



УДК 621.397

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.657.669

# СИСТЕМА УЛУЧШЕНИЯ РАЗЛИЧИМОСТИ ИНФОРМАТИВНЫХ ФРАГМЕНТОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ ТОПОЛОГИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

## SYSTEM FOR IMPROVING THE DISCERNIBILITY OF INFORMATIVE REGIONS ON DIGITAL IMAGES OF INTEGRATED CIRCUITS LAYOUTS

**КУЗЬМИН АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ**

*Инженер НИЛ «Разработка интегральных схем»*

*kuzminwrk@gmail.com*

**KUZMIN ALEXANDER A.**

*kuzminwrk@gmail.com*

**НАЧАРОВ ДЕНИС ВЛАДИМИРОВИЧ**

*К.т.н., научный сотрудник НИЛ «Разработка  
интегральных схем»*

*d.v.nacharov@sevsu.ru*

**NACHAROV DENIS V.**

*Ph.D*

*d.v.nacharov@sevsu.ru*

**МИХАЙЛЮК ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ**

*К.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
«Электронная техника» СевГУ*

*ypmikhaylyuk@sevsu.ru*

**MIKHAYLYUK YURI P.**

*Ph.D*

*ypmikhaylyuk@sevsu.ru*

**ВЕРТЕГЕЛ ВАЛЕРИЙ ВИКТОРОВИЧ**

*К.т.н., доцент, директор*

*vertegel@bk.ru*

**VERTEGEL VALERY V.**

*Ph.D*

*vertegel@bk.ru*

**ГИМПИЛЕВИЧ ЮРИЙ БОРИСОВИЧ**

*Д.т.н., профессор, директор института  
радиоэлектроники и информационной безопасности  
СевГУ*

*gimpil@mail.ru*

**GIMPILEVICH YURI B.**

*Sc.D, professor*

*gimpil@mail.ru*

*Инжиниринговый центр изделий микро-  
и нанoeлектроники СевГУ*

*299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33*

*Engineering Center of Micro- and Nanoelectronics Devices  
SevSU*

*33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053*

В работе представлены результаты разработки прототипа системы технического зрения, выполненного на основе программируемой логической интегральной схемы. Изложен метод улучшения различимости информативных фрагментов на цифровых изображениях топологий интегральных схем и его аппаратная реализация.

*Ключевые слова: ПЛИС; цифровая обработка изображений; различимость; топология интегральной схемы.*

The paper presents the results of developing a prototype of a technical vision system based on a field programmable gate array. A method for improving the discernibility of informative regions on digital images of integrated circuits layouts has been presented.

*Keywords: FPGA; digital image processing; discernibility; integrated circuit layout.*

### ВВЕДЕНИЕ

Опτικο-визуальные методы контроля в микроэлектронике применяются для поиска микро- и макродефектов, измерения размеров элементов и пр. Качество (информативность) наблюдаемого видеоизображения напрямую влияет на эффективность производимых с помощью данных средств контроля операций. Одной из возможных проблем при работе с современным контрольно-измерительным оборудованием, использующим устройства видеорегистрации, является недостаточная различимость границ разделения участков на цифровых изображениях топологий интегральных схем. В общем случае низкий контраст

изображения является следствием несогласованности динамических диапазонов изображения и воспроизводящего устройства [1]. В данном случае глобальное или локальное снижение контраста может быть вызвано выбором неверного фокусного расстояния камеры или неравномерной освещенностью наблюдаемой рабочей зоны.

Повышение эффективности работы систем визуального контроля может достигаться применением специализированных систем освещения, светофильтров или средств постобработки видеоизображения. Из этого следует, что более совершенные методы коррекции цифровых изображений могут повысить



эффективность работы системы визуального контроля без существенных финансовых затрат.

В работе представлен метод улучшения различимости информативных фрагментов на цифровых изображениях топологий интегральных схем. Представлены результаты разработки прототипа системы технического зрения, выполненного на основе программируемой логической интегральной схемы, с реализацией описанного в работе метода. Целью настоящей работы является демонстрация эффективности предлагаемого метода коррекции цифровых изображений топологий интегральных схем для контрольно-измерительных систем, использующих визуальный метод контроля.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Традиционно методы повышения контрастности растровых изображений можно разделить на две категории: глобальные и адаптивные (локальные) [2]. Глобальные методы контрастирования подразумевают преобразование всей шкалы яркости. К таким методам относится линейное контрастирование, осуществляющее линейное растяжение шкалы яркости исходного изображения на весь возможный диапазон. Методы нелинейного контрастирования выполняют преобразование шкалы яркости в соответствии с определенным нелинейным законом. К таким методам относятся степенные преобразования яркости (гамма-коррекция, соларизация и др.), логарифмическое преобразование и пр., где показатель степени выбирается в зависимости от характера исходного изображения. Адаптивные методы контрастирования предполагают преобразование яркости каждого конкретного пикселя изображения в зависимости от характеристик его окрестности. К адаптивным относятся методы, основанные на применении пространственных фильтров, которые реализуют математические операторы (например оператор Лапласа, выполняющий повышение резкости изображения). Также адаптивное увеличение контрастности достигается за счет применения к локальным областям функций, которые используются глобальными методами контрастирования.

Повышение эффективности работы оборудования визуального контроля, как правило, начинают с применения глобальных методов контрастирования, не требующих больших вычислительных ресурсов. Однако данные методы не учитывают неравномерность распределения динамических диапазонов и контрастов различных областей изображения. Применение адаптивных методов, таких как пространственная фильтрация фильтром Лапласа, позволяет повысить резкость, но имеет существенный недостаток. Степень повышения резкости одинакова для всего изображения и не учитывает контрастность соседних областей. Другие адаптивные методы повышения контрастности, предполагающие определение таких параметров окрестности, как форма гистограммы яркости, энтропия, среднеквадратическое отклонение, являются вычислительно более сложными и требуют ряда предварительных экспериментов. Таким образом, задача обработки видеоизображения в режиме реального времени усложняется, что требует использования более дорогостоящего вычислительного оборудования. С учетом этого предлагается следующий метод коррекции цифровых изображений, ориентированный на улучшение различимости информативных фрагментов топологий интегральных схем. Аппаратная реализация представленного метода позволяет проводить автоматическую коррекцию видеоизображения, основываясь на анализе гистограмм яркости и учитывая особенности работы зрительной системы человека.

### МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ РАЗЛИЧИМОСТИ

Метод предполагает увеличение контраста путем преобразования динамического диапазона яркостей изображения [3]. Для этого на основе исходного изображения (рис. 1) формируются два изображения, содержащие поддиапазоны малых и больших яркостей. Подобное разделение позволяет улучшить различимость информативных фрагментов, которые расположены в малоконтрастных областях с преобладанием больших или малых уровней яркости.

Таким образом, первым этапом коррекции является определение границы разделения диапазона яркости исходного

### INTRODUCTION

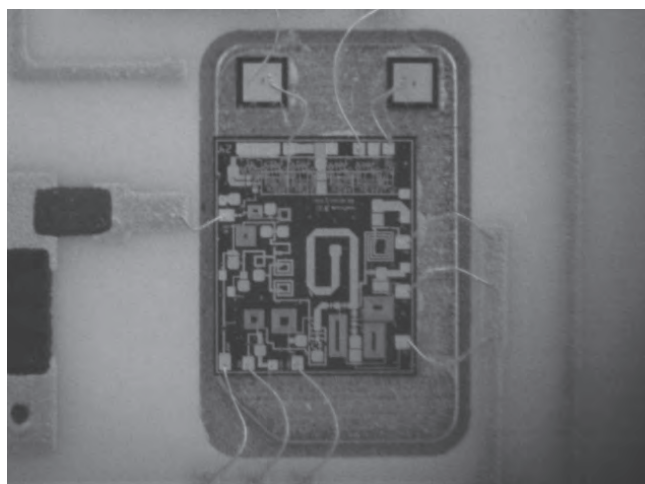
Optical-visual methods of control in microelectronics have been used to search for micro- and macrodefects, to measure the dimensions of elements, etc. The quality (informativeness) of observed video image directly affects the efficiency of operations performed with the help of these monitoring tools. One of the possible problems while working with modern control and measuring equipment using video recording devices is the insufficient discernibility of separation boundaries of regions on digital images of integrated circuit layouts. In general, the low contrast of image is a consequence of inconsistency of dynamic ranges of image and reproducing device [1]. In this case, a global or local decrease in contrast may be caused by choosing the wrong focal length of the camera or uneven illumination of the observed working area.

The efficiency of visual control systems can be improved by using specialized lighting systems, light filters or means of post-processing video. It follows that more advanced methods for correcting digital images can increase the efficiency of the visual control system without significant financial costs.

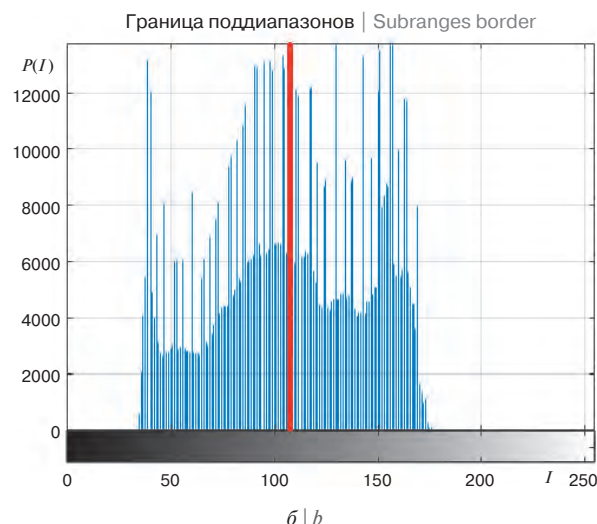
The article presents a method for improving discernibility of informative regions on digital images of integrated circuits layouts. The results of the development of technical vision system prototype, made on the basis of a field programmable gate array, with the implementation of the method described in the work have been presented. The purpose of this article is to demonstrate the effectiveness of the proposed method for correcting digital images of integrated circuits layouts for instrumentation systems that use a visual control method.

### DEFINING THE PROBLEM

Traditionally, methods for contrast improvement of raster images can be divided into two categories: global and adaptive (local) [2]. Global methods of contrasting suggest conversion of entire scale of intensity. Such methods include linear contrast enhancement, performing linear expansion of the scale of original image intensity to the maximum possible range. The methods of nonlinear contrast enhancement perform transformation of intensity scale in accordance with a certain nonlinear law. Such methods include power-law transformations of intensity (gamma correction, solarization, etc.), logarithmic transformation, etc., where exponent is selected depending on the character of original image. Adaptive methods of contrasting imply transformation of intensity of each particular pixel of the image depending



а | а



б | б

Рис. 1. Исходное изображение (а) и его гистограмма  $P(I)$  (б)

Fig. 1. The original image (a) and its histogram  $P(I)$  (b)

изображения на поддиапазоны. Для этого может использоваться среднее арифметическое значение яркости

$$I_{\text{mean}} = \frac{\sum I(x,y)}{N}, \quad (1)$$

где  $N$  — количество пикселей изображения,  $I(x,y)$  — значение яркости пикселя.

Однако при наличии на изображении обширной малококонтрастной области значение средней яркости может оказаться завышенным или заниженным в зависимости от преобладающих в малококонтрастной области уровней яркости. Это ограничивает возможность отображения объектов, относящихся к поддиапазону малых или больших яркостей. Для корректного определения границы разделения диапазона яркости требуется исключить из исходного изображения пиксели подпороговой области. Подпороговая область — область изображения, контраст в которой не превышает пороговой контрастной

чувствительности зрительной системы человека [4]. Для определения пикселей подпороговой области требуется рассчитать значение локального контраста окрестности каждого из пикселей исходного изображения согласно формуле

$$K = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  — максимальная и минимальная яркость выбранной области изображения соответственно.

По окончании расчета значение локального контраста сравнивается со значением 0,02 (пороговая контрастность зрительной системы человека при дневных условиях), и при его превышении пиксель добавляется к расчету средней яркости изображения. Стоит отметить, что чем меньше выбранная окрестность, тем более точно определяются границы подпороговой области. Поэтому выбран минимально возможный размер окрестности —  $3 \times 3$  пикселя. Для аппаратной реализации

on characteristics of its neighborhood. Adaptive methods include methods based on the application of spatial filters, which are implemented by mathematical operators (for example, the Laplacian operator performs image sharpness improvement). Also adaptive contrast increase is achieved due to application of functions used by global contrast methods to neighborhoods.

As a rule, efficiency improvement of visual control equipment begins with the use of global contrast enhancement methods that do not require large computational resources. However, these methods do not take into account uneven distribution of dynamic ranges and contrasts of different areas of the image. The use of adaptive methods, such as spatial filtering with a Laplace filter, can increase sharpness, but has a significant drawback. The degree of sharpening is the same

for the whole image and does not take into account contrast of neighboring areas. Other adaptive methods for contrast improvement, suggesting the definition of such neighborhoods parameters as the form of intensity histogram, entropy, RMS deviation, are computationally more complex and require a number of preliminary experiments. Thus, the task of video processing in real time is complicated, which requires the use of more expensive computing equipment. That is why the following method for correcting digital images has been proposed, aimed at improving discernibility of informative regions of integrated circuits layouts. The hardware implementation of the presented method allows the automatic correction of video image based on the analysis of intensity histograms and taking into account peculiarities of human visual system work.

## METHOD OF IMPROVING THE DISCERNIBILITY

The method implies contrast improvement by converting dynamic range of image intensity [3]. For this purpose, on the basis of the original image (Fig. 1), two images are formed, comprising low and high intensity subranges. This separation can improve discernibility of informative regions, which are located in low-contrast areas with a predominance of high or low levels of intensity.

Thus, the first step of correction is to determine the boundary of separation of intensity range of the original image into subranges. For this purpose, arithmetic mean value of intensity can be used:

$$I_{\text{mean}} = \frac{\sum I(x,y)}{N}, \quad (1)$$

where  $N$  is the number of pixels in the image;  $I(x,y)$  — pixel intensity value.

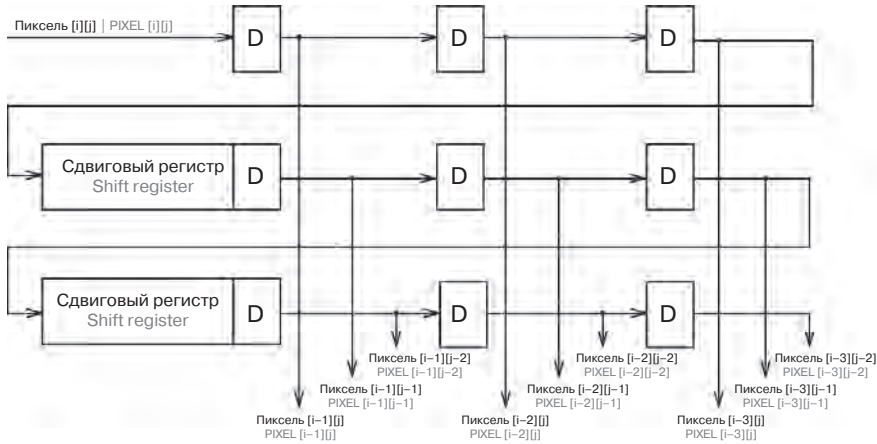


Рис. 2. Схема включения сдвиговых регистров  
Fig. 2. Diagram of switching shift registers

такой операции используется последовательность из сдвиговых регистров (рис. 2) с шириной шины данных равной разрядности значения глубины цвета пикселя. Объем памяти сдвигового регистра определяется размерностью строки видеоданных.

на котором уровни яркости исходного изображения, превышающие среднее значение, сдвигаются в начало диапазона.

Таким образом, значения яркости разностного изображения  $S_n$  рассчитываются согласно формуле

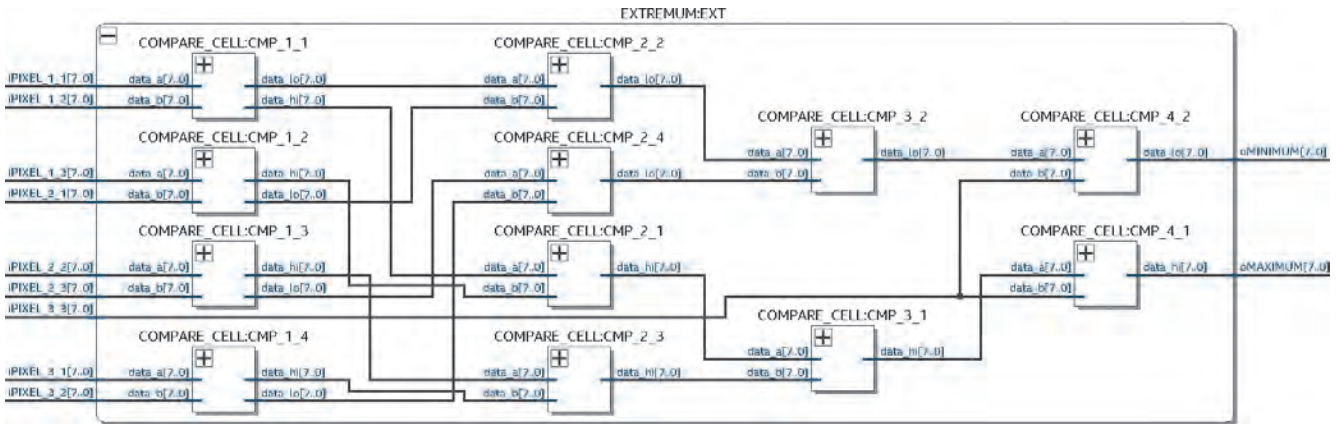


Рис. 3. RTL-вид схемы включения блоков сравнения  
Fig. 3. RTL-view diagram of switching comparison blocks

However, if there is an extensive low-contrast region in the image, the average intensity value may be overestimated or underestimated, depending on intensity levels prevailing in the low-contrast region. This limits the ability to display objects related to a subrange of low or high intensities. In order to correctly determine the separation boundary of the range of original image, it is required to exclude the pixels of the subthreshold area from the original image. Subthreshold area is image area, whose contrast does not exceed the threshold contrast sensitivity of the human visual system [4]. To determine the pixels of the subthreshold region, it is required to calculate contrast value of neighborhood of each of pixels of the original image according to the formula:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (2)$$

where  $I_{\max}$ ,  $I_{\min}$  are maximum and minimum intensity of the selected image area, respectively.

At the end of calculation, the value of local contrast is compared with the value 0.02 (threshold contrast of the human visual system under daytime conditions) and when it is exceeded, the pixel is added to calculation of average intensity of the image. It should be noted that the smaller the selected neighborhood, the more accurately the boundaries of the subthreshold region will be determined. Therefore, the minimum possible size of the neighborhood ( $3 \times 3$  pixels) was selected. For hardware implementation

D — регистр-зашелка, а каждый из выводов соответствует пикселю формируемой окрестности (с координатами  $i, j$ ).

Так как определение экстремумов окрестности необходимо производить каждый такт, полученные таким образом значения пикселей поступают на последовательность из блоков сравнения (рис. 3).

По завершении расчета границы разделения поддиапазонов яркости  $I_{\text{mean}}$  выполняется формирование изображений поддиапазонов малых и больших уровней яркости и их отдельная коррекция.

Коррекция поддиапазона больших уровней яркости заключается в формировании разностного изображения,

на котором уровни яркости исходного изображения, превышающие среднее значение, сдвигаются в начало диапазона.

Таким образом, значения яркости разностного изображения  $S_n$  рассчитываются согласно формуле

of such an operation, a sequence of shift registers (Fig. 2) with a data bus width equal to bit depth of the pixel color depth is used. The video data row dimension determines memory size of shift register. D is latch register, and each of the pins corresponds to the pixel of the area (with coordinates  $i, j$ ) being formed.

Since the determination of the extremums of the neighborhood is necessary to make each clock cycle, the pixel values thus obtained are sent to a sequence of comparison blocks (Fig. 3).

When the boundary of the division of intensity subranges  $I_{\text{mean}}$  has been calculated, the imaging of subranges of low and high intensity levels and their separate correction is performed.



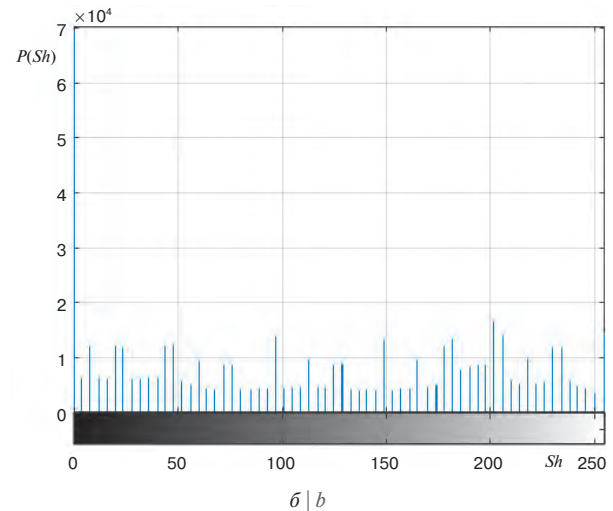
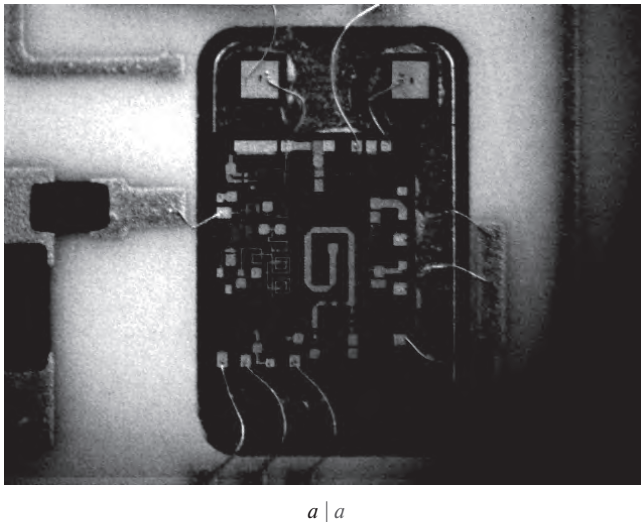


Рис. 4. Изображение, полученное в результате коррекции поддиапазона больших уровней яркости (а), и его гистограмма  $P(S_h)$  (б)  
Fig. 4. Image obtained as a result of high intensity subrange correction (a) and its histogram  $P(S_h)$  (b)

$$S_h = I - I_{mean}. \quad (3)$$

Для более эффективного использования динамического диапазона разностное изображение  $S_h$  подвергается операции линейного контрастирования, что описывается функцией преобразования яркости вида

$$S = T(I) = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min}, \quad (4)$$

где  $I$  — яркость исходного изображения;  $S$  — яркость обработанного изображения.

При этом входной диапазон уровней яркости ограничивается до 99 % наиболее часто встречающихся значений. Изображение, полученное в результате коррекции поддиапазона больших уровней яркости, представлено на рис. 4.

Для поиска значения ( $EDGE\_H\_99\%$ ), ограничивающего диапазон яркостей разностного изображения перед проведением линейного контрастирования, используется его частотное распределение (гистограмма) яркостей. В ходе процесса загрузки

пикселей осуществляется инкрементирование счетных регистров, соответствующих каждому из значений яркости разностного изображения. При этом размер выделяемой памяти составит  $C_{num} \times C_{pix}$  бит (при полутоновом режиме отображения), где  $C_{num}$  — разрядность числа, соответствующего количеству пикселей изображения при выбранном разрешении,  $C_{pix}$  — разрядность глубины цвета пикселя. После загрузки последнего пикселя кадра по сигналу вертикальной синхронизации начинается поиск граничного значения яркости. Значение, соответствующее количеству 1% пикселей, записывается в счетный регистр перед циклом поиска граничного значения яркости. Далее осуществляется последовательное вычитание значений регистров, хранящих данные гистограммы яркости из счетного регистра, хранящего значение, соответствующее количеству 1% пикселей. При этом вычитание осуществляется от регистра, хранящего значения  $I_{max}$  (максимальное значение) до  $I_{min}$  (минимальное значение). Ограничивающим значением является уровень яркости, соответствующий количеству пикселей, которое больше либо равно значению счетного регистра 1% пикселей. Направление

Correction of high intensity levels subrange consists in forming a differential image in which intensity levels of original image, exceeding the average value, are shifted to the beginning of the range.

Thus, intensity values of the difference image  $S_h$  are calculated according to the formula:

$$S_h = I - I_{mean}. \quad (3)$$

For more efficient use of the dynamic range, a differential image  $S_h$  is subjected to a linear contrast enhancement that is described by the intensity conversion function of the form:

$$S = T(I) = \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} (S_{max} - S_{min}) + S_{min}, \quad (4)$$

where  $I$  is original image intensity;  $S$  — processed image intensity.

Wherein, the input range of intensity levels is limited to 99 % of the most common values. Figure 4 shows an image obtained as a result of the correction of the subrange of high intensity levels.

To find the value ( $EDGE\_H\_99\%$ ) that is limiting intensity range of the difference image before performing linear contrast enhancement, its intensity frequency distribution (histogram) is used. During the pixel loading process, the counting registers corresponding to each of the intensity values of differential image are incremented. In this case, the size of allocated memory will be  $C_{num} \times C_{pix}$  bit (in grayscale display mode),  $C_{num}$  is bit number corresponding to the

number of image pixels at the selected resolution,  $C_{pix}$  is pixel color depth. After loading the last pixel of the frame, the search for the intensity limit value begins with the vertical synchronization signal. The value corresponding to the number of 1% of the pixels is written to the counting register before the search cycle of intensity limit value. Next, a sequential subtraction of the values of registers storing intensity histogram data from the counting register storing the value corresponding to the number of 1% of pixels is performed. In this case, subtraction is carried out from a register storing the values from  $I_{max}$  (maximum value) to  $I_{min}$  (minimum value). The limiting value is the intensity level corresponding to the number of pixels that is greater than or equal to the value of the



Imax	202											
Imin	0											
Imean	106											
EDGE_H_99%	63											
I(x,y)	157	158	157	158	160	162	160	158	157	160	162	161
I-Imean	47	51	52	51	52	54	56	54	52	51	54	55
Sh(x,y)	190	206	210	206	210	218	226	218	210	206	218	226

Рис. 5. Временные диаграммы блока коррекции поддиапазона больших уровней яркости

Fig. 5. Time diagrams of correction block operation of high intensity subrange

вычитания обусловлено характером частотного распределения яркости разностного изображения, где количество значений яркости ниже  $I_{mean}$  (равных после преобразования — 0) составляет более 1% от количества всех пикселей. По окончании поиска порогового значения память, хранящая данные частотного распределения, очищается для загрузки новых данных. Временные диаграммы работы блока коррекции поддиапазона больших уровней яркости, полученные логическим анализатором SignalTap II, представлены на рис. 5.

Коррекция поддиапазона малых уровней яркости заключается в проведении линейного контрастирования поддиапазона яркостей  $I_{min} \dots I_{mean}$  исходного изображения и описывается выражением

$$S_i = T(I) = \begin{cases} \frac{I}{I_{mean} - I_{min}}, & \text{при } I_{min} < I < I_{mean} \\ 1, & \text{при } I \geq I_{mean} \end{cases} \quad (5)$$

Для повышения эффективности преобразования аналогично процессу коррекции поддиапазона больших уровней яркости входной диапазон яркостей ограничивается до 99% наиболее часто встречающихся значений. Стоит отметить, что значения яркости, используемые в формулах (4,5) коррекции поддиапазонов, являются нормированными к своему максимальному значению. Изображение, полученное в результате линейного контрастирования поддиапазона малых уровней яркости, представлено на рис. 6.

Реализация операции поиска значения ( $EDGE\_L\_99\%$ ), ограничивающего поддиапазон малых уровней яркостей перед проведением линейного контрастирования, схожа с реализацией

поиска для поддиапазона больших яркостей. Для поиска используется частотное распределение яркостей  $P(I)$  в диапазоне  $I_{min} \dots I_{mean}$ . Главным отличием является то, что вычитание значений гистограммы яркостей из счетного регистра, хранящего значение, соответствующее количеству 1% пикселей, осуществляется в направлении от  $I_{min}$  (минимальное значение яркости) до  $I_{max}$  (максимальное значение яркости). Ограничивающим значением является уровень яркости, соответствующий количеству пикселей, которое больше либо равно значению счетного регистра 1% пикселей. Направление вычитания обусловлено характером частотного распределения поддиапазона малых яркостей после коррекции (5), где количество значений яркости выше  $I_{mean}$  (равных после преобразования —  $I_{max}$ ) составляет более 1% от общего количества пикселей. Временные диаграммы работы блока коррекции поддиапазона малых уровней яркости изображены на рис. 7.

Следующим этапом является совмещение полученных в результате коррекции изображений. Яркость совмещенного изображения описывается формулой

$$S_\Sigma = w_g S_h + (1 - w_g) S_l, \quad (6)$$

где  $w_g = 0 \dots 1$  — весовой коэффициент, определяющий вклад изображений коррекции поддиапазонов больших и малых яркостей в результирующее изображение.

Использование «глобального» весового коэффициента  $w_g$  не позволяет учитывать пространственную неравномерность ухудшения контраста, тем самым нивелируя выигрыш от увеличения динамического диапазона различных поддиапазонов яркости.

counting register of 1% of pixels. The direction of subtraction is due to the character of the intensity frequency distribution of the difference image, where the number of intensity values below  $I_{mean}$  (equal after conversion to 0) is more than 1% of the number of all pixels. At the end of the threshold search, the memory storing the frequency distribution data is cleared to load new data. Figure 5 shows time diagrams of correction block operation of high intensity subrange obtained by the Logical Analyzer SignalTap II.

Correction of low intensity levels subrange consists in performing a linear contrast enhancement of intensity subrange  $I_{min} \dots I_{mean}$  of the original image and is described by the expression:

$$S_i = T(I) = \begin{cases} \frac{I}{I_{mean} - I_{min}}, & \text{if } I_{min} < I < I_{mean} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

For conversion efficiency improvement, similar to the process of correcting the subrange of high intensity levels, the input intensity range is limited to 99% of the most common values. It is worth noting that the intensity values used in formulas (4, 5) of the subranges correction are normalized to their maximum value. Figure 6 shows the image obtained as a result of linear contrast enhancement of the low intensity levels subrange.

The implementation of the search operation for a value ( $EDGE\_L\_99\%$ ) that

limits the subrange of low intensity levels before performing linear contrast enhancement is similar to the search implementation for the subrange of high intensity. For the search, the frequency distribution of the intensity  $P(I)$  in the range  $I_{min} \dots I_{mean}$  is used. The main difference is that the subtraction of intensity histogram values from the counting register that stores value corresponding to the number of 1% of pixels is carried out in the direction from  $I_{min}$  (minimum intensity value) to  $I_{max}$  (maximum intensity value). The limiting value is the intensity level corresponding to the number of pixels that is greater than or equal to the value of the counting register of 1% of pixels. The direction of subtraction is due

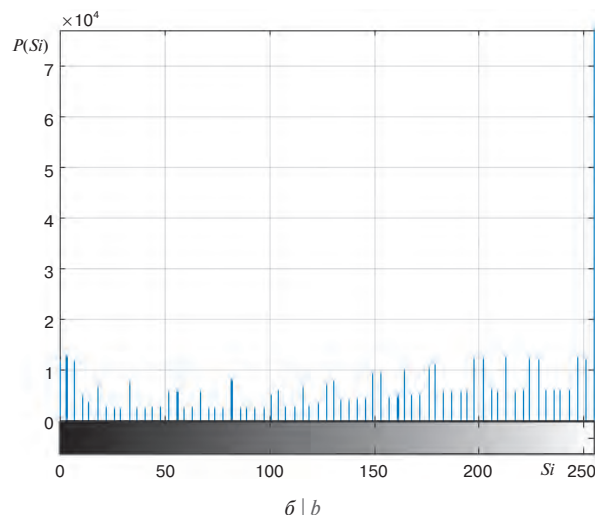
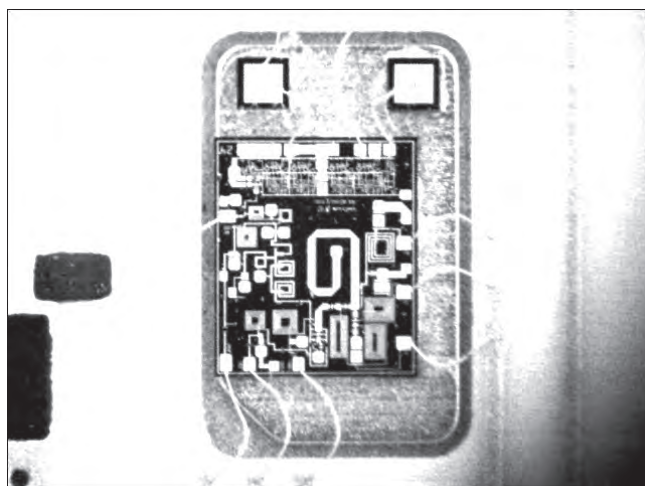


Рис. 6. Изображение, полученное в результате коррекции поддиапазона малых уровней яркости (а), и его гистограмма  $P(S_i)$  (б)

Fig. 6. Image obtained as a result of low intensity subrange correction (a) and its histogram  $P(S_i)$  (b)

Imax	202									
Imin	0									
Imean	106									
EDGE_L_99%	38									
I(x,y)	42	39	38	39	41	40	39	38	40	45
Sl(x,y)	33	14	3	0	3	11	7	3	0	7

Рис. 7. Временные диаграммы работы блока коррекции поддиапазона малых уровней яркости

Fig. 7. Time diagrams of correction block operation of low intensity subrange

Для учета свойств различных областей изображения используются локальные весовые коэффициенты  $w_{local}$ , каждый из которых соответствует пикселю исходного изображения  $I(x,y)$ . Для расчета локального весового коэффициента используется усредненное значение окрестности пикселя, нормированное к максимальному значению согласно представленной формуле

$$w_{local} = \frac{\bar{I}(x,y) - \bar{I}_{min}}{\bar{I}_{max}}. \quad (7)$$

to the character of frequency distribution of the low intensity subrange after correction (5), where the number of intensity values above  $I_{mean}$  (equal after conversion —  $I_{max}$ ) is more than 1% of the number of all pixels. Figure 7 shows time diagrams of correction block operation of low intensity subrange.

The next step is combination of the resulting correction images. The intensity of the combined image is described by the formula:

$$S_{\Sigma} = w_g S_h + (1 - w_g) S_l, \quad (6)$$

where  $w_g = 0...1$  is weight coefficient that determines the contribution of the images

Усреднение выполняется за счет использования сглаживающего пространственного фильтра с ядром свертки

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1B} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2B} \\ \dots & \dots & g_{xy} & \dots \\ g_{A1} & g_{A2} & \dots & g_{AB} \end{pmatrix} = \frac{1}{AB} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $A, B$  — размеры маски фильтра,  $g_{xy}$  — элемент маски фильтра.

of the correction of subranges of high and low intensities to the resulting images.

The use of the “global” weight coefficient  $w_g$  does not allow taking into account the spatial unevenness of the deterioration of the contrast, thereby negating the gain from the increase in the dynamic range of different intensity subranges. To take into account the properties of different image areas, local weight coefficients  $w_{local}$  are used, each of which corresponds to the pixel of the original image  $I(x,y)$ . To calculate the local weight coefficient, the average pixel area intensity normalized to the maximum value is used, according to the formula:

$$w_{local} = \frac{\bar{I}(x,y) - \bar{I}_{min}}{\bar{I}_{max}}. \quad (7)$$

Averaging is performed by using a smoothing spatial filter with a convolution kernel:

$$g(x,y) = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1B} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2B} \\ \dots & \dots & g_{xy} & \dots \\ g_{A1} & g_{A2} & \dots & g_{AB} \end{pmatrix} = \frac{1}{AB} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

where  $A, B$  are filter mask size,  $g_{xy}$  is filter mask element.

The ratio of the filter mask sizes is selected in proportion to the size of the original image.

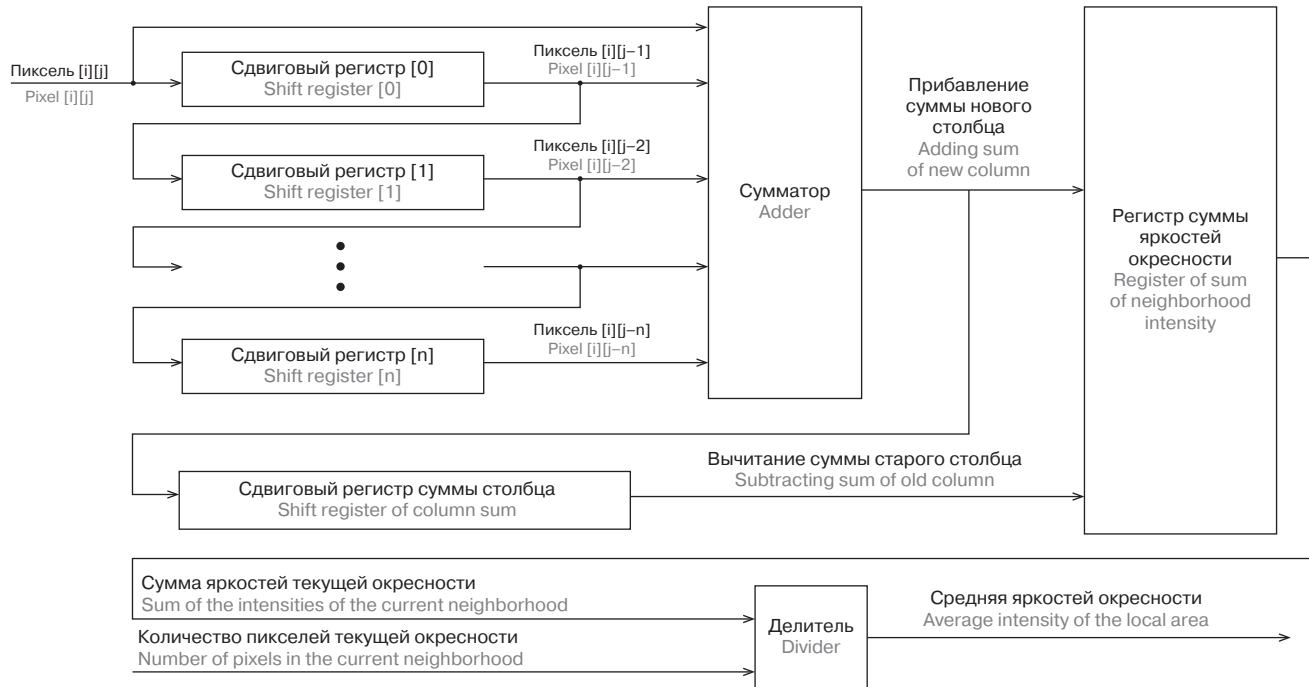


Рис. 8. Схема поиска среднего значения яркости окрестности

Fig. 8. Diagram of neighborhood average intensity search

Соотношение размеров маски фильтра выбирается пропорционально размерам исходного изображения. Следовательно, вертикальный размер маски фильтра будет равен

$$A = \frac{M}{N} B, \quad (9)$$

где  $M$ ,  $N$  — ширина и высота исходного изображения.

Исходя из того, что сглаживающий пространственный фильтр является фильтром нижних частот с частотой среза, определяемой размером фильтра, использование весовых коэффициентов  $w_{local}$  приводит к подавлению верхних частот, а инверсных коэффициентов  $[1 - w_{local}]$  — к подавлению нижних частот. Выбор малых размеров маски фильтра приводит

к повышению резкости контуров в области коррекции поддиапазона малых яркостей. В силу слабоконтрастной природы и, соответственно, небольшой ширины спектра пространственных частот уже при  $B = 0,1N$  обеспечивается значительное снижение эффекта ослабления нижних частот.

Реализация пространственного фильтра по аналогии со схемой (см. рис. 1) является крайне ресурсозатратной. Минимальный размер матрицы свертки равняется  $M \times N$  пикселей, что соответствует количеству логических сигналов, которые необходимо синхронно обрабатывать. При этом полный набор весовых коэффициентов будет рассчитан по окончании загрузки кадра видеоизображения. Поскольку матрица свертки представляет собой набор одинаковых элементов, определение среднего

Therefore, the vertical size of the filter mask will be equal to:

$$A = \frac{M}{N} B, \quad (9)$$

where  $M$ ,  $N$  are width and height of the original image.

Based on that the smoothing spatial filter is a low-pass filter with a cutoff frequency determined by the size of the filter, the use of weights  $w_{local}$  leads to the suppression of high frequencies, and the inverse coefficients  $[1 - w_{local}]$  to the suppression of low frequencies. The selection of small filter mask sizes leads to an increase in the sharpness of contours in the area of the low intensity subrange correction. Due to low-contrast nature and, accordingly, the small

width of spatial frequencies spectrum, already at  $B = 0.1N$ , a significant reduction in the effect of attenuation of low frequencies is provided.

The implementation of the spatial filter by analogy with the diagram (Fig. 1) is extremely resource intensive. The minimum size of the convolution matrix is equal to  $M \times N$  pixels that corresponds to the logical signals number that needs to be processed synchronously. Herewith, the full set of weight coefficients will have been calculated at the end of video frame loading. Since the convolution matrix is a set of identical elements, the determination of average intensity of a neighborhood can be achieved according to the diagram shown in Fig. 8.

The amount of memory occupied by the shift register is determined by the amount of memory of video image line. The number of shift registers is determined basing on the vertical size of the calculated neighborhood and is equal to  $A + 1$  (with an even value of  $A$ ) or  $A$  (with an odd number). From the diagram (Fig. 8), it follows that the data enters the sequence of shift registers and forms the output of the intensity values of the pixels corresponding to the same address in the row and thus forming the neighborhood column, its right edge. After that, the data of newly formed column are added to the current sum of the intensity of the neighborhood and are transferred to the shift register responsible for outputting the sum of the column corresponding to the left edge of the current





значения яркости окрестности может быть достигнуто согласно схеме, представленной на рис. 8.

Объем памяти, занимаемый сдвиговым регистром, определяется объемом памяти одной строки видеоизображения. Количество сдвиговых регистров определяется исходя из вертикального размера рассчитываемой окрестности и равняется  $A + 1$  (при четном значении  $A$ ) или  $A$  (при нечетном). Из схемы (см. рис. 8) следует, что данные поступают в последовательность сдвиговых регистров и формируют на выходе значения яркости пикселей, соответствующих одинаковому адресу в строке, образуя тем самым столбец окрестности, ее правую грань. После чего данные новообразованного столбца складываются с текущей суммой яркостей окрестности и поступают на сдвиговый регистр, отвечающий за вывод суммы столбца, соответствующего левой грани текущей рассчитываемой окрестности. Размер сдвигового регистра сумм столбцов определяется из горизонтального размера окрестности и равняется  $B + 1$  (при четном значении  $B$ ) или  $B$  (при нечетном). Таким образом, текущий (новый) столбец добавляется в счетный регистр суммы и в тот же момент столбец,

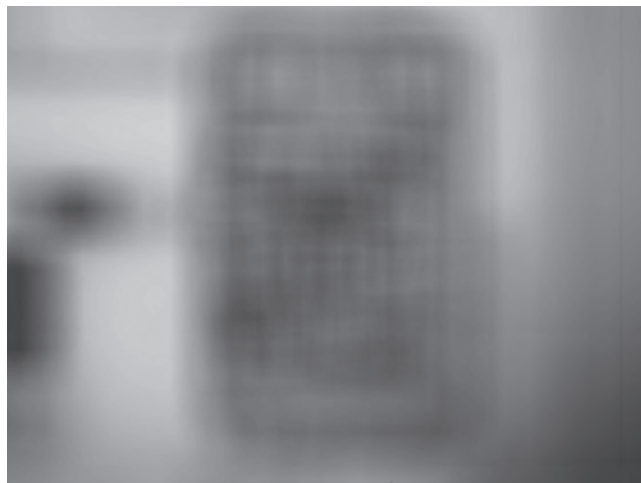
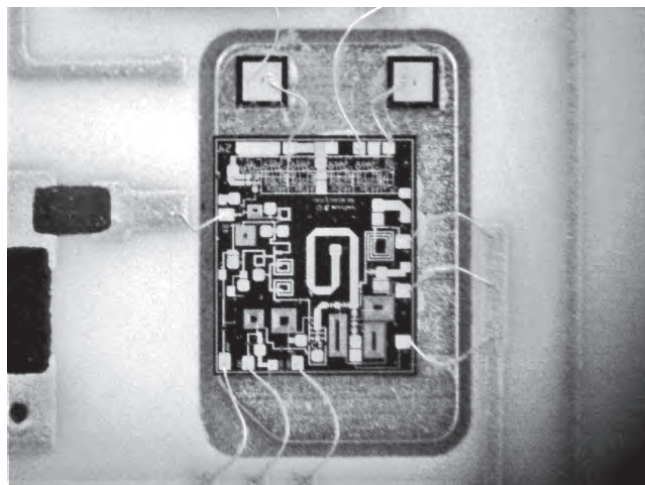
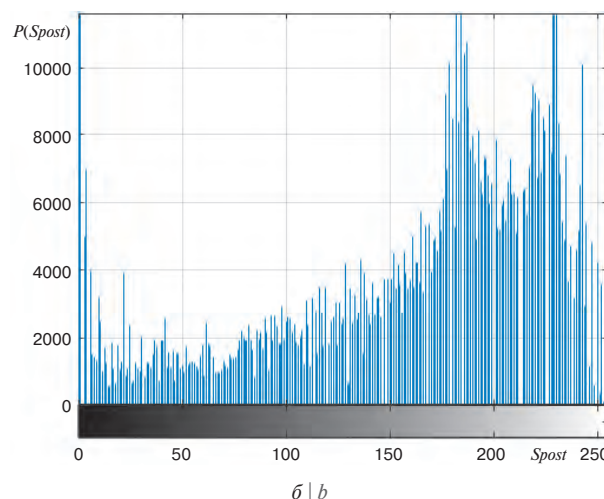


Рис. 9. Изображение массива весовых коэффициентов  
Fig. 9. Weight coefficients array image



$a | a$



$b | b$

Рис. 10. Совмещенное изображение после проведения постобработки ( $\gamma = 1,1$ ) (а) и его гистограмма (б)  
Fig. 10. Combined image after post-processing ( $\gamma = 1,1$ ) (a) and its histogram (b)

calculated neighborhood. The size of the shift register of the sum of columns is determined from the horizontal size of the neighborhood and is equal to  $B + 1$  (for an even value of  $B$ ) or  $B$  (for an odd number). Thus, the current (new) column is added to counting register of the sum and at the same time the column that is no longer in the calculated neighborhood is subtracted, which allows calculating the average value of the neighborhood intensity as a result of displacement along the image coordinates. Further, the sum of the intensity values of the neighborhood is divided by their number and normalized to  $I_{\max}$  (7). Figure 9 shows an image of weight coefficients array.

To improve the efficiency of the method, post-processing is performed, consisting

in the  $\gamma$ -correction of the combined image [5]. The exponent  $\gamma$  is selected using the formula:

$$\gamma = \frac{\log[0,5T(S_{\Sigma_{\min}}^*)]}{\log[T(S_{\Sigma_{\min}}^*)]}, \quad (10)$$

where  $S_{\Sigma_{\min}}^* = S_{\Sigma}$ , when  $F(S_{\Sigma}) = 0.01$ , which is the level of intensity  $S_{\Sigma}(x,y)$ , for which the value of the integral function is 1%.

As a result of post-processing, the dynamic range of low intensity, represented by 1% of pixels of the image, will be compressed by half. Due to this transformation, the dynamic range of low intensities is compressed and the range of average and high intensities of the combined image  $S_{\Sigma}(x,y)$  is expanded.

Figure 10 shows the combined image after post-processing.

Implementation of  $S_{\Sigma_{\min}}$  search block is similar to search for low intensity subrange correction edge. Figure 11 shows time diagrams of the combining images process with subsequent post-processing.

In hardware implementation, the weight coefficients  $w_{local}$  take integer values from 0 to 100. When conversion of the dynamic range is completed, to improve the discernibility of the separation boundaries of the layout regions, it is possible to use the Laplace filter, with the convolution matrix shown in Fig. 12. Figure 1 shows a diagram of forming the neighborhood.

Figure 13 shows the result of the system operation for improving the discernibility of informative regions of integrated circuits layouts.



lmean	106															
l(x,y)	125	117	113	117	127	125	123	118	114	111	108	110	117	115		
Sl(x,y)	255															
Sh(x,y)	60	76	44	28	44	85	76	68	48	32	20	8	16	44		
Wlocal	51	52	53				54	55								
S <sub>Σ</sub> (x,y)	155		145	134	143	164	158	154	152	141	132	125	119	123	138	
S <sub>post</sub> (x,y)	135	147	154	137	126	135	157	151	146	144	133	124	116	110	114	130

Рис. 11. Временные диаграммы процесса совмещения изображений с последующей постобработкой

Fig. 11. Time diagrams of combining images process with subsequent post-processing

который уже не входит в рассчитываемую окрестность, вычитается, что позволяет рассчитывать среднее значение яркости окрестности в результате смещения по координатам изображения. Далее сумма значений яркостей окрестности делится на их количество и нормируется к  $I_{\max}$  (7). Изображение массива весовых коэффициентов представлено на рис. 9.

Для повышения эффективности работы метода выполняется постобработка, заключающаяся в  $\gamma$ -коррекции совмещенного изображения [5]. Показатель степени  $\gamma$  выбирается с использованием формулы

$$\gamma = \frac{\log[0,5T(S_{\Sigma\min}^*)]}{\log[T(S_{\Sigma\min}^*)]}, \quad (10)$$

-1	-2	-1
-2	22	-2
-1	-2	-1

: 10

Рис. 12. Ядро свертки фильтра Лапласа

Fig. 12. Laplace filter convolution kernel

## HARDWARE PLATFORM DESIGN

The design of the technical vision system prototype has been performed basing on a field programmable gate array (FPGA). The similar class of devices is used due to availability of necessary computing resources, support for parallel computing, the possibility of hardware debugging of the system being developed, which is actual for real-time video images processing. Camcorder based on CMOS matrix is used for digital images formation that makes it possible to obtain an image with a resolution of  $640 \times 480$  pixels with a frame synchronization frequency of 30 Hz. The image is displayed in grayscale mode with a color depth of 8 bits. Figure 14 shows a block diagram of the technical vision system.

The system includes a camera initialization module using the Serial Camera Control

Bus (SCCB) interface; data capture module; an image processing module that implements a method for improving the discernibility of informative regions on digital images of integrated circuits layouts; a video display controller that generates synchronization signals at a given resolution to display the video signal on monitor.

It should be noted that the frame rate of the monitor (using the VGA interface) with the selected resolution is 60 Hz, which eliminates the direct connection of the camera to the video controller and requires the use of a frame buffer. The amount of memory for a frame with a grayscale display mode and the selected resolution is 307200 bytes that is a significant part of the on-chip memory size of the selected FPGA. Therefore, external memory is used as a frame buffer, which allows using most of the FPGA resources for

где  $S_{\Sigma\min}^* = S_{\Sigma}$  при  $F(S_{\Sigma}) = 0,01$ , что является уровнем яркости  $S_{\Sigma}(x,y)$ , для которого значение интегральной функции распределения равно 1%.

В результате постобработки динамический диапазон малых яркостей, представленный 1% пикселей изображения, будет сжат в два раза. За счет этого преобразования достигается сжатие динамического диапазона малых яркостей и растяжение диапазона средних и больших яркостей совмещенного изображения  $S_{\Sigma}(x,y)$ .

Совмещенное изображение после проведения постобработки представлено на рис. 10.

Операция поиска уровня  $S_{\Sigma\min}$  аналогична операции поиска границы коррекции поддиапазона малых яркостей. Временные диаграммы процесса совмещения изображений с последующей пост-обработкой приведены на рис. 11.

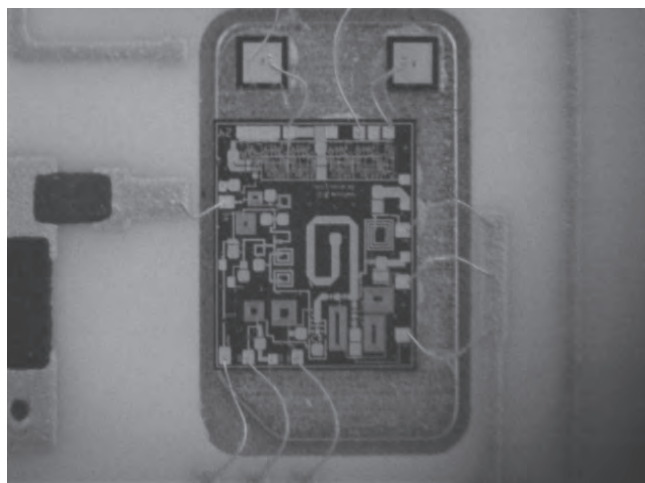
При аппаратной реализации весовые коэффициенты  $w_{local}$  принимают целочисленные значения от 0 до 100. По завершении преобразования динамического диапазона для улучшения различимости границ разделения фрагментов топологии возможно применение фильтра Лапласа с матрицей свертки, представленной на рис. 12. Формирование окрестности выполняется согласно схеме на рис. 1.

Результат работы системы улучшения различимости информативных фрагментов топологий интегральных схем представлен на рис. 13.

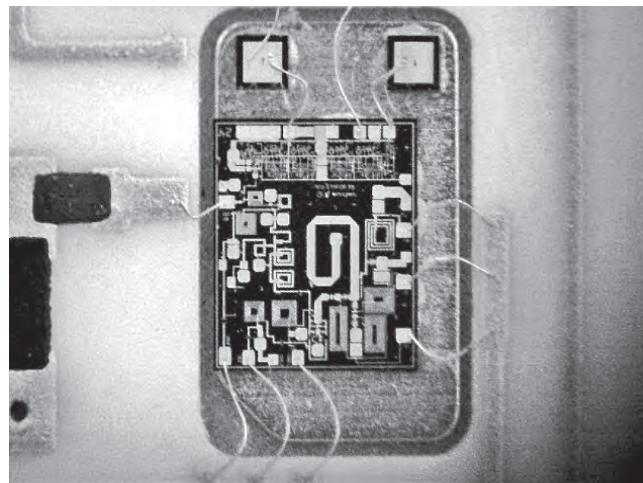
video image processing algorithm implementation.

To reduce the time of writing/reading a video frame in random access memory (RAM), block-by-block recording is used. It is implemented using two FIFO blocks (first in, first out) for writing and for reading from memory. Figure 15 shows the diagram of the memory controller.

The memory controller presented on the block diagram (Fig. 15) implements the following features of operation. The data enter RAM at a high frequency (100 MHz) by preloading the video data into the write FIFO memory (input memory) at a relatively low frequency (25.175 MHz) for the system. At the request of the video display controller, the data are read at the pixel clock frequency of the monitor, previously entered into the read FIFO memory (output memory). A state sequence



а | а



б | б

Рис. 13. Исходное изображение (а) и изображение, полученное в результате работы системы (б)

Fig. 13 Original image (a) and the image obtained as a result of the system operation (b)

### РАЗРАБОТКА АППАРАТНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Разработка прототипа системы технического зрения выполняется на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Использование подобного класса устройств обусловлено наличием необходимых вычислительных ресурсов, поддержкой параллельных вычислительных процессов, возможностью аппаратной отладки разрабатываемой системы, что актуально при обработке видеоизображений в реальном масштабе времени. Для формирования цифровых изображений используется видеокамера на основе КМОП-матрицы, позволяющая получать изображение разрешением  $640 \times 480$  пикселей с частотой кадровой синхронизации 30 Гц. Вывод изображения осуществляется в полутоновом режиме с глубиной цвета 8 бит. Структурная схема системы технического зрения приведена на рис. 14.

В состав системы входят: модуль инициализации камеры, использующий интерфейс SCCB (Serial Camera Control Bus); модуль захвата данных; модуль обработки изображения, реализующий метод улучшения различимости информативных фрагментов на цифровых изображениях топологий интегральных схем; видеоконтроллер, формирующий сигналы синхронизации в заданном разрешении для отображения видеосигнала на мониторе.

Следует отметить, что частота кадровой синхронизации монитора (при использовании интерфейса VGA) при выбранном разрешении составляет 60 Гц, что исключает прямое подключение камеры к видеоконтроллеру и требует применения кадрового буфера. Объем памяти для кадра при полутоновом режиме отображения и выбранном разрешении равен 307200

байт, что составляет значительную часть объема on-chip-памяти выбранной ПЛИС. Поэтому в качестве кадрового буфера применяется внешняя оперативная память, что позволяет использовать большую часть ресурсов ПЛИС для реализации алгоритма обработки видеоизображения.

Для уменьшения времени записи/чтения кадра видеоизображения в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)

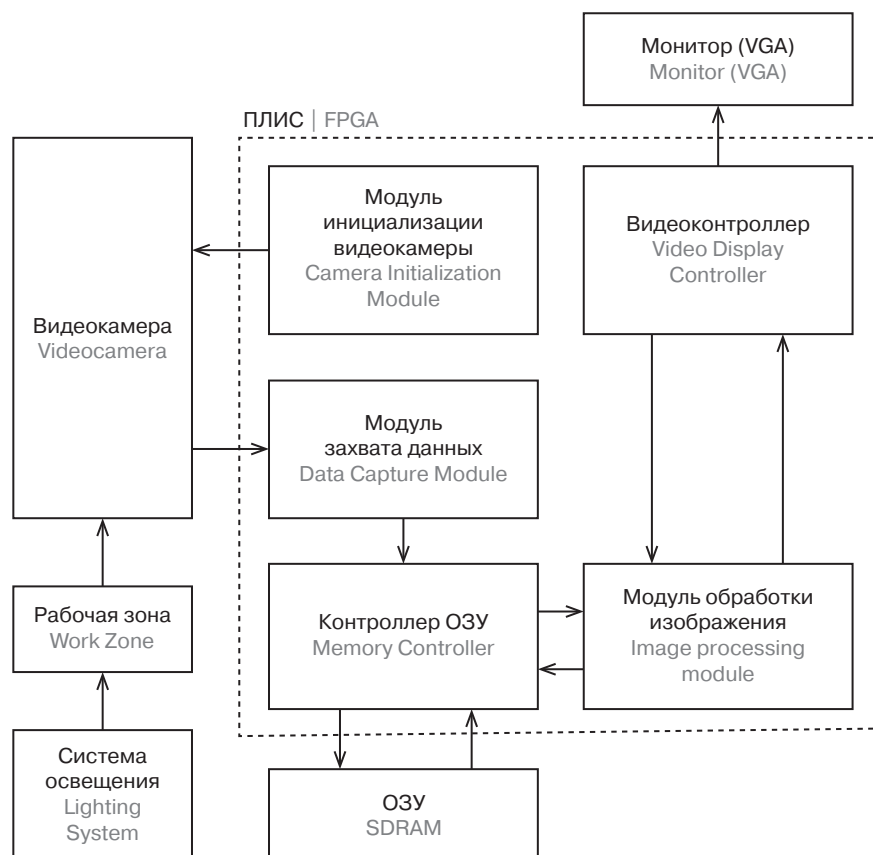


Рис. 14. Структурная схема системы технического зрения

Fig. 14. Block diagram of the technical vision system



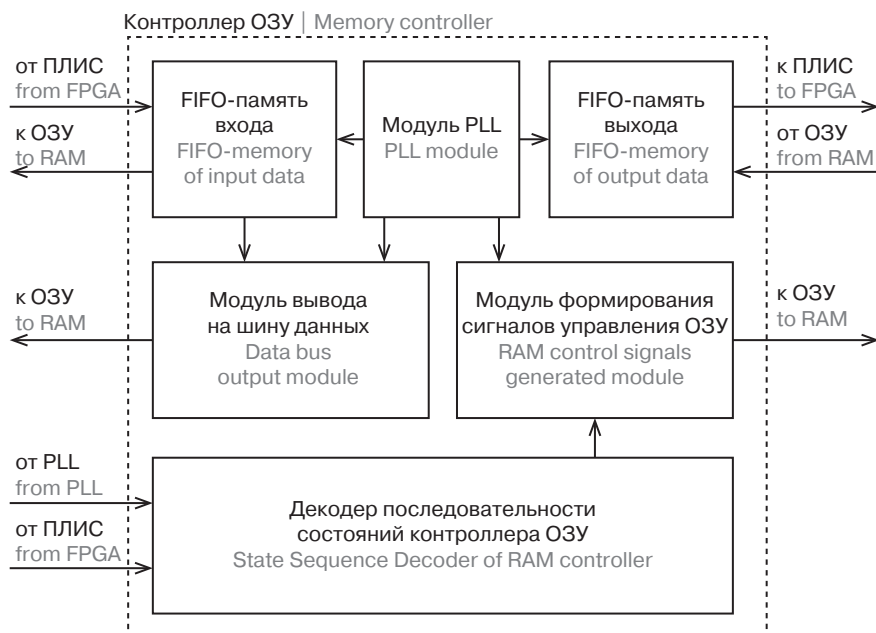


Рис. 15. Структурная схема контроллера ОЗУ

Fig. 15. Memory controller block diagram

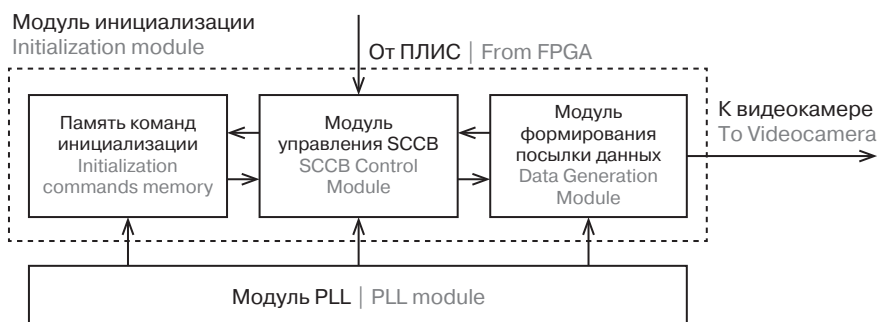


Рис. 16. Структурная схема модуля инициализации

Fig. 16. Block diagram of the initialization module

применяется режим поблочной записи. Это реализуется с помощью двух блоков FIFO (first in, first out) для записи и для чтения из памяти. Структурная схема контроллера ОЗУ изображена на рис. 15.

Представленный на структурной схеме (см. рис. 15) контроллер ОЗУ реализует следующие особенности работы. Данные поступают в ОЗУ на высокой частоте (100 МГц) посредством предзагрузки видеоданных в память FIFO (память входа) на относительно низкой (25,175 МГц) для системы частоте. По запросу видеоконтроллера данные считываются с частотой пиксельной синхронизации монитора, предварительно поступая в память FIFO чтения (память выхода). Декодер последовательности состояний представляет собой конечный автомат, генерирующий последовательность команд, необходимых к выполнению, таких как запись/чтение, подтверждение и подзарядка банков. Модуль формирования данных преобразует состояния автомата в конкретные сигналы на шине управления ОЗУ, формируя при этом необходимые временные задержки. Модуль вывода на шину синхронизирует данные из FIFO с шиной данных и определяет байтовые маски загрузки.

Для корректного вывода видеоизображения требуется выполнять загрузку данных настройки во внутренние регистры камеры. Структурная схема модуля инициализации изображена на рис. 16.

Блок памяти команд хранит последовательность посылок с адресом регистра инициализации и соответствующими настройками. Модуль формирования посылки осуществляет формирование последовательности сигналов посылки, а именно: адреса устройства, адреса регистра, данных регистра и сигналов подтверждения. Модуль управления SCCB является конечным автоматом процессов интерфейса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки прототипа системы технического зрения, реализующей цифровую обработку видеоизображений в реальном масштабе времени на основе программируемой логической интегральной схемы.

Авторы считают, что в данной работе новым является метод улучшения различимости информативных фрагментов на цифровых изображениях топологий интегральных схем и его аппаратная реализация. Разработка системы проводилась в среде проектирования Quartus. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода, его адаптивность в сравнении со схожими методами повышения контрастности, применяемыми в современных системах технического зрения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И., Спектор А. А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учебное пособие. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. — 352 с.
2. Сергеев М. Б., Соловьев Н. В., Стадник А. И. Методы повышения контрастности растровых изображений для систем цифровой обработки видеoinформации // Информационно-управляющие системы, 2007. — № 1. — С. 2–7.
3. Михайлюк Ю. П., Начаров Д. В. Метод улучшения различимости объектов на цифровых изображениях, полученных в условиях недостаточной видимости // Журнал радиоэлектроники, 2015. — № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/mac/jun15/4/text.html#7> (дата обращения: 18.07.2018).
4. Михайлюк Ю. П., Начаров Д. В. Количественная оценка эффективности контрастной коррекции цифровых телевизионных изображений // Вестник СевНТУ, 2012. — Вып. 131. — С. 160–163.
5. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005. — 1072 с.





decoder is a finite-state machine (FSM) generating a sequence of instructions necessary for execution, such as writing/reading, confirming and recharging banks. RAM control signals generated module converts the states of the automaton into concrete signals on the RAM control bus, thus forming the necessary time delays. The data bus output module synchronizes the data from the FIFO with the data bus and determines the byte boot masks.

To display the video image correctly, it is necessary to upload data settings into camera internal registers. Figure 16 shows a block diagram of the initialization module.

The initialization commands memory block stores a sequence of parcels with the address of the initialization register and the corresponding settings. The data generation module generates a sequence of sending signals, namely: device address, register address, register data and acknowledgment signals. The SCCB control module is FSM of the interface processes.

## CONCLUSIONS

The paper presents the results of developing a prototype of a technical vision system that realizes digital processing of real-time video images based on a programmable logic integrated circuit.

The authors believe that this work has a new method of discernibility improvement of informative regions on digital images of integrated circuits layouts and its hardware implementation. The system has been developed in the Quartus design environment. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed method, its adaptability in comparison with similar methods of contrast improvement used in modern technical vision systems.

## REFERENCES

1. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosykh V. P., Peretyagin G. I., Spektor A. A. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii v informatsionnykh sistemakh: uchebnoe posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. 35 p. (In Russian).
2. Sergeev M. B., Solov'ev N. V., Stadnik A. I. Metody povysheniya kontrastnosti rastroykh izobrazhenii dlya sistem tsifrovoy obrabotki videoinformatsii // Informat-sionno-upravlyayushchie sistemy, 2007. № 1. P. 2–7. (In Russian).
3. Mikhailyuk Yu. P., Nacharov D. V. Metod uluchsheniya razlichimosti ob"ektov na tsifrovyykh izobrazheniyakh, poluchennykh v usloviyakh nedostatochnoi vidimosti // Zhurnal radioelektroniki, 2015. № 6. Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/mac/jun15/4/text.html#7> (data obrashcheniya: 18.07.2018). (In Russian).
4. Mikhailyuk Yu. P., Nacharov D. V. Kolichestvennaya otsenka effektivnosti kontrastnoi korrektsii tsifrovyykh televizionnykh izobrazhenii // Vestnik SevNTU, 2012. Vyp. 131. P. 160–163. (In Russian).
5. Gonsales R., Vuds R. Tsifrovaya obrabotka izobrazhenii. M.: Tekhnosfera, 2005. 1072 p. (In Russian).

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 1300 руб.

# ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Р. Гонсалес, Р. Вудс

3-е издание, исправленное и дополненное

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. — 1104 с.  
ISBN 978-5-94836-331-8

Настоящее издание является результатом значительной переработки книги «Цифровая обработка изображений» (Гонсалес и Уинтц, 1977 г. и 1978 г.; Гонсалес и Вудс, 1992 г. и 2002 г.). Одна из важнейших причин популярности книги, которая уже более 30 лет является мировым лидером в своей области, — высокая степень внимания авторов к изменению образовательных потребностей читателя. Нынешнее издание базируется на самом обширном из когда-либо проводившихся исследований читательского мнения.

Как и прежде, основные цели книги — служить введением в основные понятия и методы цифровой обработки изображений, а также создать основу для последующего изучения и проведения самостоятельных исследований в этой области. Все разделы сопровождаются большим количеством примеров и иллюстраций.

Книга рассчитана на научных работников, профессиональных программистов, специалистов по компьютерному дизайну, студентов и преподавателей. Книга постоянно занимает первое место в рейтинге продаж Amazon.com и широко используется разработчиками и дизайнерами.

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; [knigi@technosphaera.ru](mailto:knigi@technosphaera.ru), [sales@technosphaera.ru](mailto:sales@technosphaera.ru)