

09

Параметры слоев для многослойной линзы Люнеберга

© С.В. Кузьмин

С.-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: kuzminsv@pochtamt.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2004 г.

Рассмотрено влияние параметров слоев многослойной линзы Люнеберга на ее характеристики. Данные получены в результате численных экспериментов на основе математической модели многослойной линзы Люнеберга. Математическая модель построена на основании строгого электродинамического решения задачи о дифракции на многослойном шаре.

Изготовить классическую линзу Люнеберга с непрерывно изменяющимся вдоль радиуса показателем преломления довольно сложно, поэтому, как правило, переходят от непрерывного изменения показателя преломления к ступенчатому [2–6].

Все данные в настоящей работе получены на основе численного эксперимента с математической моделью многослойной линзы, построению которой посвящено достаточно много работ [3–8].

Параметры слоев, очевидно, сказываются на характеристиках антенны. В работе рассмотрено влияние:

1. Отличия диэлектрической проницаемости слоев от расчетных значений.
2. Количества слоев. При этом установлено, что достаточно небольшого числа слоев, чтобы характеристики многослойной линзы практически не отличались от характеристик непрерывной линзы [2,3].
3. Способа разбиения на слои.
4. Потерь в диэлектрике, из которого делается антенна. Рассмотрение основано на работе [3], где представлена зависимость коэффициента усиления от диаметра антенны при различных значениях $\tan \delta$, которая имеет максимум, поскольку коэффициент усиления пропорционален $\exp\{-\tan \delta \cdot D\}$, где D — диаметр антенны, т. е. в этой работе показано, что потери компенсируют рост коэффициента направленного действия.

Рассмотрим конкретную антенну: $D/\lambda = 10$, расстояние от центра линзы до облучателя $b = 1.1D/2$, диаграмма направленности облучателя $\exp\{-3.12 \cdot 10^{-4} \vartheta^2\}$ (уровень поля облучателя на краю линзы ($\vartheta = 65^\circ$) равен 0.26, что соответствует максимальному коэффициенту усиления антенны [3]), диэлектрическая проницаемость исходного материала $\varepsilon' = 2.55$, тангенс угла диэлектрических потерь исходного материала $\tan \delta = 10^{-3}$.

В классической линзе Люнеберга показатель преломления меняется непрерывно вдоль радиуса и на краю равен 1. Но из-за того, что в реальной линзе коэффициент преломления на краю имеет значение, большее 1, рассматривают линзу Люнеберга с однородным внешним слоем. Она состоит из шара радиусом a , в котором показатель преломления меняется непрерывно, и однородного внешнего слоя [1] ($\frac{a}{D/2} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_1}}$). Пусть в нашем случае на краю $\varepsilon_1 = 1.1$. Далее, непрерывную часть разбивают на слои. Рассмотрим три способа разбиения:

1. Зависимость показателя преломления от радиуса делится на равные части по n ($n = \sqrt{\varepsilon}$). Находятся соответствующие радиусы слоев $r_1, r_2, \dots, r_{nl-1} = a$, где nl — число слоев. Каждый слой разбивается по радиусу на две равные части. Показатель преломления берется равным среднему в каждом слое $n_i = n \cdot (r_{i-1} + 0.5 \cdot (r_i - r_{i-1}))$. Получается равномерное разбиение по показателю преломления (по n).

2. Зависимость диэлектрической проницаемости от радиуса делится на равные части по ε . Находятся соответствующие радиусы слоев $r_1, r_2, \dots, r_{nl-1} = a$. Каждый слой разбивается по радиусу на две равные части. Диэлектрическая проницаемость берется равной средней в каждом слое $\varepsilon_i = \varepsilon \cdot (r_{i-1} + 0.5 \cdot (r_i - r_{i-1}))$. Получается равномерное разбиение по диэлектрической проницаемости (по ε).

3. Линза разбивается на слои одинаковой толщины: $r_1, r_2, \dots, \dots, r_{nl-1} = a$, $r_1 = r_2 - r_1 = r_3 - r_2 \dots$. Диэлектрическая проницаемость берется равной средней в каждом слое $\varepsilon_i = \varepsilon \cdot (r_{i-1} + 0.5 \cdot (r_i - r_{i-1}))$. Получается равномерное разбиение по радиусу (по r).

Так как потери зависят от диэлектрической проницаемости материала, то введем эффективную диэлектрическую проницаемость и эффективный тангенс угла диэлектрических потерь [3]:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon'_{eff}(1 - i \tan \delta_{eff}),$$

где

$$\tan \delta_{eff} = \frac{n'}{\sqrt{\epsilon'_{eff}}} \frac{\sqrt{\epsilon'_{eff}} - 1}{n' - 1} \cdot \tan \delta,$$

$n' = \sqrt{\epsilon'}$, ϵ'_{eff} — значение диэлектрической проницаемости в слое. В отличие от работ [5] и [6], здесь учтены свойства реального диэлектрика (пенополистерол), из которого, как правило, изготавливают линзы. Чем меньше диэлектрическая проницаемость, тем больше воздуха содержится в этом материале и, следовательно, тем меньше потери.

Для линзы с данным диаметром вполне достаточно взять 5–7 слоев [2,3]. В таблице приводятся результаты численных экспериментов при разных способах разбиения на слои и при различном числе слоев ($b/(D/2)$ — в относительных единицах, G — коэффициент усиления (с учетом потерь в диэлектрике), КИП — коэффициент использования поверхности в относительных единицах, УБЛ — уровень первого бокового лепестка (верхняя строка в E -плоскости, нижняя в H -плоскости)). В ходе эксперимента проводилась фокусировка антенны. Критерием служил уровень первого бокового лепестка (он минимизировался).

N	Равномерное разбиение по n				Равномерное разбиение по ϵ				Равномерное разбиение по r			
	$\frac{b}{D/2}$	G, дБ	КИП	УБЛ, дБ	$\frac{b}{D/2}$	G, дБ	КИП	УБЛ, дБ	$\frac{b}{D/2}$	G, дБ	КИП	УБЛ, дБ
5	1.14	29.36	0.87	-21.2	1.13	29.38	0.88	-21.2	1.1	28.63	0.74	-21.8
				-21.9				-21.9				-22.1
6	1.12	29.41	0.88	-21.2	1.11	29.40	0.88	-21.2	1.1	29.00	0.81	-21.7
				-21.7				-21.6				-22.3
7	1.11	29.44	0.89	-21.2	1.11	29.43	0.89	-21.1	1.1	29.23	0.85	-21.5
				-21.4				-21.6				-22.1
8	1.11	29.33	0.87	-20.9	1.1	29.45	0.89	-21.2	1.1	29.38	0.88	-21.4
				-21.0				-21.4				-21.7
20	1.1	29.47	0.90	-21.4	1.1	29.47	0.90	-21.4	1.1	29.47	0.90	-21.4
				-21.4				-21.4				-21.4

Для каждого случая были построены диаграммы направленности в E - и H -плоскости.

Рассмотрим случаи с разным N .

При $N = 20$ диаграммы направленности не зависят от способа разбиения и практически совпадают. Примем такую диаграмму за эталонную. Для анализа диаграмм направленности, полученных для других случаев, будем рассматривать три области: А — излучение вперед ($0^\circ - 65^\circ$), Б — боковое излучение ($65 - 115^\circ$), В — излучение назад ($115 - 180^\circ$).

$N = 8$. В случае разбиения по n диаграмма направленности получается искаженной, особенно в областях Б и В. Разбиение по r дает хороший результат в областях А и В, но в области Б уровень боковых лепестков диаграммы направленности на 10 дВ выше, чем у эталонной. Наилучший результат достигается при разбиении по ε . Диаграмма направленности незначительно отличается от эталонной лишь в нескольких местах.

$N = 7$. При разбиении по n существенные отличия от эталона возникают только в области В. Для разбиения по r и по ε ситуация практически не меняется.

$N = 6$ и $N = 5$. Возникают значительные искажения в области А для всех вариантов разбиения. Но при разбиении по ε искажения меньше.

Во всех случаях из-за отличия коэффициентов отражения на границах слоев для разных поляризаций поля диаграммы направленности в H -плоскости искажаются сильнее.

Исходя из результатов, приведенных в таблице, и сказанного выше в качестве объекта дальнейшего исследования выберем линзу, состоящую из 7 слоев с равномерным разбиением по ε . На рис. 1 и 2 (сверху) сравнивается диаграмма направленности (ДН) такой линзы с эталонной.

При производстве материала, из которого изготавливается линза, неизбежны ошибки величины реализуемой диэлектрической проницаемости. Поэтому необходимо провести статистическое исследование влияния этих ошибок на диаграмму направленности. В качестве примера рассмотрим случай, когда ошибка распределена равномерно, а диэлектрическая проницаемость в слое ε'_i задается следующим образом: $\varepsilon_i + \Delta_i > \varepsilon'_i > \varepsilon_i - \Delta_i$, где ε_i — исходная диэлектрическая проницаемость, $\Delta_i = 0.02 \cdot \varepsilon_i$. Для численного эксперимента было взято 20 различных реализаций закона изменения диэлектрической проницаемости

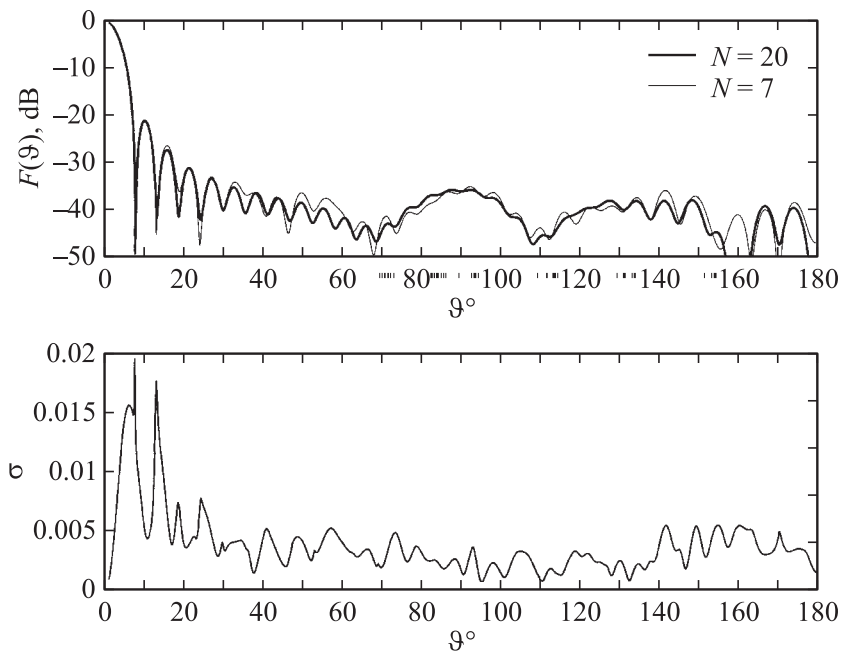


Рис. 1. ДН линзы (сверху) и оценки среднего квадратического отклонения значений ДН антенн (по полю) с ошибками от ДН антенны без ошибок (снизу) в E -плоскости.

от радиуса и получены соответствующие диаграммы направленности. В ходе эксперимента, так же как и раньше, проводилась фокусировка антенны. Было определено, что оптимальное расстояние от центра линзы до облучателя (фокусное расстояние) меняется в небольших пределах $b = 1.11 \pm 0.02D/2$. Средний коэффициент усиления $G = 29.35 \text{ dB}$ ($862.04 \pm 0.55 \text{ a.u.}$), средний коэффициент использования поверхности $\nu = 0.87 \pm 0.03 \text{ a.u.}$. Средняя диаграмма направленности практически не отличается от диаграммы направленности линзы без ошибок.

На рис. 1 и 2 кроме собственно диаграмм направленности показана зависимость от угла оценки среднего квадратического отклонения

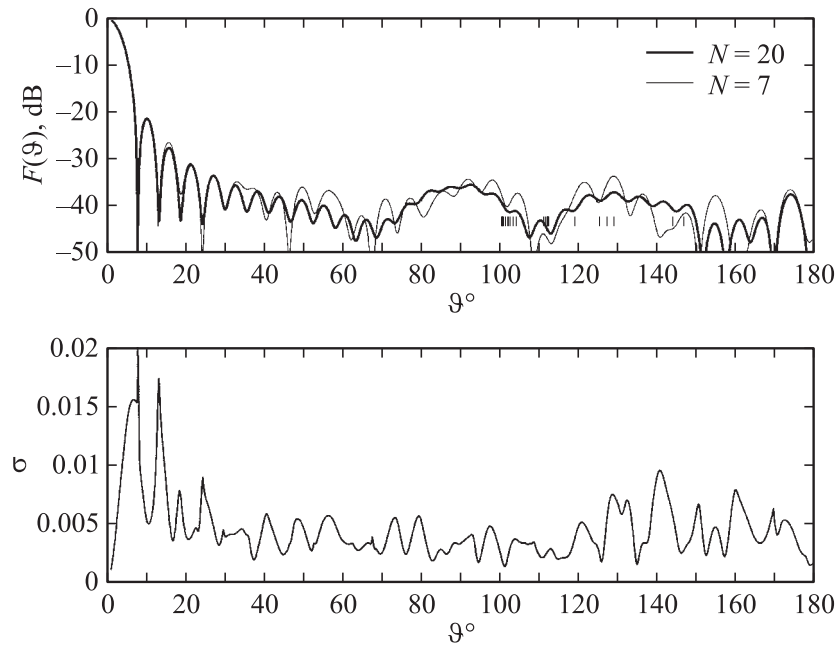


Рис. 2. ДН линзы (сверху) и оценки среднего квадратического отклонения значений ДН антенн (по полю) с ошибками от ДН антенны без ошибок (снизу) в H -плоскости.

значений диаграмм направленности с ошибками от диаграммы направленности антенны без ошибок [9, формула (14.2.14)].

При проектировании линзы другого диаметра или из материала с другими параметрами необходимо проводить рассмотренные выше исследования. Нахождение оптимальных параметров позволяет значительно снизить стоимость антенны. Исходя из требований к характеристикам антенны, можно уменьшить число слоев и применить материал с более значительным уровнем потерь и менее жесткими требованиями к точности в диэлектрической проницаемости.

Автор приносит глубокую благодарность профессору Д.В. Шанникову за помощь в работе над статьей и за ряд ценных советов.

Список литературы

- [1] *Samuel P. Morgan* // Journal of Applied Physics. September 1958. V. 29. N 9.
- [2] *Hal Schrank, John R. Sanford* // IEEE Antennas and Propagation Magazine. February 1995. V. 37. N 1.
- [3] *Shannikov D.V., Kuzmin S.V.* // 1st IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications. 26–28 June 2002.
- [4] *Сазонов Д.М., Фролов Н.Я.* // ЖТФ. 1965. Т. 35. В. 6.
- [5] *John R. Sanford* // IEEE Transactions On Antennas And Propagation. May 1994. V. 42. N 5.
- [6] *Веденский А.Б., Захаров Е.Б., Скородумов А.И., Харланов Ю.Я.* // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. В. 4.
- [7] *Марков Г.Т., Чаплин А.Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. М.–Л.: Энергия, 1967.
- [8] *Шанников Д.В., Кузьмин С.В.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 22.
- [9] *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. Учеб. для вузов. 5-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1998.