

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ДИСКРЕТИЗАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА НА ЕЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Коротков А.Н., Шабунин С.Н.

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
ул. Мира, 19,г. Екатеринбург, 620002, Россия тел.: (343) 3744886, e-mail:
an.korotkov@urfu.ru; s.n.shabunin@urfu.ru*

Аннотация: Исследуемая цилиндрическая линза Люнеберга представляет собой радиально неоднородную слоистую структуру. Исследуется влияние количества слоев дискретизации линзы на ее характеристики излучения. Рассмотрено четыре способа дискретизации линзы, для каждого из которых получены зависимости КНД от количества слоев, а также построены диаграммы направленности для варианта линзы из трех слоев и внешнего радиуса 3λ . Для расчета диаграмм направленности и КНД использовалась математическая модель, созданная на основе аппарата тензорных функций Грина стратифицированных сред в цилиндрической системе координат. Определен оптимальный способ выбора закона изменения толщины и диэлектрической проницаемости слоев.

Ключевые слова: линза Люнеберга, многослойный цилиндр, дискретизация линзы, характеристики излучения, функции Грина.

INFLUENCE OF THE CYLINDRICAL LUNEBURG LENS DISCRETIZAYION ON ITS ANTENNA RADIATION PROPERTIES

Korotkov A.N., Shabunin S. N.

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin 19, Mira Str.,
Yekaterinburg, 620002, Russian Federation Ph.: (343) 3744886, e-mail: an.korotkov@urfu.ru;
s.n.shabunin@urfu.ru*

Abstract: The cylindrical Luneburg lens under analysis has a radially unhomogeneous layered structure. The influence of the number of layers on lens antenna radiation properties is investigated. Four ways lenses discretization is considered. For each way antenna directivity is analyzed. Radiation patterns of three-layer Luneburg lens and 3-wavelength outer radius are shown. To calculate radiation patterns and antenna directivity a model based on Green's functions of cylindrical layered structure was used. The optimal method of cylindrical Luneburg lens layer's permittivity and thickness choice is suggested.

Key words: Luneburg lens, multi-layered cylinder, sampling lens, characteristic radiation, the Green's function.

Введение

Важным направлением современного проектирования антенн является создание узконаправленных и многолучевых диаграмм направленности, желательно с наименьшими размерами конструкции и достаточно высоким коэффициентом усиления.

Не меньший интерес представляют сканирующие антенные системы. Данным требованиям удовлетворяют несколько типов антенн. Во-первых, это антенные решетки, но их коэффициент усиления падает при сканировании, а в случае управления лучом, требуется сложная система управляющих элементов, которая составляет большую часть стоимости такой антенны. Во-вторых, это антенны оптического типа зеркальные или линзовые. В случае с зеркальными антеннами сканирование осуществляется путем поворота всей антенной системы механически, что также увеличивает сложность, стоимость и массогабаритные параметры антенны, а также, в достаточно узком диапазоне углов, электрическим или механическим смещением облучателя. Проще эта задача решается на основе применения линзы Лüneберга с несколькими облучателями [1,2].

Линза, предложенная Карлом Лüneбергом, за счет радиально-неоднородной среды позволяет сконцентрировать излучения слабонаправленных антенн в требуемом направлении [3]. Коэффициент рефракции такой линзы изменяется от $\sqrt{2}$ в центре, до единицы на краю, по закону

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

где ε' - относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы, r - радиальная координата в сферической или цилиндрической системе координат, a - внешний радиус линзы

Для антенн на основе линзы Лüneберга характерна возможность коммутируемого сканирования в широком диапазоне углов, многолучевое излучение и высокая направленность.

Цель исследования

Создать линзу Лüneберга из диэлектрика с плавно меняющимся коэффициентом рефракции согласно закону (1), достаточно тяжело. Проводится много исследований по созданию различного типа структур, с близким к закону (1) изменением коэффициента рефракции. Самым простым и часто используемым способом является создание структуры со ступенчатым изменением коэффициента рефракции.

В данной работе рассматриваются различные способы разбиения на слои со ступенчатым изменением коэффициента рефракции. Большинство публикаций посвящено анализу сферических линз Лüneберга. Для некоторых приложений интерес представляют цилиндрические линзы. Они позволяют сформировать веерные диаграммы направленности с возможностью коммутируемого сканирования. В качестве облучателей таких линз могут использоваться линейные антенные решетки. Это позволяет решить задачу дополнительного электронного сканирования в плоскости решетки.

В работе исследуется влияние способа дискретизации структуры линзы по толщине и значению коэффициента рефракции с точки зрения достижения максимального коэффициента направленного действия. Поиск минимального количества слоев даст возможность упростить конструкцию линзы и, соответственно, сделать ее дешевле и более технологичной.

Материал и методы исследования

Стоит отметить, что расчет и анализ многослойных структур стандартными методами в пакетах компьютерного моделирования требует больших вычислительных мощностей и временных затрат, особенно на этапе оптимизации структуры. Необходим поиск методов расчета подобных структур, дающих, может быть не достаточно точные, но приемлемые результаты вычислений, но позволяющих проводить расчеты на несколько порядков быстрее. Это даст возможность провести первичную оптимизацию структуры антенны с многослойной линзой. Уточненные расчеты на втором этапе можно выполнять, используя такие известные программные продукты как Ansys HFSS, FEKO, CST Microwave Studio и т.п.

Существенно ускорить процесс проведения первичных расчетов и оптимизации позволяет использование тензорных функций Грина. В [4] показана эффективность применения данного подхода к анализу сферических линз. Следует ожидать подобного эффекта и при анализе многослойных цилиндрических структур. Таким образом, появилась задача создания быстрого алгоритма расчета и анализа цилиндрической линзовой антенны. Предложенный в [5] метод, основанный на использовании аппарата тензорных функций Грина, позволил решить проблему создания компактных и быстро работающих алгоритмов для решения задачи излучения цилиндрической линзовой антенной при возбуждении ее различными облучателями.

В работах [6] и [7] показаны результаты использования предложенной математической модели для исследования характеристик излучения цилиндрической линзы Люнеберга. С использованием данной математической модели были проведены исследования влияния способа дискретизации цилиндрической линзы Люнеберга на ее характеристики излучения. В результате удалось выбрать оптимальный способ дискретизаций, позволяющий получить минимальное количество слоев в линзе при сохранении высокой направленности излучения.

Результаты исследования и их анализ

На рисунке 1 представлены способы дискретизации линзы, рассматриваемой в данной работе. На рисунке 1, а и 1, в показано разбиение на слои с равномерным шагом изменения диэлектрической проницаемости. В первом случае значение диэлектрической проницаемости слоя выбиралось соответствующим выражению (1) на границе слоя (рисунок 1,а). Во втором случае значение диэлектрической проницаемости слоя выбиралось соответствующим выражению (1) для середины слоя. Этот интервал делился еще пополам (рисунок 1,в). На рисунке 1, б и 1, г показано разбиение на слои с равномерным шагом по радиусу линзы. В первом случае диэлектрическая проницаемость выбиралась соответствующей выражению (1) на границе слоев (рисунок 1,б). Во втором случае диэлектрическая проницаемость слоя выбиралась равной вычисленному значению по формуле (1) для середины слоя (рисунок 1,г).

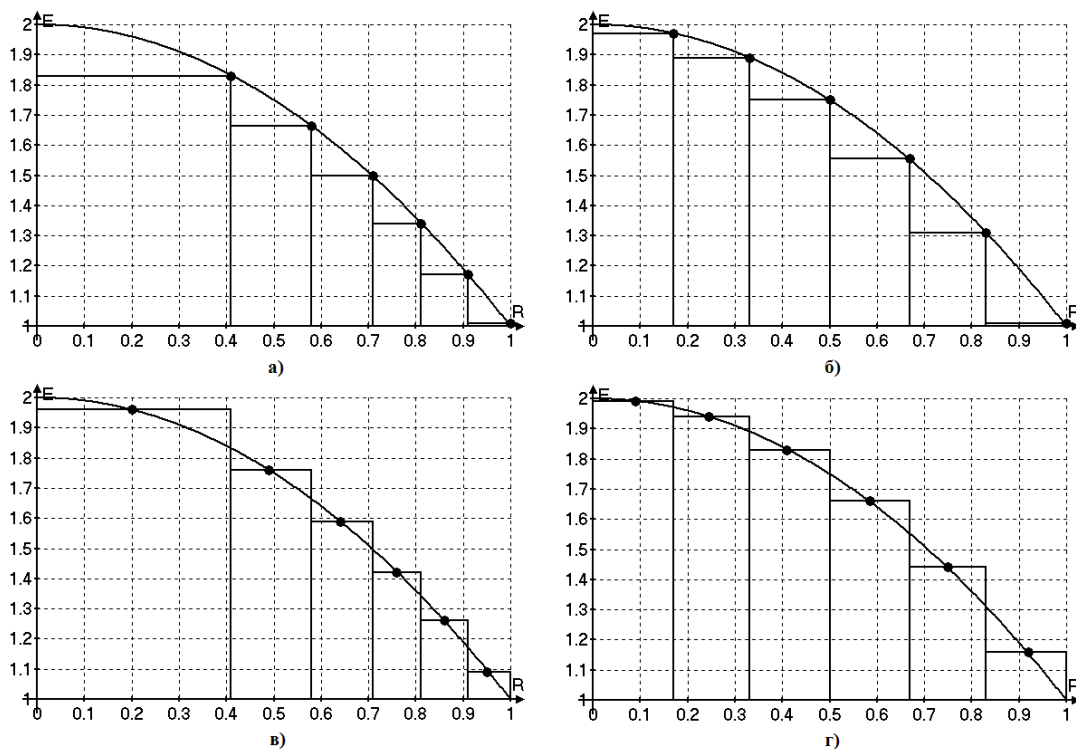


Рисунок 1. Графики дискретизации линзы Люнеберга (а) и в) с равномерным шагом изменения диэлектрической проницаемости, б) и г) с равной толщиной слоев)

На рисунке 2 приведены графики зависимости коэффициента направленного действия (КНД) от количества слоев для приведенных выше способов дискретизации цилиндрической линзы Люнеберга. В качестве облучателя использовался элемент Гюйгенса.

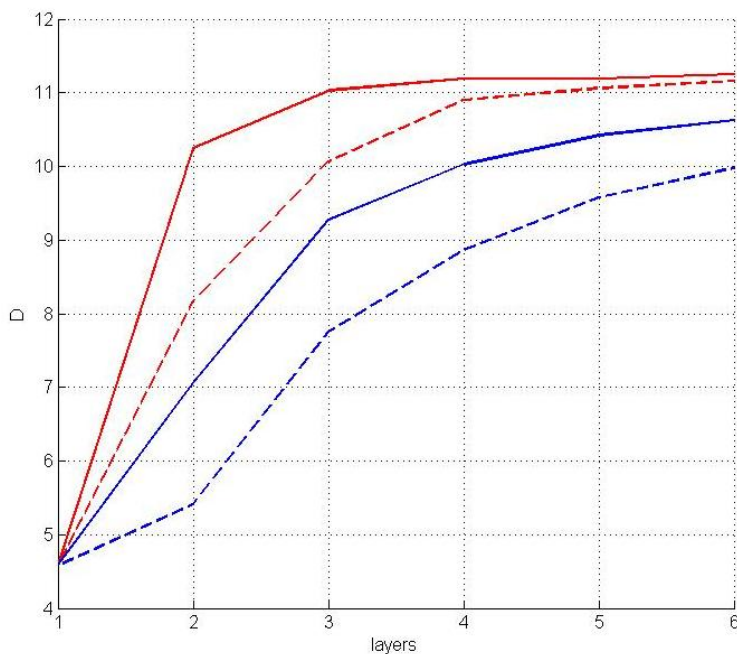


Рисунок 2. График зависимости КНД линзы от количества слоев для разных способов дискретизации (красная сплошная – соответствует варианту в, красный пунктир – г, синяя сплошная – а, синий пунктир – б на рисунке 1)

Из рисунка 2 видно, что КНД с увеличением числа слоев быстро растет примерно до трех слоев, потом его рост замедляется. Было решено сравнить диаграммы направленности четырех линз с разным способом дискретизации с внешним радиусом 3λ , имеющих по три слоя. На рисунке 3 приведены диаграммы направленности для вариантов дискретизации *a* и *в* (рисунок 1), а на рисунке 4 для вариантов *б* и *г* (рисунок 1).

Диаграммы направленности линзы Лüneберга с равномерным шагом изменения диэлектрической проницаемости, облучаемой элементом Гюйгенса, показаны на рисунке 3. Видно, что диаграмма направленности линзы, с дискретизацией, представленной на рисунке 1, *в* более узкая и имеет меньший уровень боковых лепестков, чем вариант дискретизации на рисунке 1, *a*.

Диаграммы направленности линзы Лüneберга с равной толщиной слоев, облучаемой элементом Гюйгенса, показаны на рисунке 4. Видно, что вариант дискретизации представленной на рисунке 1, *г* имеет более узкую диаграмму направленности и меньший уровень боковых лепестков по сравнению с вариантом дискретизации на рисунке 1, *б*. Оценивая способы дискретизации по ширине диаграммы направленности и уровню боковых лепестков, можно выделить два наиболее оптимальных – это варианты на рисунке 1, *в* и *г*. Это подтверждается резким ростом графиков КНД до 3 слоев для этих вариантов дискретизации, представленных на рисунке 2.

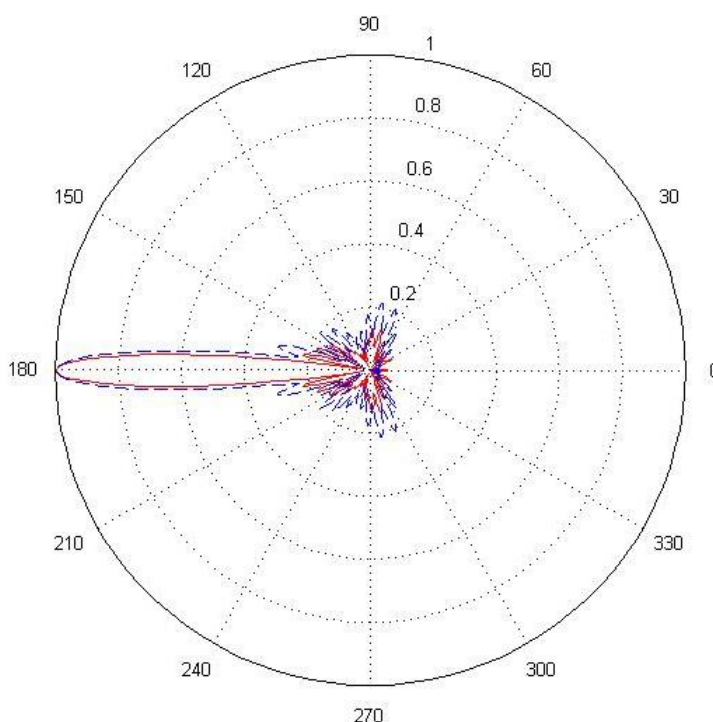


Рисунок 3. Диаграмма направленности в азимутальной плоскости цилиндрической линзы Лüneберга с тремя слоями и внешним радиусом 3λ (Синий пунктир – вариант дискретизации, обозначенный буквой *a* на рисунке 1, красная сплошная – вариант дискретизации, обозначенный буквой *в* на рисунке 1)

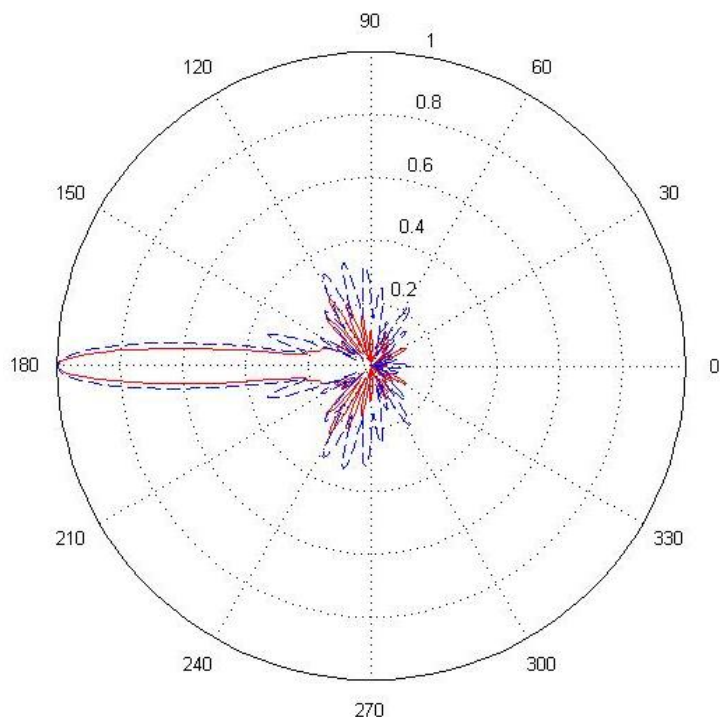


Рисунок 4. Диаграмма направленности цилиндрической линзы Лунеберга с тремя слоями и внешним радиусом 3λ (Синий пунктир – вариант дискретизации, соответствующий варианту б на рисунке 1, красная сплошная – вариант дискретизации, соответствующий варианту буквой г на рисунке 1)

Выводы

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы. Способ дискретизации линзы влияет на ее антенные характеристики достаточно сильно. При увеличении числа слоев больше 3-4, способ разбиения практически перестает влиять на антенные характеристики линзы Лунеберга. Изменение коэффициента рефракции ступенчатой линзы должно быть максимально близким к закону (1), это влияет на КНД и диаграмму направленности линзы. Самый оптимальный способ дискретизации соответствует разбиению на рисунке 1, в. У него максимальный КНД, минимальная ширина главного лепестка диаграммы направленности и минимальный уровень боковых лепестков. Используя вариант дискретизации, представленный на рисунке 1, в можно получить линзу с хорошими антенными характеристиками излучения уже при трех слоях, что уменьшает ее стоимость и сложность изготовления, а также делает ее более технологичной.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-01396).

Список литературы

1. Конструкции антенн на основе линзы Лунеберга [Официальный сайт] URL: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html> (дата обращения: 15.11.2015)
2. J.L.Volakis, “Antenna engineering handbook”. McGraw Hill, 2007.
3. R.K. Luneberg, The Mathematical Theory of Optics. Providence. RT: Brown Univ. Press, 1944.

4. B. Panchenko, M. Gizatullin, "Synthesis of plane and curved multilayer electromagnetic absorbers". Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation. EuCAP, Edinburgh, Great Britain, 2007, pp. 518-520.
5. S. Knyazev, Yu. Kostitsyn and S. Shabunin, "Green's Function Formulation for Multilayered Cylindrical Structures and Its Application to Scattering Problems", Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP 2011, Rome; Italy. 2011. V. 1, . pp. 498-501.
6. Коротков А.Н., Шабунин С.Н., "Расчет поля излучения цилиндрической линзы Лüneберга на основе функций Грина радиально-неоднородных сред". КрыМиКо, 2015, с 501 – 502.
7. A. Korotkov, S. Knyazev, S. Shabunin, "Fast Analysis of Cylindrical Luneburg Lens Radiation by Green's Function Method", Proceedings of the Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2015

References

1. Antenna design based on the Luneberg lens [Official site] [Electronic resource]. - Access mode: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html> (the date of circulation: 11.15.2015).
2. Volakis, J. L. Antenna engineering handbook / J. L. Volakis. – McGraw Hill. – 2007.
3. Luneberg, R. K. The Mathematical Theory of Optics. Providence / R. K. Luneberg. – RT : Brown Univ. Press, 1944.
4. Panchenko, B. Synthesis of plane and curved multilayer electromagnetic absorbers / B. Panchenko, M. Gizatullin // Proceedings of the European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007. – Edinburgh, Great Britain. – 2007. – Pp. 518-520.
5. Knyazev, S. Green's Function Formulation for Multilayered Cylindrical Structures and Its Application to Scattering Problems / S. Knyazev, Yu. Kostitsyn and S. Shabunin / Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011. – Rome, Italy. – 2011. – V. 1. – Pp. 498-501.
6. Korotkov, A.N. Calculation of cylindrical Luneburg lens radiation with Green's function of radially inhomogeneous structure / Korotkov A.N., Shabunin S. N./ Microwave equipment and telecommunication technologies: Proceedings of the 25th International Crimean Conference. - Sevastopol, Russia. - 2015. - T. 1. - P. 501-502.
7. A. Korotkov, S. Knyazev, S. Shabunin, "Fast Analysis of Cylindrical Luneburg Lens Radiation by Green's Function Method", Proceedings of the Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), 2015