

## Применение линзы Люнеберга для измерения коэффициента отражения на бистатическом стенде

Р.В. Гильмутдинов \*<sup>1</sup>, Н.Л. Меньших<sup>1</sup>, С.А. Федоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 04.12.2025

Одобрена после рецензирования 15.12.2025

Принята к публикации 25.12.2025

### Аннотация

Настоящее исследование направлено на модернизацию бистатического измерительного стенда путем усовершенствования облучателя гигагерцового диапазона частот с помощью линзы Люнеберга. Предложенная модификация обеспечивает формирование электромагнитного поля в широкой полосе частот с необходимым амплитудным распределением в зоне размещения исследуемого плоского образца материала и повышает точность определения бистатических характеристик рассеяния. В задачах определения модуля коэффициента зеркального отражения от материалов в свободном пространстве существенным фактором, влияющим на погрешность измерений, являются дифракционные эффекты, связанные с формой и размером образца, уменьшение влияния которых достигается оптимизацией структуры падающего электромагнитного поля в области размещения образца. В рамках работы выполнено численное моделирование методом моментов формирования поля облучателем с линзой и процесса измерения коэффициента отражения электромагнитной волны от образца материала с применением модернизированного облучателя. Результаты численного моделирования показали, что применение облучателя с гиперболической линзой уменьшает амплитуду падающей электромагнитной волны на краях образца. Диаграмма направленности модернизированной системы характеризуется более низким уровнем боковых лепестков, что снижает влияние сигнала прямого прохождения между антеннами на точность измерения коэффициента отражения в бистатической схеме. Результаты численного моделирования измерения коэффициента отражения и сравнение с аналитическим расчетом показали, что применение облучателя с линзой Люнеберга уменьшает погрешность измерения модуля коэффициента зеркального отражения в широком частотном диапазоне и секторе углов.

**Ключевые слова:** линза Люнеберга, ФЕКО, коэффициент отражения, краевые эффекты

EDN: FNCYPG

doi:10.24412/2949-0553-2025-620-04-10

---

## Application of Luneburg lens for measuring reflectivity on bistatic facility

R.V. Gilmudtinov \*<sup>1</sup>, N.L. Menshikh<sup>1</sup>, S.A. Fedorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute for Theoretical and Applied Electromagnetics of RAS, Moscow, Russia

\* psevduch777@gmail.com

---

\* Автор, ответственный за переписку: Руслан Валерьевич Гильмутдинов, psevduch777@gmail.com

**Abstract**

In this paper modernization of a bistatic facility by improving a gigahertz-range frequencies feed through the use of a Luneburg lens is described. The proposed modification enables the formation of electromagnetic field over a wide frequency band with the required amplitude distribution in the area where the flat material sample is placed, thereby increasing the accuracy of determining bistatic scattering characteristics. In problems of determining the reflection coefficient magnitude of materials in free space, a significant source of measurement error is the diffraction effects associated with the shape and size of the sample. Reducing their influence is achieved by optimizing the structure of the incident electromagnetic field in the area where the sample under study is located. Within this work, numerical modeling was performed using the method of moments of field formation by an irradiator with a lens and the process of measuring the reflection coefficient of electromagnetic wave from a material sample using a modernized irradiator. The simulation results show that employing an illuminator with a hyperbolic lens reduces the amplitude of the incident electromagnetic wave at the edges of the sample. The radiation pattern of the modernized system features a lower level of sidelobes, which decreases the influence of direct transmission between antennas in the bistatic scheme on the accuracy of reflection coefficient measurements. Numerical modeling of the reflection coefficient measurement experiment and comparison with analytical calculations demonstrated that the use of the Luneburg lens feed reduces the error in measuring the reflection coefficient magnitude across a wide frequency range and angular sector.

**Key words:** Luneburg lens, FEKO, reflection coefficient, edge diffraction

**Введение**

В современной радиотехнике и радиофизике наблюдается устойчивая тенденция к применению диэлектрических линз в проектировании приемо-передающих систем с заданными характеристиками [1]. Наибольшее распространение такие системы получили в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, где активно исследуются как простые конструкции с единственной преломляющей поверхностью, так и сложные многослойные градиентные линзы [2]. Сравнительный анализ эллиптических и гиперболических линз, проведенный в [3], выявил их схожие характеристики: сопоставимый коэффициент усиления линзовой антенны и практически идентичную структуру формируемого поля. Значительный прогресс в данной области стал возможен благодаря развитию аддитивных технологий, которые открыли новые перспективы в изготовлении линз с пространственно-неоднородной диэлектрической проницаемостью [4].

Исследовано [5] использование плоской линзы в качестве коллиматора в рупорной камере, проведены измерения распределения поля в рабочей зоне в сечении, перпендикулярном оси камеры. Показано, что линза эффективно осуществляет фазовую коррекцию.

Современные исследования рассеивающих свойств объектов приводят к активной разработке бистатических измерительных стендов [6], характеризующихся высокой степенью свободы позиционирования объекта. В исследовании [7] представлен метод временной обработки сигналов при бистатических измерениях, обеспечивающий существенное уменьшение инструментальной погрешности. Дальнейшее развитие данной методики, где введена дополнительная калибровочная мишень в измерительную процедуру, представлено в работе [8].

Бистатические исследования характеристик рассеяния объектов имеют ряд фундаментальных ограничений, существенно снижающих точность измерений [9]. Основные типы погрешностей можно классифицировать как инструментальные и методические [10], причем последние непосредственно зависят от выбранного измерительного подхода [11]. Особое значение имеет методическая погрешность, обусловленная конечными геометрическими размерами исследуемого образца [12]. Применение линзы позволяет минимизировать данный вид погрешности благодаря двум ключевым эффектам: значительному ослаблению амплитуды поля на границах образца и уменьшению сигнала прямого прохождения [13] между измерительными антеннами.

Настоящее исследование посвящено усовершенствованию бистатического стенда, расположенного в ИТПЭ РАН [14], с целью расширения его функциональных возможностей для определения характеристик рассеяния и параметров материалов.

Целями настоящей работы являются: формирование заданного распределения электромагнитного поля в зоне размещения исследуемого образца с оптимизированными амплитудно-фазовыми характеристиками; минимизация рабочего расстояния между образцом и антенной системой (приемной/передающей) без уменьшения точности измерения параметров материалов; снижение методической погрешности определения модуля коэффициента зеркального отражения (МКО) методом замещения, обусловленной краевыми эффектами, путем внедрения линзы Лунеберга в измерительную систему.

Рассмотрена линза Люнеберга с градиентной диэлектрической проницаемостью материала без частотной дисперсии для данного диапазона частот. Численные исследования зеркального отражения от образцов материалов и от нормировочной металлической пластины такого же размера, используемой для калибровки сигнала в методе замещения, проводились в программе FEKO с использованием интегральных уравнений. Результаты численного моделирования с линзой и без линзы сравнивались между собой, а также с аналитическим расчетом по формулам Френеля [15] для бесконечного слоя материала.

## Линзовый коллиматор

Фундаментальные принципы работы линзовых коллиматоров хорошо изучены и описаны в работе [16]. Современные исследования демонстрируют активное использование таких устройств от миллиметрового [17] до метрового [18] диапазона длин волн. Однако линзы используются, как правило, для моностатической схемы измерения [19].

Настоящая работа развивает предыдущие исследования авторов, посвященные разработке и оптимизации интегрированной антенной системы с линзовым коллиматором [20] в виде гиперболической линзы. Рассмотрена реализация [21] линзового коллиматора в бистатической схеме измерения.

В данной работе для создания необходимого амплитудно-фазового распределения поля предлагается использовать сферическую линзу Люнеберга, интегрированную непосредственно в передающую широкополосную антенну Satimo SH2000. Преимущество использования широкополосных антенн заключается в отсутствии механической смены облучателей для обеспечения измерений во всей рабочей полосе частот бистатического стенда. При использовании этих антенн в качестве облучателей необходимо учитывать зависимость положения фазового центра от частоты. Для модернизации измерительного стенда выбрана только часть рабочего диапазона облучателя: от 5 до 10 ГГц. В частотном диапазоне выше 10 ГГц методическая погрешность измерения МКО, связанная с конечностью размеров образца, уже не столь существенна, что исключает необходимость его модернизации в указанном диапазоне.

При оптимизации параметров варьировался радиус линзы и расстояние до антенны с целью нивелирования краевых эффектов для плоских квадратных образцов со стороной 200 мм. Зависимость диэлектрической проницаемости от расстояния до центра линзы задается следующей формулой:

$$\varepsilon = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус линзы,  $r$  – расстояние до центра.

## Исследование антенны с интегрированной линзой Люнеберга

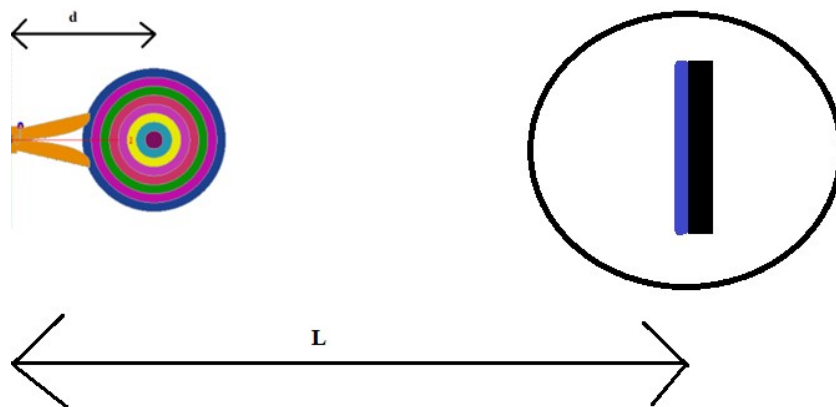


Рисунок 1 – Схема антенны с линзой Люнеберга

На рисунке 1 продемонстрирована конфигурация измерительной системы, включающая линзу Люнеберга, интегрированную с антенной Satimo SH2000. Геометрический центр основания антенны (задняя крышка) принят за начало координат. Конфигурация системы определяется параметрами: длина между объектом измерения и антенной составляет  $L = 625$  мм; смещение центра линзы относительно основания антенны равно  $d = 160$  мм и связано с фазовым центром антенны. Радиус линзы  $R = 80$  мм

выбран равным размеру гиперболической линзы (фокусное расстояние гиперболической линзы 284 мм, материал PLA пластик) [22]. Расстояние между исследуемым образцом и линзой в обоих случаях одинаково. Линза моделируется как 8 концентрических сфер толщиной 10 мм, что позволяет [5] с высокой точностью приблизить слоистую структуру с дискретными значениями диэлектрической проницаемости к непрерывному плавно меняющемуся значению  $\varepsilon$  материала линзы Люнеберга. Предполагается, что линза Люнеберга жестко связана с антенной, которая вращается вокруг измеряемого образца на тележке.

На рис. 2 представлены графики амплитудных распределений электромагнитного поля при частоте 5 ГГц в плоскости размещения образца материала для трех конфигураций: антенна с линзой Люнеберга, антенна с гиперболической линзой, антенна в исходном виде. Как можно заметить из приведенных графиков, при использовании линзы (гиперболической или линзы Люнеберга) амплитуда поля на краях образца существенно снижается. Использование метода замещения при нормировке на металлическую пластину такой же формы и размера, с высокой повторяемостью позиционирования объекта исследования, позволяет проводить измерения при значительном изменении фазы поля от центра к краю исследуемого образца.

Полученные данные подтверждают возможность эффективного подавления краевых эффектов при измерениях МКО методом замещения квадратных образцов размером (200×200) мм.

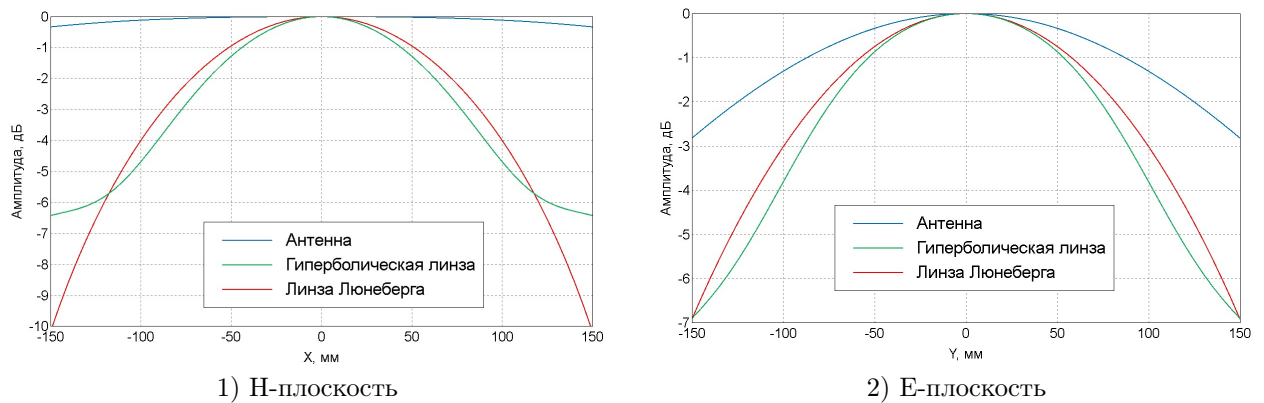


Рисунок 2 – Срезы амплитуды поля в зоне расположения измеряемого объекта, частота 5 ГГц

Сравнение диаграмм направленности (ДН) (рис. 3) исследуемых антенных систем при 5 ГГц показывает преимущество линзы Люнеберга перед гиперболической в виде более низкого уровня боковых лепестков. Видно, что боковые лепестки ДН облучателя с линзой Люнеберга лежат ниже, чем у облучателя с гиперболической линзой, что снижает взаимное влияние антенн [7]. В бистатической схеме влияние прямого прохождения сигнала между передающей и приемной антенной является самым значимым паразитным сигналом в БЭК, поэтому его снижение указывает на повышение точности измерения МКО от образцов в данной измерительной системе.

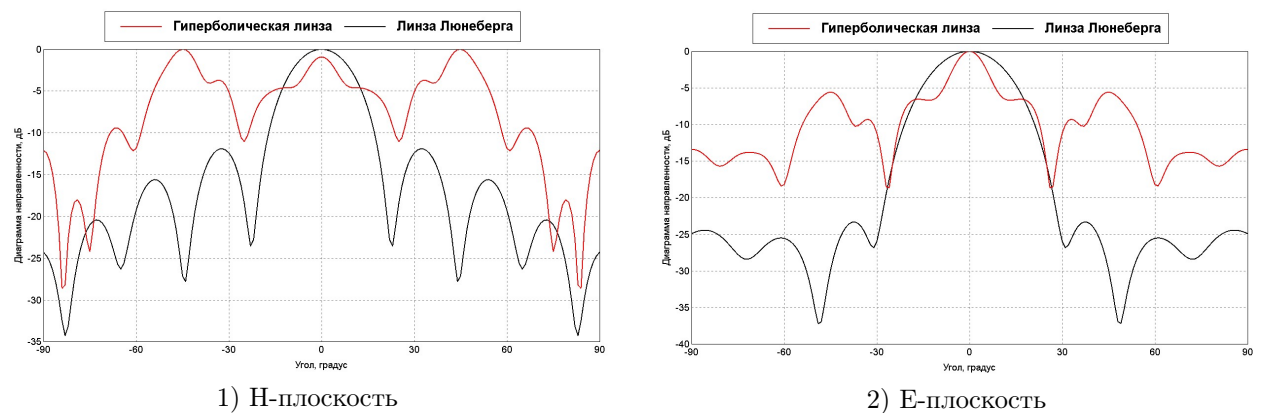


Рисунок 3 – Значения ДН в главных плоскостях для различных облучательных систем, частота 5 ГГц

## Моделирование эксперимента и результаты расчёта

При построении вычислительной модели были приняты следующие ключевые допущения. В данной модели приемная антенна не рассматривается, проводится анализ рассеянного образом поля в дальней зоне, что исключает помеховые составляющие, связанные с взаимодействием антенн.

Для оптимизации вычислительного процесса применен двухэтапный подход: расчет распределения поля в ограниченной области между линзой и образцом; использование рассчитанного распределения поля как эквивалентного источника для получения угловой зависимости характеристики рассеяния образца исследуемого материала.

Исследовался образец магнитоэлектрика [23] с известными материальными параметрами, имеющий частотную дисперсию.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования измерения МКО, полученные четырьмя методами: аналитический расчет по формулам Френеля, при облучении плоской волной, при облучении системой с гиперболической линзой и линзой Люнеберга.

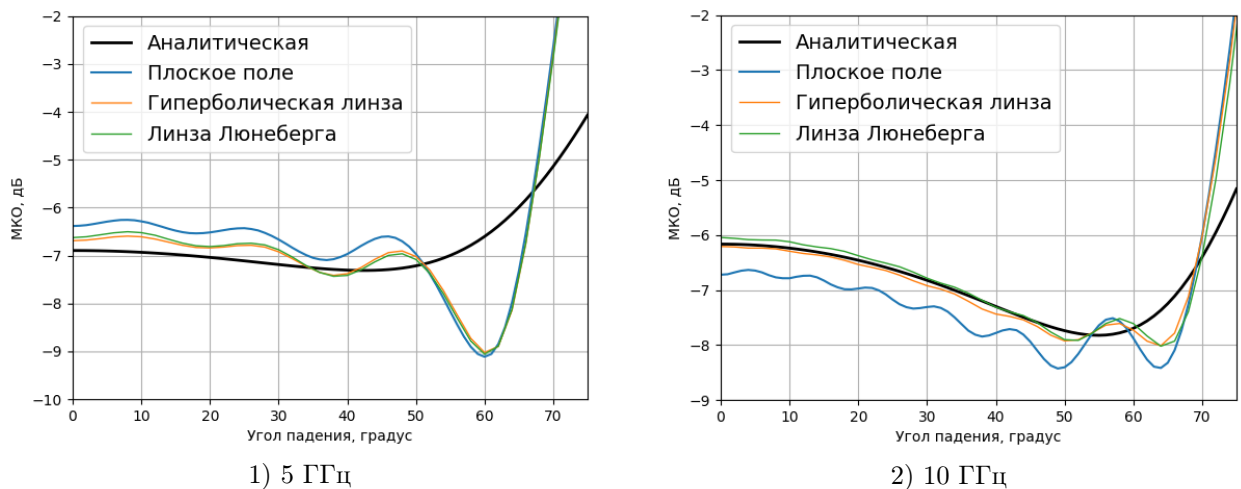


Рисунок 4 – Графики зависимостей МКО от угла падения волны на исследуемый материал

Проведенный анализ показал, что в угловом диапазоне  $0-45^\circ$  измерения МКО с использованием модифицированного поля обеспечивают лучшее соответствие аналитическим расчетам по сравнению с облучением плоской волной. Особенно важно отметить практически полное совпадение результатов, полученных с облучателем, оснащенным линзой Люнеберга, с данными представленной ранее системы антенна – линза.

Количественные оценки свидетельствуют о значительном повышении точности измерений: применение линзы Люнеберга позволило снизить методическую погрешность метода замещения с 0,8 дБ до 0,4 дБ при МКО  $-5$  дБ и с 1,0 дБ до 0,5 дБ при МКО  $-10$  дБ. Результаты численного моделирования подтверждают эффективность разработанного облучателя с линзой Люнеберга для минимизации методических погрешностей при измерениях МКО.

## Заключение

В ходе численного моделирования были оптимизированы параметры облучателя, интегрированного с линзой Люнеберга, и выполнены расчеты МКО для различных конфигураций излучающих систем. Результаты исследований демонстрируют, что применение линзы Люнеберга обеспечивает формирование электромагнитного поля с требуемым распределением амплитуды в рабочей области измерительного стенда, сохраняющее свои характеристики в широком частотном диапазоне.

Установлено, что предложенная конструкция облучателя характеризуется существенно более низким уровнем боковых и задних лепестков по сравнению с традиционными решениями, что позволяет эффективно минимизировать влияние краевых эффектов при бистатических измерениях МКО. В частности, в рабочем диапазоне частот 5-10 ГГц использование системы антенна – линза Люнеберга обеспечивает значительное снижение методической погрешности измерений: с 0,8 до 0,4 дБ для значений МКО  $-5$  дБ и с 1,0 до 0,6 дБ при МКО  $-10$  дБ.

## Список литературы

- [1] Fernandes C. A., Lima E. B., Costa J. R. Dielectric lens antennas. Handbook of antenna technologies, 2016. Pp. 1001-1064.
- [2] Линзовые антенны / Е. А. Зелкин, Р.А. Петрова. М.: Советское радио, 1974. 280 с.
- [3] Piksa P., Zvanovec S., Cerny P. Elliptic and Hyperbolic Dielectric Lens Antennas in mm-Waves // Radioengineering. April 2011. V.20. N.1. P. 270.
- [4] Garcia N.C., Chisum J.D. High-Efficiency, Wideband GRIN Lenses With Intrinsically Matched Unit Cells // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Aug. 2020. Vol. 68. No. 8. Pp. 5965-5977. doi: [10.1109/TAP.2020.2990289](https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2990289) EDN: [TGSNWG](https://www.edn.net/TGSNWG)
- [5] Korolev D.P., Menshikh N.L., Solosin V.S., Poddubny D.P. Flat Lens as a Collimator for Tapered Anechoic Chamber // 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. Pp. 652-655. doi: [10.1109/ElCon61730.2024.10468408](https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468408)
- [6] Röding M., Sommerkorn G., Häfner S., Ihlow A., Jovanoska S., Thomä R. S. A Double-Arch Positioner for Bistatic RCS Measurements with Four Degrees of Freedom. 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, 2017. Pp. 1273-1276. doi: [10.23919/EuMC.2017.8231083](https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8231083)
- [7] Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Федоров С.А., Брук Л.В. Методика обработки сигналов, позволяющая уменьшить погрешности измерений бистатических характеристик рассеяния образцов материалов // Журнал радиоэлектроники. 2024. №. 10. doi: [10.30898/1684-1719.2024.10.10](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.10) EDN: [LJZIAE](https://www.edn.net/LJZIAE)
- [8] Fedorov S.A., Menshikh N.L., Gilmutdinov R.V., Korolev D.P. Improving the Accuracy of Bistatic Measurements Using a Reference Target. 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), Saint Petersburg, Russian Federation, 2024. Pp. 637-640. doi: [10.1109/ElCon61730.2024.10468125](https://doi.org/10.1109/ElCon61730.2024.10468125)
- [9] Gilmutdinov R.V., Menshikh N.L., Fedorov S.A. Improving the accuracy of measurements of the bistatic scattering characteristics of material samples of various configurations // Meas Tech. 2024. V. 67. Pp. 467-476. doi: [10.1007/s11018-024-02367-1](https://doi.org/10.1007/s11018-024-02367-1) EDN: [NNYLMF](https://www.edn.net/NNYLMF)
- [10] Balabukha N.P., Fedorov S.A., Gilmutdinov R.V., Menshikh N.L., Sapoznikov D.V. The Impact of the Sizes of a Planar Sample to Methodical Errors in Measuring the Specular Reflection Coefficient // Antennas Design and Measurement International Conference (ADMInC). 2021. Pp. 54-57. doi: [10.1109/ADMInC54110.2021.9671006](https://doi.org/10.1109/ADMInC54110.2021.9671006) EDN: [EYYASH](https://www.edn.net/EYYASH)
- [11] Fedorov S.A., Menshikh N.L., Gilmutdinov R.V., Solosin V.S. Comparison of the Measurement Accuracy of Material Sample Specular Reflection Coefficient for Two Types of Measuring Facilities // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russia, 2021. Pp. 332-336. doi: [10.1109/RSEMW52378.2021.9494032](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494032) EDN: [DYQWUA](https://www.edn.net/DYQWUA)
- [12] Gilmutdinov R.V., Menshikh N.L., Fedorov S.A. Application of Etalon for Measurement of Bistatic Parameters of Materials // IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation. 2022. Pp. 394-396. doi: [10.1109/RMC55984.2022.10079582](https://doi.org/10.1109/RMC55984.2022.10079582)
- [13] Fedorov S.A., Gilmutdinov R. V., Menshikh N. L., Reducing Error of Position When Measuring the Bistatic Reflection Coefficient // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). 2020. Pp. 276-278. doi: [10.1109/RMC50626.2020.9312243](https://doi.org/10.1109/RMC50626.2020.9312243) EDN: [SYIAMJ](https://www.edn.net/SYIAMJ)
- [14] Gilmutdinov R.V., Krasnolobov I.I., Menshikh N.L., Fedorov S.A. Procedural Measurement Error in Specular Reflection Coefficient from Planar Samples Using Two Different Types of Test Stands // Meas Tech. 2021. V. 64. Pp. 481-487. doi: [10.1007/s11018-021-01957-7](https://doi.org/10.1007/s11018-021-01957-7) EDN: [NVSVAQ](https://www.edn.net/NVSVAQ)
- [15] Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 503 с.
- [16] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния. М.: Наука, 2007. ISBN: 978-5-02-032738-2 EDN: [QMRWHF](https://www.edn.net/QMRWHF)
- [17] Costa J.R., Silveirinha M.G., Fernandes C.A. Evaluation of a Double-Shell Integrated Scanning Lens Antenna // IEEE Antenna and Wireless Propagation letters. 2008. V. 7. P. 781. doi: [10.1109/LAWP.2008.2008403](https://doi.org/10.1109/LAWP.2008.2008403)
- [18] Balabukha N.P., Menshikh N.L., Shapkina N.E. A Study of Electromagnetic Fields in Conical and Pyramidal Tapered Anechoic Chambers // Moscow University Physics Bulletin. 2021. Vol. 76. No. 3. Pp. 126-135. doi: [10.3103/s0027134921030024](https://doi.org/10.3103/s0027134921030024) EDN: [QYDSFIY](https://www.edn.net/QYDSFIY)

- [19] Afzal M. U., Esselle K. P. Radiation performance and profile comparison of all-dielectric phase-corrected electromagnetic bandgap resonator antennas and hyperbolic lens antennas // International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Cairns, QLD, Australia, 2016. Pp. 704-707. doi: [10.1109/ICEAA.2016.7731496](https://doi.org/10.1109/ICEAA.2016.7731496)
- [20] Gilmutdinov R.V., Fedorov S.A., Menshikh N.L. Modernization of the Electromagnetic Field Formation System for Bistatic Measurements // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorskoe, Russian Federation, 2023. Pp. 92-95. doi: [10.1109/RSEMW58451.2023.10202125](https://doi.org/10.1109/RSEMW58451.2023.10202125)
- [21] Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Фёдоров С.А. Использование антенны с корректирующей линзой для измерения параметров рассеяния материалов на бистатическом стенде // Современная электродинамика. 2024. № 6 (14). С. 18-27. doi: [10.24412/2949-0553-2024-614-18-27](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2024-614-18-27) EDN: [MHERAM](https://www.edn.net/MHERAM)
- [22] Menshikh N.L., Fedorov S.A., Gilmutdinov R.V. Application of Antenna - Lens System for Measurement of Bistatic Parameters of Materials // International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), 2022. Pp. 1-4. doi: [10.1109/ICCT56057.2022.9976617](https://doi.org/10.1109/ICCT56057.2022.9976617)
- [23] Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A., Kibets S.G. Complex permittivity and permeability of composite materials based on carbonyl iron powder over an ultrawide frequency band // Physical Review Applied. 2021. 16(1). 014062. doi: [10.1103/PhysRevApplied.16.014062](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014062) EDN: [KKKPQC](https://www.edn.net/KKKPQC)

Ссылка для цитирования:

Гильмутдинов Р.В., Меньших Н.Л., Фёдоров С.А. Применение линзы Лüneберга для измерения коэффициента отражения на бистатическом стенде // Современная электродинамика. 2025. Т. 4, № 6(20). С. 4-10. EDN [FNCYPG](https://www.edn.net/FNCYPG), doi: [10.24412/2949-0553-2025-620-04-10](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-620-04-10)

Citation link:

Gilmutdinov R.V., Menshikh N.L., Fedorov S.A. Application of Luneburg lens for measuring reflectivity on bistatic facility // Modern Electrodynamics. 2025. Vol. 4, No. 6(20). P. 4-10. EDN [FNCYPG](https://www.edn.net/FNCYPG), doi: [10.24412/2949-0553-2025-620-04-10](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-620-04-10)