

Расширение динамического диапазона коротковолновых ИК матричных фотоприемных устройств

П. А. Кузнецов, И. С. Моцев

Обосновывается необходимость расширения динамического диапазона в МФПУ коротковолнового ИК-спектра. Традиционно применяемые способы обладают низкой эффективностью, в особенности, в крупноформатных матрицах с шагом не более 15 мкм. Наибольшей эффективностью расширения динамического диапазона (до 100 дБ) обладают накопительные ячейки с индивидуально изменяемой передаточной характеристикой в зависимости от яркости фрагментов наблюдаемой сцены. В данной работе предлагается простой в топологической реализации и эффективный способ расширения динамического диапазона, основанный на автподстройке времени накопления индивидуально в каждой ячейке интегральной схемы считывания. При этом сохраняется высокая крутизна и линейность преобразования в накопительных ячейках с умеренной освещенностью (до 50–70 % от максимального сигнала), но снижается чувствительность в ячейках, близких к насыщению. В результате формируется линейно-логарифмическая передаточная характеристика, обеспечивающая расширенный динамический диапазон. В работе приводятся примеры полученных изображений с расширенным динамическим диапазоном в коротковолновом ИК-спектре.

Ключевые слова: МФПУ, БИС считывания, расширенный динамический диапазон.

Введение

Матричные фотоприемные устройства (МФПУ) для коротковолнового ИК-спектра (0,9–1,7 мкм) находят широкое применение в приборах ночного видения, системах тепловизионной и лазерной локации [1–10].

Особенностью функционирования МФПУ на данном участке ИК-спектра является необходимость регистрации изменений освещенности на четыре-пять порядков в пределах наблюдаемой сцены. Накопительные ячейки интегральных схем считывания (БИС считывания) фотосигнала с линейной передаточной характеристикой не в состоянии обеспечить детальную передачу столь высококонтрастного изображения. В связи с этим к накопительным ячейкам предъявляются повышенные требования по величине динамического диапазона.

В общем случае динамический диапазон устройства определяется как отношение максимального входного фотосигнала к среднеквадра-

тичному отклонению входного шума. Расширение динамического диапазона является одной из основных тенденций развития современных ИК МФПУ [1, 2, 11].

Целью данной работы является предложение, обсуждение и экспериментальная проверка способа расширения динамического диапазона накопительных ячеек за счет индивидуальной подстройки их времени накопления. Особенностью предлагаемого способа является внешнее управление динамическим диапазоном в широких пределах (60–100 дБ).

Обзор способов расширения динамического диапазона

Предварительно кратко рассмотрим основные существующие способы реализации режима расширенного динамического диапазона (или т. н. режима HDR – High Dynamic Range) в ИК МФПУ, которые можно классифицировать следующим образом:

1. суперпозиция подкадров с различным временем накопления программно-аппаратными средствами за пределами МФПУ [4];
2. фотовольтаический режим фотодетектора или режим «солнечного элемента» [5, 6];
3. нелинейная нагрузка фотодетектора на МОП-транзисторе [6];

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.
Моцев Иван Сергеевич, начальник дизайн-центра.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.

© Кузнецов П. А., Моцев И. С., 2017

4. переключение накопительной емкости на больший номинал [7];
5. цифровой преобразователь «фототок–частота» [8, 9];
6. повторный сброс накопительной емкости в одном кадре (multi-reset) [11].

Первый способ предполагает запоминание подкадров изображения с изменяемым временем накопления, например, по закону $T_n = T_0 2^n$, где n – порядковый номер подкадра (0, 1, 2, ...). При этом синтезируется изображение с широким динамическим диапазоном и с передаточной характеристикой, близкой к логарифмической. Существенным недостатком этого способа является снижение кадровой частоты МФПУ в n раз, что допустимо только при наблюдении статических и малодинамичных объектов.

В варианте 2 используется логарифмическая зависимость фотоЭДС на p – n -переходе от освещенности ФЧЭ, а в варианте 3 используется логарифмическая зависимость напряжения «затвор–исток» нагрузочного МОП-транзистора от величины протекающего фототока (только в подпороговом режиме). При всей простоте этих вариантов, они имеют ряд недостатков: низкая чувствительность (60–90 мВ на декаду изменения фототока) и низкая скорость стекания фотогенерированного заряда при слабых уровнях освещенности; большой уровень геометрического шума, связанный с температурной зависимостью ВАХ p – n -переходов (вар. 2) и разбросом пороговых напряжений нагрузочных МОП-транзисторов (вар. 3). Кроме того, для режима «солнечного элемента» требуется специально разработанная технология изготовления фоточувствительной матрицы для исключения межэлементной взаимосвязи при прямом смещении фотодетекторов, характерном для этого режима [5, 6].

Построение ячейки с переключением накопительной емкости на больший номинал (вар. 4) является в настоящее время наиболее распространенным вариантом. При уровнях освещенности, близких к насыщению фотосигнала, применяется общее 10–20-кратное ослабление выходного фотосигнала по внешнему управляющему сигналу. Недостатком этого варианта является ослабление чувствительности МФПУ по всем фрагментам наблюдаемой сцены, что ведет к ухудшению контраста изображения и снижению отношения сигнал/шум. Кроме того, в накопительных ячейках крупноформатных МФПУ с малым шагом (не более 15 мкм) остается площадь только под малую накопительную емкость, что делает этот вариант топологически нереализуемым. Поэтому в таких МФПУ часто применяется способ автоматически

регулируемого времени накопления по средней яркости, но с ухудшением контраста изображения и снижением отношения сигнал/шум.

Вариант 5 с автосбросом накопления и с цифровым преобразованием «фототок–частота» имеет линейную передаточную характеристику, но ввиду схемотехнической и топологической сложности наиболее предпочтителен для матричных МФПУ с шагом не менее 25 мкм. Кроме того, в коротковолновом ИК-диапазоне из-за низких уровней фототока (0,1–100 пА) будет очень низкая частота автосброса и, соответственно, неприемлемо низкая разрядность цифрового кода.

Вариант 6 получил широкое распространение в мегапиксельных МФПУ видимого диапазона за счет простоты реализации в ячейках с накоплением на собственной емкости фотодетектора. Тем не менее, в ячейках трансимпеданного типа (СТПА), наиболее распространенных в коротковолновых ИК МФПУ, применение этого варианта является проблематичным из-за нестабильной работой схемы трансимпедансного усилителя при выходе из режима насыщения.

Из отечественных разработок представляет интерес фото-КМОП БИС формата 1280×1024 (шаг 13 мкм) с индивидуальным переключением накопительной емкости в зависимости от накопленного заряда [2].

Накопительная ячейка с автоподстройкой времени накопления

Суть предлагаемого способа расширения динамического диапазона можно охарактеризовать как введение в накопительные ячейки функции «динамического антиблужинга». Обычно транзистор антиблужинга стоит в каждой накопительной ячейке и ограничивает накопленное напряжение при больших засветках, снижая при этом взаимосвязь между ячейками, но не расширяя динамический диапазон.

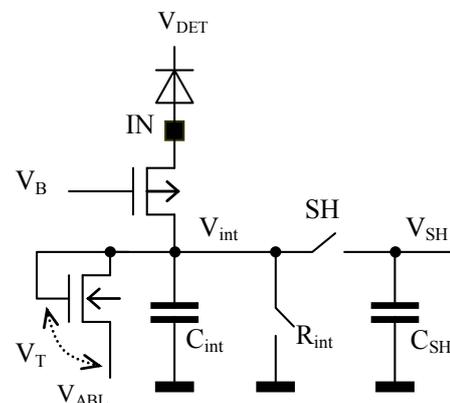


Рис. 1. Типичная накопительная ячейка с транзистором антиблужинга.

Рассмотрим типичную накопительную ячейку с прямой инъекцией и транзистором антиблуминга (рис. 1). Рост напряжения на накопительной емкости C_{int} происходит пропорционально фототоку I_p и времени накопления t_{int} до заданного уровня ограничения

$$V_{\text{int}} = I_p t_{\text{int}} / C_{\text{int}} \leq V_{\text{max}} = V_{\text{ABL}} + V_T, \quad (1)$$

где V_{ABL} – напряжение антиблуминга, V_T – пороговое напряжение n -МОП-транзистора антиблуминга (порядка 0,6–0,8 В). В предлагаемом способе вводится ступенчатое переключение напряжения V_{ABL} в течение кадра накопления, что, как следствие, приводит к появлению зависимости коэффициента передачи по току $k_I = \partial V_{\text{int}} / \partial I_p$ от величины фототока I_p .

На рис. 2 приведен пример моделирования процесса накопления напряжения $V_{\text{int}}(t)$ при выбранных значениях фототока 2 пА, 14 пА, 26 пА, емкости накопления 0,05 пФ и времени кадра 800 мкс. При этом вместо статического напряжения на вход V_{ABL} подавалось динамическое напряжение ступенчатой формы с тремя уровнями: $V_1 = 0$ В (интервал 0-1), $V_2 = 1$ В (интервал 1-2),

$V_3 = 1,5$ В (интервал 2-3). В соответствии с выражением (1), максимальные значения накопленного напряжения на каждом из интервалов будут заданы своими уровнями: V_T ; $1 \text{ В} + V_T$; $1,5 \text{ В} + V_T$. Если напряжение заряда накопительного конденсатора $V_{\text{int}}(t)$ достигает этого уровня, то оно перестает дальше расти, т. е. процесс накопления останавливается до включения следующего уровня антиблуминга. Например, при фототоке $I_{p1} = 2$ пА (рис. 2, а) напряжение $V_{\text{int}}(t)$ не достигает первого уровня ограничения, равного $V_1 + V_T$ и поэтому накопление идет в течение полного кадра, т. е. время накопления равно $t_{\text{int}} = t_{0-1-2-3} = 800$ мкс. При фототоке $I_{p2} = 14$ пА (рис. 2, б) напряжение $V_{\text{int}}(t)$ достигает первого уровня ограничения (первая точка перегиба) и до момента окончания интервала 0-1 не меняется. При переключении напряжения антиблуминга V_{ABL} на второй уровень $V_2 + V_T$ напряжение $V_{\text{int}}(t)$ снова начинает расти на интервале 1-2-3 до конца кадра. Фактическое время накопления в этом случае уже меньше кадрового и вычисляется графически как

$$t_{\text{int}} = t_{1-2-3} + C_{\text{int}} (V_1 + V_T) / I_{p2} = 300 \text{ мкс}. \quad (2)$$

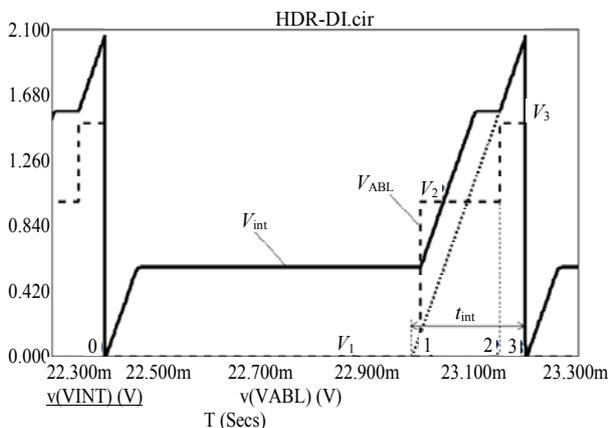
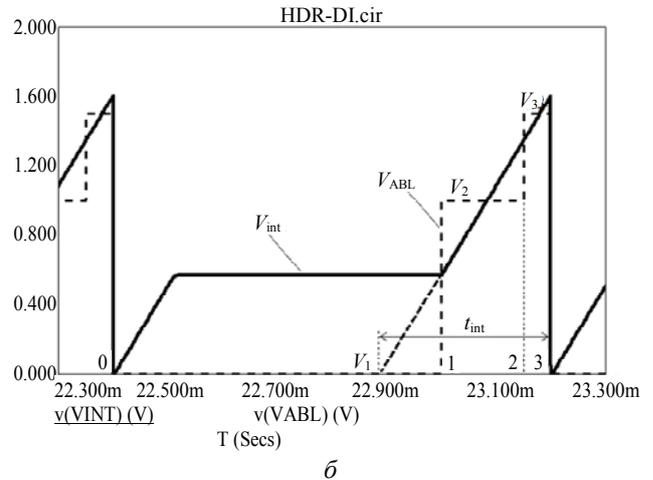
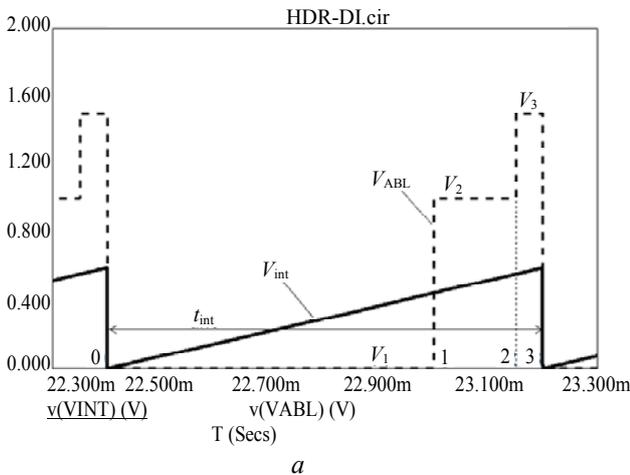


Рис. 2. Моделирование процесса накопления с «динамическим антиблумингом» при различных значениях фототока: а) $I_{p1} = 2$ пА; б) $I_{p2} = 14$ пА (с одной точкой перегиба); в) $I_{p3} = 26$ пА (с двумя точками перегиба).

Аналогично, для фототока $I_{p3} = 26$ пА создается вторая точка перегиба, при этом фактическое время накопления будет еще меньше и составит

$$t_{\text{int}} = t_{2-3} + C_{\text{int}}(V_2 + V_T) / I_{p3} = 220 \text{ мкс.} \quad (3)$$

Таким образом, время накопления в ячейке автоматически подстраивается под уровень фототока.

На рис. 3 представлено моделирование выходного сигнала V_{SH} накопительной ячейки при подаче на вход треугольного импульса фототока от 0 до I_{max} . При этом в случае *а* имеем $I_{\text{max}} = 36$ пА и без «динамического антиблуминга», но в случае *б* реализуется $I_{\text{max}} = 36$ пА с «динамическим антиблумингом» с одной точкой перегиба.

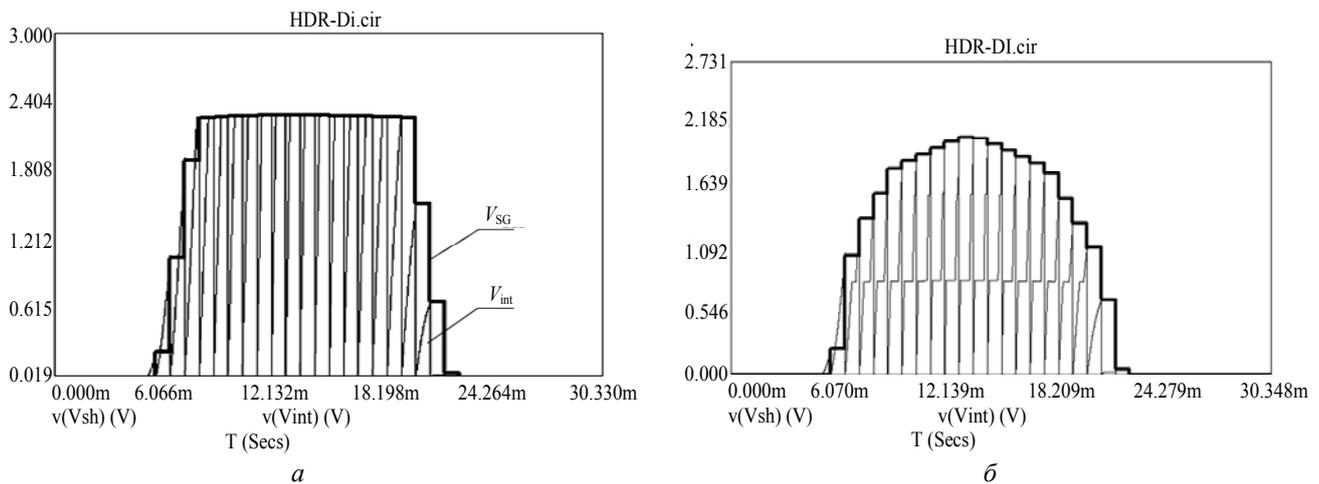


Рис. 3. Моделирование выходного сигнала V_{SH} накопительной ячейки при подаче на вход треугольного импульса фототока от 0 до I_{max} : а) $I_{\text{max}} = 36$ пА и без «динамического антиблуминга»; б) $I_{\text{max}} = 36$ пА с «динамическим антиблумингом» с одной точкой перегиба.

На рис. 4 приведены зависимости времени накопления t_{int} в ячейке и соответствующего выходного сигнала $V_{\text{отн.ед.}}$ от величины фототока I_p при заданных параметрах напряжения V_{ABL} . Следует отметить, что вид функции $t_{\text{int}} = f(I_p)$, определяющей ширину динамического диапазона, может оптимизироваться за счет выбора параметров напряжения V_{ABL} в зависимости от распределения яркости фрагментов наблюдаемой сцены.

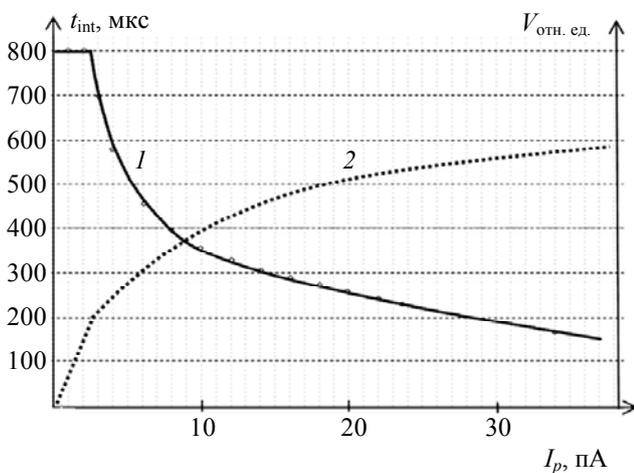


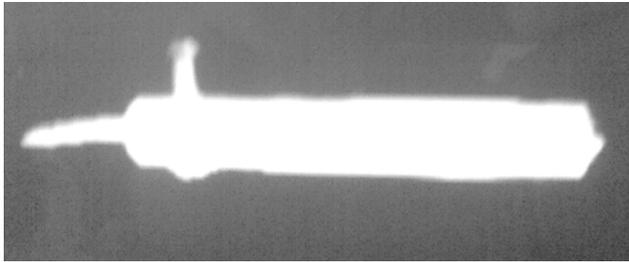
Рис. 4. Зависимость времени накопления ячейки (кривая 1) и выходного сигнала (кривая 2) от величины фототока в режиме HDR с одной точкой перегиба.

Практическая реализация режима расширенного динамического диапазона (HDR)

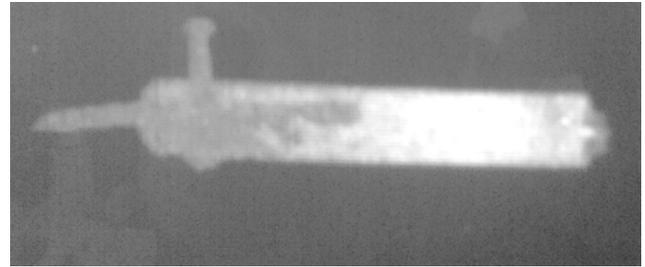
Практическая реализация режима HDR с «динамическим антиблумингом» была проведена в коротковолновом ИК МФПУ формата 320×256 элементов на основе гетероструктуры InGaAs/InP, разработанной в АО «НПО «Орион». В режиме HDR на БИС считывания подавалось двухуровневое напряжение антиблуминга, что создавало одну точку перегиба в передаточной характеристике ячейки и расширяло динамический диапазон в 8–10 раз. На рис. 5–7 приведены примеры полученных ИК-изображений с режимом HDR в сравнении с высококонтрастными оригиналами без режима HDR. Приведены также гистограммы распределения количества пикселей по яркостной шкале 8-ми битного монитора. Из гистограмм следует, что в изображениях без режима HDR наблюдается дефицит серых пикселей, что ведет к потере информации в виде пересвеченных и затемненных участков наблюдаемой сцены. В гистограммах изображений с режимом HDR происходит, напротив, перераспределение количества светлых и темных пикселей с краев гистограммы к середине, что ведет к увеличению информативности высококонтрастного изображения.

На рис. 5, в приведены также осциллограммы строки высококонтрастного изображения объекта (паяльника), из которых следует, что в режиме HDR имеются два участка чувствительности:

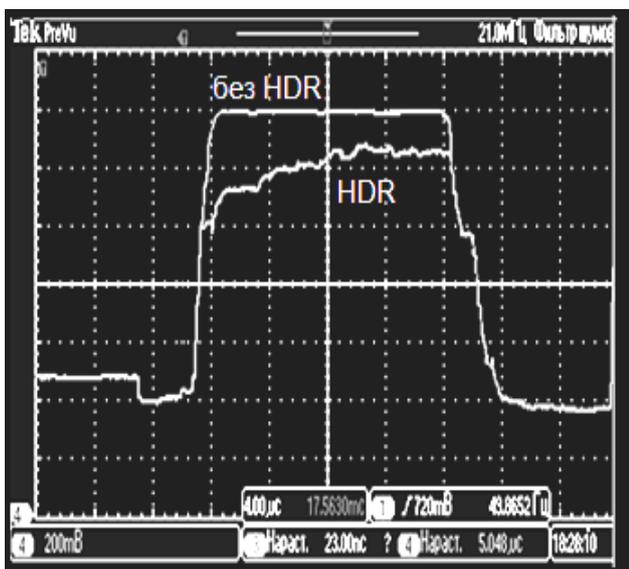
высокая линейная чувствительность для малого сигнала и низкая, близкая к логарифмической, чувствительность для большого сигнала.



а



б



в

Рис. 5. Собственное коротковолновое ИК-излучение нагретого объекта (паяльника): а) без режима HDR; б) с режимом HDR; в) соответствующие осциллограммы сигнала строки.



а



б

Рис. 6. Отраженное солнечное коротковолновое ИК-излучение: а) без режима HDR; б) с режимом HDR.

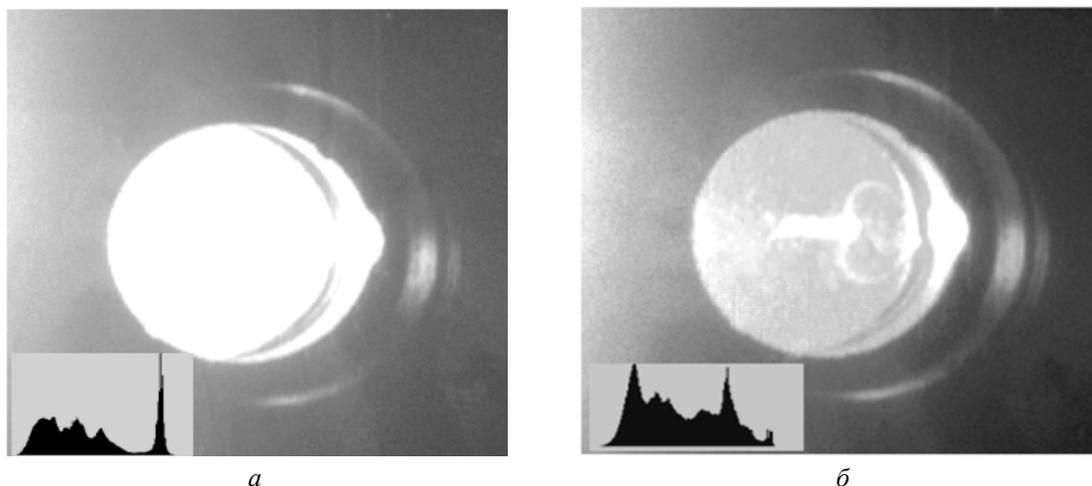


Рис. 7. Коротковолновое ИК-излучение лампы накаливания: а) без режима HDR; б) с режимом HDR.

Заклучение

Особенностью функционирования МФПУ в коротковолновом ИК-спектре является необходимость регистрации изменений освещенности на четыре-пять порядков в пределах наблюдаемой сцены. В представленной работе предлагается простой для практической реализации и эффективный способ перехода коротковолновых ИК МФПУ в режим расширенного динамического диапазона (HDR), основанный на автоподстройке времени накопления индивидуально для каждого пиксела. Применение в БИС считывания оригинальной техники «динамического антиблужинга» позволяет осуществлять внешнее управление динамическим диапазоном в широких пределах (до 100–110 дБ) и на высокой кадровой частоте. Полученные на отечественном ИК МФПУ примеры HDR-изображений подтверждают перспективность предлагаемых технических решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И., Залетаев Н. Б. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
2. Бородин Д. В., Осипов Ю. В., Васильев В. В. / Тезисы 13-й международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». 2016. С. 169.
3. Гусарова Н. И., Коцавцев Н. Ф., Попов С. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 288.
4. Richards A., Cromwell B. Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras. – FLIR Systems, Indigo Operations.
5. Yang Ni. Low noise WDR ROIC for InGaAs SWIR Image Sensor / International Conference on Space Optics, Spain. 2014.
6. Yang Ni, Yi Ming Zhu. A 768×576 Logarithmic Image Sensor. – New Image Technologies SA.
7. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 12.
8. Bermak A., Kitchen A. IEEE Photonics Technology Letters. 2006. Vol.18. No. 20. P. 15.
9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 83.
10. Андреев Д. С., Залетаев Н. Б. и др. // Прикладная физика, 2012. № 4. С. 86.
11. Rogalski A. Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. P. 279.
12. Jiang D., Liang Q., Ding R. // Proc. of SPIE. 2014. Vol. 9275. (Infrared, Millimeter-Wave and Terahertz Technologies III).

PACS: 85.60 Dw

Expansion of the dynamic range of short-wave IR FPA

P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received September 4, 2017

The necessity of expanding the dynamic range in the IR FPA of the short-wave IR spectrum is substantiated. Traditionally used methods have low efficiency, especially in large-format arrays with a pitch of

not more than 15 microns. The greatest efficiency of expanding the dynamic range (up to 100 dB) is possessed by pixels with individually variable transmission characteristics, depending on the brightness of fragments of the observed scene. The paper proposes a simple in the topological implementation and an effective way of expanding the dynamic range, based on the auto-adjustment of the accumulation time individually in each cell of the ROIC. At the same time, high steepness and linearity of conversion in cells with moderate illumination (up to 50–70 % of the maximum signal) is preserved, but sensitivity in cells close to saturation decreases. As a result, a linear-logarithmic transfer characteristic is formed, which provides an extended dynamic range. In this paper, examples of obtained images with an extended dynamic range in the short-wave IR spectrum are given.

Keywords: IR FPA, ROIC, extended dynamic range.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, L. Y. Grinchenko, A. I. Dirochka, and N. B. Zaletaev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (2), 131 (2014).
2. D. V. Borodin, Yu. V. Osipov, V. V. Vasilev, in *Proceeding of the XIII International Conference «Television: Images Broadcasting & Processing»*. (Saint Petersburg, 2016).
3. N. I. Gusarova, N. F. Koshchavtsev, and S. V. Popov, Usp. Prikl. Fiz. **2** (3), 288 (2014).
4. A. Richards and B. Cromwell, *Superframing: Scene Dynamic Range Extension of Infrared Cameras*. (FLIR Systems, Indigo Operations).
5. Ni Yang, in *Proceeding of the International Conference on Space Optics* (Spain, 2014).
6. Ni Yang and Ming Zhu Yi. *A 768×576 Logarithmic Image Sensor* (New Image Technologies SA).
7. P. A. Kuznetsov and S. S. Khromov, Prikl. Fiz., No. 4, 12 (2013).
8. A. Bermak and A. Kitchen. IEEE Photonics Technology Letters **18** (20), 15 (2006).
9. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, Usp. Prikl. Fiz. **2** (1), 83 (2014).
10. D. S. Andreev, N. B. Zaletaev, et al., Prikl. Fiz., No. 4, 86 (2012).
11. A. Rogalski, Opto-Electronics Review **20**, 279 (2012).
12. D. Jiang, Q. Liang, and R. Ding, Proceeding of SPIE **9275**, (2014).