



УДК 621.396.67

Б. А. Панченко, Д. В. Денисов, В. В. Мохова  
Уральский технический институт связи информатики  
(филиал Сибирского государственного университета  
телекоммуникаций и информатики)

Р. И. Панов  
Уральский федеральный университет

## Влияние уровня стратификации линзы Люнеберга на ее антенные характеристики

*Рассчитываются антенные характеристики линзы Люнеберга для различных типов стратификации тела линзы. В качестве модели взята многослойная структура из концентрированных слоев диэлектрика с различными значениями диэлектрической проницаемости. Получены численные результаты для диаграмм направленности и коэффициента направленного действия в зависимости от числа слоев модели линзовой антенны.*

### Линза Люнеберга, многослойная аппроксимация, диаграмма направленности, коэффициент направленного действия

Фокусирующие свойства неоднородной сферической линзы впервые описаны Р. К. Люнебергом в [1]. Показано, что если коэффициент рефракции сферического тела изменяется по закону

$$d(r) = \sqrt{\epsilon'(r)} = \sqrt{2 - \tilde{r}^2}, \quad (1)$$

( $r$  – текущая радиальная координата;  $\epsilon'$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы;  $\tilde{r} = r/a$ , причем  $a$  – радиус сферы линзы), то это тело имеет две фокальные точки:  $F_1$  находится на поверхности линзы (место расположения первичного источника облучения),  $F_2$  – на теневой стороне линзы в точке  $r \rightarrow \infty$  (дальняя зона антенны). Основной технической трудностью при создании линзовых антенн является реализация требуемого распределения коэффициента рефракции в соответствии с формулой (1). На практике для этого используется многослойная реализация. Уровень и степень стратификации (послойной аппроксимации) тела линзы являются предметом исследований. Возможны равношаговая [2] и оптимизированная [3] аппроксимации. С ростом числа слоев возрастают технические трудности реализации и стоимость линзы, следовательно, актуальны исследования уровня

стратификации тела линзы и ее антенных характеристик. В настоящей статье рассмотрено облучение линзы электромагнитным полем линейной и круговой поляризации.

**Расчет стратифицированной модели линзы Люнеберга.** Идеальная линза Люнеберга (ЛЛ) должна иметь распределение относительной диэлектрической проницаемости, соответствующее закону (1). На практике непрерывный закон распределения диэлектрической проницаемости заменяют послойно-постоянной аппроксимацией (рис. 1). В настоящей статье исследовано влияние количества слоев стратификации материала линзы  $N$  на ее антенные характеристики.

Тип аппроксимации профиля линзы – равношаговый. При аппроксимации профиля линзы с внешней стороны диэлектрической сферы добавлялся виртуальный воздушный слой ( $r/a = 1$ ,  $\epsilon' = 1$ ), что соответствует закону (1) и позволяет регулировать положение облучателя относительно тела линзы.

При решении задачи использовался аппарат тензорных функций Грина. Рассмотрено облучение ЛЛ источником однонаправленного облучения (апертурным излучателем). При линейной поляризации падающей волны вектор напряжен-

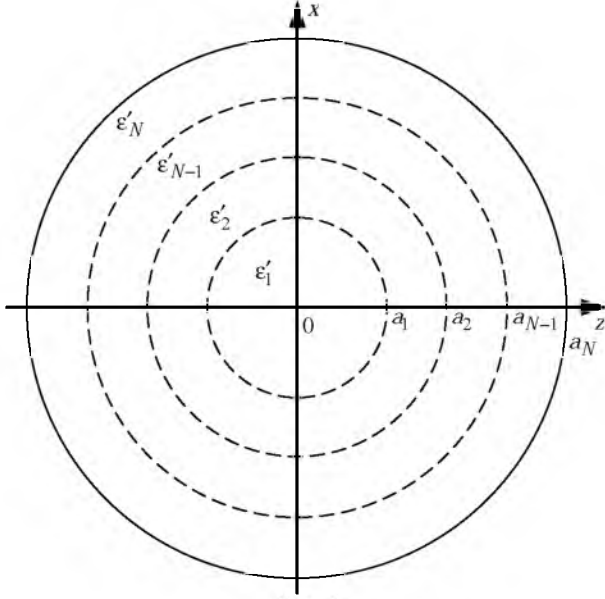


Рис. 1

ности электрического поля в дальней зоне вычисляется по формуле [4]:

$$\mathbf{E}(\theta) = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} e^{i(\pi/2)n} (\mathbf{S}'_1 M_n - \mathbf{S}'_2 N_n),$$

где  $E_0 = j \frac{I_e k_0 l Z_0}{4\pi} \frac{e^{-ik_0 r}}{k_0 r}$ ;

$$\mathbf{S}'_1 = \mathbf{a}_\theta \cos(\varphi) \tau_n(\theta) - \mathbf{a}_\varphi \sin(\varphi) \pi_n(\theta);$$

$$M_n = \frac{i\tilde{Z}_n(a) - i}{i\tilde{Z}_n(a) h_n(k_0 a)};$$

$$\mathbf{S}'_2 = \mathbf{a}_\theta \cos(\varphi) \pi_n(\theta) - \mathbf{a}_\varphi \sin(\varphi) \tau_n(\theta);$$

$$N_n = \frac{i\tilde{Y}_n(a) - i}{i\tilde{Y}_n(a) h_n(k_0 a)},$$

причем  $I_e$  – сила тока;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – волновое число ( $\lambda$  – длина волны излучения);  $l$  – ширина и высота рупора;  $Z_0$  – волновое сопротивление свободного пространства;  $\mathbf{a}_\theta$ ,  $\mathbf{a}_\varphi$  – единичные векторы сферической системы координат;

$$\tau_n(\theta) = \partial P_n^1(\cos \theta) / \partial \theta;$$

$$\pi_n(\theta) = P_n^1(\cos \theta) / \sin \theta$$

( $P_n^1(\cdot)$  – функции Лежандра);

$\tilde{Z}_n(\cdot)$ ,  $\tilde{Y}_n(\cdot)$  – ориентированные направленные сопротивления и проводимости, определяемые последовательным пересчетом от внешней границы ЛЛ к центру через частичные области –

слои по методике [4];  $h_n(\cdot)$  – сферические функции Бесселя–Рикатти [5].

Для круговой поляризации падающего поля вектор напряженности рассчитывается по формуле

$$\mathbf{E}(\theta) = E_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} e^{i(\pi/2)n} e^{i\varphi} (\mathbf{S}'_1 M_n - \mathbf{S}'_2 N_n),$$

где

$$\mathbf{S}'_1 = \mathbf{a}_\theta \tau_n(\theta) + i\mathbf{a}_\varphi \pi_n(\theta);$$

$$\mathbf{S}'_2 = \mathbf{a}_\theta \pi_n(\theta) + i\mathbf{a}_\varphi \tau_n(\theta).$$

Наряду с полем основной поляризации (ОП) существенным является появление кроссполяризационной (КП) составляющей поля излучения. Паразитная составляющая определяется наличием слоистого диэлектрика и кривизной поверхности линзы. Компоненты электрического поля ОП и КП составляющей вычисляются из общего выражения для напряженности электрического поля. В случае линейной поляризации они определяются следующим образом:

$$E_{\text{ОП}} = \mathbf{E} \mathbf{a}_{\text{ОП}}; \quad E_{\text{КП}} = \mathbf{E} \mathbf{a}_{\text{КП}};$$

где

$$\mathbf{a}_{\text{ОП}} = -\left[1 - (\sin \theta \cos \varphi)^2\right]^{-1/2} \times \\ \times (\mathbf{a}_\theta \cos \theta \cos \varphi - \mathbf{a}_\varphi \sin \varphi);$$

$$\mathbf{a}_{\text{КП}} = -\left[1 - (\sin \theta \cos \varphi)^2\right]^{-1/2} \times \\ \times (\mathbf{a}_\theta \sin \varphi + \mathbf{a}_\varphi \cos \theta \cos \varphi).$$

Для случая круговой поляризации ОП и КП определяется с помощью формул:

$$E_{\text{ОП}} = (1/\sqrt{2}) \mathbf{E} (\mathbf{a}_\theta + j\mathbf{a}_\varphi);$$

$$E_{\text{КП}} = (2/\sqrt{2}) \mathbf{E} (\mathbf{a}_\theta - j\mathbf{a}_\varphi).$$

Далее в статье для круговой поляризации за ОП принято поле правого вращения, за КП – поле противоположного направления вращения.

Коэффициент направленного действия (КНД) для направления максимального излучения ( $\theta = \pi$ ) рассчитывается по формуле

$$D(\pi) = \frac{\left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (M_n + N_n) \right|^2}{T \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|M_n|^2 + |N_n|^2)},$$

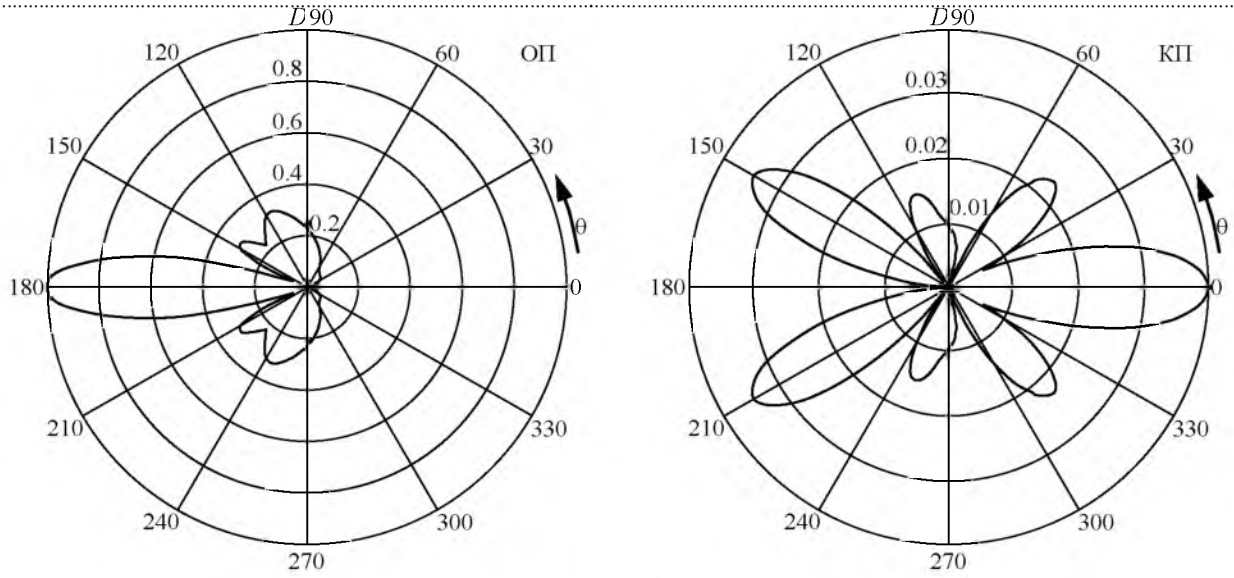


Рис. 2

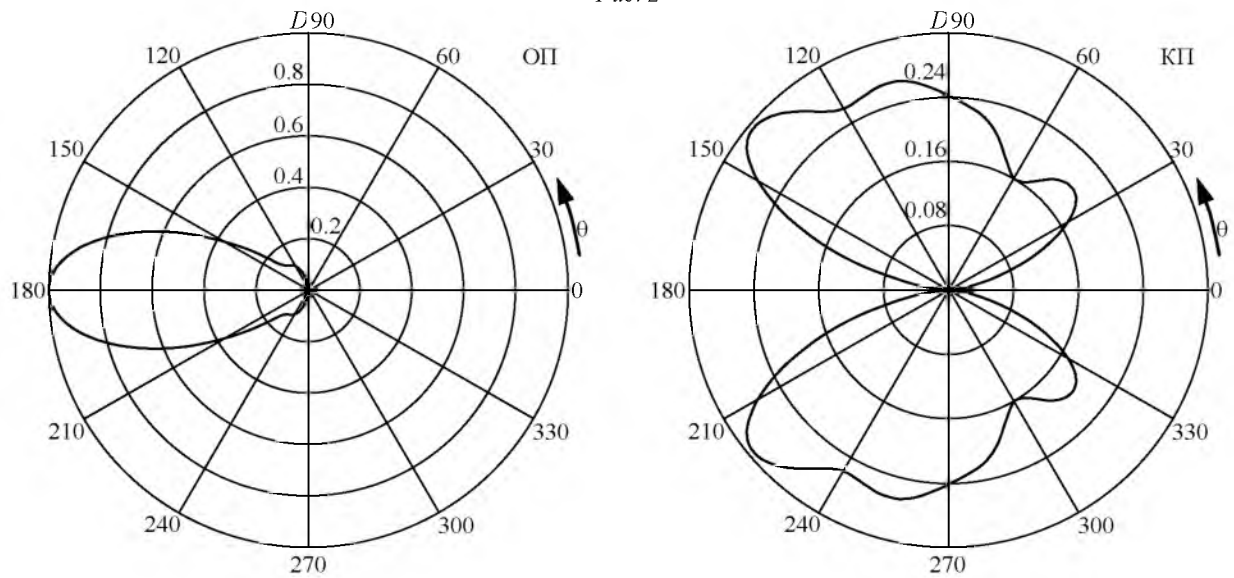


Рис. 3

Поляризация облучателя	$k_0 a$	$N$	$2\Delta\theta^{\circ}_{-3}$	$2\Delta\theta^{\circ}_{-10}$	$\xi_1$	$E_{КП,max}$	$D$
			дБ				
Линейная	$2\pi$	1	30.8	91.8	-8.24	-21.25	9.88
		3	20.4	32.6	-9.76	-17.38	12.88
		6	20.0	32.6	-9.92	-16.60	13.79
		8	19.8	32.4	-9.95	-15.86	14.03
		20	19.7	32.3	-10.00	-15.38	14.43
	$6\pi$	1	11.0	83.2	-1.70	-17.28	11.97
		3	7.4	11.8	-8.78	-19.30	22.8
		6	6.8	11.0	-8.22	-16.60	22.95
		8	6.8	11.0	-8.24	-15.82	23.36
		20	6.7	10.9	-8.26	-14.53	23.99
Круговая	$2\pi$	1	20.0	36.0	-5.30	-15.76	6.87
		3	19.4	32.4	-10.40	-29.14	9.87
		6	19.4	31.8	-10.50	-28.46	10.78
		8	18.8	31.8	-10.57	-27.91	11.02
		20	18.7	31.4	-10.60	-27.00	11.42
	$6\pi$	1	9.4	12.0	-7.72	-15.53	11.35
		3	7.0	11.8	-9.20	-24.90	19.79
		6	6.8	11.0	-8.56	-34.00	20.44
		8	6.8	11.0	-8.60	-35.50	20.35
		20	6.6	10.8	-8.60	-33.90	20.98

причем в случае облучения линзы Лунеберга источником с линейной поляризацией падающего поля  $T=2$ , при облучении источником с круговой поляризацией  $T=4$ .

**Антенные характеристики. Численные результаты.** Проведен расчет для многослойной модели ЛЛ с радиусами, соответствующими  $k_0 a = 6\pi$  ( $a/\lambda = 3$ ) и  $2\pi$  ( $a/\lambda = 1$ ). В качестве облучателя рассматривались источники однонаправленного излучения линейной и круговой поляризации. На рис. 2 приведены диаграммы направленности шестислойной модели ЛЛ с  $k_0 a = 6\pi$  при облучении источником круговой поляризации, а на рис. 3 – аналогичные диаграммы при облучении источником линейной поляризации в плоскости  $\varphi = \pi/4$ . Значения КНД на диаграммах нормированы на максимум лепестка ОП.

В таблице представлены основные антенные характеристики многослойной линзовой антенны для различного количества слоев  $N$ , где  $2\Delta\theta_{-10}$ ,

$2\Delta\theta_{-3}$  – ширина диаграммы направленности по уровням  $-10$  и  $-3$  дБ соответственно;  $\xi_1$  – уровень первого бокового лепестка;  $\xi(0)$  – уровень излучения в направлении  $\theta = 0$  (в направлении облучателя);  $E_{\text{КП}_{\text{max}}}$  – максимальный уровень КП-составляющей поля относительно максимума излучения по ОП. Для сравнения приведены также характеристики для однослойной линзы ( $N=1$ ) с диэлектрической проницаемостью материала  $\epsilon' = 1.5$ .

В результате расчетов ЛЛ показано, что достаточная точность моделирования ЛЛ достигается при небольшом количестве слоев. При увеличении числа слоев более 3 (в статье до 8) получены достаточно близкие значения КНД и вторичных характеристик диаграммы направленности: ширины главного лепестка и уровня боковых лепестков. Дальнейшее увеличение числа слоев не дает существенного увеличения КНД, однако усложняет конструкцию линзы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luniburg R. K. *Mathematical theory of optics* // Providence: Brown univ. press. 1944. 448 p.
2. Панченко Б. А., Комарова Е. В. *Дифракционные и антенные характеристики многослойной линзы Лунеберга*. Saarbrucken: LAP. 2012. 100 с.
3. *Design optimization of multishell Luneburg Lenses* / B. Fuchs, L. Le Coq, O. Lafond, S. Rondineau // IEEE Trans. anten. and propag. 2007. Vol. AP-55, № 2. P. 283–289.
4. Панченко Б. А. *Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами*. М.: Радиотехника, 2013. 264 с.
5. Абрамовиц М., Стиган И. *Справочник по специальным функциям*. М.: Наука, 1979. 832 с.

B. A. Panchenko, D. V. Denisov, V. V. Mokhova  
*Urals technical institute of communications, information technologies  
(branch of the Siberian state university of telecommunications and information sciences)*

R. I. Panov  
*Urals federal university*

### **Influence of the Luneberg lens stratification level on its antenna characteristics**

*Calculated are characteristics of the Luneberg lens antenna for different types of the stratification lens body. A multilayer structure of the concentrated dielectric layers with different permeability has been considered as a model. The measurement data for the radiation patterns and directivity factor dependent on the number of layers of the lens antenna model have been obtained.*

Luneberg lens, multilayer approximation, directivity pattern, coefficient of antenna directivity

Статья поступила в редакцию 21 января 2014 г.