

А. В. ГОЛИЦЫН, П. В. ЖУРАВЛЕВ, Г. Е. ЖУРОВ, А. В. КОРЯКИН,
А. П. ЧИХОНАДСКИХ, В. Б. ШЛИШЕВСКИЙ, Т. В. ЯШИНА

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ ПРИБОР ОБНАРУЖЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ УГРОЗ

Представлен двухспектральный прибор обнаружения потенциальных угроз для подвижных дозорных войсковых групп и спецподразделений силовых структур. Прибор содержит тепловизионный и лазерный локационный каналы.

Ключевые слова: тепловизионный, микроболометрический, многоканальный, электронно-оптический преобразователь, активно-импульсный, суперпохромат, реконфигурируемая система высокой производительности, слияние изображений, обработка изображений.

В последние десятилетия интенсивное развитие получили многоканальные (многоспектральные) оптико-электронные приборы (МОЭП) [1, 2], в которых объединение и одновременное использование нескольких спектральных каналов позволяет с большей вероятностью (и достоверностью) обнаруживать и распознавать цели различного характера, в том числе тщательно замаскированные и закамуфлированные. Однако в силу необходимости удовлетворения целому ряду противоречивых требований — повышение дальности обнаружения, увеличение вероятности опознавания и идентификации целей при снижении массогабаритных параметров — в каждом из отдельных каналов МОЭП обычно не реализуются предельные значения, достижимые в существующих узкоспециализированных приборах. Так, любая комбинация двух каналов в одном МОЭП имеет следствием увеличение его массогабаритных характеристик по сравнению с обычным одноканальным вариантом. С другой стороны, при создании МОЭП (прежде всего, с небольшой массой) в рамках массогабаритных характеристик одного канала включение второго канала неизбежно приводит к уменьшению либо оптической апертуры каналов, либо фокусных расстояний приемных объективов, что влечет за собой снижение дальности наблюдения в каждом отдельном канале. В этих условиях основная нагрузка по повышению качества изображения МОЭП ложится на систему интегрирования изображений всех каналов.

В настоящей статье описывается двухспектральный прибор [3], предназначенный для подвижных дозорных войсковых групп и спецподразделений силовых структур и позволяющий им обнаруживать людей и технику (в том числе возможные засады, проявления нежелательной активности и другие потенциальные угрозы) на маршруте в любое время суток до приближения на расстояние эффективного поражения стрелковым оружием.

Прибор содержит тепловизионный канал (ТпВК) на базе неохлаждаемой 384×288 -матрицы микроболометров с шагом 35 мкм и лазерный локационный канал (ЛЛК) на основе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), сопряженного с ПЗС-матрицей формата 756×582 элементов (с шагом $8,6 \times 8,3$ мкм) посредством проекционной оптической системы. Назначение ТпВК, работающего в спектральной области 8—12 мкм, — обнаружение живых объектов и транспортной техники. ЛЛК, оснащенный лазерной импульсной фарой, синхронизированной с ЭОП, в активном режиме решает задачу обнаружения оптико-электронных средств, а в пассивном — дает телевизионное изображение объектов наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Для вывода изображения использован псевдобинокулярный микродисплей на двух цветных матрицах органических диодов формата 800×600 элементов с оптической системой

типа „виртуальный сферический экран“ [4], которая снимает необходимость регулировки межзрачкового расстояния и диоптрийной подстройки, упрощая тем самым конструкцию и снижая массу выходного блока без потери его функциональности и герметичности. При этом каждый канал представляется отдельным цветом, который может задаваться оператором (красный, зеленый, синий), что в значительной степени помогает ослабить взаимные помехи каналов. Значения общей и относительной яркости каналов регулируются. Изображение в каналах может быть представлено и в черно-белой палитре, в которой различимо больше оттенков.

Кроме изображения на микродисплей выводится служебная информация, отображающая в процессе работы текущее состояние и настройки каналов, а в процессе подготовки к работе — вспомогательную информацию, позволяющую осуществить тонкую выверку каналов по вертикали и горизонтали, горизонтальное масштабирование, калибровку измеряемой дальности, цветовую палитру и относительные значения яркости каждого из каналов. Микродисплей на двух матрицах является достаточно энергозатратным блоком (2 Вт), что, однако, компенсируется высокой яркостью изображения и малой массой — не более 200 г.

Изображение также может выводиться на внешний стандартный дисплей формата VESA SVGA или на компьютер через порт Ethernet.

Внешний вид прибора показан на рис. 1. Его штатное рабочее положение — на треноге, однако сравнительно небольшая масса (5 кг) допускает возможность работы „с рук“ в течение, как минимум, 15 мин. Общее энергопотребление не превышает 8 Вт; длительность непрерывной работы от аккумулятора — до 4 ч.



Рис. 1

Основные проблемы, которые пришлось решать в процессе разработки прибора, были связаны с необходимостью обеспечения единого масштаба изображений каналов (с учетом технологических допусков и температурного диапазона применения), высоких поисковых характеристик ЛЛК и устойчивости его работы в условиях яркой дневной освещенности (до 10^5 лк), широкого спектрального диапазона работы объектива (0,45—0,85 мкм) и малого энергопотребления при использовании микродисплеев и процессоров обработки и слияния изображений.

Для удержания сигнала в пределах входного диапазона 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя при отказе от температурной стабилизации микроболометрической матрицы встроенным термоэлектрическим регулятором (вызывающим расход энергии при низких температурах около 10 Вт) был разработан метод балансировки сигнала с помощью регулировки напряжений смещения на матрице на основании анализа его частотных гистограмм, выполняемого в процессоре изображения. Применение метода обеспечило малое энергопотребление ТпВК (в пределах 1,5 Вт) при сохранении высокой температурной чувствительности — до 0,08 К.

При использовании объектива, имеющего фокусное расстояние $f = 80$ мм и относительное отверстие 1:1, дальность опознавания ростовой фигуры человека в ТпВК составляет 650 м, а дальность обнаружения движущихся транспортных средств — более 5 км (в пределах видимости).

Масса отдельно взятого ТпВК равна ≈ 1200 г, в том числе объектива ≈ 800 г (микроболометрические матрицы с шагом 20—25 мкм, позволяющие снизить массу объектива примерно вдвое при той же дальности действия, на момент разработки не были доступны).

Процессор изображений ТпВК построен с использованием перспективных принципов реконфигурируемых систем высокой производительности (High Performance Reconfigurable

Computing — HPRC). Ресурсозатратная параллельная обработка видеопотока ведется в программируемой логической интегральной схеме, а анализ сигнала — в сигнальном процессоре. За счет обработки изображения в высокопроизводительном процессоре ТпВК не требует каких-либо настроек, кроме регулировки яркости относительно ЛЛК и вывода служебной информации на экран микродисплея.

На рис. 2 приведена принципиальная оптическая схема ЛЛК. Зондирование пространства производится лазерной фарой ближнего инфракрасного диапазона. Оптические и оптико-электронные средства, попадающие в зондируемую зону, дают отклик (за счет переотражения), который четко виден на естественном фоне, имеющем диффузный характер отражения излучения фары. Изображение с экрана ЭОП переносится на ПЗС-матрицу проекционной системой с линейным увеличением $-0,446\times$ и относительным отверстием 1:1,6. Увеличение может регулироваться в пределах $\pm 10\%$ при сохранении расчетного диаметра пятна рассеяния (4 мкм) менее шага микроканалов ЭОП (7 мкм). В канале предусмотрена возможность управления мощностью лазерной фары, задания диапазона просматриваемых дальностей в автоматическом режиме сканирования по глубине пространства, установки протяженности и положения строба дальности в ручном режиме, а также переключения режимов работы.

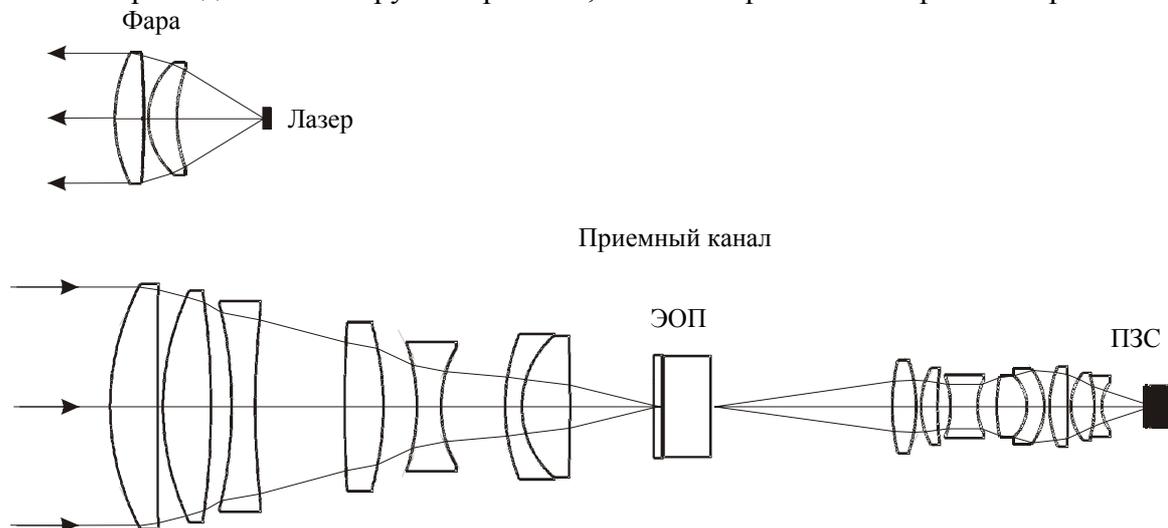


Рис. 2

Поскольку в дневное время суток отношение сигнал/фон на требуемых значениях дальности снижается на несколько порядков (диапазон рабочих освещенностей составляет от 0 до 10^5 лк, а освещенностей, на которых различаются цель и фон, — от 10^{-4} до 10^5 лк), для поддержания необходимого уровня превышения сигнала был разработан модифицированный активно-импульсный принцип, позволяющий существенно подавить фон. Обычно классический активно-импульсный прибор ночного видения (ПНВ) имеет узкое поле подсвета — до 1° , а также ручную регулировку положения строба дальности [1]. Такая комбинация предопределяет его крайне низкие поисковые возможности, особенно если иметь в виду, что в момент попадания обнаруживаемого объекта одновременно в поле подсвета и строб дальности объект решает собственные задачи и не обязательно обращен в сторону лоатора. Предложенная и использованная здесь модификация активно-импульсного принципа заключается в автоматическом сканировании строба по всему диапазону значений дальности за время каждого кадра ЛЛК. Оператор может выбрать один из четырех профилей распределения средней мощности фары по глубине сканирования, что существенно повышает дальность обнаружения при сохранении высоких поисковых характеристик. Более подробно этот вопрос рассмотрен в отдельной статье настоящего тематического выпуска.

ЭОП (на базе серийного вакуумного блока ЭПМ44Г-А) оснащен специально спроектированным импульсным источником питания, стробирующим его с частотой 5 кГц и длительностью

переднего и заднего фронтов 50 и 25 нс соответственно, что обеспечивает одновременно как круглосуточный активно-импульсный режим работы ЛЛК, так и возможность его пассивной работы днем или в присутствии ярких световых помех в поле зрения.

Следует отметить, что в данном случае ЭОП выполняет, прежде всего, роль затвора, повышающего отношение сигнал/фон, поскольку дальность обнаружения цели в канале ограничена не собственным шумом приемника, а низким значением отношения сигнал/фон в светлое время суток. Расчеты дальности действия демонстрируют достаточный уровень чувствительности ПЗС-матрицы для обнаружения обратно отраженного излучения в отсутствие солнечной засветки. Функция отображения фоновой обстановки, для которой в темное время суток необходим именно ЭОП, является вторичной и может быть возложена на ТпВК.

Для решения задачи отображения четкого точечного отклика бликующего объекта в интервале значений длины волны 0,83—0,85 мкм через оптическую систему, которую оператор может фокусировать, наблюдая обстановку только в видимом диапазоне спектра, был разработан специальный широкоспектральный линзовый объектив-суперапохромат с исправленным хроматизмом положения для четырех длин волн. Объектив имеет фокусное расстояние $f = 85$ мм, относительное отверстие 1:2 и размер абберационного пятна рассеяния в диапазоне значений длины волны 0,48—0,85 мкм менее 4 мкм по всей площади фотокатода ЭОП, что почти соответствует дифракционному пределу и значительно меньше шага микроканалов ЭОП (7 мкм). Такие параметры позволяют полностью реализовать рабочий спектральный диапазон ЭОП поколения 2^+ без применения каких-либо дополнительных отрезающих фильтров.

Бликующие объекты обнаруживаются с помощью ЛЛК на расстоянии от 50 до 2000 м. В частности, дневной телескопический снайперский прицел ПСО-1 уверенно обнаруживается на расстоянии 1 км при освещенности до 1000 лк. Заметим, что, как и у аналогичных систем, с уменьшением освещенности дальность действия ЛЛК возрастает.

При создании любого МОЭП с совмещенным изображением каналов в едином информационном поле всегда возникают серьезные проблемы, связанные с взаимными помехами изображений, потерей разрешения при слиянии разнородных дискретных растров, а также технологическими и эксплуатационными неточностями элементов каналов. В МОЭП с небольшой массой возникают дополнительные трудности — совмещение должно производиться в реальном масштабе времени, не должно быть затратным по вычислительным ресурсам (из-за ограничений по весу и энергопотреблению), а результат должен выводиться на малоформатный дисплей, что исключает возможность некрatного электронного масштабирования каналов без потери пространственного разрешения. Поэтому достаточно хорошо проработанные способы совмещения разнородных изображений различных каналов [5—7], действенные при неограниченных временных и вычислительных ресурсах, оказываются практически непригодными для компактных приборов с малым энергопотреблением.

Не касаясь здесь всех подробностей [8], укажем только, что в нашем случае проблема была решена за счет точного оптического масштабирования изображения ТпВК по отношению к изображению ЛЛК по вертикали в пропорции 1:2 с использованием проекционной системы между ЭОП и ПЗС-матрицей в качестве компенсатора технологических отклонений, а также дополнительным масштабированием изображения ТпВК по горизонтали во fusion-процессоре в пределах 1/20—1/30, не приводящим к потере разрешения. Тем самым было учтено и различие в отношении размеров элементов матриц по вертикали и горизонтали (1:1 — в микроболометрической матрице и 1,036:1 — в ПЗС-матрице).

На рис. 3 представлена функциональная схема управления и обработки данных. Fusion-процессор реализован на принципах HPRC и работает под управлением операционной системы реального времени вытесняющего типа для микроконтроллеров scmRTOS [9, 10]. Помимо решения задач обработки изображений он осуществляет управление каналами, синтез цифро-

алфавитной служебной информации и взаимодействие с Ethernet-каналом передачи данных на дополнительный внешний компьютер, а также обеспечивает интерфейс с двумя джойстиками и шестью кнопками управления. Энергопотребление процессора составляет 1 Вт.



Рис. 3

На рис. 4 показана модификация прибора с приводом, работающим по командам, поступающим от внешнего компьютера. Компьютер принимает изображение и служебную информацию по встроенному каналу Ethernet и может осуществлять управление по интерфейсу RS432. Программное обеспечение поддерживает ручное и автоматическое управление приводом, а также автоматическое обнаружение тепловых и бликующих целей по настраиваемым оператором критериям с выработкой звуковых и графических сигналов при обнаружении цели.



Рис. 4

Полевые испытания опытных образцов, проведенные в разных климатических зонах (Сибирь и Северо-Западный регион), при различной освещенности (день, сумерки, ночь) и в различных метеоусловиях (теплая и прохладная ясная безоблачная погода, морозящий дождь, туман, снег), подтвердили надежность и устойчивость совместного отображения различных

каналов, представленных разными цветами, без взаимного зашумления, но при некоторой потере числа воспринимаемых градаций яркости по сравнению с черно-белым изображением.

На рис. 5 приведен характерный пример получаемых изображений: *а* — изображение в ТпВК, *б* — изображение в ЛЛК (блик от обнаруженного объекта — в центре), *в* — совмещенное изображение. В поле зрения ТпВК достаточно хорошо просматриваются рельеф и детали ландшафта местности, но совершенно не заметно замаскированное оптико-электронное устройство наблюдения. В поле зрения ЛЛК, наоборот, отчетливо виден яркий блик от этого устройства. Тот же блик, хотя и с несколько меньшим контрастом, присутствует в совмещенном изображении. Еще раз подчеркнем, что на микродисплее изображения из обоих каналов и служебная информация представлены разными цветами, и лишь черно-белый формат иллюстраций не позволяет показать совмещенное изображение в цветовой палитре.



Рис. 5

В ходе испытаний образцы безотказно и оперативно обеспечивали все предусмотренные установки: наблюдательного канала (ТпВК, ЛЛК или обоих одновременно), цвета и яркости каждого канала, режима работы лазерного осветителя (непрерывного или импульсного), уровня мощности его излучения, режима стробирования (ручного или автоматического), положения передней границы строба дальности, шага строба дальности в пределах от 3 до 300 м (с дискретностью 3 м) и его глубины (15, 100 или 300 м).

В целом полевые испытания и опытная эксплуатация приборов продемонстрировали хорошее соответствие их основных технико-эксплуатационных характеристик проектным, а главное — способность эффективно решать задачи круглосуточного наблюдения и поиска людей, животных, транспорта, оптических и оптико-электронных средств наблюдения и при-

целивания. Все это оказалось возможным, в первую очередь, благодаря разработанным и использованным новым принципиальным и техническим решениям, таким как:

- способ сохранения высокой чувствительности микроболометрической матрицы без термоэлектрической стабилизации ее температуры,
- способ совмещения изображений разноспектральных каналов, комбинирующий оптический габаритный расчет с электронным масштабированием,
- модифицированный активно-импульсный режим с автоматическим сканированием дальности и регулируемым профилем распределения энергии лазера по глубине сканирования,
- широкоспектральный линзовый объектив-суперапохромат с относительным отверстием 1:2,
- специализированный параллельный процессор изображений с использованием принципов HPRC.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин Б. С., Бондаренко А. В., Волков В. Г., Драб Э. С., Цибулькин Л. М. Оптические приборы наблюдения, обработки и распознавания объектов в сложных условиях. М.: Гос. НИИ авиационных систем, 1999. 139 с.
2. Журавлев П. В. Разработка оптико-электронных приборов для дистанционного контроля объектов специального назначения и природной среды. Автореф. докт. дисс. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 35 с.
3. Голицын А. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Корякин А. В., Чихонадских А. П., Шлишевский В. Б., Яшина Т. В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения // Тез. докл. Совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 141.
4. Ковалев А. М. О способе отображения объектов в сферической перспективе // Автометрия. 2000. № 4. С. 76.
5. Hall D. L., Llinas J. Handbook of multisensor data fusion. CRC Press LLC, 2001. 537 p.
6. Павлов Н. И., Ясинский Г. И. Малогабаритный оптико-электронный сканирующий прибор для аэросъемки в видимом и инфракрасном диапазонах // Оптич. журнал. 2003. Т. 70, № 4. С. 11—14.
7. Иванов Е. Л., Смагин М. С. Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности // Датчики и системы. 2006. № 11. С. 6—12.
8. Войтов В. А., Голицын А. В., Дегтярев Е. В., Журавлев П. В., Журов Г. Е., Шлишевский В. Б. Способ формирования единого информационного поля в приборе наблюдения // Тез. докл. Совещ. „Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника—2008)“. Новосибирск, 2008. С. 140.
9. Журов Г. Е. Операционная система реального времени. [Электронный ресурс]: <http://scmrts.sourceforge.net/old/files/Doc/scmRTOS_v2.pdf>.
10. [Электронный ресурс]: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Операционная_система_реального_времени>.

Сведения об авторах

- Андрей Вячеславович Голицын** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, заведующий отделом моделирования оптико-электронных приборов, Новосибирск; E-mail: golitsyn@oesd.ru
- Петр Васильевич Журавлев** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск
- Гарри Евгеньевич Журов** — филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск; заведующий сектором отдела электронных систем и испытаний
- Александр Викторович Корякин** — д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; E-mail: koral_spb@email.ru
- Александр Павлович Чихонадских** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; E-mail: spchih@mail.ru

Виктор Брунович Шлишевский

— д-р техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра фотограмметрии и дистанционного зондирования, Новосибирск; E-mail: svb_dom@ngs.ru

Татьяна Владимировна Яшина

— филиал Института физики полупроводников СО РАН, Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники, Новосибирск; ведущий инженер-конструктор отдела конструирования оптико-электронных приборов

Поступила в редакцию
12.01.09 г.