

УДК 621.391.161

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ НА КОРРЕЛИРОВАННОМ АТМОСФЕРНОМ ФОНЕ

**И.В. Якименко, М.В. Жендарев**

**Академия войсковой ПВО Вооруженных Сил РФ им. Маршала Советского Союза  
А. М. Василевского, г. Смоленск**

Получена 6 февраля 2009 г.

*В данной работе изложен способ обнаружения тепловых объектов на коррелированном атмосферном фоне с помощью инфракрасных тепловизоров с широким полем зрения. Предлагаемый способ основан на использовании отличий пространственных спектров излучения точечного теплового объекта и протяженного, более холодного, атмосферного фона. На основе данного способа обнаружения тепловых объектов разработан алгоритм двумерного пространственного фильтра, который может быть реализован программно в видеопроцессоре тепловизора. Алгоритм позволяет автоматизировать процесс обнаружения воздушных целей (самолетов, вертолетов, крылатых ракет, беспилотных летательных аппаратов и т. д.) и обеспечить вывод их видеоизображений на монитор видеоконтрольного устройства в бинарном виде.*

**Ключевые слова:** обнаружение тепловых объектов, обработка изображений.

По характеру решаемых задач существующие инфракрасные (ИК) оптико-электронные системы (ОЭС) можно разделить на два класса. К первому можно отнести системы тепловидения, основными задачами которых являются обнаружение и распознавание различных теплоизлучающих (тепловых) объектов по их изображениям. Используя этот класс приборов, можно решить задачи сопровождения и прицеливания. Их называют прицельными ОЭС (теповизорами). Размеры изображений объектов в таких приборах сопоставимы с размерами фокальной плоскости (или с размерами регистрирующего матричного приемника излучения (МПИ)). Достижение большой дальности в этих системах связано с использованием светосильных и узкопольных объективов и высококачественных матричных ИК приборов. В настоящее время такие тепловизоры получили широкое применение.

Второй класс – это системы обнаружения. Их называют обзорными ОЭС (теплопеленгаторами). Теплопеленгаторы имеют оптическую систему с широким полем зрения ( $>25^\circ$ ), коротким фокусным расстоянием около 50 мм и матричным приёмником ИК излучения. Угловой размер наблюдаемого точечного объекта в них меньше или равен элементарному угловому полю матричных ИК приемников [1]. Основная задача таких систем – обнаружение на максимальной дальности попавших в поле зрения оптической системы точечных тепловых объектов. Под точечным объектом (целью) понимается малоразмерный тепловой объект, изображение которого уместается в элементарном поле зрения (пиксель изображения) пеленгатора или одновременно попадает в несколько соседних пикселей (по вертикали или горизонтали) [2].

В настоящее время для теплопеленгаторов применяется способ обнаружения точечных

тепловых объектов на фоноцелевом изображении (ФЦИ). Данный способ основан на зрительном разделении яркости отметок точечного теплового объекта и флюктуаций атмосферного фона. Получение ФЦИ на мониторе видеоконтрольного устройства (ВКУ) проводится в соответствии с видеосигналом, полученным с выхода МПИ. Каждому пикселю ФЦИ в соответствие ставят ограниченное число дискретных уровней яркости – квантов, пропорциональных энергетической яркости собственного излучения атмосферы и цели. Чем больше уровней квантования, тем выше качество изображения.

Особенностью работы оптико-электронных приборов с широким полем зрения, работающих в диапазоне 8–13 мкм, является высокие перепады яркости одновременно наблюдаемых фрагментов изображения. Например, радиационный контраст кучевого облака на фоне чистого неба как днём, так и ночью, может достигать 60 К [3]. Аналогичная ситуация возникает при визировании цели вблизи линии горизонта, когда в угловом поле прицела наблюдается часть небесной полусферы и наземный ландшафт, который обычно «теплее» небесного. При чувствительности матрицы  $<0,1$  К и наличии ограничения в выходном видеосигнале «уровнем белого» осуществляется компрессия сигналов с МПИ. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению сигнала цели на входе ВКУ [4]. ФЦИ, полученное на мониторе ВКУ тепlopеленгатора при наличие цели (отметка от цели находится в разрыве линии), представлено на рис. 1. Изображение получено в темное время суток при кучевой облачности.

Проблемы видения возникают вследствие потенциально слабой контрастности ФЦИ, низкого уровня заметности целей и возможного появления пассивных и активных видов противодействия (маскировка, ложные тепловые цели (ЛТЦ), прожекторы и т. п.). Шумовые компоненты сигнала, образующиеся вследствие особенностей применяемых датчиков и неидеальности сигнала передачи данных приводят к ухудшению изображения точечного теплового объекта на мониторе ВКУ. С целью улучшения качества изображений были созданы различные способы цифровой фильтрации и обработки двумерного изображения. Обработка изображений проводится в реальном масштабе времени, без прореживания пиксельного потока видеоданных и без пропуска кадров. Основными способами обработки изображений являются алгоритмы цифровой коррекции неоднородностей, сглаживание шумов, повышение контрастов, подчеркивание границ, высокочастотная коррекция, коррекция дефектных пикселей и т. д., реализованных программно в видеопроцессоре тепlopеленгатора. Отметим, что перечисленные способы обработки изображений косвенно улучшают характеристики тепlopеленгаторов за счет улучшения визуального восприятия изображения оператором.



Рис. 1. Исходное изображение, полученное на мониторе ВКУ

Окончательной оценкой эффективности улучшения качества видеоизображений должно служить субъективно оцениваемое качество изображения, поскольку конечным потребителем воспроизводимого изображения является оператор. Зрительные возможности у разных операторов различны, и на неравномерном изображении облачного атмосферного фона трудно выделить точечную отметку теплового объекта. Ещё сложнее селективировать несколько отметок, поэтому при использовании зрительного обнаружения повышается вероятность

ошибок принятия решений.

Таким образом, необходимы новые способы обнаружения воздушных целей, которые способны выделять отметки точечных тепловых объектов на изображении атмосферного фона без участия оператора. На конечном этапе обнаружения оператор на мониторе ВКУ должен увидеть изображение, для которого характерно максимально контрастное представление отметок тепловых объектов на скомпенсированном равномерном фоне. Для получения такого изображения достаточно двух уровней квантования. Полученные на экране монитора бинарные изображения тепловых объектов позволяют определять их угловые координаты и количественный состав (рис. 2).

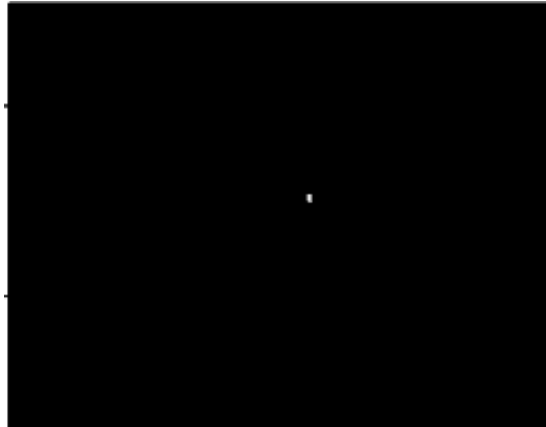


Рис. 2. Изображение на мониторе ВКУ, полученное после фильтрации

Такое выделение тепловых объектов на изображении атмосферного фона можно отнести к пространственной фильтрации. Пространственный фильтр предлагается реализовать программно в видеопроцессоре. Структурная схема тепlopеленгатора, реализующая предлагаемую пространственную фильтрацию, представлена на рис. 3.

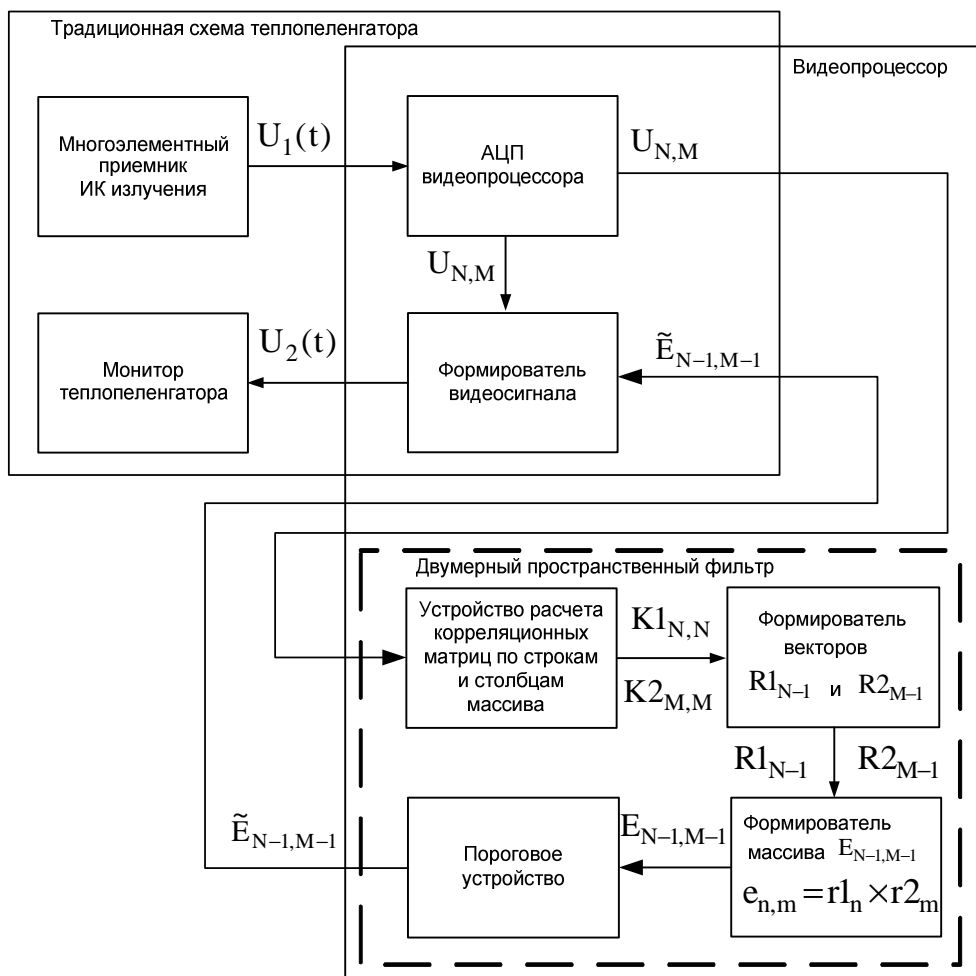


Рис. 3. Структурная схема тепловизора, построенного с использованием способа корреляционной компенсации фона

Сущность разработанного авторами способа обнаружения тепловых объектов на атмосферном фоне заключается в том, что предлагается использовать отличия пространственных спектров излучения точечных объектов и протяженного, более холодного, атмосферного фона. Пространственный спектральный анализ атмосферного фона содержит расчет нормированных пространственных спектральных плотностей мощности флуктуаций излучения. Он связан с методическими и вычислительными сложностями, которые касаются оптимизации выбора корреляционного окна.

Согласно теореме Винера – Хинчина, пространственная спектральная плотность мощности преобразованием Фурье связана с взаимной корреляционной функцией, поэтому предлагается оценивать спектральную плотность мощности излучения на основе анализа нормированных коэффициентов взаимной корреляции для соседних строк (столбцов) цифрового массива ФЦИ  $U_{N,M}$ . Математическое выражение, используемое для расчетов нормированных коэффициентов взаимной корреляции для соседних строк (столбцов) цифрового массива изображения, приведено в работе [3, с 132]. Эта формула используется для обработки экспериментальных данных при изучении пространственных корреляционных связей флуктуаций излучения атмосферных фонов. Принято считать: если коэффициент взаимной корреляции второй диагонали корреляционной матрицы стремится к единице, то корреляционные связи сильны или устойчивы, а если меньше 0,5, то корреляционные связи слабы или отсутствуют [3].

В ходе исследования корреляционных связей фонового излучения облачной атмосферы установлено, что нормированные коэффициенты взаимной корреляции соседних строк, столбцов массива изображения, находящиеся во вторых диагоналях корреляционных матриц,

принимают значения в интервале  $[0,65-0,99]$ . При проведении предварительного математического моделирования по обнаружению теплового объекта на атмосферном фоне установлено, что присутствие теплового объекта в элементе  $u_{n,m}$  массива изображения  $U_{N,M}$  приведет к ослаблению корреляционных связей. При этом нормированные коэффициенты взаимной корреляции соседних строк, столбцов массива изображения, в которых находится изображение цели, находящиеся во вторых диагоналях корреляционных матриц, снижаются по сравнению со значениями для строк, столбцов, в которых его нет. Это явление предлагается считать признаком строк и столбцов, в которых находится отметка теплового объекта.

Основой алгоритма пространственной фильтрации является расчет диагональной корреляционной матрицы  $K1_{N,N}$  по строкам и матрицы  $K2_{M,M}$  по столбцам для массива  $U_{N,M}$  ФЦИ. Первая (центральная) диагональ каждой корреляционной матрицы содержит элементы, равные единице, поскольку они получены путем вычисления коэффициентов корреляции строки (столбца) с самим собой. Вторая диагональ матрицы показывает, каков коэффициент взаимной корреляции первой строки со второй, второй с третьей и т. д. Из элементов вторых диагоналей корреляционных диагональных матриц  $K1_{N,N}$  и  $K2_{M,M}$  получают векторы  $R1_{N-1}$  и  $R2_{M-1}$ . Вектора  $R1_{N-1}$ ,  $R2_{M-1}$  используются для формирования массивов  $E_{N-1,M-1}$ , в каждый элемент, (имеющий индексы  $n$  и  $m$ ) которого записывался результат умножения в соответствии с формулой  $e_{n,m} = r1_n \times r2_m$ , где  $r1_n$  и  $r2_m$  – величины  $n$ -го и  $m$ -го элементов векторов  $R1_{N-1}$  и  $R2_{M-1}$  соответственно. По адаптивному порогу  $p$ , в соответствии с решающим правилом в элемент  $e_{n,m}$  записывается 0, если в соответствующем элементе массива  $e_{n,m} \leq p$ . В элемент  $e_{n,m}$  записывается 1, если в соответствующем элементе массива  $e_{n,m} > p$ . Таким образом, окончательно формируется массив  $\tilde{E}_{N-1,M-1}$ . Массив  $\tilde{E}_{N-1,M-1}$  используется для создания бинарного изображения на мониторе ВКУ. По номерам строк и столбцов элементов, в которых находятся единичные значения, определяется пространственное положение цели в сегменте полусферы поиска. Изображение на мониторе с отфильтрованной точечной тепловой целью представлено на рис. 2.

С целью проверки эффективности предлагаемого алгоритма обнаружения теплового объекта было проведено математическое моделирование с использованием моделей излучения воздушных целей и фона. Модели построены на основе измерений собственного излучения воздушных целей и атмосферных фонов при различных метеорологических ситуациях. Измерения собственного излучения воздушных целей и атмосферных фон проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК), в состав которого входит двухспектральный радиометр (3–5 мкм и 8–13 мкм). Характеристики радиометра приведены в работе [3].

Модели фона представляли собой цифровые массивы изображений  $U_{N,M}$ , в каждом элементе  $u_{n,m}$  которых записаны энергетические яркости собственного излучения атмосферного фона. Модели излучения воздушной цели представлены средними контрастами излучения воздушных целей, полученных на различных по типу облачности, фонах и дальности [5]. Средний контраст излучения тепловой воздушной цели рассчитывался по формуле

$$\Delta\bar{s} = \bar{s} - \bar{u}_\phi, \quad (1)$$

где  $\bar{s}$  – среднее значение собственного излучения тепловой цели;  $\bar{u}_\phi$  – среднее значение

собственного излучения фона, на котором наблюдается тепловая цель.

Для проведения математического моделирования обнаружения теплового объекта на атмосферном фоне из имеющейся базы моделей фона были отобраны около 400 массивов изображений  $U_{N,M}$ , полученных в спектральных диапазонах 3–5 мкм и 8–13 мкм, размером  $512 \times 1024$  пикселей. Массивы изображения  $U_{N,M}$  охватывают верхнюю полусферу от горизонта до  $40^\circ$  и имеют больший размер по азимуту ( $80^\circ$ ). В набор массивов изображений  $U_{N,M}$  включены результаты дневных и ночных измерений в летний и осенний сезоны для следующих типов облачности: ясно, кучевая, слоистая, перистая.

С целью определения вероятности обнаружения, реализуемой при использовании предлагаемого способа, проведено моделирование процесса обнаружения теплового объектов на исследуемых фоновых кадрах. Были взяты по 100 фрагментов массивов изображения  $U_{N,M}$  для ясного неба, кучевой, слоистой и перистой типов облачности, размером  $256 \times 256$  пикселей.

В качестве полезного сигнала (изображение теплового объекта) использовалась величина среднего контраста излучения вертолета, который вычислен по формуле (1). Размер изображения теплового объекта уместился в одном элемент  $u_{n,m}$  (пикселе) изображения атмосферного фона  $U_{N,M}$ , что соответствует при линейном размере цели 4 м удалению 12 – 15 км. На выбранные массивы изображения атмосферного фона  $U_{N,M}$  «накладывался» сигнал от тепловых объектов. «Наложение» т. е. имитация появления изображения воздушной цели в выбранном пикселе  $u_{n,m}$  массива проводилось в соответствии с формулой

$$\hat{u}_{n,m} = u_{n,m} + \Delta\bar{s}, \quad (2)$$

где  $\Delta\bar{s}$  – средний контраст излучения цели и фона. [5]. В результате моделирования, изображение теплового объекта наблюдалось, затеняя участок атмосферного фона находящегося за ним. При каждом «наложении» в случайно выбранный пиксель  $u_{n,m}$  массива изображения фона  $U_{N,M}$ , создавалось отношение сигнал/шум

$$\frac{\hat{u}_{n,m}^2}{\sigma_{uu}^2} \approx 2,$$

где  $\sigma_{uu}^2$  – дисперсия флуктуаций излучения атмосферного фона примерно равная дисперсии шума аппаратуры (радиометра)  $\sigma_{uu}^2 \approx 4 \cdot 10^{-11} (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1})^2$  [2].

Обнаружение осуществлялось по адаптивному порогу  $p$  для коэффициента взаимной корреляции по строкам и столбцам массивов изображений  $U_{N,M}$ . Диапазон изменения адаптивного порога находится в интервале  $[0,1 - 0,6]$ . Значение порога зависит от типа атмосферного фона, которому присуще свое значение радиуса корреляции, и от величины контраста цели на фоне атмосферных помех.

Анализ результатов математического моделирования подтвердил работоспособность предлагаемого способа пространственной фильтрации в обоих инфракрасных диапазонах. Вероятности обнаружения теплового объекта на атмосферном фоне при отношении сигнал/шум, равном 2, представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Вероятности обнаружения теплового объекта на атмосферном фоне

Диапазон длин волн	Тип облачности			
	Ясно	Кучевая	Слоистая	Перистая
3 – 5 мкм	0,82	0,67	0,73	0,82

8 – 13 мкм	0,91	0,73	0,84	0,87
------------	------	------	------	------

Как видно из сравнения видеоизображений, показанных на рисунках 1 и 2, при использовании предлагаемого способа отметка теплового объекта (целей), ввиду отсутствия фона на бинарном изображении, видна контрастно. Поэтому оценить их пространственное положение в сегменте полусферы поиска легко. Полученные на экране монитора бинарные изображения тепловых объектов позволяют определять их угловые координаты, количественный состав и другие характеристики без предварительной подготовки оператора, что приводит к увеличению информационной способности и простоте эксплуатации тепловизора.

### Литература

1. Якушенков Ю.Г., Тарасов В. В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: «Логос», 2004. 430 с.
2. Приходько В.Н., Хисамов Р.Ш. Обнаружение «точечных» объектов тепловизором на основе матричного фотоприёмного устройства. //Оборонная техника.// Вып. 1–2, 2007. С. 64-66.
3. Алленов М.И. и др. Стохастическая структура излучения облачности. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 175 с.
4. Чупраков А. М., Хитрик А.С. Тепловизионный прицел на основе матричного болометрического приемника. //Оптико–электронные системы визуализации и обработки оптических изображений.// Вып. 2. – М.: ЦНИИ «Циклон». 2007. С. 60-71.
5. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. – М.: «Советское радио», 1971. 199 с.