

Моделирование измерений ЭПР проводящего диска в рупорной безэховой камере с линзой

Н.П. Балабуха¹ Н.Л. Меньших^{1,*}

¹ *Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)*

Россия, 125412, Москва, ул. Инжорская, д. 13, стр. 6

(Поступила в редакцию 04.07.2025; после доработки 10.07.2025; подписана в печать 14.07.2025)

Проведено моделирование измерения характеристик рассеяния эталонного объекта в виде плоского диска в низкочастотной рупорной безэховой камере с линзой. Рассмотрены два линзовых коллиматора: обычная гиперболическая линза и эта же линза, покрытая с двух сторон просветляющим покрытием, оптимизированным для частоты 600 МГц. Исследован вклад неравномерности распределения поля в рабочей зоне камеры в погрешность измерения эффективной площади рассеяния объекта. Показано, что коллиматор с просветленной линзой обеспечивает более высокую точность измерения эффективной площади рассеяния диска в боковых лепестках диаграммы рассеяния за счет обеспечения меньшей неравномерности распределения амплитуды поля в рабочей зоне камеры. Также исследовалось влияние переотражения между линзой и диском на точность измерения его эффективной площади рассеяния. Показано, что просветленная линза снижает влияние переотражения не только на частоте просветления, но и в достаточно широком диапазоне частот.

PACS: 41.20.Jb, 84.40.?x УДК: 537.8

Ключевые слова: рупорная безэховая камера, диэлектрическая линза, просветляющий слой, метод моментов, FEKO, измерение ЭПР.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.80.2550301](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.80.2550301)

ВВЕДЕНИЕ

Рупорные безэховые камеры (РБЭК) уже более полувека используются для проведения экспериментальных исследований в области низких частот [1]. Благодаря специальной форме камеры, формируемое в рабочей зоне поле имеет приемлемую неравномерность, уровень безэховости в РБЭК лучше, чем в прямоугольной БЭК с близкими размерами рабочей зоны [2, 3]. Кроме того, РБЭК требует меньшего количества радиопоглощающего материала для облицовки поверхности, причем в рупорной части используется тонкий, более дешевый радиопоглощающий материал.

Современные вычислительные мощности позволяют провести оценку параметров камеры еще на этапе ее проектирования. Разрабатываются математические модели РБЭК, которые позволяют оценить распределения поля в рабочей зоне камеры с использованием строгих методов расчета [4, 5].

Для сохранения размеров рабочей зоны во всем частотном диапазоне камеры используют линзу. Наиболее простыми линзами, трансформирующими сферический фронт в плоский, являются линзы с одной преломляющей поверхностью [6]. Применение таких линз для создания линзового коллиматора [7] исследовалось еще в середине прошлого века. Благодаря простой конструкции такие линзы привлекают интерес исследователей и в наши дни.

Например, сравнению двух самых распространенных форм линз, эллиптической и гиперболической, в радиочастотном диапазоне посвящена работа [8].

В Сингапуре [9] была разработана и изготовлена линза из композитного материала, имеющего почти не меняющуюся с частотой диэлектрическую проницаемость, равную 1.8 (для частот выше 100 МГц). Благодаря этому линза диаметром 2 м весит всего 35 кг. Для улучшения свойств линзы используются просветляющие покрытия [10]. Просветление в радиодиапазоне преследует две цели: во-первых, уменьшает переотражения внутри линзы, во-вторых, обеспечивает более гладкий переход линза–воздух, а значит, снижает дифракционные эффекты на краях.

Просветление в микроволновом диапазоне начали использовать в середине прошлого века [11] путем нанесения канавок или дырок глубиной четверть длины волны прямо на поверхность линзы. Однако нанесение такого слоя обычно заметно сужает рабочий диапазон частот линзы [10]. Просветляющее покрытие в виде слоя диэлектрика с постоянной проницаемостью рассматривалось в [12]. На современном этапе развития радиофизики просветление в линзовых антеннах активно начали исследовать и применять в диапазоне миллиметровых [13] и сантиметровых [14] длин волн.

В литературе почти не обсуждаются рупорные камеры с линзами, хотя интерес к низкочастотным камерам замечен. Авторами было исследовано [15] распределение поля в рабочей зоне РБЭК с гиперболической линзой. В статье [16] было показано,

* E-mail: nl_menshikh@itae.ru

что использование просветляющего покрытия на линзе позволило существенно уменьшить неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне рупорной камеры во всем частотном диапазоне 0.1–1 ГГц. Для перекрытия всего рабочего диапазона частот камеры используется несколько источников излучения, которые размещаются в разных положениях вблизи устья камеры. Исследование распределения поля в рабочей зоне рупорной камеры в зависимости от положения источника излучения рассмотрено в работе [17].

В последние годы наметилась тенденция увеличения числа публикаций, посвященных численному эксперименту. Появляется все больше статей по моделированию измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) проводящих объектов, например цилиндра с отверстием на боковой поверхности [18] или эталонных больших цилиндров [19]. Моделируется влияние стен безэховой камеры на измерения диаграммы направленности антенн [20].

Целью настоящей работы является определение погрешности измерения ЭПР проводящего диска в рупорной камере с линзой путем численного моделирования. Работа является продолжением работ по моделированию измерения ЭПР эталонных тел в РБЭК [21]. Для этого были созданы компьютерные модели рупорной камеры с линзой, в одной из которых рассматривалась линза с просветляющим слоем вокруг неё. Моделирование позволило определить погрешности измерения ЭПР диска, связанные с неоднородным распределением поля в рабочей зоне рупорной камеры с линзой без просветляющего слоя и с ним. Также продолжены работы по определению погрешности измерения ЭПР эталонного тела, связанной с переотражениями между ним и линзой.

1. ГЕОМЕТРИЯ РУПОРНОЙ КАМЕРЫ С ЛИНЗОЙ

Геометрия рупорной камеры с линзой показана на рис. 1. Рупорная часть камеры имеет 15 м в длину, она покрыта клиновидным радиопоглощающим материалом (РПМ). Толщина материала составляет 60 см. Вблизи устья рупора располагается источник излучения. Поле излучателя при небольших углах (раскрыв исследуемого рупора составляет 30°) мало отличается от поля, формируемого точечным источником, поэтому для простоты моделирования в качестве излучателя использовался диполь. Как показано в [4], данное упрощение оправдано.

Объект помещается в прямоугольной части камеры с поперечным сечением (8.3 × 8.3) м и длиной 10 м. Эта часть РБЭК покрыта пирамидальным РПМ толщиной 90 см. Рабочая зона представляет собой горизонтально расположенный круговой цилиндр диаметром 3 м и длиной 3 м, центр рабочей зоны находится на расстоянии 4 м от апертуры рупорной части камеры.

В апертуре рупорной части камеры установлен

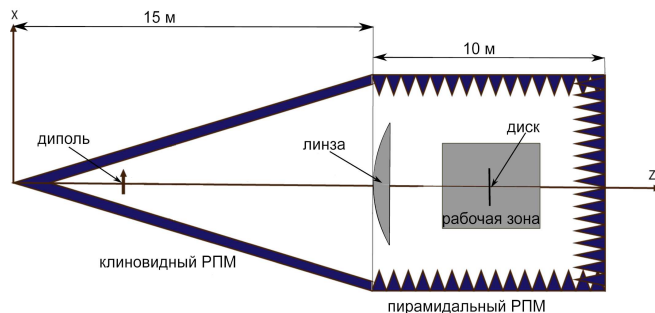


Рис. 1. Геометрия рупорной камеры с линзой, в рабочей зоне которой установлен объект измерения — проводящий диск

на гиперболическая линза со следующими параметрами: диаметр 4 м, фокусное расстояние 17 м и диэлектрическая проницаемость материала линзы 1.6. Освещенная поверхность линзы имеет форму гиперboloида вращения, поверхность, обращенная к рабочей зоне камеры, — плоская. Вершина гиперboloида вращения находится в плоскости раскрыва рупора на оси камеры, как показано на рис. 1. Линза выполнена из композитного материала [9], резонансные частоты которого находятся далеко от диапазона рабочих частот камеры, диэлектрическую проницаемость материала можно считать постоянной в этом диапазоне.

Для уменьшения переотражений в линзе используется просветляющий слой (рис. 2). Диэлектрическая проницаемость слоя n_{ML} рассчитывается как среднее геометрическое между проницаемостями внешнего пространства (воздух) и материала линзы, в данном случае составляет 1.265. Толщина слоя h на поверхности линзы должна быть

$$h = \frac{\lambda_0}{4n_{ML} \cos \theta_2}, \quad (1)$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве, θ_2 — угол между направлением луча внутри просветляющего слоя и осью симметрии линзы (она же ось РБЭК). Так как рупорная часть камеры довольно длинная, то углы падения волны можно считать близкими к нормали.

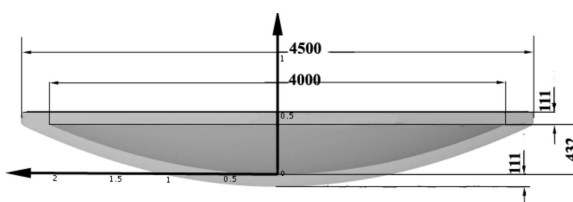


Рис. 2. Линза с просветляющим слоем на обеих поверхностях

Обе поверхности линзы покрыты слоем диэлектрика толщиной 111 мм, обеспечивающим максимальное просветление на частоте 600 МГц — середине рабочего диапазона частот. Просветляющий

слой наносится не только на поверхность линзы, но и продолжается за её пределами. Диаметр линзы с учётом просветляющего слоя равен 4.5 м.

Как показали предыдущие исследования [15, 16], использование просветляющего слоя позволяет обеспечить плавный переход от материала линзы к свободному пространству, что позволяет уменьшить влияние дифракционных эффектов на краях линзы. Неравномерность распределения поля в рабочей зоне камеры с просветленной линзой уменьшилась на некоторых частотах на 1 дБ и стала не больше, чем 3 дБ. Неравномерность распределения фазы поля в случае просветленной линзы осталась практически такой же, как и в случае линзы без просветляющего слоя.

Кроме того, у гиперболической линзы плоская поверхность направлена к объекту измерения, что способствует возникновению переотражений между ней и исследуемым объектом, которые будут влиять на результаты измерения характеристик рассеяния. Просветляющий слой позволяет снизить переотражения между объектом и линзой. Причем в зависимости от положения объекта результаты измерения его ЭПР могут как завышаться, так и занижаться.

2. ПАРАМЕТРЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ КАМЕРЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭПР ДИСКА

Расчеты характеристик рассеяния диска, установленного в рабочей зоне РБЭК, выполнены методом моментов с использованием программы ФЕКО.

При расчетах РПМ на поверхностях рупорной части камеры рассматривался как слой диэлектрика с постоянной эффективной диэлектрической проницаемостью. При заданном угле падения плоской волны на этот слой коэффициент отражения соответствует отражению от реального материала. Вся камера поделена на секции, границы которых представляют собой плоскости, перпендикулярные оси камеры. Секции строятся так, что для каждой секции можно выбрать характерный угол падения волны на материал, для которого и подбираются параметры слоя. Использовались результаты работы [22], в которой рассчитывался коэффициент отражения от клиновидного РПМ в зависимости от угла падения на материал. Моделируемый материал имеет коэффициент отражения при нормальном падении волны не хуже -15 дБ на частотах от 300 МГц и выше.

РПМ на стенках прямоугольной части камеры моделируется с помощью резистивного слоя с заданным импедансом. Это позволяет аппроксимировать коэффициент отражения для материала в более широком секторе углов падения, что важно для этой секции камеры [17]. При нормальном падении волны материал имеет коэффициент отражения около -30 дБ при частотах от 400 до 1000 МГц. Задняя стенка камеры в модели не учитывается.

Материалы линзы и просветляющего слоя предполагаются однородными диэлектриками.

Идеально проводящий бесконечно тонкий диск диаметром 1 м располагается в рабочей зоне камеры как эталонный объект измерения. Опора, на которой располагается диск при измерениях, не учитывается при моделировании. Диск выбран в качестве объекта измерения именно потому, что между ним и плоской поверхностью линзы могут возникать существенные переотражения, и интересно оценить их влияние на точность измерения. Диск занимает только часть рабочей зоны, при этом уровень исследуемого сигнала находится в интересующем нас диапазоне значений.

При моделировании измерения диаграммы обратного рассеяния (ДОР) диска используются скрипты, написанные на языке Lua и позволяющие эмитировать вращение диска на опоре и движение диска вдоль оси камеры в автоматическом режиме с дискретным шагом. Данный скрипт запускается внутри программы ФЕКО, и для каждого нового положения диска проводится расчет требуемых характеристик. В настоящей работе представлены результаты расчета только для линейной поляризации, для которой вектор $\mathbf{E}$ лежит в плоскости падения волны на материал. Для второй линейной поляризации волны ДОР диска качественно похожа, а для учета взаимодействия объекта с линзой важнее всего нормальное падение волны на диск.

Решение задачи о нахождении характеристик рассеяния диска проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается только рупорная часть камеры с небольшой (1 м вдоль оси камеры) секцией прямоугольной части. Ищется распределение поля в сечении, перпендикулярном оси камеры, расположенном на расстоянии 1 м от апертуры рупорной части камеры по направлению к вершине рупора и одновременно на этом же расстоянии от вершины параболической поверхности линзы. Далее, во втором расчете полученное распределение поля используется в качестве источника излучения, причем так как внешние поверхности РБЭК металлические, поле вне рассматриваемого сечения строго ноль. Рассматривается уже не сама камера, а только линза в свободном пространстве. Диск находится в центре рабочей зоны камеры (рис. 3).

Влияние стенок прямоугольной части камеры во второй модели не рассматривается. Понятно, что есть лучи, отраженные от стенок камеры и попадающие в рабочую зону, а значит, взаимодействие со стенками может влиять на точность измерения характеристик рассеяния объектов в камере. Однако стенки камеры покрыты РПМ и потому предполагается их слабое взаимодействие с объектом измерения. То есть их влияние предполагается более слабым, чем влияние взаимодействия с линзой и неравномерности распределения поля в рабочей зоне. Таким образом, происходит существенное упрощение решаемой задачи, которое позволяет провести большое количество расчетов, получить в этом приближении характеристики рассеяния диска и оценить

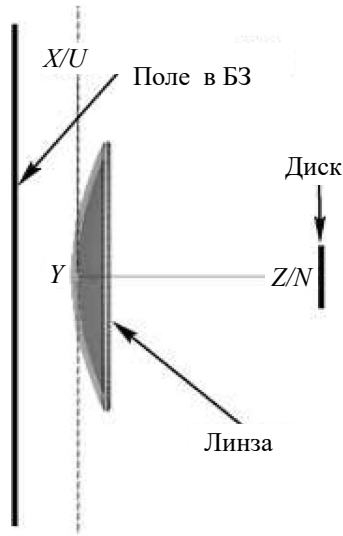


Рис. 3. Вид второй модели расчета: диск и линза в поле, сформированном в РБЭК

их точность.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАМЕРЫ

В модели рассматривается источник гармонической монохроматической волны в виде диполя. Зависимость от времени в виде $e^{i\omega t}$ опускаем, так как нас интересует стационарное решение. Поле внутри РБЭК удовлетворяет уравнениям Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= i\omega \epsilon \mathbf{E}, & \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -i\omega \mu \mathbf{H}, & \operatorname{div} \mathbf{H} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В рупорной камере рассматриваются три типа областей: полость внутри камеры (воздух), обозначим поля здесь как $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$, область внутри РПМ, обозначим поля как $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ и внутри материала линзы, обозначим поля как $(\mathbf{E}_L, \mathbf{H}_L)$. На всех поверхностях внутри камеры записывается условие непрерывности тангенциальных компонент поля. На поверхностях РПМ (обозначим S_1) и обеих поверхностях линзы (обозначим S_L) ставятся граничные условия для диэлектриков, на них касательные компоненты поля приравниваются друг к другу. Внешние стенки камеры металлические (обозначим S_2), поэтому на них касательная компонента электрического поля равна 0. Это же условие ставится на поверхности проводящего диска (обозначим S_d):

$$\begin{aligned} E_1^\tau|_{S_1} &= E_2^\tau|_{S_1}, & H_1^\tau|_{S_1} &= H_2^\tau|_{S_1}, \\ E_1^\tau|_{S_L} &= E_L^\tau|_{S_L}, & H_1^\tau|_{S_L} &= H_L^\tau|_{S_L}, \\ E_2^\tau|_{S_2} &= 0, & E_1^\tau|_{S_d} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Использовался стандартный алгоритм метода моментов [23] для решения задачи о нахождении рас-

пределения поля в апертуре рупорной части камеры. Использовались представления поля для каждой области в виде фундаментальных решений уравнения Гельмгольца. При этом источник излучения выделялся в отдельную область, на поверхности которой поле задается как поле электрического диполя. Вводились электрический и магнитный токи на всех рассматриваемых поверхностях камеры. Из представлений поля для всех рассматриваемых областей путем ряда преобразований получена система уравнений. Эта система интегро-дифференциальных уравнений содержит под интегралами по поверхностям S_1 и по S_2 введенные токи, а в правой части — падающее поле, созданное диполем в точке наблюдения. Такая система решается стандартными методами решения СЛАУ [24].

Вторая задача решается аналогичным образом, только теперь вместо поля диполя источником излучения является распределение поля в заданной плоскости. Рассматриваются области внутри линзы (с учётом просветляющего слоя, если он есть). Записываются аналогичные уравнения на всех поверхностях при использовании граничных условий 3.

4. ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДОР ДИСКА

При проведении измерений ЭПР объекта возникает несколько источников погрешностей. На основе модели РБЭК оценим численно факторы, влияющие на точность измерения характеристик рассеяния объектов. Одним из них является неравномерность распределения поля в рабочей зоне камеры.

Объектом исследования, как говорилось выше, является проводящий диск диаметром 1 м. Для того, чтобы оценить погрешность измерения характеристик рассеяния объекта, связанную с неравномерностью распределения поля в рабочей зоне камеры, исследуем ДОР объекта в поле, сформированном РБЭК с линзой. Под ДОР будем подразумевать диаграмму ЭПР в моностатической локации объекта.

Найдем распределение поля в сечении камеры на небольшом расстоянии после линзы в отсутствии объекта исследования. Это поле следует нормировать, чтобы его можно было сравнивать с полем плоской волны с амплитудой напряженности 1. При измерениях диск расположен в центре рабочей зоны. Поэтому нормировку проведем для амплитуды поля в центральном сечении рабочей зоны камеры внутри круга диаметром 1 м. Ищем среднее значение амплитуды поля в этом сечении, которое будет нашим нормировочным коэффициентом. Фазу поля оставляем без изменения.

Рассмотрим поле в дальней зоне (ДЗ), отраженное строго назад от диска, в зависимости от положения диска. Диск вращается относительно вертикальной оси, проходящей через центр рабочей зоны, согласно процедуре, описанной в разд. 3. Получа-

ем ДОР на заданной частоте. Ниже на рис. 4 приведены графики ДОР диска, полученные при численном эксперименте в поле после линзы без просветляющего слоя и с просветляющим слоем для частот 400 и 800 МГц. На этих же рисунках приведены ДОР диска в плоском поле в свободном пространстве, полученные также строгим методом моментов.

Как видно из графиков, центральный лепесток прописывается весьма точно: на обеих частотах разница между моделированием измерения ЭПР диска и расчетом в свободном пространстве составляет около 0.2 дБ. Но в первом лепестке уже видна разница. Для частоты 400 МГц погрешность измерения составила около 0.8 дБ для обеих линз. То есть разницы между измерением в поле обычной и просветленной линз практически нет на низких частотах, однако с ростом частоты ситуация меняется. На частоте 800 МГц погрешность измерения в первом лепестке составила 1 дБ для линзы без просветления и 0.13 дБ для просветленной линзы. При этом напомним, что линза просветлена для частоты 600 МГц. Можно сказать, что использование просветления позволяет повысить точность измерения за счет уменьшения неравномерности распределения поля в рабочей зоне в диапазоне частот.

Использование просветления позволило существенно снизить неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне камеры с линзой, в частности на частоте 400 МГц неравномерность уменьшилась почти на 1 дБ. На рис. 5 приведены распределения амплитуды поля в центре рабочей зоны в E плоскости на частотах 400 и 800 МГц.

Диаметр диска 1 м, что составляет только треть размера рабочей зоны. На этом расстоянии использование просветляющего слоя на линзе практически не приводит к уменьшению неравномерности распределения поля в рабочей зоне на частоте 400 МГц, а на частоте 800 МГц распределение амплитуды поля на размере диска меняется сильнее. Поэтому на нижней из рассматриваемых частот уменьшение погрешности измерения ЭПР диска практически не произошло.

5. ПРОЦЕДУРА МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДОР ДИСКА

Измерение ЭПР объектов, как правило, выполняется с нормировкой сигнала на эталонный объект. То есть процедура следующая: измеряется комплексная амплитуда рассеянного объектом поля в зависимости от его положения, измеряется комплексная амплитуда в отсутствии объекта (фон) и измеряется сигнал от эталонного объекта. ЭПР диска рассчитывается по формуле:

$$\sigma = 10 \lg \left(4\pi \left| \frac{E_{\text{sim}} - E_{\text{bkg}}}{E_{\text{norm}}} \cdot E_{\text{disk}} \right|^2 \right), \quad (4)$$

где E_{sim} — полученное в результате моделирования процесса измерения ЭПР значение поля рассеяния

объекта в ДЗ, E_{bkg} — значение поля, отраженного от линзы без объекта, в ДЗ (фон), E_{norm} — рассеянное поле в ДЗ от эталонного объекта (калибровка), E_{disk} — значение поля в ДЗ для объекта в свободном пространстве, рассчитанное строгим методом.

В моделировании измерения используются значения полей в ДЗ. В нашем случае в качестве фонового сигнала используется комплексная амплитуда отраженного назад поля в ДЗ при отсутствии диска в модели (отражение только от линзы).

В измерениях ЭПР важно сделать корректную нормировку поля. Между линзой и объектом существуют переотражения, которые могут влиять на точность измерения объекта и эталона. Потому предложена следующая процедура.

Поля, использованные в пункте 5, не нормируем на среднее значение в заданной области, а в исходном виде используем как источник излучения. В этом поле исследуется отражение от нашего же диска, стоящего нормально к оси камеры. Линзы и остальных элементов камеры в модели уже нет. Записываем распределение только рассеянного поля снова в сечении, близком к положению поля излучения. Это поле снова используется как источник излучения, записываем значение поля в ДЗ.

Таким образом, за счет двух пересчетов полей мы смогли рассчитать поле, отраженное назад от диска, в поле РБЭК с линзой, исключив переотражения. При этом размер области пересчитываемых полей берется много больше сечения камеры, чтобы избежать потерь энергии волны при пересчетах. Нормировка на тот же самый диск позволяет минимизировать в данных расчетах влияние неравномерности распределения поля, так как спад поля к краям эталонного и измеряемого объекта одинаковый.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭПР ДИСКА

Проведены три типа «измерения» ЭПР диска: зависимость ЭПР диска от частоты, зависимость ЭПР диска от его положения вдоль оси камеры и от угла поворота диска при симуляции измерения ДОР. Первое моделирование покажет изменение точности измерения ЭПР диска от частоты, флуктуацию погрешностей. Второе наглядно выявит влияние переотражения между диском и линзой на точность измерения ЭПР. Третье поможет оценить точность измерения лепестков диаграммы рассеяния диска уже в совокупности влияния нескольких факторов.

6.1. Зависимость измерения ЭПР диска от частоты

Проведено моделирование измерения ЭПР диска от частоты в диапазоне от 400 до 800 МГц с шагом 50 МГц. В этих моделях исследуемый диск всегда

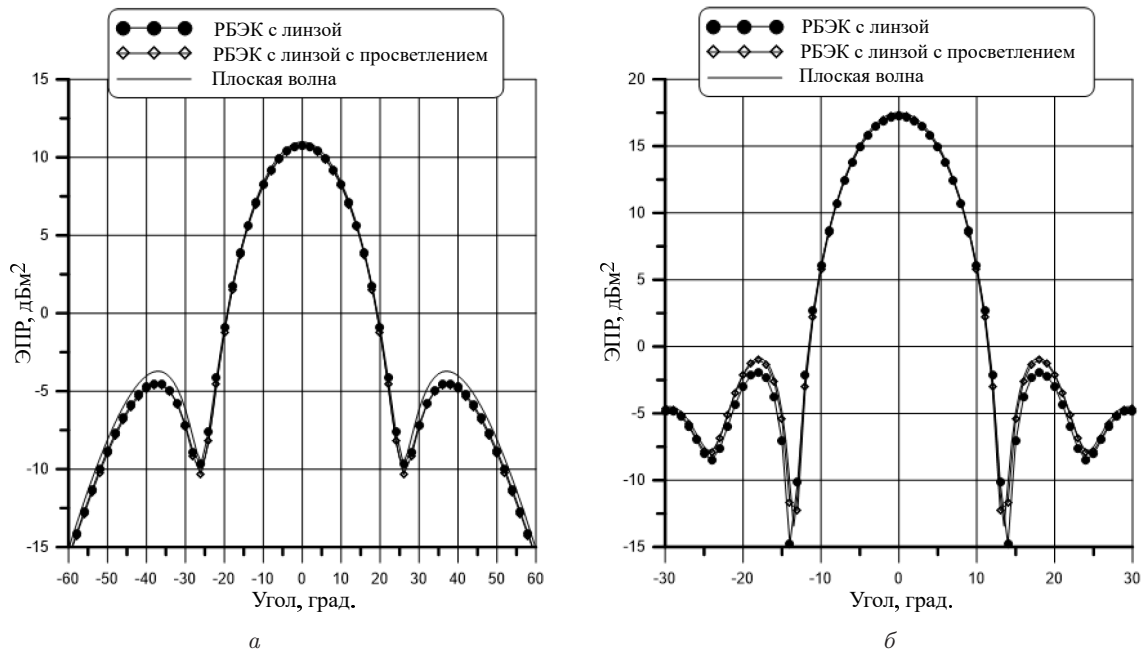


Рис. 4. ДОР диска в свободном пространстве и в поле камеры с линзой и с линзой с просветлением на частотах a — 400 и b — 800 МГц

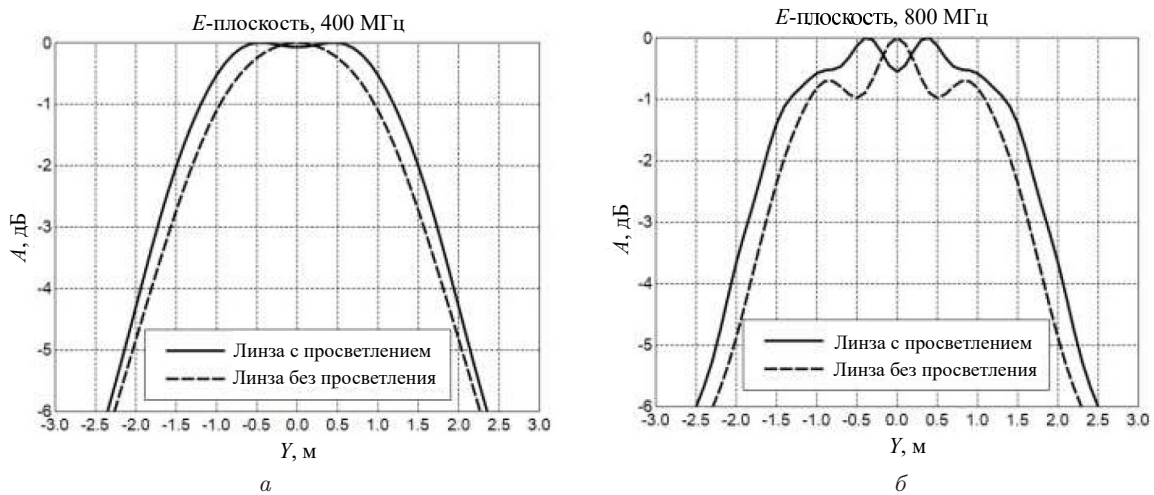


Рис. 5. Распределение амплитуды поля на частоте 400 (a) и 800 МГц (b) в сечении, проходящем через центр рабочей зоны РБЭК с линзой и с просветленной линзой

располагался в центре рабочей зоны, квазиплоская волна после линзового коллиматора падает по нормали к поверхности диска.

На рис. 6 представлены результаты численного моделирования. Представлена зависимость ЭПР диска, расположенного в свободном пространстве в поле плоской волны, от частоты. Также представлены результаты численного эксперимента по моделированию измерения ЭПР диска при расположении его в поле обычной линзы и линзы с просветляющим слоем.

На представленном графике можно заметить две особенности. Во-первых, отличия между полученной зависимостью ЭПР диска от частоты в поле

обычной линзы от расчетной больше, чем аналогичные отличия между «измеренными» значениями ЭПР диска в поле просветленной линзы. Причем отличия для непросветленной линзы хорошо видны визуально. Во-вторых, точность измерения ЭПР диска для непросветленной линзы на всех частотах остается примерно одинаковой, в то время как для просветленной линзы она меняется, около частоты 600 МГц эти отличия визуально совершенно не видны.

Максимальная погрешность определения ЭПР диска при использовании непросветленной линзы в полосе частот от 400 до 800 МГц составила 0.8 дБ, а при использовании просветленной линзы —

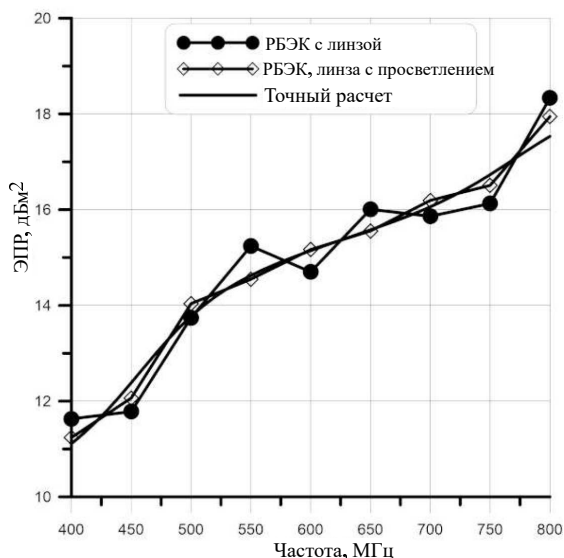


Рис. 6. ЭПР диска диаметром 1 м в зависимости от частоты излучения падающей по нормали волны

0.4 дБ. Исследования частотной зависимости указывают на эффективность использования просветления в достаточно большом диапазоне частот.

6.2. Движение диска вдоль оси камеры

Наличие переотражения между поверхностями линзы и объектом может по-разному влиять на точность измерения ЭПР диска в зависимости от числа длин полуволин, укладываемых на расстоянии между ними. Поэтому для оценки такого влияния проведено моделирование измерения ЭПР диска при установке его вдоль оси камеры в диапазоне $\pm \lambda/4$ от центра рабочей зоны. При этом сам диск всегда стоит нормально к оси камеры, нормировка происходит, как описано в пункте 6, на положение диска именно в центре рабочей зоны.

Для борьбы с переотражениями между линзой и объектом можно использовать поворот линзы. При небольшом повороте линзы вокруг вертикальной оси, проходящей через вершину гиперболоида вращения линзы, переотраженные лучи будут отклоняться в сторону и не попадут обратно в приемную антенну. При этом неравномерность распределения поля в рабочей зоне РБЭК меняется не сильно. Будем рассматривать кроме просветленной и обычной линзы еще обычную линзу, ось симметрии которой повернута на 10° от оси РБЭК (обозначим это как «линза с поворотом»).

Ниже приведены результаты моделирования измерения ЭПР диска на частотах 400, 600 и 800 МГц в поле линзы с просветлением и без, а также линзы с поворотом. На графиках горизонтальной линией показано точное значение ЭПР диска на данной частоте.

Измеренное значение ЭПР диска колеблется в зависимости от положения диска в рабочей зоне каме-

ры. Колебания не периодические, то есть распределение поля меняется вдоль оси камеры и оказывает влияние на измеренное значение ЭПР диска, влияет не только переотражения между линзой и объектом. Сразу обращает на себя внимание график на рис. 7, б, где практически отсутствуют колебания для просветленной линзы. На частоте, для которой линза просветлена, переотражений нет, и практически все отклонения от точного значения обусловлены остальными факторами, оказывающими не столь значительное воздействие в моделируемой ситуации.

Оценим максимальные колебания измеренных значений ЭПР диска и среднее отклонение от точного значения. В табл. 1 приведены результаты моделирования измерения ЭПР диска при его установке в разных положениях вдоль оси камеры.

На частоте 600 МГц ЭПР диска в поле просветленной линзы измеряется с очень высокой точностью. Но и на других частотах точность измерения ЭПР диска повышается: существенно снижаются колебания значения ЭПР вдоль оси камеры и измеренное среднее значение приближается к точному.

Для линзы с поворотом значения среднего измеренного ЭПР ближе к значениям для обычной линзы, что логично, ведь это значение определяется больше неравномерностью распределения поля и иными факторами в РБЭК. А вот максимальная разность как раз определяется именно переотражениями между линзой и объектом, потому для линзы с поворотом мы наблюдаем наименьшие значения в этой колонке.

Таким образом, можно сделать два вывода: переотражения между линзой и плоским объектом могут быть весьма значительными, использование просветления снижает переотражения и вдали от частоты просветления.

6.3. Моделирование измерения ДОР диска

Теперь оценим, как комплекс факторов влияет на точность измерения в целом. Смоделируем измерение ДОР диска в камере с линзой, как это бы происходило в реальности. То есть теперь уже не нормируем поле после линзы на 1, а идем по процедуре, описанной в секции 6. Используем в качестве источника поле в апертуре рупорной части камеры. После прохождения линзы поле становится квазиплоским, в нем проводим измерение характеристик рассеяния диска, вращая его с помощью скрипта. Центр вращения диска совпадает с центром рабочей зоны камеры.

Точно также используем вычитание фона — отражение от самой линзы и нормировку. В качестве нормировочного объекта снова берется тот же самый диск, но за счет двух пересчетов полей, в нормировке исключается переотражение между диском и линзой. Эта нормировка позволяет максимально компенсировать неравномерность распределения поля в рабочей зоне рупорной камеры с лин-

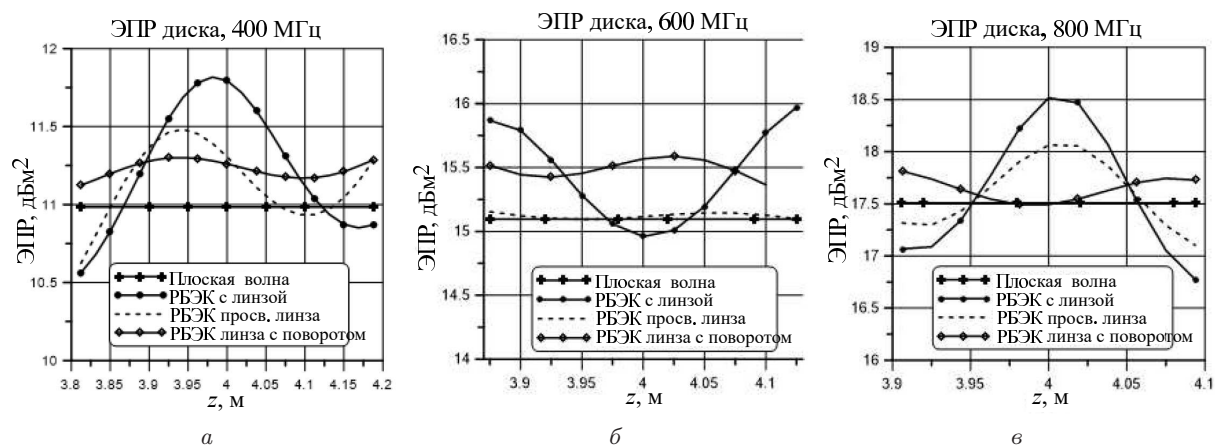


Рис. 7. ЭПР диска в зависимости от его положения в рабочей зоне на частотах 400, 600 и 800 МГц

Таблица 1. Погрешности определения ЭПР диска при движении его вдоль оси РБЭК

Частота, МГц	Погрешность среднего ЭПР, дБ			Максимальная разность «измеренных» ЭПР, дБ		
	Линза	Линза с просветлением	Линза с поворотом	Линза	Линза с просветлением	Линза с поворотом
400	0.27	0.16	0.24	1.25	0.86	0.18
600	0.36	0.02	0.35	1.02	0.06	0.23
800	0.14	0.10	0.13	1.74	0.96	0.30

зой.

На рис. 8 представлены результаты моделирования измерения ДОР диска в камере с линзой без просветления и с ним, а также для линзы с поворотом. На этих же графиках приведены ДОР диска в плоском поле в свободном пространстве — расчет строгим методом.

Сразу отметим, что форма ДОР передана верно во всех измерениях. Есть видимые существенные расхождения в провалах диаграммы, но это связано в первую очередь с тем, что количество точек в моделировании измерения было ограниченным, диаграммы не слишком подробны. Но оба лепестка из выбранного сектора для диаграммы 400 МГц прописались довольно четко, хотя и видны некоторые погрешности. Обратим внимание, что на этой частоте мы видим завышение результатов измерения — это нормальное явление, ведь за счет переотражений между диском и линзой мы можем получать как завышенный, так и заниженный результат измерения.

ДОР диска на частоте 800 МГц имеет все те же указанные выше особенности, что и ДОР на частоте 400 МГц. Визуально заметны отличия в главном лепестке, отличия в первом боковом лепестке оказались визуально не видны для обеих линз.

На частоте 600 МГц в главном лепестке погрешность измерения ЭПР диска практически не видна взглядом. Но вот в первом боковом лепестке она хорошо видна в измерении, смоделированном для непросветленной линзы. Напомним, что 600 МГц — частота просветления, и тут мы ви-

дим максимальную эффективность просветляющего слоя. Вот и в ДОР в первом боковом лепестке минимальные отличия.

В табл. 2 приведены погрешности измерения ДОР диска для главного и первого бокового лепестков.

При использовании линзы с поворотом на диаграммах наблюдается небольшая несимметричность, то есть погрешность определения ЭПР диска с одной стороны всегда чуть больше, чем с другой. Сравнивая значения погрешностей, приведенных в таблице, можно заключить, что просветление помогло повысить точность определения ЭПР диска не только на частоте просветления, но и в некотором диапазоне частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена модель РБЭК с линзой, позволяющая оценить ряд важнейших характеристик данного измерительного стенда. Предложенная модель позволяет не только оценить неравномерность распределения амплитуды и фазы поля в рабочей зоне камеры, но и оценить погрешности измерения характеристик рассеяния эталонных объектов в ней.

Проведено моделирование измерения характеристик рассеяния проводящего диска диаметром 1 м. При этом выделены погрешности, связанные с неравномерностью распределения поля в камере и, отдельно, переотражениями между объектом

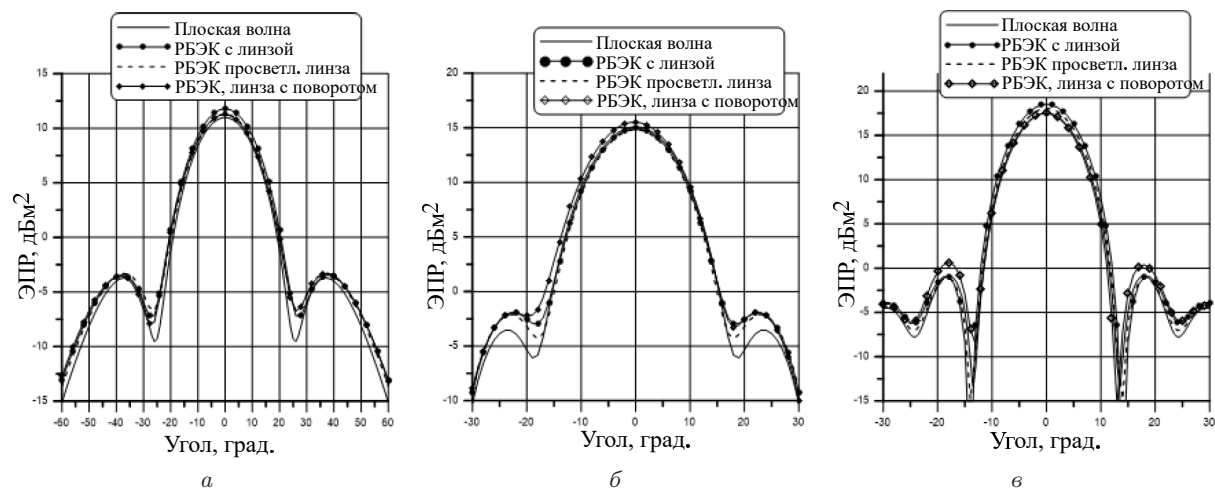


Рис. 8. ДОР диска в свободном пространстве и в поле камеры с линзой, с просветленной линзой и с повернутой линзой на частотах 400, 600 и 800 МГц

Таблица 2. Погрешности определения ЭПР диска при вращении диска вокруг вертикальной оси

Частота, МГц	Погрешность в главном лепестке, дБ			Погрешность в первом боковом лепестке, дБ		
	Линза	Линза с просветлением	Линза с поворотом	Линза	Линза с просветлением	Линза с поворотом
400	0.81	0.31	0.28	0.33	0.42	0.22
600	0.13	0.03	0.42	1.39	0.20	1.32
800	1.01	0.56	0.02	0.13	0.16	1.25

и линзой. Показано, что переотражения могут существенно влиять на точность измерения объекта в камере. Влияние неравномерности распределения поля в рабочей зоне камеры может быть скомпенсировано лишь частично, даже в самом идеальном случае (то есть при нормировании на этот же объект) погрешность определения значений ЭПР диска в боковых лепестках ДОР может оказаться значительной.

Использование просветления на линзе позволяет снизить переотражения между объектом и линзой, уменьшить неравномерность распределения амплитуды поля в рабочей зоне камеры. Все это способствует существенному уменьшению погрешностей измерения характеристик рассеяния объекта в данной камере. На частоте просветления погрешности определения ЭПР даже в боковых лепестках снижа-

ются до 0.2 дБ, на частотах выше и ниже частоты просветления значения погрешностей существенно меньше, чем для линзы без просветления. Исследования показали, что просветление эффективно в достаточно широком диапазоне частот.

Поворот линзы вокруг оси также позволяет эффективно снизить влияние переотражений между линзой и объектом измерения. Однако в этом случае влияние неравномерности распределения поля приводит все равно к большей погрешности определения ЭПР диска, и на ДОР появляется небольшая несимметричность, связанная именно с поворотом линзы.

Авторы выражают признательность своему покойному коллеге Солосину Владимиру Сергеевичу, который инициировал данное исследование.

- [1] Emerson W.H., Sefton H.B. // J. Proceedings of the IEEE. **53**, N 8. 1079 (1965).
- [2] Hemming L.H. Electromagnetic Anechoic Chambers. NY, USA: IEEE Press and Wiley Interscience, 2002.
- [3] Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007.
- [4] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. // <http://radiotec.ru/en/journal/antennas/number/2015-9/article/17293> Антенны. **220**, № 9. 61 (2015). (Balabukha N.P., Menshikh N.L., Solosin V.S. // <http://radiotec.ru/en/journal/antennas/number/2015-9/article/17293> Antennas. **220**, N 9, 61 (2015).)
- [5] Xiong Z. and Chen Z. // <http://ieeexplore.ieee.org/document/8604178> Proc. of the Conference of Antenna Measurement Techniques Association, Williamsburg, VA, Nov., 2018, (NY: IEEE Press, 2018, p. 13.)
- [6] Handbook of Antenna Technology. Zhi Ning Chen (Editor), Singapore: Springer, 2016.
- [7] Mentzer J.R. // Proc. IRE. **41**, N 2. 252 (1953).
- [8] Piksa P., Zvanovec S., Cerny P. // http://www.radioeng.cz/fulltexts/2011/11_01_270_275.pdf

- Radioengineering. **20**, N 1. 270 (2011).
- [9] Matitsine S., Lagoiski P., Matytsine L. et al. // <http://ieeexplore.ieee.org/document/8604178> Proc. of the Conference of Antenna Measurement Techniques Association, Bellevue, Washington, Oct., 2012, (Omnipress, 2012, p. 153.)
- [10] Milligan T. Modern antenna design. 2nd ed. New Jersey, USA: Wiley, 2005.
- [11] Morita T., Cohn S.B. // IRE Transactions on Antennas and Propagation. **4**, N 1. 33 (1956).
- [12] Bachman P.L. Dielectric lens model. E-systems Inc. New York, NY, USA, Tech. Rep. TR-72-299, 2005.
- [13] Costa J.R., Silveirinha M.G., Fernandes C.A. // Antenna and Wireless Propagation letters. **7**. 781 (2008).
- [14] Garcia N.C., Chisum J.D. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. **68**, N 8. 5965 (2020).
- [15] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. // <http://radiotec.ru/ru/journal/antennas/number/2017-2/article/19152> Антенны. **234**, № 2. 42 (2017). (Balabukha N.P., Menshikh N.L., Solosin V.S. // <http://radiotec.ru/en/journal/antennas/number/2017-2/article/19152> Antennas. **234**, N 2. 42 (2017).)
- [16] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. // <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/5/text.pdf> Журнал радиоэлектроники, 2017, № 9, (2017). (Balabukha N.P., Menshikh N.L., Solosin V.S. // <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/5/text.pdf> Journal of Radio Electronics. N 9, (2017)).
- [17] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Шапкина Н.Е. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. **76**, № 3, (2021). (Balabukha N.P., Menshikh N.L., Shapkina N.E. // Moscow Univ. Phys. Bull. **76**, N 3. 126 (2021)).
- [18] Chanmi H., Khenchaf A., Pouliquen P. // 2018 IEEE Conference on Anten. Meas. & Applic. (CAMA), Sept. (2018).
- [19] Pogorzelski R.J. // IEEE Trans. on Anten. and Prop. **57**, I. 10 (2009).
- [20] Wei P.S.P., Reed A.W., Ericksen C.N., Schuessler R.K. // IEEE Anten. and Prop. Magazine. **51**, I. 2 (2009)
- [21] Балабуха Н.П., Меньших Н.Л., Солосин В.С. // <http://modern-electrodynamics.ru/number-2-2/> Современная электродинамика, декабрь 2022–январь 2023, № 2 (2), (2022). (Balabukha N.P., Menshikh N.L., Solosin V.S. // <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/5/text.pdf> Modern Electrodynamics, December 2022–January 2023, N 2 (2), (2022).)
- [22] Никитенко А.В., Зубов А.С., Шапкина Н.Е. // https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=3513&option_lang=rus Матем. моделирование. **26**, № 9. 18 (2014) (Nikitenko A.V., Zubov A.S., Shapkina N.E. // Mathematical Models and Computer Simulations. **7**, N 2, 134 (2015).
- [23] Medgyesi-Mitschang L.N. and Eftimiu C. // Appl. Phys. **19**. 275 (1979).
- [24] Peterson A.F., Ray S.L., Mittra R. Computational Methods for Electromagnetics. New York, NY, USA: Wiley, 1997.

Simulation of the RCS Measurements of a Conductive Disk in a Tapered Anechoic Chamber with a Lens

N. P. Balabukha^a, N. L. Menshikh^b

Institute for Theoretical and Applied Electrodynamics of the Russian Academy of Sciences

Moscow, 125412, Russia

E-mail: ^an_bala@mail.ru, ^bnl_menshikh@itae.ru

Simulation of measurements of the scattering characteristics of a reference object in the form of a flat disk in a low-frequency tapered anechoic electromagnetic chamber (TAEC) with a lens has been carried out. Two lens collimators are considered: a conventional hyperbolic lens and the same lens coated on both sides with an anti-reflective coating optimised for the frequency of 600 MHz. The contribution of the non-uniformity of the field distribution in the quiet zone of the chamber to the measurement accuracy of the radar cross section (RCS) of the object has been investigated. It is shown that the collimator with the anti-reflective lens provides higher accuracy in measuring the RCS of the disk in the side lobes of the scattering pattern due to providing lower non-uniformity of the field amplitude distribution in the quiet zone of the chamber. The influence of re-reflections between the lens and the disk on the accuracy of its RCS measurements has also been investigated. It is shown that the anti-reflective lens reduces the effect of re-reflections not only at the anti-reflective (matching) frequency but also in a sufficiently wide frequency range.

PACS: 41.20.Jb, 84.40.-x

Keywords: tapered anechoic chamber, dielectric lens, matching layer, method of moments, FEKO, RCS measurements.

Received 04 July 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Балабуха Николай Павлович — канд. техн. наук, доцент, зав. лабораторией; тел.: (495)483-23-62, e-mail: n_bala@mail.ru.
2. Меньших Николай Леонидович — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; тел.: (495)485-95-44, e-mail: nl_menshikh@itae.ru.