

Результаты калибровки высокочувствительного устройства измерения параметров поперечного распределения энергии в пучке инфракрасного излучения

А. Г. Верхогляд, А. Г. Елесин, В. М. Ведерников, М. Ф. Ступак, С. Н. Макаров

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения, СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: stupak@tdisie.nsc.ru, verhog@tdisie.nsc.ru, veder@tdisie.nsc.ru, makarovsn@tdisie.nsc.ru

Описано высокочувствительное устройство измерения параметров поперечного распределения энергии в пучке инфракрасного излучения, входящее в состав автоматизированной системы синтеза динамических и статических инфракрасных изображений. Система предназначена для контроля характеристик матричных фотоприёмных устройств в области спектра 2,5–4,6 мкм при уровнях облучённости в диапазоне 10^{-9} – 10^{-5} Вт/см². Устройство подлежит периодической градуировке и проверке точности перемещений линейных подвижек ножа Фуко по двум координатам. Измерения с применением устройства выполняют в соответствии с государственным и отраслевым стандартами РФ. Погрешность сканирования по каждой координате не превышает 1 мкм. Устройство выполняет измерения функции концентрации энергии, коэффициента концентрации энергии в плоскости сформированного изображения в рабочих спектральном и динамическом диапазонах системы.

Ключевые слова: система синтеза инфракрасных изображений, матричное фотоприёмное устройство, коэффициент концентрации энергии, калибровка, уровень облучённости, прецизионное позиционирование.

Введение. Два последних десятилетия усилия ряда коллективов зарубежных и отечественных разработчиков направлены на создание высокоэффективных чувствительных матричных фотоприёмных устройств (МФПУ), работающих в инфракрасном (ИК) и даже терагерцевом диапазонах [1]. Один из важнейших этапов создания МФПУ ИК-диапазона – испытания и тестирования. Лабораторное тестирование на специализированном стенде является одним из способов экономии средств, времени и позволяет разработчикам оценивать и оптимизировать характеристики будущих МФПУ уже на этапе конструкторской проработки изделий.

Автоматизированная система синтеза динамических и статических инфракрасных изображений. Создание систем, синтезирующих различные динамические тесты для испытания современных МФПУ чрезвычайно актуально в настоящее время (см., например, «RTB 3000 Detector test bench. Santa Barbara Infrared. Heico company. Specification rev. 319–000–310», [2, 3]). Базовыми элементами таких систем являются комплексированные преобразователи, формирующие как статические тестовые изображения, так и динамические сцены на МФПУ в заданной ИК-области спектра. Авторами настоящей статьи разработана и апробирована автоматизированная система синтеза динамических и статических ИК-изображений для контроля характеристик МФПУ в спектральном диапазоне 2,5–4,6 мкм (далее – система) [4]. В конструкции системы реализованы, в частности, два канала засветки поверхности

тестируемого изделия – каналы объекта и фона. С помощью канала объекта создают структуры с переменной яркостью и высокой пространственной частотой. Минимальный диаметр области засветки должен быть не более 30 мкм, коэффициент концентрации энергии в его пятне рассеивания около 0,7. Максимальный размер области засветки канала объекта может достигать 3×3 мм. Канал фона предназначен для создания управляемой засветки на области размером не менее 200×200 мм. Система обеспечивает возможность независимого изменения уровней облучённости в обоих каналах в широком диапазоне облучённостей (облучённость в канале фона не менее 10^{-7} Вт/см², в канале объекта – в диапазоне 10^{-9} – 10^{-6} Вт/см²).

Для проведения различных юстировочных операций в подобных системах, а также тестирования элементов их оптических трактов необходимы высокочувствительные, высокоточные устройства с большим динамическим диапазоном измерений функции концентрации энергии, коэффициента концентрации энергии в плоскости сформированного изображения в рабочем спектральном диапазоне системы или стенда [5–7].

Готовых промышленных решений для относительно широкого спектрального диапазона 2,5–4,6 мкм и диапазона измерения облучённости 10^{-9} – 10^{-5} Вт/см² в открытых источниках авторами настоящей статьи не обнаружено. Поэтому задача создания устройств измерения характеристик поперечного распределения энергии в пучке ИК-излучения для средней ИК-области и с приведёнными

выше диапазонами измерения облучённости является чрезвычайно актуальной.

Учитывая отсутствие аттестованных средств измерений (СИ) (в том числе матричных) облучённости для рабочей широкой спектральной ИК-области с высокой спектральной селективностью и требуемого большого динамического диапазона 10^{-9} – 10^{-6} Вт/см², авторами настоящей статьи разработано входящее в состав системы оригинальное высокочувствительное устройство [8] (далее – устройство). Устройство предназначено для измерения коэффициента концентрации энергии в рабочем спектральном диапазоне системы (диапазон измерения облучённости 10^{-9} – 10^{-5} Вт/см²). Калибровка устройства выполняется с использованием сертифицированного СИ ЗА OPHIR (OPHIR OPTRONICS SOLUTIONS Ltd. (HQ), Израиль, свидетельство об утверждении типа средств измерений IL.C.37.003.A № 44661) и набора калиброванных нейтральных фильтров (или программно изменяемой геометрии генерируемых изображений).

Описание устройства и принципов определения его основных характеристик. С помощью устройства определяют характеристики поперечного распределения энергии в пучке ИК-излучения в области 2,5–4,6 мкм, в частности измеряют коэффициент концентрации энергии в пятне и геометрические размеры пятна. Также измеряют мощность излучения в ИК-диапазоне. Результаты измерений по проводному соединению поступают во внешний персональный компьютер (ПК), где преобразуются в удобный для отображения вид.

Габаритные размеры устройства 320×250×200 мм, общая масса не более 10 кг. Конструктивно устройство выполнено в виде шести функциональных блоков, находящихся в едином корпусе. На передней панели корпуса

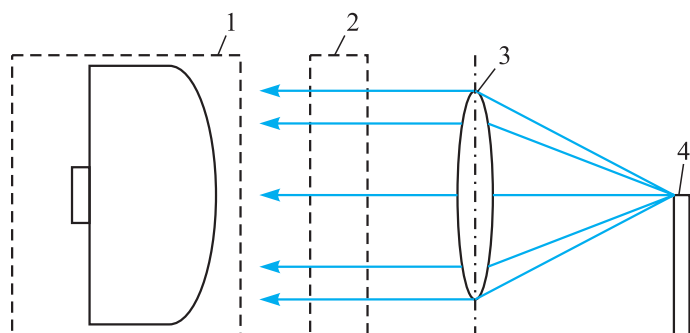


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема устройства:

1 – фоточувствительный элемент (полупроводниковый болометр) с фокусирующей германиевой линзой; 2 – гнездо размещения сменных интерференционных фильтров; 3 – линза LE5838-E ThorLabs; 4 – двухкоординатный нож Фуко или двухкоординатная калиброванная диафрагма

Fig. 1. The concept of the device:

1 – photosensitive element (semiconductor bolometer) with a focusing germanic lens; 2 – nest placement of interchangeable interference filters; 3 – lens LE5838-E ThorLabs; 4 – two-coordinated Foucault knife or two-coordinated calibrated diaphragm

расположено входное отверстие для приёма излучения, на задней – разъём RJ45 для подключения к внешнему ПК, светодиодный индикатор, разъём для синхронизации с источником ИК-излучения, разъём питания 220 В, совмещённый с выключателем и индикатором питания.

Оптическая схема устройства представлена на рис. 1. ИК-излучение (либо на всю рабочую спектральную область, либо «вырезанное» по спектру фильтром 2) попадает на фоточувствительный элемент 1 – полупроводниковый болометр БП-2М* (Ризлта, Россия) с фокусирующей германиевой линзой. При поглощении ИК-излучения фоточувствительный элемент нагревается, вследствие чего изменяется его электрическое сопротивление. Данное изменение сопротивления регистрируется, усиливается, оцифровывается и направляется во внутренний буфер устройства типа FIFO на хранение. Особенность устройства, существенно повышающая его чувствительность, – синхронное детектирование измерительного тракта устройства с источником ИК-излучения. Это позволило исключить из измеряемого сигнала паразитную засветку от окружающей среды и элементов оптического тракта исследуемого объекта. Поэтому основной вклад в погрешность устройства вносит тепловой шум сопротивления полупроводникового болометра.

Штатным модулируемым источником ИК-излучения является DLP-диапроектор на специализированной DMD-матрице из микрозеркал – пикселей, доработанной под заданный ИК-диапазон. Каждое микрозеркало имеет форму квадрата со стороной 12 мкм. Микрозеркала плотно упакованы в матрицу: зазоры между зеркалами около 0,5 мкм, шаг зеркал составляет 12,5 мкм, размерность матрицы 1600×1200 пикселей (микрозеркал). Применяются доработанные DMD-матрицы, используемые в видеопроекторах F32 (Projection Design, Норвегия). Исходная DMD-матрица типа S1410-9037 (Texas Instr., США) обеспечивает формирование и перемещение тестового объекта согласно программе, задаваемой управляющим компьютером и передаваемой через DVI-интерфейс. Рабочее поле матрицы 15×15 мм. Изображение матрицы располагается точно в приёмной плоскости устройства, где расположен нож Фуко или калиброванная диафрагма.

В связи с отсутствием аттестованных матричных СИ облучённости для рабочей широкой спектральной ИК-области с высокой спектральной селективностью в требуемом широком динамическом диапазоне 10^{-9} – 10^{-6} Вт/см² измерения с помощью данного устройства производили альтернативными утверждёнными методами: измерения ширины пучка падающего излучения – методом ножа Фуко по ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 «Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений ширин, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Ч. 3. Собственная и геометрическая классификация лазерных пучков, специфика их распространения и методики измерений»; измерения концентрации энергии – методом измерительной диафрагмы согласно ОСТ 3-6816-94 «Метод измерения функции концентрации энергии». Для измерения распределения энергии ИК-излучения на площадке фоточувствительного элемента используется нож Фуко, который расположен на программно-управляемой

сканирующей подвижке. При сканировании регистрируется массив данных распределения мощности пучка излучения, попадающего на фоточувствительный элемент. В устройстве реализовано раздельное сканирование по двум взаимно ортогональным координатам. Дифференцируя данное распределение по координате сканирования, получают распределение облучённости в пятне рассеяния по этой координате. Погрешность сканирования по каждой координате не превышает 1 мкм, шаг сканирования задаётся программно.

Градуировка устройства. Перед началом работы устройство градуируют и проверяют точность перемещений линейных подвижек ножа Фуко по поперечным относительно оси луча координатам x , z . В процессе градуировки определяют цену деления устройства в единицах измерения мощности и проверяют линейность его показаний. Для этого показания устройства методом прямых измерений сравнивают с показаниями эталонного СИ в рабочем ИК-диапазоне длин волн. Первичную градуировку устройства производят в составе автоматизированной системы синтеза ИК-изображений для тестирования характеристик МФПУ [4].

На установочный стол системы в месте размещения устройства для крепления МФПУ поочередно устанавливают сначала эталонное СИ – измерительную головку преобразователя измерительного термоэлектрического лазерного излучения 3А ОРНІR (далее – СИ1), а затем устройство. В плоскости изображений канала объекта системы формируется тестовый объект в виде квадрата размером 0,5×0,5 мм с максимальной облучённостью – изображение такого размера заведомо полностью переносится оптической схемой устройства на приёмную площадку полупроводникового болометра размером 120×120 мкм. Энергию светового потока в пятне рассеивания полученного изображения поочередно измеряют СИ1 и устройством. По результатам измерений определяют цену деления устройства в единицах мощности: $S_y = P_{СИ1}/P_y$, где $P_{СИ1}$, P_y – показания СИ1 и устройства в условных единицах мощности. При необходимости работы в единицах облучённости с помощью ножа Фуко определяют точные поперечные размеры тестового объекта.

Для проверки линейности показаний устройства в канал объекта последовательно вводят калиброванные нейтральные фильтры с известными коэффициентами пропускания. Испытания по утвержденной методике нейтральных фильтров с соответствующей паспортизацией каждого из них были проведены на сертифицированном СИ – фурье-спектрометре ФТ-801 (СИМЕКС, Россия) с привлечением специалистов предприятия-изготовителя данного измерительного оборудования. Затем измерения повторяют. Измеренные значения мощности в пределах чувствительности СИ1 и за её пределами соответственно должны отвечать равенствам

$$\begin{aligned} P_y^i S_y &= P_{СИ1}^i; \\ P_y^{\phi/\Phi} K_\Phi &= P_y^\Phi, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_y^{\phi/\Phi}$, P_y^Φ – значения мощности, измеренные устройством без фильтров и с фильтрами соответственно; K_Φ –

произведение значений коэффициентов пропускания нейтральных светофильтров в канале объекта.

Если для всей серии измерений с фильтрами равенство (1) верно в пределах погрешности устройства, то можно считать его шкалу линейной.

Линейность шкалы устройства была дополнительно проверена при программно изменяемой геометрии генерируемых изображений. Для этого выполняют следующую последовательность действий:

на установочный стол системы в месте размещения устройства для крепления МФПУ устанавливают СИ1;

система поочередно генерирует изображения – квадраты. Стороны каждого последующего квадрата в два раза меньше сторон предыдущего. Показания СИ1 записываются и сравниваются между собой (измеренное показание отличается от предыдущего в четыре раза в пределах погрешности СИ1);

затем на установочный стол устанавливают устройство, с помощью которого измеряют те же самые программно генерируемые изображения (квадраты);

если предыдущее и последующее показания устройства, как и показания СИ1, изменяются в четыре раза, то можно утверждать, что шкала устройства линейна (что и было подтверждено многочисленными испытаниями).

По результатам градуировочных испытаний было установлено следующее: шкала устройства линейная; значение одной собственной единицы устройства равно $4 \cdot 10^{-11}$ Вт; погрешность измерения устройства (среднее квадратическое отклонение), полученная статистической обработкой большого массива непрерывных измерений при неизменных внешних условиях, не превышает $4 \cdot 10^{-9}$ Вт.

Проверку погрешности перемещений линейной подвижки по оси X проводят с помощью лазерной измерительной системы XL-80 (RENISHAW plc., Великобритания, свидетельство об утверждении типа средств измерений GB.C.27.001.A № 50145) (далее – СИ2). На перемещающейся площадке линейной подвижки устанавливают оптический отражатель СИ2, а сам СИ2 – на отдельной стойке, так чтобы отражённый луч попадал в СИ2 во всём диапазоне перемещений линейной подвижки. Перед началом измерений подвижка находится в нулевом положении. Управляющей программой устройства задаются координаты точек x_{gi} с шагом 2 мм в диапазоне 0–20 мм и даётся команда на последовательное перемещение линейной подвижки в точку с координатой x_{gi} . В каждой точке с использованием СИ2 измеряются координаты при движении линейной подвижки в прямом $x_i(+)$ и обратном $x_i(-)$ направлениях. Количество циклов измерений в каждой точке $n=5$.

После измерений определяют воспроизводимость перемещений линейных подвижек по оси X как $R_i = |x_i(+)-x_i(-)|$. За погрешность перемещений принимается максимальное из n серий измерений значение воспроизводимости $R_{\max} = \max R_i$. Погрешность перемещений по оси Z находят аналогичным образом. По итогам проведённых измерений погрешность сканирования по каждой координате не превышает 1 мкм. Периодичность калибровки устройства

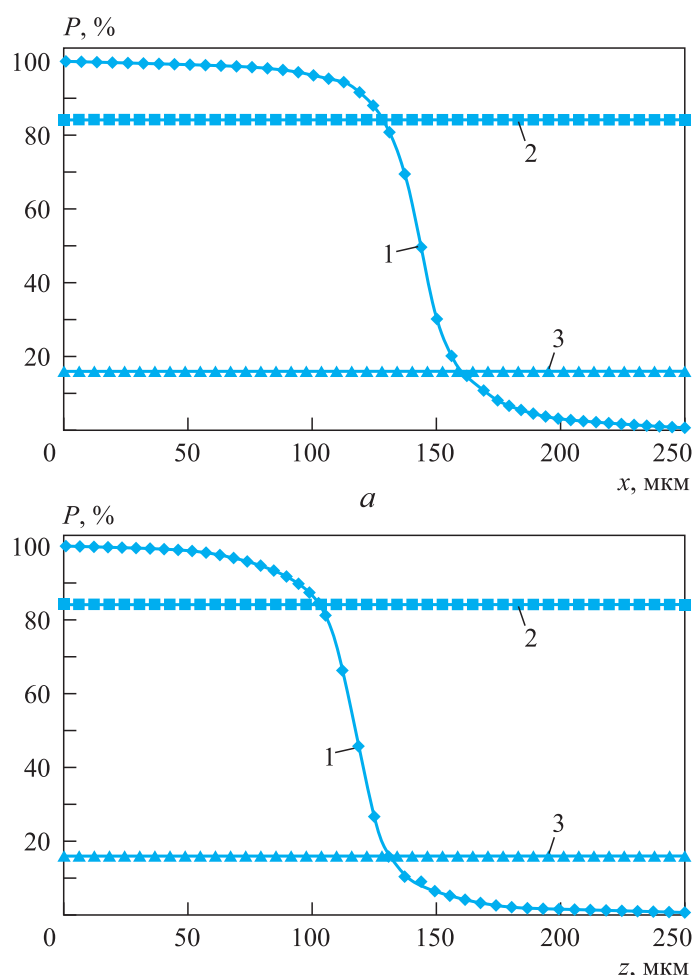


Рис. 2. Результаты измерений ширины пучка вдоль поперечных осей сечения пучка X (а) и Z (б):

1 – измеренная мощность; 2, 3 – 84 и 16 % максимальной мощности соответственно

Fig. 2. Beam width measurements along the beam cross-section X (a) and Z (b) ratios:

1 – measured power; 2, 3 to 84 and 16 % maximum capacity respectively

и проверки подвижки в соответствии с программой и методикой аттестации всей системы – один год.

Установление метрологической прослеживаемости полученных результатов измерений устройства базируется на непрерывной цепи калибровок измерительной системы ЗА ОРНИР и набора нейтральных фильтров для определения параметров поперечного распределения абсолютных значений энергии в пучке. Измерительную систему ЗА ОРНИР калибруют и поверяют по рабочему эталону единицы средней мощности лазерного излучения (№ 27393-04 в Госреестре СИ РФ), установленный предел допускаемой относительной погрешности системы $\pm 3\%$. Испытания нейтральных фильтров с соответствующей паспортизацией каждого из них на сертифицированном СИ – фурье-спектрометре ФТ-801 проводились при реальном разрешении 4 см^{-1} в течение 1 мин, что устанавливало отношение сигнал–шум не менее 40000. Поэтому вклад

в итоговую методическую погрешность определения параметров поперечного распределения абсолютных значений энергии в пучке ИК-излучения в основном будет давать погрешность измерительной системы.

Примеры измерения устройством характеристик поперечного распределения энергии в пучке ИК-излучения. В качестве примера ниже приведены результаты измерения ширины пятна изображения точечного объекта, формируемого в плоскости изображения канала объекта. Измерения проводили с помощью штатного элемента устройства – программно управляемого ножа Фуко (по ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008). Коэффициент концентрации энергии измеряли с применением измерительной диафрагмы (по ОСТ 3-6816-94). Нож Фуко использовали для пересечения пучка непосредственно перед приёмной поверхностью устройства. В результате измеряется мощность прошедшего излучения в зависимости от положения края ножа. Согласно ГОСТ Р ИСО/ТО 11146-3-2008 ширина пучка равна расстоянию между двумя положениями края (x_1, x_2), в которых приёмник воспринимает 84 и 16 % мощности соответственно. Ширину пучка в данном сечении определяют как $D_x = x_2 - x_1$. Ширину слабо астигматических пучков необходимо измерять вдоль двух главных осей сечения пучка – осей X, Z .

На рис. 2 приведены результаты выполненных измерений. Разность значений координаты x линейного поля, в которых измеренная мощность засветки (кривая 1) равна 84 и 16 % (линии 2, 3) её максимального значения определяет ширину пучка в сечении X : $D_x = 159,3 - 129,6 = 29,7\text{ мкм}$. Ширина пучка в сечении Z : $D_z = 130,9 - 103,7 = 27,2\text{ мкм}$. Из результатов измерений следует, что точечный объект, формируемый в плоскости изображения канала объекта, является слабо астигматичным, а его диаметр не превышает 30 мкм.

При измерении коэффициента концентрации энергии в устройство вместо ножа Фуко устанавливают оптический фильтр с калиброванной диафрагмой диаметром 30 мкм. В плоскости изображения объекта формируется световое изображение точечного тестового объекта диаметром 30 мкм. Троекратно регистрируется максимальная мощность пучка в условных единицах без использования диафрагмы и вычисляется среднее значение $P_{\text{ср}}$. Затем троекратно регистрируется максимальная мощность пучка с использованием диафрагмы и также вычисляется среднее значение $P_{30\text{ср}}$. Коэффициент концентрации энергии в пятне рассеяния диаметром 30 мкм в канале объекта рассчитывается по формуле $K = P_{30\text{ср}} / P_{\text{ср}}$. По результатам измерений $K = 0,719$, что близко к максимально достижимому значению.

Заключение. Апробировано разработанное устройство для измерения характеристик поперечного распределения энергии в пучке ИК-излучения для средней ИК-области и диапазона измерения облучённости 10^{-9} – 10^{-5} Вт/см^2 в составе оригинальной автоматизированной системы синтеза динамических и статических ИК-изображений для контроля характеристик МФПУ. По результатам проведённых градуировочных испытаний установлено, что шкала устройства линейная, собственная единица устройства $4 \cdot 10^{-11}\text{ Вт}$, погрешность измерения не более $4 \cdot 10^{-9}\text{ Вт}$. Перед вводом в эксплуатацию и далее

с периодичностью раз в год необходимо проверять точность перемещений по двум координатам линейных подвижек ножа Фуко, входящего в состав устройства. Погрешность сканирования по каждой координате не превышает 1 мкм.

Список литературы

1. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дразников Б. Н., Кузнецов П. А. Современные инфракрасные фотоприемные устройства для сканирующей аппаратуры дистанционного зондирования Земли (обзор) // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 63–79.
2. D. Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, Sean McCall, Tim Messer and Daniel A. Saylor, *Proc. SPIE 5785, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing X* (20 May 2005). DOI:10.1117/12.604443
3. Гибин И. С., Колесников Г. В. Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов (обзор) // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 293–302.
4. Верхогляд А. Г., Гибин И. С., Елесин А. Г., Касторский Л. Б., Кокарев С. А., Солдатенко А. В., Ступак М. Ф. Автоматизированная система синтеза ИК-изображений для тестирования характеристик матричных фотоприемных устройств // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 3. С. 260–268.
5. Нужин А. В. Измерение концентрации энергии в малоразмерном изображении // ТелеФотоТехника: сетевой журнал. 2009. URL: <http://www.telephototech.ru> (дата обращения: 18.11.2019).
6. Осипович И. Р. Принципы построения автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 127–131.
7. Осипович И. Р. Использование автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем для исследования функции концентрации энергии объектов // Сборник трудов X международной конференции «Прикладная оптика-2012», Санкт-Петербург, 15–19 октября 2012 /

Под ред. Л. Н. Архиповой, В. Б. Шиловой, Ан. А. Мака. СПб.: Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, 2012. Т. 1. Секция 1. С. 18–21.

8. Верхогляд А. Г., Гибин И. С., Елесин А. Г., Макаров С. Н., Ступак М. Ф. Высокочувствительное устройство измерения коэффициента концентрации энергии при синтезе ИК-изображений для тестирования характеристик матричных фотоприемных устройств // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 79–84.

References

1. Kozlov K. V., Patrashin A. I., Byrlakov I. D., Bychkovsky Y. S., Drazhnikov B. N., Kyznetsov P. A., *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 63–79 (in Russian).
2. D. Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, Sean McCall, Tim Messer and Daniel A. Saylor, *Proc. SPIE 5785, Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing X* (20 May 2005). DOI:10.1117/12.604443
3. Gibin I. S., Kolesnikov G. V., *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 293–302 (in Russian).
4. Verhoglyad A. G., Gibin I. S., Elesin A. G., Kastorskij L. B., Kokarev S. A., Soldatenko A. V., Stupak M. F., *Uspekhi prikladnoj fiziki*, 2018, vol. 6, no. 3, pp. 260–268 (in Russian).
5. Nuzhin A. V., *Telefototekhnika*, 2009, available at: <http://www.telephototech.ru> (accessed: 18.11.2019).
6. Osipovich I. R., *Prikladnaya fizika*, 2009, no. 3, pp. 127–131 (in Russian).
7. Osipovich I. R., *Prikladnaya optika-2012, Proceeding of the XX International Conference*, St. Petersburg, October 15–19, 2012, Eds. L. N. Arhipova, V. B. Shilov, An. A. Mak, St. Petersburg, Opticheskoe obshchestvo im. D. S. Rozhdestvenskogo Publ., 2012, vol. 1. section 1, pp. 18–21.
8. Verhoglyad A. G., Gibin I. S., Elesin A. G., Makarov S. N., Stupak M. F., *Prikladnaya fizika*, 2018, no. 3, pp. 79–84 (in Russian).

Дата поступления: 17.04.2019.

Дата принятия: 03.10.2019.

Calibration of highly sensitive measurement device of transverse energy distributions in a beam of infrared radiation

Aleksander G. Verhoglyad, Andrey G. Elesin, Vladimir M. Vedernikov, Mikhail F. Stupak, Sergey N. Makarov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: stupak@tdisie.nsc.ru

A highly sensitive device for measuring the parameters of transverse energy distribution in a beam of infrared radiation is described as part of an automated system of synthesis of dynamic and static infrared images. The system is designed to monitor the characteristics of matrix photo-receivers in the spectrum of 2,5–4,6 μm at irradiation levels in the range of 10^{-9} – 10^{-5} W/cm^2 . The device is subject to periodic gradation and verification of the accuracy of movements of the Foucault knife line movements at two coordinates. Measurements with the use of the device are carried out in accordance with state and industry standards of the Russian Federation. The scan error for each coordinate does not exceed 1 micrometer. The device measures the function of energy concentration, the concentration of energy in the plane formed image in the working spectral and dynamic ranges of the system.

Key words: infrared image synthesis system, array photodetector, energy concentration ratio, calibration, irradiance level, precision positioning.