

Линза из неоднородного диэлектрика.

Рассмотрена проблема сокращения толщины линзы типа линзы Микаэляна при помощи вспомогательного отражателя. Определена необходимая геометрия отражателя, проведено численное моделирование линзы, дано сравнение характеристик полученной структуры с характеристиками соответствующей полноразмерной линзы Микаэляна.

Ключевые слова: линзовая антенна, неоднородный диэлектрик, линза Микаэляна

Линза Микаэляна является линзой из неоднородного диэлектрика, преобразующей сферический фронт волны в плоский. Для цилиндрической линзы зависимость показателя преломления от радиуса r определяется выражением [1]

$$n(r) = n_0 / \operatorname{ch}(\pi r / 2L), \quad (1)$$

где n_0 — показатель преломления на оси линзы, L — толщина линзы. Если предположить, что на краю линзы $n(r_1) = 1$, что соответствует минимальному реализуемому n , то отношение радиуса линзы к толщине r_1/L однозначно определяется значением n_0 :

$$r_1/L = 2 \operatorname{Arch}(n_0) / \pi. \quad (2)$$

На рисунке 1 приведен график зависимости отношения r_1/L от n_0 . Можно видеть, что для наиболее распространенных материалов, у которых n не превышает 4, толщина линзы сопоставима с её радиусом, что не всегда удобно.

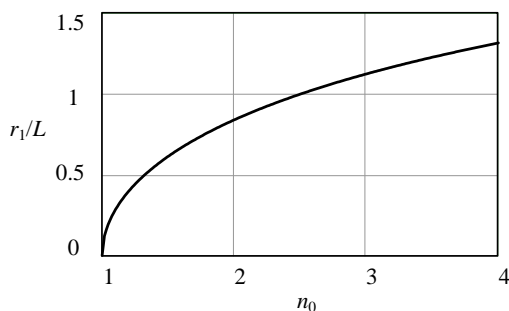


Рисунок 1. — Зависимость отношения радиуса линзы к толщине от показателя преломления на оси линзы.

Так, для $r_1/L = 3$ значение n_0 равно 55. Если же уменьшить толщину линзы втрое, можно обойтись материалом с $n_0 = 2,4$.

Толщину линзы Микаэляна можно уменьшить в три раза, если применить структуру с двумя рефлекторами (рисунок 2). Первичный рефлектор представляет собой сплошной металлический экран, вторичный рефлектор — систему концентрических колец, лежащих в плоскости апертуры. На рисунке 3 проиллюстрирован ход лучей в такой линзе. Внешний радиус кольца вторичного рефлектора определяется точкой, в которую приходит луч 1 после отражения от

первичного рефлектора. Аналогично, внутренний радиус определяется точкой прихода луча 2, входящего в линзу с внешнего края кольца.

Чтобы эффективно использовать оставшееся внутри кольца окно, в нём размещаются меньшие кольца, размеры которых определяются из аналогичных соображений.

Для закона изменения $n(r)$, соответствующего (1), радиусы колец определяются из условия

$$x(r, r_{\text{вх}}) = \int_r^{r_{\text{вх}}} \frac{n_0 \cos(\theta(r_{\text{вх}}))}{\sqrt{n(r)^2 - (n_0 \cos(\theta(r_{\text{вх}})))^2}} dr = 2L/3. \quad (3)$$

Выражение (3) является уравнением луча в декартовых координатах [2], где $r_{\text{вх}}$ — точка вход луча в линзу, L — толщина соответствующей полноразмерной линзы Микаэляна, а $\theta(r_{\text{вх}})$ определяется формулой

$$\theta(r_{\text{вх}}) = \arccos\left(\frac{n(r_{\text{вх}})}{n_0}\right) \quad (4)$$

и имеет смысл угла выхода луча из фокуса (рисунок 3). Для нахождения внешнего радиуса первого кольца в выражение (3) нужно подставить $r_{\text{вх}} = r_1$ и найти r . Нахождение остальных размеров отражающих колец проиллюстрировано на рисунке 4.

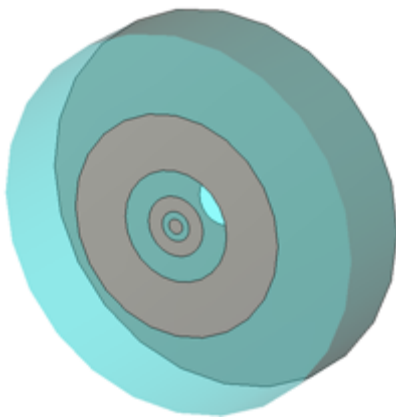


Рисунок 2. Тонкая линза с рефлектором в виде колец

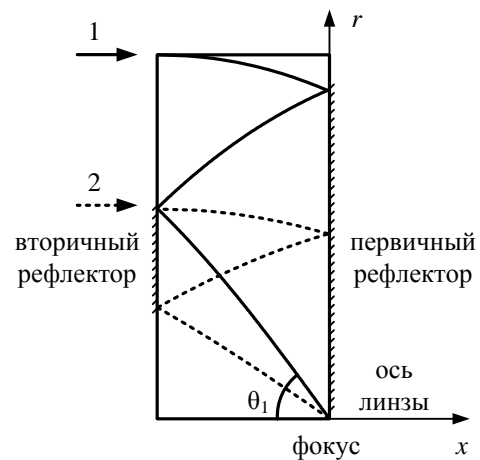


Рисунок 3. Ход лучей в линзе

Численный расчёт проводился для тонкой линзы радиусом 7,4 см и толщиной 3,3 см. Указанные размеры соответствуют материалу с $n_0 = \sqrt{3}$ (полиэтилентерефталат, акриловое стекло). Расчёт произведён в диапазоне частот 20—40 ГГц, что соответствует электрическим размерам раскрыва $4,8\lambda$ и $9,6\lambda$. Общий вид линзы приведен на рисунке 2. Непрерывная неоднородная среда была заменена дискретной в виде концентрических цилиндров. В расчёте моделировалось падение плоской волны на апертуру линзы. В результате моделирования получены распределения амплитуды и

фазы в продольном сечении линзы, а также частотная зависимость напряжённости поля в фокусе. Для сравнения были рассчитаны две полноразмерные линзы Микаэляна равного радиуса толщиной 10 см, причём в одном варианте такой линзы часть апертуры была закрыта рефлектором, аналогичным вторичному рефлектору тонкой линзы

Приёмный режим работы антенны моделируется нормальным падением на линзу плоской волны, напряжённость электрического поля которой равна 1 В/м. Качественная картина распределения поля в продольном сечении линзы приведена на рисунке 5. В области фокуса амплитуда поля значительно увеличивается. На рисунке 6 приведены частотные зависимости амплитуды поля в фокусе для трёх типов линз: тонкой линзы, полноразмерной линзы с апертурой, частично затенённой рефлектором и линзой полной толщины без затенения апертуры.

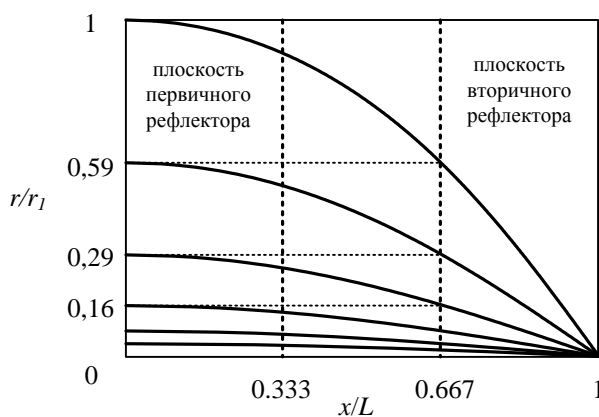


Рисунок 4. Вычисление размеров колец вторичного рефлектора.

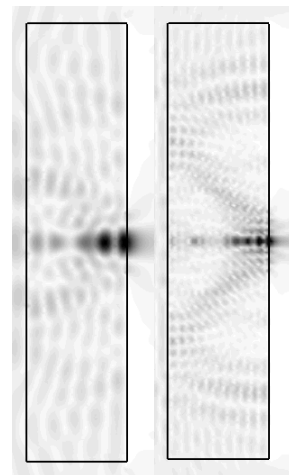


Рисунок 5. Амплитудное распределение в продольном сечении линзы на частотах 20 и 40 ГГц.

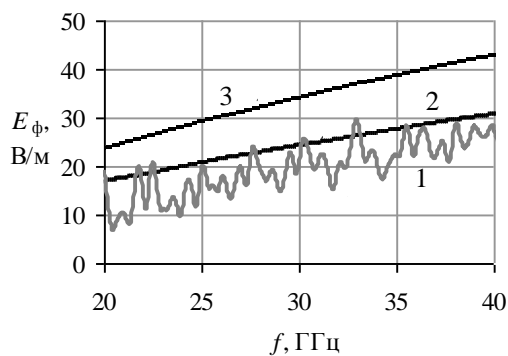


Рисунок 6. Зависимость амплитуды напряжённости поля в фокусе от частоты: 1 — для тонкой линзы, 2 — для полноразмерной линзы с затенением апертуры, 3 — для полноразмерной линзы без затенения.

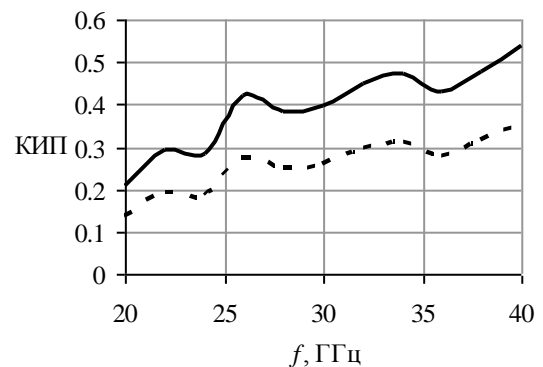


Рисунок 7. Зависимость КИП от частоты, рассчитанная по синфазному круглому раскрытию без затенения (пунктирная линия) и раскрытию, затенённому рефлектором (сплошная линия)

Помимо падения плоской волны был произведён расчёт антенной системы с облучателем. В качестве облучателя используется открытый конец круглого волновода, заполненного диэлектриком с $\epsilon = 3$, критическая частота которого 20 ГГц. Зависимости коэффициента отражения и коэффициента использования поверхности (КИП) приведены на рисунках 7 и 8.

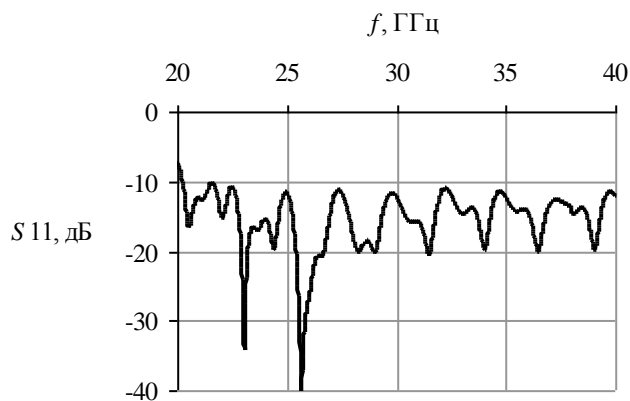


Рисунок 8. Коэффициент отражения для волноводного облучателя

Как можно видеть из приведённых графиков, тонкая линза обеспечивает КИП порядка 0,3 при приемлемом уровне согласования облучателя (S_{11} не превышает -10 дБ). В пределах диапазона частот КИП увеличивается, что связано с ослаблением дифракционных эффектов, не учитывавшихся в расчёте, с повышением частоты. При более высоких частотах можно ожидать дальнейшего улучшения КИП.

Заключение

В данной работе был предложен метод уменьшения толщины осесимметричной неоднородной линзы Микаэляна. Уменьшение толщины достигается использованием двух плоских рефлекторов. Первичный рефлектор представляет собой сплошной экран, вторичный рефлектор представлен набором концентрических колец, размеры которых рассчитаны в соответствии с траекторией луча в неоднородной среде. Показано, что такая линза в целом работает аналогично полноразмерной линзе Микаэляна, однако, имеет более низкий КИП за счёт частичного затенения раскрыва и значительной дифракции волны на вторичном рефлекторе; последний эффект ослабевает с ростом частоты.

Библиографический список

1. Е. Г. Зелкин, Р. А. Петрова Линзовые антенны. М. Сов. радио, 1974г, 277 с.
2. Ю. А. Кравцов, Ю. И. Орлов. Геометрическая оптика неоднородных сред. М. : Наука, 1980 г.