Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга

Аннотация

Здесь мы расскажем вам о необычном типе антенны в форме шара. В этой статье принцип ее работы, применение и достоинства, - поехали.

Введение

В настоящее время известно большое количество высоконаправленных антенн, применяемых в радионавигации, радиолокации, радиопротиводействии, а также системах космической и наземной радиосвязи. На рисунках ниже для наглядности изображены наиболее распространенные типы высоконаправленных антенн: зеркальные (рис. 1а), фазированные антенные решетки (ФАР) (рис. 1б), антенны на основе поверхностных гребенчатых структур, а также плоские линзовые антенны (укоряющие и замедляющие).

Рис. 1а – Внешний вид зеркальной антенны

Рис. 1б – Внешний вид фазированной антенной решетки

Как правило, задача любой высоконаправленной антенны заключается в том, чтобы сопровождать какой-либо объект в широком диапазоне углов. Для этих целей антенны должны иметь систему управления лучом (диаграммой направленности). Это управление в самом простом случае осуществляется путем механического поворота антенной системы (как например в зеркальных и двух зеркальных антенных системах), либо путем электрического управления формой диаграммы направленности, применяемого в ФАР. Условная схема работы такой системы поясняется рисунком ниже:

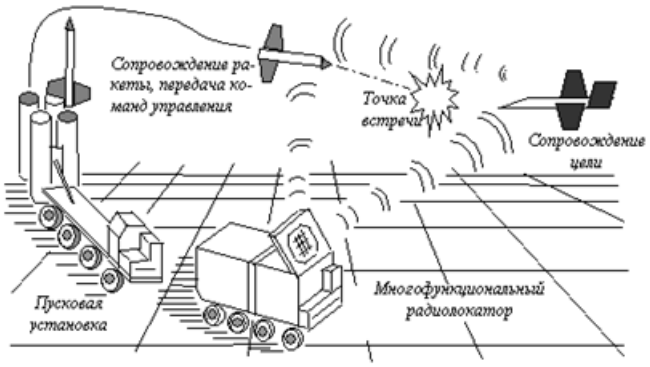

Рис. 2 – Работа ФАР в составе оборонного ракетного комплекса

Перечисленные антенные системы имеют ограничения на ширину рабочих частот и что самое важное – ограниченный диапазон углов сканирования. Альтернатива перечисленным высоконаправленным антеннам - линза Люнеберга (ЛЛ), лишённая перечисленных недостатков (но обладающая своими "заморочками").

На просторах русскоязычного интернета информативного упоминания об антенных системах типа линзы Люнеберга можно встретить достаточно мало. В частности, горячо любимая и уважаемая Википедия не раскрывает в полной мере всего потенциала этого типа антенн. Однако производством подобных антенных систем занимаются ведущие предприятия в области СВЧ из США и Франции. На просторах РФ производством занимаются некоторые НИИ (по большей части в научных целях).

Историческая справка

Физику работы ЛЛ впервые описал немецкий математик Рудольф Карл Люнеберг в работе "Математическая теория оптики" [1]. Из названия самой работы понятно, что изначально такая линза должна была работать в оптическом диапазоне длин волн, соответственно должна быть изготовлена из оптически прозрачного материала. В оптике применения такие линзы не нашли, а вот со временем, когда научились делать нужные радиопрозрачные материалы, такая линза нашла свое применение в радиолокации.

Из курса физики нам известно, что функционал любой линзы заключается в том, чтобы каким-либо образом изменять ход лучей (фокусировать, расфокусировать, производить разбиение луча и др.) в теле линзы. Принцип работы линзы Люнеберга точно такой же. Как принято говорить в математике "после несложных математических преобразований" Р.К. Люнеберг получил формулу:

$$n(r) = \sqrt{\varepsilon'(r)} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2} = \sqrt{2 - \tilde{r}^2}$$

где $\varepsilon'(r)$ – относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы в точке r

r – текущая радиальная координата;

a –радиус сферы.

Вид этой формулы говорит о том, что если коэффициент преломления сферического тела меняется от 2 в центре до 1 на поверхности, то это тело преломляет падающие на него лучи таким образом, что они выходят из сферы параллельно своему диаметру. Схема прохождения лучей показана на рисунке ниже:

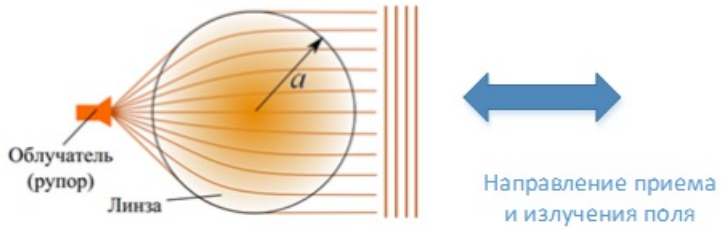

Рис. 3 – Схема прохождения лучей через линзу Люнеберга

Антенна на базе ЛЛ обладает рядом полезных свойств: во-первых, такая антенна позволяет осуществлять сканирование лучей практически в любом диапазоне углов, путем перемещения

малого облучателя вдоль поверхности. Во-вторых, в силу своей сферически-симметричной конструкции, линза способна формировать несколько независимых диаграмм направленности одновременно (при использовании нескольких облучателей). К тому же линзовые антенны по своей конструктивной особенности эргономичны и имеют малое аэродинамическое сопротивление, что позволяет устанавливать их на движущиеся объекты.

Техническая реализация линзы Люнеберга

Точно реализовать требуемый непрерывный закон изменения коэффициента преломления крайне сложно. Поэтому при технической реализации линзы оптимальный способ изготовления – это ее разбиение на сферические слои из материалов с разными электрофизическими параметрами. Например, вся линза от центра до поверхности разбивается на участки равной длины и далее по закону Люнеберга высчитывается требуемая относительная диэлектрическая проницаемость каждого участка.

Приведём несколько примеров технической реализации линзы Люнеберга. На рисунке 4 представлена конструктивная реализация многослойных ЛЛ в виде полусфер различного радиуса из натурального пенистого диэлектрика (слева), и пенистого полистирола (справа).

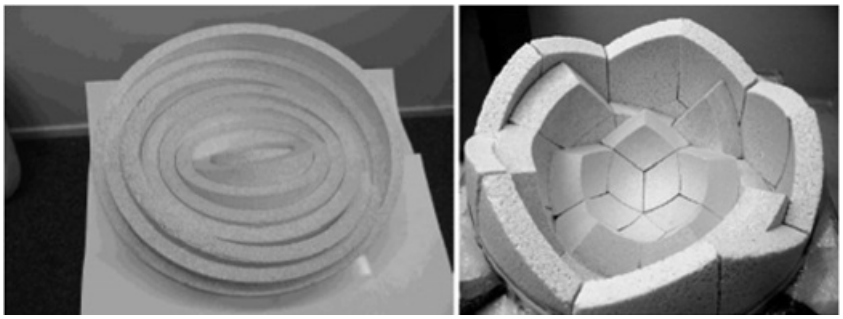

Рис. 4 – Конструктивная реализация многослойной линзы

То, что диэлектрическая проницаемость меняется довольно в узких приделах – от 2 до 1 создает трудности при синтезе материала линзы. Но на сегодня доступные технологии позволяют регулировать эти параметры с достаточной степенью точности. Так, например, при использовании искусственного диэлектрика при изготовлении линзы возможно внесение в него неоднородностей различного размера и формы, или, наоборот, образование в нем проницаемых отверстий и щелей. Кроме того, тело линзы может состоять из дискретных элементов кубической формы с различными коэффициентами преломления. Таким образом, необходимый закон изменения коэффициента преломления может быть реализован с достаточной степенью точности в виде переменного по радиусу скопления неоднородностей в диэлектрике. Подобная модель линзы показана на рисунке 5.

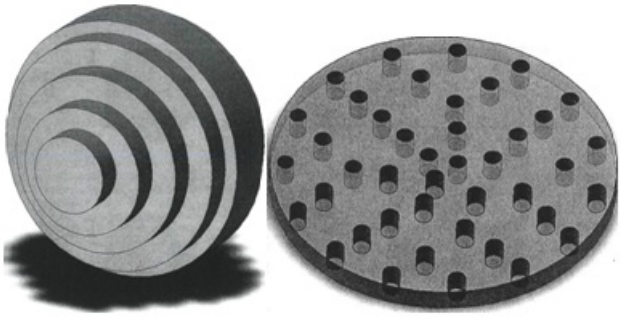

Рис. 5 – Модель ЛЛ с внедрением неоднородностей

Применение и существующие антенные комплексы

Встречаются довольно нестандартные варианты реализации и применения антенн на базе линзы Люнеберга. Примером может служить антенна РЛС "Неман-П", рисунок 6.

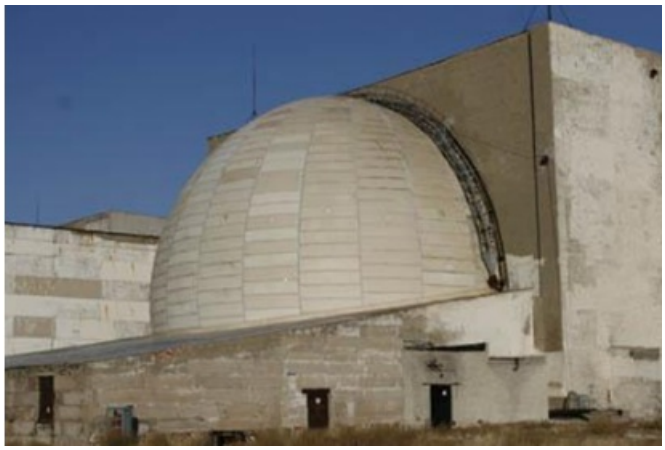

Рис. 6 – Приемная позиция РЛС "Неман" на Балхашском полигоне

Данная РЛС проектировалась как станция обнаружения, сопровождения и селекции большого числа баллистических целей и рассматривалась как один из вариантов стрельбового локатора систем ПРО Москвы.

И на сегодня наиболее перспективное направление применения линз Люнеберга - организация связи по произвольным направлениям в пространстве. На рисунке 7 продемонстрирован вариант возможного применения ЛЛ при работе в многоканальных системах связи.

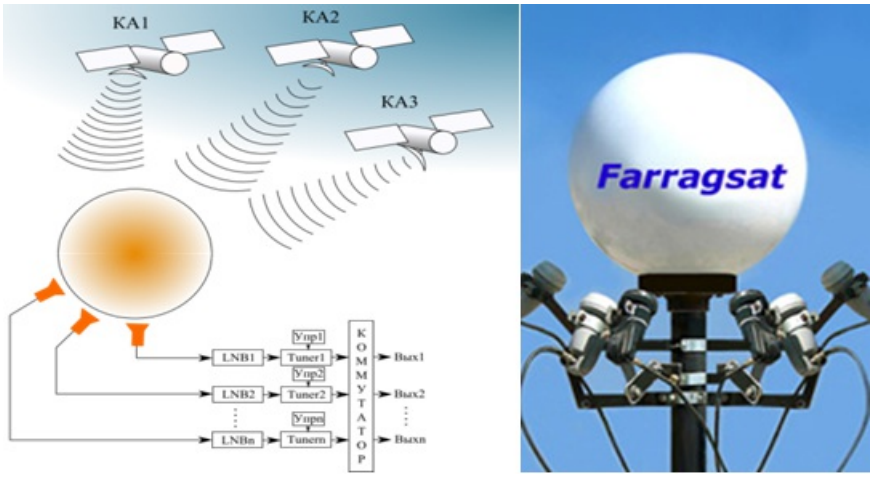

Рис. 7 – Многоканальный терминал спутниковой связи с ЛЛ

Такой вариант применения довольно перспективен по сравнению с системами, использующими для тех же целей параболические или зеркальные антенны, которых необходимо намного большее количество, из-за того, что спутники расположены на большом угловом расстоянии друг от друга. К тому же, используя линзу Люнеберга для сканирования пространства, нет необходимости перемещать всю конструкцию, как это принято в зеркальных антеннах, достаточно лишь перемещать слабонаправленный облучатель по поверхности линзы. Таким образом, линза Люнеберга способна заменить целый парк параболических антенн, рисунок 8.

Рис. 8 – Компактная ЛЛ, заменяющая 4 параболические антенны

Помимо этого, ЛЛ эффективно могут быть использованы в подвижных терминалах связи, когда взаимное расположение передатчика и приемника со временем меняется, и необходимо

организовать систему сопровождения абонента. На рисунке 1.7 показано, как полноповоротная параболическая антенна терминала спутниковой связи, установленная на автомобиле, может быть заменена линзовой полусферой.

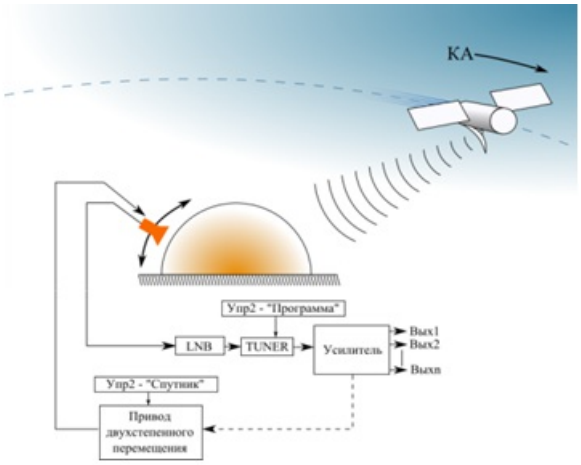

Рис. 1.7 – ЛЛ на движущемся объекте

В этом случае преимуществом использования линзы Люнеберга является то, что она может оставаться неподвижной, так как управление диаграммой направленности происходит путем перемещения первичного облучателя по поверхности линзы. При использовании терминала с параболической антенной необходим механизм поворота крупного зеркала. Данная конструкция не надежна, а поворотный механизм зеркала, как правило, является довольно дорогостоящим, и зачастую составляет большую часть от стоимости антенной системы.

В настоящее время на мировом рынке представлены варианты гражданского применения линз Люнеберга, устанавливаемых на крышах автомобилей для организации стабильного телевизионного сигнала по спутниковому радиоканалу. Примером могут служить системы TracVision от компании KVH, рисунок 8.

Рис. 8 – Линза Люнеберга для гражданского применения

Для обеспечения поворота облучателя вокруг линзы, необходима реализация поворотного устройства облучателя, пример реализации которого показан на рисунке 9.

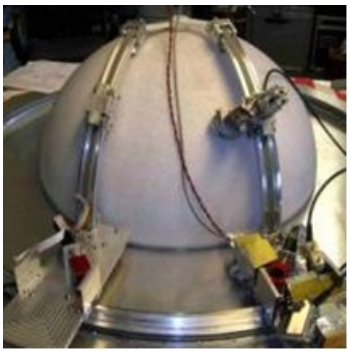

Рис. 9 – Устройство перемещения первичного облучателя ЛЛ

Пример использования линзы Люнеберга в качестве спутниковой антенны на поезде показан на рисунке 10. Принимая во внимание высокую скорость движения состава, установка линзовой антенны позволит осуществить плавное сопровождение передающей станции и обеспечить тем самым качественную и стабильную передачу сигнала.

Рисунок 10 – Спутниковый терминал с ЛЛ на крыше поезда

На рисунке 11 показан пример современной технической реализации линзы Люнеберга.

Рис. 11 –Современная техническая реализация ЛЛ

Линза Люнеберга может быть использована в качестве многолучевой антенны в СВЧ-системах картографирования: в спутниковых системах для мониторинга подстилающей поверхности, влажности почвы, борьбы с лесными пожарами. Она успешно используется в спутниковых системах слежения, где спутник и пользователь перемещаются относительно друг друга.

Линзы Люнеберга могут применяться в спутниковых системах, размещаемых на суше, на борту корабля, фюзеляже самолета. Такие антенны имеют хорошие характеристики для широкоугольного сканирования и обеспечивают высокий коэффициент усиления во всем диапазоне углов. Кроме того, ЛЛ по своим конструктивным особенностям обладает малым аэродинамическим сопротивлением и удовлетворяет эргономическим требованиям.

В настоящее время можно рассматривать Линзу Люнеберга как альтернативу зеркальным антеннам и фазированным антенным решеткам. Новые технологии производства, использующие композитные диэлектрические материалы с низкими потерями, в совокупности со сложными электромагнитными технологиями проектирования позволяют построить мощные линзовые антенны с высоким коэффициентом усиления.

Электродинамическая модель ЛЛ в программном пакете AnsysHFSS

Сферическая линза Люнеберга играет ту же самую роль в антенной системе, что и фокусирующее зеркало зеркальной антенны. В качестве источника электромагнитной волны может использоваться любой тип слабонаправленного облучателя в виде одиночных вибраторов, различных рупоров, микрополосковых антенн и пр. Решение задачи моделирования антенны на базе ЛЛ начнем с задания первичного источника.

В качестве первичного источника будем использовать круглый рупор, излучающий поле основной поляризации на частоте 25ГГц. Диаметр круглого рупора Модель рупора в программном пакете Ansys HFSS показана на рисунке 12.

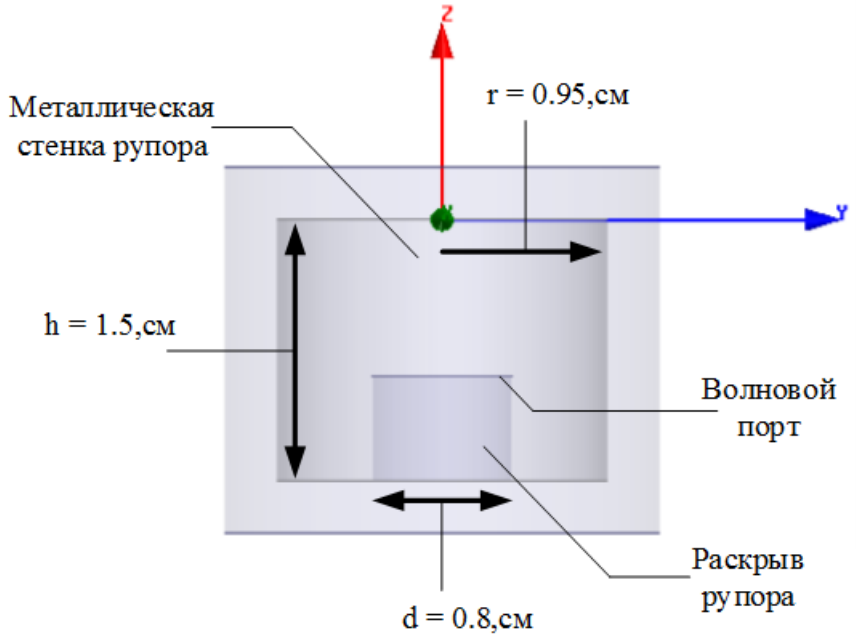

Рис. 12 – Модель первичного облучателя ЛЛ в Ansys

Диаграмма направленности рупора в дальней зоне приведена на рисунке 12.

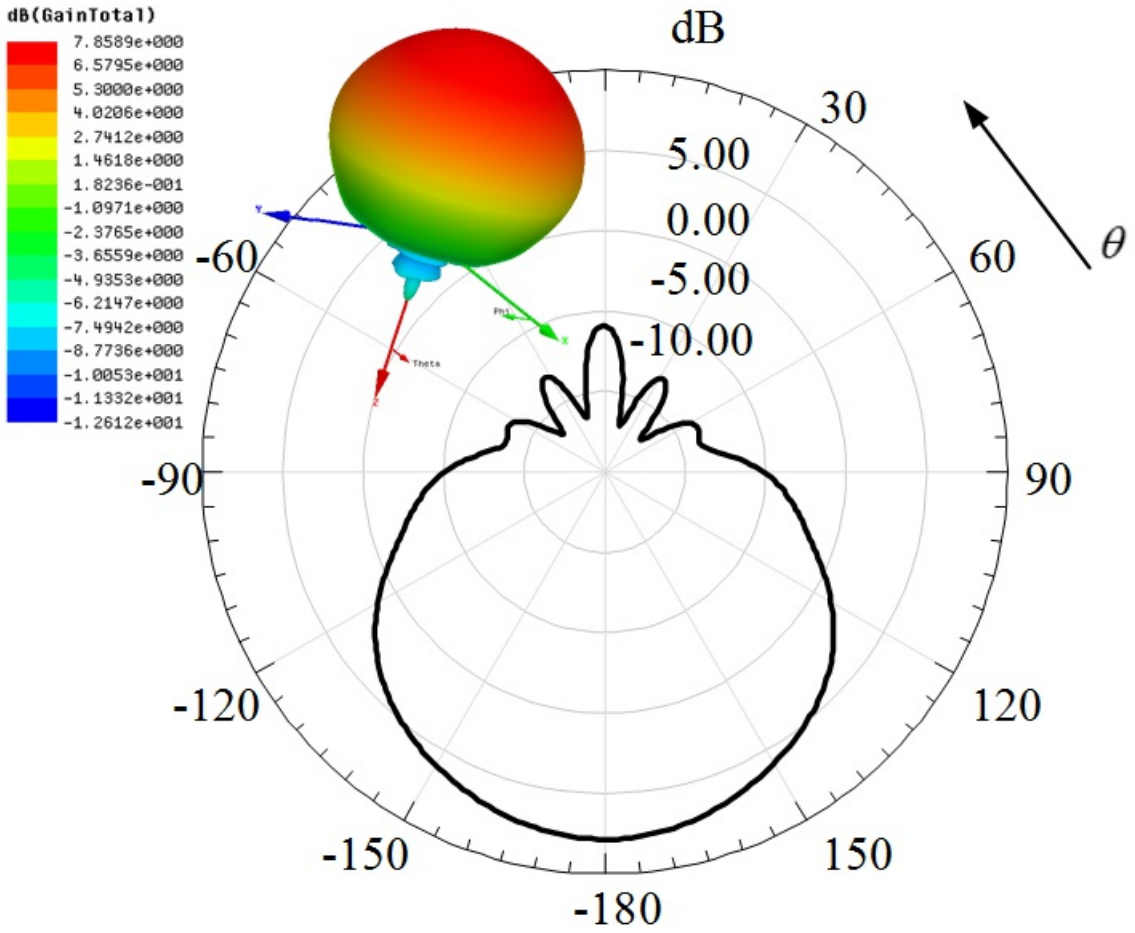

Рис. 12 – Диаграмма направленности рупора

Зададим трехслойную модель линзы Люнеберга. Электрический радиус линзы $a = 2\lambda_0, (k_0 a = 4\pi)$. то есть две длины волны, рисунок 13. Диаграмма антенной системы приводится на рисунке 14.

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]
Рис. 13 – Модель трехслойной линзы Люнеберга в Ansys

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]
Рис. 14 – ДН трехслойной линзы Люнеберга

В качестве первичного облучателя может быть использована микрополосковая антенна (МПА). К примеру, микрополосковая антенна, работающая в диапазоне 2.4 ГГц, формирующая поле круговой поляризации выглядит следующим образом (рисунок 15):

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]
Рис. 15– Вид МПА и ее диаграммы направленности

Реализуемый коэффициент усиления микрополосковой антенны составляет G=5,6 дБ. Применение линзы Люнеберга в качестве фокусирующей системы позволит увеличить коэффициент усиления МПА. В качестве примера рассмотрим каких результатов усиления можно добиться при совместном использовании вместе с этой МПА шестислойной линзы Люнеберга диаметром 150 мм. Характеристики слоев ЛЛ приведены в таблице 1 и удовлетворяют закону Люнеберга.

Таблица 1 - Характеристики линзы Люнеберга

L	Нормированные радиусы слоев	Диэлектрическая проницаемость слоев
6	0,39; 0,56; 0,68; 0,78; 0,88; 0,96	1,93; 1,77; 1,61; 1,46; 1,31; 1,16

Модель антенны в программном пакете AnsysHFSS представлена на рисунке 16, а ее диаграмма на

рисунке 17.

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]
Рис.16 - Модель линзы с МПА в программном пакете AnsysHFSS

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]
Рис.17– Диаграммы линзы Люнеберга

Диаграмм антенной системы реализует КНД в 10.7 dB.

Таким образом, линза Люнеберга с облучателем в виде микрополосковой антенны может быть эффективно использована для организации связи в Wi-Fi диапазоне, показывает отличные антенные характеристики с коэффициентом усиления в 10 dB при малых габаритных размерах устройства.

И еще немного многотонных линз напоследок, установленных в США для нужд противоракетной обороны:

[Высоконаправленные линзовые антенны Люнеберга]