

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.396.967.029.7

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ И ВСЕПОГОДНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ И ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ

© 2007 г. А. Г. Шипунов, академик РАН; Е. Н. Семашкин, доктор техн. наук; А. А. Черноусов; А. Н. Громов; А. Р. Романов; В. В. Воробьев; А. Ю. Матюшин

Конструкторское бюро приборостроения, г. Тула, Россия

E-mail: kbkedr@tula.net

В статье изложены результаты экспериментальных исследований всепогодности телевизионных и тепловизионных приборов наблюдения второго и третьего поколений, осуществленных на трассе длиной 15 км в 2004–2005 гг. Эксперименты охватывали годовой период времени и сопровождалась постоянными оценками дальности метеовидимости, освещенности и других метеопараметров. В результате исследований получено большое число видеозаписей, позволивших оценить не только визуальные возможности приборов, но и сделать оценки вероятности использования приборов в условиях умеренного климата на широте г. Тулы.

Коды OCIS: 150.0150.

Поступила в редакцию 16.10.2006.

Системы технического зрения, размещаемые на современных вертолетах, должны обладать большой дальностью действия. Топографическая дальность видимости, летные возможности современных ракет и тактические соображения требуют обеспечения дальности стрельбы 15–17 км. При этом возникают практические вопросы двух типов: насколько хорошо и как часто видны объекты колесной и гусеничной техники на этой дальности. С целью ответа на эти вопросы были проведены экспериментальные исследования, охватывающие годовой период времени.

Экспериментальная установка представляла собой поворотную платформу, позволяющую наводить приборы в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 1). Объектом исследования были телевизионная камера с телевизионной оптической головкой ТОГ-452, а также тепловизоры IRIS-AWS (8–12 мкм) и MATIS-LR (3–5 мкм) фирмы SAGEM SA (Франция), характеристики которых представлены в табл. 1.

Методика проведения испытаний состояла в следующем. На определенную точку местности, удаленную от места наблюдения на 15–17 км, приезжал автомобиль. В качестве объектов наблюдения использовались автомобили ГАЗ-66 (кунг), ЗИЛ-131 (кунг), УАЗ-452. После получасового пребывания на местности с выключенным двигателем производи-

лась запись изображения автомобиля на цифровой видеомagnetofон с помощью телевизионной и тепловизионной камер. При этом специальным термометром определялась температура воздуха, земли (фона), кузова (кунга), кабины и колес автомобиля, а люксметром измерялась освещенность. Эти данные по мобильной связи передавались на наблюдательный пункт. Наблюдения осуществлялись из спе-

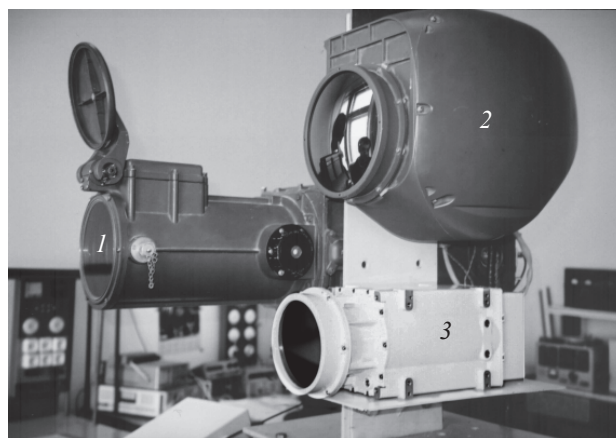


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 — телекамера с объективом ТОГ-452, 2 — тепловизор IRIS AWS (8–12 мкм), 3 — тепловизор MATIS-LR (3–5 мкм).

**Таблица 1.** Основные характеристики каналов наблюдения

| Характеристика                                                            | Тепловизор IRIS-AWS   | Тепловизор MATIS-LR   | Телекамера с объективом ТОГ-452 |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Диапазон работы приемника, мкм                                            | 8–12                  | 3–5                   | 0,4–0,8                         |
| Число элементов приемника                                                 | 288×4                 | 320×240               | 752×582                         |
| Число строк в кадре                                                       | 576                   | 240                   | 582                             |
| Число пикселей в строке                                                   | 768                   | 320                   | 752                             |
| Диаметр входного зрачка, мм                                               | 168                   | 102                   | 125                             |
| Пороговая облученность, приведенная ко входному зрачку, Вт/м <sup>2</sup> | $6,2 \times 10^{-10}$ | $5,5 \times 10^{-11}$ |                                 |
| Потребляемая мощность, Вт                                                 | 90                    | 20                    | 20                              |
| Узкое поле зрения:                                                        |                       |                       |                                 |
| фокусное расстояние, мм                                                   | 285                   | 410                   | 500                             |
| угловое поле зрения (вертик. × гориз.), град.                             | 1,6×2,0               | 0,9×1,3               | 0,6×0,8                         |
| Широкое поле зрения:                                                      |                       |                       |                                 |
| фокусное расстояние, мм                                                   | 95                    | 90                    | 150                             |
| угловое поле зрения (вертик. × гориз.), град.                             | 4,5×6,0               | 4,17×6,25             | 2×2,64                          |

циальной лаборатории, расположенной на высоте 30 м от поверхности земли. Это позволяло визировать контрастные и крупногабаритные объекты до линии горизонта на расстояниях от 1 до 25 км и высокие объекты за горизонтом (трубы, колонны химкомбината и телевышка в г. Новомосковске) на расстоянии 40 км. Расстояния до ряда удаленных объектов были определены по подробным топографическим картам и уточнены в ясную погоду с помощью лазерного дальномера. Выяснилось, что картографический метод давал погрешность в пределах  $\pm 100$  м относительно лазерного дальномерирования и был вполне приемлемым для прогнозирования дальности метеовидимости визуальным способом.

Трижды в день: в 9<sup>00</sup>, 13<sup>00</sup> и 16<sup>00</sup>, наблюдатели с хорошим зрением оценивали метеовидимость. Наблюдения позволили определить частоту метеовидимости с дальностью  $S_m(f_{S_m})$ , как отношение числа случаев с метеовидимостью  $S_m$  к общему числу наблюдений. Экспериментальная гистограмма дальностей метеовидимости по общей совокупности на-

блюдений за год представлена на рис. 2. При этом следует сказать, что в ходе экспериментов не было возможности фиксировать метеовидимости более 40 км, хотя они безусловно были.

Одним из главных требований к месту наблюдений было его доступность в любую погоду при использовании машины. Поэтому оно было выбрано около трассы Москва–Симферополь. Помимо удобства подъезда к точке наблюдения трасса представляла возможность для съемки большого количества разнообразных автомобилей, движущихся по ней, и тем самым существенно дополняла эксперименты. Работа продолжалась ровно год и проводилась ежедневно за исключением выходных, праздничных дней, дней ремонта и обслуживания оборудования. Выезд на точку наблюдения осуществлялся тогда, когда в тепловизор были видны машины на трассе. Всего на точку наблюдения осуществлено около 150 выездов, что позволило собрать уникальную видеoinформацию, которая будучи сжатой в 10 раз, занимает на компьютере объем памяти более 200 Гбайт.

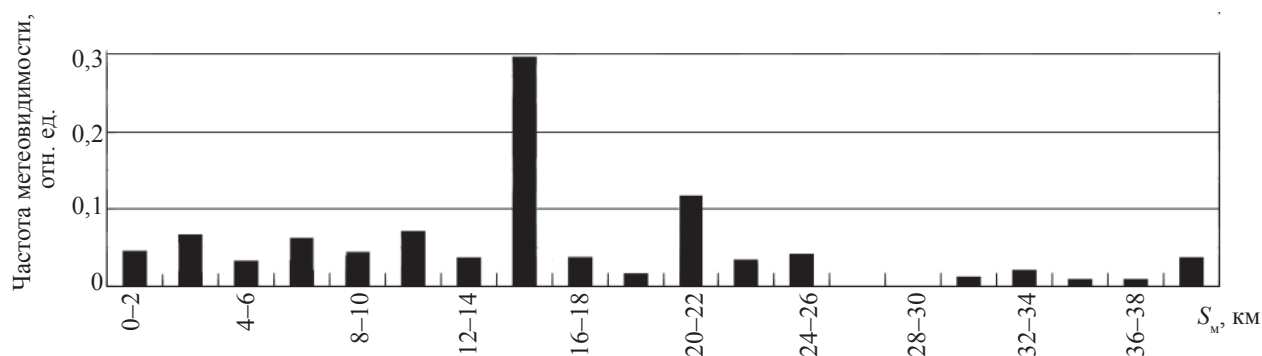


**Рис. 2.** Гистограмма распределения метеовидимости за год.

Дальность действия оптических и оптико-электронных приборов (дальность обнаружения) целесообразно сравнивать с дальностью метеовидимости. Как известно, дальность метеовидимости характеризует предельную дальность видимости невооруженным глазом объекта с угловым размером более  $7'$  и абсолютным контрастом  $C = 1$ .

$$S_M = \ln(C/\varepsilon)/\beta = 3,912/\beta, \quad (1)$$

где  $\beta$  – удельный показатель ослабления видимых сигналов атмосферой,  $\text{км}^{-1}$ ,  $\varepsilon = 0,02$  – контрастная чувствительность глаза.

Для дальности действия телекамеры можно записать аналогичную формулу

$$S_{TV} = \ln(C/K_{\min})/\beta_{TV}, \quad (2)$$

где  $K_{\min}$  – минимальная контрастная чувствительность матричного приемника,  $\beta_{TV}$  – удельный показатель ослабления радиоволн телевизионного диапазона.

Данный показатель связан с показателем для глаза соотношением

$$\beta_{TV} = \beta\omega(\lambda), \quad (3)$$

где  $\omega(\lambda)$  – расчетный коэффициент, показывающий, во сколько раз снижается показатель ослабления при переходе от видимого диапазона на большую длину волны. Значения  $\omega(\lambda)$  для наиболее вероятных параметров атмосферной дымки приведены в работах академика Зуева В.Е. [1].

Из (1) и (2) с учетом (3) получаем

$$S_{TV}/S_M = \ln(C/K_{\min})/\omega(\lambda)\ln(C/\varepsilon). \quad (4)$$

Согласно [2] величина  $K_{\min}$  для матричных приемников находится на уровне 0,005 и ниже. При использовании кремниевой матрицы с максимумом спектральной чувствительности  $\lambda = 0,7$  мкм параметр  $\omega(\lambda) = 0,9$ , что для абсолютных контрастов дает  $S_{TV}/S_M = 1,5$ . В случае уменьшения контраста  $C$  соотношение  $S_{TV}/S_M$  может увеличиваться до 2. В экспериментах с визуальным наблюдением цели на мониторе мы неоднократно получали соотношение  $S_{TV}/S_M = 1,5-1,6$ .

Для тепловизора установить зависимость, аналогичную зависимости (4), сложно, так как помимо аэрозолей излучение ослабляется водяным паром, который в диапазонах работы телекамеры и глаза существенной роли не играет. Поэтому, говоря о соотношении дальности действия тепловизора  $L_{ТПВ}$  и дальности метеовидимости  $S_M$ , нужно опираться на экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения данной и других работ.

Наибольшие соотношения  $L_{ТПВ}/S_M$  были зафиксированы нами жарким летом 2002 года во время горения торфяников в Подмоскowie. Антропогенная

дымка накрыла несколько областей, включая и Тульскую. Видимость в Туле уменьшилась до 1 км, что позволяло незащищенным глазом безболезненно наблюдать солнечный диск. В этих условиях тепловизор IRIS TGS-100, работающий в диапазоне 8–12 мкм, обеспечивал визирование объектов на расстоянии 40 км, т. е. соотношение  $L_{ТПВ}/S_M$  достигало 40 единиц. Однако данный результат не может считаться опорным, так как был получен в условиях тонких дымовых аэрозолей антропогенного происхождения при довольно сухом воздухе.

В ходе экспериментов было установлено, что при метеовидимостях, больших или равных 3 км, тепловизор IRIS-AWS (8–12 мкм) позволял в узком поле зрения обнаруживать объект наблюдения на 15 км при любых тепловых контрастах (от  $2^\circ$  до  $9^\circ$ ) и при любых сочетаниях температур и относительных влажностей воздуха. То есть соотношение  $L_{ТПВ}/S_M$  для тепловизора в атмосферной дымке ( $S_M \geq 1$  км) составило 5 единиц.

Для тепловизора MATIS-LR (3–5 мкм) этот показатель меньше и составляет  $L_{ТПВ}/S_M \approx 2,9$ , или около трех единиц.

В случае наблюдения объекта с контрастом 30% невооруженным глазом дальность видимости его составит  $S_r = \ln(0,3/0,02)/\beta = 2,7/\beta$  и отношение  $S_r/S_M = 0,7$ .

Наблюдения за метеовидимостью позволили построить распределение метеовидимостей за год, больших некоторого уровня

$$P(S_M > S) = 1 - \sum_{S_M=0}^{S_M=S} f_{S_M}.$$

Это распределение представлено на рис. 3 (кривая 4).

На основании этого распределения, используя отношения дальностей наблюдения невооруженным глазом ( $C = 0,7$ ) с помощью телекамеры и двух тепловизоров к дальности метеовидимости ( $C = 1$ ), соответственно равные 0,7, 1,5, 3, 5, были построены соответствующие распределения для этих каналов наблюдения (кривые 1–3, 5). При этом абсциссы кривой 4 для соответствующих ординат умножались на указанные коэффициенты.

Полученные распределения, по существу, дают вероятности обнаружения объекта с помощью этих каналов наблюдения или их показатели всепогодности в условиях метеовидимости, характерной для г. Тулы.

Графики распределений ограничены дальностью 20 км, которая соответствует началу сплошного лесного массива на основном наблюдательном поле (рис. 5), препятствующего наблюдению колесной техники.

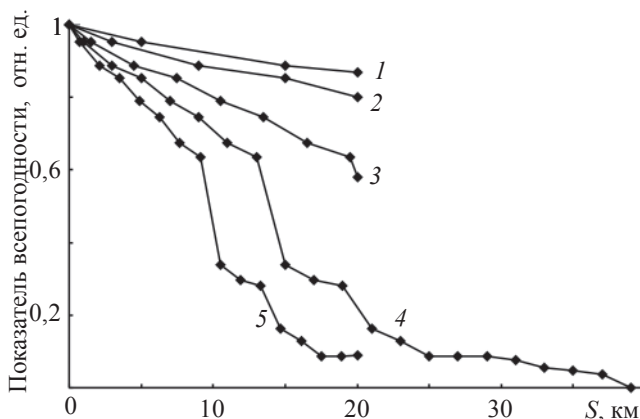


**Рис. 3.** Зависимости показателей всепогодности оптических каналов от дальности в условиях атмосферных дымок. 1 – тепловизор (8–12 мкм), 2 – тепловизор (3–5 мкм), 3 – телекамера, 4 – невооруженный глаз (высококонтрастные объекты  $C = 1$ ), 5 – невооруженный глаз (слабоконтрастные объекты  $C = 0,3$ ).

Сопоставление распределений показывает, что на дальности 5 км разница в показателях всепогодности невелика, но при увеличении дистанции до 15 км глаз уже проигрывает системам технического зрения. Показатели всепогодности телевизионного канала и тепловизора (8–12 мкм) различаются на 19%.

Если рассмотреть показатели всепогодности для тепловизионных каналов с сентября по апрель (без летних прозрачных состояний атмосферы), то на дальности 20 км для тепловизора он в два раза больше, чем у телевизионного канала (см. табл. 2).

Большое количество экспериментов позволяет сделать некоторые выводы относительно обнаружительной способности каналов на дальности 15 км.

Телевизионная система позволяла обнаруживать машины на местности в широком поле зрения и опознавать их тип в узком поле зрения. Это выполнялось в широком диапазоне горизонтальных освещенностей вплоть до 100 лк.

Тепловизоры, несмотря на различные значения угловых полей зрения, имеют близкие обнаружительные возможности. Дело в том, что более широкое поле зрения у тепловизора IRIS-AWS может

**Таблица 2.** Показатели всепогодности каналов наблюдения в период с сентября по апрель

| Каналы наблюдения   | Дальность, км |      |      |      |
|---------------------|---------------|------|------|------|
|                     | 5             | 10   | 15   | 20   |
| Телевизионный канал | 0,81          | 0,67 | 0,55 | 0,41 |
| ТПВ (3–5 мкм)       | 0,88          | 0,81 | 0,77 | 0,67 |
| ТПВ (8–12 мкм)      | 0,91          | 0,87 | 0,83 | 0,79 |

быть искусственно “сужено” с помощью двукратного цифрового увеличения. При этом качество исходной картинка в 768×576 пикселей трансформируется в качество исходной картинка тепловизора MATIS-LR (320×240). Заявленные в рекламных проспектах на MATIS-LR данные, что дальность обнаружения танка составляет 25 км, а дальность опознавания 10,5 км, подтверждаются. В очень хороших условиях, при высокой прозрачности атмосферы и, соответственно, хороших контрастах, машины, идущие по дороге за 15 км от места наблюдения, распознаются обоими тепловизорами до типа в узком поле зрения и даже обнаруживаются в широком в виде точек, о чем свидетельствуют соответствующие видеозаписи.

Исследования также показали, что при наличии даже сильно рассеянного солнечного света в условиях плотных дымок корпус машин очень быстро (за 10–15 минут) набирал тепловой контраст 3–6°С относительно воздуха. Данный эффект наблюдался даже с машинами светло-серого цвета, не говоря уже о машинах цвета хаки. Объясняется это тем, что солнечная радиация на наклонных трассах (особенно летом при высоком стоянии Солнца) ослабляется во много раз меньше, чем на горизонтальных трассах.

Несмотря на то что в результате оцифровки, сжатия видеоролика и последующего распечатывания на бумаге качество видеоизображения по сравнению с тем, что было на мониторе, ухудшилось, можно высказать некоторые соображения по видимости объектов, анализируя рис. 4 и 5.

Качество визуальной картинка, получаемой с тепловизора IRIS-AWS (768×576 элементов), столь высоко, что в ясную погоду на дистанциях 15–20 км опознаются отдельные детали инфраструктуры и ландшафта (например, ажурные конструкции высоковольтной вышки слева от наблюдаемой машины) (рис. 5).

Наличие плотных дымок с малыми метеовидимостями в сочетании с полной облачностью, как это ни парадоксально, создает для обнаружения объектов более благоприятные условия, чем в ясную погоду (рис. 4). Из-за слабой инсоляции и больших горизонтальных ослаблений излучения исчезает фон с его пестротой и искусственно нагретые объекты быстро обнаруживаются.

Теплокадр на рис. 4 также демонстрирует возможности тепловизора при пониженных прозрачностях атмосферы. Многоэтажные дома, отстоящие от места наблюдения на 6,5 км при метеовидимости 3 км можно увидеть только в тепловизор.

Подводя итоги исследований, можно сказать, что системы технического зрения существенно расширили время года, в течение которого можно обнаруживать объекты на дальностях, больших 10 км. Не-



**Рис. 4.** Теплокадр изображения автомобиля ЗИЛ-131 на местности, полученный с помощью тепловизора (8–12 мкм), узкое поле зрения,  $S_m = 3$  км, расстояние до объекта 15 км.

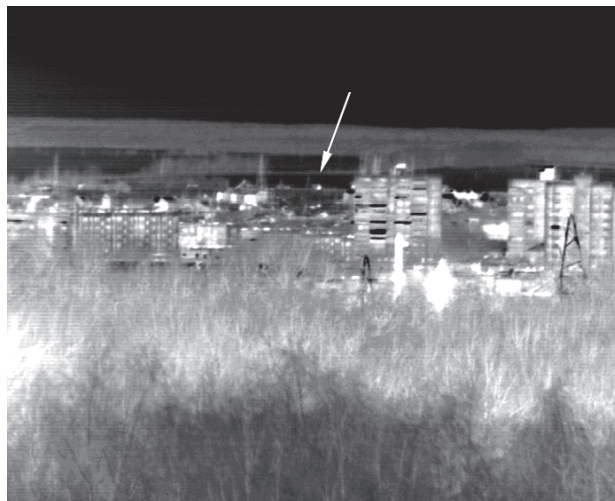


**Рис. 5.** Теплокадр изображения автомобиля ЗИЛ-131 на местности, полученный с помощью тепловизора (8–12 мкм), узкое поле зрения,  $S_m = 8$  км, расстояние до объекта 15 км.

смотря на то что по уровню всепогодности телевизионные системы ощутимо уступают тепловизору, они являются важным дополнением к тепловизионным каналам в тех случаях, когда тепловые контрасты малы.

Главный вывод исследований состоит в том, что по уровню всепогодности (около 90%) тепловизионные системы лишь немногим уступают радиолокационным (95–98%), превосходя последние по воз-

можности визирования неподвижных объектов, точности при меньших размерах и стоимости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных волн. М.: Советское радио, 1968.
2. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2001.