

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-63-72

УДК 681.78.01, 621.384.3

Наблюдение воздушных малоразмерных объектов с применением оптико-электронных приборов инфракрасного диапазона

Александр Александрович Максимов¹, Николай Ильич Павлов²,
Алексей Николаевич Старченко³, Владимир Геннадьевич Филиппов⁴✉

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия

¹maksimovAA@nioep.ru <https://orcid.org/0009-0005-3370-2150>

²pavlovNI@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>

³anstar2000@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>

⁴filippovvg@nioep.ru <https://orcid.org/0009-0004-1617-9225>

Аннотация

Предмет исследования. Оптико-электронные приборы инфракрасного диапазона как средство обнаружения воздушных малоразмерных объектов. **Цель исследования.** Сравнительная оценка возможностей обнаружения воздушных малоразмерных объектов с применением оптико-электронных приборов на основе фотоприемных устройств средневолнового и длинноволнового инфракрасного диапазона. **Метод работы.** Применение расчетно-аналитической модели с проведением натурного эксперимента. **Основные результаты.** Получены теоретические оценки пороговой силы излучения объекта наблюдения и порогового потока для элемента матричного фотоприемного устройства. Полученные теоретические оценки показывают, что приборы с охлаждаемым фотоприемником средневолнового диапазона обеспечивают лучшие обнаружительные возможности, чем приборы длинноволнового диапазона, использующие как охлаждаемые (фотонные), так и неохлаждаемые (тепловые) фотоприемные устройства аналогичного формата и размера. Натурный эксперимент с наблюдением воздушного малоразмерного объекта подтвердил лучшие обнаружительные возможности прибора на основе охлаждаемого фотоприемника средневолнового диапазона в сравнении с прибором длинноволнового диапазона на микроболометрической матрице. **Практическая значимость.** При выборе рабочего спектрального диапазона проектируемых оптико-электронных систем обнаружения воздушных малоразмерных объектов следует учитывать выявленное преимущество в пороговых характеристиках приборов, использующих охлаждаемые фотоприемники средневолнового диапазона.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, инфракрасный диапазон, матричное фотоприемное устройство, обнаружение, воздушный малоразмерный объект

Ссылка для цитирования: Максимов А.А., Павлов Н.И., Старченко А.Н., Филиппов В.Г. Наблюдение воздушных малоразмерных объектов с применением оптико-электронных приборов инфракрасного диапазона // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 63–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-63-72>

Коды OCIS: 040.1880, 040.5570, 040.6808

Observation of aerial small-size objects by optoelectronic devices in the infrared range

ALEXANDER A. MAKSIMOV¹, NIKOLAI I. PAVLOV²,
ALEXEY N. STARCHENKO³, VLADIMIR G. FILIPPOV⁴✉

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,
Leningrad region, Russia

¹maksimovAA@niiiep.ru <https://orcid.org/0009-0005-3370-2150>

²pavlovNI@niiiep.ru <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>

³anstar2000@mail.ru <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>

⁴filippovvg@niiiep.ru <https://orcid.org/0009-0004-1617-9225>

Abstract

Subject of the study. The detection capability of optoelectronic devices in infrared range when observing aerial small-size objects. **The aim of the study.** Comparative analysis of the detection capabilities of optoelectronic devices based on photodetectors of the middle-wave and long-wave infrared range when observing aerial small-size objects. **The method.** Calculating based on analytical model and carrying out field measurements. **Key results.** A theoretical analysis of the threshold radiation strength for observing object and threshold flux for photosensitive element is performed. The analysis showed that according to these indicators, devices with a cooled middle-wave range photodetector have an advantage in relation to long-wave range devices that use both cooled and uncooled photodetector of similar format and size. A field experiment with the observation of an aerial small-size object confirmed the best detection capabilities of a device based on a cooled middle-wave range photodetector in comparison with a long-wave range device based on a microbolometric matrix. **Practical significance.** When choosing the operative spectral range of optoelectronic systems designed to detect aerial small-size objects it is necessary to take into account the revealed advantage in the threshold characteristics of devices using cooled photodetectors of middle-wave range.

Keywords: optoelectronic device, infrared range, array photodetectors, detection, aerial small-size object

For citation: Maksimov A.A., Pavlov N.I., Starchenko A.N., Filippov V.G. Observation of aerial small-size objects by optoelectronic devices in the infrared range [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 63–72. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-63-72>

OCIS codes: 040.1880, 040.5570, 040.6808

ВВЕДЕНИЕ

Инфракрасный (ИК) диапазон спектра широко используется в приборах различного назначения, обеспечивая возможность их работы в любое время суток, включая погодные условия с пониженной видимостью [1–12]. Обнаружению объектов способствует их собственное тепловое излучение, регистрация которого, как правило, осуществляется в средневолновом и длинноволновом окнах прозрачности земной атмосферы с участками длин волн в диапазонах 3–5 и 8–14 мкм соответственно. Далее для краткости будем использовать для обозначения средневолнового и длинноволнового диапазонов ИК спектра ши-

роко принятые англоязычные аббревиатуры MW¹ и LW².

В приборах MW диапазона наиболее часто используются охлаждаемые (фотонные) матричные фотоприемные устройства (МФПУ) на InSb и HgCdTe. В LW диапазоне применение находят как охлаждаемые МФПУ (чаще на HgCdTe), так и неохлаждаемые (тепловые) микроболметрические матрицы (МБМ) на оксиде ванадия VO_x или легированном аморфном гидрированном кремнии a-Si:H. Стоимость тепловых неохлаждаемых прием-

¹ Middle-wavelength.

² Long-wavelength.

ников на порядок ниже, а эквивалентная шуму разность температур (NETD)³ приближается к аналогичной характеристике охлаждаемых детекторов [5–7].

Учитывая неоднозначность в выборе рабочего спектрального диапазона в пользу MW или LW диапазона, а также возможность применения как охлаждаемых, так и неохлаждаемых МФПУ, разработчики оптико-электронного прибора руководствуются разными критериями, включающими как эффективность выполнения прибором целевой функции, так и технологические и экономические факторы.

Настоящая статья посвящена проблеме обнаружения на фоне неба подвижных малоразмерных объектов с температурой поверхности, близкой к температуре окружающего воздуха, с применением оптико-электронного прибора на основе МФПУ ИК диапазона. В ряде работ для решения этой задачи предлагается использовать ИК приборы на основе МБМ, в частности, в публикации [11] для обнаружения беспилотного летательного аппарата-дрона, в публикации [12] — для обнаружения артиллерийского снаряда. При этом отмечаются такие достоинства прибора с МБМ по сравнению с охлаждаемыми МФПУ, как малое время выхода на рабочий режим, компактные габариты, низкая стоимость производства и эксплуатации. Тем не менее, сравнительный анализ обнаружительных возможностей прибора с охлаждаемыми и неохлаждаемыми МФПУ ИК диапазона не проводился, что и определяет новизну настоящего исследования. Актуальность работы обусловлена рядом практических приложений, включая контроль воздушного пространства в ближней зоне, охранные системы и др.

Целью настоящего исследования является сравнительная оценка возможностей обнаружения воздушных малоразмерных объектов с применением оптико-электронных приборов на основе фотоприемных устройств MW и LW ИК диапазона. Выполнена теоретическая оценка пороговых характеристик приборов, использующих охлаждаемые фотонные фотоприемники MW и LW диапазонов одного и того же типа (на основе HgCdTe), формата и размеров, а также неохлаждаемого теплово-

го приемника LW диапазона на основе МБМ аналогичного формата с близким размером фоточувствительных элементов (ФЧЭ). При теоретическом анализе предполагается, что обнаруживаемый объект удовлетворяет следующим характеристикам: на рабочих дистанциях его линейные (или угловые) размеры соизмеримы или меньше, чем разрешение прибора, температура поверхности незначительно отличается от температуры окружающего воздуха, угловая скорость может составлять от долей до нескольких единиц градусов в секунду. В частности, таким наблюдаемым (на дистанции в единицы километров) объектом может быть малоразмерный беспилотный летательный аппарат — дрон, птица, артиллерийский снаряд и др. Теоретический анализ дополнен результатом натурного эксперимента с регистрацией сигналов от воздушного малоразмерного объекта прибором с охлаждаемым МФПУ MW диапазона и прибором LW диапазона на основе МБМ аналогичного формата.

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С ОХЛАЖДАЕМЫМ ФОТОННЫМ МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Максимальное время накопления t_{a_max} сигнала при 70%-ом заполнении зарядовой ячейки, ограниченное фоновым и темновым токами, можно определить из соотношения для емкости заполнения зарядовой ячейки фотонного МФПУ

$$\begin{aligned} 0,7 n_{e_max} &= A_{el} t_{a_max} (i_b + i_{dc}) = \\ &= A_{el} t_{a_max} (\eta \tau_{os} \sin^2 \alpha M_{p\Delta\lambda} + i_{dc}), \end{aligned} \quad (1)$$

где n_{e_max} — емкость ячейки МФПУ в электро-нах, i_b и i_{dc} — поверхностные плотности фонового и темнового токов ФЧЭ соответственно, A_{el} — площадь ФЧЭ, η — квантовый выход матрицы ФЧЭ, τ_{os} — пропускание объектива, α — апертурный угол, $M_{p\Delta\lambda}$ — интегральная фотонная светимость от фона с радиационной температурой T_b в спектральном интервале $\Delta\lambda$ с длинами волн от λ_1 до λ_2 , рассчитываемая в соответствии с законом Планка. Далее будем использовать приближение

³ Noise equivalent temperature difference.

$\sin^2 \alpha \approx 1/(2n)^2$, где $n = f_{os}/D_{os}$ — диафрагменное число, а f_{os} и D_{os} — фокусное расстояние и диаметр (апертура) входного зрачка приемного объектива. Также при оценках будут использоваться следующие типовые значения указанных выше параметров: $n = 2$, $\tau_{os} = 0,8$, $A = 225 \text{ мкм}^2$, η составляет 0,75 для МФПУ MW и 0,65 для МФПУ LW диапазонов, n_{e_max} будем считать равным $9,1 \times 10^6$ и $13,6 \times 10^6$ электронам для этих же МФПУ (см. [13–15]).

Для сигнала n_t от объекта в электронах, накопленного за время t_a , имеем следующее выражение:

$$n_t = \frac{I_{p\Delta\lambda}}{R^2} \frac{\pi}{4} D_{os}^2 \tau \eta t_a. \quad (2)$$

Здесь $I_{p\Delta\lambda}$ — интегральная фотонная сила излучения объекта в рассматриваемом диапазоне волн $\Delta\lambda$, R — дистанция до объекта наблюдения, $\tau = \tau_{os} \tau_a$, где τ_a — пропускание атмосферной трассы.

Накопленный квадратичный уровень шума $(n_n)^2$ в электронах за время t_a определяется выражением

$$\begin{aligned} n_n^2 &= n_b + n_{dc} + n_{rn}^2 = \\ &= A_{el} \left(\eta \tau_{os} \frac{1}{4n^2} M_{p\Delta\lambda} + i_{dc} \right) t_a + n_{rn}^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь n_b и n_{dc} — составляющие шума, обусловленные фоновым и темновым токами (см. выражение (1)), n_{rn} — шум считывания сигнала. Оценки показывают, что поверхностная плотность фонового тока (при $T_b \approx 300 \text{ К}$) в MW диапазоне примерно на 9 порядков превышает поверхностную плотность темнового тока, в LW диапазоне аналогичное превышение фонового тока над темновым током составляет более 4 порядков [16, 17]. По этой причине в дальнейшем поверхностной плотностью темнового тока в формулах (1) и (3) будем пренебрегать. Шум считывания охлаждаемых МФПУ MW и LW диапазонов можно считать равным 400 электронам [13–15]. Оценки показывают, что вкладом шума считывания $(n_{rn})^2$ в формуле (3) также можно пренебречь при времени накопления t_a , большем 4 мкс в LW диапазоне и большем 200 мкс в MW диапазоне. Другими словами, охлаждаемые

МФПУ в обоих диапазонах при обнаружении воздушных объектов работают в режиме ограничения фоном⁴.

Используя формулы (2) и (3), получим следующее выражение для пороговой фотонной силы излучения объекта $I_{p\Delta\lambda_th}$, при превышении которой он может быть обнаружен на дистанции R при заданном отношении сигнал/шум $N_{s/n}$:

$$I_{p\Delta\lambda} \geq I_{p\Delta\lambda_th} = N_{s/n} \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{A_{el} M_{p\Delta\lambda}}{\tau_{os} \eta t_a}} \frac{R^2}{\tau_a n D_{os}^2}. \quad (4)$$

При нормальных погодных условиях (метеорологическая дальность видимости 10 км, температура воздуха 10 °С, относительная влажность воздуха 80%) в диапазоне дальностей от 2 до 6 км пропускание атмосферной трассы в MW и LW диапазонах имеет близкие значения, лежащие в диапазоне от 0,6 до 0,4 соответственно [18]. Будем считать, что оптическая система и используемое МФПУ характеризуются одинаковыми или близкими параметрами: D_{os} , n и τ_{os} для оптической системы, A_{el} и η для МФПУ. Согласно выражению (4) в этом случае пороговая фотонная сила излучения объекта $I_{p\Delta\lambda_th} \sim (M_{p\Delta\lambda}/t_a)^{1/2}$.

Оценки показывают, что при радиационной температуре неба 300 К отношение интегральной фотонной светимости фона в LW диапазоне к аналогичной светимости в MW диапазоне составляет $M_{p_LW}/M_{p_MW} \approx 50$.

При кадровой частоте прибора в десятки герц время накопления сигнала при обнаружении малоразмерного подвижного объекта на фоне неба в MW диапазоне t_{a_MW} ограничено условием на допустимый смаз изображения. Обозначим это время как время, за которое объект смещается на два пиксела прибора наблюдения,

$$t_{a_MW} = 2\delta\gamma/\omega_t, \quad (5)$$

где $\delta\gamma = (A_{el})^{1/2}/f_{os}$ — угловой размер пиксела, ω_t — угловая скорость объекта. При наблюдении высоко динамичных воздушных объектов значение ω_t может достигать 40 мрад/с (2,3 град/с). В этом случае при размере пиксела 15 мкм и $f_{os} = 100 \text{ мм}$ время смещения объекта на два пиксела составит $t_{a_MW} = 7,5 \text{ мс}$.

⁴ Background limited infrared photodetector (BLIP).

Время накопления сигнала при обнаружении малоразмерного объекта на фоне неба в LW диапазоне t_{a_LW} ограничено зарядовой емкостью ячейки МФПУ n_{e_max} и, как правило, не превышает значение в несколько сотен микросекунд (для оценок можно использовать значение $t_{a_LW} = 500$ мкс).

Используя приведенные выше оценки, можно оценить отношение пороговых фотонных сил излучения в MW и LW диапазонах (далее индекс p для простоты опускаем)

$$\begin{aligned} I_{LW_th}/I_{MW_th} &\approx \\ &\approx (M_{LW}/M_{MW})^{1/2}(t_{a_MW}/t_{a_LW})^{1/2} \approx 27. \end{aligned} \quad (6)$$

Из полученного соотношения следует, что для обнаружения подвижного малоразмерного объекта на фоне неба в нормальных погодных условиях его фотонная сила излучения в LW диапазоне должна в несколько десятков раз превышать соответствующую силу излучения в MW диапазоне. Другими словами, по критерию пороговой (минимально обнаруживаемой) фотонной силы излучения подвижного малоразмерного объекта, наблюдаемого на фоне неба, определенным преимуществом обладает прибор с МФПУ MW диапазона.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОРОГОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ И ТЕПЛОВЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

При рассмотрении пороговых характеристик тепловых МФПУ в силу их «нефотонного» механизма регистрации сигнала принято применять энергетические величины вместо фотонных. Поэтому ниже, сравнивая пороговые потоки фотонных и тепловых МФПУ, будем пользоваться параметром, измеряемым в ваттах.

Как известно, пороговый поток P_{e_th} (приращение потока излучения, соответствующее порогу чувствительности по температуре ΔT_{th}) для ФЧЭ МФПУ площадью A_{el} может быть рассчитан согласно выражению

$$P_{e_th} = A_{el} \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{e\lambda}(T + \Delta T_{th}) - L_{e\lambda}(T)) s(\lambda) d\lambda. \quad (7)$$

Здесь $L_{e\lambda}(T)$ и $L_{e\lambda}(T + \Delta T_{th})$ — спектральные плотности энергетической яркости излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с радиа-

ционными температурами T и $T + \Delta T_{th}$ соответственно, Ω — телесный апертурный угол, ΔT_{th} — NETD, $s(\lambda)$ — относительная спектральная чувствительность МФПУ, в максимуме равная 1.

Часто производители МФПУ не приводят спектральные зависимости чувствительности, а оговаривают лишь границы рабочего спектрального диапазона для оценки порогового потока. В этом случае, как правило, используется более простое выражение

$$P_{e_th} = A_{el} \Omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (L_{e\lambda}(T + \Delta T_{th}) - L_{e\lambda}(T)) d\lambda. \quad (8)$$

При одинаковых размерах пиксела (элемента фоточувствительной матрицы) пороговый поток прямо пропорционален порогу чувствительности по температуре ΔT_{th} . Для фотонных приемников значение ΔT_{th} обычно нормируется при заполнении зарядовой ямы до половины (50%) от максимальной емкости. Исходя из этого выбирается время накопления. Температура протяженного АЧТ выбирается близкой к 300 К. При паспортизации типовые значения времени накопления для МФПУ MW диапазона составляют 3–5 мс, а для LW диапазона — около 500 мкс.

В табл. 1 приведены рассчитанные согласно выражениям (7)–(8) пороговые потоки P_{e_th} охлаждаемых МФПУ MW и LW диапазонов с относительным отверстием холодной диафрагмы 1:2, телесным апертурным углом $\Omega = 0,19$ ср и одинаковым размером ФЧЭ (15 мкм).

В отличие от охлаждаемых фотонных МФПУ неохлаждаемые тепловые фотоприемники на МБМ не имеют встроенных охлаждаемых диафрагм и фильтров. При паспортизации МБМ кадровая частота, как правило, составляет 30–50 Гц, телесный угол полагается соответствующим относительному отверстию 1:1 и равным $\Omega = 0,66$ ср. В действительности эффективный телесный угол больше из-за отсутствия апертурной диафрагмы.

В табл. 2 приведены результаты оценки порогового потока ФЧЭ ряда МБМ при $\Omega = 1,2$ ср. Для МБМ с размером ФЧЭ 17 мкм пороговый поток изменяется в пределах $(2,0–2,7) \times 10^{-11}$ Вт, при размере ФЧЭ 12 мкм — $(0,8–1,4) \times 10^{-11}$ Вт. Если сравнивать пороговые потоки фотонных и тепловых МФПУ,

Таблица 1. Пороговые характеристики охлаждаемых МФПУ MW и LW диапазонов**Table 1.** Threshold characteristics of cooled MW and LW sensors

Наименование	$\Delta\lambda$, мкм	$(A_{el})^{1/2}$, мкм	ΔT_{th} , мК	$P_{e_{th}}$, Вт
<i>Scorpio</i> MW (фирма <i>Lynred</i>)	3,7–4,8	15	15	$2,5 \times 10^{-14}$
C615M (фирма GST)	3,7–4,8	15	15	$2,5 \times 10^{-14}$
<i>Mars</i> MW (фирма <i>Lynred</i>)	3,7–4,8	30	9	$7,0 \times 10^{-14}$
Ф-29 (ИФП СО РАН)	3,5–4,9	15	20	$3,5 \times 10^{-14}$
<i>Scorpio</i> LW (фирма <i>Lynred</i>)	7,7–9,6	15	25	$3,5 \times 10^{-13}$
<i>Mars</i> LW (фирма <i>Lynred</i>)	7,7–9,6	30	20	$2,5 \times 10^{-12}$
ФП2М-L (ИФП СО РАН)	7,8–9,8	30	30	$4,0 \times 10^{-12}$
<i>Mars</i> VLW (фирма <i>Lynred</i>)	7,7–11,7	30	25	$4,5 \times 10^{-12}$

Таблица 2. Пороговые характеристики неохлаждаемых МФПУ на МБМ**Table 2.** Threshold characteristics of uncooled microbolometric sensors

Наименование	Материал	$(A_{el})^{1/2}$, мкм	ΔT_{th} , мК	$P_{e_{th}}$, Вт
<i>Pico</i> 640-Gen 2	α -Si	17	40	$2,2 \times 10^{-11}$
<i>Pico</i> 1024-Gen 2	α -Si	17	50	$2,7 \times 10^{-11}$
<i>Bird</i> XGA HS	VO_x	17	35	$2,0 \times 10^{-11}$
АСТРОН-64017-1	VO_x	17	40	$2,2 \times 10^{-11}$
GST 817M	VO_x	17	40	$2,2 \times 10^{-11}$
DB1024-12C-A	VO_x	12	50	$1,4 \times 10^{-11}$
GST 612M	VO_x	12	40	$1,2 \times 10^{-11}$
GST 1212M	VO_x	12	30	$0,8 \times 10^{-11}$

то у последних эти характеристики примерно в 50 раз хуже, чем у фотонных МФПУ LW диапазона, и примерно в 500 раз хуже, чем у фотонных приемников MW диапазона.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ВОЗДУШНОГО МАЛОРАЗМЕРНОГО ОБЪЕКТА

Проведенный выше теоретический анализ пороговой силы излучения и порогового потока позволяет сделать вывод, что при обнаружении на фоне неба малоразмерного объекта по его тепловому излучению определенное преимущество будет у приборов с охлаждаемым МФПУ MW диапазона по сравнению с аналогичными приборами LW диапазона, использующими как охлаждаемые фотонные, так и неохлаждаемые тепловые фотоприемные устройства.

Теоретический вывод подтверждается результатом натурного эксперимента по обнаружению воздушного малоразмерного обь-

екта с температурой, близкой к температуре окружающего воздуха, и угловой скоростью около 40 мрад/с. В эксперименте использовались два макета приборов (рис. 1 и 2). Макет прибора MW диапазона оснащен охлаждаемым МФПУ (формат 640×512, шаг 15 мкм, $\Delta\lambda = 3,7\text{--}4,8$ мкм) и двумя сменными объективами (фокусные расстояния 40 и 200 мм) с относительными отверстиями 1:2. В макете прибора LW диапазона использовалась камера VLM-640 [19] с неохлаждаемой МБМ (формат 640×512, шаг 17 мкм, $\Delta\lambda = 7\text{--}15$ мкм) и объективом-трансфокатором (с переменным фокусным расстоянием от 25 до 222 мм). В обоих макетах обеспечивалась передача несжатых изображений с полным амплитудным разрешением 14 бит и кадровой частотой 50 Гц. Программной регулировкой реализовывались следующие времена накопления: в приборе LW диапазона — от 3,3 до 33 мкс (максимальное значение ограничено кадровой частотой и «катыщимся» построчным считыва-

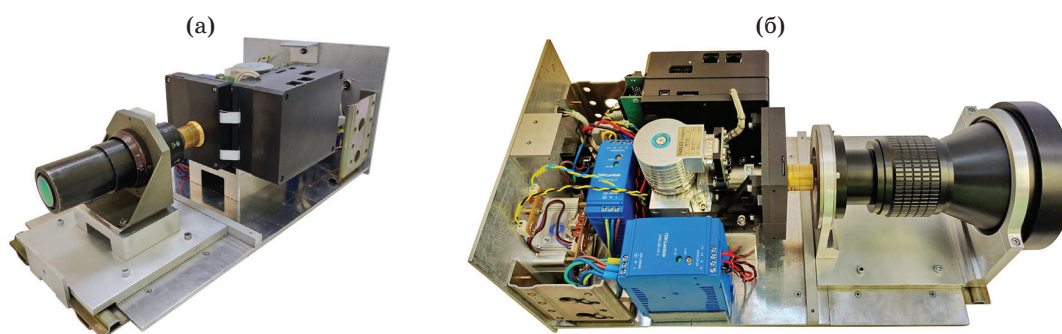


Рис. 1. Макет прибора MW диапазона со сменными объективами
Fig. 1. The prototype of MW-range device with interchangeable lenses

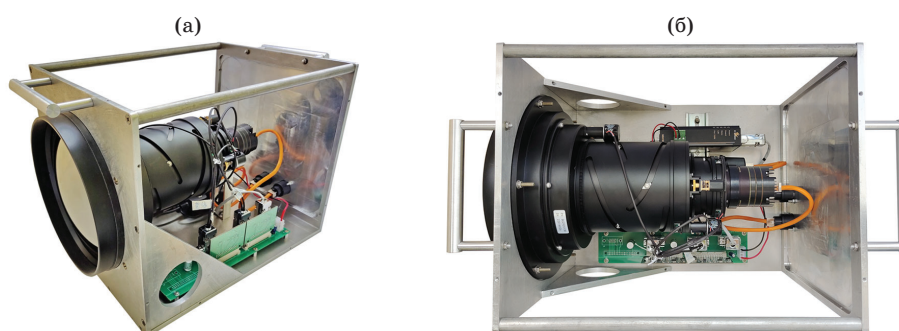


Рис. 2. Макет прибора LW диапазона с объективом-трансфокатором
Fig. 2. The prototype of LW-range device with zoom lenses

ванием в камере VLM-640), в приборе MW диапазона его можно было увеличивать до 6 мс.

Эксперимент проводился в сентябре, в малооблачную погоду без осадков. Макеты размещались над траекторией полета воздушного малоразмерного объекта. Дистанция наблюдения составляла от нескольких сотен метров до нескольких километров. Размещение аппаратуры иллюстрирует рис. 3.

Рисунки 4 и 5 демонстрируют регистрацию сигнала от объекта наблюдения: прибором MW диапазона с охлаждаемым фотоприемником на дистанции около 3,5 км и прибором LW диапазона на МБМ на дистанции около 3,0 км. Для облегчения визуального обнаружения объекта применялось вычитание предыдущего кадра из текущего. Было получено порядка 30 информативных реализаций. Отношение сигнал/шум, полученное усреднением по реализациям, составило 100–120 в MW приборе (фокусное расстояние 40 мм) и 11–20 в LW приборе (11–12 при фокусном расстоянии 60 мм). Как и ожидалось, прибор MW диапазона с охлаждаемым МФПУ пока-



Рис. 3. Размещение аппаратуры
Fig. 3. The equipment placement

зал лучшую чувствительность по сравнению с прибором LW диапазона на МБМ, что обусловило отличие на порядок в регистрируемом отклике при сопоставимых параметрах объективов.

Изображения объекта наблюдения, полученные LW прибором, имеют вытянутую форму, которая объясняется особенностью

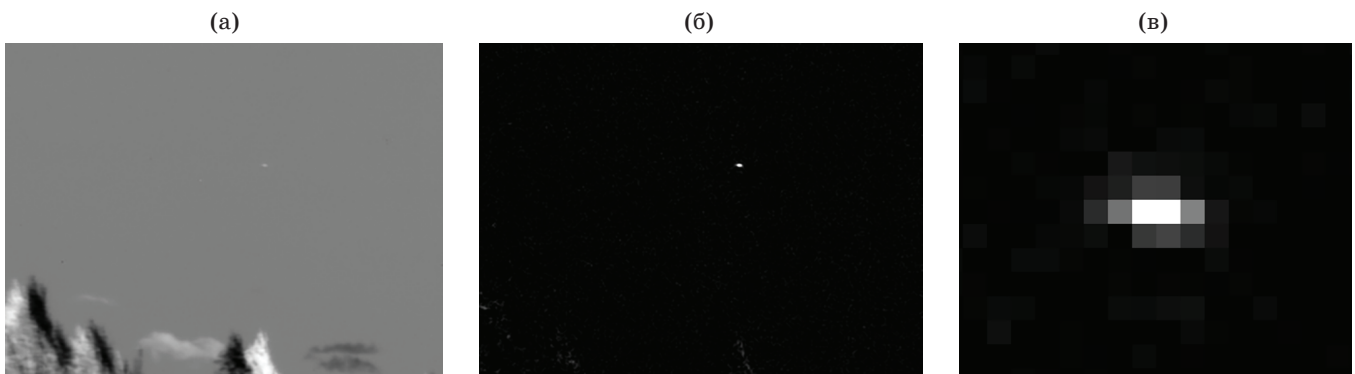


Рис. 4. Объект на фоне неба (MW диапазон, охлаждаемое МФПУ, расстояние около 3,5 км, $f_{os} = 40$ мм). (а) — исходное изображение, (б) — разность двух последовательных кадров, (в) — увеличенный фрагмент изображения

Fig. 4. An object against the sky (MW range, cooled matrix photodetector, distance near 3.5 km, $f_{os} = 40$ mm). (a) Original image, (б) difference between two consecutive frames, (в) enlarged image fragment

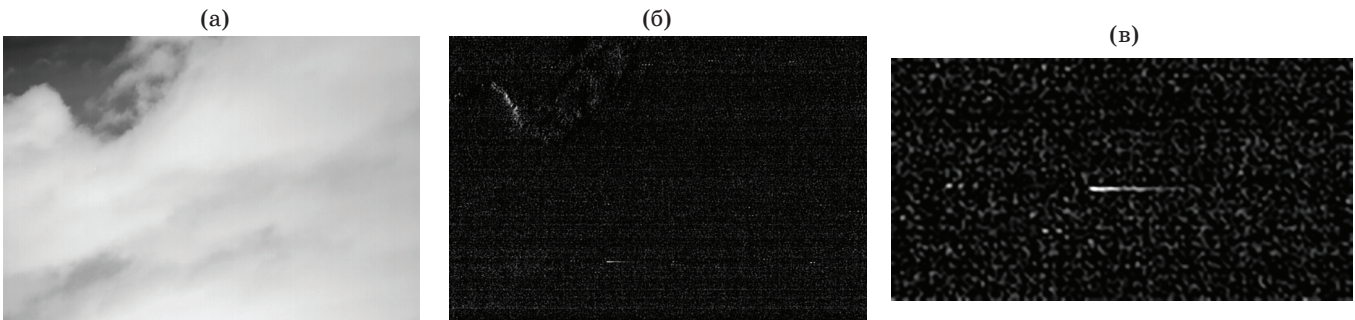


Рис. 5. Объект на фоне неба (LW диапазон, МБМ, расстояние около 3,0 км, $f_{os} = 100$ мм). (а) — исходное изображение, (б) — разность двух последовательных кадров, (в) — увеличенный фрагмент изображения

Fig. 5. An object against the sky (LW range, microbolometer, distance near 3.0 km, $f_{os} = 100$ mm). (a) Original image, (б) difference between two consecutive frames, (в) enlarged image fragment

работы МБМ, обладающей существенной тепловой инерционностью. Размер и направление изображения объекта в каждом кадре указывают на его траекторию и ориентацию относительно наблюдателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный теоретический анализ показал, что по критерию пороговой силы излучения, начиная с которой появляется возможность обнаружить подвижный малоразмерный объект на фоне неба, преимущество имеет прибор с охлаждаемым фотонным МФПУ MW диапазона. При равных параметрах объектива и охлаждаемой фоточувствительной матрицы пороговая сила излучения в MW диапазоне в несколько десятков раз меньше, чем в LW диапазоне. По критерию минимального по-

рогового потока преимущество также остается за охлаждаемыми фотонными МФПУ MW диапазона. Пороговые потоки у тепловых МФПУ LW диапазона примерно в 50 раз больше, чем у фотонных приемников того же диапазона, и примерно в 500 раз больше, чем у фотонных приемников MW диапазона.

Сравнительный теоретический анализ дополнен натурным экспериментом, что в значительной мере определяет новизну проведенного исследования. В рамках натурального эксперимента выполнено сравнение сигналов от наблюдаемого воздушного малоразмерного объекта, регистрируемых приборами с охлаждаемым фотонным МФПУ MW диапазона и с тепловым приемником на МБМ аналогичного формата и близким размером фоточувствительных элементов. При сопоставимых параметрах объектива регистрируемые

отклики прибором с фотонным МФПУ MW диапазона были примерно на порядок больше, чем у прибора с тепловым приемником на МБМ. Свидетельством этому являются значения отношения сигнал/шум, полученные усреднением по нескольким десяткам реализаций, а именно, в приборе MW диапазона указанное отношение составило 100–120 по сравнению с 11–12 в приборе LW диапазона.

Полученные результаты показывают, что при выборе рабочего спектрального диапазона проектируемых оптико-электронных систем обнаружения воздушных малоразмерных объектов следует учитывать выявленное преимущество в пороговых характеристиках приборов, использующих охлаждаемые фотоприемники MW диапазона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Ч. III. Особенности дистанционной регистрации и анализа тепловых полей природных образований и антропогенных объектов. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 140 с.
Belousov Yu.I., Postnikov E.S. Infrared photonics. P. III. Features of remote registration and analysis of thermal fields of natural formations and anthropogenic objects [in Russian]. St. Petersburg: ITMO University, 2019. 140 p.
2. Тарасов В.В., Якушников Ю.Г. Инфракрасные системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 443 с.
Tarasov V.V., Yakushnikov Yu.G. Infrared systems of viewing type [in Russian]. Moscow: "Logos" Publ., 2004. 443 p.
3. Севостьянов К.К. К вопросу обнаружительной способности оптической системы на основе матричного фотоприемного устройства при наблюдении удаленного объекта в длинноволновом ИК спектре // Вестник воздушно-космической обороны. 2023. Вып. 4(40). С. 67–72.
Sevostyanov K.K. On the issue of the detection ability of an optical system based on a matrix photodetector when observing a remote object in the long-wavelength IR spectrum [in Russian] // Bulletin of Aerospace Defense. 2023. Iss. 4(40). P. 67–72
4. Знаменский И.В., Зотьев Е.О., Юдин С.Ю. Сравнительный анализ пороговой чувствительности ИК-систем в различных спектральных диапазонах // Фотоника. 2021. Т. 15. № 6. С. 484–500. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.6.484.500>
Znamensky I.V., Zot'ev E.O., Yudin S.Yu. Comparative analysis of threshold sensitivity of ir systems in different spectral range // Photonics. 2021. V. 15. № 6. P. 484–500. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.6.484.500>
5. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Матричные фотоприемные устройства ИК-диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Ч. II // Фотоника. 2020. Т. 14. № 4. С. 320–330. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.4.320.330>
Kulchitsky N.A., Naumov A.V., Startsev V.V. Infrared focal plane array detectors: "Post Pandemic" development trends. P. II. [in Russian] // Photonics. 2020. V. 14. № 4. P. 320–330. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.4.320.330>
6. Сизов Ф.Ф. ИК-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы // Sensor Electronic and Microsystem Technol. 2015. Т. 12.
Sizov F.F. IR photoelectronics: Photonic or thermal detectors? Prospects [in Russian] // Sensor Electronic and Microsystem Technol. 2015. V. 12. № 1. P. 26–53. <http://doi.org/10.18524/1815-7459.2015.1104447>
7. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Марчишин И.В. и др. Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники инфракрасного диапазона // Научно-техн. журнал ВЕСТНИК. 2016. № 2. С. 130–135.
Demyanenko M.A., Yesaev D.G., Marchishin I.V., et al. Uncooled matrix microbolometric infrared detectors [in Russian] // Scientific and Technical J. VESTNIK. 2016. № 2. P. 130–135.
8. Кремис И.И., Гладков Р.А., Турбин А.В. и др. Малогабаритная тепловизионная камера с микросканированием // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 6. С. 50–60. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-06-50-60>
Kremis I.I., Gladkov R.A., Turbin A.V., et al. Small-sized thermal imaging camera based on micro-scanning // J. Opt. Technol. 2023. V. 90. № 6. P. 317–323. <http://doi.org/10.1364/JOT.90.000317>
9. Павлов Н.И., Прилипко А.Я. Быстрый обзор круговой зоны инфракрасной сканирующей системой с матричным фотоприемным устройством // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 71–75.
Pavlov N.I., Prilipko A.Ya. Rapid survey of a circular zone using an IR scanning system with a photodetector array // J. Opt. Technol. 2013. V. 80. № 5. P. 313–315. <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000313>
10. Борисов М.Ф., Лебедев О.А., Павлов Н.И. и др. Оптико-электронная система кругового обзора. 1. Схемы построения и вариант практической реализации // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 15–21.
Borisov M.F., Lebedev O.A., Pavlov N.I., et al. Optoelectronic circular scanning system. 1. Structural setup and version of practical implementation // J. Opt. Technol. 2014. V. 81. № 9. P. 493–498. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000493>
11. Ашуров Д.А., Исламов В.К. Неохлаждаемые тепловизионные приборы для обнаружения малоразмерных воздушных целей // Молодой ученый. 2017. № 46(180). С. 40–43.
Ashurov D.A., Islamov V.K. Uncooled thermal imaging devices for detecting small-size air targets [in Russian] // Young Scientist. 2017. № 46(180). P. 40–43.
12. Головкин В.А., Емельянов В.Н., Солк С.В. Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК-диапазоне // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 5. С. 40–44.
Golovkov V.A., Yemelyanov V.N., Solk S.V. Detection of heated moving small-size objects in the IR range [in Russian] // Izvestiya VUZov. Instrumentation. 2013. V. 56. P. 40–44.
13. Lynred. Scorpio MW [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lynnred.com/sites/default/files/2021-07/SCORPIO%20MW%20datasheet.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.06.2024).

- Lynred. Scorpio MW [Electronic resource]. Access mode: <https://www.lynnred.com/sites/default/files/2021-07/SCORPIO%20MW%20datasheet.pdf>, free. Language English (date of access: 06/05/2024).
14. Lynred. Scorpio LW [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.lynnred.com/sites/default/files/2021-07/SCORPIO%20LW_DEFENSE%20Datasheet.pdf, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.06.2024).
Lynred. Scorpio LW [Electronic resource]. Access mode: https://www.lynnred.com/sites/default/files/2021-07/SCORPIO%20LW_DEFENSE%20Datasheet.pdf, free. Language English (date of access: 06/05/2024).
15. GSTiR. Cooled Infrared Detector [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gst-ir.net/uploads/products/pdf/c615m-cooled-infrared-detector.pdf>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 05.06.2024).
GSTiR. Cooled Infrared Detector [Electronic resource]. Access mode: <https://www.gst-ir.net/uploads/products/pdf/c615m-cooled-infrared-detector.pdf>, free. Language English (date of access: 06/05/2024).
16. Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: History, status and outlook // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 2267–2336. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01>
17. Dark Current of HgCdTe Detectors / Electronic resource URL: [http://ridl.cfd.rit.edu/products/talks/DVW/James Beletic/AM 3256699 Beletic II-VI Presentation-RIT \(26 Mar 2012\).pdf](http://ridl.cfd.rit.edu/products/talks/DVW/James%20Beletic/AM%203256699%20Beletic%20II-VI%20Presentation-RIT%20(26%20Mar%202012).pdf)
18. Романов К.Ю., Старченко А.Н., Филиппов В.Г. и др. Программы расчета спектральных коэффициентов пропускания атмосферы в диапазоне от 0,3 до 14 мкм для горизонтальных и наклонных трасс // Сб. тр. VII Междунар. конф. «Прикладная оптика–2006». Т. III. СПб., Россия. 16–20 октября 2006. С. 259–262.
Romanov K.Yu., Starchenko A.N., Filippov V.G., et al. Programs for calculating spectral coefficients of atmosphere in the range from 0.3 to 14 microns for horizontal and inclined routes [in Russian] // Proc. VII Intern. Conf. — Applied Optics-2006. V. III. St. Petersburg, Russia. October 16–20, 2006. P. 259–262
19. <https://www.npk-photonica.ru/product/21363> (НПК Фотоника / Сенсор GWIR 0318X2A фирмы North Guangwei Technology Inc.)
<https://www.npk-photonica.ru/product/21363> (NPK Photonics / Sensor GWIR 0318X2A from North Guangwei Technology Inc.)

АВТОРЫ

Александр Александрович Максимов — ведущий инженер-электроник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0005-3370-2150>; maksimovaa@niioep.ru

Николай Ильич Павлов — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>; pavlovni@niioep.ru

Алексей Николаевич Старченко — кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>; anstar2000@mail.ru

Владимир Геннадьевич Филиппов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540, Россия; <https://orcid.org/0009-0004-1617-9225>; filippovvg@niioep.ru

AUTHORS

Alexander A. Maksimov — Leading Electronics Engineer, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0005-3370-2150>; maksimovaa@niioep.ru

Nikolai I. Pavlov — Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director in Science, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, 188540, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>; pavlovni@niioep.ru

Alexey N. Starchenko — PhD (Engineering), Head of Department, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0003-5129-5515>; anstar2000@mail.ru

Vladimir G. Filippov — PhD (Engineering), Leading Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, 188540, Russia; <https://orcid.org/0009-0004-1617-9225>; filippovvg@niioep.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.2024

Одобрена после рецензирования 05.06.2024

Принята к печати 29.07.2024

The article was submitted to the editorial office 08.04.2024

Approved after review 05.06.2024

Accepted for publication 27.07.2024