценивать ширину и освещенность световой зоны по размытому видеосигналу с учетом влияния импульсной функции СОЭС.

2. Пространственно-структурная модель видеосигнала позволяет расширить область применимости сканистора на случай узких световых зон, когда традиционные способы анализа границ световых зон с применением производных перестают работать.

#### 5. Литература

- [1] Ruokamo, H. An 80×25 Pixel CMOS Single-Photon Sensor With Flexible On-Chip Time Gating of 40 Subarrays for Solid-State 3-D Range Imaging / H. Ruokamo, L. Hallman, J. Kostamovaara // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 2019. – Vol. 54(2). – P. 501-510.
- [2] Guk, E. Novel principle of optical signal sensing based on the creation of signal statistical estimates / E. Guk, B. Podlaskin // Proceedings of IEEE Sensors, 2011. – P. 436-439.
- [3] Horton, J.W. The Scanistor – a Solid-State Image Scanner / J.W. Horton, R.V. Mazza, H. Dym // Proc. IEEE. – 1964. – Vol. 52. – P. 1513-1528.
- [4] Шелковников, Ю.К. Повышение стабильности и линейности координатной характеристики сканисторных информационно-измерительных систем // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 251-255.
- [5] Подласкин, Б.Г. Повышение разрешающей способности позиционно-чувствительного устройства на основе датчика интегрального типа / Б.Г. Подласкин, Е.Г. Гук, А.Г. Оболенсков, А.А. Сухарев // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 846-849.
- [6] Шелковников, Ю.К. Теоретические основы и технология изготовления телевизионных сканисторных структур / Ю.К. Шелковников, А.М. Липанов – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 133 с.
- [7] Arkhipov, I.O. The analysis of the video signal from TV scanistor using spatial-structural parameters / I.O. Arkhipov, Y.K. Shelkovnikov, A.A. Meteleva // Instrumentation Engineering in the XXI Century. Integration of Science, Education and Production, 2018. – P. 11-16.
- [8] Берковская, К.Ф. Безвакуумный телевизионный преобразователь изображения – сканистор // Полупроводниковые приборы и их применение – М.: Сов. радио, 1968. – Вып. 20. – С. 3-22.
- [9] Бейли, Д. Волоконная оптика: Теория и практика / Д. Бейли, Э. Райт – М.: Кудиц-пресс, 2008. – 320 с.
- [10] Пешков, И.Б. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений – М.: Академия, 2006. – 432 с.
- [11] Кольцов, П.П. Оценка размытия изображения // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 1. – P. 95-102.

- [12] Мурынов, А.И. Оценка геометрико-топологических параметров деталей изображения на основе метода центроидной фильтрации / А.И. Мурынов, А.М. Вдовин, В.Е. Лялин // Химическая физика и мезоскопия. – 2002. – Т. 4, № 2. – С. 161-177.
- [13] Архипов, И.О. Моделирование и анализ линейных малоразмерных структурных элементов графических изображений на основе использования пространственно-хроматических параметров // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова. – 2014. – Т. 65, № 2. – С. 149-152.
- [14] Мурынов, А.И. Математические модели и методы анализа пространственных структур для экспертных геоинформационных систем: дис. ... д-р. физ.-мат. наук – Ижевск, 2002. – 307 с.
- [15] Архипов, И.О. Особенности применения производных для определения ширины размытых малоразмерных структурных элементов графического изображения // Информационные технологии. Проблемы и решения. – 2015. – Т. 1-2, № 2. – С. 247-252.
- [16] Архипов, И.О. Измерение размеров структурных элементов зашумленного графического изображения на основе его пространственно-хроматической модели / И.О. Архипов, Р.Т. Аккузин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2015. – Т. 66, № 2. – С. 100-102.

## The use of the spatial-structural model of a video signal from the television scanistor in the tasks of monitoring the geometric parameters of small objects

I.O. Arkhipov<sup>1</sup>, Yu.K. Shelkovnikov<sup>2</sup>, A.A. Meteleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Studencheskaya street 7, Izhevsk, Russia, 426069

<sup>2</sup>Institute of Mechanics, Ural Branch of RAS, Baramzinoy street 34, Izhevsk, Russia, 426067

**Abstract.** A video signal model for determining the size and coordinates of the light zone on a television scanistor is proposed. For this, the profile of the light zone is represented in the form of a vector of spatial and structural parameters that allow you to localize the light zone and restore its width and illumination. The use of the spatial-structural model of the video signal allows you to expand the scope of scanistor optoelectronic systems for monitoring the geometric parameters of small objects.