

УДК 681.78; 621.383.5

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПЗС-ФОТОПРИЁМНИКОВ В СОСТАВЕ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

© А. А. Голицын^{1,2}

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Новосибирский государственный технический университет,

630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: aag-09@yandex.ru

Представлены результаты разработки и апробации комплекса для изучения режимов работы ПЗС-матриц. Целью изучения является проверка работоспособности указанных матриц в составе активно-импульсного устройства без использования в его конструкции электронно-оптического преобразователя или иного внешнего быстродействующего затвора. Комплекс позволяет управлять серийной ПЗС-матрицей недокументированным способом с помощью сигналов произвольной формы, синхронизировать её работу с лазерным излучателем, получать изображение, производить его цифровую обработку и передавать на внешние устройства. Проведённые эксперименты на различных ПЗС-матрицах показали возможность построения на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом активно-импульсной системы наблюдения без использования в её составе электронно-оптического преобразователя и практического приложения такой системы.

Ключевые слова: активно-импульсное наблюдение, метод стробирования, электронный затвор, ПЗС-матрица.

DOI: 10.15372/AUT20190515

Введение. Активно-импульсными приборами наблюдения называются устройства, принцип действия которых основан на методе стробирования по дальности [1, 2]. Суть метода заключается в том, что местность подсвечивается короткими импульсами с помощью лазерного излучателя, а фотоприёмник устройства, синхронизированный с излучателем, воспринимает отражённый свет с задержкой, достаточной для прохождения света до интересующего объекта и обратно. За счёт задержки устройство не воспринимает свет, отражённый от близко расположенных объектов, например частиц пыли или дыма, находящихся в воздухе, и не ослепляет себя своей собственной подсветкой, отражённой от этих частиц. Подобные устройства получили широкое распространение в качестве приборов наблюдения в условиях ограниченной видимости [3], лазерных локаторов [4] и устройств получения 3D-изображений [5].

Сегодня основным элементом активно-импульсной системы наблюдения является электронно-оптический преобразователь (ЭОП), выполняющий функции быстродействующего затвора и обеспечивающий синхронизацию фотоприёмника с импульсным лазерным излучателем. Недостатком использования ЭОП считается существенное увеличение массы и габаритов активно-импульсного прибора по сравнению с обычным цифровым прибором наблюдения как за счёт самого ЭОП, так и за счёт необходимой для его согласования с ПЗС- или КМОП-матрицей оптической проекционной системы [6]. Кроме того, ЭОП ограничивает использование матриц с большим разрешением, не даёт возможности применения цветных матриц и увеличивает стоимость прибора.

В [7] описывается синхронизация ПЗС-матрицы с лазерным излучателем с помощью функции электронного затвора. Теоретическая возможность исключения ЭОП из конструкции активно-импульсной системы для ПЗС-матрицы со строчным переносом и управление ею недокументированным способом, позволяющим использовать секцию вертикального переноса зарядов матрицы в качестве дополнительной накопительной секции, описаны в [6]. В [8] рассматривается указанный способ управления на примере ПЗС-матрицы ICX618 производства Sony и приводятся соответствующие диаграммы управления.

Представленная работа посвящена описанию аппаратно-программного комплекса, специально созданного для управления различными типами ПЗС-матриц и для получения наблюдаемых изображений в целях проверки возможности применения этих ПЗС-матриц в качестве фотоприёмников в составе активно-импульсных приборов наблюдения без использования ЭОП в их конструкциях.

Описание устройства комплекса. Основой модуля электроники аппаратно-программного комплекса является реконфигурируемая система [9] на базе работающих в связке программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и сигнального процессора. Кроме них применены два элемента быстродействующей памяти — синхронные динамические оперативные запоминающие устройства. На ПЛИС реализованы аппаратные модули, формирующие управляющие ПЗС-фотоприёмником и оцифровывающей схемой сигналы, а также модули, осуществляющие высокоскоростную параллельную обработку видеопотока. Сигнальный процессор проводит интеллектуальный анализ изображения, расчёт необходимых коэффициентов, требуемых алгоритмом, реализованным на ПЛИС, и управляет комплексом в целом. Один из элементов памяти используется для обеспечения работы аппаратно-программных блоков, реализованных на базе ПЛИС. Другой необходим для обмена данными между модулями ПЛИС и внешним по отношению к ним сигнальным процессором. Такой подход построения системы обработки изображений совмещает высокую производительность, эквивалентную производительности одноядерных сигнальных процессоров (64...512 шт.) класса Blackfin с малыми габаритами и низким энергопотреблением (не более 1 Вт), что позволяет использовать систему в носимых приборах с питанием от батареек. Производительности системы хватает на одновременную оценку и обработку в реальном времени кадров изображения форматом не менее 1600×1200 при скорости потока не менее 25 кадр./с, что, в частности, в [10] позволило реализовать тепловизионный прибор наблюдения на основе аналогично построенного модуля электроники, но с помощью электронной элементной базы предыдущего поколения, а также визуализатор терагерцового диапазона [11].

На рис. 1 представлена архитектура модуля электроники. На базе ПЛИС формируются сигналы, управляющие ПЗС-фотоприёмником и ПЗС-процессором, а также синхронизированный с ними сигнал запуска лазерного излучателя. Сигналы управления ПЗС-фотоприёмником поступают на него не напрямую, а через драйверы вертикальной и горизонтальной развёртки, обеспечивающие необходимые уровни напряжений сигналов и физически располагающиеся в корпусе ПЗС-процессора вместе с остальными его частями, такими как модуль двойной коррелированной выборки, усилители, источники прецизионных напряжений и аналого-цифровой преобразователь. Аналоговый сигнал на выходе ПЗС-фотоприёмника, соответствующий получаемому изображению, оцифровывается и поступает в тракт обработки изображений, одновременно реализованный на ПЛИС и на сигнальном процессоре. Обработанное изображение передаётся на дисплей или монитор по VESA-шине или на ПК, для чего в составе комплекса предусмотрен контроллер HighSpeed USB 2.0. Технологический интерфейс с внешним компьютером позволяет выполнять ряд задач, например передачу изображения для его детального анализа или последующей записи, настройку прибора в режиме реального времени, удалённое наблюдение.

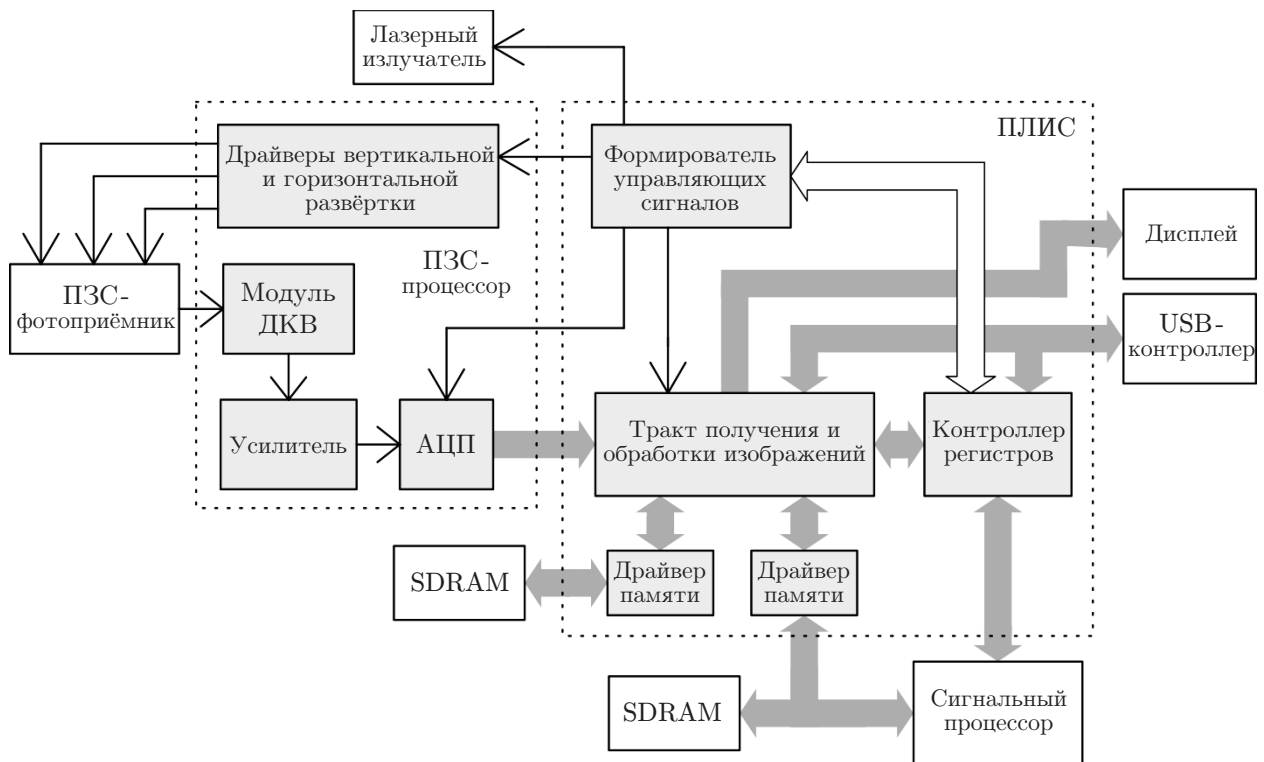


Рис. 1. Архитектура модуля электроники макета активно-импульсного прибора наблюдения

Следует отметить, что в настоящее время существуют ПЛИС с уже встроенными микропроцессорами, и в составе реконфигурируемой системы такая ПЛИС могла быть применена. Но на момент разработки макета активно-импульсного прибора наблюдения энергопотребление подобных ПЛИС при работе на высокой (порядка 200 МГц) частоте превышало энергопотребление отдельно подобранных ПЛИС и сигнального процессора, что было установлено опытным путём.

На рис. 1 для упрощения фрагмент архитектуры, реализованный на сигнальном процессоре, не показан. Взаимодействие сигнального процессора и ПЛИС осуществляется через контроллер регистров. В сигнальном процессоре на аппаратном уровне реализована поддержка регистров и их адресация ядром в качестве ячеек памяти в общем пространстве адресов (memory-mapped registers, MMR), что облегчает написание программы. Так, чтение и запись в регистры в программе аналогичны записи и чтению для переменных, несмотря на то что физически регистры располагаются во внешней по отношению к процессору памяти. В ПЛИС поддержка MMR-регистров реализована программно. Через регистры происходят взаимный обмен командами, опрос процессором состояний отдельных блоков, реализованных на ПЛИС, их переконфигурация под конкретную задачу и т. д. Управление периферийными устройствами (по отношению к ПЛИС и сигнальному процессору), например ПЗС-процессором, USB-приёмопередатчиком, микромонитором и т. д. также осуществляется через блок регистров. Модули в ПЛИС при взаимодействии с периферией сами определяют, какие сообщения и в каком виде отправить периферийным устройствам, получают от них ответы и сохраняют результат, который сигнальный процессор может считывать также из регистров. Преимущество такого подхода реализации обмена данными с периферийными устройствами перед прямым соединением заключается в отсутствии необходимости переконфигурации аппаратного модуля передачи данных

процессора перед каждой отправкой или приёмом сообщения.

Обмен большими массивами данных (более 20 «слов»), в том числе кадрами изображения между ПЛИС и процессором, осуществляется через элемент памяти, расположенный на общей для ПЛИС и сигнального процессора шине. В частности, в эту память помещается служебный кадр, состоящий из изображений пиктограмм, шкал и диалоговых окон, необходимых для реализации пользовательского интерфейса цифрового активно-импульсного прибора наблюдения, который объединяется с изображением сцены, полученным после всех преобразований непосредственно перед выводом итогового изображения на микромонитор. Также обмен кадрами изображения между процессором и ПЛИС необходим для работы алгоритмов обработки изображений, частично реализованных на процессоре, а частично в модулях ПЛИС. Например, процессор, выдав команду на загрузку в память определённого количества кадров (от одного до нескольких десятков) и получив к загруженному массиву данных доступ, производит гистограммный анализ фрагментов загруженных изображений, вычисляет корректирующие коэффициенты для каждого кадра и рассчитывает новое время экспозиции. Затем коэффициенты передаются в ПЛИС (уже через регистры), где они используются для коррекции изображения непосредственно в потоке в реальном времени.

Для буферизации обрабатываемых кадров изображения модулями ПЛИС, не взаимодействующими с процессором при обмене фрагментами кадров изображения, реализуется дополнительный элемент памяти. Применение памяти, служащей для обмена данными между ПЛИС и процессором, привело бы к значительному уменьшению пропускной способности тракта видеообработки, работающему асинхронно по отношению к процессору, из-за использования одних и тех же шины адресов и шины данных.

Конструкция. Конструктивно аппаратно-программный комплекс представляет собой металлическое основание с закреплёнными на нём объективами фотоприёмника и лазерного излучателя, блендой фотоприёмника и платами: фотоприёмника, управления и видеообработки, а также лазерного излучателя. При работе под открытым небом всё устройство закрывается защитным кожухом с кнопками управления на его поверхности и разъёмом для подключения USB-кабеля. Кожух также снабжён батарейным отсеком и микромонитором, подключаемым к плате управления и видеообработки, что позволяет производить исследования не только в лабораторных условиях. Могут использоваться любые объективы, имеющие резьбовое соединение C-Mount.

На плате фотоприёмника находятся исследуемый ПЗС-фотоприёмник, ПЗС-процессор, источники питания и некоторые вспомогательные элементы, необходимые для их работы. Плата аппаратно-зависимая и проектируется под каждый фотоприёмник отдельно с учётом необходимого количества выводов и уровней напряжений питания.

Плата управления и видеообработки универсальная аппаратно-независимая. На ней располагаются ПЛИС, сигнальный процессор, элементы памяти, USB-контроллер, источники питания для них и элементы постоянной памяти, в которых хранятся программы ПЛИС и сигнального процессора, а также вспомогательный микроконтроллер, обеспечивающий взаимодействие с кнопками управления макетом активно-импульсного прибора наблюдения. Плата остаётся неизменной для любого исследуемого фотоприёмника. Изменяется только часть программного обеспечения, касающаяся количества и формы сигналов управления ПЗС-фотоприёмником. На плате реализованы ПЛИС EP4CE55F23 производства фирмы Altera семейства Cyclone IV, сигнальный процессор ADSP-BF533 производства фирмы Analog Devices, элементы памяти MT48H16M16 и MT48H16M32 производства фирмы Micron, а также USB-контроллер CY7C68013 производства фирмы Cypress. С платами фотоприёмника данная плата соединяется шлейф-кабелем через 60-контактный разъём. Такого количества контактов достаточно для управления практически любым

ПЗС-фотоприёмником, для получения данных об изображении в цифровом виде и для обеспечения питания платы фотоприёмника.

На плате лазерного излучателя находится полупроводниковый импульсный лазерный диод 905D3S3J08S, имеющий импульсную мощность 210 Вт при длительности импульса 120 нс и частоте повторения от 10 до 15 кГц. Длина волны излучения составляет 905 нм.

Управление всем комплексом, а также визуализация получаемого изображения осуществляется на персональном компьютере через специально разработанное для этих целей приложение. В полевых условиях управление осуществляется с помощью кнопок, расположенных на защитном кожухе, а наблюдение за изображением на микромониторе.

Эксперименты и их результаты. Работоспособность активно-импульсного метода наблюдения без электронно-оптического преобразователя или иного внешнего быстродействующего затвора проверялась на различных ПЗС-фотоприёмниках. Эксперименты показали, что использование функции электронного затвора даёт возможность синхронизировать фотоприёмник с лазерным излучателем, но не позволяет наблюдать изображение приемлемого качества. Это связано с тем, что при малом времени экспозиции, равном длительности единичного импульса лазерного излучателя (от 100 до 200 нс), уровень полезного сигнала накопленного изображения не превышает уровня квантования АЦП оцифровывающей схемы.

Помимо ПЗС-матриц также проверялась возможность использования КМОП-матриц, для чего были спроектированы дополнительные платы фотоприёмника. Но опытным путём установлено, что для реализации активно-импульсного метода КМОП-фотоприёмники непригодны.

Положительный результат получен при проведении экспериментов с ПЗС-фотоприёмниками со строчным переносом. Их конструктивной особенностью является наличие двух независимо работающих секций: области накопления зарядов в момент экспозиции и области постепенного вертикального переноса зарядов на выходные цепи фотоприёмника. Подробно способ управления фотоприёмником со строчным переносом описан в [8], где также приведены примеры управляющих диаграмм. Суть способа заключается в том, чтобы область вертикального переноса использовалась не только для собственно вертикального переноса зарядов, но и в качестве дополнительной секции накопления. В этом случае в ней происходит суммирование фактически отдельных кадров изображения, наблюдаемых в моменты получения отдельных отражённых импульсов лазерного излучателя. На выходные цепи фотоприёмника затем передаётся уже итоговый кадр изображения, обладающий приемлемым для наблюдения качеством. Экспериментальная проверка осуществлялась на ПЗС-матрицах серий ICX445 и ICX692 (Sony) с прогрессивной развёрткой и серий ICX279 и ICX659 с чересстрочной развёрткой.

Эксперимент, демонстрирующий работоспособность предложенного метода управления ПЗС-фотоприёмником со строчным переносом, состоял в том, чтобы при подсветке местности лазерным излучением можно было наблюдать отражённый свет от заранее расставленных на заданном расстоянии от оператора катафотов. При постепенном увеличении дальности наблюдения или увеличении задержки срабатывания фотоприёмника относительно срабатывания лазерного излучателя, блики от катафотов, расположенных ближе заданного расстояния, должны исчезать. Примеры полученных изображений в условиях вертикальной освещённости около 5000 лк представлены на рис. 2. Используется ПЗС-матрица ICX445ALA, управляемая в режиме центрального окна с разрешением изображения 800×600 элементов. Уменьшение разрешения обусловлено необходимостью ограничения объёма данных, передаваемых на компьютер по USB-шине с ограниченной пропускной способностью. Поток несжатых кадров с разрешением 800×600 и частотой 25 кадр./с передавался со скоростью до 25 Мб/с. Вспомогательные узкополосные фильтры не применялись. В первом случае при обозначенной дальности наблюдения 150 метров



Рис. 2. Наблюдение отражённого света от катафотов, расположенных на расстоянии 150 и 200 метров: при установленной дальности 150 метров (а) и 170 метров (b)

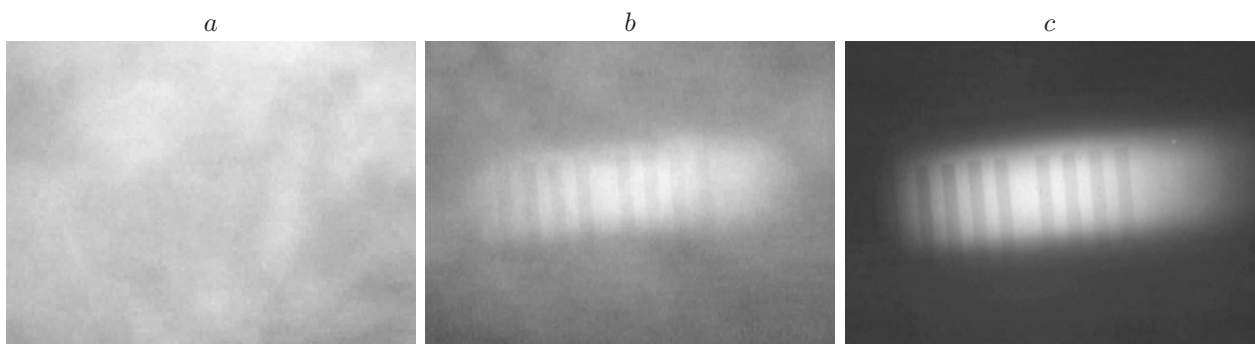


Рис. 3. Изображение миры, находящейся на расстоянии 20 метров в задымлённом помещении: а — наблюдение в пассивном режиме; б — активно-импульсным методом с установленной дальностью 10 метров; с — в активно-импульсном режиме с установленной дальностью 20 метров

видны блики от катафотов с расстояния 150 и 200 метров. Во втором случае дальность наблюдения была установлена в 170 метрах и при этом был виден только один блик от катафота, расположенного в 200 метрах. Для наглядности блики на обоих изображениях указаны стрелками. При проверке работоспособности других ПЗС-матриц со строчным переносом в аналогичном режиме, например ICX692, ICX659 и некоторых других, наблюдались аналогичные изображения.

В целях повышения вероятности обнаружения отражающих объектов в исходном эксперименте дополнительно проводилось кратковременное прерывание подсветки. Оператор при этом видел мигающие с частотой около 2 Гц блики, легко идентифицируемые на разнородном фоне. Экспериментально установлено, что для отчётливого наблюдения отражения лазерной подсветки от катафотов, находящихся на расстоянии до 300 метров, в условиях освещённости «ясный день» достаточно от 10 до 20 импульсов лазерного излучателя на каждый кадр изображения. Для дистанции 800 метров количество импульсов увеличивается от 70 до 90. При понижении окружающей освещённости количество импульсов, достаточное для обнаружения бликов, пропорционально уменьшается.

Помимо наблюдения хорошо отражающих свет объектов с помощью разработанно-

го комплекса проведён эксперимент, показывающий возможность использования активно-импульсной системы в условиях непрозрачности атмосферы (рис. 3). Эксперимент заключался в наблюдении тестового объекта на заданном расстоянии сквозь дым. Тестовым объектом в эксперименте являлась мира, представляющая собой вертикальные штрихи, распечатанные на листе формата А3. Она располагалась на расстоянии 20 м от наблюдателя в задымлённом закрытом помещении. Источником дыма служила дымовая пашка, предназначенная для игры в пейнтбол. Как показано на рис. 3, при наблюдении в пассивном режиме дым полностью заслоняет миру, в активно-импульсном режиме с установленной дальностью 10 метров мира наблюдается, но также виден и дым, от которого частично отражается свет лазерного излучателя. При установленной дальности наблюдения 20 метров свет, отражённый от дыма, оказывается практически полностью отсечённым, что позволяет наблюдать миру так, будто она находилась в прозрачной среде. В каждом случае мира подсвечивалась 25 импульсами лазерного излучателя. На изображении площадь пятна подсветки по сравнению с площадью сцены мала. Это связано с тем, что использованный объектив обеспечивал малую расходимость света лазерного излучателя, недостаточную для покрытия всей сцены на малом расстоянии.

Оба описанных эксперимента позволили продемонстрировать построение активно-импульсной системы на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом. Во-первых, наглядно показана способность отсечения света лазерного излучателя, отражённого от объектов, находящихся ближе заданного расстояния. Во-вторых, показана возможность получения изображений приемлемого для наблюдения человеком качества, на которых видны не только блики от ретроотражателей, но и окружающие предметы вместе с фоном.

Заключение. В данной работе предлагается аппаратно-программный комплекс для исследования возможности применения ПЗС-матриц в составе активно-импульсных приборов наблюдения. Комплекс представляет собой систему, способную управлять фотоприёмниками с помощью сигналов произвольной формы и передавать оператору наблюдаемое изображение.

Разработанный аппаратно-программный комплекс дал возможность выявить способ управления ПЗС-фотоприёмником со строчным переносом, позволяющий использовать его в составе активно-импульсного прибора наблюдения без электронно-оптического преобразователя в качестве внешнего затвора.

С применением этого комплекса были проведены эксперименты, показавшие работоспособность активно-импульсной системы без электронно-оптического преобразователя, построенной на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом, и её реализацию на практике. Продемонстрирована возможность отсекал свет лазерного излучателя, отражённый от предметов, которые находятся ближе заданного расстояния, в том числе наблюдать предметы в условиях непрозрачности атмосферы. Кроме того, экспериментально подтверждена возможность получения кадров изображения приемлемого качества в условиях малых длительностей (около 150 нс) импульсов лазерного излучателя.

Спроектированные схемы управления ПЗС-матрицей и программное обеспечение в дальнейшем могут быть использованы при разработке приборов наблюдения в условиях ограниченной видимости и при разработке лазерных локаторов. Исключение электронно-оптического преобразователя из конструкций позволит уменьшить их массу, габаритные размеры и стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Neumann D. B.** Precision range gated imaging technique // Journ. SMPTE. 1965. **74**, N 4. P. 313–319. DOI: 10.5594/J06040.

2. **Gillespie L. F.** Apparent illuminance as a function of range in gated, laser night-viewing systems // JOSA. 1966. **56**, N 7. P. 883–887. DOI: 10.1364/JOSA.56.000883.
3. **Mariani P., Quincoces I., Haugholt K. et al.** Range-gated imaging system for underwater monitoring in ocean environment // Sustainability. 2019. **11**, N 1. P. 162. DOI: 10.3390/su11010162.
4. **Laser Radar: Progress and Opportunities in Active Electro-Optical Sensing** /Eds. P. McManamon, W. Buell. Washington, DC: The National Academies Press, 2014. 310 p. DOI: 10.17226/18733.
5. **Chua S. Y., Chew K. W., Guo N., Wang X.** Three-dimensional (3D) reconstruction of range gated imaging // Proc. of the IEEE 7th Intern. Conf. on Photonics (ICP). Kuah, Malaysia, 9–11 Apr., 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/ICP.2018.8533195.
6. **Golitsyn A. A., Seyfi N. A.** The implementation of gated-viewing system based on CCD image sensor // Proc. of the IEEE 14th Intern. Scientific-Technical Conf. on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct., 2018. P. 102–104. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545072.
7. **Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К., Манцветов А. А. и др.** Управление режимом накопления в твердотельных фотоприёмниках // Оптический журнал. 2012. **79**, № 11. С. 84–92.
8. **Голицын А. А., Сейфи Н. А.** Реализация активно-импульсного режима на ПЗС-матрице // Прикладная физика. 2018. № 1. С. 78–83.
9. **Reconfigurable Computing: The Theory and Practice of FPGA-Based Computation** /Eds. S. Hauck, A. DeHon. Burlington, US: Elsevier Inc., 2008. 944 p.
10. **Голицын А. А., Голицын А. В., Журов Г. Е. и др.** Тепловизионный канал на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров // Оптический журнал. 2013. **80**, № 6. С. 8–13.
11. **Паулиш А. Г., Новгородов Б. Н., Хрящев С. В., Кузнецов С. А.** Терагерцовый визуализатор на основе ТГц–ИК-конвертера // Автометрия. 2019. **55**, № 1. С. 56–63. DOI: 10.15372/AUT20190108.

Поступила в редакцию 23.05.2019

После доработки 04.07.2019

Принята к публикации 11.07.2019