

УДК 621.391.161

## МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ФОНА ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

И.В. Якименко

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

Получена 11 апреля 2009 г.

*В статье изложен метод компенсации атмосферного фона и способ обнаружения тепловых объектов на атмосферном фоне с помощью инфракрасных тепlopеленгаторов с широким полем зрения. На основе способа разработан алгоритм двумерного пространственного фильтра, который может быть реализован программно в видеопроцессоре тепlopеленгатора. 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.

Основная задача тепlopеленгаторов состоит в обнаружении на максимальной дальности попавших в поле зрения оптической системы воздушных целей. Угловой размер наблюдаемых целей в них меньше или равен элементарному угловому полю инфракрасных (ИК) матричных приемников излучения (МПИ) тепlopеленгатора [1]. При работе на больших дистанциях оптическая система тепlopеленгатора оказывается неспособной различить детали и формы целей, а «видит» их как светящуюся точку – точечный тепловой объект (ТТО). Такое явление называется «дефицитом разрешающей способности оптики» [2]. Под ТТО понимается малоразмерный излучающий объект, изображение которого умещается в элементарном поле зрения (пиксель изображения) пеленгатора или одновременно попадает в несколько соседних пикселей (по вертикали или горизонтали) [3].

Поскольку положение объекта заранее неизвестно система пеленгации решает сложную задачу обнаружения случайного сигнала. В процессе ее решения система должна произвести выбор между двумя гипотезами: 1) присутствует только атмосферный фон (АФ), 2) помимо АФ есть ТТО. Традиционно такая задача решается путем поиска ТТО по известным его характеристикам. К таким характеристикам можно отнести меньший размер, по сравнению с размерами излучающих атмосферных неоднородностей, и большая интенсивность излучения, поскольку искомый аэродинамический объект всегда имеет более высокую температуру, обусловленную горением топлива, по сравнению с «холодным» АФ.

В настоящее время для тепlopеленгаторов используют амплитудный метод обнаружения ТТО на фоноцелевом изображении (ФЦИ). 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 ТТО и АФ. Чем больше уровней квантования, тем выше качество

изображения. Обнаружение производится исходя из различий яркости излучения АФ и ТТО. Данный метод основан на зрительном разделении яркости отметок ТТО и флюктуаций АФ. Для обнаружения ТТО используют пороговый способ. Выбор порога производят с учетом того, что яркости излучения «холодного» АФ и ТТО отличаются по величине амплитуды. Порог срабатывания зрительно выбирают по среднему уровню яркости фонового шума. Те области изображения, где яркость пикселя выше установленного порога, считают ТТО, остальные – АФ.

Проблемы видения возникают вследствие потенциально слабой контрастности ФЦИ, низкого уровня заметности ТТО. Шумовые составляющие сигнала, образующиеся вследствие особенностей применяемых датчиков и неидеальности сигнала передачи данных приводят к ухудшению изображения ТТО на мониторе ВКУ тепlopеленгатора. С целью улучшения визуального восприятия оператором на экране блока ВКУ применяются различные преобразования качества видеоизображений, приводящие к повышению информационных характеристик видеосигнала, расширяющих возможности по максимизации дальности видимости, быстрому поиску и обнаружению ТТО. Для таких преобразований были созданы различные способы обработки двумерного цифрового изображения. Основными способами цифровой обработки изображений являются алгоритмы сглаживания шумов, повышения контрастов, подчеркивания границ, накопления сигналов и т. д. Отметим, что перечисленные способы обработки изображений косвенно улучшают характеристики тепlopеленгаторов за счет улучшения визуального восприятия изображения оператором. Но разные по яркости источники вызывают неодинаковые зрительные ощущения. Практически человек способен различать не более 8–10 градаций яркости (полутонов), поэтому если информация передается изменением яркости индикатора, то нельзя использовать более 4–5 градаций, а для надежной передачи – более двух (черное – белое) [1].

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 АФ трудно выделить ТТО. Ещё сложнее выделить несколько отметок, поэтому при использовании зрительного обнаружения повышается вероятность возникновения ошибок принятия решений. С увеличением дистанции возможности применения амплитудного метода в сочетании с преобразованием качества видеоизображений существенно ограничиваются. Это прежде всего связано с уменьшением размера отметки и контраста ТТО. ФЦИ, полученное на мониторе ВКУ тепlopеленгатора, при наличии ТТО, представлено на рисунке 1. Изображение получено в темное время суток при слоистой кучевой облачности.



Рисунок 1 – Исходное изображение, полученное на мониторе ВКУ

Малоразмерность (по угловой величине) ТТО не сохраняется при приближении объекта к прибору. Сокращение дистанции приводит к увеличению не только размера изображения, но и к увеличению интенсивности излучения объекта из-за снижения поглощения излучения атмосферой. Это обуславливает превосходство уровня излучения ТТО над излучением АФ, которое станет достаточным для устойчивого обнаружения, проводимого традиционным амплитудным методом.

Таким образом, необходим новый метод обнаружения ТТО, который способен выделять на изображении АФ ТТО, находящиеся на максимальном удалении, за счет математической обработки цифрового массива ФЦИ. В основе такой обработки должны быть математические операции, опирающиеся на наиболее общие свойства случайного излучающего фона, способные выделить элементы массива, принадлежащие изображению АФ. В результате этих действий оператору на мониторе ВКУ должно быть представлено изображение, для с максимально контрастным представлением отметок ТТО на скомпенсированном АФ. Для получения такого изображения достаточно двух уровней квантования яркости. Единичные точки будут соответствовать точкам ТТО, а нулевые – точкам АФ. Такое изображение называется бинарным. Бинарное изображение удобно не только для восприятия оператором, но и для использования его в качестве машинного зрения автоматических систем.

Метод математической обработки цифрового массива ФЦИ, результатом применения которого становится обнаружение элементов, в которых нарушаются известные свойства излучающего АФ, можно назвать методом компенсации АФ. Несмотря на большое разнообразие типов АФ, быстро изменяющихся во времени все они имеют общие свойства. К таким свойствам, прежде всего можно отнести устойчивые корреляционные связи, особенности пространственных спектров и т.д. [4].

Предложенный метод объединяет несколько способов обнаружения ТТО, отличающихся типом математической обработки цифрового массива ФЦИ. Два способа уже рассматривались автором в ряде статей [5, 6]. Такие способы обнаружения ТТО на ФЦИ были отнесены к пространственной фильтрации. Пространственной фильтрацией называют совокупность операций по преобразованию оптического изображения, обеспечивающих обнаружение искомого объекта среди других мешающих [2].

Каждый способ начинается с предварительной математической обработки и заканчивается разделением элементов массива ФЦИ на два класса путем сравнения полученных результатов с адаптивным порогом. Тем элементам массива, которые обладают свойствами АФ, присваиваются нулевые значения, в оставшиеся заносятся единицы. В результате этих действий создается бинарный массив принятия решения. Отображенное на экране монитора ВКУ бинарное изображение позволяет однозначно принимать решение о наличии ТТО, определять их угловые координаты и количественный состав. Для примера на рисунке 2 представлено бинарное изображение, полученное после применения способа пространственной фильтрации к массиву ФЦИ представленного на рисунке 1.



Рисунок 2 – Изображение на мониторе ВКУ, полученное после фильтрации

Рассмотрим способ пространственной фильтрации с нелинейной компенсацией фона. Структурная схема тепlopеленгатора, реализующая этот способ, представлена на рисунке 3. Предлагаемый пространственный фильтр предлагается реализовать программно в видеопроцессоре в соответствии с предлагаемым алгоритмом:

1. Определение среднего значения яркости фонового шума кадра

$$\mu = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{n,m}}{NM}, \quad (1)$$

где  $u_{n,m}$  – элемент массива  $U_{N,M}$ , содержащий информацию о напряжении, пропорциональному яркости излучения АФ, снятого с ячейки многоэлементного приемника в  $n$ -й строке на  $m$ -м шаге.

2. Формирование массива линейной фильтрации  $E_{N,M}$ . В каждый элемент, имеющий индексы  $n$  и  $m$ , записывают результат, полученный в соответствии с формулой

$$e_{n,m} = \frac{u_{n,m}}{\mu}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – среднего значения яркости фонового шума кадра.

3. Формирование массива нелинейной фильтрации  $\tilde{E}_{N,M}$ . В каждый элемент, имеющий индексы  $n$  и  $m$ , записывают результат, полученный в соответствии с формулой

$$\tilde{e}_{n,m} = [e_{n,m}]^K, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент нелинейной фильтрации.

4. Пороговая обработка, в процессе которой происходит сравнение величин элементов  $\tilde{e}_{n,m}$  массива  $\tilde{E}_{N,M}$  с адаптивным порогом принятия решения  $p > 1$ .

5. По адаптивному порогу  $p$ , в соответствии с решающим правилом в элемент  $\tilde{e}_{n,m}$  записывается 0, если предполагается что в соответствующем элементе массива  $\tilde{e}_{n,m} \leq p$  находится только АФ. В элемент  $\tilde{e}_{n,m}$  записывается 1, если предполагается что в соответствующем элементе массива  $\tilde{e}_{n,m} > p$  находится ТТО.

Таким образом, окончательно формируется массив принятия решения  $\tilde{E}_{N,M}$ . Массив  $\tilde{E}_{N,M}$  может быть использован для создания бинарного изображения на мониторе ВКУ, либо для его использования в системах машинного зрения. По номерам строк и столбцов элементов, в которых находятся единичные значения, определяется пространственное положение ТТО в сегменте полусферы поиска. Изображение на мониторе с отфильтрованной точечной тепловой целью представлено на рисунке 2.

Сущность разработанного способа обнаружения ТТО на АФ заключается в том, что предлагается использовать нелинейную операцию, которая повышает вероятность принятия решения о наличии искомого ТТО в поле зрения тепlopеленгатора. Результатом выполнения нелинейной операции (3), возведение в степень  $K$  отношения (2) значения яркости элемента к среднему значению яркости кадра (1), будет получение массива нелинейной фильтрации. В каждом элементе массива записаны величины, которые могут быть меньше или больше 1. Те элементы, величины которых меньше 1 принадлежат ячейкам, яркость которых соответствует излучению АФ. В ячейках, величина которых больше единицы, может быть излучение искомого ТТО, но может быть и излучение яркой атмосферной неоднородности (облаком-помехой). Обнаружить ячейку, соответствующую

по величине излучению ТТО можно только при сравнении величин с адаптивным порогом принятия решения. На этом заканчивается предварительная математическая обработка цифрового массива ФЦИ и начинается пороговая обработка.

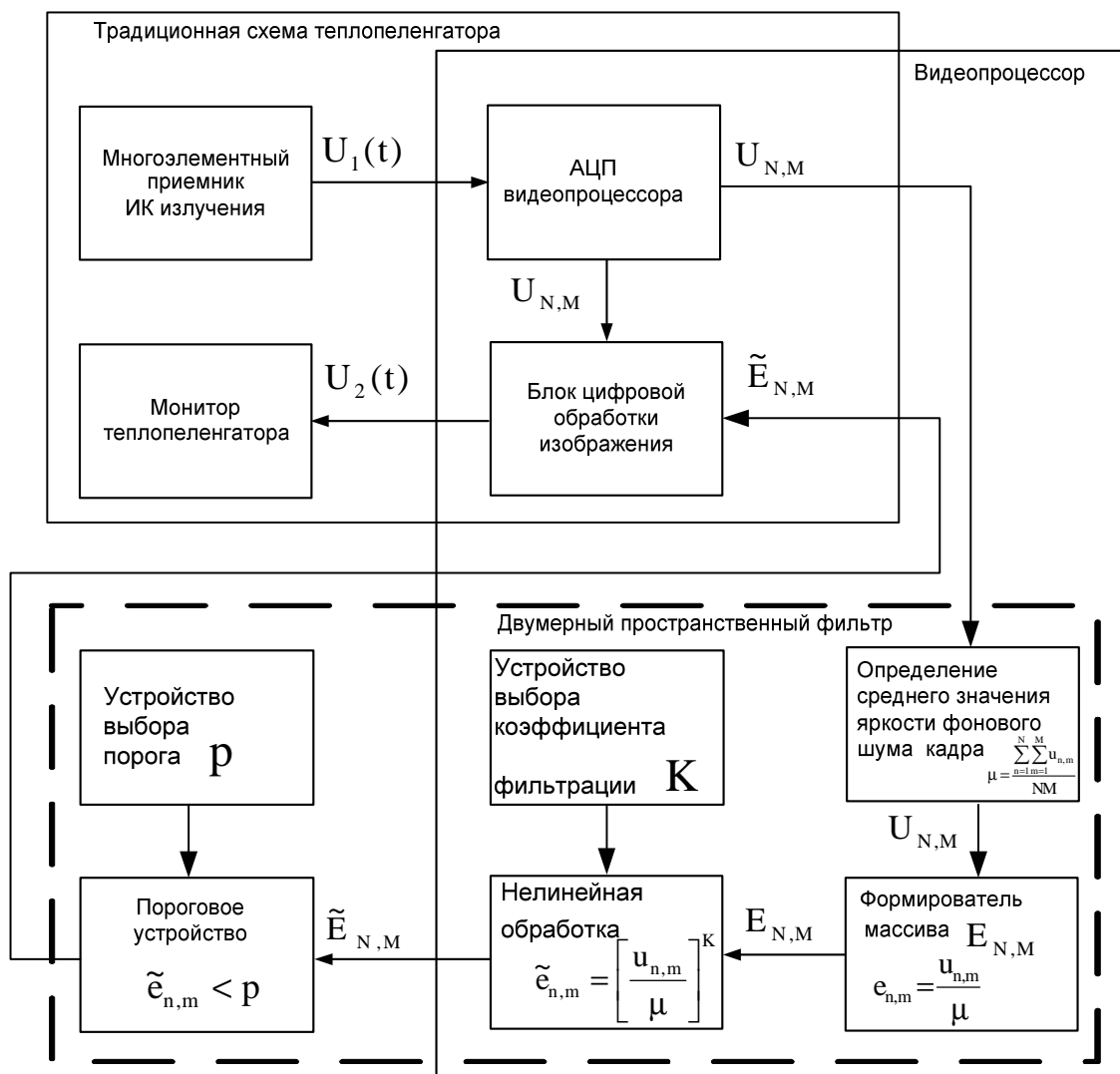


Рисунок 3 – Структурная схема тепловизора, построенного с использованием способа пространственной фильтрации с нелинейной компенсацией атмосферного фона

Пороговая обработка завершается формированием массива принятия решения  $\tilde{E}_{N,M}$ . При выводе, которого на монитор ВКУ формируется бинарное ФЦИ. Как правило, изображения содержат не только искомые изображения ТТО (см. рисунок 2), но и изображения наиболее ярких облачных полей. В этом случае на завершающем этапе обнаружения необходимо учесть отличия пространственных размеров ТТО и протяженных, более холодных, облачных масс. Если же возникнет ситуация когда ТТО проектируется на облачное поле, то повысить вероятность обнаружения можно изменив коэффициент фильтрации  $K$  и порог принятия решения. Предлагаемый способ решает задачу обнаружения ТТО с высокой вероятностью при условии, когда яркость ТТО выше яркости неоднородностей АФ. Существование обратной ситуации в условиях наблюдения ночного неба маловероятно.

С целью проверки эффективности предлагаемого алгоритма двумерной пространственной фильтрации ТТО было проведено математическое моделирование с

использованием моделей излучения воздушных целей и фона. Модели построены на основе оцифрованных, при помощи специальной программы [8], кадров видеосигнала, полученных с видеовыхода тепlopеленгатора. Примерный вид кадра видеосигнала, из которого получили массив  $U_{N,M}$  представлен на рисунке 1. Каждый элемент  $u_{n,m}$  массива  $U_{N,M}$  содержит информацию о дискретных уровнях квантования, пропорциональных яркости излучения АФ, снятого с ячейки многоэлементного приемника в  $n$ -й строке на  $m$ -м шаге. Сигнал в каждом пикселе квантован в 16777162 уровней яркости и занимает 24 бита. Характеристики тепlopеленгатора приведены в работе [7].

Модели фона представляли собой цифровые массивы изображений  $U_{N,M}$ , в каждом элементе  $u_{n,m}$  которых записаны энергетические яркости собственного излучения атмосферного фона без ТТО. Модели излучения ТТО представлены средними контрастами излучения воздушных целей, полученных на различных по типу облачности, фонах и дальности [1]. Средний контраст излучения ТТО рассчитывался по формуле

$$\Delta\bar{s} = \bar{s} - \bar{u}_\delta, \quad (4)$$

где  $\bar{s}$  – среднее значение собственного излучения тепловой цели;  $\bar{u}_\delta$  – среднее значение собственного излучения фона, на котором наблюдается тепловая цель.

Для проведения математического моделирования обнаружения теплового объекта на атмосферном фоне из имеющейся базы кадров фона были отобраны около 400 массивов изображений  $U_{N,M}$ , полученных в спектральных диапазонах 8–13 мкм, размером 320×240 пикселей. В набор массивов кадров  $U_{N,M}$  включены результаты 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 объекта на исследуемых фоновых кадрах. Были взяты по 100 кадров  $U_{N,M}$  для названных типов облачности.

В качестве полезного сигнала (изображение теплового объекта) использовалась величина среднего контраста излучения вертолета, который вычислен по формуле (4). Размер изображения ТТО умещался в одном элемент  $u_{n,m}$  (пиксель) 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

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

где  $\Delta\bar{s}$  – средний контраст излучения цели и фона. [2]. 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

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

где  $\hat{u}_{n,m}$  – пиковое значение квантованной яркости в  $\sigma_{\phi}^2$  – дисперсия флуктуаций излучения атмосферного фона

Обнаружение осуществлялось по адаптивному порогу  $p$ . Диапазон изменения адаптивного порога находится в интервале [1 – 3]. Значение порога зависит от типа атмосферного фона, от величины контраста цели на фоне атмосферных помех и от выбранного коэффициента нелинейной фильтрации  $K$ .

Анализ результатов математического моделирования подтвердил работоспособность предлагаемого способа пространственной фильтрации в инфракрасном диапазоне 8 – 13 мкм. 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
8 – 13 мкм	0,93	0,83	0,87	0,91

Как видно из сравнения видеоизображений, приведенных на рисунках 1 и 2, при использовании предлагаемого способа отметка ТТО (целей), ввиду отсутствия АФ на бинарном изображении, видна контрастно. Следовательно 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. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. – М.: «Советское радио», 1971. 199 с.
3. Приходько В.Н., Хисамов Р.Ш. Обнаружение «точечных» объектов тепловизором на основе матричного фотоприёмного устройства. //Оборонная техника.// Вып. 1–2, 2007. С. 64-66.
4. Алленов М. И. и др. Стохастическая структура излучения облачности. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 175 с.
5. Якименко И.В., Жендарев М.В. Пространственная фильтрации тепловых объектов на атмосферном фоне // Мат. морфология: Электронный мат. и медико-биологический журн. 2009. Т. 8. № 1. URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/TITL.HTM>.
6. Якименко И.В., Жендарев М.В. Пространственная фильтрации тепловых объектов на коррелированном атмосферном фоне // Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал. 2009. №2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb09/1/text.html>.
7. 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.
8. Якименко И.В., Коваль С.Н., и др. Цифровая обработка сигналов тепловизионных устройств перспективных образцов вооружений // Программа ЭВМ. Зарегистрирована ФГУП «Всероссийский научно-технический центр» Инв. Номер 50200900390