

## Один из подходов к созданию площадного квазиоптического осветителя в миллиметровом диапазоне длин волн

С.П. Астахов<sup>1</sup>, Н.Н. Строев<sup>1</sup>, И.В. Якименко<sup>1</sup>, Е.С. Сулимский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, 1, Смоленск, 214013, Россия

<sup>2</sup> АО «НИИ СТТ», улица Ново-Ленинградская, 10, Смоленск, 214012, Россия

### Аннотация

В статье рассматривается один из подходов к созданию площадного квазиоптического осветителя систем технического зрения в миллиметровом диапазоне длин волн. Наряду с широко используемым рентгеновским излучением, излучение миллиметрового диапазона, представляющее его более безопасную альтернативу с точки зрения воздействия на живые организмы, является перспективным для исследования внутренних структур объектов, поиска неоднородностей и скрытых дефектов различных конструкций.

Представлен подход формирования диаграммы направленности в ближней зоне с параметрами, позволяющими сконфигурировать равномерное освещение заданной площади. Разработана оригинальная квазиоптическая система, позволяющая формировать адаптированную к полю зрения матричной камеры, имеющей чувствительную (активную) поверхность прямоугольной формы, конфигурацию диаграммы излучения осветителя системы технического зрения миллиметрового диапазона с помощью квазиоптической системы, помещаемой в раскрыв конического рупорного излучателя, и тем самым, обеспечивающего увеличение коэффициента полезного использования излученной электромагнитной энергии матричной камерой. Приведены результаты имитационного моделирования и экспериментального исследования осветителя, реализованного с помощью квазиоптической системы. По результатам работы сформулированы пути улучшения характеристик полученного площадного квазиоптического осветителя.

### Ключевые слова

Осветитель, диаграмма направленности, миллиметровый диапазон волн, радиовидение, техническое зрение.

## One of the Approaches to Creating an Area Quasi-optical Illuminator in the Millimeter Wavelength Range

S.P. Astakhov<sup>1</sup>, N.N. Stroeve<sup>1</sup>, I.V. Yakimenko<sup>1</sup>, E.S. Sulimsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Branch of the National Research University Moscow Power Engineering Institute in Smolensk, Energeticheskij proezd, 1, Smolensk, 214013, Russia

<sup>2</sup> AO «NII STT», ulica Novo-Leningradskaya, 10, Smolensk, 214012, Russia

### Abstract

The article considers one of the approaches to the creation of an area quasi-optical illuminator of technical vision systems in the millimeter wavelength range. Along with the widely used X-ray radiation, millimeter-wave radiation, which represents its safer alternative in terms of exposure to living organisms, is promising for studying the internal structures of objects, searching for inhomogeneities and hidden defects of various structures.

The approach of forming a radiation pattern in the near zone with parameters allowing to configure uniform illumination of a given area is presented. An original quasi-optical system has been

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: eimttre@ya.ru (С.П. Астахов); nlnik\_s@mail.ru (Н.Н. Строев); jakigor@ Rambler.ru (И.В. Якименко); e.s.sulimski@gmail.com (Е.С. Сулимский)

ORCID: 0000-0002-6903-997X (Е.С. Сулимский)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

developed that makes it possible to form a matrix camera adapted to the field of view, having a sensitive (active) rectangular surface, the configuration of the radiation diagram of the illuminator of the millimeter-range vision system using a quasi-optical system placed in the opening of a conical horn radiator, and thereby providing an increase in the efficiency of the emitted electromagnetic energy by the matrix camera. The results of simulation modeling and experimental study of the illuminator implemented using a quasi-optical system are presented. Based on the results of the work, ways to improve the characteristics of the obtained areal quasi-optical illuminator are formulated.

### Keywords

Illuminator, directional pattern, millimeter wave range, radio vision, technical vision.

## 1. Введение

Практически любая система технического зрения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов требует использования средств освещения с определенными параметрами из-за низкой чувствительности приемников излучения. Системы радиовидения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в последнее десятилетие получили высокий импульс развития за счет развития радиоэлектронной элементной базы и аппаратуры. Высокий интерес к данным системам радиовидения обусловлен приемлемыми параметрами размерности исследуемых объектов и безопасностью в применении [1, 2, 3, 4, 13, 14].

Основные особенности средств освещения для подобных систем и соответствующие требования:

- При попадании на поверхность объекта волнового излучения миллиметрового диапазона наблюдается два явления – полное или частичное отражение и поглощение волновой энергии. В зависимости от материала объекта и характера его поверхности, угла падения волнового потока, преобладание составляющих будет меняться
- Отражение волн носит преимущественно зеркальный характер, поскольку элементы структуры поверхности значительно меньше длины волны применяемого излучения. В то время как для оптических систем для большинства случаев преобладает отражение от поверхности с диффузным рассеянием, поскольку элементы ее структуры соизмеримы или больше длины волны излучения

Таким образом, объект, имеющий сложный рельеф поверхности со свойствами зеркального отражения является типичным в случае радиовидения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Соответственно, наблюдение поверхности объекта будет возможно только в случае применения источника освещения с диффузными свойствами. На практике же практически все источники миллиметрового диапазона по свойствам являются точечными [1, 2, 3, 4, 13, 14]. Применение точечного источника в качестве средства освещения не позволяет проводить наблюдение поверхности объекта без применения сканирования (перемещения источника с синхронным считыванием отраженного сигнала). Эти технические сложные системы с громоздкими квазиоптическими элементами применяют в досмотровых комплексах в пропускных пунктах аэропортов и охраняемых учреждений. Явления интерференции и дифракции искажают картину при приеме отраженных радиосигналов, при обработке требуется учет когерентности и поляризации исходного сигнала источника. Это возможно только при использовании в приемной части фазочувствительного оборудования. В матричных приемниках миллиметрового диапазона такая возможность отсутствует, элементы камеры чувствительны к уровню энергии волны [1, 2, 3, 4, 13, 14].

Таким образом, при построении средств освещения для систем радиовидения необходимо исходить из требования использования источников, формирующих пространственное распределенное излучение с равномерным распределением энергии без выраженной когерентности и поляризации волн. Отметим, что диффузные рассеиватели, которые можно применять для выполнения указанного требования с исходным точечным источником, несут недопустимые потери энергии и не являются эффективными [5, 13, 14]. Использование массива точечных излучателей крайне затратное и лишь частично снимает проблему [1, 2, 3, 4, 13, 14].

Поэтому актуальна разработка специальных осветителей, которые способны обеспечить выполнение указанных требований с незначительными энергетическими потерями.

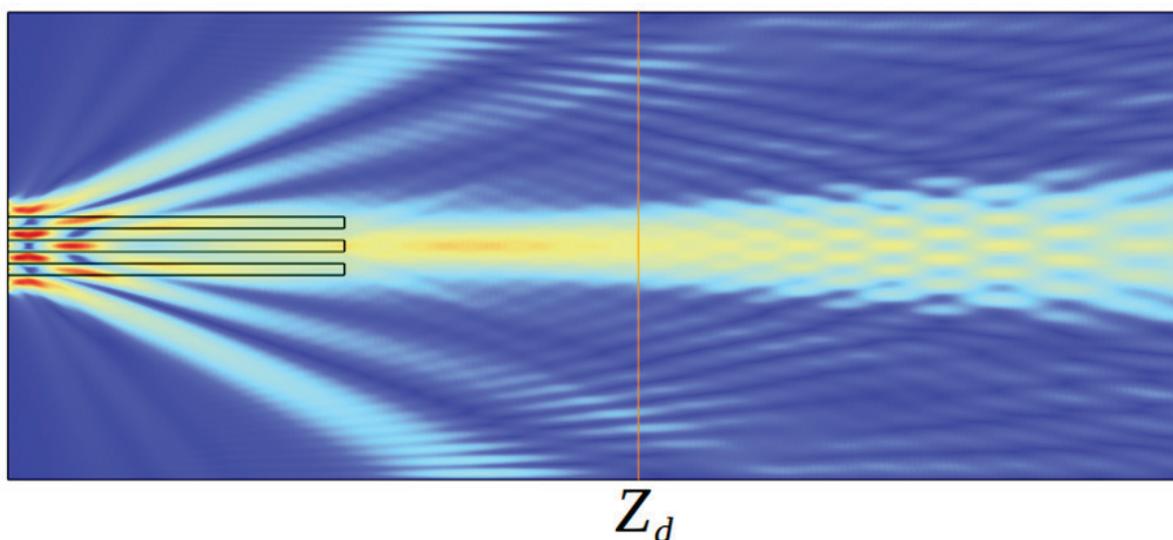
## 2. Подход к созданию площадного квазиоптического осветителя

Подход основывается на явление дифракции и интерференции волн, исходящих из системы параллельных диэлектрических волноводов. Форма распределения электромагнитной энергии сохраняет структуру, заданную расположением диэлектрических волноводов, на расстояние  $Z$ . Расстояние  $Z_d$  на котором выходная апертура системы параллельных диэлектрических волноводов совпадает с нулевой зоной Френеля ограничивает область применения данного подхода ближней зоной [6, 13, 14]. Параметр  $Z_d$  вычисляется по формуле

$$Z_d = h^2 / \lambda, \quad (1)$$

где  $h$  – размер выходной апертуры,  $\lambda$  – длина волны.

На рисунке 1 показано распределение электромагнитного поля при падение плоской волны на систему параллельных диэлектрических волноводов в упрощенной  $2D$  модели. После расстояния  $Z_d$  в результате интерференции распределение электромагнитного поля приобретает сложную структуру.



**Рисунок 1** – Распределение электромагнитного поля при падение плоской волны на систему параллельных диэлектрических волноводов

Для оценки равномерности освещения оценивается доля равномерно освещенной поверхности в пределах прямоугольной области, описанной вокруг полученной формы распределения электромагнитной энергии. Равномерно освещенной поверхностью считается поверхность глубина колебания распределения электромагнитной энергии которой равна  $-3$  дБ или 70 % от максимального значения.

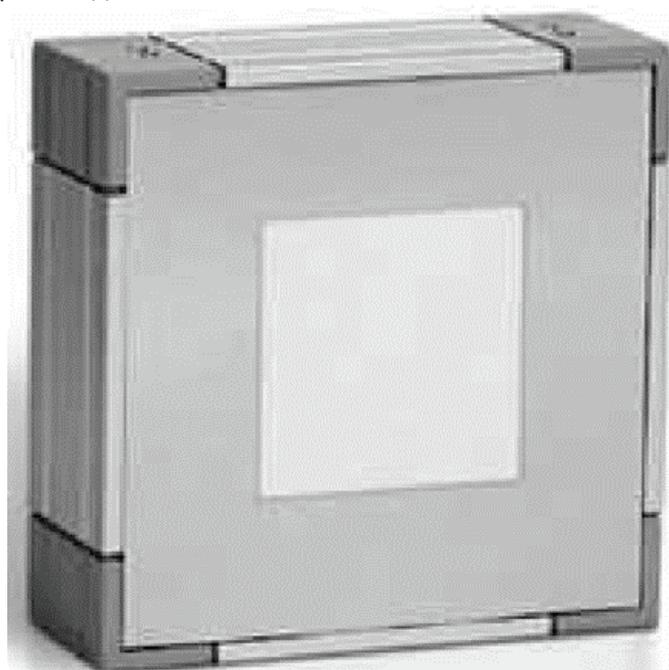
Экспериментальное исследование одного из подходов к созданию площадного квазиоптического осветителя включало в себя использование следующего оборудования:

1. В качестве источника электромагнитной энергии – генератор субтерагерцового диапазона на *ИМРАТТ*-диоде (рисунок 2), со следующими характеристиками [7, 13, 14]:
  - Частота излучения – 98 ГГц
  - Мощность излучения – 80 мВт
2. В качестве излучателя электромагнитной энергии – конический рупорный излучатель (рисунок 2) (антенна коническая рупорная миллиметрового диапазона «АНКР 90000-100000» [8, 13, 14]), со следующими характеристиками:
  - Диапазон рабочих частот – 90-100 ГГц

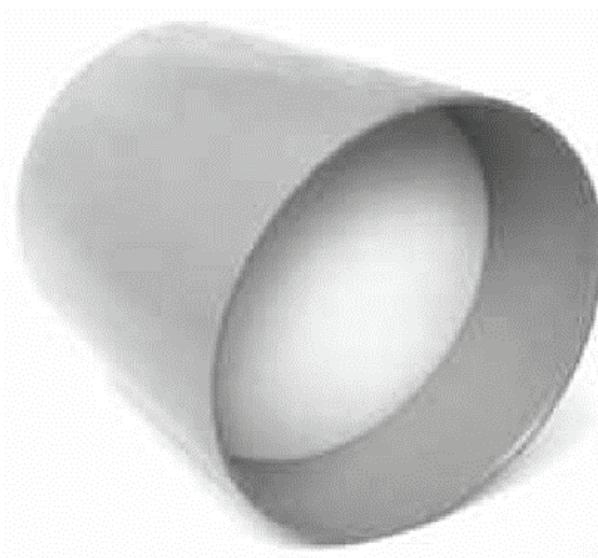
- Коэффициент стоячей волны, нормированный на входе – 1,3 (в диапазоне рабочих частот)
  - Коэффициент усиления – 20 дБ
  - Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости (на средней частоте диапазона рабочих частот) –  $17^\circ \pm 1,5^\circ$
3. В качестве приёмника излучения – матричная камера терагерцового диапазона *Tera-1024* (рисунок 3), со следующими характеристиками [9, 13, 14]:
- Размеры чувствительной (активной) поверхности – 48×48 мм
  - Разрешение – 32×32
  - Размеры элемента разрешения – 1,5×1,5 мм
  - Шумовая эквивалентная мощность (NEP) –  $1 \text{ нВт}/\text{Гц}^{1/2}$
4. В качестве фокусирующей системы – квазиоптический объектив (рисунок 4), состоящий из объединённых радиопрозрачным корпусом двух плосковыпуклых линз диаметром 100 мм из тефлона.



**Рисунок 2** – Генератор субтерагерцового диапазона на IMPATT-диоде с конической рупорной антенной миллиметрового диапазона «АНКР 90000-100000»

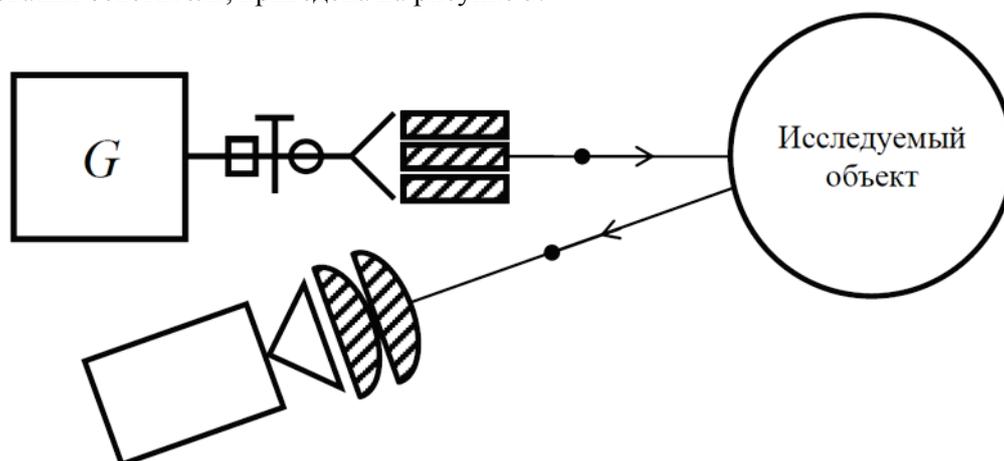


**Рисунок 3** – Матричная камера терагерцового диапазона *Tera-1024*



**Рисунок 4** – Квазиоптический объектив

Функциональная схема исходной установки, положенной в основу экспериментального исследования осветителя, приведена на рисунке 5.

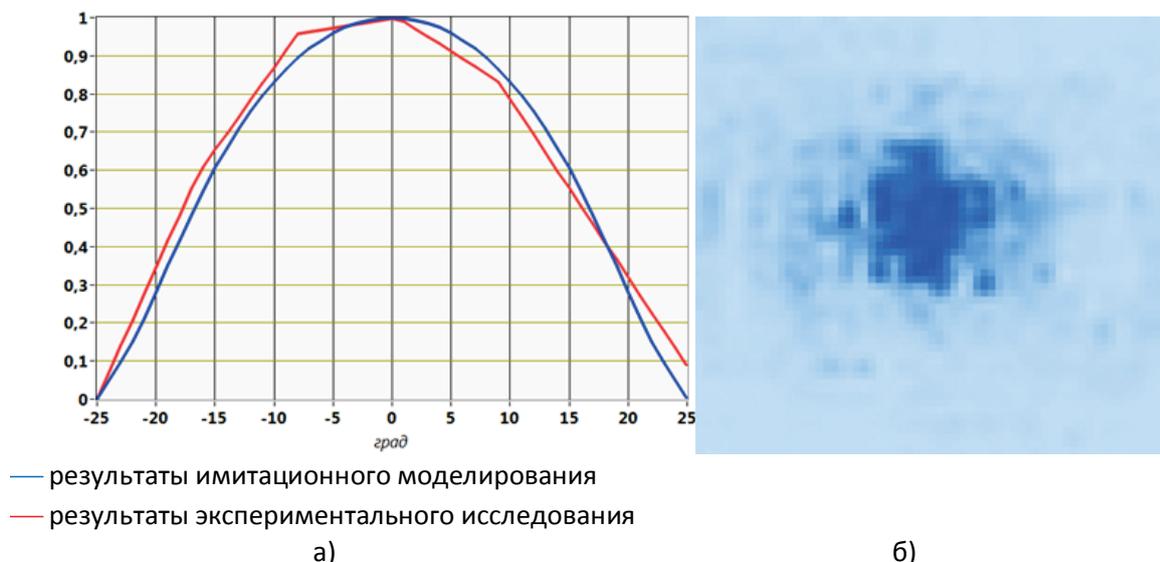


**Рисунок 5** – Функциональная схема исходной установки

### 3. Результаты

Характер распределения электромагнитной энергии в диаграмме направленности (рисунок 6, а) распространенных осветителей для систем радиовидения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн [3, 4, 13, 14], построенных на основе маломощных генераторов субтерагерцового диапазона, снабжённых коническими рупорными излучателями, обладает следующими свойствами:

- Облучаемый им участок поверхности исследуемого объекта, расположенного на относительно небольшом расстоянии (3 м), оказывается облучаемым (засвечиваемым) неравномерно (рисунок 6, б), вследствие чего использование такого осветителя в системах радиовидения нерационально, так как может вызывать формирование ложного изображения несуществующей неоднородности исследуемого объекта
- Излучаемая им электромагнитная энергия используется нерационально, так как значительная часть конического пучка излучения не попадает в поле зрения матричной камеры, имеющей чувствительную (активную) поверхность прямоугольной формы



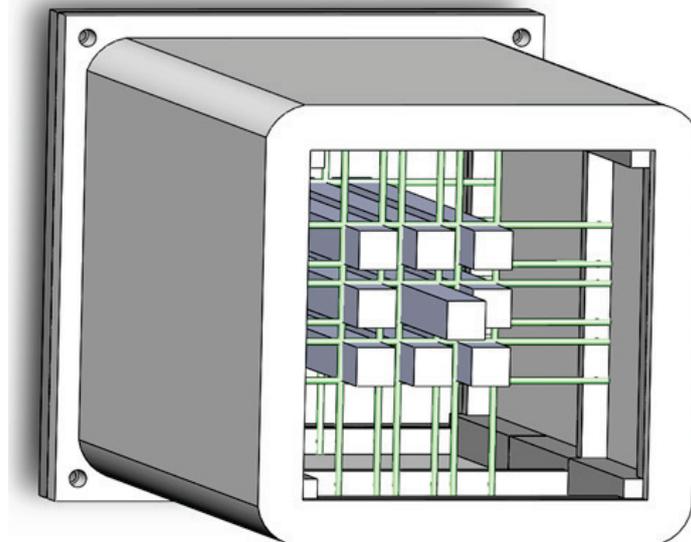
**Рисунок 6** – Характер распределения электромагнитной энергии: а) в диаграмме направленности конического рупорного излучателя, б) в плоскости чувствительной поверхности матричной камеры

С учётом этого целесообразно экспериментально исследовать подход формирования адаптированной к полю зрения матричной камеры (с чувствительной (активной) прямоугольной поверхностью) конфигурации диаграммы направленности излучения осветителя с помощью квазиоптической системы, помещаемой в раскрыв конического рупорного излучателя для повышения коэффициента полезного использования излучения электромагнитной энергии матричной камерой.

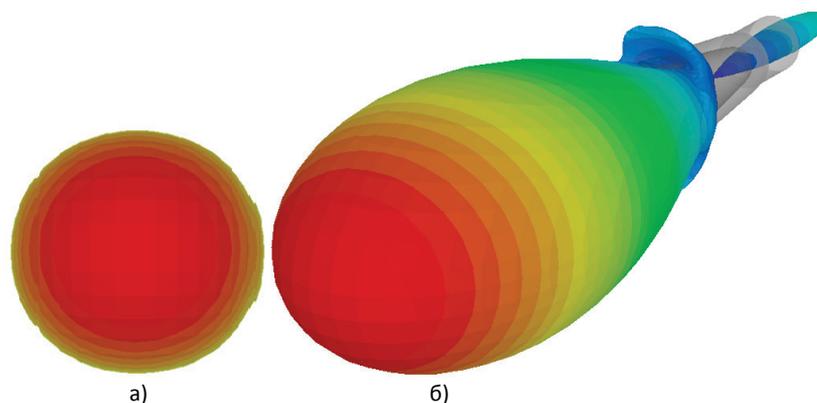
При этом в качестве вариантов базовых элементов квазиоптической системы использовались непосредственно устанавливаемые в плоскости раскрыва конического рупорного излучателя или в непосредственной близости от неё диэлектрические линзы, диэлектрические элементы разной конфигурации, диэлектрические волноводы прямоугольной формы и комбинации разных базовых элементов. В результате экспериментального исследования подтверждено, что решению данной научной задачи наиболее полно удовлетворяет применение квазиоптической системы из диэлектрических волноводов прямоугольной формы, образующих тетрагональную матрицу.

Характер взаимодействия выходящей из раскрыва конического рупорного излучателя электромагнитной волны с системой параллельных диэлектрических волноводов достаточно хорошо известен [10, 12, 13, 14]. Полученные экспериментальные результаты легли в основу конструкции квазиоптической системы [11, 13, 14] (рисунок 7), содержащей: радиопрозрачный каркас; девять диэлектрических волноводов в форме параллелепипедов с размерами  $30\lambda \times 2\lambda \times 2\lambda$ , (где  $\lambda$  – длина волны излучения), изготовленные из материала с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 1,03$ ; радиопрозрачные растяжки, обеспечивающие целостность конструкции и расположение диэлектрических волноводов на взаимных расстояниях, равных  $\lambda$ , в виде тетрагональной матрицы.

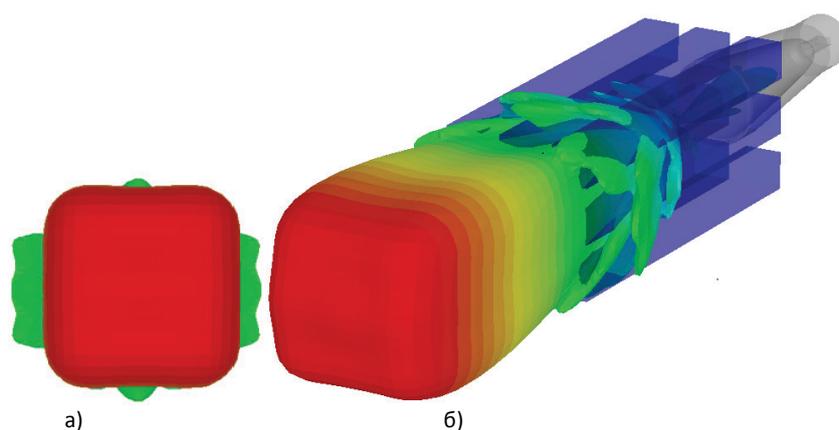
Функциональная схема экспериментальной установки с помещённой в раскрыв конического рупорного излучателя квазиоптической системой из диэлектрических волноводов, с помощью которой осуществлялось формирование адаптированной к полю зрения приёмного устройства конфигурации диаграммы направленности излучения осветителя, приведена на рисунке 5. Результаты имитационного моделирования дают наглядное представление о том, как исходная форма диаграммы направленности излучения конического рупорного излучателя (рисунок 8) с помощью квазиоптической системы из диэлектрических волноводов преобразуется к виду (рисунок 9), имеющему поперечное сечение, близкое к прямоугольной форме. Такой характер распределения электромагнитной энергии в диаграмме направленности излучения осветителя (рисунок 10, а) позволяет с расстояний в  $7,5$  см достаточно равномерно облучать участок поверхности исследуемого объекта, по форме близкий к прямоугольному (рисунок 10, б).



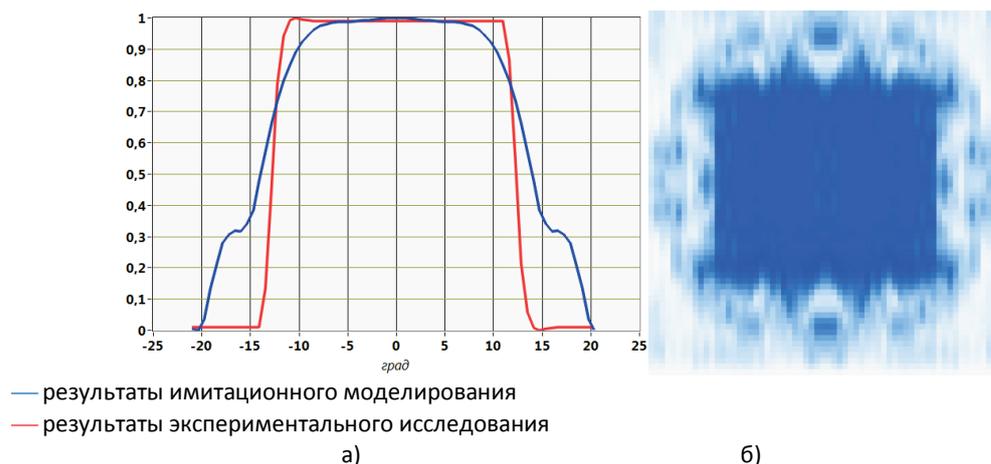
**Рисунок 7** – Внешний вид квазиоптической системы на основе тетрагональной матрицы, образованной диэлектрическими волноводами, имеющими форму параллелепипедов



**Рисунок 8** – Рисунок 8 – Форма диаграммы направленности излучения конического рупорного излучателя: а) фронтальная проекция, б) аксонометрическая проекция



**Рисунок 9** – Форма диаграммы направленности излучения конического рупорного излучателя с помещенной в его раскрыв квазиоптической системой: а) фронтальная проекция, б) аксонометрическая проекция



**Рисунок 10** – Характер распределения электромагнитной энергии: а) в диаграмме направленности конического рупорного излучателя с помещенной в его раскрыв квазиоптической системой, б) в плоскости чувствительной поверхности матричной камеры

#### 4. Заключение

Анализ результатов экспериментального исследования характера распределения электромагнитной энергии в диаграмме направленности излучения осветителя, снабжённого коническим рупорным излучателем с помещённой в его раскрыв квазиоптической системой из девяти диэлектрических волноводов, показывает, что:

- Излучаемая им для функционирования системы технического зрения миллиметрового (субтерагерцового) диапазона электромагнитная энергия используется рационально, так как большая часть излучения достаточно равномерно распределяется по близкому по форме к прямоугольному участку поверхности, к размерам которого адаптировано поле зрения матричной камеры, имеющей чувствительную (активную) поверхность прямоугольной формы
- На основе некоторого множества осветителей такой конструкции могут строиться системы облучения (подсвета) поверхностей (контролируемых зон), обеспечивающие их относительно равномерное облучение за счёт реализации принципа «мозаичного» облучения элементарных участков поверхностей протяжённых объектов
- Для увеличения дальности и площади облучения одиночным осветителем необходимо увеличения размера выходной апертуры осветителя за счет увеличения числа параллельных диэлектрических волноводов
- При увеличении количества параллельных диэлектрических волноводов потребуется замена осветителя, снабжённого коническим рупорным излучателем, на другой с подходящей выходной апертурой

#### 5. Благодарности

Авторы выражают признательность АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий» (АО «НИИ СТТ») за помощь в техническом обеспечении процесса экспериментальных исследований.

#### 6. Список источников

- [1] Appleby R., Robertson D.A., Wikner D. Millimeter wave imaging: a historical review // SPIE Defense + Security. Millimeter wave imaging. 2017. S. 1018902.

- [2] Quantitative analysis of water content and distribution in plants using terahertz imaging / Anton V. Shchepetilnikov, Alexey M. Zarezin, Viacheslav M. Muravev, Pavel A. Gusikhin, Igor V. Kukushkin // *Optical Engineering*. 2020. T. 59, N 6. S. 1-7.
- [3] Wang Z., Chang T., Cui H.-L. Review of Active Millimeter Wave Imaging Techniques for Personnel Security Screening // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. S. 148336-148350.
- [4] New Real-Time Sub-Terahertz Security Body Scanner / Tzydynzhapov G., Gusikhin P., Muravev V., Dremine A., Nefyodov Y., Kukushkin I. // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2020. Vol. 41. No. 6. S. 632-641.
- [5] Coding Metasurfaces for Diffuse Scattering: Scaling Laws, Bounds, and Suboptimal Design / Massimo Moccia [и др.] // *Adv. Optical Mater.* 2017, 5, S. 1700455
- [6] Abbaszadeh A., Ahmadi-Boroujeni M., Tehranian A. Generating uniform irradiance in the Fresnel region by quasi-optical beam shaping of a millimeter-wave source // *Optics Express*. 2019. Vol. 27. No. 22. S. 32135.
- [7] Terahertz sources and generators [Электронный ресурс] // Terasense Group Inc. URL: <https://terasense.com/products/terahertz-sources/> (дата обращения: 13.04.2022).
- [8] Антенна направленная «АНКР 90000-100000» [Электронный ресурс] // АО «НИИ СТТ». URL: [https://www.niistt.ru/products/radio/antennfid/antenns/ankr\\_90-100.aspx](https://www.niistt.ru/products/radio/antennfid/antenns/ankr_90-100.aspx) (дата обращения: 15.04.2022).
- [9] Terahertz imaging cameras [Электронный ресурс] // Terasense Group Inc. URL: <https://terasense.com/products/sub-thz-imaging-cameras/> (дата обращения: 13.04.2022).
- [10] Астахов С. П., Строев Н. Н., Сулимский Е. С. Устройство, изменяющее распределение энергии в плоскости раскрыва конического излучателя системы радиовидения миллиметрового диапазона // *Энергетика, информатика, инновации – 2020. Сб. трудов X-ой Нац. науч.-техн. конф. с межд. Уч.* 2020. Т.2, С. 61-64.
- [11] Устройство для изменения распределения энергии в плоскости раскрыва конического излучателя системы радиовидения миллиметрового диапазона: пат. 2728249 Рос. Федерация, МПК H01Q 3/26 / Сулимский Е. С., Строев Н. Н., Астахов С. П., Власенкова А. А., Тимофеева Н. С.; заявитель и патентообладатель АО «НИИ СТТ». № 2020101335; заявл. 15.01.2020; опубл. 28.07.2020, Бюл. № 22. 10 с.: ил.
- [12] Yeh C., Shimabukuro F. *The Essence of Dielectric Waveguides*. 2008. S. 522.
- [13] Результаты экспериментального исследования методики преобразования диаграммы направленности излучения конического рупорного излучателя миллиметрового (субтерагерцового) диапазона / Астахов С.П., Строев Н.Н., Якименко И.В., Сулимский Е.С. // *Светотехника*. 2021. № 4. С. 74 –77.
- [14] The results of the experimental study of the method of directional radiation pattern transformation of a conical horn radiator operating in millimetre (sub-THz) band / Astakhov S. P., Stroeve N. N., Yakimenko I. V., Sulimsky E. S. // *Light & Engineering*. 2021. Vol. 29. # 6. S. 157–161.