

УДК 621.396.67.012.12

Расчёт диаграммы направленности планарной линзы Люнеберга

*Маврин А. В., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Ахияров В.В., к.т.н., доцент
к. т.н, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»,
Россия, 105505, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана,
rl1@bmstu.ru*

Введение

Как правило, в антенных системах для изменения положения луча в пространстве требуется перемещать всю антенну. Такое сканирование пространства называется механическим. Для обеспечения возможности произвольного перемещения луча по сектору обзора при неподвижной антенне применяется электрическое сканирование. Данный механизм реализован в фазированных антенных решётках.

Существуют специальные типы антенн, в которых изменение направления луча в достаточно широком угловом секторе можно осуществить только за счёт перемещения облучателя. Данный принцип реализован в линзовых антеннах Люнеберга. На рис. 1.а показан ход лучей в сферической линзе Люнеберга, цифрами 1 и 2 обозначены облучатель и плоский фронт волны на выходе линзы. На рис. 1.б представлено положение главного лепестка диаграммы направленности антенной системы в зависимости от положения облучателя.

Математическая модель линзы Люнеберга

Лучевые траектории, представленные на рис. 1.а, можно реализовать в линзе, диэлектрическая проницаемость $\mathcal{E}(r)$ которой изменяется по закону:

$$\mathcal{E}(r) = 2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2, \quad (1)$$

где a — радиус линзы.

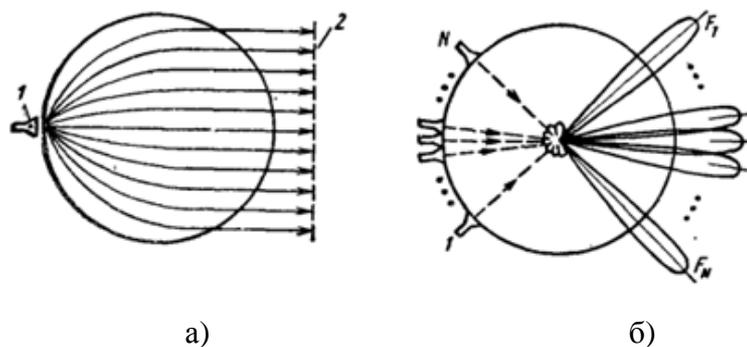


Рис. 1. Сферическая линза Лунеберга [1]

В настоящей статье рассматривается планарная линза Лунеберга. Её конструкция состоит из двух квадратных металлических пластин, пространство между которыми заполнено диэлектрическим цилиндром, как это показано на рис. 2. В работе [2] исследования планарной линзы выполнялись для случая, когда вектор напряженности электрического поля \vec{E} перпендикулярен металлическим пластинам и в этом случае закон изменения $\varepsilon(r)$ определяется формулой (1). Такой вариант хорошо изучен, и в настоящей статье рассматриваться не будет. Мы будем исследовать случай, когда вектор \vec{E} параллелен металлическим пластинам, при этом зависимость диэлектрической проницаемости от радиуса линзы имеет вид:

$$\varepsilon(r, \lambda) = 2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2 \cdot D}\right)^2, \quad (2)$$

где λ — длина волны; D — расстояние между пластинами.

Как видно из формулы (2), при ориентации вектора \vec{E} параллельно металлическим пластинам, относительная диэлектрическая проницаемость зависит от длины волны, т.е., наблюдается явление дисперсии. Все расчёты, представленные в данной работе, выполнялись при длине волны $\lambda = 3$ см.

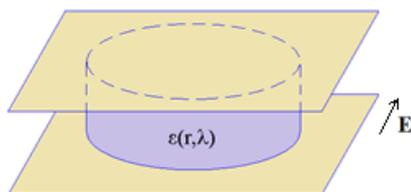


Рис. 2. Конструкция планарной линзы Лунеберга

Практическая реализация непрерывного закона изменения коэффициента преломления от радиуса связана с большими сложностями. Поэтому ниже рассматривается дис-

кретный закон изменения $\varepsilon(r)$. Способом реализации такого закона является изготовление линзы Люнеберга из концентрических слоёв с различной диэлектрической проницаемостью. В работе исследуется планарная линза из пяти слоёв диэлектрика радиусом $a = 50$ мм, непрерывный и дискретный законы изменения $\varepsilon(r)$ показаны на рис. 3. Расчеты для линзы с непрерывным законом изменения $\varepsilon(r)$ выполнялись по формуле (2). Значения радиусов слоёв, а также их диэлектрических проницаемостей ε для слоистой линзы приведены в таблице.

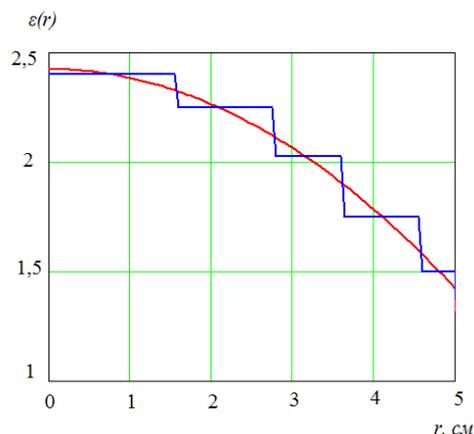


Рис. 3. Зависимость диэлектрической проницаемости от радиуса линзы.

Красная кривая – непрерывный закон изменения $\varepsilon(r)$ в линзе,

синяя кривая – линза из пяти слоёв.

Номер слоя	1	2	3	4	5
Внешний радиус цилиндра, см	1,6	2,8	3,6	4,6	5
ε	2,40	2,25	2,03	1,75	1,50

Для электродинамического моделирования линзы использовалась программа Ansoft HFSS. В данной программе реализован численный метод конечных элементов, который заключается в следующем [3, 4]:

- Пространство разбивается на простейшие элементы, имеющие форму тетраэдров. На заданной частоте производится начальная генерация сетки, в результате чего весь исследуемый объём разбивается на конечные элементы.

- Размер тетраэдров достаточно мал, чтобы поле в его пределах можно было описать простой функцией или набором функций с неизвестными коэффициентами. Эти коэффициенты определяются из уравнений Максвелла и граничных условий. В результате электродинамическая задача сводится к системе линейных алгебраических уравнений относительно этих коэффициентов. Полученная система достаточно просто решается.

Определение фокуса планарной линзы

На основании представленных в таблице данных построим линзу в системе электродинамического моделирования Ansoft HFSS. Результаты построения показаны на рис.

4. Задача расчёта диаграммы направленности антенной системы состоит из двух этапов:

1. Определение фокуса линзы.
2. Расчёт диаграммы направленности линзовой антенны.

Слоистая линза радиусом 50 мм заключается между двумя плоскопараллельными металлическими квадратными пластинами (сторона квадрата – 150 мм). Расстояние между пластинами – 23 мм, их толщина — 1 мм. Для определения фокуса требуется облучить линзу плоской электромагнитной волной, вектор \vec{E} параллелен металлическим пластинам (см. рис. 4). Цифрами на рис. 4 обозначены номера слоёв диэлектрика согласно таблице.

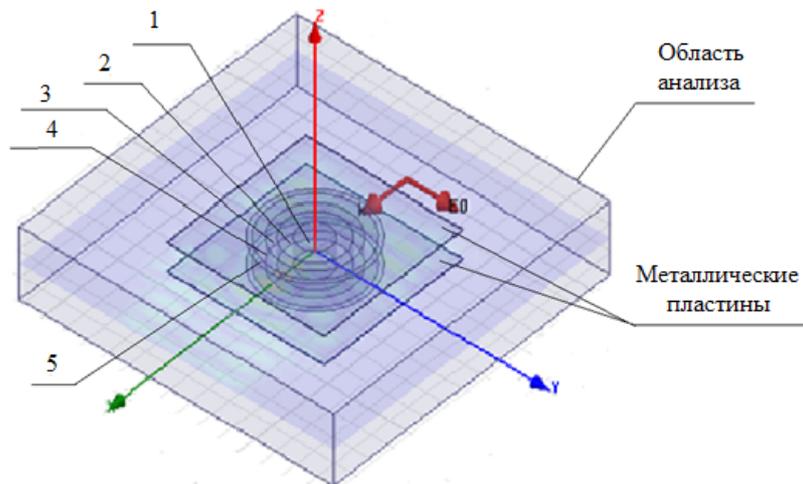


Рис. 4. Конструкция линзы Люнеберга

На рис. 5 показано распределение электромагнитного поля в плоскости XOY при $z = 0$, красный цвет в правой части линзы соответствует максимуму напряженности поля, т.е. положению ее фокуса.

На рис. 6 представлена зависимость напряжённости электрического поля от координаты x при $y = 0$. Согласно рис. 6 получаем, что фокус линзы расположен на расстоянии $x = 3,4$ см от её центра. Видно, что для решаемой задачи фокус оказывается сильно смещённым к центру линзы.

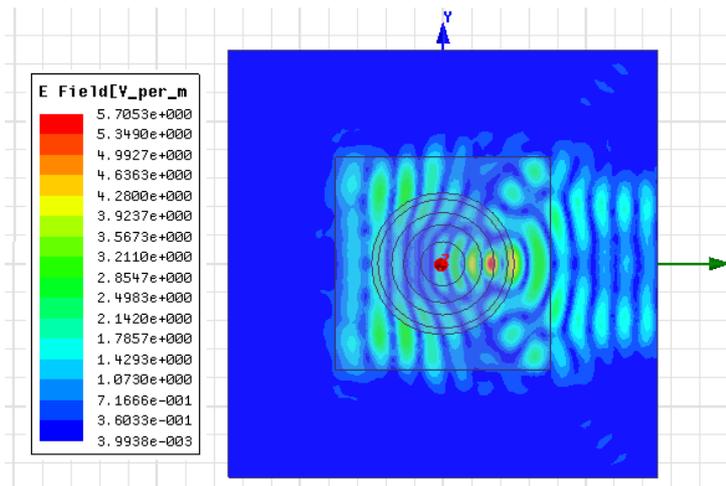


Рис. 5. Распределение электромагнитного поля в плоскости XOY при $z = 0$

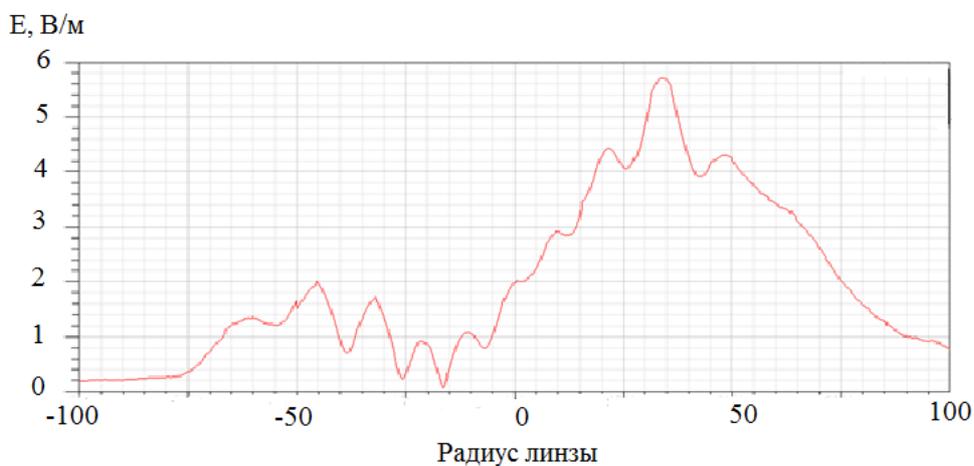


Рис.6. Зависимость напряжённости электрического поля от координаты x

Расчёт диаграммы направленности

Для того, чтобы обеспечить условия оптимального возбуждения линзы, источник в виде открытого конца волновода сечением 23×18 мм следует поместить в ее фокус, как показано на рис. 7. Помимо конструкции линзовой антенны, на рис. 7 представлено распределение ближнего поля в плоскости XOY. Видно, что волновой фронт на выходе линзы является плоским.

С использованием электродинамической модели, представленной на рис. 7, выполним расчёт диаграммы направленности линзовой антенны. На рис. 8 представлена трехмерная диаграмма направленности данной антенны, а на рис. 9 – её сечение плоскостью XOY.

Из представленных на рис. 9 результатов следует, что коэффициент усиления антенны составляет 15 дБ, ширина главного лепестка — $14,7^\circ$, уровень боковых лепестков равен $-20,5$ дБ.

Далее выполним теоретический расчёт коэффициента усиления антенны G и ширины главного лепестка диаграммы направленности антенны $\theta^{0,5P}$ по уровню половинной мощности:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot S}{\lambda^2}, \quad (3)$$

$$\theta^{0,5P} \approx \frac{\lambda}{d}, \quad (4)$$

где S — площадь апертуры антенны, d — диаметр линзы.

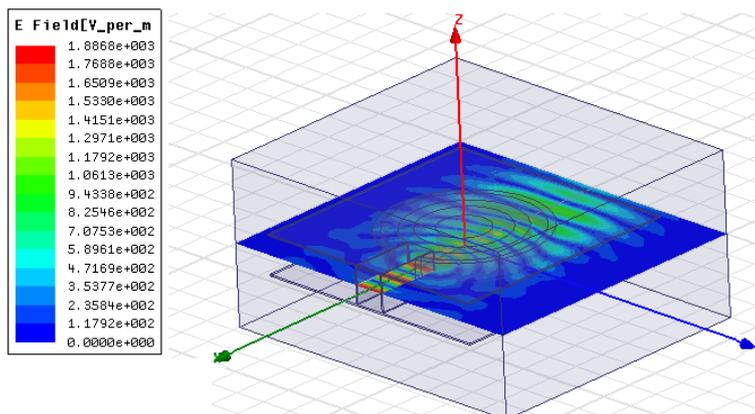


Рис.7. Конструкция антенны на основе планарной линзы Лüneберга

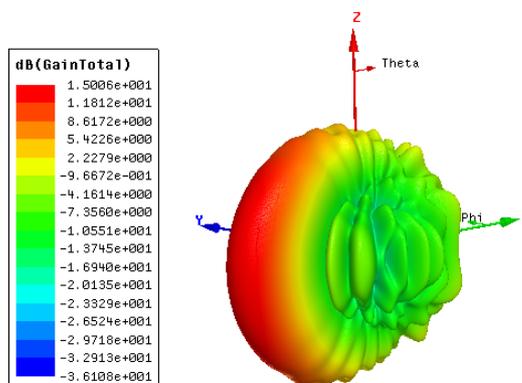


Рис.8. Диаграмма направленности антенны

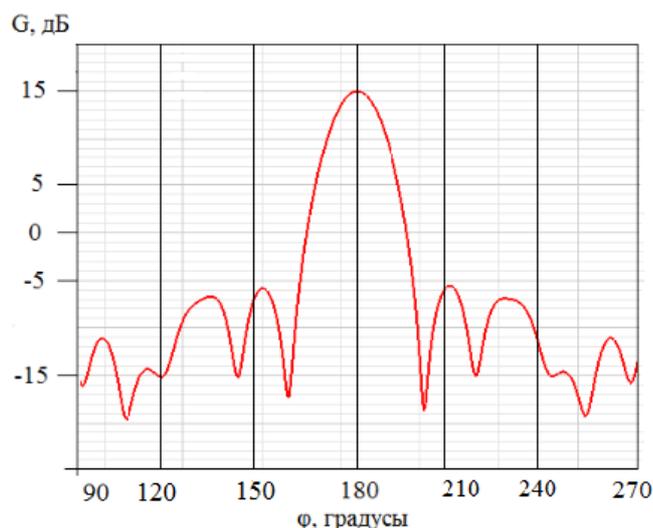


Рис.9. Диаграмма направленности антенны в плоскости XOY

Расчёты по формулам (3) и (4) дают значения $G = 15$ дБ и $\theta^{0.5P} = 17,2^{\circ}$. Меньшая ширина диаграммы направленности планарной линзы, полученная при расчетах в программе Ansoft HFSS, объясняется тем, что в электродинамической модели линза ограничена металлическими пластинами размером 150 мм. Это приводит к увеличению эффективной апертуры антенны и, соответственно, сужению ее диаграммы направленности.

Заключение

Использование программы электродинамического моделирования Ansoft HFSS позволяет выполнить все расчеты, необходимые для анализа планарной линзы Люнеберга. Облучение линзы плоской волной позволяет найти положение ее фокуса, т.е. определить оптимальное положение облучателя линзы. При возбуждении линзы отрезком прямоугольного волновода на выходе линзы наблюдается плоский волновой фронт (см. рис. 7). Использование метода конечных элементов позволяет определить коэффициент усиления, ширину главного лепестка и уровень боковых лепестков рассмотренной линзовой антенны.

Список литературы

1. Воскресенский Д.И. Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / под. ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2006. 376 с.
2. Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А. Исследование широкополосных планарных линз Люнеберга // Журнал Радиоэлектроники. 2014. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/18/text.pdf> (дата обращения 06.03.2015).

3. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчёт антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2009. 256 с.
4. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР. М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2008. 276 с.