

Методы скоростной обработки видеоизображений с большим разбросом яркостей с использованием ПЛИС

Д. В. Сорокин, Д. Э. Драгунов, М. Ю. Ляпустин, Н. А. Семенченко, К. А. Шарганов

Задача обнаружения и распознавания малоконтрастных объектов тепловизионными оптико-электронными системами на сцене с большим динамическим диапазоном требует использования специальных алгоритмов яркостного преобразования. Однако наиболее популярные и качественные методы, такие как Digital Detail Enhancement (DDE), вносят большую задержку кадра и требуют значительных аппаратных ресурсов. В статье приведен обзор алгоритмов увеличения динамического диапазона, среди которых выделены нетребовательные к количеству логических элементов ПЛИС и позволяющие получить минимальную задержку кадра. На их основе разработаны математические модели градационного преобразования яркости, которые позволяют выявлять слабоконтрастные детали изображения. Приведены результаты их реализации на ПЛИС в составе отечественного оптико-электронного модуля.

Ключевые слова: динамический диапазон, нелинейная передаточная функция, локальное контрастирование, инфракрасный диапазон, ПЛИС, обработка изображения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-34-41

Введение

Задачей наблюдательных оптико-электронных систем (ОЭС), в том числе тепловизионных, является визуализация изображения в заданном спектральном диапазоне длин волн, при котором система лишь формирует изображение, а поиск, распознавание и обнаружение объектов осуществляет человек-оператор.

Основная проблема взаимодействия человека с ОЭС заключается в том, что выходной диапазон сигналов такой системы состав-

ляет, как правило, не менее 6000 градаций. Согласно эксперименту Вебера [1], количество ступеней яркости, различаемых обычным наблюдателем, довольно ограничено. Общий диапазон одновременно различаемых уровней яркости мал по сравнению со всеми значениями интенсивности, воспринимаемыми человеком (прямая $V_b V_a$ на рис. 1), при этом уровни яркости меньше V_b субъективно воспринимаются как черное.

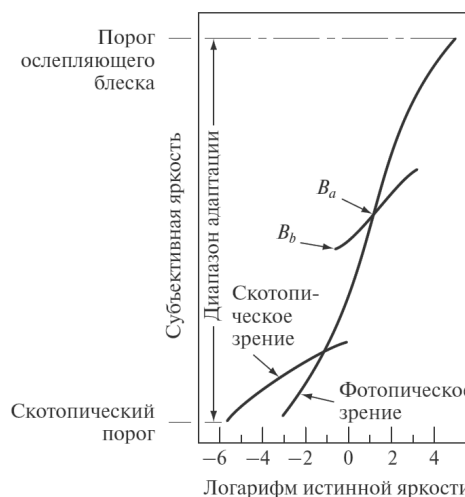


Рис. 1. Диапазон субъективно воспринимаемой яркости и конкретный уровень адаптации

Сорокин Дмитрий Владимирович¹, инженер 2-й кат.
 Драгунов Денис Эдуардович¹, инженер 1-й кат.
 Ляпустин Алексей Викторович¹, техник.
 Семенченко Наталья Александровна¹, инженер 2-й кат.
 Шарганов Кирилл Александрович², нач. отдела.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: dbmoksor@gmail.com

² ФГБУ «Главный научный метрологический центр»
 Минобороны России.

Россия, 141006, Московская область, г. Мытищи,
 ул. Комарова, 13.

Статья поступила в редакцию 29 декабря 2021 г.

Обзор методов обработки видеоизображений

Среднюю яркость изображения можно скорректировать глобально (т. е. по всему кадру) методами гибридной кластеризации, эквализации и нормализации гистограммы.

Однако использование глобальных методов для обработки изображений с большим перепадом яркостей не позволяет добиться существенного улучшения детализации мало-контрастных объектов – глобальные методы не являются оптимальным решением для локальной области.

Хороший результат дают адаптивные методы преобразования изображения, то есть подстраиваемые под локальные характеристики области. Локальные алгоритмы по сравнению с глобальными имеют более широкую область применения.

Существует метод преобразования динамических диапазонов дальней и ближней сцены, описанный в работе [2], позволяющий повысить различимость объектов. Это достигается путем формирования на основе обрабатываемого изображения двух изображений, содержащих поддиапазоны малых и больших яркостей благодаря нормированию гистограммы. Однако из-за процедуры совмещения и постобработки этот метод может привести к потере информации о малых быстро движущихся объектах.

Адаптивность метода дает возможность выделить информативные участки на изображении и соответствующим образом их обработать. Это позволяет получить хорошие результаты при обработке изображений с неравномерно распределенным контрастом.

Изложенным требованиям отвечают методы адаптивного преобразования локального контраста [3]. Один из таких был осуществлен израильской компанией RP Optical Lab в их процессоре обработки видео для охлаждаемой тепловизионной системы [4].

Для аппаратной реализации аналогичного метода на ПЛИС потребуется много логических вентилях платы, которых может не хватить для реализации более важных алгоритмов, таких как двухточечная коррекция, замена дефектных элементов, автоматическая

регулировка усиления. Кроме этого, задержка отображения при реализации такого алгоритма в режиме полной обработки составляет 32 мс при частоте кадров 60 Гц.

Очевидно, что аппаратная реализация на ПЛИС такого рода алгоритмов затруднительна из-за ограниченности ресурсов памяти и логики.

Отдельным классом методов обработки изображений являются яркостные преобразования, среди которых выделяются три основных типа: линейное (тождественное), логарифмическое и степенное.

Отличительной особенностью данных методов является высокая скорость вычисления в виду того, что для расчета не требуются данные о яркостях соседних элементов.

Яркостные преобразования

Существуют три основных типа яркостных преобразований (рис. 2):

- линейное (тождественное);
- логарифмическое;
- степенное.

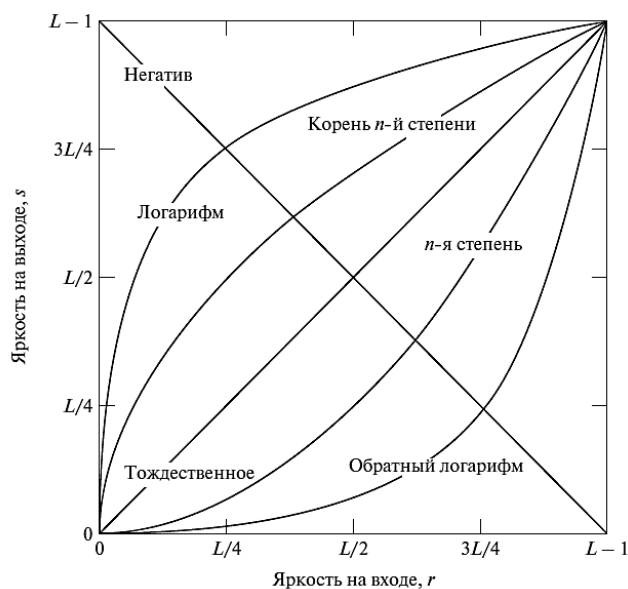


Рис. 2. Основные функции яркостных преобразований

Линейное преобразование является тривиальным случаем, при котором яркости на выходе идентичны яркостям на входе (или наоборот, в случае негатива). В данной работе они не рассматриваются.

Степенное преобразование образует семейство кривых, где малому значению степени соответствует отображение узкого диапазона входных значений в широкий диапазон выходных значений. В работе [5] рассматривается обработка темных слабоконтрастных изображений путем изменения яркости элементов посредством степенной функции. При этом преобразования удовлетворяют условиям наблюдения с малой задержкой и минимальными затратами аппаратных ресурсов, но наблюдение на светлом фоне лишает пользователя части полезной информации.

Функция прямого логарифма отображает узкий диапазон малых значений яркостей на исходном изображении в более широкий диапазон выходных значений. Однако при этом полезная информация на темных участках теряется.

К отдельному типу яркостных преобразований относится препарирование изображений с использованием кусочно-линейных функций – для ее построения необходимы сшивки двух и более функций. Главное преимущество таких преобразований состоит в том, что их форма может быть сколь угодно сложной. Одним из частных случаев использования кусочно-линейного преобразования является усиление контраста, что подходит для решения поставленной задачи [1].

Кроме того, традиционные устройства отображения чаще всего поддерживают только 8-битную ширину данных, а большинство ОЭС имеют 16-битную.

Задачей данного исследования являлся поиск метода отображения информации глубиной 16 бит в 8-битное значение без потери качества отображения деталей, не требовательного к количеству логических элементов ПЛИС и позволяющего получить минимальную задержку кадра.

Математическое моделирование

В ходе исследования были разработаны три математические модели передаточных функций яркости изображений, в основу которых легло использование кусочно-линейного преобразования (рис. 3).

Как видно из графиков, функции на рис. 3 состоят из нескольких участков отдель-

ных функций. График на рис. 3,а состоит из отрезков с равным по модулю коэффициентом наклона k . Тонкие пунктирные линии являются отклонением (Δ) от первоначальной передаточной характеристики и устанавливают верхнюю и нижнюю границы возрастания (убывания) отрезков. Условием сшивки этих прямых в единую функцию является достижение границы, после чего функция меняет свой коэффициент наклона на противоположный.

Эмпирическим путем было установлено, что оптимальным для функции на рис. 3,а является значение $\Delta = 20000$. Именно при таком виде ломанной функции хорошо изменяется динамический диапазон темных, серых и светлых деталей, однако при этом функция может сопровождаться появлением ложных контуров [6]. Сплошная линия на графике – это функция с оптимальным параметром $\Delta = 20000$; жирная штрихпунктирная линия – тождественная функция яркости.

Функция на рис. 3,б характеризуется обратным логарифмом на темном и светлом участках входной яркости. В основном полезная информация изображения находится в интервале от 18432 до 36864 градаций серого. При использовании обратного логарифмического преобразования динамический диапазон сжимается на светлых и темных участках и расширяется для значений, лежащих в этом интервале с дальнейшим их отображением в диапазоне от 48 до 192 значений яркости серого при 8-битном выходном сигнале. Благодаря этому слабоконтрастные объекты на сером фоне становятся лучше различимы для наблюдателя, но темные и светлые детали сливаются с окрестностью.

График на рис. 3,в состоит из трех функций: прямая с коэффициентом наклона 0,5 для серых значений и две кривые, описывающие зависимости со степенью 1/2. Степенные преобразования в этой функции отображают узкий диапазон малых и больших входных значений яркости в широкий диапазон выходных значений. Разброс серых значений входной яркости «ужимается», тем самым теряется информация о черно-белых слабоконтрастных объектах на сером фоне.

Для сшивки функций на рис. 3,б и 3,в было решено несколько систем линейных алгебраических уравнений, в которых приравнялись производные и значения функций в

точках соединений. Одна из систем приведена ниже и была решена для сшивки линейной функции и функции обратного логарифма на первом участке рис. 3,б. Варьируемыми являются четыре параметра: угол наклона прямой $k_2 = 2$; начало выходного динамического диапазона $y_1 = 30\ 720$; конец выходного динамического диапазона $y_2 = 34\ 816$; основание логарифма $a = 1,01$.

Зная конец и начало выходного динамического диапазона, можно рассчитать x_1 . Получилась следующая система:

$$\begin{cases} -k_1 \times \log_{1,01}(-a_1) + b_1 = 0 \\ \frac{-k_1}{(x_1 - a_1) \times \ln 1,01} = 2 \\ -k_1 \times \log_{1,01}(x_1 - a_1) + b_1 = y_1 \end{cases}$$

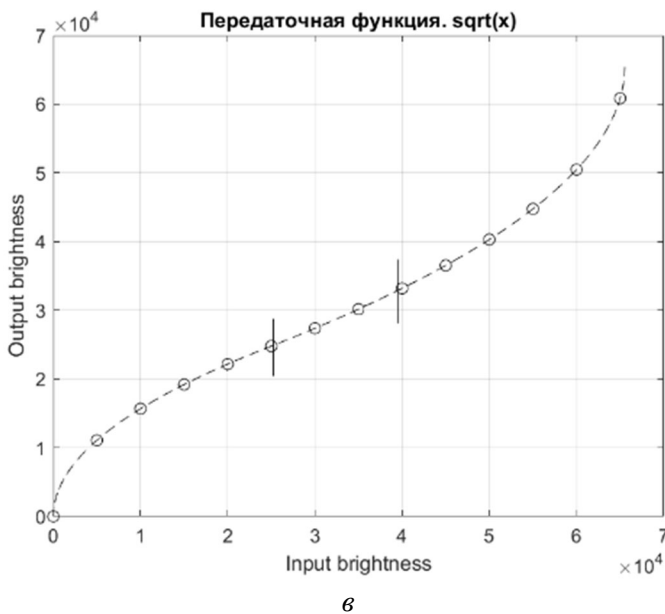
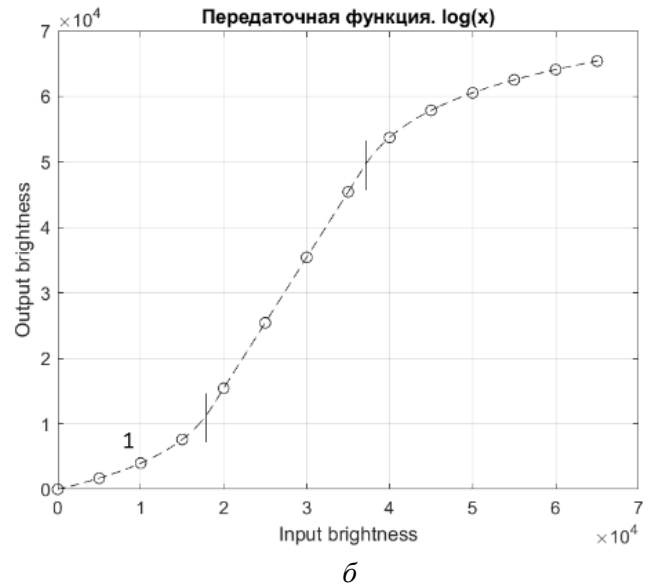
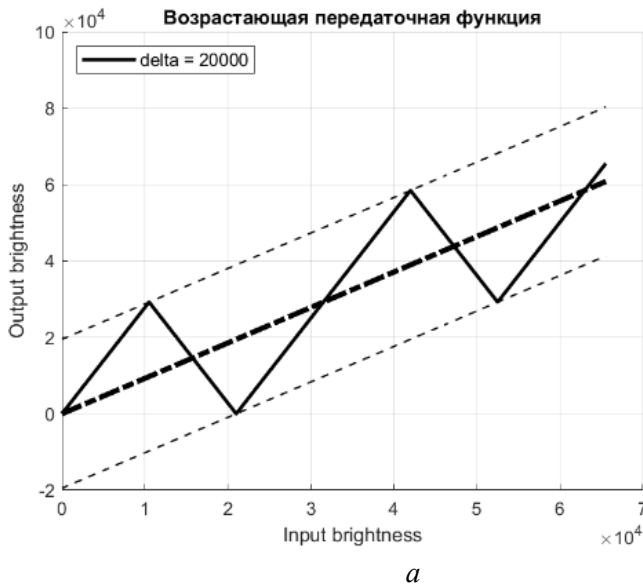


Рис. 3. Виды передаточных функций:
 а – семейство возрастающих кусочно-линейных передаточных функций; б – кусочно-нелинейная передаточная характеристика;
 в – кусочно-нелинейная передаточная характеристика (степенная)

В случае монотонно-возрастающих передаточных функций (рис. 3,б, 3,в) обеспечивается сохранение правильной последовательности уровней яркости (чем холоднее элемент, тем темнее его отображение), предотвращая тем самым появление ложных деталей (гради-

ент на границах, ступенчатые переходы яркости) на обработанном изображении [1].

Для предварительной оценки изображений и подбора оптимальных изменяющихся параметров использовалась программа для решения задач технических вычислений

MATLAB. Для каждого кусочно-линейного яркостного преобразования была написана отдельная функция, на вход которой подавались

изменяемые данные. Пример одной такой функции для преобразования на рис. 3,б приведен ниже:

Листинг 1 – Функция MATLAB для получения яркостного преобразования на рис. 4,б

```
function [x1, x2, k1, k3, a1, a3, b1, b3] = obr_log_koef_ (osnLog,k2, y1, y2)
hC000 = 49152;
h6000 = 24576;
h3000 = 12288;
pow16 = 2^16;
x1 = (y1+k2*(2^15)-2^15)/k2;
x2 = (y2+k2*(2^15)-2^15)/k2;
syms aa1;
eqns = (k2*log(osnLog)*(x1-aa1)*log((aa1-x1)/aa1)/log(osnLog) == y1);
S1 = vpasolve (eqns, aa1);
a1 = eval(real(S1));
b1 = -k2*log(osnLog)*(x1-a1)*log(-a1)/log(osnLog);
k1 = -k2*log(osnLog)*(x1-a1);
syms aa3;
eqns = (k2*log(osnLog)*(x2-aa3)*log((x2-aa3)/(pow16-1-aa3))/log(osnLog)+pow16-1 == y2);
S3 = vpasolve (eqns, aa3);
a3 = eval(real(S3));
b3 = pow16-1-k2*log(osnLog)*(x2-a3)*log(pow16-1-a3)/log(osnLog);
k3 = k2*log(osnLog)*(x2-a3);
end
```

Полученные результаты обработки изображений представлены на рисунке 4.

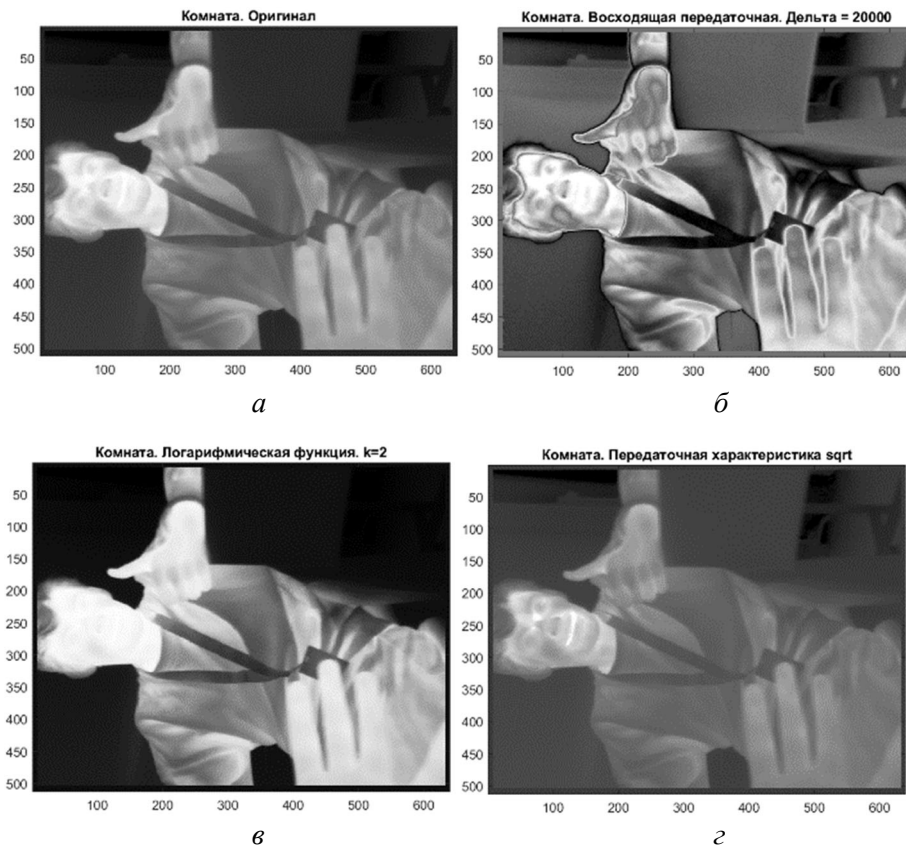


Рис. 4. Сцена в комнате с человеком: а – до наложения передаточных функций; б – с наложением восходящей передаточной функцией ($\Delta = 20\ 000$); в – с наложением передаточной функции обратного логарифма ($k = 2$); з – с наложением степенной передаточной функцией ($k = 0,5$)

Аппаратная реализация

Аппаратная реализация была осуществлена путем замены алгоритмов обработки изображения оптико-электронного модуля средневолнового ИК-диапазона на основе отечественного фотоприемного устройства формата 640×512 производства АО «НПО «Орион» [7].

В качестве ядра обработки изображений была использована ПЛИС семейства Cyclone III компании Altera. Каждая функция была разбита на таблицу, где каждое выходное значение яркости хранится в ячейке памяти, а входное является адресом к нему. Используемая плата EP3C10 содержит 414 Кбит встроенного ОЗУ, чего явно недостаточно. На одну таблицу приходится $2^{16+8-3-10} = 2048$ Кбайт. В ходе исследования было выяснено, что при уменьшении разрядности входного диапазона яркости до 10 бит сохраняется основная информация без искажения деталей. Из-за огра-

ниченности ресурсов блочной памяти BRAM на плате был уменьшен входной диапазон яркости с 2^{16} до 2^{10} значений. Таким образом, получилось сэкономить не только ресурсы памяти, но и количество используемых логических элементов без искажения качества. Всего было сконфигурировано три таблицы общим объемом 96 Кбайт.

Для объективной оценки результата был проведен опрос наблюдателей, чтобы выявить положительные и отрицательные стороны каждого из алгоритмов.

Для эксперимента использовались две сцены: помещение с наличием больших объектов разного контраста и городская местность с наличием объектов малых размеров. В опросе принимали участие десять человек. Каждому участнику предлагалось оценить пять параметров. Проведенная в реальном времени субъективная оценка изображения группой наблюдателей приведена в таблице.

Параметры	Пилообразная передаточная функция	Функция обратного логарифма	Степенная функция
Сохранение информативности (однозначность цвета)	–	+	+
Выделение границ	+	–	–
Обнаружение малых объектов	–	+	+
Обнаружение слабоконтрастных объектов на сером фоне	+	+	–
Обнаружение слабоконтрастных объектов на ярком (темном) фоне	+	–	+

Заключение

Методы яркостных преобразований видеоизображения являются наиболее оптимальными для реализации на ПЛИС в виду малой требовательности к аппаратным ресурсам и малой величины задержки кадра. Это достигается за счет того, что эти методы для расчета не требуют данные о яркостях соседних элементов, а просто преобразуют яркость отдельного элемента.

Среди методов яркостных преобразований предпочтительными являются нетривиальные преобразования с использованием кусочно-линейных функций, которые позволяют избежать недостатков, связанных с потерей полезной информации на каких-либо участках диапазона яркости.

На основе смоделированных в среде MATLAB и опробованных в работе оптико-электронного модуля средневолнового ИК-диапазона на основе отечественного фотоприемного устройства формата 640×512 трех алгоритмов с использованием кусочно-линейных функций сделаны следующие выводы:

- кусочно-линейная передаточная функция на основе степенной лучше всего подходит для наблюдения слабоконтрастных объектов на темном и светлом фонах;
- кусочно-линейная передаточная функция на основе функции обратного логарифма позволяет хорошо обнаруживать серые объекты (средней яркости) на сером фоне;
- кусочно-линейная передаточная функция, реализующая пилообразное восхо-

дящее градационное преобразование яркости, приводит к проявлению границ отдельных участков, создавая общее интегральное представление о наблюдаемой сцене, но происходит полная потеря линейности и искажение реальной формы объекта.

Полная задержка кадра при реализации любого из трех описанных алгоритмов, вместе с двухточечной коррекцией, заменой дефектных элементов и автоматической регулируемой усиления составляет 288 мкс.

Благодаря табличной реализации разработанных математических моделей на блоках BRAM, задействованы только ресурсы внутренней памяти платы, что позволяет рационально использовать логические элементы ПЛИС для реализации алгоритмов, более требовательных к логическим элементам. Из-за сжатия входного динамического диапазона получилось реализовать все три алгоритма сразу, при этом наблюдателю предоставляется возможность при переключении между ними составить более полную картину, выявляя

необходимые детали в зависимости от поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Рафаэль С., Вудс Ричард Е. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012.
2. Михайлюк Ю. П., Начаров Д. В. // Журнал радиоэлектроники. 2015, № 6. С. 15.
3. Gordon R., Rangayyan R. M. // Applied optics. 1984. Vol. 23. P. 560.
4. RP Optical Lab Ltd. [Электронный ресурс]. URL: <http://rp-optical-lab.com/products/video-engine/> (дата обращения: 01.12.2021).
5. Раухваргер А. Б., Мартынов В. В. // Вестник АСГУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 2. С. 70.
6. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И., Спектор А. А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000.
7. Драгунов Д. Э., Курганов И. П., Полесский А. В., Юдовская А. Д., Деомидов А. Д., Соломонова Н. А., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Шарганов К. А. // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 5. С. 410.

PACS: 07.05.Pj

FPGA-based methods for high-speed processing of video images with large brightness scatter

D. V. Sorokin¹, D. E. Dragunov¹, M. Y. Lyapustin¹, N. A. Semenchko¹, and K. A. Sharganov²

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: dbmoksor@gmail.com

² FSBI «RF MD MHC»
13 Komarova st., Mytishi, Moscow region, 141006, Russia

Received December 29, 2021

The task of detecting and identifying low contrast objects by thermal imaging optoelectronic systems in a scene with a large dynamic range requires the use of special brightness conversion algorithms. However, the most popular and high-quality methods, such as Digital Detail Enhancement (DDE), introduce large frame delays and require significant hardware resources. This article presents a review of dynamic range enhancement algorithms, among which algorithms that do not require a large number of FPGA logic elements and allow for minimal frame delay. Based on them, developed mathematical models of gradational transformation of brightness, which can detect low-contrast details of the image. The results of their implementation on FPGA as a part of domestic optoelectronic module are given.

Keywords: dynamic range, non-linear transfer function, local contrast, infrared, FPGA, image processing.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-1-34-41

REFERENCES

1. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, *Digital Image Processing*. (Pearson Education Limited, Harlow, 2008; TECHNOSPHERA, 2012).
2. Y. P. Mikhailuk and D. V. Nacharov, *Journal of Radioelectronics*, No. 6, 15 (2015).
3. R. Gordon and R. M. Rangayyan, *Applied optics* **23**, 560 (1984).
4. <https://rp-optical-lab.com/products/video-engine/> (01.12.2021).
5. A. B. Rauchvarger and V. V. Martyanov, *Bulletin of ASU. Ser.: Management, Computer Science and Informatics*, No. 2, 70 (2020).
6. I. S. Gruzman, V. S. Kirichuk, V. P. Kosykh, Peretyagin G. I., and Spector, *Digital image processing in information systems: study guide*. (NSTU, Novosibirsk, 2000).
7. D. E. Dragunov, I. P. Kurganov, A. V. Polesky, A. D. Yudovskaya, A. D. Deomidov, N. A. Solomonova, P. S. Lazarev, K. O. Boltar, and K. A. Sharganov, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (5), 410 (2021).