

Обработка сигналов, информации и изображений

DOI 10.24412/2221-2574-2025-2-32-39

УДК 621.391

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С БОЛОМЕТРИЧЕСКИМ МАТРИЧНЫМ ПРИЁМНИКОМ

Костров Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», ведущий инженер-программист АО «НИИ «Субмикрон»².

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Ракитин Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехники Муромского института¹ (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», начальник отдела АО «НИИ «Субмикрон»².

E-mail: alexey.rakitin@mail.ru

¹Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

²Адрес: 124460, Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2.

Аннотация: В работе рассматривается оптико-электронная система (ОЭС) инфракрасного (ИК) диапазона, в которой реализован оценочно-компенсационный подход к обработке изображений для обеспечения постоянного уровня ложных тревог (ПУЛТ процессор) в устройстве автоматического обнаружения объектов. Первичное изображение формируется с помощью микроболометрического матричного приёмника излучения (МПИ). В основу работы ПУЛТ процессора положен параметрический алгоритм оценивания среднего значения, дисперсии и градиента фона в специальных окнах анализа, окружающих область вероятного появления объекта. Получены соотношения для расчёта адаптивного порога при обнаружении в присутствии гауссовского шума и коррелированного фона. Приводятся результаты экспериментов по обработке изображения с нестационарным фоном и точечной целью. При автоматическом обнаружении цели в ПУЛТ процессоре использовались два вида оценок: выборочного среднего и на основе экстремальных статистик. Для этих случаев обсуждаются основные особенности работы ПУЛТ процессора, его достоинства и недостатки.

Ключевые слова: оптико-электронная система (ОЭС), оценочно-компенсационная обработка, матричный фотоприёмник, болометр, компенсация фона, постоянный уровень ложных тревог.

Введение

Применение технологий технического зрения и оптико-электронных систем (ОЭС) инфракрасного (ИК) диапазона волн позволяет существенно повысить информативность систем наблюдения [1]. В современных ОЭС ИК диапазона чаще всего используются матричные приёмники излучения (МПИ), которые позволяют создавать системы наблюдения «смотрящего типа» без механического сканирования [1]. Сигналы МПИ представляются в виде

набора строк и образуют прямоугольный растр (кадр изображения), что делает получаемую информацию удобной для обработки и воспроизведения. В качестве основы МПИ — интегральной матрицы в последние десятилетия стали широко использоваться микроболометрические матрицы на основе оксида ванадия (VOx). Такие матрицы в отличие от фотоэлектрических матриц не требуют криогенного охлаждения, имеют малое время готовности после включения, низкую стоимость. К недо-

статкам микробометрических матриц относится более низкая (в 2...3 раза) температурная чувствительность, невысокая частота кадров, большой разброс параметров отдельных элементов матрицы и наличие относительно большого количества «битых» пикселей. Эти недостатки частично устраняются в специальном видеопроцессоре (ROIC — ReadOut Integrated Circuit), который автоматически определяет и корректирует сигналы «неправильных» и «битых» пикселей, поэтому при дальнейшей обработке кадра это данные при некоторых приближениях и ограничениях можно использовать как правильные. Более сложным является вопрос повышения чувствительности микроболометрических МПИ. Её повышение напрямую связано с увеличением времени накопления сигналов, что приводит к снижению и без того невысокой частоты кадров.

В любом случае будем ориентироваться на автоматическую обработку изображений с целью обнаружения точечного объекта, которая максимально снижает субъективный фактор, вносимый оператором. К числу основных проблем, возникающих при решении этой задачи, относится снижение влияния нестационарного фона [2]. Другим фактором, обостряющим проблему автоматического обнаружения объектов, является низкое отношение сигнал-шум, которое обусловлено сложной фоно-целевой обстановкой.

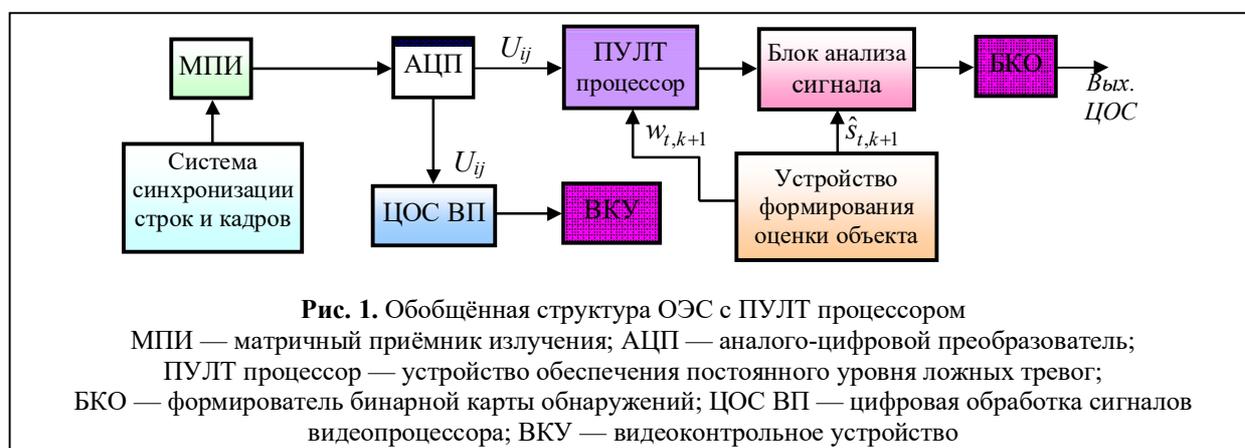
К настоящему времени сложилось несколько направлений построения сигнальной обработки для снижения влияния атмосферного

фона или подстилающей поверхности. Основными являются направления, связанные с улучшением изобразительных свойств изображений и обработкой видеопотоков, получаемых с помощью ОЭС [3]. Применение большинства из этих методов предполагает предварительную оценку и выбор инструментов оператором, что не всегда возможно из-за малого ресурса времени, отводимого на обработку. Более приспособлены под задачи автоматического обнаружения объектов методы пространственной фильтрации с корреляционной обработкой строк и столбцов [4], однако они удовлетворительно работают при разбиении изображений на небольшие фрагменты, не содержащие более одного объекта. В целом при решении задачи автоматического обнаружения целей должно быть обеспечено постоянство вероятности ложной тревоги, поэтому в общий контур сигнальной обработки вводится специализированный процессор с постоянным уровнем ложной тревоги (ПУЛТ процессор).

Целью данной работы является рассмотрение принципов и алгоритмов автоматического обнаружения объектов на изображении с постоянным уровнем ложных тревог при использовании микроболометрического матричного приёмника излучения.

1. Структура ОЭС с ПУЛТ процессором

Обобщённая структура ОЭС автоматического обнаружения объектов с устройством обеспечения постоянного уровня вероятности ложных тревог представлена на рис. 1. В МПИ



осуществляется пространственная дискретизация с последующим аналого-цифровым преобразованием (АЦП) и формированием кадра изображения. После оцифровки получаем сигнал $U_{ij}^{(k)}$, который используется при последующей обработке. Здесь i — индекс времени по строке, $i = 0, 1, 2, \dots, W-1$; j — номер строки, $j = 0, 1, 2, \dots, H-1$; $W \times H$ — размер изображения по ширине и высоте; k — номер кадра.

В основе работы схемы лежит квазиоптимальный оценочно-корреляционно-компенсационный алгоритм обнаружения сигналов на фоне коррелированной помехи [5]

$$Z_T = \iint_T (\hat{s}_t + (\hat{g}_{1t} - \hat{g}_{0t})) (f - \hat{g}_{0t}) dx dy,$$

где оценки \hat{s}_t , \hat{g}_{1t} вычисляются в предположении о наличии сигнала; \hat{g}_{0t} — оценка, вычисляемая в предположении об отсутствии сигнала; $f(x, y)$ — наблюдаемое изображение, полученное в результате пространственной дискретизации непрерывного поля; T — область интегрирования на изображении; t — текущие координаты (x, y) . Данный алгоритм адаптирован к дискретному времени [6].

При этом предполагается, что в системах автоматического обнаружения оценка фона производится на участках, свободных от сигнала, поэтому $\hat{g}_{1t} \cong \hat{g}_{0t}$. Основной операцией вычисления Z_T в общем случае является корреляционная обработка сигналов, которая при наблюдении точечного объекта вырождается в попиксельный анализ изображения, и компенсация фона, реализуемая путём вычитания оценки \hat{g}_{0t} из наблюдаемого изображения $f(x, y)$. На малых расстояниях до объекта наблюдения точечная модель цели становится несправедливой, поэтому в качестве опорного сигнала s_t (эталона объекта) в блоке анализа сигнала используется экстраполированная оценка объекта $\hat{s}_{t, k+1}$. Одновременно корректируются размеры окон анализа в ПУЛТ процессоре $\{w_{t, k+1}\}$.

В типовой схеме включения МПИ после

оцифровки видеосигнал поступает на блок ЦОС ВП, где осуществляется повышение контраста, определение границ, сглаживание шума, коррекция яркости и др., т.е. производится обработка для улучшения визуальных свойств изображений. За результатом обработки оператор может наблюдать по ВКУ.

В основном тракте ЦОС проводится оценивание статистических характеристик изображения и локального градиента, с использованием которых в ПУЛТ процессоре формируется адаптивный порог. По результатам анализа сигнала в выделенном окне и принимается решение об обнаружении (или отсутствии) объектов. Признаки обнаружения сводятся в бинарную карту обнаружений (БКО), т.е., по существу, производится переход к бинаризованному изображению кадра, содержащим информацию только по обнаруженным объектам. На основании полученной БКО оцениваются координаты и размеры объекта (вторичная обработка информации), которые передаются дальше к исполнительным устройствам.

Перед устройствами обработки изображений в ОЭС стоят сложные задачи приёма случайных сигналов в условиях априорной неопределённости и наличия атмосферного фона. В данной работе ключевым звеном в технологии обработки сигналов является ПУЛТ процессор с адаптивным порогом, поэтому его работа требует отдельного рассмотрения.

2. ПУЛТ процессор

Стабилизация вероятности ложной тревоги P_{fa} в ПУЛТ процессоре достигается адаптивным формированием порога на основании анализа пикселей, окружающих анализируемый элемент изображения [7]. Как правило, в МПИ используется прямоугольная строчно-кадровая система координат, поэтому чаще всего области анализа фона, шума и сигнала представляют окна квадратной формы с размерами $w_b \times w_b$ и $w_s \times w_s$, разделённые защитной зоной с максимальным размером $w_g \times w_g$. Типичный вид оконных функций представлен на рис. 2. С помощью окна анализа фона формируется оценка

\hat{g}_{0i} , которая компенсируется в принятом изображении $f(x, y)$, т.е. реализуется квазиоптимальная оценочно-компенсационная обработка.

Обобщённая структурная схема ПУЛТ процессора представлена на рис. 3, на котором приняты обозначения: ПУ — пороговое устройство; K_v — поправочный коэффициент, зависящий от алгоритма адаптации порога; $d_{1(ji)}$ — решение об обнаружении пикселя с целью. Возможно применение различного набора параметров, которые используются при вычислении порога и его адаптации. В рамках данной работы для установки порога используются среднее значение, второй момент (дисперсия) и оценка градиента в окне анализа фона и шума.

Оценивание среднего значения и второго момента (дисперсии) производилось двумя способами: методом выборочного среднего (ВС-ПУЛТ процессор) и методами экстремальных статистик (ЭС-ПУЛТ процессор).

В окне анализа фона и шума с центральной точкой $\{j_0i_0\}$ математическое ожидание и второй момент определяются соотношениями

$$\hat{m}_1 = N_f^{-1} \sum_{ij} U_{ij} \text{ и } \hat{m}_2 = N_f^{-1} \sum_{ij} U_{ij}^2 \text{ для}$$

ВС-ПУЛТ процессора,

$$\hat{m}_1 = (U_{\min} + U_{\max}) / 2 \text{ и}$$

$$\hat{m}_2 = \frac{2U_{\max}^2}{3} + \frac{2U_{\min}^2}{3} + \frac{2U_{\max}U_{\min}}{3} \text{ для ЭС-ПУЛТ}$$

процессора,

где U_{ij} — значение поступающего пикселя; N_f — число пикселей при усреднении; U_{\min} , U_{\max} — экстремальные статистики в окне анализа фона и шума.

В качестве параметров градиента используются и оцениваются два коэффициента, характеризующие градиент по горизонтали кадра k_{grHji} и по вертикали k_{grVji} области, окружающей точку $\{j_0i_0\}$.

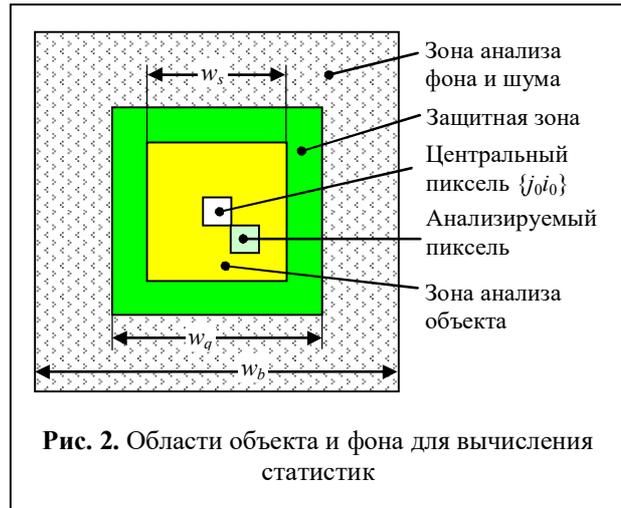


Рис. 2. Области объекта и фона для вычисления статистик

С учётом этих оценок вычисляется средняя мощность, которую вносит градиент во второй момент,

$$P_{gr} = (k_{grH}^2 + k_{grV}^2) \cdot k_{norm},$$

где k_{norm} — нормировочный коэффициент, зависящий от объёма выборки в окне анализа шума и фона. Эта мощность корректирует оценку второго момента и позволяет вычислить оценку дисперсии шума

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{m}_2 - P_{gr} - \hat{m}_1^2.$$

Данные соотношения дают возможность сформировать порог для каждой центральной точки окна $\{j_0i_0\}$. В случае модели гауссовского шума и релейевских флуктуаций фона порог Неймана-Пирсона T_{NP} рассчитывается для заданной вероятности ложной тревоги P_{fa} по соотношению $T_{NP} = \hat{m}_1 + k_{kor} h_{norm} \hat{\sigma}_n$, где k_{kor} — корректирующий коэффициент, учитывающий объём выборки в окне анализа фона и шума;

h_{norm} — нормированный порог; $\hat{\sigma}_n = \sqrt{\hat{\sigma}^2}$.

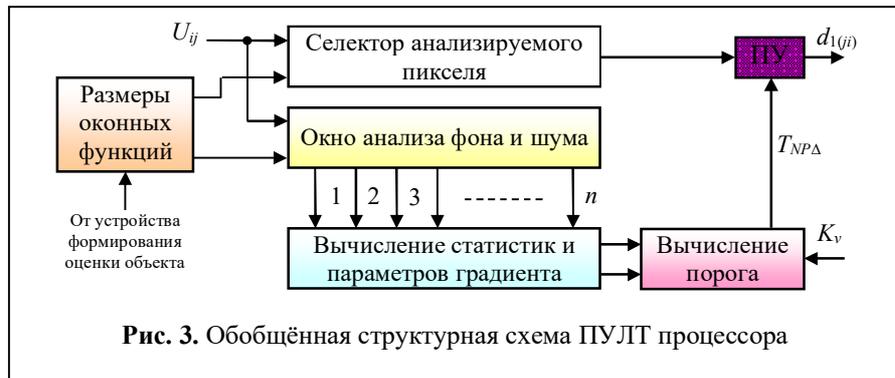


Рис. 3. Обобщённая структурная схема ПУЛТ процессора

Таблица 1. Значения коэффициента h_{norm}

P_{fa}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
h_{norm1}	2,48	3,12	3,66	4,12	4,54	4,92	5,28
h_{norm2}	2,31	3,05	3,68	4,23	4,73	5,19	5,62

Поскольку взаимосвязь между P_{fa} и h_{norm} не является линейной, то применяются приближенные решения. Одно из простых соотношений для расчёта порога, которое даёт высокую точность аппроксимации в области $P_{fa} = 10^{-3} \dots 10^{-4}$, имеет вид $h_{norm} = \sqrt{-1,57 \cdot \ln[1 - (1 - P_{fa})^2]}$. Если требуется обеспечить более широкий диапазон установки P_{fa} , то может быть использовано соотношение $h_{norm2} = -1,18 + \sqrt{0,847 - 5,662 \cdot \lg(P_{fa})}$, которое даёт совпадение с теоретической зависимостью с точностью до 2%.

Соответствующие значения коэффициента h_{norm} для различных значений P_{fa} приведены в таблице 1.

Корректирующий коэффициент $k_{kor} \rightarrow 1$ при $N_f \rightarrow \infty$, поэтому при предварительном моделировании он может быть положен равным 1. Значение порога корректируется также при анализе пикселей вокруг точки $\{j_0 i_0\}$, которые попадают в диапазон $(w_s \times w_s)$ зоны обнаружения целей в основном окне. На эти точки производится линейная экстраполяция среднего значения с учётом градиента

$$\hat{m}_{1gr} = \hat{m}_1 + k_{grV} \cdot \Delta_j + k_{grH} \cdot \Delta_i, \text{ где}$$

$$\Delta_j, \Delta_i \in [w_s \times w_s].$$

Соответствующим образом корректируется порог в зоне анализа объекта

$$T_{NP\Delta} = \hat{m}_{1gr} + k_{kor} h_{norm} \hat{\sigma}_n.$$

Принятие решения $d_{1(ji)}$ об обнаружении объекта в точке $\{j, i\}$ с помощью окна с центром $\{j_0 i_0\}$ производится путём сравнения текущего уровня яркости с адаптивным порогом $T_{NP\Delta}$, который вычисляется по оценкам дисперсии и среднего значения с учётом градиента вокруг анализируемой области

$$d_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{ji} \geq T_{NP\Delta}, \\ 0, & \text{если } U_{ji} \leq T_{NP\Delta}. \end{cases}$$

Результаты принятия решений записываются в бинарную карту обнаружений БКО, при этом также фиксируется частота принятых решений, которая учитывается в процессоре вторичной обработки.

3. Экспериментальные результаты

В качестве МПИ был использован микроболометрический (VOx) ИК-модуль InfiRay® LT384 с объективом Астрон F30/1.0. Основные технические характеристики модуля: разрешение 384×288 пикселей, спектральный диапазон 8–14 мкм, частота кадров 50 Гц. Для подключения ВКУ предусматривается аналоговый выход в формате PAL и элементы обработки изображения (коррекция неравномерности, шумоподавление, улучшение детализации, регулировка яркости и контраста). Была разработана и изготовлена переходная плата, с помощью которой были получены 2 цифровых выхода: 8-битный цифровой поток канала с автоматическим нелинейным АРУ и 14-битный RAW-поток. Внешний вид МПИ в сборе представлен на рис. 4. Пример ИК изображения сложной сцены, содержащей металлоконструкции и другие техногенные элементы,



Рис. 4. Матрица в сборе с объективом



Рис. 5. Пример ИК изображения

приведён на рис. 5.

В качестве модели цели использовалось микро-АЧТ EMIRS200_AT01T_BR090 с оптической выходной мощностью около 2 мВт в диапазоне волн 10...13 мкм. Излучающее окно микро-АЧТ составляет 2,1×1,8 мм, что при расстоянии наблюдения 8 м для выбранного МПИ соответствует критерию точечной цели. Для экспериментальных исследований ПУЛТ процессора использовалось окно с параметрами $w_s = 7$, $w_d = 11$, $w_b = 21$, при этом общее количество точек в окне анализа фона и шума составило $N_f = 320$ пикселей.

Примеры автоматической обработки отдельных изображений представлены на рис. 6, рис. 7, где результаты обнаружения из БКО наложены на исходное изображение.

Во всех тестовых кадрах оба обнаружителя находили цель и производили оценивание

её координат в плоскости матрицы болометров (координаты измеряются в пикселях относительно центра матрицы). Вместе с тем алгоритм ВС-ПУЛТ процессора имеет на 19% более высокую вероятность ложной тревоги, чем алгоритм ЭС-ПУЛТ процессора при 14-битном изображении. Если обрабатывается 8-битное изображение, то вероятность ложной тревоги возрастает на порядок. Следует отметить, что фон в этом случае является сложным и имеет много перепадов яркости и разнородных участков, со многими из которых при обнаружении помогает справиться процедура измерения и учёта градиента на локальных участках исходного изображения.

Заключение

Проведённый анализ различных подходов к обработке изображений, получаемых с помощью ОЭС и содержащих объекты в виде точечных целей, выявил ряд особенностей автоматизации процедур обнаружения.

1) Технология построения ПУЛТ процессора позволяет реализовать с относительно малыми потерями квазиоптимальную оценочно-корреляционно-компенсационную обработку и автоматизировать процедуру обнаружения сигналов на изображениях.

2) Статистический анализ изображений, полученных с помощью микро болометрического МПИ показал, что в качестве модели широкополосных шумов может быть исполь-

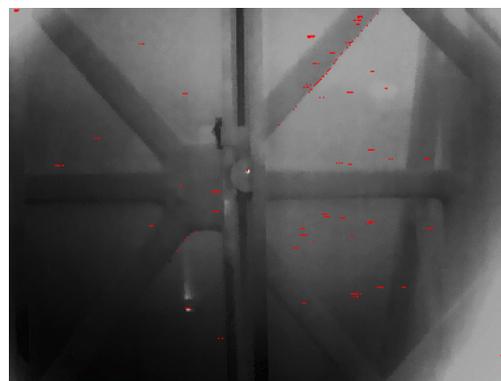
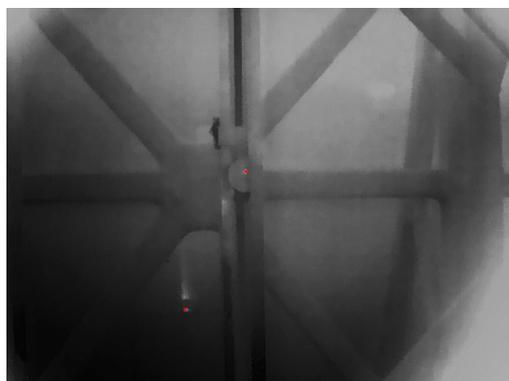


Рис. 6. Пример обработки 8 битного изображения: алгоритмы ЭС (слева) и ВС (справа) ПУЛТ процессоры

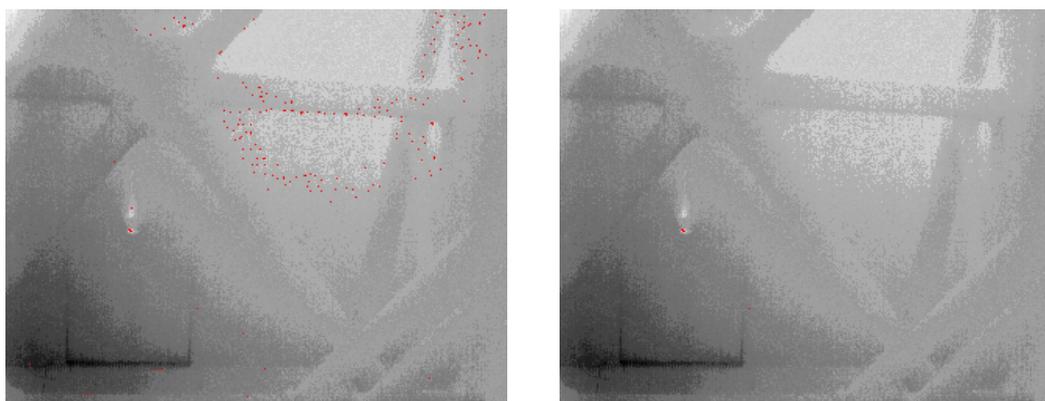


Рис. 7. Изображения 14 бит после обработки ЭС-ПУЛТ процессором: слева — без учёта градиента; справа — с учётом градиента

зована модель некоррелированного гауссовского шума. Это существенно отличает шум болометрических МПИ от шума МПИ на основе фотоэффекта, в которых для описания статистических свойств применяется закон Пуассона.

3) Применение оценки градиента фона позволяет в ПУЛТ процессоре более точно установить порог обнаружения, с одной стороны, за счёт учёта изменения мощности фона в пределах окна анализа фона и шума, с другой стороны, снижения ошибок в оценке среднего значения фона в пределах окна анализа сигнала. Это снижает пороговое отношение сигнал-шум и улучшает качество обнаружения объектов с малой яркостью в условиях воздействия нестационарного шума.

4) На испытуемых изображениях алгоритмы с экстремальными статистиками (ЭС-ПУЛТ процессор) и на основе выборочного среднего (ВС-ПУЛТ процессор) успешно обнаруживали сигнал от излучающего ИК микроАЧТ. Однако обнаружитель с ВС-ПУЛТ процессором показал несколько более высокую вероятность ложных тревог, чем обнаружитель с ЭС-ПУЛТ процессором.

5) Для повышения качества обработки на малых дальностях необходимо учитывать масштаб объекта на изображении, его ориентацию, а также геометрические параметры съёмки. С этой целью по результатам обработки последовательности кадров в «Устройстве формирова-

ния оценки объекта» (рис. 1) вырабатывается прогноз на следующий кадр и регулируются размеры оконных функций $\{w_{k+1}\}$ и эталона объекта $\hat{s}_{t,k+1}$. Эта стадия нормализации изображений также потребует дополнительных вычислительных затрат, причём результаты оптимизации времени вычислений будут зависеть от применяемого алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения.

Литература

1. Катуплев А.Н., Храмычев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. М.: Радиотехника, 2018. 408 с.
2. Костров В.В., Ракитин А.В. Компенсация нестационарного фона при автоматическом поиске объектов // VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и Электроника» (СТНО-2023) (1–3 марта 2023 г., Рязань). Том 1. Рязань: РГРТУ, 2023. С. 72–78.
3. Мареев А.В., Орлов А.А., Рыжкова М.Н. Методы локализации объектов в видеопотоке // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. Вып. 3. С. 48–60.
4. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. М.: Радиотехника, 2015. 456 с.
5. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника, 2014. 632 с.
6. Костров В.В., Паршин Ю.Н. Пространственно-временные марковские модели в оценочно-

корреляционно-компенсационной обработке сигналов в дискретном времени // Радиотехника и электроника. 2024. Т.69. № 8. С. 741–753.

7. *Костров В.В., Ракитин А.В.* Автоматическое обнаружение объектов на изображении при

наличии нестационарного фона // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сб. трудов VII междунар. научн.-техн. форума: в 10 т. Т.5. Рязань: РГРТУ, 2024. С. 116–124.

Поступила 10 февраля 2025 г.

English

AUTOMATIC OBJECT DETECTION IN OPTOELECTRONIC SYSTEMS WITH A BOLOMETRIC MATRIX RECEIVER

Viktor Vasilyevich Kostrov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute¹ (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”; Lead Software Engineer, JSC “Research Institute “Submicron”².

E-mail: kostrov.46@mail.ru

Alexey Valerievich Rakitin — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute¹ (branch) of the “Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs”; the Head of Department, JSC “Research Institute “Submicron”².

E-mail: alexey.rakitin@mail.ru

¹Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23.

²Address: 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5, b. 2.

Abstract: The paper considers an optical-electronic system (OES) of the infrared (IR) range, which implements an estimation-compensation approach to image processing to ensure a constant false alarms rate (CFAR processor) in an automatic object detection device. The primary image is formed using a micro bolometric matrix radiation receiver (MRR). The operation of the CFAR processor is based on a parametric algorithm for estimating the average value, variance and background gradient in special analysis windows surrounding the area of the probable appearance of the object. The relations for calculating the adaptive threshold for detection in the presence of Gaussian noise and correlated background are obtained. The results of experiments on image processing with an unsteady background and a point target are presented. When automatically detecting a target in the CFAR processor, two types of estimates were used: a sample average and based on extreme statistics. For these cases, the main features of the CFAR processor, its advantages and disadvantages are discussed.

Keywords: optical-electronic system (OES), estimation-compensation processing, matrix detector, bolometer, background compensation, constant false alarm rate (CFAR).

References

1. *Katulev A.N., Khramichev A.A., Yagolnikov S.V.* Digital processing of 2D low-contrast images generated by an optoelectronic device in difficult background conditions. Detection, recognition, tracking of dynamic objects. Moscow: Radiotekhnika, 2018. 408 p.
2. *Kostrov V.V., Rakitin A.V.* Compensation of the non-stationary background during automatic object search. VI International Scientific and Technical Forum “Modern technologies in science and education. Radio Engineering and Electronics” (STNO-2023) (March 1-3, 2023, Ryazan). Volume 1. Ryazan: RSRTU, 2023. Pp. 72–78.
3. *Mareev A.V., Orlov A.A., Ryzhkova M.N.* Methods of localization of objects in a video stream. Radio engineering and telecommunication systems. 2021. Iss. 3. Pp. 48–60.
4. Detection and coordination of optoelectronic devices, evaluation of their signal parameters. Edited by *Yu.L. Koziratsky*. Moscow: Radiotekhnika, 2015. 456 p.
5. *Sosulin Yu.G., Kostrov V.V., Parshin Yu.N.* Estimation-correlation signals processing and interferences compensation. Moscow: Radiotekhnika, 2014. 632 p.
6. *Kostrov V.V., Parshin Yu.N.* Spatial-temporal Markov models in estimation-correlation-compensation signal processing in discrete time. Radio Engineering and Electronics. 2024. Vol. 69. No. 8. Pp. 741–753.
7. *Kostrov V.V., Rakitin A.V.* Automatic detection of objects in the image in the presence of an unsteady background. Modern Technologies in Science and Education – STNO-2024: proceedings of the VII International Scientific and Technical Forum: in 10 vols. Vol.5. Ryazan: RSRTU, 2024. Pp. 116–124.