

Для сопоставления ЛРМ и уровней NIIRS было проведено исследование по моделированию вышеуказанных параметров. По разработанной математической модели оптико-электронного тракта задавались параметры ОЭА с последующим расчетом ЛРМ и уровня NIIRS (см. таблицу 1). Расчет проводился для ОЭА среднего и высокого разрешения с высоты орбиты 500 км для следующих зачетных условий:

- съемка в надири;
- высота Солнца над местным горизонтом – не менее 30 град;
- коэффициент пропускания атмосферы – не менее 0,85 (интегральный) или метеорологическая дальность видения (МДВ) не хуже – 20 км;
- минимальный коэффициент отражения подстилающей поверхности 0,1;
- максимальный коэффициент отражения тест – объекта 0,4;
- альbedo фона 0,07;
- вероятность обнаружения не менее 0,8.

На основе полученных результатов были определены требования к ОЭА по критериям ЛРМ и уровню NIIRS для различных сфер применения (табл. 2).

Таблица 2. Сфера применения

Сфера применения	ЛРМ, м	Уровень NIIRS
Военное дело	0,28–0,97	6, 7
Гражданский сектор	0,97–1,56	5
Сельское хозяйство	1,56–3,25	4
МЧС	1,56–3,25	4

В ходе проведенного расчета и последующего анализа было определено соответствие друг другу уровней NIIRS и ЛРМ. На основе расчетных данных и в зависимости от поставленных задач по применению ОЭА можно сформировать технический облик аппаратуры для потенциального пользователя.

Литература

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://irp.fas.org/imint/niirs.htm>. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Качество данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень показателей качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне : ГОСТ Р 59475-78.

УДК 681.772

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ

Свибович И.В., Шкадаревич А.П.

УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведен краткий обзор современных тенденция оптического приборостроения в области тепловизионной техники. Рассмотрено применение тепловизионных матриц с различным разрешением и размером пикселей, их влияние на тактико-технически характеристики изделий. Показаны преимущества и недостатки применения различных видов калибровки тепловизионного изображения (тепловизионные модули с механическим затвором и без него). Затронута тематика использования атермализованных объективов в современных приборах наблюдения и тепловизионных прицелах.

Ключевые слова: тепловизионный модуль, атермализованный объектив, калибровка.

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THERMAL IMAGING DEVICES BASED ON UNCOOLED BOLOMETRIC MATRICES

Svibovich I., Shkadarevich A.

Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk Belarus

Annotation. The paper provides a brief overview of modern trends in optical instrumentation in the field of thermal imaging technology. The use of thermal imaging matrices with different resolution and pixel size, their influence on the tactical and technical characteristics of products is considered. The advantages and disadvantages of using various types of thermal image calibration (thermal imaging modules with and without a mechanical shutter) are shown. The topic of the use of materialized lenses in modern surveillance devices and thermal imaging sights is touched upon.

Keywords: thermal imaging module, materialized lens, calibration.

Адрес для переписки: Свибович И.В., ул. Макаенка, 23, корп. 1, 220113, Республика Беларусь
e-mail: ilya_svibovich@mail.ru

В данной статье при упоминании микроболометрических модулей будут иметься в виду тепловизионные матрицы дальнего ИК-диапазона (8–14 мкм).

Развитие электроники и усовершенствование технологии производства болометрических приемников излучения стало причиной появления большого количества коммерчески доступных

тепловизионных модулей, имеющих сравнительно небольшую стоимость, малые габариты и при этом хорошие характеристики.

До 2015 года основная часть тепловизионных модулей имело разрешение 384×288 пикселей и размер пикселя 25 мкм. Но начиная с 2015 года технология производства позволила уменьшить размер пикселя до 17 мкм. Тепловизионные модули с таким размером пикселя и сегодня занимают основной объем поставок на рынке данного вида продукции. В 2020 году на рынке появились коммерчески доступные тепловизионные модули с размером пикселя 12 мкм. Их доля в общем производстве пока не большая, но в ближайших несколько лет они вытеснят свои аналоги с размером пикселя в 17 мкм. При этом стандарт разрешения остался прежним, это модули с разрешением 384×288 и 640×512 мкм. Выпускаются модули с разрешением 1024×768 пикселей, но их стоимость гораздо выше, а прирост в характеристиках готовых оптико-электронных приборов в сегменте приборов наблюдения и тепловизионных прицелов не значительный, поэтому далее их мы рассматривать не будем.

Для примера ниже приведена таблица, в которой показан прирост в одной из основных характеристик тепловизионного прибора (дальности обнаружения объекта размером 1,7×0,5 метра) при использовании тепловизионных модулей с размером пикселя 12, 17 и 25 мкм соответственно. При этом остальные параметры (разрешение, фокусное расстояние объектива) для них оставим неизменными. Дальность обнаружения объекта при использовании тепловизионного модуля с размером пикселя 25 мкм возьмем за 1 (100 %).

Таблица 1. Прирост в характеристике

Размер пикселя	Дальность обнаружения (объект 1,7×0,5 м), м	Прирост, %
25 мкм	2250	0
17 мкм	3309	47
12 мкм	4688	108

Из данного примера можно сделать следующие основные выводы:

1. Уменьшение размера пикселя в тепловизионных модулях приводит к значительному увеличению дальности обнаружения различных объектов.

2. Использование тепловизионных модулей с меньшим размером пикселя дает возможность значительного уменьшения массы и габаритов тепловизионных приборов, за счет использования тепловизионных объективов с меньшим фокусным расстоянием, при этом тактико-технические характеристика такого прибора остаются на прежнем уровне. Это очень важно для оптико-электронных приборов, предназна-

ченных для ношения и/или установки на стрелковое оружие.

Следующим важным параметром, характеризующим тепловизионные модули, является материал, на основе которого изготовлена матрица.

В 2021 году основными материалами для микроболометрических матриц являются оксид ванадия (VOx, примерно 68 % тепловизионных матриц изготавливаются с его использованием) и аморфный кремний (α -Si). Существует еще одна технология производства матриц – BST, но сегодня, приборы, выполненные на сегнето-электрическом эффекте, практически не изготавливаются. Поэтому в дальнейшем мы ее касаться не будем.

Одним из самых важных параметров данных микроболометрических матриц является способ их калибровки для компенсации ошибок сенсора. Точность определения сенсором температурной разницы изучаемой сцены падает со временем, поскольку накопленный матрицей тепловой сигнал начинает вносить свои собственные коррективы. Для компенсации таких искажений, а также при запуске матрицы, требуется обнулить значение получаемого сигнала при отсутствии внешнего воздействия. Наиболее эффективным и зарекомендовавшим себя методом является калибровка при помощи затвора. Применение механического затвора для калибровки не всегда удобно, поэтому как альтернатива – калибровка с использованием компенсационных калибровочных таблиц.

Если говорить о плюсах и минусах двух способов калибровки, то в конечном итоге калибровка по затвору, дает больший температурный контраст изображения, что действительно заметно. Это связано с тем, что компенсационные калибровочные таблицы со временем теряют свою актуальность, и для получения достоверного изображения требуется определение новых коэффициентов; сделать это можно только силами производителя. Это в свою очередь потребует демонтаж и долговременную транспортировку до завода-изготовителя и обратно. Поэтому для приборов наблюдения использование матриц с калибровкой по затвору является более предпочтительным.

Однако в сфере применения тепловизионных модулей для прицелов, калибровка с использованием компенсационных калибровочных таблиц все же выигрывает. Это связано с тем, что при калибровке по затвору, тепловизионное изображение замирает на время закрытия затвора, иногда это время достигает одной секунды. А в условиях быстро изменяющейся боевой обстановки одна секунда может стоить очень дорого. В итоге более рационально пожертвовать качеством изображения.

Итак, выбор технологии изготовления микроболометра, равно как и применение затвора зависит от специфики применения прибора.

Отдельно поговорим о тепловизионных объективах. Самым распространенным, но не единственным материалом для изготовления объективов тепловизионных приборов является монокристаллический германий. В той или иной степени, пропускной способностью в MWIR и LWIR – диапазонах обладают также сапфир, селенид цинка, кремний и полиэтилен. Для изготовления объективов тепловизионных приборов применяют также халькогенидные стекла.

Но для применения в приборах большой интерес вызывают атермализованные объективы и их преимущества и недостатки по сравнению с объективами, подразумевающими фокусировку.

Атермализованный объектив имеет «автоматическую» температурную компенсацию. Это означает, что он не требует перефокусировки при изменении температуры окружающей среды (в диапазоне температур от минус 40 до плюс 80 °С). С точки зрения конструкции это означает, что у него нет механических элементов в виде кольца фокусировки, что снижает габариты и вес всего объектива в целом. К примеру вес объектива с

ручной фокусировкой и объектива атермализованного (с одинаковым фокусным расстоянием) может отличаться в два раза.

К минусам атермализованного объектива следует отнести уменьшение качества изображения по сравнению с объективом без атермализации (это связано с технологией производства).

Вывод. Современные технологии производства тепловизионных матриц и объективов позволяют производить на предприятии НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО весь спектр современных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов. Это малогабаритные приборы наблюдения (весом до 400 грамм, при использовании модулей с размером пикселя 12 мкм, калибровкой без затвора и атермализованных объективов), которые отлично работают на дистанциях до 1000 метров. Либо приборы, требующие повышенного качества изображения (матриц с размером пикселя 12 мкм, механическим затвором для калибровки и объективами с ручной фокусировкой собственного производства), и дистанция наблюдения свыше 5000 м.

УДК 621.37.535

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ДВУХЧАСТОТНОМ ГАЗОВОМ ЛАЗЕРЕ СО СЛАБО АНИЗОТРОПНЫМ РЕЗОНАТОРОМ Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для различных типов анизотропии резонатора и различных переходов между рабочими уровнями активной среды на основе разработанной и экспериментально апробированной теоретической модели проведено исследование влияния отстройки частоты генерации от центра контура усиления на работу двухчастотного газового лазера. Обнаружена поляризационная мультистабильность: возможность одновременного существования стационарных одночастотных режимов генерации, поляризация которых задается резонатором, и автоколебательных двухчастотных режимов с периодическими колебаниями интенсивностей, азимутов и эллиптичностей, а также с колебаниями интенсивностей и эллиптичностей и с вращением азимутов генерируемых волн.

Ключевые слова: поляризация излучения лазера, автоколебания, мультистабильность.

POLARISATION MULTISTABILITY IN A TWO-FREQUENCY GAS LASER WITH WEAKLY ANISOTROPIC CAVITY Svirina L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. On the basis of developed and experimentally tested theoretical model the influence of the line center tuning on the dynamical behavior of a two-frequency gas laser with a weakly anisotropic cavity has been studied at different cavity anisotropies and different transitions between the working levels. The polarization multistability has been revealed, which appears as a coexistence of one-frequency steady state regimes with polarization of light given by the empty cavity conditions and two-frequency spontaneous pulsations with periodic oscillations of intensities, ellipticities and azimuths, as well as with oscillations of intensities and ellipticities and rotation of azimuths.

Key words: vector-field laser, spontaneous pulsations, multistability.

*Адрес для переписки: Свирина Л.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lpsvirina@bntu.by*

Для различных типов анизотропии резонатора и различных переходов между рабочими уровнями среды на основе разработанной и экс-

периментально апробированной теоретической модели [1] в области значений фазовой анизотропии резонатора, где возникает поляризацион-