

УДК 621. 383

Реализация режима временной задержки и накопления в фотоприёмном модуле формата 576×6 для сканирующих фотоприёмного устройства длинноволнового ИК-диапазона

П. А. Кузнецов, И. С. Мощев

В работе представлены результаты разработки фотоприёмного модуля формата 576×6 с ВЗН-режимом. Проведен сравнительный анализ различных вариантов реализации ВЗН-режима в БИС считывания. Обосновывается целесообразность модернизации существующих сканирующих ФПУ формата 288×4 на основе разработанного фотомодуля 576×6. Результатом такой модернизации станет упрощение оптико-механического узла сканирования и улучшение качества тепловизионного изображения.

PACS: 85.60 Dw

Ключевые слова: БИС считывания, КРТ, ВЗН.

Введение

Режим временной задержки и накопления (ВЗН), применяемый в сканирующих оптико-электронных системах, является эффективным способом увеличения времени накопления без ухудшения пространственно-временного разрешения фотоприёмного устройства (ФПУ) [1]. Суть его состоит в запоминании и суммировании сигналов от N фотоприемников, расположенных вдоль сканирования изображения. В ФПУ, реализованных по этому принципу, появляется ряд преимуществ:

- возрастание отношения сигнал-шум в $N^{1/2}$ раз независимо от вида шумового спектра, в том числе в условиях ограничения фоном;
- снижение неравномерности чувствительности и полное исключение дефектных фоточувствительных элементов (ФЧЭ);
- повышение пространственного разрешения за счет применения безззорной топологии ФЧЭ.

В результате ФПУ с режимом ВЗН становятся конкурентоспособными в сравнении с ФПУ «смотрящего» типа. Например, сканирующие тепловизоры 2-го поколения на многорядных линей-

ках HgCdTe имеют преимущества над матричными тепловизорами 3-го поколения в спектральной области 8—12 мкм, что показывает практика применения этих приборов в составе прицельных комплексов различных типов военной техники [2, 3].

ФПУ формата 288×4 для длинноволнового ИК-диапазона получили наибольшее распространение в сканирующих тепловизорах 2-го поколения, поскольку использование двунаправленного сканирования (с подсканированием на половину шага ФЧЭ) позволяет получить кадр изображения телевизионного формата 768×576. Тем не менее, наблюдается повышенный интерес к ФПУ формата 576×6 по следующим причинам:

- возможность замены двунаправленного сканирования на однонаправленное, что позволяет уменьшить влияние недостатков сканирующих устройств (неравномерность скорости сканирования; люфт ротора сканера и т. д.) и улучшить качество тепловизионного изображения [4, 5];
- упрощение оптико-механической системы за счет отсутствия узла подсканирования, поскольку кадр изображения 768×576 пикселей формируется за один проход сканера;
- однонаправленное сканирование позволяет увеличить в два раза время накопления и, соответственно, улучшить пороговые характеристики ФПУ;
- увеличение ВЗН-элементов до шести дополнительно улучшает пороговые характеристики ФПУ, а также позволяет проводить деселекцию до двух дефектных ФЧЭ с соответствующей компенсацией чувствительности ВЗН-канала.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист.

Мощев Илья Сергеевич, начальник ДЦ.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Коссинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 2 июня 2016 г.

© Кузнецов П. А., Мощев И. С., 2016

В данной работе представлены результаты разработки фотоприёмного модуля (ФПМ) формата 576×6 на основе многорядной линейки КРТ-диодов длинноволнового ИК-диапазона (7,7—10,5 мкм). Основной задачей являлось обеспечение полной совместимости ФПМ с конструкцией ФПУ формата 288×4, что позволило бы проводить модернизацию существующих тепловизоров данного формата без изменения их оптической и микрокриогенной систем.

Выбор варианта схемотехники БИС считывания для реализации режима ВЗН

Используя опыт разработки БИС считывания с режимом ВЗН в АО «НПО «Орион», можно выделить три основных варианта схемотехники: 1) с суммированием токов; 2) с суммированием зарядов; 3) с ВЗН-регистром [6]. Недостатками варианта с суммированием токов являются следующие: межстрочная модуляция выходного сигнала, обусловленная разбросом накопительных емкостей; большие номиналы накопительных емкостей (6—9 пФ), необходимые для суммирования токов от шести ФЧЭ.

Во втором варианте ВЗН (на основе сумматоров заряда) функции накопления и ВЗН-суммирования заряда разделены. Введение в накопительные ячейки дополнительной функции деления накопленного заряда позволяет снизить зарядовую емкость сумматоров заряда и, соответственно, уменьшить топологические размеры ВЗН-канала. Кроме того, считывание накопленного и просуммированного заряда последовательно производится по единой шине, что позволяет дополнительно снизить ширину ВЗН-канала. Сигналы деселекции из регистра памяти также передаются по одной шине, синхронно с опросом накопительных ячеек. Для проведения реверса ВЗН достаточно сменить направление опроса накопительных ячеек. На основе данной структуры были реализованы БИС считывания форматов 576×6 с шагом каналов 14 мкм и 1024×10 с шагом каналов 15 мкм [7, 8]. Однако в

этом варианте также наблюдалась межстрочная модуляция выходного сигнала, но уже обусловленная разбросом пороговых напряжений сумматоров заряда. Для устранения этого эффекта требуется усложнение алгоритма цифровой обработки фотосигнала и повышение линейности сканирующего устройства.

В результате, для разработки БИС считывания 576×6 был выбран третий вариант с ВЗН-регистром. В современных БИС считывания с реализацией аналогового режима ВЗН наибольшее распространение получили МОП ВЗН-регистры, обозначаемые в зарубежной литературе аббревиатурой BBD (bucket brigade device) [9]. BBD-регистры, сохраняя достоинства ПЗС-регистров, более технологичны и имеют стандартные КМОП-уровни управляющих сигналов. Упрощенная схема BBD-регистра для 4-х каскадного режима ВЗН, приведенная на рис. 1, содержит ячейки переноса A_i ($i = 1—10$) на двух МОП транзисторах, двух емкостях nC_0 ($n = 1—4$) и с двумя фазами переноса F_1, F_2 . Заряды $Q_1…Q_4$, накопленные во входных ячейках, поступают в ячейки переноса A_i , где после 3-тактной задержки суммируются. Для увеличения зарядовой емкости ячеек переноса в процессе суммирования заряда выбирают ступенчатое нарастание емкостей с шагом C_0 . Динамика суммирования заряда выражается формулой

$$Q_{sum}(t) = Q_1(t-10T_0) + Q_2(t-7T_0) + Q_3(t-4T_0) + Q_4(t-T_0), \quad (1)$$

где T_0 — период каждой из фаз F_1, F_2 , равный периоду опроса строки. Необходимость 3-тактной задержки вызвана тем, что в современных сканирующих МФПУ передискретизация, т. е. отношение периода ФЧЭ вдоль сканирования к периоду поперек сканирования, равна трем.

Структурная схема одного канала разработанной БИС считывания с ВЗН на основе BBD-регистра, приведена на рис. 2. Здесь полностью сохранена структура опроса и деселекции накопительных ячеек схемы с ВЗН-сумматорами. Накопленные сигнальные заряды по общей шине считывания

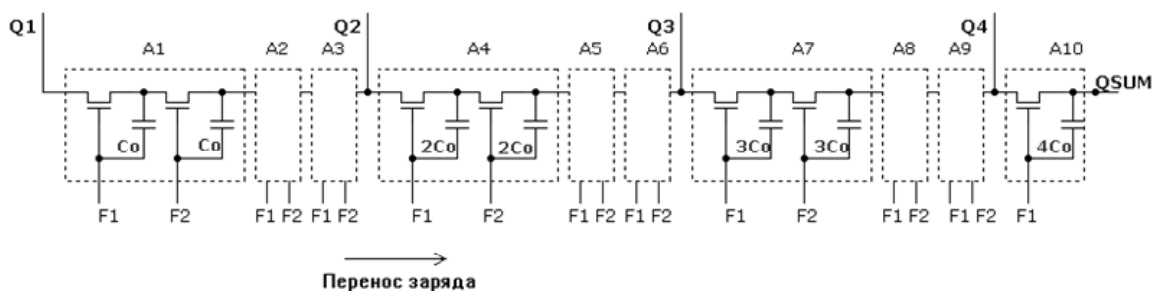


Рис. 1. Упрощенная схема BBD-регистра.

вания READ последовательно передаются в ВЗН-регистр TDIREG через устройства ввода и суммирования заряда SUM1,...SUM6. Между этими устройствами включены устройства задержки и сдвига TQ для временного хранения заряда до следующе-

го суммирования. После преобразования суммарного заряда в напряжение сигнала, происходит считывание этого сигнала через мультиплексирующий буфер MUXBUF на выход БИС считывания.

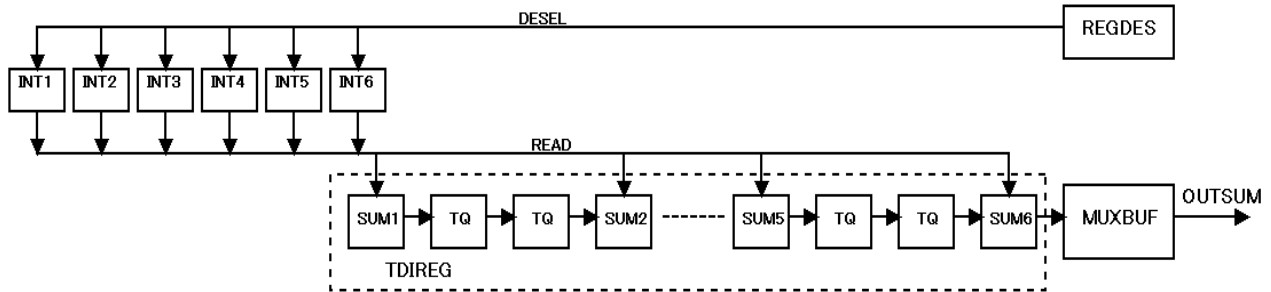
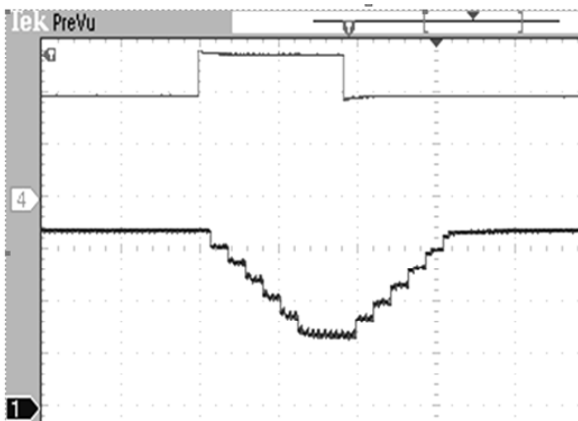


Рис. 2. Структурная схема канала БИС считывания 576×6 с ВЗН-регистром.

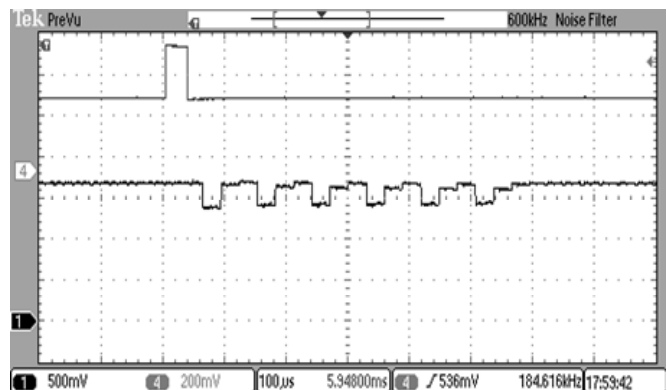
Результаты разработки БИС считывания 576×6 с ВЗН-регистром

БИС считывания 576×6 с ВЗН-регистром была изготовлена по стандартному КМОП-техпроцессу 0,35 мкм, 4М, 2Р с напряжением питания 3,3 В. Поскольку основной проблемой ВЗН-регистров на МОП-транзисторах является невысокая эффективность переноса заряда, то было проведено, в первую очередь, тестирование режима ВЗН методом электрической инжекции в накопительную ячейку. Суть метода состоит в подаче на шину сброса VR импульсов двух типов: широкого, с длительностью больше 16 строк, и узкого, с длительностью не более одной строки. В результате на выходе БИС считывания были получены осциллограммы тестовых ВЗН-сигналов (рис. 3). На рис. 3, а показана динамика формирования шестиступенчатого ВЗН-сигнала с длительностью каждой ступени в три строки, а на рис. 3, б представлены отклики

отрицательной полярности от накопительных ячеек 1—6 с временными задержками в 1, 4, 7, 10, 13 и 16 строк. Небольшие «размытия» откликов с большей задержкой позволяют оценить эффективность переноса заряда на уровне 99,5 %, которая не меняется при криогенных температурах и считается вполне приемлемой [10]. Кроме того, межстрочная модуляция в схемах с ВЗН-регистром принципиально отсутствует. Поскольку разработанная БИС считывания 576×6 (шифр — OrionF6) с шагом каналов 14 мкм рассматривается как адекватная замена прототипам формата 288×4 и с шагом каналов 28 мкм, то в сравнительном анализе не рассматривались другие форматы. В табл. 1 приведены основные параметры разработанной БИС считывания и ближайших аналогов МКМ-3 (ИФП СО РАН), TL015-XX-V3 (Sofradir) [11, 12]. На рис. 4 приведены изображения кристаллов БИС считывания OrionF6 и прототипа МКМ-3.



а



б

Рис. 3. Тестовый ВЗН-сигнал: а — большой длительности; б — малой длительности.

Таблица 1

Сравнение параметров БИС считывания с режимом ВЗН

Параметр	OrionF6 576×6	МКМ-3 288×4	TL015-XX-V3 288×4
Напряжение питания, В	3,3	5	5
Размах выходного сигнала, В	2,2	2,8	2,8
Зарядовая емкость по входу, Ме	65	28	16
Зарядовая емкость по выходу ВЗН-регистра, Ме	33	13,5	8
Кол-во выходов	8	4	4
Шаг каналов, мкм	14	28	28
Деселекция дефектных ФЧЭ	есть	есть	есть
Коэффициент компенсации дефектных ФЧЭ	1,2; 1,5	нет	1,33
Обнаружительная способность в λ_{\max} , $\text{Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ (при $f/1,8$)	$\geq 2,6 \times 10^{11}$	$\geq 1,9 \times 10^{11}$	$\geq 2,1 \times 10^{11}$
Тип сканирования	Реверсивное, без подсканирования	Реверсивное с подсканированием	Реверсивное с подсканированием

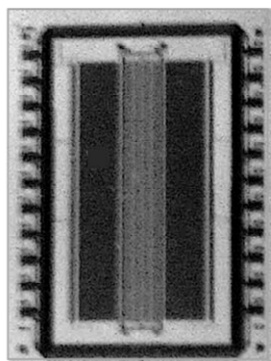


Рис. 4. Изображения БИС считывания OrionF6 (слева) и прототипа МКМ-3.

Наиболее важное отличие БИС считывания 576×6 состоит в возможности осуществлять однонаправленное сканирование, т. е. получать полный формат телевизионного кадра 768×576 за один проход сканера без подсканирования. Кроме того, увеличивается в 2 раза время накопления фото-сигнала, что в совокупности с увеличением в 1,5 раза числа ВЗН-элементов позволяет улучшить в 1,7 раза температурный порог ФПУ.

Была также проведена оценка эффективности перехода к формату 576×6, в частности, снижение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) достигало 1,7 раза при неизменном объективе, при этом пространственное разрешение 14 мкм достигалось за счет топологического перекрытия 2-х субматриц ФЧЭ формата 288×6.

Заключение

Рассмотрены три основные варианты реализации режима ВЗН в БИС считывания: с суммированием токов; с суммированием заряда; с динамической задержкой в ВЗН-регистре. Обосновывается выбор в пользу варианта с МОП ВЗН-регистром, дающим приемлемую эффективность переноса

заряда при числе ВЗН-элементов, не превышающем шести. Приводится сравнительный анализ БИС считывания 576×6 с ближайшими аналогами, обосновывающий целесообразность модернизации существующих сканирующих ФПУ формата 288×4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Дегтярев Е. В. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
2. Гордиенко В. И., Колобродов В. Г. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2010. Вып. 1. С. 17.
3. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения. — Киев, Академперіодика, 2008.
4. Алев Р. М., Насибуллин Р. А. // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2006. № 5.
5. Алев Р. М., Насибуллин Р. А. // Прикладная физика. 2008. № 1. С. 102.
6. Kim B., Yoon N., Lee H. C. // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4028. P. 166.
7. Зайцев А. А., Хромов С. С., Болтарь К. О., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2011. № 5. С. 92.
8. Зайцев А. А., Хромов С. С., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95.
9. Козлов К. В., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 61.
10. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 163.

11. Козлов А. И., Марчишин И. В. // Автометрия. 2012. Т. 48. № 4.

12. Васильев В. В., Варавин В. С., Рева В. П. и др. // Оптический журнал. 2009. Т. 12. № 12. С. 30.

Implementation of TDI mode in the scanning LWIR 576×6 FPA

P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev

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

Received June 02, 2016

A photoreceiver 576×6 module for the LWIR FPA with the TDI mode is described in this paper. The main feature of the FPA consists in applying sixteen stages of CMOS TDI-register. The average detectivity of the FPA is more than 2.6×10^{11} Jones. Comparative analyses and testing results have been showed.

PACS: 85.60 Dw

Keywords: ROIC, MCT, TDI.

REFERENCES

1. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and E. V. Degtyarev. *Prikladnaya Fizika*, No 2, 43 (2007).
2. V. I. Gordienko and V. G. Kolobrodov, *Artillerijskoe i Strelkovoe Vooruzhenie*, No. 1, 17 (2010).
3. F. F. Sizov. *Photoelectronics for Systems of Vision* (Kiev, Akadempriodika, 2008) [in Russian].
4. R. M. Aleev and P. A. Nasibullin, *Izvestia Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser.: Proborostroenie*, No 5, (2006).
5. R. M. Aleev and P. A. Nasibullin. *Prikladnaya Fizika*, No 1, 102 (2008).
6. B. Kim, N. Yoon, and H. C. Lee. *Proc. SPIE* **4028**, 166 (2000).
7. A. A. Zaitsev, S. S. Khromov, K. O. Boltar, and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No 5, 92 (2011).
8. A. A. Zaitsev, S. S. Khromov, and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No 5, 95 (2012).
9. K. V. Kozlov and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No 3, 61 (2015).
10. P. A. Kuznetsov and I. S. Moshchev. *Prikladnaya Fizika*, No 2, 163 (2014).
11. A. I. Kozlov and I. V. Marchishin, *Optoelectron., Instrum. Data Process.* **48** (4) (2012).
12. V. V. Varavin, V. S. Vasiliev, V.P. Reva, et al., *Opticheski Journal* **12** (12), 30 (2009).