

рис.3. Диаграммы направленности, реализующие равносигнальный метод пеленгации

Список публикаций:

[1] Kireyev, E.S., Mitelman, Yu.E. Radiation pattern null elimination of the radiosonde antenna. (2013) CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, art. no. 6652975, pp. 606-607.

[2] Kireyev, E.S., Mitelman, Yu.E. Optimization of radiosonde antenna radiation pattern. (2013) CriMiCo 2013 - 2013 23rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings, art. no. 6652974, pp. 604-605.

## Моделирование линзы Люнеберга различными численными методами электродинамики

**Коротков Алексей Николаевич**

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

Мительман Юрий Евгеньевич к.т.н.

[an.korotkov@urfu.ru](mailto:an.korotkov@urfu.ru)

Важным направлением антенной техники сегодня является разработка многолучевых и сканирующих антенных систем для радиолокационных и телекоммуникационных комплексов. Построить такие антенные системы можно на основе антенной решетки или антенны оптического типа – линзовой или зеркальной. Эффект концентрации поля наблюдается при определенном законе изменения диэлектрической проницаемости линзы в радиальном направлении. В большинстве случаев неоднородную структуру линзы реализуют в виде слоистой со ступенчатым законом изменения коэффициента рефракции. При проектировании линзовых антенн актуальной становится задача рационального выбора числа слоев, их толщины и диэлектрической проницаемости с точки зрения получения необходимых полевых характеристик и минимизации стоимости. Расчет диаграмм направленности, коэффициента усиления, поляризационных характеристик, как правило, проводят в специальных программах электродинамического моделирования. При этом современные программные комплексы предоставляют широкий спектр методов для анализа антенных систем. В данной работе проводится сравнение результатов анализа линзовой антенны посредством различных численных методов, заложенных в программный пакет Ansys EM.

Эффект концентрации излучения с помощью радиально-неоднородной диэлектрической линзы впервые описал математик Рудольф Карл Люнеберг [1]. Этот эффект имеет место для излучателя, расположенного на противоположной стороне линзы, коэффициент рефракции которой изменяется от  $\sqrt{2}$  в центре до единицы на краю по закону

$$n(r) = \sqrt{\epsilon'(r)} = \sqrt{2 - (r/a)^2}, \quad (1)$$

где  $\epsilon'$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы,  $r$  – радиальная координата в сферической или цилиндрической системе координат,  $a$  – внешний радиус линзы.

Обычно линзы изготавливают как многослойные конструкции со ступенчатым изменением коэффициента рефракции с законом, близким к (1). Анализируемая структура показана на рис.1. Количество слоев и их электродинамические параметры приведены в таблице ниже.

В качестве облучателя используется полуволновый диполь, находящийся на расстоянии 118 мм от ее поверхности. Расчет проводится на частоте 4 ГГц. В качестве критерия оценки точности анализа модели был выбран коэффициент направленного действия линзовой антенны, т.к. чем точнее будет модель криволинейной линзы, тем большим будет значение КНД, в пределе приближаясь к истинному значению. Всего было рассмотрено пять различных способов моделирования сферической линзы Люнеберга. Результаты их сравнения занесены в таблицу.

Параметры	Номер слоя						
	1	2	3	4	5	6	7
Радиус слоя, мм	75	101	164	194	227	260	325
Относительная диэлектрическая проницаемость слоя, $\epsilon$	1,76	1,70	1,66	1,60	1,53	1,46	1,39
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

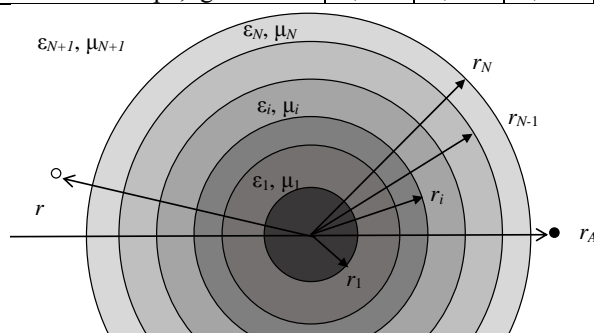


рис. 1. Сечение сферической линзы Люнеберга

1. Анализ сферической линзы методом конечных элементов. При таком способе необходимо искусственно ограничивать область пространства, которая разбивается на конечные элементы, устанавливая на границе этой области граничные условия излучения. Была задана область анализа, имеющая форму цилиндра, поверхность которого отстоит от сферы и облучателя на половину длины волны.

2. Анализ методом моментов. Расчет модели данным способом задействует меньшее количество оперативной памяти и требуют меньше времени, но менее точен с точки зрения формы диаграммы направленности и величины коэффициента направленного действия.

3. Использование гибридных граничных условий FE-BI. При этом расчет проводится методом конечных элементов внутри областей, конформных к анализируемым объектам, а взаимодействие этих областей рассчитывается методом моментов. Данный метод позволяет значительно сократить объемы вычислений (используемой оперативной памяти), ускорить их, а также получить достаточно точное решение.

4. Использование симметрии антенной системы. В данном случае производится разбиение на конечные элементы только четверти всей антенны из первого метода, с заданием на ее срезах граничных условий симметрии Н- и Е-типов. Данный вариант оказался наиболее быстрым, с высокой точностью результатов.

5. Использование большего объема анализируемого пространства. Вместо относительно близко расположенных границ на цилиндре из способов 1 и 4, используется в качестве области анализа методом конечных элементов прямоугольный параллелепипед, охватывающий и сферу и облучатель. Данный вариант показал наибольший коэффициент направленного действия, но и затребовал достаточно большого объема оперативной памяти.

Моделирование проводилось на персональном компьютере со следующими параметрами: процессор Intel core i7-6700 3.4 GHz, 16 GB RAM, жесткий диск SSD, Windows 8.1. Результаты моделирования представлены в виде таблицы:

№ способа	КНД	Число элементов разбиения	Затраченное время, мин		Объем RAM, Gb
			Реальное	Процессорное (с учетом деления расчетных операций между ядрами процессора)	
1	22	157543	13,32	69	12,5
2	19,7	43308	8,23	54,05	3,91
3	21,58	36470	4,32	24,54	2,36
4	21,68	43047	1,08	3,50	2,18
5	23,28	81210	2,54	11,09	5,25

Список публикаций:

[1] R.K. Luneburg "The mathematical theory of optics", Providence, RI: Brown Univ. Press, 1944