

АНАЛИЗ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАЗЕМНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НАБЛЮДЕНИЯ

© 2012 г. В. А. Балоев*, канд. техн. наук; С. С. Мишанин**;
В. А. Овсянников*, доктор техн. наук; В. Л. Филиппов*, доктор физ.-мат. наук;
С. Е. Якубсон**, канд. техн. наук; В. С. Яцык*, канд. техн. наук

* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

** 3 ЦНИИ МО, Москва

E-mail: nrogipo@tnpko.ru

Обсуждены методы повышения эффективности видовых оптико-электронных комплексов наземного базирования, основанные на использовании дополнительных демаскирующих признаков объектов и спектральной адаптации каналов комплексов. Сделан вывод о целесообразности реализации в этих комплексах активно-импульсного дальностно-яркостного канала, регистрирующего объемную форму объектов и ретроотраженное излучение их оптико-электронных систем.

Ключевые слова: оптико-электронная система, демаскирующие признаки объектов, изображение, эффективность.

Коды OCIS: 110.3000.

Поступила в редакцию 19.05.2011.

Введение и постановка задачи

Многоспектральные оптико-электронные комплексы наблюдения (ОЭКН), используемые, в частности, в сухопутных войсках, предназначены для ведения круглосуточной разведки в сложной погодной и фоноцелевой обстановке [1, 2]. Состоящие на вооружении армий различных стран мобильные комплексы наземной разведки и наведения оружия (см. “Jane’s Electro-Optic Systems, 2008–2009”) оснащены в основном телевизионными и тепловизионными каналами, а также лазерными дальномерами [2, 3]. При этом в основе идеологии построения ОЭКН не в последнюю очередь учитывается принцип минимальной достаточности спектральных каналов, обеспечивающих адекватную оценку ситуации на местности, с учетом наиболее общего критерия оптимальности “стоимость-эффективность”.

Существующие в настоящее время ОЭКН традиционно используют в качестве демаскирующих признаков типовых объектов наблюдения – военной и транспортной техники – их тепловой или яркостный контраст, размеры и форму. Поэтому повышение пороговой чувствительности и углового разрешения еще остается приоритетным направлением раз-

вития ОЭКН. Однако сегодня разработчики ОЭКН приближаются к тому уровню, когда прямое наращивание пороговой чувствительности и углового разрешения уже не дает пропорционального прироста эффективности комплекса. С другой стороны, на эти параметры ОЭКН наложены определенные принципиальные ограничения, а именно: пороговая чувствительность ограничена фотонным шумом фона, а угловое разрешение – дифракцией объектива. Поэтому резервы повышения эффективности перспективных ОЭКН логично искать в регистрации и привлечении к анализу дополнительных специфических характеристик оптического поля, претендующих на роль устойчивых демаскирующих признаков объектов. Имеющиеся в настоящее время сведения о таких признаках позволяют ставить вопрос об оценке целесообразности и соотношениях обмена потенциально возможных пороговой чувствительности и углового разрешения каналов ОЭКН на их способность регистрировать эти дополнительные демаскирующие признаки. Использование данных признаков может существенно повысить эффективность ОЭКН и позволить оператору за более короткое время оценивать и прогнозировать развитие наблюдаемой ситуации. Их регистрация может

дать и существенный выигрыш в достоверности интерпретации получаемой информации. Вместе с тем при разработке высокоэффективных ОЭЖН нового поколения должны быть не только рассмотрены перспективы обеспечения принятия решений более высокого иерархического уровня (например, не только классифицировать, но и идентифицировать объект) за счет привлечения нетрадиционных демаскирующих признаков объектов, но и уточнены оценки оптимального состава информационных каналов ОЭЖН [4].

Другим направлением совершенствования ОЭЖН является создание их адаптивных аналогов, т. е. комплексов с управляемыми элементами (параметрами). Под адаптацией ОЭЖН понимается процесс изменения параметров и структуры комплекса по мере поступления информации об изменениях параметров объекта, фона, атмосферы, носителя, помех и самого комплекса с целью устранения избыточности информации и достижения оптимальности заданных рабочих характеристик. Применение адаптивных ОЭЖН позволяет оптимизировать объем получаемой видеoinформации, улучшить ее качество и существенно снизить затраты на ее последующую обработку и дешифрирование. С этой целью в адаптивных ОЭЖН измеряются и оцениваются текущие параметры внешней среды, носителя и аппаратуры [5].

Имеющиеся к настоящему времени результаты теоретических и экспериментальных исследований показывают, что главными задачами, которые необходимо решить на пути создания адаптивных ОЭЖН, являются уменьшение искажающего влияния турбулентности и замутненности атмосферно-оптического канала, приспособление к различным фоновым ситуациям и условиям освещения и обеспечение возможности функционирования ОЭЖН в любое время года и суток в различных регионах.

В связи с изложенным, нашей задачей является критический анализ возможностей повышения эффективности ОЭЖН путем реализации некоторых дополнительных демаскирующих признаков объектов военно-транспортной техники (ВТТ) и одного из важнейших видов адаптации – спектральной адаптации, заключающейся в оптимальном выборе спектральных рабочих диапазонов основных (теlevisionного и телевизионного) каналов этих комплексов.

1. Использование дополнительных демаскирующих признаков

Объемная форма объектов. Одним из наиболее информативных демаскирующих признаков объектов ВТТ является их объемная форма – геометрический профиль, регистрируемый, например, при стереоскопическом наблюдении. Однако для подвижных ОЭЖН создать необходимое пространственное разнесение (базу) оптико-электронных каналов практически невозможно. Альтернативой стереоскопическому наблюдению является использование активно-импульсного дальностно-яркостного канала (лазерного канала видения – ЛКВ, длина волны излучения 1,06 мкм или 1,55 мкм), обеспечивающего возможность формирования как яркостных, так и дальностных изображений, яркость элементов которых пропорциональна расстоянию до соответствующих участков поля объектов. Эффективность этого канала не зависит от энергетического состояния объектов и определяется, главным образом, оптическими характеристиками объекта и фона, а также условиями локации. Выполненные в ГИПО соответствующие эксперименты и анализ дальностных изображений свидетельствуют о возможности профилирования объектов по глубине сцены, благодаря чему информация об этих объектах принципиально отличается от информации, которую дают яркостные каналы ОЭЖН [6]. Это позволяет оператору быстрее и точнее оценивать обстановку на местности, что существенно повышает эффективность использования ОЭЖН (см. рис. 1–3).

Рисунок 1 представляет яркостное изображение сюжета “техника-строения-фон”, на котором может быть выявлена лишь одна деталь, которая принципиально отличает его от аналога, получаемого пассивными каналами ОЭЖН: в центре снимка виден блик от оптико-электронной системы (ОЭС).

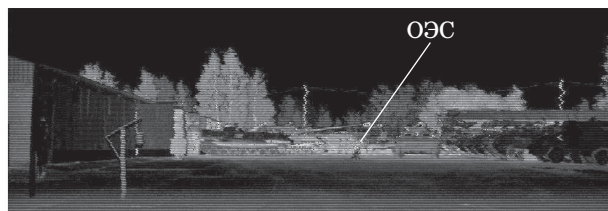


Рис. 1. Яркостное изображение: регистрация сигнала “обратного блеска”.

Рисунок 2 иллюстрирует информационные возможности дальностных изображений, последовательно показывающих “продвижение” контролируемой оператором зоны наблюдения в глубь перспективы. При этом, как видно, предъявляются сюжеты, на которых исключен фон заднего плана, а в пределах выделенного диапазона дальностей последовательно выявляются новые фрагменты поля объектов – образцы ВТТ и люди, находящиеся на соответствующем удалении.

На рис. 3 показан интегрированный ряд дальностных изображений, причем каждому диапазону дальностей присвоен определенный цвет изображения в соответствии с приводимой шкалой. Указанная технология электронной обработки видеосигналов существенно повышает дешифрируемость данных изображений.

Основным перспективным достоинством ЛКВ является возможность воспроизведения объемной формы объектов, являющейся до-

полнительным демаскирующим их признаком. В практике создания ЛКВ указанное направление связывается и с успехами в создании так называемых флэш-приемников, пример результатов использования которых в экспериментальных нанотехнологиях приведен на рис. 4 [7]. В любом случае регистрация объемной формы обеспечивает более высокую эффективность канала при распознавании объектов, в том числе автоматическом, поскольку пик корреляционной функции (критерий распознавания) здесь оказывается более острым [8]. Другие преимущества данного канала – это возможность дальнометрирования и выделения объектов, в частности по их силуэту, из фона и внешних помех, естественных или преднамеренных, снижение влияния излучения атмосферы, обеспечение возможности наблюдения объектов, расположенных, например, за транспарантными маскировочными покрытиями или редким кустарником. Все это особенно важно при обнаружении движущихся объектов или изменении условий их

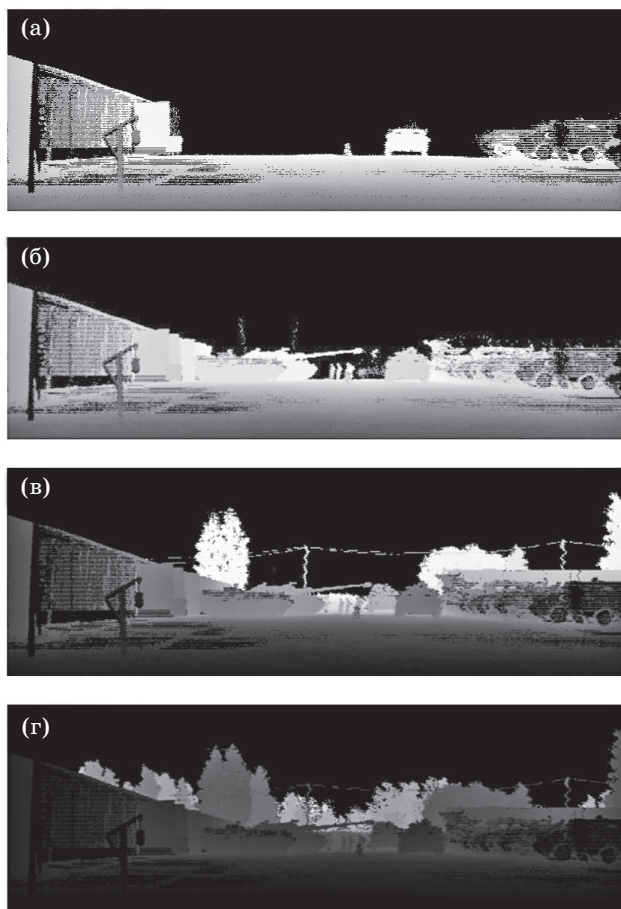


Рис. 2. Дальностные изображения на разных расстояниях. а – D , б – $D + 26$ м, в – $D + 73$ м, г – $D + 326$ м.

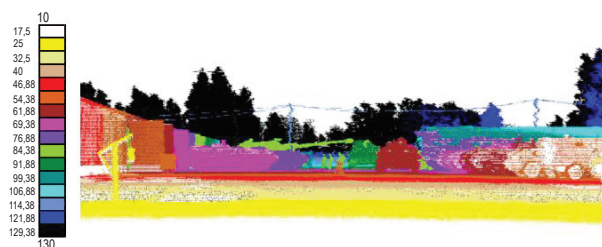


Рис. 3. Формирование на мониторе ЛКВ ряда текущих дальностных изображений, соответствующих различным расстояниям до наблюдаемой сцены.

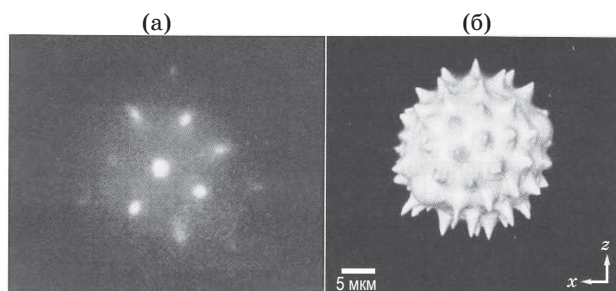


Рис. 4. Изображение пыльцы растения с размерами 25 мкм, полученное при регистрации одного изображения (а) и множества изображений по глубине сцены (б).

наблюдения. Однако качество формируемых ЛКВ-изображений может быть снижено из-за наличия спеклов – наложенного на изображение высококонтрастного мелкозернистого шума, обусловленного интерференцией излучения, отраженного от шероховатой поверхности объекта, а также сцинтилляционного шума, вызванного воздействием на зондирующие лазерные импульсы турбулентности атмосферы [9, 10].

Отметим, что надежная оценка эффективности ЛКВ в режиме формирования дальностных изображений затруднительна по причине отсутствия соответствующих достаточно полных и достоверных экспериментальных данных. Однако в качестве верхней границы показателей эффективности канала при восприятии объемной формы объектов, по-видимому, допустимо принять оценку, согласно которой номинальные значения критериев Джонсона, определяющих, например по методике [11], вероятность обнаружения и распознавания объектов, должны быть уменьшены в два раза [12]. Хотя, по мнению авторов [13], эффективность регистрации объемной формы объектов может быть даже выше (“3D-датчики дают многократное преимущество по дальности идентификации по сравнению с системами типа FLIR”), все же наиболее реальной, на наш взгляд, является оценка, выполненная в [14], в соответствии с которой дальность идентификации с вероятностью 0,9, например, вооруженного человека при восприятии его объемного профиля примерно на 30% больше, чем по плоскому изображению. Среднее значение критерия Джонсона (определяемое, как правило, для вероятности вскрытия 0,5) для объемных изображений при этом оказывается в 1,2–1,3 раза меньше, чем для плоских. Основным тактический недостаток ЛКВ – отсутствие скрытности – может быть нивелирован сокращением времени использования канала.

“Обратный блеск” – блики ОЭС объектов. Высокая насыщенность ВТТ современными ОЭС разведки и управления обуславливает возможность повышения эффективности ОЭЖН за счет регистрации “обратного блеска”, когда при подсвете лазерным излучением оптических световозвращающих элементов ОЭС ВТТ вследствие автоколлимационного эффекта системы объектив–фотоприемник часть энергии подсвета возвращается в сторону облучателя узким пучком, создавая световой отклик – блик [15] (см. рис. 1).

Использование лазерного принципа обнаружения ОЭС может повысить и живучесть ОЭЖН, поскольку наличие отраженного излучения свидетельствует о нахождении ОЭЖН в поле зрения облучаемой ОЭС и, следовательно, о возможности его поражения огневыми средствами противника. Кроме того, локационный способ обнаружения ОЭС позволяет решать задачи, реализация которых другими способами затруднена, например: определение факта и степени повреждения ОЭС, идентификация и оценка параметров ОЭС, а значит, и распознавание объекта, в том числе замаскированного, в состав которого входит эта ОЭС.

Отметим, что достаточно обоснованный прогноз эффективности любого конкретного ЛКВ при обнаружении бликов ОЭС по методике, изложенной, например, в [15], весьма затруднен априорной оценкой так называемого показателя световозвращения $R = I/E$, представляющего собой отношение силы излучения I , отраженного ОЭС, к облученности E объектива зондируемой ОЭС. Данный показатель варьируется в чрезвычайно большом диапазоне (до 3-х порядков) для различных типов ОЭС и отдельных их образцов внутри типа, причем он существенно зависит от угла визирования цели, дальности до нее, длины волны излучения, аберраций объектива ОЭС (кривизны поля, хроматизма) и погрешностей юстировки и сборки. Это означает, что при проектировании ЛКВ для обнаружения ОЭС по ретроотраженному излучению следует прежде всего ориентироваться на экспериментальные оценки показателя световозвращения, взятые с определенным запасом – для обеспечения гарантированного уровня эффективности канала.

Поляризация излучения объектов. Одним из демаскирующих признаков объектов, который может быть использован для повышения эффективности ОЭЖН, является их поляризационный контраст, обусловленный различием коэффициентов излучения объекта в спектральном рабочем диапазоне канала для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости выхода его из поверхности объекта и перпендикулярно ей соответственно.

Методика оценки эффективности поляризационного теплового канала ОЭЖН достаточно детально изложена в [11]. Оценивая перспективность использования поляризационных демаскирующих признаков объектов, отметим, что специфика объединения и обработки

сигналов, снимаемых с элементов матричного фотоприемного устройства (ФПУ) канала, в данном случае приводит к получению поляризационных изображений, которым отвечает в два раза более низкое (худшее) разрешение на местности, чем для пассивного теплового канала ОЭЖН. Это обстоятельство, наряду со сложностью технической реализации канала и невысокой степенью поляризации реальных многофрагментных объектов ВТТ, поверхность которых обычно покрыта слоем пыли, грязи и т. д., обуславливает весьма ограниченное практическое использование обозначенного демаскирующего признака. Его целесообразно привлекать лишь в случаях, когда металлические объекты, визируемые под большим углом, имеют достаточно плоскую поверхность и, следовательно, заметную степень поляризации излучения (например наземные мины), а высокого углового разрешения аппаратуры не требуется. Поэтому в мировой практике известны лишь единичные случаи разработки и применения поляризационного канала для наблюдения объектов ВТТ (см., например, [16]).

Ультрафиолетовое излучение объектов. В последние годы обозначился интерес к использованию для дистанционного обнаружения объектов ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра. Анализ имеющихся данных по практическому использованию этого диапазона позволяет отметить следующие обстоятельства:

– сравнительно невысокий коэффициент пропускания атмосферы в УФ диапазоне, особенно при ее повышенной замутненности, и весьма малые, а главное, близкие друг к другу коэффициенты отражения объектов и естественных фонов (порядка 3–4%) приводят, как показывает опыт ГИПО, к весьма слабоконтрастным и поэтому малопригодным для дешифрирования УФ изображениям наземных объектов [6]. Поэтому ни один из существующих в настоящее время комплексов наблюдения различного назначения только в УФ диапазоне спектра не работает. Так, в [17] описана двухспектральная телевизионная камера на диапазоны спектра 0,25–0,65 мкм (этот канал имитирует глаза насекомых) и 0,25–1,05 мкм, предназначенная для научных исследований в биологии, медицине, искусстве и промышленности. Однако попытки использования подобных камер на длинных трассах, на которых уже существенно затухание отражен-

ного излучения в атмосфере, приводят к заключению о целесообразности ограничения ее спектрального рабочего диапазона со стороны коротких длин волн на уровне 0,4 мкм (т. е. исключения УФ области спектра), ибо соответствующее сужение этого диапазона, практически не снижая по указанным выше причинам полезный сигнал, приводит к гораздо более заметному уменьшению фотонного шума, вызванного дискретным характером излучения атмосферы;

– в области спектра 0,25–0,3 мкм локализованы сильные полосы поглощения озона, вследствие чего из-за наличия на высоте 25–30 км мощного озонового слоя в более низких слоях атмосферы имеет место так называемый “солнечно-слепой” режим работы канала, связанный с тем, что солнечное излучение указанных длин волн практически не достигает земли, а прозрачность оптических трасс хотя и невелика, но еще отличается от нулевой. В этих условиях помехи от фона – одного из основных ограничивающих факторов в системах видения – минимальны и возникает возможность обнаружения высокотемпературных объектов (факелов ракет и самолетов и др.), излучающих в том числе в УФ диапазоне спектра; данное обстоятельство успешно используется в УФ пеленгаторах, предназначенных для автоматического обнаружения удаленных объектов типа “факел” [18].

Однако сухопутная ВТТ, обычно являющаяся объектом наблюдения ОЭЖН, как правило, не имеет незащищенных высокотемпературных элементов, существенно излучающих в УФ диапазоне. Указанными обстоятельствами, определяющими сравнительно невысокую эффективность УФ канала, и объясняется факт неиспользования данного диапазона длин волн не только в современных, но и в перспективных ОЭЖН различного базирования, включая гиперспектральные ОЭС (см. например, [19]). Тем не менее существуют две ситуации, в которых использование ближнего УФ диапазона спектра 0,3–0,4 мкм для наблюдения объектов, в принципе, может оказаться достаточно продуктивным:

– наблюдение воздушных объектов на фоне неба – в этом случае имеет место отрицательный УФ контраст объекта с атмосферой, рассеивающей УФ излучение Солнца;

– наблюдение объектов ВТТ на фоне снега, имеющего в УФ диапазоне довольно высокий коэффициент отражения, что также соз-

дает отрицательный контраст с фоном таких объектов.

Коротковолновое излучение объектов. Для наблюдения объектов местности, в принципе, могут использоваться и спектральные каналы ОЭКН для окон прозрачности атмосферы 1–1,75 мкм или (и) 2–2,5 мкм с ФПУ, требующими неглубокого (до 200–250 К) охлаждения. Эти каналы имеют следующие преимущества перед тепловыми [20]:

- потенциально более высокое угловое разрешение (за счет меньшего дифракционного кружка рассеяния) и возможность использования объектива с небольшим относительным отверстием ε , ибо пороговая чувствительность каналов здесь пропорциональна $1/\varepsilon$, а не $1/\varepsilon^2$, как, например, для ОЭС на микроболометрических ФПУ;

- возможность выделения антропогенных объектов из фоновых неоднородностей (по соотношению сигналов в поддиапазонах спектра 1,2–1,4 и 1,4–1,6 мкм);

- высокую чувствительность к вспышкам, факелам и т. д.

Однако очевидным недостатком таких каналов является то, что они способны успешно функционировать либо в дневное время при хорошей освещенности, либо при вскрытии объектов, имеющих высокотемпературные элементы (которые для современной ВТТ обычно экранируются). Поэтому для обеспечения круглосуточного наблюдения таких объектов в условиях помех эти каналы практически не пригодны.

Спектральный состав излучения объектов. Дополнительным демаскирующим признаком объектов может быть их спектральная сигнатура – характер изменения спектральной плотности энергетической яркости объектов, регистрируемой посредством гиперспектральных ОЭС (ГОЭС).

В общем случае задачей ГОЭС как информационной системы является максимально точное отображение спектральной структуры поля излучения наблюдаемой сцены для последующего распознавания находящихся на ней объектов по спектральным признакам. Схема обработки данных наблюдений ГОЭС включает множество спектральных каналов, в каждом из которых формируется изображение сцены, а для каждого разрешаемого топологического элемента изображения многоканальной системой обработки формируется спектральный образ. В устройстве распознавания осущест-

вляется автоматизированная обработка спектральных образов, соответствующих интересующему элементу изображения.

Физической основой распознавания по спектральным признакам является наличие достаточно ярко выраженных спектральных образов у большинства природных и искусственных объектов. В качестве спектрального образа обычно выступает спектральный коэффициент яркости $r(\lambda) = L(\lambda)/L_0(\lambda)$, представляющий собой отношение спектральной плотности энергетической яркости исследуемого объекта $L(\lambda)$ к спектральной плотности энергетической яркости идеально рассеивающей эталонной поверхности $L_0(\lambda)$, измеренной в тех же условиях.

ГОЭС эффективно решают проблему распознавания объектов, спектральные сигнатуры которых существенно различны. Это имеет место в задачах дистанционного зондирования Земли, экологического контроля, исследования природных ресурсов и т. д., а также в задачах разведки, если под распознаваемыми классами объектов понимать такие их укрупненные категории, как, например, всю сухопутную ВТТ, корабли, маскировочные покрытия, самолеты, асфальтовые дороги – все те группы объектов, которые имеют практически одинаковые, характерные для каждой такой категории оптические свойства поверхностей. Однако более детальный уровень распознавания (например, установление наличия танков, артиллерийских установок, вертолетов и т. д. – именно подобные группы объектов, как правило, и интерпретируются как классы), т. е. классификацию и тем более идентификацию объектов ВТТ ГОЭС обеспечить не могут, ибо все такие объекты покрыты защитной эмалью, тип (марка) и оптические свойства которой связаны не с классом объекта, а с характером окружающего фона. Более того, объекты даже одного и того же класса могут быть покрыты эмалями с различными оптическими характеристиками, обусловленными, например, различными технологиями нанесения. Поэтому ГОЭС, эффективно решая в дневное время суток задачу выделения объектов по спектру отражения из фоновых неоднородностей, практически не обеспечивают, по причине принципиально невысокого углового разрешения, решение основной задачи наблюдения объектов ВТТ – их классификацию и идентификацию. Это обстоятельство, наряду с очевидной сложностью технической реализации подобных ГОЭС и их высокой стоимостью,

не позволяет рекомендовать их для использования в составе ОЭКН [11].

Флуоресценция – вторичное излучение объектов. Еще одним дополнительным демаскирующим признаком, который может быть использован для наблюдения объектов ВТТ, является искусственно стимулированная флуоресценция элементов фоноцелевого сюжета (растительности, конструкционных материалов). Установлено (см., например, [21], [22]), что, в частности, растения, облученные УФ или синим светом, начинают переизлучать (флуоресцировать) в различных участках видимого диапазона, особенно на длинах волн, близких к красной границе спектра. При этом характер и сила излучения зависят от биохимического состояния растений, которое определяется степенью давности их среза, увлажнения, временем пребывания в инородной газовой среде (например, в выхлопных газах двигателей ВТТ) и т. д. Это позволяет, в принципе, рассчитывать на обнаружение объектов ВТТ по их выхлопным газам, а также объектов, замаскированных подручными средствами – срезанной растительностью.

На вероятность распознавания ВТТ данный метод наблюдения влияния, естественно, не оказывает. Другой его недостаток заключается в различии для разных объектов (материалов) временных и спектральных характеристик вторичного излучения и в необходимости подсветки объекта, что ограничивает дальность действия и демаскирует соответствующий канал ОЭКН. Практическое апробирование специалистами ГИПО соответствующего прибора в виде лазерного флуоресцентного спектрографа вертолетного базирования (источник подсветки – жидкостный лазер на красителях) позволило сделать вывод о возможности оценки структуры элементов подстилающих поверхностей лишь на дальностях до 300 м. Следовательно, флуоресцентный метод для повышения эффективности ОЭКН малоприменим.

2. Адаптация спектральных каналов

Тепловизионный канал. Как известно, одним из принципиальных недостатков тепловизионного (ТПВ) канала является то, что пассивные объекты, не имеющие внутренних источников тепла, дважды в сутки имеют средний тепловой контраст, равный нулю, что обусловлено различной тепловой инерцией и раз-

ными законами нагрева или охлаждения корпуса объекта ВТТ и фона – полуограниченного массива грунта.

Воспринимаемая (с учетом излучения и пропускания атмосферы) ТПВ каналом разность радиационных температур объекта и фона ΔT_R^* – его тепловой контраст – может быть равна нулю и для нагретого относительно фона объекта в ситуации, когда расстояние до фона значительно больше дистанции до объекта, а температура воздуха T_B превышает температуру объекта $T_{об}$. В этом случае излучение слоя воздуха между объектом и фоном может скомпенсировать положительный тепловой контраст объекта и фона $\Delta T_R = T_{об} - T$. Напротив, если температура воздуха ниже таковой для фона, то величина ΔT_R^* может даже повыситься. Значение ΔT_R^* может снизиться до нуля и в ситуации, когда $T_B < T_{об} < T$, с тем лишь не принципиальным отличием, что здесь имеет место компенсация излучением атмосферы отрицательного теплового контраста близрасположенного объекта с более удаленным фоном. При этом в обоих случаях важно то, что когда воспринимаемый тепловой контраст в одном из спектральных рабочих диапазонов $\Delta \lambda_1 = 3-5$ мкм или $\Delta \lambda_2 = 8-12$ мкм нивелируется, в другом диапазоне спектра он еще является существенно ненулевым [23].

Необходимо отметить, что негативное влияние снижения среднего теплового контраста объектов до нуля на эффективность ОЭС отчасти ослабляется тем обстоятельством, что вероятность вскрытия объектов определяется не средним тепловым контрастом, а так называемым контрастом Дойла, равным [11]

$$\Delta T_R = \left(\overline{\Delta T_R}^2 + \sigma_{\Delta T}^2 \right)^{1/2},$$

где $\overline{\Delta T_R}$ – средний по площади объекта тепловой контраст, $\sigma_{\Delta T}$ – среднеквадратическое отклонение вариаций контраста по площади объекта.

Поскольку на практике всегда $\sigma_{\Delta T} > 0$, то и значение ΔT_R будет в любом случае отлично от нуля.

Различное влияние излучения атмосферы в тепловых диапазонах спектра $\Delta \lambda_1$ и $\Delta \lambda_2$ на яркостный контраст изображения проявляется и в том случае, когда дистанции до объекта и фона одинаковы, но используется широкопольный канал, одновременно дающий изображение объектов как близких, так и удаленных.

В этом случае оператор, настроив яркость и контраст изображения на наблюдение, например, близрасположенных объектов, может не увидеть более далекие объекты вследствие снижения яркостного контраста их изображений, вызванного возрастанием яркости столба атмосферы [23].

Целесообразность одновременного использования в ОЭКН каналов на диапазоны спектра $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ (или построения ТПВ канала с пере-страиваемым спектральным рабочим диапазоном) определяется еще и тем, что моменты возможной инверсии тепловых контрастов одних и тех же объектов в данных диапазонах спектра в общем случае не совпадают (вследствие различия коэффициентов излучения объектов) и эти каналы в указанные моменты фактически дублируют друг друга, обеспечивая непрерывное наблюдение объектов.

При выборе спектрального рабочего диапазона ТПВ канала ОЭКН необходимо прежде всего учитывать следующие особенности формирования сигнатур объектов и построения самого канала [24]:

– для многих объектов местности, в том числе ВТТ, коэффициенты излучения $\varepsilon_{об}$ в $\Delta\lambda_1$ заметно ниже, чем в $\Delta\lambda_2$: в $\Delta\lambda_1$ они в среднем составляют $\varepsilon_{об} = 0,83$, а в $\Delta\lambda_2 - \varepsilon_{об} = 0,9$, в то время как коэффициенты излучения всех естественных фонов в этих диапазонах спектра практически одинаковы: $\varepsilon = 0,91-0,93$ [23]. Это означает, что поскольку тепловой контраст объектов зависит не только от их температурного контраста (общего для обоих диапазонов), но и от различия коэффициентов излучения объекта и фона, то эти объекты имеют в диапазоне $\Delta\lambda_2$ более высокий тепловой контраст ночью, а в диапазоне $\Delta\lambda_1$ – днем (за счет большей доли отраженного солнечного излучения, определяемого коэффициентом отражения $\rho_{об} = 1 - \varepsilon_{об}$). Следует также отметить, что канал для $\Delta\lambda_2$ обеспечивает более стабильное во времени изображение, чем канал для $\Delta\lambda_1$, а его эффективность слабее зависит от температуры фона. Диапазон спектра $\Delta\lambda_2$ наиболее подходит для наблюдения при пониженной метеорологической дальности видимости (МДВ) и в условиях применения аэрозольных и дымовых завес и активных помех (ИК прожекторы, вспышки и т. д.), сосредоточенных в основном в видимой и ближней ИК областях спектра;

– поскольку излучение Солнца в диапазоне $\Delta\lambda_2$ практически отсутствует, то в этом диапазоне движущиеся объекты не имеют тепловых

теней – в отличие от диапазона $\Delta\lambda_1$, в котором солнечное излучение более существенно и, соответственно, динамические тепловые тени – как и световые тени в видимом диапазоне спектра – являются дополнительным демаскирующим признаком таких объектов. Это означает, что, например, при перемещении объекта в солнечную тень его тепловой контраст в диапазоне спектра $\Delta\lambda_1$ изменяется мгновенно, а в диапазоне $\Delta\lambda_2$ – лишь после охлаждения объекта (по модулю – не всегда в сторону уменьшения). Заметим, что статические тепловые тени от неподвижных объектов, возникающие из-за отсутствия нагрева Солнцем экранированных этими объектами участков фона, имеют место в обоих диапазонах спектра;

– в диапазоне $\Delta\lambda_1$ достигается дифракционный предел разрешения в 2,5 раза меньший, чем в $\Delta\lambda_2$. Кроме того, разность температур, эквивалентная пространственному шуму канала, обусловленная остаточной (после коррекции) неоднородностью чувствительности элементов матричного ФПУ, в диапазоне $\Delta\lambda_1$ также меньше, а сами ФПУ для этого диапазона спектра заметно дешевле, чем для $\Delta\lambda_2$. Наконец, канал для $\Delta\lambda_1$ дает более отчетливое изображение характерных высоконагретых элементов объекта (выхлопные патрубки и др.), что повышает дешифрируемость полученного изображения.

К недостаткам канала на диапазон $\Delta\lambda_1$ можно отнести следующие:

– он малоэффективен при вскрытии объектов на низкотемпературных фонах: так, при понижении температуры фона, например с 295 К до 243 К, пороговая чувствительность канала может ухудшиться до 7 раз [11];

– коэффициент пропускания типовых маскирующих аэрозолей (как, впрочем, и естественных дымок и дымов) в данном диапазоне меньше, чем в диапазоне $\Delta\lambda_2$, что препятствует эффективной работе этого канала при вскрытии замаскированных объектов, а также в неблагоприятных погодных условиях (дымка, туман);

– данный канал заметно подвержен влиянию засветочных помех, ограничивающих его эффективность в условиях активного противодействия.

Наиболее обоснованным и представительным критерием выбора спектрального рабочего диапазона ТПВ канала ОЭКН может служить достигаемое значение разрешения на местности, однозначно определяющее вероятность обнаружения или распознавания любого дан-

ного объекта (или дальность действия канала). Вполне очевидно, что правильный выбор спектрального рабочего диапазона, от которого зависит это разрешение на местности, отнюдь не однозначен и определяется множеством факторов. При этом, как показывает анализ [11], в самом общем смысле можно утверждать, что диапазон $\Delta\lambda_1$ при прочих равных условиях тем предпочтительнее, чем

- длиннее трасса,
- больше высота объекта или носителя аппаратуры,
- больше МДВ и абсолютная влажность воздуха,
- меньше турбулентность атмосферы,
- больше остаточный разброс чувствительности элементов ФПУ,
- меньше аберрации объектива и размеры элемента ФПУ,
- выше температура объекта и фона,
- сильнее солнечная засветка,
- меньше вероятность применения аэрозольных и световых помех.

Условия предпочтительности диапазона $\Delta\lambda_2$ противоположны сформулированным.

Для ОЭЖН, работающих в условиях помех, последний из упомянутых факторов нередко является решающим, поэтому для наземных ОЭЖН, служащих для наблюдения ВТТ, в общем, предпочтительнее использование диапазона спектра $\Delta\lambda_2 = 8-12$ мкм. Напротив, для ОЭЖН воздушного базирования, действующих на длинных наклонных трассах, важнее обеспечить высокое разрешение на местности. А поскольку для наклонных трасс турбулентность атмосферы практически роли не играет, то данные обстоятельства стимулируют для ТПВ каналов таких ОЭЖН переход в рабочий диапазон спектра $\Delta\lambda_1 = 3-5$ мкм.

Телевизионный канал. В диапазоне спектра $0,4-1,3$ мкм, в котором энергетическая яркость объектов определяется спектральным коэффициентом яркости и, следовательно, их изображения носят принципиально иной характер, нежели в ТПВ диапазонах, по результатам исследований многих авторов в качестве основного рабочего участка рекомендована ближняя ИК область спектра $0,7-1,3$ мкм. Эта область отличается устойчивым отрицательным контрастом объектов, расположенных на различных фонах, причем эти контрасты не зависят от угла визирования, довольно стабильны по площади объекта и в 1,5–2 раза превышают (по модулю) соответствующие положительные

контрасты в видимом диапазоне спектра. Кроме того, для ближнего ИК диапазона характерны лучшие, чем для видимого, атмосферные условия наблюдения объектов [11].

Используемые в ОЭЖН спектральные рабочие диапазоны телевизионного канала в видимой и ближней ИК областях спектра определяются соответствующими окнами прозрачности атмосферы, а также характерными особенностями спектрального коэффициента яркости типовых объектов. При этом желательно, чтобы разности спектральных коэффициентов яркости объектов и фона в соответствующих диапазонах спектра были однополярными. Поскольку в зимнее время года яркостные контрасты объектов на фоне снега обычно однополярные (отрицательны) во всем видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, то для повышения эффективности ОЭЖН целесообразно предусмотреть два варианта спектрального рабочего диапазона яркостного канала (с учетом области спектральной чувствительности обычно используемого кремниевого ФПУ):

$$\Delta\lambda = \begin{cases} 0,7 - 1,1 \text{ мкм (летом)} \\ 0,4 - 1,1 \text{ мкм (зимой)} \end{cases}$$

Впрочем, при сложности технической реализации подобной спектральной адаптации канала ОЭЖН вполне допустимо использовать и единый, фиксированный диапазон $0,4-1,1$ мкм, ибо, как показывает анализ, средняя за сутки вероятность вскрытия объекта всем комплексом при сужении этого диапазона до “летнего” варианта практически не изменится. Именно в данном диапазоне функционирует, например, телевизионный канал перспективной воздушной ОЭС разведки DB-110 (помимо ее ТПВ канала на диапазон спектра $3-5$ мкм) [25].

Сравнительные достоинства и недостатки спектральных каналов, использование которых в ОЭЖН оправдывает его неизбежное усложнение и поэтому целесообразно, подытожены в таблице.

Таким образом, можно заключить, что в обозримой перспективе практически единственными дополнительными демаскирующими признаками объектов ВТТ, реализация которых может существенно повысить эффективность ОЭЖН, является объемная форма объектов и “обратный блеск” их ОЭС, регистрируемые активно-импульсным дальностно-яркостным каналом.

Сравнительные достоинства и недостатки спектральных каналов ОЭЖН

Свойства	Тепловизионный канал		Телевизионный канал	Активно-импульсный дальностно-яркостный канал	
	$\Delta\lambda_1 = 3-5$ мкм	$\Delta\lambda_2 = 8-12$ мкм		Яркостный режим	Дальностный режим
Преимущества	Практически круглосуточность и всепогодность, высокая эффективность вскрытия замаскированных объектов.		Высокое угловое разрешение. Независимость эффективности от энергетического состояния объектов. Возможность вскрытия камуфлированных (окрашенных защитной эмалью) объектов.	Высокая дальностно-яркостная характеристика.	
	Повышенное угловое разрешение. Высокая эффективность на длинных трассах, при высокой влажности воздуха. Большой тепловой контраст объектов ВТТ днем. Возможность вскрытия объектов с нулевым температурным контрастом и по динамическим тепловым теням.	Устойчивость к засветкам, аэрозольным помехам. Высокая эффективность при малой МДВ, при низких температурах, высокой турбулентности (день, лето). Более высокий тепловой контраст объектов ВТТ ночью. Высокая стабильность тепловых контрастов объектов.		Дешевизна и доступность элементной базы.	Круглосуточность. Возможность определения дистанции до объекта. Возможность вскрытия объекта под маскировочными покрытиями. Возможность отсечки фона от объекта.
Недостатки	Снижение эффективности при высокой турбулентности атмосферы, низкой температуре воздуха, малой МДВ. Пониженная устойчивость к засветкам, аэрозольным помехам. Повышенная пестрота фона днем.		Низкая эффективность при высокой турбулентности атмосферы	Отсутствие скрытности. Ухудшение качества изображений из-за возникновения спеклов и сцинтилляционного шума.	
	Снижение эффективности при падении среднего теплового контраста объектов до нуля: – в моменты инверсии (дважды в сутки); – в случаях, когда фон значительно дальше объекта, а ($T_v > T_{об} > T$) или ($T_v < T_{об} < T$).			Неэффективность в аэрозольных завесах. Высокая зависимость эффективности от метеоусловий.	

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мордвин Н.Н., Попов Г.Н.* Концепция построения оптико-электронных приборов наблюдения универсального назначения // Известия ВУЗов. Сер. "Приборостроение". 2007. № 2. С. 13–17.
2. *Филатов Г., Якубсон С., Беглова Н.* Развитие подвижных наземных комплексов оптико-электронных средств разведки сухопутных войск за рубежом // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 1–2. С. 17–30.
3. *Балоев В.А., Филиппов В.Л., Овсянников В.А., Непогодин И.А., Навражных В.А., Яцык В.С.* К развитию многоспектральных оптико-электронных систем разведки // XXI Всероссийская межвузовская н/т конф. "Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий". Тезисы докладов. – Казань: КВВКУ. 2009. Ч. 2. С. 225–227.
4. *Белюсов Ю.И.* Оптические характеристики излучения целей и фонов – физическая основа создания оптико-электронной аппаратуры // Оптический журнал. 2006. № 10. С. 88–93.
5. *Покотило С.А.* Адаптивные оптико-электронные средства дистанционного зондирования // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. № 6. С. 37–48.
6. *Яцык В.С., Непогодин И.А., Липатов В.В., Каплан В.Г., Степанов В.А., Тиранов Д.Т.* Экспериментальные исследования информативности яркостных и дальностно-яркостных изображений объектов в УФ и ИК областях спектра // Оборонная техника. 2007. № 1–2. С. 56–60.
7. *Новотный Л., Хехт Б.* Основы нанооптики. М.: Физматлит. 2009. 482 с.
8. *Andersson P.* Long-range three-dimensional imaging using range-dated laser radar images // Optical Engineering. 2006. № 3. P. 034301–034309.
9. *Lapaz F., Canevet L.* Validation of a target acquisition model for active imager using perception experiment // Proc. SPIE. 2007. V. 6737. P. 67370G-1–67370G-10.
10. *Espinola R., Teaney B., Nguyen Q., Jacobs E., Halford C., Jofsted H.* Active imaging system performance model for target acquisition // Proc. SPIE. 2007. V. 6543. P. 65430T-1–65430T-12.
11. *Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л.* Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 595 с.
12. Nuclear arms technology, 1990`s. New York, 1988. P. 149–164.
13. *Гринченко Л.Я., Пономаренко В.П., Филачев А.М.* Современное состояние и перспективы ИК фотоэлектроники // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 57–65.
14. *Krapels K., Driggers R., Jeaney B., Halford C.* Handheld threat object identification performance of 2-D visible imagery versus 3-D visible imagery // Optical Engineering. 2006. № 6. P. 63201-1–63201-12.
15. *Волков В.Г.* Приборы ночного видения для обнаружения бликующих элементов // Специальная техника. 2004. № 2. С. 3–6.
16. *Sadjadi F., Chun C.* Remote sensing using passive IR Stokes parameters // Opt. Engin. 2004. № 10. P. 2283–2289.
17. *Takiguchi Y., Nakayama M., Kubota M., Yamazaki J.* New color TV cameras for UV, near IR and visible light // IEEE transaction. 1998. V. 44. № 1. P. 123–130.
18. *Королев В.В., Падусенко И.И., Танташев М.В., Яцык В.С.* Условия дистанционного обнаружения высокотемпературных источников излучения в ультрафиолетовом диапазоне спектра // Оптический журнал. 2005. № 1. С. 28–31.
19. *Яблонский Л., Воронин Е., Кашин В.* Зарубежные военные программы космической видовой разведки // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 7. С. 29–37.
20. *Richwine R., Sood A., Balcerak R., Freyvogel K.* EO/IR sensor model for evaluating multispectral imaging system performance // Proc. SPIE. 2007. V. 6543. P. 65430W-1–65430W-11.
21. *Ivanov V., Kozlov V., Philippov V.* Laser Spectrofluorescent technology of monitoring of the natural environment / SPIE Meetings, Sept., 2003, Barcelona.
22. *Козлов В.К., Красильников Д.М., Филиппов В.Л., Польский Ю.Е.* Спектроанализатор и основы методики флуоресцентной диагностики состояния биоткани и ее составляющих // Журнал прикладной спектроскопии. 1993. № 1. С. 21–29.
23. *Hodgkin A., Maurer T., Halford C., Vollmerhausen R.* Impact of path radiance on MWIR and LWIR imaging // Proc. SPIE. 2007. V. 6543.
24. *Richardson P., Miller B., Ra C., Jran V., Kang R.* Third generation FLIR simulation at NVESD // Proc. SPIE. 2007. V. 6543.
25. *Lange D., Abrams W., Iyengar M., Lane R., Defietas A.* The Goodrich DB-110 system: multiband operation // Proc. SPIE. 2003. V. 5109. P. 22–36.