

Особенности цифровой обработки сигналов в оптико-электронных системах с болометрической матрицей

В.В. Костров^{1,2}, А.В. Ракитин^{1,2}

¹ Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23

² АО «НИИ «Субмикрон» 124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2
E-mail: kostrov.46@mail.ru; alexey.rakitin@mail.ru

Рассмотрена задача цифровой обработки сигналов в пассивной оптико-электронной системе дальнего инфракрасного диапазона с болометрическим матричным приемником излучения. Процессор цифровой обработки предназначен для обнаружения точечных целей и оценивания их координат в автоматической системе наблюдения. Предложена структура многоканального корреляционного приемника, позволяющего снизить потери сигнала. Для стабилизации вероятности ложных тревог в обнаружителе использован специализированный процессор. Устройство измерения координат точечной цели построено на использовании метода центра тяжести. Предложен адаптивный вариант устройства оценивания координат объекта в плоскости матрицы. Для реализации базовых алгоритмов обнаружения применены алгоритмы быстрой свертки на основе быстрого преобразования Фурье. Ключевые слова: оптико-электронная система, болометрический матричный приемник, цифровая обработка сигналов, постоянный уровень ложных тревог, быстрое преобразование Фурье.

Features of digital signal processing in optoelectronic systems with a bolometric matrix

V.V. Kostrov^{1,2}, A.V. Rakitin^{1,2}

¹ Murom Institute of the Vladimir State University

² JSC Research Institute "Submicron"

The problem of digital signal processing in a passive optical-electronic system of the far infrared range with a bolometric matrix radiation receiver is considered. The digital processing processor is designed to detect point targets and estimate their coordinates in an automatic surveillance system. The structure of a multichannel correlation receiver is proposed to reduce signal loss. A specialized processor is used in the detector to stabilize the probability of false alarms. The device for measuring the coordinates of a point target is based on the use of the center of gravity method. An adaptive version of the device for estimating the coordinates of an object in the plane of the matrix is proposed. Fast convolution algorithms based on the fast Fourier transform are used to implement basic detection algorithms.

Keywords: optoelectronic system, bolometric matrix receiver, digital signal processing, constant false alarm rate, fast Fourier transform.

Введение

Задача обнаружения объектов и определения их угловых координат является фундаментальной проблемой пассивных оптико-электронных систем (ОЭС) [1,2]. Ее решение критически важно для различных приложений, например, при наблюдении малогабаритных беспилотных воздушных средств на атмосферном фоне [2]. В настоящее время достижение потенциальных характеристик по рубежам обнаружения и

оцениванию угловых координат в основном достигается оптимизацией оптических устройств [3,4]. В то же время известно, что применение оптимальных алгоритмов, как промежуточной стадии обработки сигналов и изображений, позволяет реализовать в соответствии с тем или иным критерием скрытые возможности, заложенные в наблюдаемых процессах [5]. Теория оптимального приема в большей степени разработана применительно к радиотехническим системам. В оптическом диапазоне основное внимание уделяется повышению визуального качества получаемых изображений, что является необходимым для эффективной работы оператора [6,7].

В современных пассивных ОЭС «смотрящего типа», которые работают в дальнем ИК диапазоне, часто используются неохлаждаемые матричные приемники излучения (МПИ) на основе микроболометров [8]. Болометрические МПИ имеют ряд особенностей, существенно влияющих на структуру обработки сигналов. К ним в первую очередь относятся дифракционные эффекты и технологические зазоры между чувствительными элементами, которые приводят к деградации качества обнаружения и снижению точности измерения угловых координат. Учет этих особенностей в алгоритмах обработки частично позволяет достичь потенциальные характеристики или приблизиться к ним [9,10]. Однако, естественно, что все процедуры обработки сигнала усложняются [11,12].

Целью данной работы является рассмотрение особенностей болометрических приемников излучения и их влияние на алгоритмы обнаружения и пеленгации точечных объектов.

Статистические свойства сигналов

Анализ изображений и сигналов на выходе болометрических МПИ как случайных процессов основан на выборочном методе, при котором предполагается, что основные статистические характеристики процессов в пределах анализируемого участка постоянны. Основу для расчетов составляет выборка по строкам или по столбцам. К основным характеристикам, которые используются при синтезе алгоритмов обработки изображения, относятся среднее значение, дисперсия, плотность распределения и корреляционная функция. Точность оценок, полученных на основе выборочного метода, существенно зависит от объема выборки, поэтому при экспериментах максимально использовались выборки вдоль строки или вдоль столбцов. Дальнейшее увеличение выборки и усреднение по нескольким строкам и столбцам дает повышение точности измерения статистических характеристик, но в то же самое время повышает влияние неоднородности и нестационарности используемого изображения.

В экспериментах использовался тепловизионный модуль АСТРОН-384В17, который разработан для детектора АСТРОН-38417 с размером чувствительного элемента 17 мкм. Для статистического анализа отобранный образ, содержащий примерно 110 592 (384×288) точек. На первом этапе обработки производилось вычисление глобальных статистических характеристик (по кадру).

Данные по измерениям глобальных характеристик для 6 отобранных кадров приведены в таблице 1. Здесь координаты максимального пикселя определяются парой (i, j) – номер пикселя в строке по горизонтали, номер строки по вертикали; M – среднее значение; S – среднеквадратическое отклонение; U_{\min} , U_{\max} – минимальное и максимальное значение пикселя.

Из таблицы видно, что диапазон, который занимают значащие значения сигнала, меньше, чем это позволяет сделать АЦП. При использовании 8 бит сигнал занимает 64% от полной шкалы (FS); для 16 разрядного квантования – 1,5%. Это говорит о том, что есть резерв для повышения динамического диапазона.

Таблица 1 – Основные статистические характеристики изображений

8 бит	M	S	Umin	Umax	Coord. (i,j)
output_image_4	128,4	24,5	73	235	195,143
output_image_10	129,04	24,69	73	235	195,143
output_image_11	129,98	24,68	72	235	195,143
16 бит					
output_image_23	19112	112,8	18540	19480	177,166
output_image_24	19116	107,2	18692	19484	380,286
output_image_27	19092	97,3	18688	19528	380,38

На рис. 1 и 2 представлены сечения изображения, сделанные по столбцам и строкам изображения с координатами (144, 192). На этих зависимостях хорошо видна шумовая дорожка, обусловленная тепловым шумом болометров и элементов платы формирования сигналов и управления. Сечение изображения по столбцу (рис. 1) показывает, что имеется много перепадов яркости, которые увеличивают дисперсию сигнала всего изображения и создают трудности в работе системы обработки сигналов.

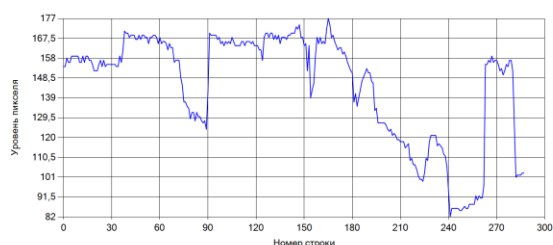


Рис. 1. Распределение уровней пикселей вдоль столбца 192

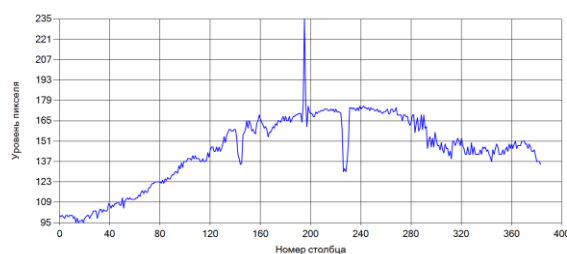
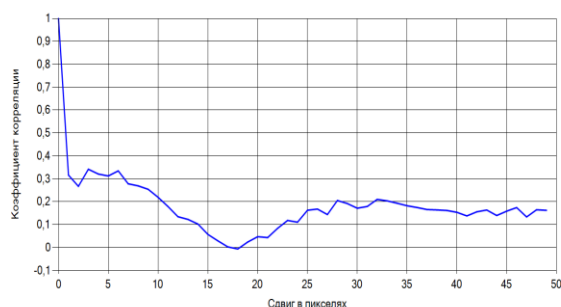


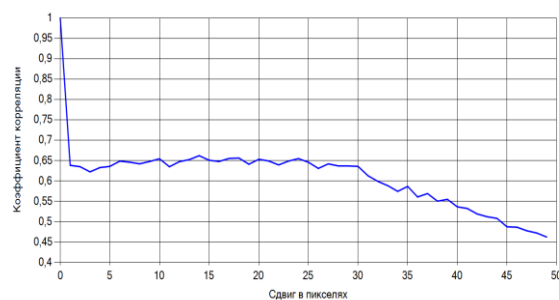
Рис. 2. Распределение уровня пикселей вдоль 144 строки

На рис. 2 изменения сигнала более плавные (за исключением отдельных выбросов), поэтому время корреляции вдоль строк больше, чем для столбцов.

Для более детального анализа шумового компонента изображения из кадра выделялись участки размером (50×100) пикселей, для которых проводились вычисления коэффициента корреляции. Фрагменты кадров подбирались таким образом, чтобы визуально они воспринимались как однородные участки. Типичные примеры поведения коэффициента корреляции представлены на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Коэффициент корреляции шумовой составляющей и фона

Графики показывают, что фрагменты кадра содержат довольно значительную часть коррелированной составляющей, причем доля этой составляющей разная, радиус корреляции тоже отличается. Для одного фрагмента (рис. 3а) радиус корреляции можно оценить величиной 15 пикселей, а для другого (рис. 3б) – более 70. Отсюда видно, что визуальный выбор не всегда дает точные результаты. Если рассмотреть отдельно один

из анализируемых фрагментов изображения (рис. 4), то более детально проявятся нестационарности. В левой части фрагмента преобладает светло-серый цвет, в центральной части – яркие и темные точки, снизу и справа – черные участки изображений. Такая неоднородность снижает точность определения статистических характеристик шума.

Особенно отчетливо это проявляется на гистограммах шума, поэтому для повышения точности оценивания гистограмм и снижения влияния нестационарности область усреднения была уменьшена до размеров интервала корреляции фоновой помехи. Такой эксперимент проведен с несколькими фрагментами изображений, типичный результат приведен на рис. 5 (использовано окно 70×70 пикс).

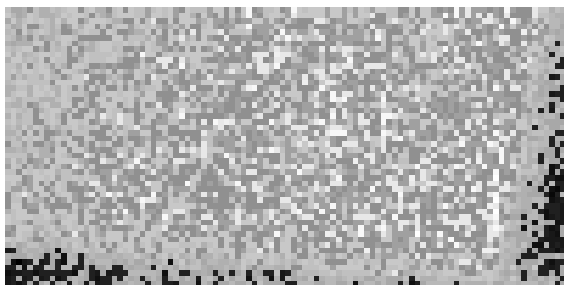


Рис. 4. Фрагмент изображения

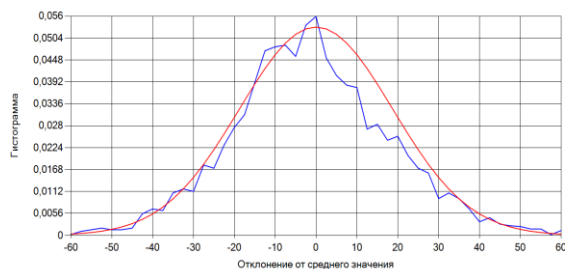


Рис. 5. Гистограмма распределения шума

Как видно, хвосты распределения удовлетворительно аппроксимируются гауссовской плотностью распределения (красная кривая). Гистограмма имеет небольшое смещение относительно локального среднего значения и сужение по отношению к гауссовскому распределению (коэффициенты асимметрии и эксцесса больше нуля). Смещение составляет величину менее 0,5%, а экспериментально измеренная дисперсия меньше теоретической в 1,5...2 раза.

Корреляционная обработка при обработке сигналов точечного объекта

Дифракционные эффекты приводят к рассеиванию мощности оптического сигнала точечной цели, а смещение положения центра диска Эйри на поверхности матрицы – к дополнительным потерям, которые из-за наличия технологических промежутков могут быть значительными (до 15 дБ). Оптимизация процедуры обработки в простейшем случае приводит к 4-х канальному корреляционному устройству обнаружения и оценивания угловых координат [12]. Структурные схемы обнаружителя и измерителя координат представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

При моделировании в качестве опорных сигналов (ОС) корреляторов использовались копии сигналов, в общем случае содержащие 5×5 пикселей. Для упрощения аппаратуры обработки также предложено использовать более простые ОС единичной амплитуды: матрицы 1×1 (случай 1); 1×2 (случай 2); 2×1 (случай 3); 2×2 (случай 4). По качеству работы обнаружителя с такими ОС практически не отличаются от оптимальных – различие в пороговых сигналах 0,1...0,15 дБ находится в пределах погрешностей моделирования.

После обработки сигналов корреляционными приемниками ($КП_i$) в схеме выбора максимума (СВМ) определяется максимальный уровень среди всех результатов корреляционной обработки, по которому в пороговом устройстве (ПУ) принимается решение об обнаружении цели ($d_1=1$) или ее отсутствии ($d_1=0$). На основании принятого решения с учетом номера канала ($N_{kp}=1...4$), в котором произошло обнаружение, составляется карта обнаружений.

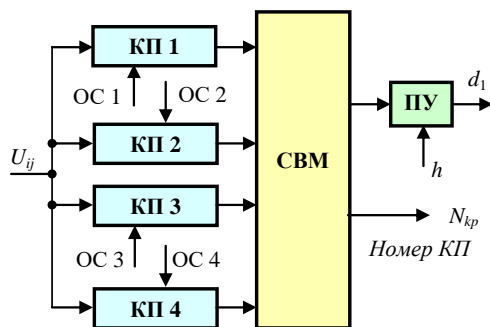


Рис. 6. Структура обнаружителя

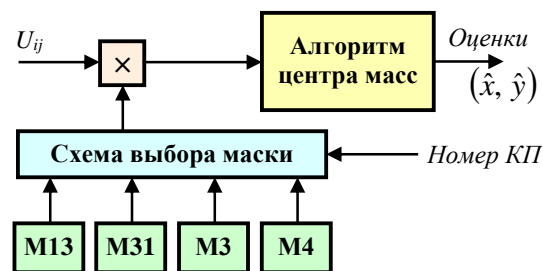


Рис. 7. Структура измерителя координат

Для измерения угловых координат на первом этапе обработки используется метод максимального правдоподобия с учетом номера КП. Область неопределенности и ошибки измерений при таком подходе снижаются в 2 раза. Более точный, субпиксельный метод измерения углов реализуется с помощью дискриминатора, основанного на алгоритме взвешенного определения центра тяжести отметки от цели. Особенностью блока измерения координат является применение различных масок в зависимости от положения диска Эйри на матрице. Анализ различных конфигураций масок показал, что для оценивания координат точечных целей на больших дальностях наилучшие результаты дают маски в виде матриц размерностью 3×3 (М3) и 4×4 (М4), в которых угловые пиксели равны нулю, а также 1×3 (М13) и 3×1 (М31). Маски переключаются номером корреляционного приемника, в котором произошло обнаружение.

Для повышения устойчивости работы обнаружителя используется процессор с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ процессор, рис. 8) [11]. Одной из особенностей применения ПУЛТ процессора в условиях воздействия коррелированных помех является вычисление градиента. В качестве параметров градиента используются и оцениваются два коэффициента, характеризующие градиент по горизонтали кадра и по вертикали области, окружающей анализируемый пиксель. С учетом этих оценок вычисляется средняя мощность, которую вносит градиент во второй момент.



Рис. 8. Обобщенная структурная схема ПУЛТ процессора

Особенности структура программы обработки сигналов на основе БПФ

При использовании процедуры быстрой свертки (корреляции) действительных сигналов на основе комплексного БПФ для сокращения вычислений можно использовать метод замещения, когда в реальная часть используется для одного сигнала, мнимая – для другого. В этом случае расчет идет сразу для двух реальных сигналов. В результате работы свертки с комплексным БПФ получается комплексная последовательность, на основе которой производится переход к отдельным последовательностям свертки исходных сигналов. Этот прием широко использовался при разработке программного обеспечения для вычисления математического ожидания и второго момента.

Структурная схема обработки изображений представлена на рис. 9.

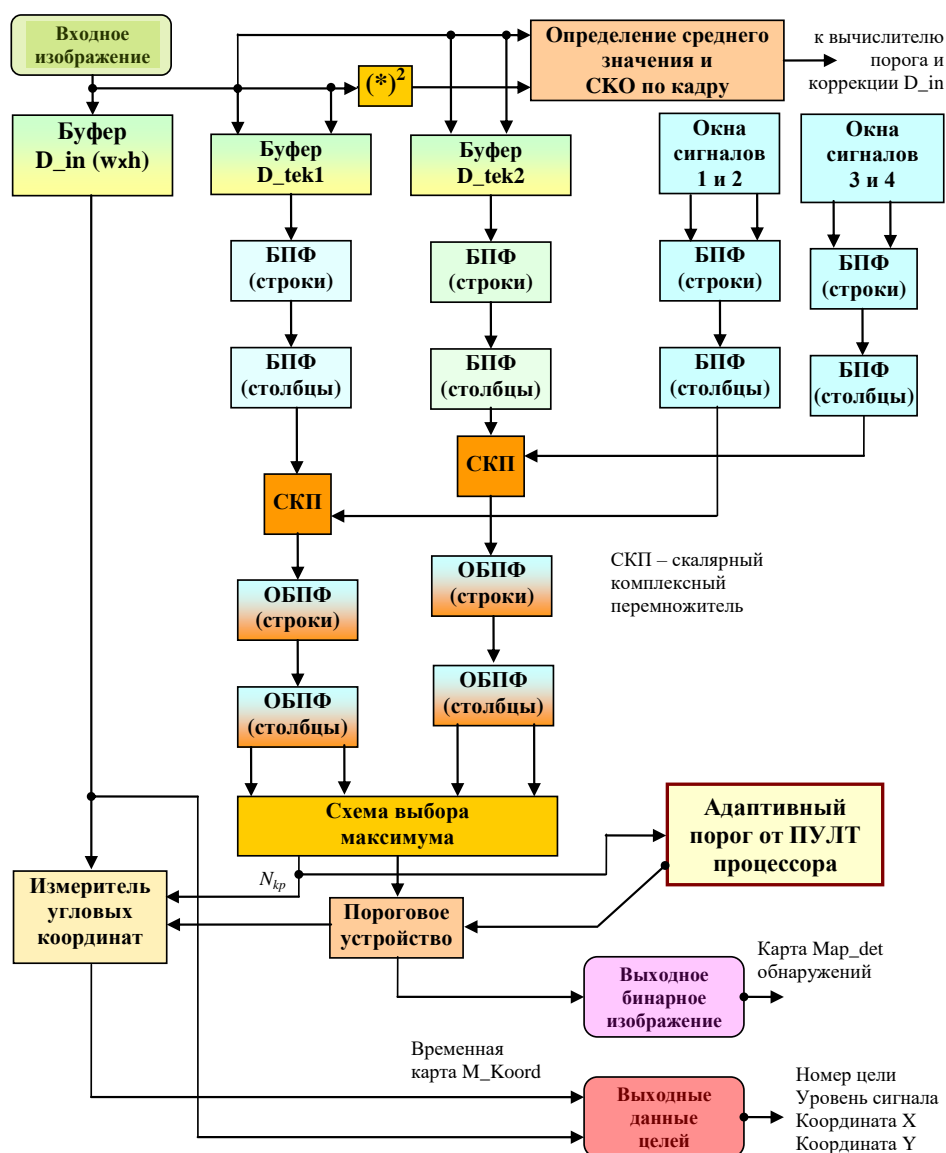


Рис. 9. Функциональная схема двумерной обработки кадра изображения ОЭС

Канал опорных колебаний составляют блоки формирования оконных функций сигналов 1...4 и вычислительных блоков, формирующих двумерные спектры. Данные преобразования выполняются однократно при выбранном формате оконных функций анализа изображения. Получаемые в результате их работы двумерные спектры хранятся в памяти и извлекаются из памяти каждый раз при поступлении и обработке нового кадра изображения. Скалярный комплексный перемножитель (СКП) реализует операцию почленного умножения элементов матриц спектра. Основная часть блока обработки реализует выполнение свертки входного изображения с четырьмя сигналами. Определение среднего значения и дисперсии изображения всего кадра осуществляется выборочным методом по типовым соотношениям.

Обнаружение объектов производится в сигнальном окне путем сравнения амплитуды пикселя с адаптивным порогом, который поступает от ПУЛТ процессора, в соответствии со следующей логикой:

- если значение пикселя превышает порог, то в массив Map_Det (карта обнаружений) записывается 1 (цель с положительным контрастом);
- если значение пикселя меньше отрицательного порога, то в массив Map_Det записывается минус 1 (цель с отрицательным контрастом).

После блока обнаружения объектов формируется бинарная карта обнаружений (карта Map_det), в которую также заносятся номера каналов, где происходит обнаружение. После обнаружения объектов по всему изображению осуществляется измерение их координат. Для работы формируется копия карты обнаружений M_Koord. Измерение координат осуществляется по центру масс в сигнальном окне размером с учетом N_{kr} . Итогом работы являются данные о цели: 1) номер цели; 2) максимальный уровень сигнала пикселя; 3) координата X в плоскости матрицы – номер пикселя вдоль строки; 4) координата Y – номер строки.

На рис. 10 представлена структурная схема вычислений в ПУЛТ процессоре, который предназначен для формирования адаптивного порога.

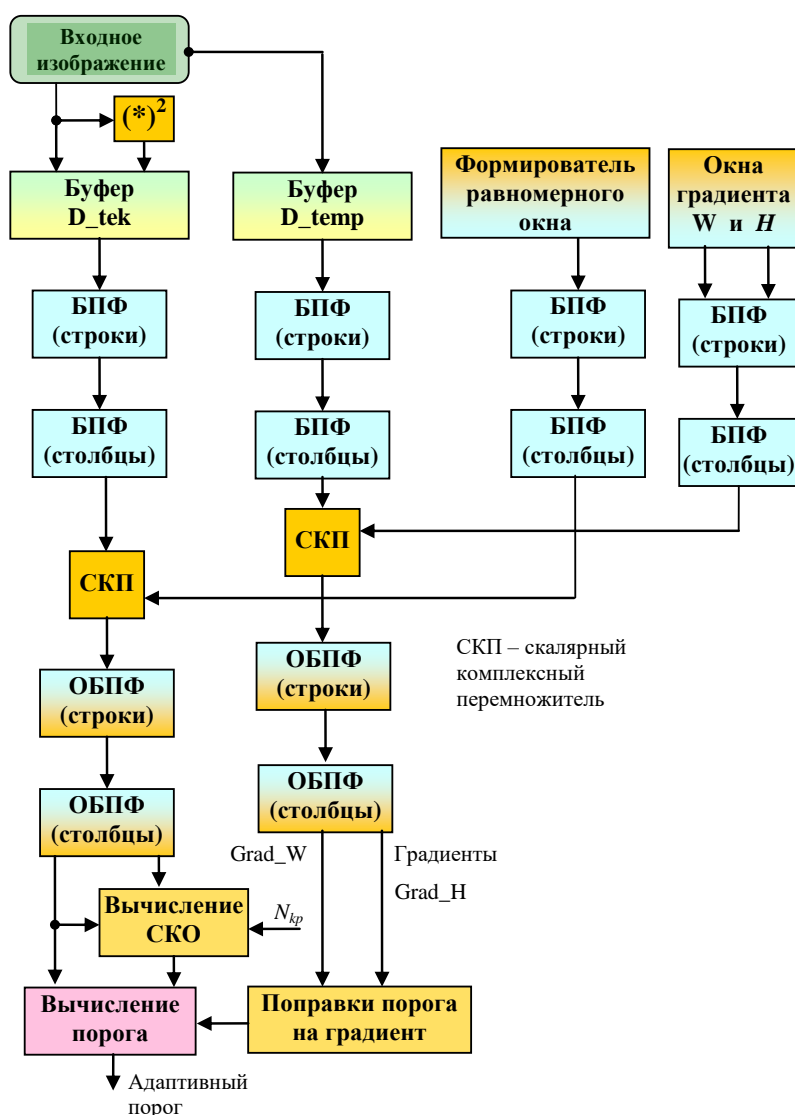


Рис. 10. Функциональная схема ПУЛТ процессора

Основной блок обработки в ПУЛТ процессоре выполняет определение среднего значения и второго момента в окне анализа фона, вычисление градиента по строкам и столбцам, вычисление поправки на градиент и собственно вычисление порога для

обнаружения целей в окне анализа объектов. Для вычислений широко используются алгоритмы на основе быстрого преобразования Фурье, что позволяет существенно сократить время вычислений.

Входное изображение записывается в действительную часть массивов D_{tek} и D_{temp} , в мнимую часть массива D_{tek} записывается квадрат входного сигнала, в мнимую часть массива D_{temp} записываются нули. Далее для массивов D_{tek} и D_{temp} с использованием БПФ производится вычисление двумерного спектра. Для промежуточных расчетов по алгоритму БПФ используются одномерные массивы.

В ПУЛТ процессоре формируются три оконные функции анализа фона:

- равномерное окно (записывается в реальную часть массива);
- окно анализа градиента по строкам (записывается в реальную часть массива опорного сигнала градиента);
- окно анализа градиента по столбцам (записывается в мнимую часть массива опорного сигнала градиента).

С использованием БПФ вычисляются двумерные спектры оконных функций, которые подаются на скалярный комплексный перемножитель (СКП). После перемножения производится обратное БПФ (ОБПФ). На выходах соответствующих каналов получаем для каждого пикселя среднее значение, дисперсию, коэффициенты градиента по горизонтали и вертикали матрицы. Эти данные используются при вычислении адаптивного порога.



Рис. 11. Пример обработки 8 битного изображения

На рис. 11 представлен пример обнаружения точечного объекта на сложном фоне. В качестве модели объекта выступал источник ИК излучения EMIRS200_AT01T_BR090 с излучающей поверхностью $2,1 \times 1,8 \text{ мм}^2$. Обнаруженные пиксели (красный цвет) наложены на исходное изображение. Разработанный комплекс программ показал высокую эффективность в работе. Как видно из рисунка, ПУЛТ процессор уверенно обрабатывает сложные перепады яркости.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования по анализу и обработке ИК изображений в задаче наблюдения точечных объектов позволяют сделать некоторые выводы и выявить ряд особенностей процедур обработки.

1. Статистический анализ полученных изображений показал наличие в них сильно коррелированного фона и широкополосной (некоррелированной) составляющей. Гауссовский шум является преобладающим, поэтому оптимальной обработкой является корреляционная обработка сигналов.

2. Разработанные алгоритмы обнаружения и оценивания координат для матричных приемников с болометрическими чувствительными элементами позволяют автоматизировать процессы обработки сигналов и изображений.

3. На качество обработки оказывает заметное влияние дифракционные эффекты и технологические зазоры, которые приводят к рассеиванию принимаемой мощности по поверхности матрицы и прямым потерям. Оптимизация алгоритмов обнаружения и оценивания угловых координат с учетом этих эффектов позволяет заметно снизить потери в пороговой мощности и повысить точность измерений.

4. Анализ градиента яркости в районе тестируемого пикселя обеспечивает при обнаружении автоматическое подавление ложных целей, возникающих на резких границах изменения яркости.

5. Предложен многоканальный корреляционный приемник, в котором реализуется метод максимального правдоподобия и минимизируются дополнительные потери мощности сигнала. Информация о канале, в котором обнаружен сигнал, используется в субпиксельном измерителе координат для выбора маски. Такая подстройка обнаружителя и измерителя координат делает их адаптивными.

Литература

1. Катулев А.Н., Храмичев 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.
2. Якименко И.В. Методы, модели и средства обнаружения воздушных целей на атмосферном фоне широкоугольными оптико-электронными системами. СПб: Лань, 2022.
3. Иванов В.П., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Метод оптимизации несканирующих тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2012. Т.79. №3. С.3-10.
4. Баранов П.С., Манцетов А.А. Оптимизация отношения радиуса кружка рассеяния объектива к размеру пикселя для повышения точности оценки координат изображений малоразмерных объектов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2016. Вып. 2. С.49-53.
5. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. М.: Радио и связь, 1992.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006.
7. Алтынбай А.Н., Кусаинова У.Б. Эффективная цифровая обработка изображений в информационных системах // Вестник науки. 2024. Т.1. № 6 (75). С.1372-1376.
8. Хафизов Р.З., Старцев В.В., Москвичев В.Ю. Быстродействующие болометрические матричные детекторы // Фотоника. 2021. Т. 15. №5. С 396-409.
9. Меденников П.А. Алгоритм обнаружения и определения координат точечного объекта // Оптический журнал. 2019. Т.86. № 8. С.65-69.
10. Yao H., Liu L., Wei Y., Chen D., Tong M. Infrared Small-Target Detection Using Multidirectional Local Difference Measure Weighted by Entropy // Sustainability. 2023. 15. 1902.
11. Костров В.В., Ракитин А.В. Автоматическое обнаружение объектов в оптико-электронных системах с болометрическим матричным приемником // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2025. №2. С.32-39.
12. Костров В.В., Ракитин А.В., Богатов А.Д. Алгоритмическое обеспечение обнаружения и координатометрии точечных объектов в оптико-электронных системах с болометрическим матричным приемником // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025. № 4. С.44-54.