

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАТРИЧНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ПЕЛЕНГАТОРА

© 2005 г. В. Н. Приходько, канд. техн. наук; В. В. Сунцов; Р. Ш. Хисамов, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: postmaster@gipo.kazan.ru

Изложены результаты исследований экспериментального образца ультрафиолетового пеленгатора (УФП) на основе матричного фотоприемного устройства. Рассмотрены вопросы автоматического обнаружения целей на мешающем неоднородном фоне. Приведено описание программно-аппаратной подсистемы обработки сигналов УФП. Предложен эффективный алгоритм обнаружения цели в реальном масштабе времени на основе экспериментально определенных параметров полезного сигнала и помех. Представлены результаты натурных испытаний.

Коды OCIS: 040.7190, 110.2970.

Поступила в редакцию 16.03.2005.

Введение

Одной из основных проблем при разработке оптических систем пеленгации является обеспечение необходимого уровня помехозащищенности, под которой понимается способность системы к обнаружению полезного сигнала на мешающем неоднородном фоне. С этой точки зрения использование ультрафиолетового (УФ) спектрального диапазона представляется весьма перспективным по сравнению с видимым и инфракрасным диапазонами. Дело в том, что атмосфера Земли содержит небольшое количество озона (так называемый “озоновый слой”), который практически полностью поглощает солнечное излучение с $\lambda < 300$ нм, создавая идеальные условия для обнаружения даже очень слабых высокотемпературных объектов, например факелов ракетных двигателей в приземном слое атмосферы.

В настоящей работе дается описание программно-аппаратной подсистемы обработки сигналов экспериментального образца УФ пеленгатора (УФП), обеспечивающей надежное обнаружение полезных сигналов в условиях фоновой засветки при реально достигнутых характеристиках светофильтра и матричного фотоприемного устройства (МФПУ) в целом. УФП предназначен для быстрого обнаружения и определения с заданной точностью угловых координат точечных источников УФ излучения (целей) в широком поле зрения ($92^\circ \times 92^\circ$ при фокусном расстоянии 7,3 мм). УФП относится к классу “смотрящих” приборов, не имеет подвижных частей и не требует системы охлаждения. Датчиком оптического сигнала

служит УФ МФПУ с фотокатодом на основе CsTe. Для получения выходного сигнала используется электронно-оптический преобразователь с микроканальным усилением, работающий в режиме счета фотонов, и фотоприемник на базе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Структурная схема прибора представлена на рис. 1. Оптическая система, состоящая из защитного окна, светофильтра и объектива, формирует на поверхности фотокатода УФ изображение. Выходной сигнал считывается с ПЗС-матрицы в стандартном телевизионном формате. Модуль предварительной обработки сигнала преобразует аналоговый сигнал в цифровой вид. Вычислительный модуль анализирует последовательность оцифрованных кадров, принимает решение о наличии или отсутствии полезных сигналов, определяет их координаты и передает информацию в систему контроля и управления (СКУ) через последовательный канал RS-485. Под СКУ подразумевается любая система, использующая данные УФП. Помимо координат, могут передаваться дополнительные признаки, например амплитуда и время накопления сигнала, которые характеризуют яркость визируемых объектов и уровень фона. Более подробно конструкция прибора описана в [1].

В основу предлагаемого алгоритма работы системы положено экспериментальное определение параметров изображений полезных сигналов и помех, полученных для достаточно большого набора входных воздействий. Такой подход позволяет одновременно учесть как физические параметры излучения объектов, так и реальную передаточную характеристику прибора.

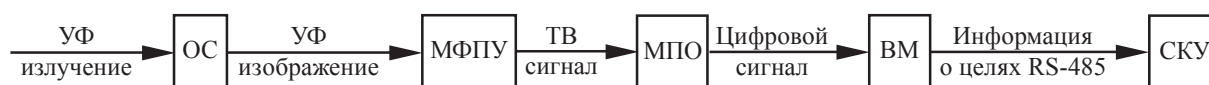


Рис. 1. Структурная схема УФП. ОС – оптическая система, МПО – модуль предварительной обработки, ВМ – вычислительный модуль, СКУ – система контроля и управления.

Программно-аппаратные средства

Для определения параметров выходных сигналов и разработки алгоритмов обнаружения был создан стенд полунатурного моделирования, состоящий из следующих компонентов: МФПУ, плата компрессора, плата цифрового ввода/вывода, персональный компьютер, программное обеспечение (ПО).

Плата компрессора представляет собой специализированное устройство для аппаратного сжатия входного потока данных. Пороговое устройство пропускает только сигналы, превышающие заданное значение (порог). Порог выбирается таким образом, чтобы обеспечить регистрацию одноэлектронных сигналов и исключить геометрический шум МФПУ. Сигналы, превышающие порог, оцифровываются в 8-разрядное число (амплитуду сигнала) и передаются в компьютер.

Матрица МФПУ имеет 768×288 элементов размером 17×34 мкм. Каждая пара соседних по строке площадок объединяется в одну логическую путем суммирования сигналов от них, вследствие чего размерность матрицы по строке сокращается вдвое. Информация каждого кадра поступает в виде переменного количества блоков данных, каждый из которых содержит амплитуду и координаты засвеченной площадки.

Синхронизация работы ПО с работой МФПУ происходит в момент кадрового синхроимпульса подачей признака конца кадра от платы компрессора в компьютер. ПО работает в циклическом режиме, длительность цикла определяется кадровой частотой МФПУ и составляет 20 мс.

Алгоритм работы ПО в каждом цикле следующий: ожидание признака готовности данных нового кадра, обработка кадра с параллельным вводом данных следующего кадра из платы компрессора по сигналам прерываний, переход к началу цикла.

Программа написана на языке C++ и работает под управлением операционной системы Windows'98. Для взаимодействия с платой ввода/вывода разработан специальный драйвер устройства.

Для обнаружения целей разной яркости и селекции по форме и размеру в памяти программы формируются и обновляются в режиме реального времени пять массивов с размерностями 384×288 , соответствующих кадрам с временами накопления τ_n 20, 40 мс, 0,4, 1 и 2 с. Они получают суммированием необходимого количества исходных кадров с $\tau_n = 20$ мс. Суммирование проводится по принципу "конвейера", при этом одновременно с добавлением данных "нового" кадра вычитаются данные самого "старого". Во всех фазах работы программы исключается обработка всего кадра, связанная с большими вычислительными затратами, при этом

программа имеет полную информацию о сигналах всего кадра при разном времени накопления.

Из-за неполного подавления светочувствительным фоновым излучением первоначальный входной поток данных, даже с учетом компрессии, слишком велик для обработки его целиком с использованием сложных алгоритмов. Поэтому на первом этапе применяется простой алгоритм пороговой селекции, в результате чего для дальнейшей, более сложной обработки, остается небольшое количество целеподобных объектов. Адаптация порога к неоднородной во времени и пространстве фоновой ситуации для каждого τ_n выполняется следующим образом. Матрица делится на достаточно большое количество (24×18) квадратных областей. После ввода данных очередного кадра для всех τ_n в каждой области вычисляются среднее значение и среднее квадратичное отклонение (СКО) сигналов, на основании которых определяется величина порога в каждой области для следующего кадра. Координаты площадок, на которых сигнал превысил порог, заносятся в список целей.

Алгоритм работы программы представлен на блок-схеме (рис. 2). Блок формирования данных с частотой кадров передает видеоданные в блок суммирования кадров (БСК), блок формирования порогов (БФП) и пороговый селектор (ПС). БСК обновляет массивы кадров для пяти τ_n . БФП рассчитывает массивы пороговых значений. ПС обновляет списки целей для каждого τ_n . Исходный поток данных используется ПС для определения координат

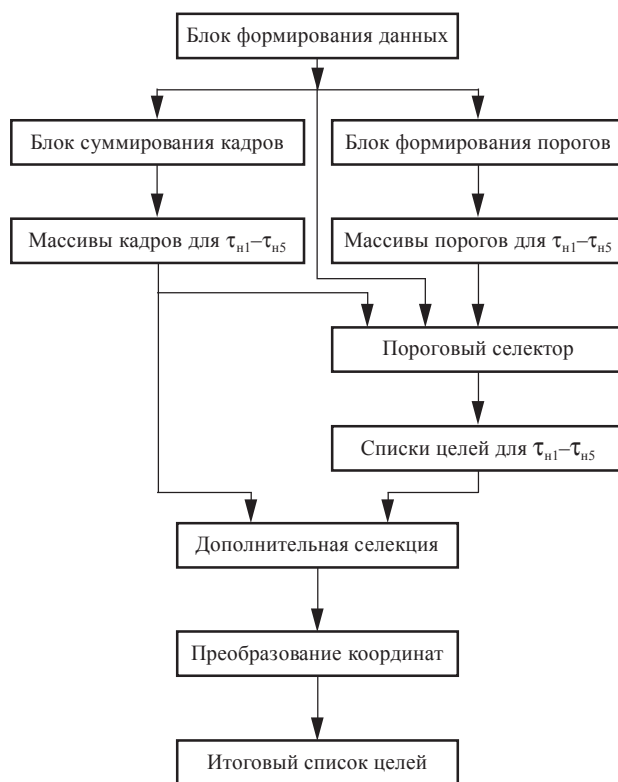


Рис. 2. Алгоритм работы программы.

$I = 0,85 \text{ A}$								
$I = 1,05 \text{ A}$								
$I = 1,3 \text{ A}$								

Рис. 3. Изображения целей разной яркости.

засвеченных площадок. Элементы массивов в местах засветки анализируются на предмет превышения порогов. Списки целей передаются в блок дополнительной селекции, в котором для определения пространственных признаков объекта анализируются сигналы в некоторой окрестности (стробе) площадки, сигнал с которой превысил порог. Для целей, прошедших дополнительную селекцию, определяются азимут и угол места по их координатам в матрице. Цели заносятся в единый список целей в порядке уменьшения яркостей.

Исследование параметров целей

В качестве имитатора цели использовалась лампа ТРШ1500-2300, установленная на расстоянии 4 м от МФПУ. На рис. 3 представлены фрагменты УФ изображений, полученные при наблюдении целей разной яркости. Яркость регулировалась изменением тока накала лампы (I). При $I = 0,85 \text{ A}$ сигнал наблюдался в среднем в одном из 10–15 последовательных кадров (пустые фрагменты на рисунке не показаны). Очевидно, что в данном случае сигнал обусловлен возникновением одного фотоэлектрона за время экспозиции кадра. Выяснилось, что вследствие aberrаций оптической системы засвечиваться может разное количество площадок, координаты засвеченных площадок имеют разброс на 2–3 площадки относительно среднего значения. Поэтому в случае слабой цели определение ее параметров по одному отдельному кадру не представляется возможным. При $I = 1,05 \text{ A}$ пропусков цели практически не наблюдалось. Можно предположить, что в этом случае МФПУ регистрирует возникновение за время экспозиции двух-трех фотоэлектронов. В этом случае также наблюдается нестабильная картина. В последнем случае ($I = 1,3 \text{ A}$) имитируется очень яркая цель. Изображение формируется в результате возникновения большого количества фотоэлектронов. В этом случае в каждом кадре наблюдается стабильное изображение.

На рис. 4 представлены УФ изображения кадров с $\tau_n = 0,02, 0,04, 0,4, 1$ и 2 c , полученных суммирова-

	$\tau_n, \text{ c}$				
	0,02	0,04	0,4	1	2
$I = 0,85 \text{ A}$					
$I = 1,05 \text{ A}$					
$I = 1,3 \text{ A}$					

Рис. 4. Изображения, полученные путем суммирования кадров.

нием исходных кадров. Видно, что с увеличением времени накопления изображения слабой и средней целей приобретают достаточно определенный вид.

Можно сделать вывод, что сигнал от точечной цели представляет собой группу засвеченных площадок, причем основная часть энергии сигнала сосредоточена в пределах строба с размером примерно 5×5 площадок. В такой строб вписывается как сигнал от очень яркой цели независимо от времени накопления, так и сигнал от очень слабой цели при большом времени накопления.

Исследование параметров фона

Под фоном понимается рассеянное УФ излучение естественного происхождения. Основная часть фоновых сигналов исключается на этапе пороговой селекции. Зависимость оптимальной величины порога от интенсивности фона и времени накопления была получена экспериментальным путем. Для этого проводилась регистрация фоновое излучения разной интенсивности в течение длительного времени. Наблюдались как естественные УФ источники (чистое небо), так и искусственные (рассеянное излучение лампы ДДС-30 в помещении). Уровень фона характеризовался средним значением $S_{\text{сред}}$ и

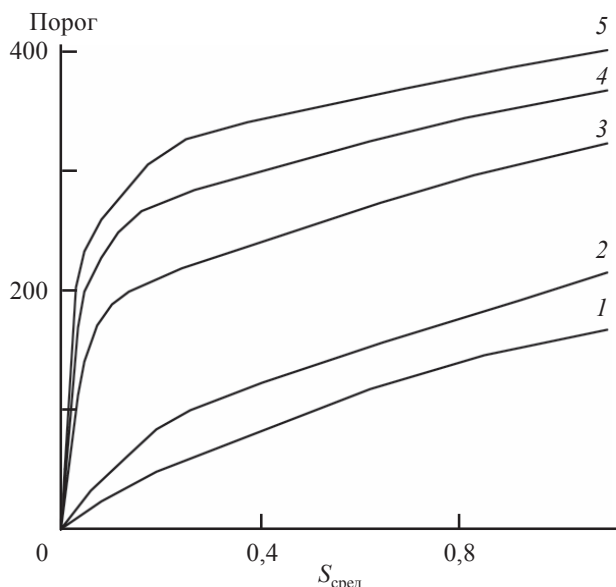


Рис. 5. Зависимости порога от интенсивности фона и времени накопления. $\tau_n = 0,02$ (1), $0,04$ (2), $0,4$ (3), 1 (4), 2 с (5).

СКО фоновых сигналов. Оказалось, что для фоновых сигналов СКО однозначно связано с $S_{\text{сред}}$, поэтому порог может быть представлен функцией одной из этих величин. На рис. 5 приведены графики полученных зависимостей, где $S_{\text{сред}}$ вычислялось как средняя сумма амплитуд сигналов на одной площадке за 1 с. Оптимальным считалось такое значение порога, при котором наблюдалось не более 20–30 случаев его превышения за кадр.

Исследование внутреннего шума МФПУ

Было выявлено два типа внутреннего шума МФПУ. Во-первых, это достаточно редкие одиночные импульсы случайной амплитуды в произвольном месте матрицы. Во-вторых, относительно стабильные ложные сигналы, которые время от времени появляются в произвольном месте и существуют достаточно долго. Характерным признаком таких сигналов является их большая амплитуда и наличие на одной или двух соседних площадках.

Методы селекции цели

Описанный выше процесс предварительной пороговой селекции направлен лишь на сокращение объема обрабатываемой информации и не обеспечивает надежного различения целей от помех. Для решения этой задачи был проведен тщательный анализ изображений целей и фоновых образований на предмет выявления признаков, позволяющих идентифицировать цель по ее УФ изображению. Все рассмотренные методы селекции основаны на определении параметров УФ изображения в пределах строба 5×5 , центром которого является площадка,

сигнал на которой превысил порог. Для определения параметров изображения в окрестности цели использовался строб 9×9 с центром в этой же точке.

Алгоритм селекции заключается в выполнении нескольких последовательных проверок на соответствие параметров изображения в стробе определенным критериям:

1. Определяется количество засвеченных площадок в стробе. Изображение идентифицируется как помеха, если это количество меньше определенного значения. Это связано с тем, что сигнал от фотодиода, как правило, приводит к засветке нескольких близко расположенных площадок ПЗС-матрицы. Наличие в стробе не более одной-двух ярко засвеченных площадок должно рассматриваться как ложный сигнал, обусловленный внутренним шумом.

2. Проводится пороговая селекция по сумме амплитуд аналогично описанной выше пороговой селекции отдельных сигналов. С пороговыми значениями сравнивается сумма амплитуд сигналов в стробе ($\Sigma_{5 \times 5}$). Зависимость оптимального значения порога от уровня фона определялась экспериментально. Графики полученных зависимостей представлены на рис. 6. Использование $\Sigma_{5 \times 5}$ в качестве амплитудного признака позволяет учесть распределение сигнала от точечного источника по нескольким площадкам ПЗС-матрицы. Применение данного метода селекции существенно снижает частоту ложных тревог без заметной потери чувствительности к полезному сигналу. (Следующие два метода селекции основаны на использовании пространственных признаков.)

3. Проверяемая площадка должна иметь максимальный по стробу сигнал. Согласно этому критерию при наличии нескольких близко расположенных сигналов, превысивших порог, строб будет построен вокруг самого яркого из них, менее яркие

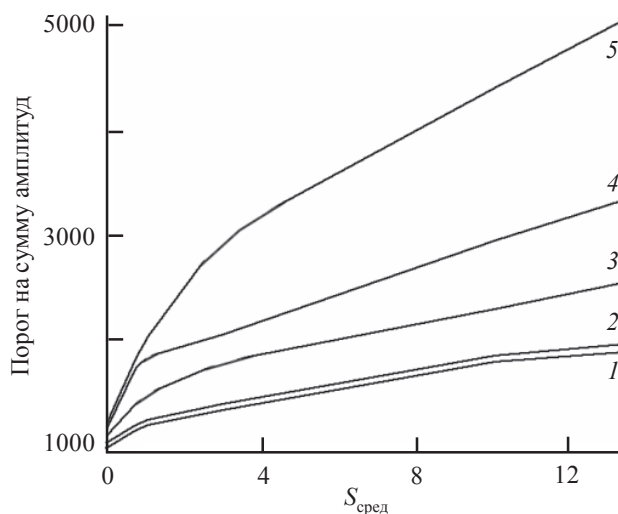


Рис. 6. Зависимости порога по сумме амплитуд от интенсивности фона и времени накопления. $\tau_n = 0,02$ (1), $0,04$ (2), $0,4$ (3), 1 (4), 2 с (5).

будут рассматриваться как часть размытого изображения цели. Кроме того, исключаются из рассмотрения фрагменты, не имеющие локального максимума интенсивности.

4. Сравнивается значение $\Sigma_{5 \times 5}$ с суммой сигналов в строке 9×9 ($\Sigma_{9 \times 9}$). Отношение $\Sigma_{5 \times 5} / \Sigma_{9 \times 9}$ должно быть больше определенного значения. Согласно данному критерию полезный сигнал должен представлять собой локальный максимум интенсивности в некоторой окрестности с учетом его распределенности по строку 5×5 . (Два последних метода позволяют исключить из рассмотрения фрагменты крупноразмерных объектов независимо от их формы, реализуя функции размерного селектора.)*

5. Идентификация ситуации, когда в строб попадает ложный сигнал МФПУ большой амплитуды, а несколько соседних площадок засвечены фоновым излучением. Изображение в строке при этом может удовлетворять всем описанным выше критериям. Для исключения помехи такого рода использовалась экспериментально полученная зависимость максимального возможного для цели значения $\Sigma_{9 \times 9}$ ($\Sigma_{9 \times 9 \max}$) от числа засвеченных в строке площадок. Ложный сигнал дает большой вклад в сумму сигналов, но не приводит к увеличению числа засвеченных площадок, поэтому в случае $\Sigma_{9 \times 9} > \Sigma_{9 \times 9 \max}$ сигнал считается помехой.

6. Следующий метод применяется только для кадров с большим временем накопления ($\tau_n = 0,4, 1$ и 2 с) для обнаружения ситуации, когда в пределах τ_n на относительно короткое время ($5-20$ исходных кадров) в строке возникает ложный сигнал. Предыдущий метод не селектирует помеху такого рода при большом времени накопления и малой интенсивности фона. Количество засвеченных площадок может оказаться достаточно большим при относительно небольшом суммарном сигнале. Был разработан алгоритм для определения факта засветки одной и той же площадки строка в большом количестве кадров, который заключается в следующем. Подсчитывается общее число засветок площадок строка N во всех кадрах за все время накопления и сравнивается с числом засвеченных площадок в суммарном кадре N_Σ . Ложный сигнал вносит вклад в N , но не

вносит в N_Σ . Поэтому слишком малое отношение N_Σ / N является признаком помехи. Минимально допустимые значения N_Σ / N для разных τ_n были получены экспериментально.

7. Рассмотренные методы реализуют достаточно эффективный алгоритм селекции точечной цели. Тем не менее, испытания в условиях интенсивной фоновой засветки показали, что иногда в исходных кадрах наблюдаются фрагменты изображения, не отличимые от цели. Селектировать их можно по одному единственному признаку – они не повторяются в двух кадрах подряд в одном и том же месте. Поэтому был введен дополнительный критерий, согласно которому изображение в строке при $\tau_n = 0,02$ с считается целью только в том случае, если в предыдущем кадре в этом же строке была засвечена хотя бы одна площадка, даже если сигнал от нее не превышал порог.

Выбор оптимальных значений критериев распознавания и оценка эффективности методов селекции

Эффективность методов селекции оценивалась по двум показателям. Во-первых, они должны обеспечивать низкую частоту ложных тревог $f_{лт}$. Во-вторых, они не должны приводить к снижению вероятности правильного обнаружения цели $P_{поц}$.

Значения $f_{лт}$ и $P_{поц}$ зависят от значений критериев распознавания (КР), используемых в ряде описанных выше методов селекции (методы 2, 4, 6 и 7). Значения КР подбирались таким образом, чтобы $f_{лт}$ и $P_{поц}$ удовлетворяли заданным значениям.

При низкой $f_{лт}$ (порядка 10^{-3} Гц) ее экспериментальное определение с достаточной точностью не представляется возможным, так как для этого требуется проведение испытаний в течение слишком длительного времени. Методы расчета $f_{лт}$ для данного типа МФПУ и применяемых методов селекции не разработаны. Тем не менее, получение оценки $f_{лт}$ “сверху” возможно экспериментальным путем.

Подбор КР для обеспечения значения $f_{лт}$, не превышающего заданного значения, проводился следующим образом. Для повторяемости результатов использовались записи реализаций фона. Устанавливались первоначальные значения, приводящие к заведомо большому значению $f_{лт}$ – порядка 1 Гц. Подсчитывалось количество ложных срабатываний за $1-2$ мин. Определялась зависимость $f_{лт}$ от значения каждого КР. Зависимости экстраполировались в сторону уменьшения $f_{лт}$. В соответствии с ними устанавливались значения КР, отвечающие относительно низкой $f_{лт}$ – порядка 10^{-2} Гц. Эксперимент повторялся при большем времени наблюдения. По результатам эксперимента зависимости корректировались. За несколько подобных итераций $f_{лт}$ доводилась до $1-2$

* Был исследован метод, основанный на геометрических признаках. Определялось отношение (K) длины изображения к его ширине как отношение главных моментов инерции изображения [2] по значениям сигналов в строке 5×5 и 9×9 . Для центрально-симметричного объекта $K = 1$. Предполагалось, что K должно быть близким к единице для точечного источника, таким образом можно исключить фоновые сигналы случайной неправильной формы. Однако данный метод на практике оказался неприменимым: значения K изображения цели имеют слишком большой разброс и сильно перекрываются с диапазоном значений K фоновых сигналов.

в час по результатам нескольких испытаний. После этого КР корректировались в сторону уменьшения $f_{\text{лт}}$ с некоторым коэффициентом запаса.

Применение методов селекции может привести к снижению $P_{\text{поц}}$ при неоптимальном подборе значений КР или неправильном выборе самих критериев распознавания. Проверка влияния методов селекции на $P_{\text{поц}}$ проводилась для каждого времени накопления отдельно и выполнялась в следующей последовательности. Наблюдался имитатор цели (лампа ТРШ1500-2300) в условиях фоновой засветки. Яркость лампы подбиралась таким образом, чтобы $P_{\text{поц}}$ составляла примерно 0,5 при работе всех методов селекции. $P_{\text{поц}}$ определялась как отношение числа кадров, в которых цель была обнаружена, к общему числу кадров при времени наблюдения, равном примерно 1 мин. Затем алгоритмы селекции с помощью специальных функций ПО выключались из работы, за исключением первоначальной пороговой селекции с уменьшенными пороговыми значениями. Определялась $P_{\text{поц}}$ при неработающих алгоритмах селекции. Выяснилось, что значение $P_{\text{поц}}$ практически не зависит от включения или выключения алгоритмов селекции.

Результаты натурных испытаний УФП

ПО, разработанное и отлаженное на стенде полунатурного моделирования, с минимальными изменениями было перенесено в вычислительный модуль УФП, выполненный в формате PC/104. Управляющая программа была модифицирована в 32-разрядную программу MS-DOS. Для записи кадров в реальном масштабе времени к вычислительному модулю подключался жесткий диск.

Были проведены натурные испытания УФП по экспериментальному определению дальности обнаружения реальных целей по УФ излучению. Изделие устанавливалось на неподвижном стенде на разных расстояниях от УФП. Одновременно регистрировалось излучение контрольного источника – лампы ТРШ1500-2300, установленной на расстоянии 4 м от УФП при токе накала 0,835 А.

Максимальная дальность при угле установки изделия 10° от линии визирования составила 2500 м при времени обнаружения 1 с.

На рис. 7 и 8 приведены фрагменты записей сигналов МФПУ на максимальной дальности. На рис. 7 представлены УФ изображение центральной части

		$\tau_n, \text{с}$				
		0,02	0,04	0,4	1	2
Кадр 1000 (нет цели)	Исходное изображение					
	После пороговой					
Кадр 1260 (есть цель)	Исходное изображение					
	После пороговой					

Рис. 7. Центральная часть поля зрения с угловыми размерами $40^\circ \times 40^\circ$. КИ – изображение контрольного источника, Ц – изображение цели.

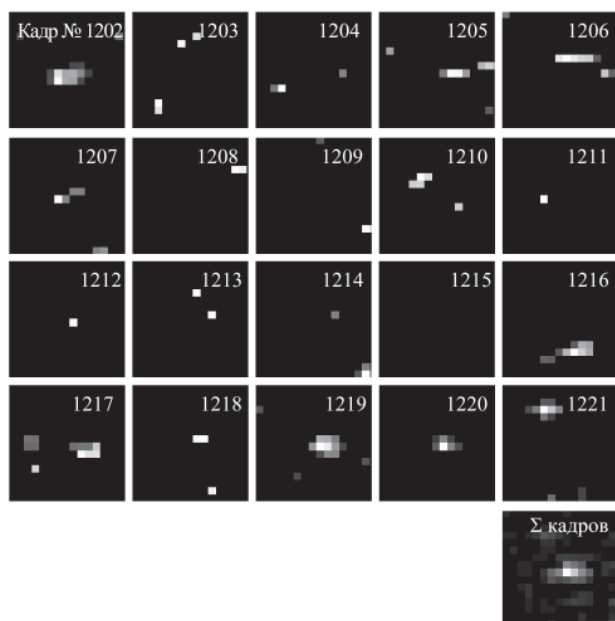


Рис. 8. УФ изображения исходных кадров и кадра с временем накопления 0,4 с, полученного путем их суммирования (справа внизу), в окрестности цели 16×16 элементов матрицы.

поля зрения с угловыми размерами $40^\circ \times 40^\circ$ для кадров с разными временами накопления в условиях наличия и отсутствия цели и результат работы порогового селектора. Автоматическое распознавание цели было зафиксировано при времени накопления 1 с. На рис. 8 показан процесс получения кадра с временем накопления 0,4 с посредством суммирования 20 исходных кадров. Изображена окрестность цели 16×16 элементов матрицы (угловые размеры

$\sim 5^\circ \times 5^\circ$). В результате суммирования кадров формируется детерминированный сигнал, который может быть идентифицирован как цель.

Заключение

Предложен эффективный алгоритм обнаружения точечных высокотемпературных объектов по УФ излучению, основанный на экспериментально определенных параметрах полезных сигналов и помех. Рассмотрен ряд методов селекции, учитывающих особенности формирования УФ изображения конкретным типом МФПУ. Проведена оценка эффективности применения предложенных методов селекции. Лабораторные исследования и натурные испытания показали высокую надежность и эффективность принятых технических и алгоритмических решений. Результаты проделанной работы могут найти практическое применение при проектировании оптико-электронных систем защиты летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хисамов Р.Ш., Приходько В.Н. Оптико-электронные системы обнаружения и сопровождения точечных динамических объектов для авиационных носителей // Сб. тр. 2-й Междунар. науч.-практич. конф. "Авиакосмические технологии и оборудование". Казань, 2004.
2. Писаревский А.Н., Чернявский А.Ф., Афанасьев Г.К., Кухарчик П.Д., Лебедев В.И., Потапов А.В., Ревинский В.В., Тихоненко О.М. Системы технического зрения. Ленинград: Машиностроение, 1988. С. 144–145.