

УДК 621.383  
EDN: GGJTTD

PACS: 42.79.–e



## Алгоритм временного шумоподавления с адаптивным порогом для охлаждаемых тепловизионных оптико-электронных систем

М. Ю. Ляпустин, Д. Э. Драгунов, А. А. Алексеев

*Приведены результаты разработки рекурсивного алгоритма временного шумоподавления с адаптивным порогом для тепловизионных систем. Данный алгоритм предназначен для уменьшения уровня временного шума по результатам анализа последовательности изображений, полученных с помощью тепловизионного канала. Приведена математическая модель алгоритма, а также требуемое количество вычислительных ресурсов, необходимых для его аппаратной реализации в ПЛИС. Измерен ряд характеристик тепловизионной системы с разработанным алгоритмом и сделаны выводы о положительном влиянии алгоритма на ее ЭШРТ (эквивалентная шуму разность температур).*

*Ключевые слова:* временная фильтрация, межкадровая обработка, адаптивный порог, рекурсивный алгоритм, детектор движения, инфракрасный диапазон, ПЛИС.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-139-145

### Введение

Основной задачей любой тепловизионной системы является формирование температурного распределения сцены в видимом диапазоне спектра [1]. Практическое применение подобных систем связано с наблюдением за целями, которые сильно удалены от приемника излучения и на визуализируемом изображении имеют размер в несколько пикселей. Таким образом, возможность наблюдать за удаленными целями с помощью инфракрасных оптико-электронных систем напрямую связана с задачей подавления шумов, имеющих на изображении наблюдаемой сцены.

Данное исследование нацелено на поиск и разработку оптимального способа устранения временной флуктуации сигнала, полученного с помощью тепловизионной системы. При разработке алгоритма были поставлены следующие задачи: уменьшение шума изображений (повышение визуального восприятия сцены), сохранение пространственного разрешения оптико-электронной системы и возможность реализации алгоритма на ПЛИС.

### Методы устранения шумов на изображении

Известно, что существуют два способа шумоподавления: алгоритмы шумоподавления по одному кадру и алгоритмы шумоподавления по последовательности кадров. К алгоритмам шумоподавления, основанным на обработке одного кадра можно отнести следующие методы:

- 1) двухточечная коррекция;
- 2) оконная фильтрация.

Двухточечная коррекция применяется для подавления пространственной неоднород-

Ляпустин Михаил Юрьевич, инженер 2-й кат.

E-mail: miklyapustin@gmail.com

Драгунов Денис Эдуардович, инженер 1-й кат.

Алексеев Александр Андреевич, инженер 2-й кат.

АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2023

После доработки 4.04.2023

Принята к публикации 12.04.2023

© Ляпустин М. Ю., Драгунов Д. Э., Алексеев А. А., 2023

ности, возникающей в результате специфики технологии производства МФПУ [2] и является обязательной для тепловизионных систем.

Оконные фильтры (фильтр Гаусса, медианная фильтрация и т. д.) хорошо исследованы [3] и способны заметно снизить уровень шума на изображении. Однако, стоит отметить, что без введения дополнительных модификаций данный подход также снижает пространственное разрешение системы, что может повлечь за собой невозможность детектирования оператором тепловизионной системы малоразмерных объектов. Таким образом, эти методы являются ограничено применимы в таких системах.

Альтернативным подходом является применение алгоритмов, основанных на обработке последовательности кадров [4]. Такие фильтры не оказывают воздействия на пространственное разрешение и могут подавить значительную часть временного шума. Именно по этой причине все дальнейшие исследования будут основываться на этом методе фильтрации.

### Рекурсивная межкадровая обработка

Наибольшую эффективность в совокупности с относительной простотой реализации демонстрируют алгоритмы, основанные на рекурсивной обработке конечного множества следующих друг за другом кадров. Примером такого метода может являться межкадровое усреднение:

$$f^{filtered}(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^{(N-1)} f_{-n}^{filtered}(x, y) + f_0(x, y)}{N}, \quad (1)$$

где  $f^{filtered}$  – рассчитанное значение функции яркости в пространстве кадра с координатой  $(x, y)$ ;

$f_{-n}^{filtered}$  – отфильтрованные значения функции яркости в пространстве  $N - 1$  предыдущих кадров;

$f_0$  – исходное значение функции яркости в пространстве текущего кадра.

Альтернативным решением может стать замена функции усреднения функцией выбора медианного значения из  $N$  элементов:

$$f^{filtered}(x, y) = med_N \left( \begin{array}{c} f_{-N+1}^{filtered}(x, y), \dots, f_{-\frac{N}{2}}^{filtered}(x, y), \\ f_{-\frac{N}{2}}(x, y), \dots, f_{-1}(x, y), f_0(x, y) \end{array} \right). \quad (2)$$

При выборе алгоритма рекурсивной медианной фильтрации необходимо использовать  $\frac{N}{2}$  отфильтрованных кадров и  $\frac{N}{2} + 1$  неотфильтрованных. Здесь и далее выражение вида  $\frac{x}{2}$  подразумевает целочисленное деление без остатка при нечетном  $x$ . Такое решение связано с тем, что функция яркости пикселей может сходиться к константному значению, что сделает невозможным наблюдать какие-либо изменения сцены.

На рис. 1 показано изменение яркости случайного пикселя в зависимости от времени для исходного изображения и обработанных с помощью алгоритмов медианной и усредняющей временной фильтраций для  $N = 3$ .

Стоит отметить, что данные методы имеют недостаток, который заключается в появлении эффекта «размытия» на границах движущихся объектов. Помимо снижения визуального качества изображения, данные артефакты могут потенциально снизить вероятность обнаружения и распознавания малоразмерных объектов тепловизионным прибором. Результат применения рекурсивного усреднения к последовательности тепловизионных изображений продемонстрирован на рис. 2.

Как видно на рис. 2, объект (грузовик), прибывающий в динамике, оставляет за собой явный шлейф, из-за чего уменьшается детализация как объекта, так и конкретной области изображения. Таким образом, возникает необходимость математически отделить движение геометрически определенных объектов от временной флуктуации сигнала. Для решения данной задачи разработан детектор движения.

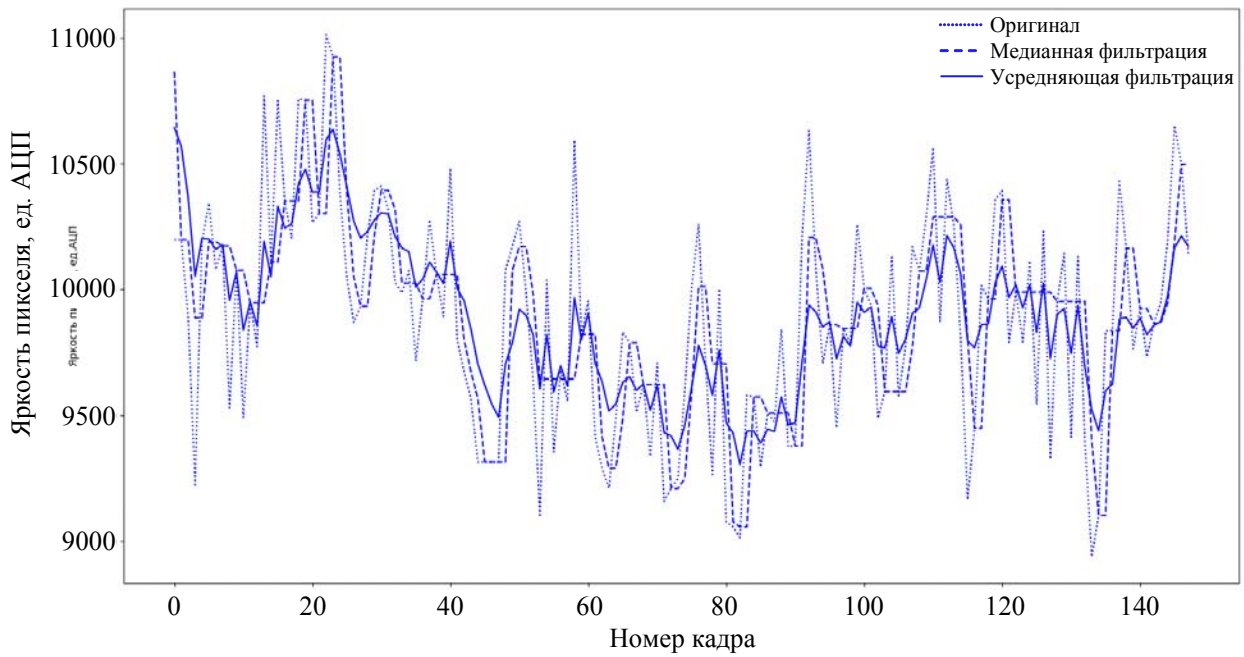


Рис. 1. Временные флуктуации случайного пикселя



Рис. 2. Область изображения с дефектами

**Детектор движения**

В контексте изменения наблюдаемой сцены во времени, все объекты можно разделить на две категории:

- статические объекты;
- динамические объекты.

Для разделения этих двух категорий предлагается следующий критерий. Для каждого пикселя изображения вводится коэффициент корреляции. Данная характеристика основана на вычислении средней разности между прямоугольными окрестностями размера  $N \times N$  для двух последовательно идущих

кадров и показывает величину изменения яркости пикселя с координатой  $(x, y)$  во времени:

$$corr(x, y) = \frac{\sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} |f_{-1}(x+i, y+j) - f_0(x+i, y+j)|}{N^2} \quad (3)$$

Чем больше абсолютное значение коэффициента корреляции, тем сильнее изменение яркости пикселя во временной области. Анализ тепловизионных изображений, произведенный при разработке данного алгоритма, показал, что коэффициент корреляции между

фоном и динамическим объектом в несколько раз выше, чем между фоном и временным шумом. Именно на основании этой величины можно произвести дифференциацию динамических объектов и шума. Для этого вводится пороговое значение, рассчитываемое как среднее значение всех коэффициентов корреляции по предыдущему кадру, помноженному на коэффициент воздействия:

$$threshold_{-1} = \frac{\sum_{x=0, y=0}^{X-1, Y-1} corr(x, y)}{X * Y} * k, \quad (4)$$



а)

где  $k$  – произвольное целое число;

$X$  и  $Y$  – число пикселей в кадре по вертикали и горизонтали соответственно.

Сравнение определенного коэффициента корреляции с пороговым значением дает возможность понять, являются ли временные флуктуации в выбранном пикселе шумом или же динамическим объектом. На рис. 3 показан результат детектирования движения на последовательности кадров для  $X = 512$ ,  $Y = 640$ ,  $k = 3$ ,  $N = 3$ .



б)

Рис. 3. Детектирование движущихся объектов: а) – исходное изображение; б) – результат работы детектора движения

### Алгоритм временной фильтрации

Выделение шумовой составляющей из временной неоднородности сцены позволяет

построить фильтр, лишенный недостатка обычной временной рекурсивной фильтрации. Обработка пикселя с координатой  $(x, y)$  осуществляется в соответствии с функцией:

$$f(x, y) = \begin{cases} med(f_a(x, y), f_b(x, y), f_c(x, y)), & corr(x, y) < threshold_{-1} \\ f_0(x, y), & corr(x, y) \geq threshold_{-1} \end{cases}, \quad (5)$$

где значения функций  $f_a$ ,  $f_b$ ,  $f_c$  определяются согласно формулам:

$$f_a(x, y) = \frac{f_{-2}^{filtered}(x, y) + f_{-1}^{filtered}(x, y)}{2} \quad (6)$$

$$f_b(x, y) = \frac{f_{-1}^{filtered}(x, y) + f_0(x, y)}{2} \quad (7)$$

$$f_c(x, y) = \frac{f_{-2}^{filtered}(x, y) + f_{-1}^{filtered}(x, y) + f_0(x, y)}{3}. \quad (8)$$

Стоит отметить, что вычисление корреляции между  $f_0$  и  $f_{-1}^{filtered}$  является некорректным, поскольку одна из функций представляет из себя уже отфильтрованный кадр. Исходя из этого, расчет корреляции для двух кадров проводится по формуле:

$$corr(x, y) = \frac{\sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} |f_{-1}^{filtered}(x+i, y+j) - f_{-2}^{filtered}(x+i, y+j)|}{N^2}. \quad (9)$$

Таким образом, разработанный рекурсивный алгоритм временной фильтрации реализуется следующими действиями:

1) вычисление коэффициента корреляции для каждого пикселя изображения в соответствии с формулой (9);

2) фильтрация пикселей по формуле (5) в соответствии с пороговым значением, вычисленным на предыдущей итерации;

3) перерасчет порогового значения согласно выражению (4);

4) повторение шагов 1–3.

Для проверки результатов воздействия разработанного алгоритма на изображения

была смоделирована сцена с наличием временных флуктуаций сигнала и движущимся объектом малого размера (рис. 4). Для имитации временного шума была выбрана статистическая модель нормального распределения Гаусса [5]. На рис. 4а изображена модель движущегося объекта размера  $3 \times 3$  пикселя на зашумленном фоне. Как несложно увидеть, разработанный алгоритм (рис. 4б) способен значительно снизить амплитуду временного шума. При этом в отличие от алгоритма рекурсивного усреднения (рис. 4б) метод пороговой временной фильтрации не искажает геометрические параметры объекта.

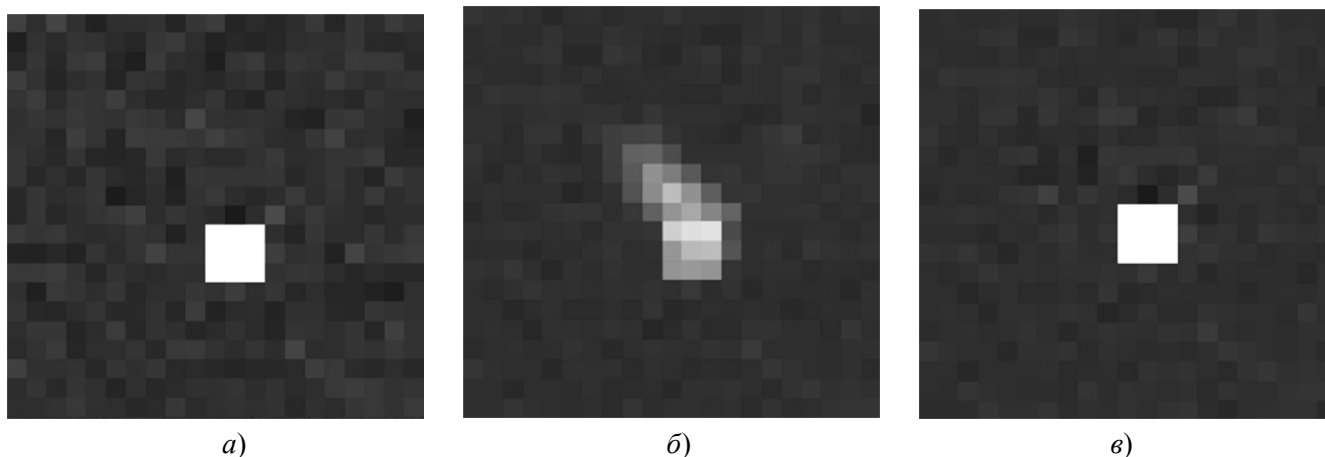


Рис. 4. Объект на фоне шума: а) – до применения фильтров; б) – после применения рекурсивного межкадрового усреднения; в) – после применения разработанного алгоритма

### Аппаратная реализация

Моделирование временного фильтра с адаптивным порогом проводилось с учетом ограничений по вычислительным ресурсам, что делает возможным его реализацию в имеющейся тепловизионной системе.

Данный метод был полностью реализован на ПЛИС EP3C10F256, с использованием статичной оперативной памяти объемом 16 Мбит. Для реализации описанного метода, были задействованы следующие ресурсы: 2268 LUT-ов, 13 МК9 блоков, а также 15,7 Мбит внешней оперативной памяти. Разработанный алгоритм работает на кадровой частоте 50 Гц при глубине 16 бит и разрешении  $640 \times 512$  пикселей.

### Оценка результатов

Для апробации результатов были произведены измерения шума изображений и эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) на оптико-электронном модуле средневолнового инфракрасного диапазона спектра производства АО «НПО «Орион» [2].

Исследование проводилось при помощи зеркального коллиматора с тест-объектом. Была проведена запись последовательности кадров без применения разработанного алгоритма, реализованного непосредственно в блоке электронной обработки оптико-электронного модуля, для оценки результатов математического моделирования алгоритма при помощи языка программирования Python. После этого была записана последователь-

ность кадров с применением разработанного алгоритма, для анализа и сравнения результатов. Измерение ЭШРТ осуществлялось в соответствии с ГОСТ Р 59606-2021 п.4.27. Численное значение шума рассчитано по формуле:

$$\text{noise} = \frac{1}{X * Y} \times \sum_{x=0, y=0}^{X-1, Y-1} \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} [f(n, x, y) - \langle f(n, x, y) \rangle_n]^2}{N}} \quad (10)$$

Результаты измерений приведены в таблице.

Таблица

	Без обработки	Программная реализация на Python	Аппаратная реализация на ПЛИС
ЭШРТ, мК	24,42	21,69	22,96
Уменьшение шума, %	-	24,73	21,88

Расхождение полученных значений для программной и аппаратной реализаций обусловлены ограничениями вычислительной системы на ПЛИС, в частности:

- отказ от чисел с плавающей точкой по причине высоких требований к ресурсам ПЛИС;
- недостаточная точность при аппаратном делении на числа, отличные от  $2^n$ ;
- ограничение разрядности аппаратных умножителей.

### Заключение

Результатом работы является рекурсивный алгоритм временной фильтрации тепловизионных изображений с адаптивным порогом, применимый в реальной тепловизионной системе.

В ходе разработки алгоритма были решены следующие задачи: анализ существующих алгоритмов временной фильтрации, их адаптация под ресурсы имеющейся тепловизионной системы и выявление их недостатков, теоретическое описание и математическое моделирование нового алгоритма, его реали-

зация в ПЛИС и анализ полученных данных. Результат анализа показал, что разработанный алгоритм улучшает значение ЭШРТ имеющейся тепловизионной системы с 24,42 до 22,96 мК и снижает показатель временного шума на 21,88 %.

Дальнейшие разработки связаны с улучшением метода подбора адаптивного порога, а также увеличением глубины рекурсивной фильтрации за счет потенциального прироста вычислительных ресурсов в имеющейся тепловизионной системе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин Д. В., Драгунов Д. Э., Ляпустин М. Ю., Семенченко Н. А., Шарганов К. А. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 34–41.
2. 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. 410–416.
3. Гонсалес Р. С., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012.
4. Колчаев Д. А., Ефимов А. И., Устюков Д. И. / Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 2. С. 101–109.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Изд. 12-е. – М.: ЮРАЙТ, 2022.

## Temporal denoising algorithm with adaptive threshold for cooled thermal imaging optoelectronic systems

*M. Y. Lyapustin, D. E. Dragunov and A. A. Alekseev*

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

*Received 27.03.2023; revised 4.04.2023; accepted 12.04.2023*

***In this paper presents the results of the developments of a recursive temporal noise reduction algorithm with an adaptive threshold for thermal imaging systems. This algorithm is designed to reduce the level of temporal noise based on the results of a sequence of images obtained using a thermal imaging channel. A mathematical model of algorithm is given, as well as the required amount of computing resources required for its hardware implementation in the FPGA. A few characteristics of a thermal imaging system with the development algorithm have been measured, and conclusions have been drawn about the positive effect of the algorithm on its NETD.***

*Keywords:* temporal denoising, inter-frame processing, adaptive threshold, recursive algorithm, motion detector, infrared range, FPGA.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-139-145

### REFERENCES

1. Sorokin D. V., Dragunov D. E., Lyapustin M. Y., Semenchko N. A. and Sharganov K. A., Applied Physics, № 1, 34–41 (2022) [in Russian].
2. Dragunov D. E., Kurganov I. P., Poleskiy A. V., Yudovskaya A. D., Deomidov A. D., Solomonova N. A., Lazarev P. S., Boltar K. O. and Sharganov K. A., Usp. Prikl. Fiz. 9 (5), 410–416 (2021) [in Russian].
3. Gonzalez R. C. and Woods R. E., Digital Image Processing, Pearson Education Limited, Harlow, 2008; TECHNOSPHERA, 2012.
4. Kolchaev D. A., Efimov A. I. and Ustukov D. I., Izvestia Tulskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie nauki, № 2, 101–109 (2019).
5. Gmurman V. E., Theory of probability and mathematical statistics. 12-th edition, Moscow, URIHGT, 2022.