

УДК 621.391.161

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ С ЧЕРЕСПЕРИОДНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНА

И.В. Якименко, Д.А. Гурченков

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

Получена 11 апреля 2009 г.

В данной работе изложен способ обнаружения тепловых объектов на атмосферном фоне с помощью инфракрасных тепловизоров с широким полем зрения. Предлагаемый способ основан на использовании отличий в амплитудах яркости излучения точечного теплового объекта и е 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 обнаруживать воздушные цели (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты, беспилотные летательные аппараты и т. д.) на максимальной дальности и обеспечивает вывод их видеоизображений на монитор видеоконтрольного устройства в бинарном виде.

Ключевые слова: обнаружение тепловых объектов, обработка изображений.

Рассматривается способ обнаружение точечных тепловых объектов (ТТО) на естественных атмосферных фонах (АФ), что соответствует условиям обнаружения малоразмерного объекта на больших дальностях. Под ТТО понимается малоразмерный объект, изображение которого вписывается в элементарное поле зрения (пиксель) пеленгатора.

В настоящее время для тепловизоров применяется амплитудный способ обнаружения ТТО на фоноцелевом изображении (ФЦИ). Данный способ основан на зрительном разделении яркости отметок ТТО и флюктуаций атмосферного фона (АФ). 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 ОЭС 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 тепловизора 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 искажении сигнала передачи данных приводят к ухудшению изображения ТТО 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.



Рисунок 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 АФ трудно выделить ТТО. 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 ТТО на изображении АФ без участия оператора. На конечном этапе обнаружения оператор на мониторе ВКУ должен увидеть изображение, для которого характерно максимально контрастное представление отметок ТТО на скомпенсированном равномерном АФ. Для получения такого изображения достаточно двух уровней квантования. Полученные на экране монитора бинарные изображения ТТО позволяют определять их угловые координаты и количественный состав (рисунок 2).

Такое выделение ТТО на изображении АФ можно отнести к пространственной фильтрации. Для компенсации мешающих излучений предлагается использовать свойство излучения АФ, который имеет примерно одинаковый уровень флуктуаций яркости в пределах сегмента полусферы с угловыми размерами $1\div 3^\circ$ [3]. Размер поля зрения тепlopеленгатора составляет 18° по углу места и 18° по азимуту. Размер массива

череспериодной компенсации (МЧПК) составляет 256×256 элементов, т. е. при переводе его в визуальное изображение оно будет содержать $256 \times 256 = 65\,536$ пикселей [4]. Это позволяет выделить 36 сегментов углового поля зрения прибора размером $2,25 \times 2,25^\circ$, что соответствует делению МЧПК на фрагменты размером 32×32 элемента. Таким образом, МЧПК может быть разделён на 36 или менее фрагментов, в пределах которых существует одинаковое число облучённых элементов положительной и отрицательной полярности. Хаотическое размещение в сегменте обнаружения областей с различной интенсивностью излучения фона, а также их различная пространственная протяжённость не оказывают существенного влияния на результат усреднения излучения в том или ином столбце (строке). Неполная компенсация излучения фона может быть обусловлена нечетным числом элементов, принадлежащих частной области излучения фона, отличающейся по уровню излучения от других частных областей. Тем не менее, при попадании в сегмент углового поля зрения тепlopеленгатора протяженной помехи в любой момент времени, число облучённых элементов по строкам и столбцам МЧПК, дающих сигнал положительной полярности, будет примерно равно числу элементов, дающих сигнал отрицательной полярности. При сложении амплитуд разнополярных сигналов, снятых по строкам или столбцам матрицы МЧПК, будет происходить их взаимосопряжение. Величина среднего арифметического по строкам или столбцам, содержащим сигналы от АФ, будет близка к нулю. При усреднении разнополярных значений элементарных сигналов по строке (столбцу) МЧПК, содержащей амплитуду сигнала от ТТО, взаимной компенсации происходить не будет, т.е. среднее арифметическое будет значительно отличаться от нуля.

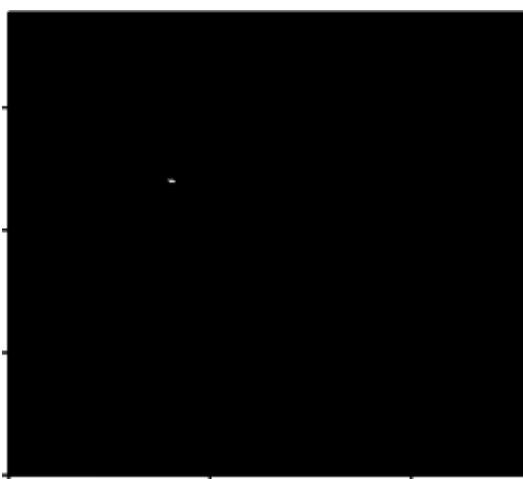


Рисунок 2 – Изображение на мониторе ВКУ, полученное после фильтрации

Таким образом, существует возможность, установив порог принятия решения, близкий к среднему арифметическому, рассчитанному по строкам и столбцам МЧПК, различать строки и столбцы, в которых находится изображение фона, от строк и столбцов, в которых записана амплитуда сигнала от ТТО, а также определять их номера. В этом состоит сущность способа череспериодной компенсации фона

Порог устанавливается каждый раз перед началом обработки массива изображения. Для этого используется результат расчета среднего арифметического по всему массиву изображения. Таким образом, меняющийся порог на каждом этапе обработки для каждого массива, адаптивно учитывает средний уровень энергетической яркости холодного протяжённого АФ. Это возможно, поскольку элементов с отражениями фона на несколько порядков больше элементов с отражением от ТТО. При равномерном фоне в сегменте обнаружения порог по модулю уменьшается. В случае наличия участков с разной яркостью уровень порога p растёт. То есть величина порога адаптивно реагирует на

условия обнаружения ТТО. Большое число строк и столбцов МЧПК и малое число неоднородных областей фона (более или менее тёмных) приводят к тому, что при усреднении по числу элементов МЧПК величина порога p изменяется незначительно, однако адаптивно реагирует на наличие неоднородностей в анализируемом сегменте небесной полусферы. Чтобы величина порога p была менее чувствительна к наличию неоднородных (разнояркостных) областей, существующих в пределах сегмента обнаружения, необходимо увеличивать число элементов МЧПК за счёт применения более чувствительных приёмников с большей дискретностью опроса.

Пространственный фильтр предлагается реализовать программно в видеопроцессоре. Структурная схема тепlopеленгатора, реализующая предлагаемую пространственную фильтрацию, представлена на рисунке 3.

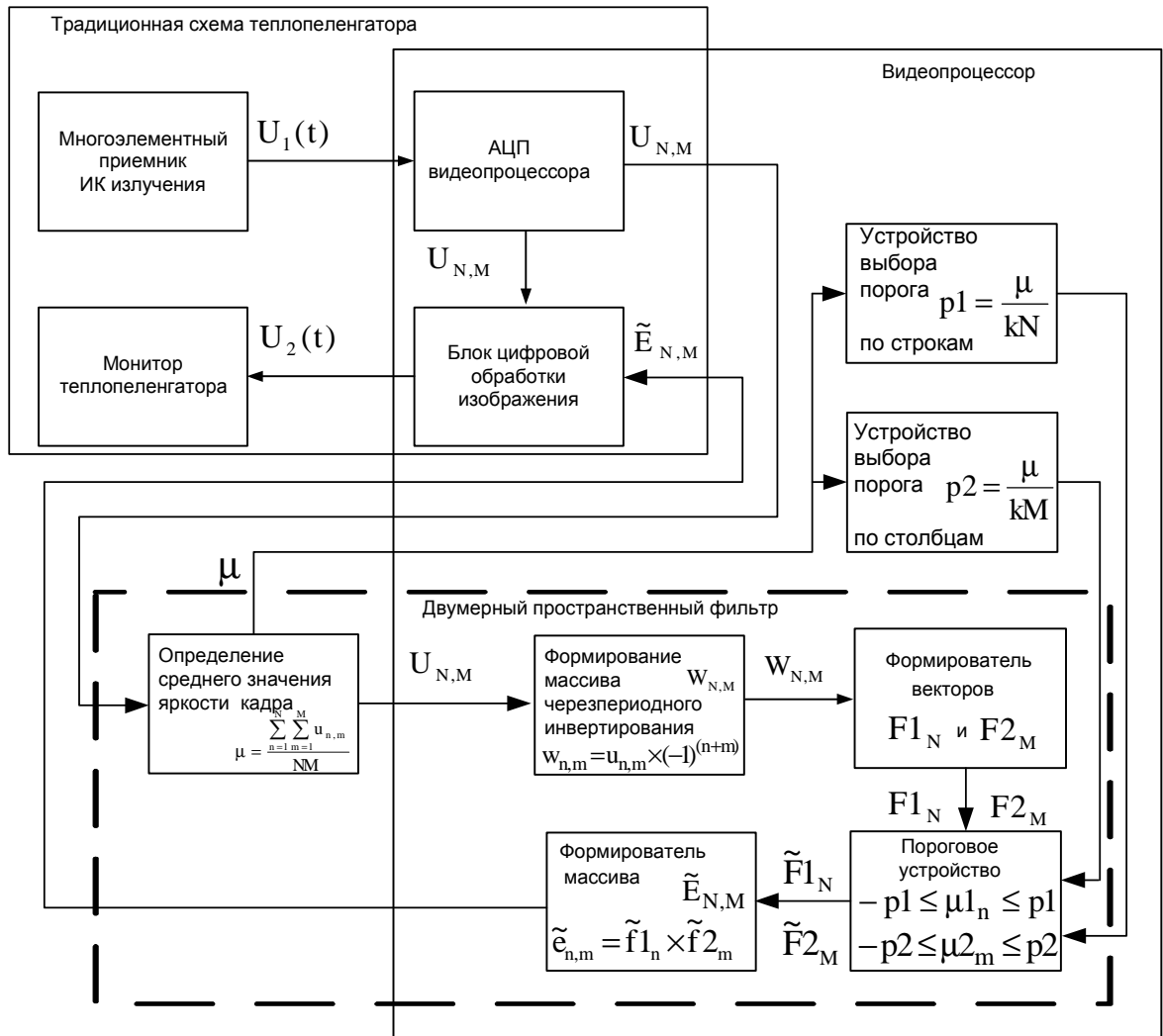


Рисунок 3 – Структурная схема тепlopеленгатора, построенного с использованием способа черезпериодной компенсации фона

С целью проверки эффективности предлагаемого алгоритма обнаружения ТТО было проведено математическое моделирование с использованием моделей излучения воздушных целей и фона. Модели построены на основе измерений собственного излучения воздушных целей и АФ при различных метеорологических ситуациях. Измерения собственного излучения воздушных целей и АФ 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 АФ. 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}_ϕ – среднее значение собственного излучения фона, на котором наблюдается тепловая цель.

Для проведения математического моделирования обнаружения ТТО на АФ 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 512×1024 пикселей. Массивы изображения $U_{N,M}$ охватывают верхнюю полусферу от горизонта до 40° и имеют большой размер по азимуту (80°). 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 ТТО на исследуемых фоновых кадрах. Были взяты по 100 фрагментов массивов изображения $U_{N,M}$ для ясного неба, кучевой, слоистой и перистой типов облачности, размером 256×256 пикселей.

В качестве полезного сигнала (изображение ТТО) использовалась величина среднего контраста излучения вертолета, который вычислен по формуле (1). Размер изображения ТТО умещался в одном элемент $u_{n,m}$ (пикселе) изображения АФ $U_{N,M}$, что соответствует при линейном размере цели 4 м удалению 12 – 15 км. На выбранные массивы изображения АФ $U_{N,M}$ «накладывался» сигнал от ТТО. «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. [5]. В результате моделирования, изображение ТТО наблюдалось, затеняя участок АФ находящегося за ним. При каждом «наложении» в случайно выбранный пиксель $u_{n,m}$ массива изображения фона $U_{N,M}$, создавалось отношение сигнал/шум

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

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

Математическое моделирование включало предварительные вычисления по расчёту среднего арифметического значения μ яркости фонового шума массива изображения $U_{N,M}$ по формуле

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

где $u_{n,m}$ – элемент массива $U_{N,M}$, содержащий информацию о сигнале, пропорциональном яркости излучения фона, снятого с ячейки многоэлементного приёмника в n -й строке на m -м шаге; N – чётное число строк; M – чётное число столбцов массива.

Модуль адаптивного порогового значения по строкам рассчитывается по формуле

$$p1 = \frac{\mu}{k1N},$$

где $k1$ – весовой коэффициент, позволяющий адаптировать порог принятия решения по строкам.

Модуль адаптивного порогового значения по столбцам рассчитывается по формуле

$$p2 = \frac{\mu}{k2M},$$

где $k2$ – весовой коэффициент, позволяющий адаптировать порог принятия решения по столбцам.

Основная часть моделирования включала формирование МЧПК $W_{N,M}$, в каждый элемент (имеющий индексы n и m) которого записывали результат умножения в соответствии с формулой

$$w_{n,m} = u_{n,m} \times (-1)^{(n+m)}.$$

Элементы массива изображения $U_{N,M}$, обязательно должны иметь четное количество N строк и четное число M столбцов.

Для массивов $W_{N,M}$ были рассчитаны средние значения $\mu1_n$ по столбцам по формуле

$$\mu1_n = \frac{\sum_{m=1}^M u_{n,m}}{M}.$$

Затем значения $\mu1_n$ заносились в соответствующие элементы вектора $F1$.

В результате пороговой обработки, при которой сравнивались величины элементов $\mu1_n$ вектора $F1$ с порогом принятия решения $-p1 \leq \mu1_n \leq p1$, был получен выходной вектор $\tilde{F}1$ в соответствии с правилом:

при попадании величины элемента $\mu1_n$ вектора $F1$ в интервал принятия решения $[-p1, p1]$, величину элемента обнуляют: $\tilde{\mu}1_n = 0$;

если значение элемента $\mu1_n$ вектора $F1$ не попало в интервал принятия решения $[-p1, p1]$, ему присваивают единичное значение $\tilde{\mu}1_n = 1$.

Далее для массивов $W_{N,M}$ были рассчитаны средние значения $\mu2_m$ по столбцам по формуле

$$\mu2_m = \frac{\sum_{n=1}^N u_{n,m}}{N}.$$

Затем значения $\mu2_m$ заносились в соответствующие элементы вектора $F2$.

В результате пороговой обработки, при которой сравнивались величины элементов μ_{2_n} вектора $F2$ с порогом принятия решения $-p2 \leq \mu_{2_n} \leq p2$, был получен выходной вектор $\tilde{F}2$ в соответствии с правилом:

при попадании величины элемента μ_{2_n} вектора $F2$ в интервал принятия решения $[-p2, p2]$, величину элемента обнуляют: $\tilde{\mu}_{2_n} = 0$;

если значение элемента μ_{2_n} вектора $F2$ не попало в интервал принятия решения $[-p2, p2]$, ему присваивают единичное значение $\tilde{\mu}_{2_n} = 1$.

Полученные векторы $\tilde{F}1, \tilde{F}2$ были использованы для получения массивов $\tilde{E}_{N,M}$, в каждый элемент (имеющий индексы n и m) которого записывался результат умножения в соответствии с формулой

$$\tilde{e}_{n,m} = \tilde{\mu}_{1_n} \cdot \tilde{\mu}_{2_m},$$

где $\tilde{\mu}_{1_n}$ и $\tilde{\mu}_{2_m}$ – величины n -го и m -го элементов векторов $\tilde{F}1$ и $\tilde{F}2$ после пороговой обработки соответственно.

Массив $\tilde{E}_{N,M} = \tilde{F}1 \cdot \tilde{F}2$ был использован для создания фоноцелевого изображения на мониторе видеоприемного устройства. На мониторе формируется бинарное изображение фоноцелевой обстановки, где местоположение цели в сегменте полусферы обозначается на черном фоне отметкой белого цвета. Бинарное изображение фоноцелевой обстановки представлено на рисунке 2.

При попадании четного количества точечных отметок нескольких ТТО в одну строку или столбец возможен пропуск цели. Однако после завершения первого этапа обнаружения процесс селекции цели на фоне неба не прекращается, а повторяется многократно. Неизменное положение ТТО, в роли которого выступает воздушная цель, в одном и том же пикселе изображения является маловероятным событием. Поэтому пропуск цели на одном из этапов, за счет случайного попадания отметок ТТО в одну строку или столбец, не приводит к полной потере цели.

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

Таблица 1. Вероятности обнаружения ТТО на АФ при отношении сигнал/шум 2

Диапазон длин волн	Тип облачности			
	Ясно	Кучевая	Слоистая	Перистая
3-5 мкм	0,77	0,78	0,76	0,84
8-13 мкм	0,82	0,79	0,81	0,87

Как видно из сравнения видеоизображений, показанных на рисунках 1 и 2, при использовании предлагаемого способа отметка ТТО (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 ТТО 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 тепловизионным устройством 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.