

УДК 681.2.084

## ГЕНЕРАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СЦЕН ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ В ДАЛЬНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ\*

И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: nejevenko@iae.nsk.su*

При создании специализированных стендов контроля и оценки параметров информационных систем важное значение имеют устройства формирования тестовых полей. Рассмотрены имитационно-моделирующие стенды на основе микрозеркальных модуляторов, способные генерировать динамические (перестраиваемые) изображения в реальном времени. Для применения таких модуляторов в длинноволновом ИК-диапазоне спектра проведена их модернизация путём замены обычных защитных стёкол материалами, прозрачными в ИК-диапазоне, вплоть до длины волны 14 мкм. Исследованы конструктивные особенности стендов на основе описания микрозеркальных модуляторов в виде эшелеттов — дифракционных решёток с пилообразной формой штриха. Приведены результаты экспериментов. Модернизированные модуляторы показали свою работоспособность в составе инфракрасных имитационно-моделирующих стендов и являются перспективными при разработке современных систем контроля и динамического тестирования инфракрасных фотоприёмных устройств и систем.

*Ключевые слова:* стенд для генерации инфракрасных изображений, микрозеркальный модулятор, DLP, DMD-модулятор, эшелетт, порядки спектра дифракционной решётки.

DOI: 10.15372/AUT20180102

**Введение.** При разработке ИК-систем наблюдения ключевым остаётся вопрос организации имитационно-моделирующих стендов, позволяющих не только воссоздавать климатические условия и внешние воздействия, при которых предстоит функционировать ИК-системе, но и генерировать инфракрасное имитационное изображение, максимально приближённое к реальному. Создаются специализированные стенды контроля ИК-систем, в которых применяются статические тест-объекты [1, 2], однако очевидно, что для полной имитации работы систем наблюдения тесты должны быть динамическими. В [3, 4] показано, что в ближнем ИК-диапазоне для этого целесообразно использовать микрозеркальные модуляторы на основе DLP-технологии (Digital Light Processing). В [5] рассмотрен созданный на базе такой технологии макет системы генерации динамической сцены для тестирования тепловизионных приборов и проведено его экспериментальное исследование. Показано, что система успешно функционирует в среднем ИК-диапазоне ( $\sim(3-5)$  мкм).

Однако в ряде приложений (при анализе сцен с преобладанием собственного теплового излучения) более перспективным является дальний ИК-диапазон ( $\sim(8-14)$  мкм). Цель данной работы — создание и исследование имитационно-моделирующего стенда для дальнего ИК-диапазона. Несмотря на кажущуюся похожесть функционирования стендов в различных диапазонах волн выявились и существенные отличия. Основная проблема заключается в том, что длина волны в дальнем ИК-диапазоне практически равна размеру микрозеркала модулятора DMD (Digital Micromirror Device).

Таким модуляторам для генерации изображений в длинноволновом ИК-диапазоне посвящён ряд публикаций (например, [6–8]). Наиболее обстоятельный анализ формирования изображений в DMD-модуляторах в длинноволновой (8–12 мкм) области спектра проведён

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (проект № 0319-2018-0008, № государственной регистрации АААА-А17-117052410034-6).

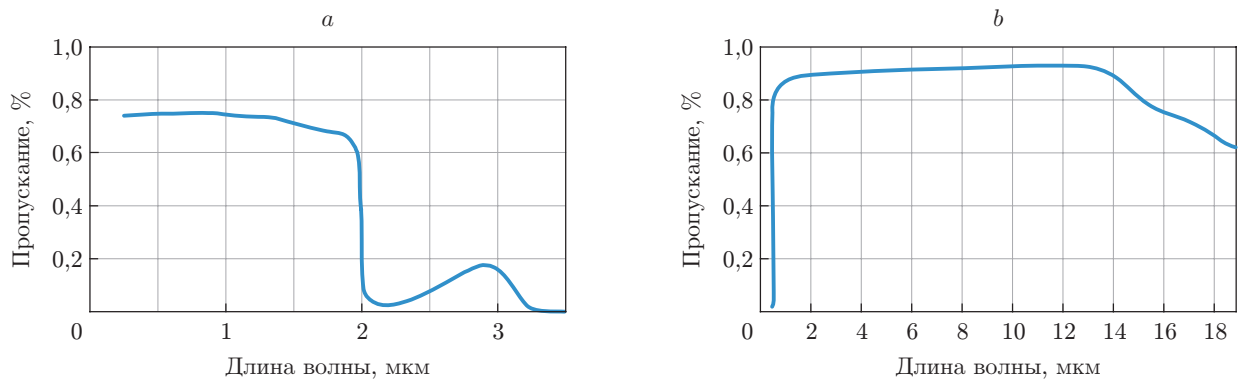


Рис. 1. Спектры пропускания окон DLP-модулятора: исходного (а) и модернизированного (b)

в [9]. Анализ основан на применении скалярной теории дифракции и преобразования Фурье. Отмечено, что, в случае когда азимутальный угол падающего пучка света равен  $0^\circ$ , зенитный угол находится в промежутке  $42\text{--}46^\circ$ , проектор ИК-спен обеспечивает хороший контраст изображений. Главное внимание в [9] уделено анализу дифракционной эффективности микрозеркальных ИК-проекторов. Исследования, приведённые в данной работе, показывают, что при анализе процесса формирования изображений в DMD-модуляторе в длинноволновом ИК-диапазоне правильнее массив микрозеркал рассматривать как пилообразную дифракционную решётку (эшелетт).

**Модернизация DMD-модулятора для работы в длинноволновом ИК-диапазоне.** Рассмотрим некоторые технологические особенности доработки DMD-модуляторов для обеспечения возможности применения в диапазоне  $10\text{--}12$  мкм. Входные окна серийных DMD-модуляторов оказались непригодными для генерации изображений в требуемом диапазоне, поскольку они нормально пропускают световые волны только в ультрафиолетовом, видимом и ближнем ИК-диапазонах (рис. 1, а). Пропускание волн резко падает после 2 мкм, хотя в диапазоне  $\sim(2,2\text{--}3,2)$  мкм имеется некоторый всплеск, что позволяет генерировать изображения в ближнем ИК-диапазоне [5]. Для диапазона  $8\text{--}14$  мкм была проведена модернизация стандартного микрозеркального модулятора: заменён материал его входного окна. Для этой цели выбран селенид цинка (ZnSe). На рис. 1, b показан спектр его пропускания. Видно, что материал прозрачен в диапазонах спектра от  $0,6$  до  $14$  мкм.

Технологически решить проблему модернизации модулятора оказалось непросто. Необходимо было снять с микросхемы, имеющей внутри сотни тысяч микрозеркал, стекло (любая попавшая внутрь микрочастица — это дефектный пиксел или группа пикселов) и вклеить вместо него пластину селенида цинка, обеспечив при этом внутри либо вакуум, либо нейтральный газ.

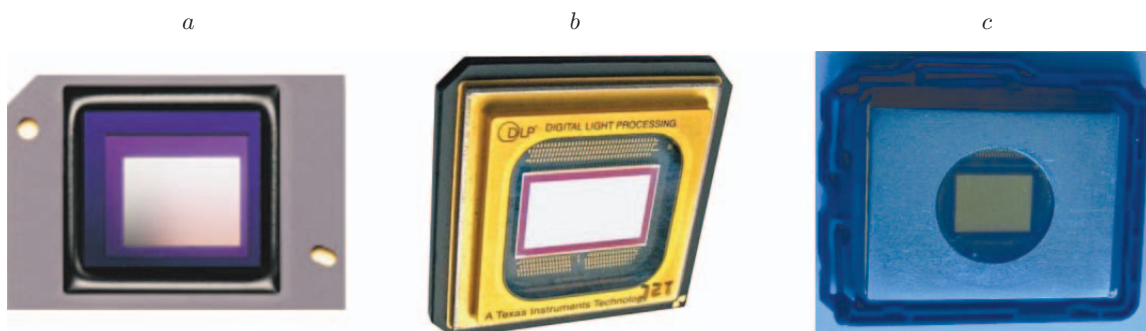


Рис. 2. Варианты конструкции DLP-модулятора: в пластмассовой оправе (а), в металлической оправе (b), в металлической оправе с окном из селенида цинка (с)

Трудоёмкость модернизации определялась конструктивными особенностями корпусов микросхем. Существует два типа корпусов: с пластмассовой и металлической оправками для стекла (рис. 2, *a*, *b*). Нам удалось обеспечить требуемую чистоту при снятии окон и вакуум при установке нового материала только для модулятора в металлической оправке. Модернизированная микросхема с окном из селенида цинка представлена на рис. 2, *c*.

**Теоретические основы работы DMD-модулятора в длинноволновом ИК-диапазоне.** На основе модернизированного DMD-модулятора разработан и создан стенд для генерации изображений в диапазоне 8–14 мкм (он может быть использован и для более низких диапазонов, вплоть до видимого). Одна из главных особенностей стендов для различных диапазонов волн — это источники света и их положение.

Рассмотрим схему освещения DMD-модулятора (рис. 3). Угол поворота зеркал равен  $12^\circ$ . Источник света с длиной волны 3–5 мкм устанавливается на стенде в полном соответствии с законом зеркального отражения — под углом  $24^\circ$ . Отражённый свет распространяется перпендикулярно плоскости, на которой находятся микрозеркала, и через объектив попадает в тепловизор. Для видимого света на месте источника располагается зеркало, которое посылает мощный пучок света в том же направлении. Такая же конструктивная схема работала и для источника с  $\lambda = 3–5$  мкм. Но при размещении в том же месте источника света с длиной волны 8–12 мкм излучение минует объектив тепловизора.

Было найдено положение источника с  $\lambda = 8–12$  мкм, при котором излучение с DMD-модулятора попадает в объектив (рис. 3). Как видно, координаты источника с  $\lambda = 8–12$  мкм существенно отличаются от координат источника для видимого и ближнего ИК-диапазонов. Выясним, почему так происходит и каковы должны быть параметры источника излучения для работы в длинноволновой части спектра? Как уже отмечалось выше, DMD-модулятор в рабочем состоянии (т. е. при наклонённых зеркалах) представлен как дифракционная решётка с пилообразным профилем.

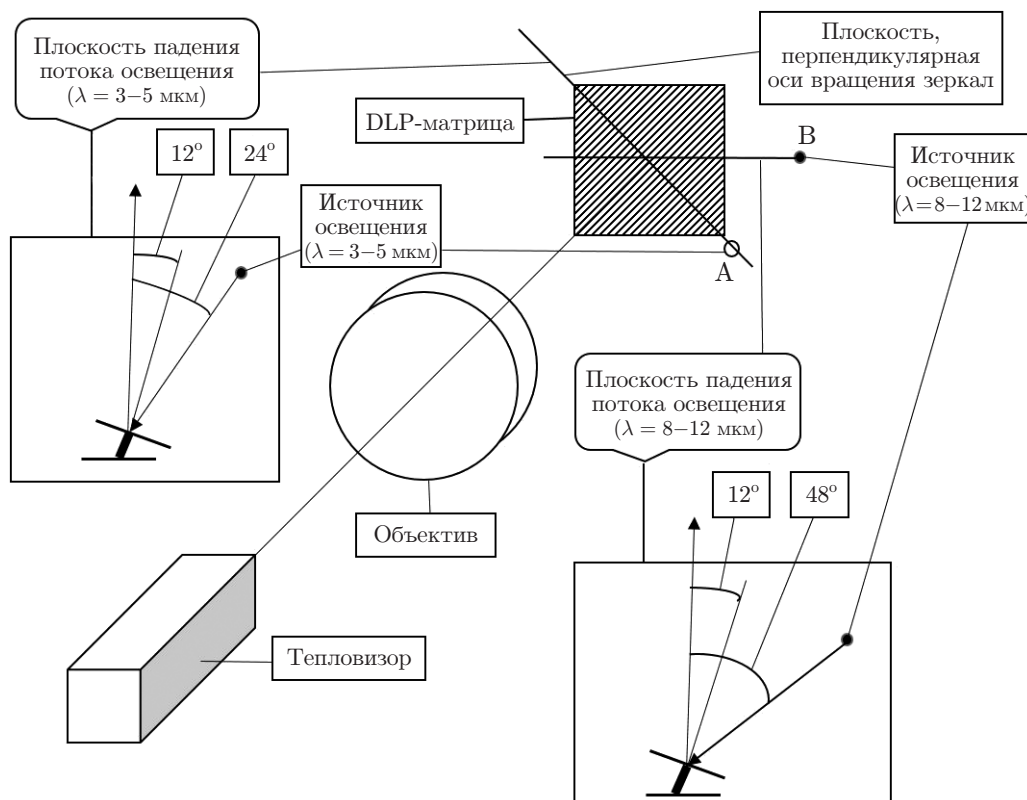


Рис. 3. Схема освещения DMD-модулятора при различных диапазонах длин волн

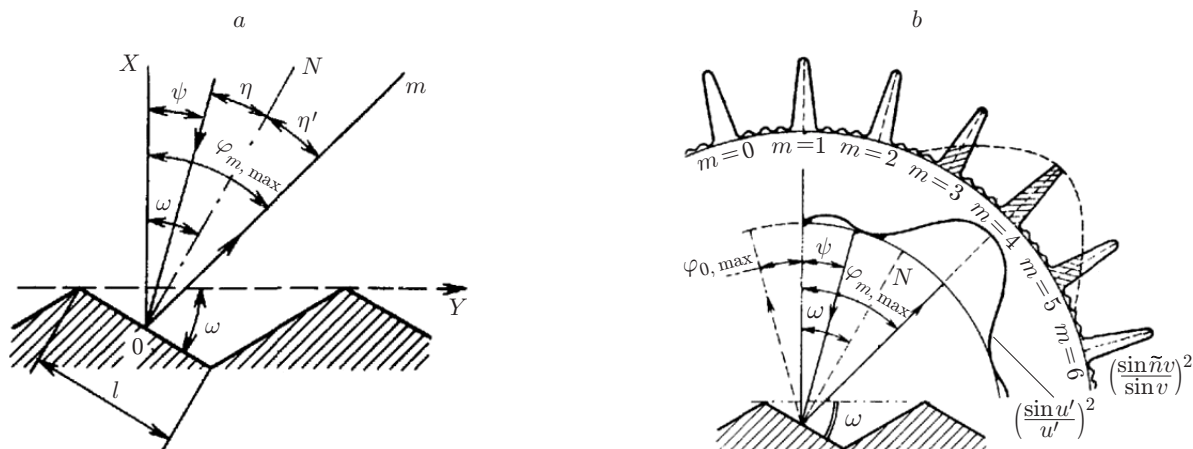


Рис. 4. Дифракция на пилообразной отражательной решётке: от одного штриха (а) и от всей решётки (b)

Для понимания происходящих процессов рассмотрим модель дифракционной отражательной пилообразной решётки [10] (рис. 4): грани штрихов (здесь плоскости микрозеркал) образуют с поверхностью решётки (с плоскостью подложки DMD-модулятора) угол  $\omega$ ;  $d$  — расстояние между штрихами (шаг микрозеркал);  $X$  — нормаль к подложке DMD-модулятора;  $N$  — нормаль к поверхности микрозеркал. Пусть на решётку падает световой поток, составляющий с нормалью  $X$  угол  $\psi$ ;  $\eta$  — угол падения луча к нормали решётки; луч отражается от поверхности решётки в направлении  $m$ , в котором одним штрихом решётки (в нашем случае зеркалом) формируется дифракционная функция  $(\sin u)/u$  (где  $u = (\pi d/\lambda) \sin \varphi$ ) и её угловая координата зависит от угла  $\omega$ . Решётка же создаёт свою функцию — интерференционную, не зависящую от формы штрихов и состоящую из порядков спектра освещения, как показано на рис. 4, b.

Направления на главные максимумы дифракционной решётки определяются её основным уравнением

$$d(\sin \psi + \sin \varphi_{m, \max}) = m\lambda, \quad (1)$$

где  $\varphi_{m, \max}$  — угол между нормалью к подложке и направлением на главный максимум порядка  $m$ .

Интенсивность света в указанном направлении задаётся произведением значений дифракционной и интерференционной функций для выбранного угла. Пронаблюдаем, как будет распространяться свет при различных длинах волн и положениях источника. Заметим, что нас интересует одно-единственное направление — по нормали к решётке, т. е. по нормали к подложке DMD-модулятора, когда свет попадает в объектив тепловизора.

Дифракция на DMD-модуляторе, когда источники света находятся на стандартной позиции А (см. рис. 3), показана на рис. 5, a. Освещающий пучок падает на зеркало под углом  $\psi = 2\omega = 24^\circ$ . В соответствии с уравнением (1) нулевой порядок дифракции находится в направлении  $\varphi_0 = -\psi$  ( $m = 0$ ,  $\sin \psi = -\sin \varphi_{0, \max}$ ), а высшие порядки — под углами

$$\varphi_{0, \max} = \arcsin(m(\lambda/d) - \sin \psi). \quad (2)$$

Подставляя в (2) значения  $\lambda = 4$  мкм,  $d = 10,8$  мкм (шаг микрозеркал),  $m = 1$ , получаем  $\varphi_{1, \max} = 2,1^\circ$ , т. е. первый порядок дифракции распространяется практически по нормали к DMD-модулятору. Угловая ширина спектра для  $\lambda = 3$ –5 мкм, если не учитывать длину решётки (т. е. структуру изображения, формируемого на DMD-модуляторе), составляет  $10,63^\circ$ . Дифракционная функция зеркала в данном направлении максимальна, поэтому мы

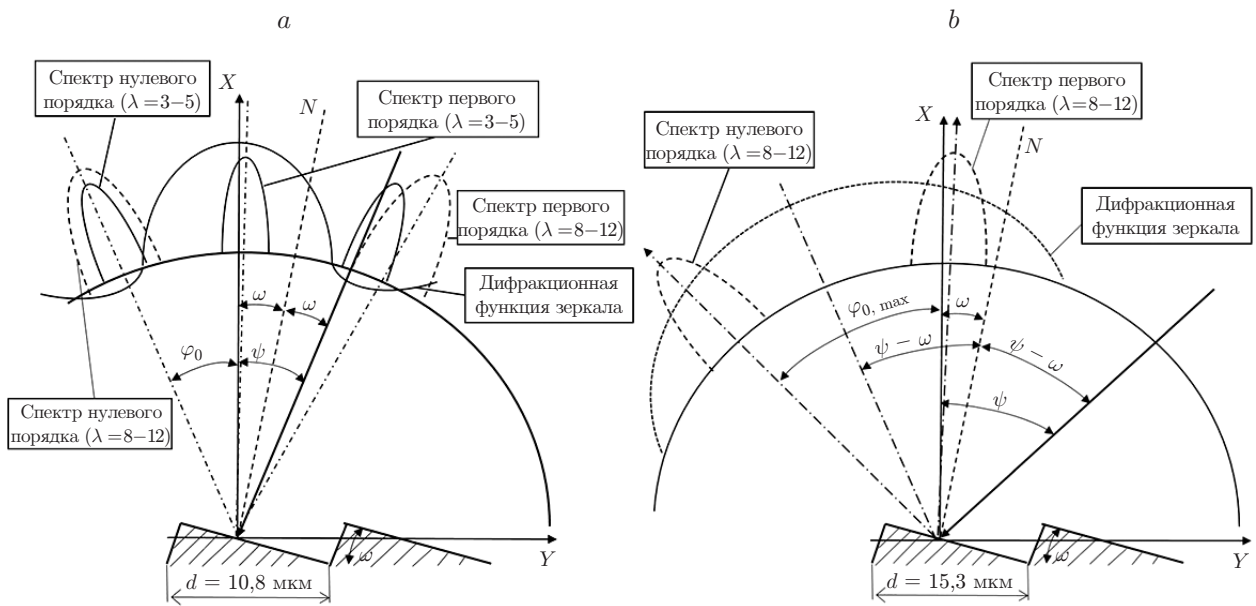


Рис. 5. Дифракция на DMD-модуляторе при различных положениях источника освещения: в положениях А (а) и В (б)

видим изображение в указанном диапазоне волн [1]. Посмотрим, что произойдёт, если на место А поставить источник с длиной волны 8–12 мкм. Нулевой порядок будет находиться в том же направлении, что и для длины волны 3–5 мкм, а угол первого порядка для  $\lambda = 10$  мкм в уравнении (2) равен  $31,3^\circ$ . На рис. 5, а угол показан пунктиром, очевидно, что нормаль  $X$  не пересекает, и следовательно, в этом направлении свет не распространяется.

Оценим, что будет при расположении источника с  $\lambda = 8$ –12 мкм в положении В (см. рис. 3). Дифракция на DMD-модуляторе в этом случае приведена на рис. 5, б. Световой пучок падает под углом  $\psi = 48^\circ$ . Нулевой порядок дифрагированного пучка распространяется под углом  $\varphi_{0, \max} = -\psi$ . Направление пучка первого порядка находится из выражения (2). Здесь  $d = 15,3$  мкм, так как плоскость падения освещающего пучка развёрнута на  $45^\circ$  к плоскости, проходящей через нормали к подложке и к наклонённому зеркалу DMD-модулятора. Подставив в (2)  $\lambda = 10$  мкм, получим  $\varphi_{1, \max} = 5,1^\circ$ . Учитывая, что для длины волны излучения 8–12 мкм ширина спектра составляет  $15,1^\circ$ , можно отметить,

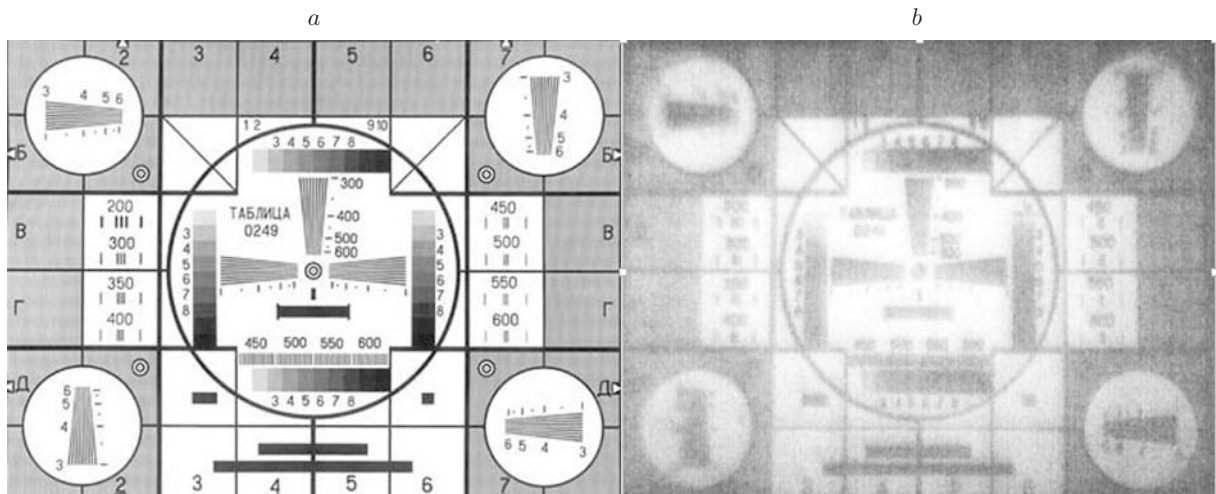


Рис. 6. Исходное изображение: в видимой области (а) и в области 8–12 мкм (б)



Рис. 7. Стенд для генерации изображений в области 8–12 мкм

что существенная часть первого порядка спектра будет распространяться по нормали к DMD-модулятору.

При необходимости есть возможность подстройки положения порядка вплоть до  $\varphi_{1, \max} = 0^\circ$  путём изменения положения источника, а значит, и величины  $d$ . Максимум дифракционной функции зеркала находится на направлении под углом  $\psi - \omega$  (см. рис. 5, *b*). Для длины волны 10 мкм данная функция широкая и её значение на нормали к подложке достаточно велико, соответственно и произведение этого значения и сечения первого порядка спектра нормалью вполне значимо. Изображение, полученное в результате такой дифракции, показано на рис. 6, *b*. Видно, что, несмотря на близость длины волны и размера микрзеркала, формирующего элемент изображения, качество последнего удовлетворительно.

Общий вид стенда, на котором получено изображение, представлен на рис. 7. Кроме статических были сгенерированы также и динамические изображения в длинноволновом диапазоне. Исходные изображения даны в AVI-формате.

**Заключение.** В данной работе показано, какие трудности возникают при создании стендов для генерации изображений в дальнем ИК-диапазоне: обсуждались как технологические проблемы самих DMD-модуляторов, так и конструктивные, связанные с положением источника ИК-излучения. Последнюю проблему удалось решить путём предложенного представления DMD-модулятора как эшелетта — дифракционной решётки с пилообразным профилем штриха, которое позволило объяснить неочевидную координату источника длинноволнового ИК-излучения. Это решение необходимо учитывать при конструировании стендов для генерации изображений в ИК-диапазоне, поскольку координата источника зависит и от длины волны, и от параметров DMD-модулятора.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук П. Л. Чаповскому за конструктивное обсуждение проблемы, а также В. В. Золотцеву за предоставление тепловизора для проведения экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галянтич А. Н., Гибин И. С., Золотцев В. В. и др. Экспериментальные исследования матричных фотоприёмных устройств инфракрасного диапазона для систем обнаружения малоразмерных объектов // *Автометрия*. 2012. 48, № 1. С. 95–102.

2. Демьяненко М. А., Козлов А. И., Новоселов А. Р., Овсяк В. Н. О мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмниках инфракрасного и терагерцового диапазонов // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 115–123.
3. Гибин И. С., Колесников Г. В., Нежевенко Е. С. Анализ схем генерации динамической сцены в задачах тестирования тепловизионных приборов // Автометрия. 2011. **47**, № 6. С. 34–38.
4. Курт В. И., Воронько М. Ю., Васильев Д. Ю. Измерительный стенд на основе микрозеркальной матрицы для измерения параметров оптико-электронных систем, работающих в инфракрасном диапазоне спектра // Тр. XXIV Междунар. науч.-техн. конф. и шк. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: Изд. НПО «Орион», 2016. С. 268–270.
5. Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С. Экспериментальное исследование макета системы генерации динамической сцены для тестирования тепловизионных приборов // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 80–85.
6. Dupuis J. R., Mansur D. J. Considerations for DMDs operating in the infrared // Proc. SPIE. 2012. **8254**. 82540J.
7. Dupuis J. R., Mansur D. J., Vaillancourt R. High-dynamic range DMD-based IR scene projector // Proc. SPIE. 2013. **8618**. 86180R.
8. Meuret Y., de Visschere P. Contrast-improving methods for Digital Micromirror Device projectors // Opt. Eng. 2003. **42**, N 3. P. 840–845.
9. Han Q., Zhang J., Wang J., Sun Q. Diffraction analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared // Appl. Opt. 2016. **55**, N 28. P. 8016–8021.
10. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука, 1979. 480 с.

*Поступила в редакцию 2 июня 2017 г.*

---