



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-28-34>

УДК 621.396.67

Формирование диаграммы направленности специального типа с помощью полусферической линзы Люнебурга¹

Д. В. Денисов, А. А. Тангамян

Уральский технический институт связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге, Екатеринбург, Российская Федерация

В работе рассматривается полусферическая линза Люнебурга с проводящим экраном. При определенных условиях такая конструкция линзы может формировать диаграммы направленности с отсутствием бокового лепестка либо диаграммы направленности косекансного типа. Подобные диаграммы направленности могут быть сформированы управлением следующих параметров: угол поворота облучателя, изменение диаметра проводящего экрана, управление толщиной диэлектрической подложки. В работе рассмотрены частные случаи получения диаграмм направленности специального типа.

Ключевые слова: линза Люнебурга, диаграмма направленности, косеканс-квадратная диаграмма

Для цитирования: Денисов Д. В., Тангамян А. А. Формирование диаграммы направленности специального типа с помощью полусферической линзы Люнебурга // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 2. С. 28–34. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-28-34>

For citation: Denisov D. V., Tangamyayn A. A. Special beamforming by means of a semi-spherical Lüneburg lens // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 2. P. 28–34. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-2-28-34>

Поступила 01.12.2020 Отрецензирована 17.12.2020 Одобрена 18.02.2021 Опубликована 18.06.2021

¹ В русскоязычной литературе антенны такого типа называются линзой Люнеберга, хотя правильное написание имени этого немецкого ученого Лüneбург.

1. Конструкция и параметры полусферической линзы Люнебурга

Линза Люнебурга – это сферически симметричная линза с градиентным индексом показателя преломления n , который радиально уменьшается от центра до поверхности. Линза Люнебурга может выступать в роли широкополосной антенны, эффективность ее работы в большей степени зависит от параметров радиопрозрачности материалов для выбранного диапазона. Каждая точка на поверхности идеальной такого типа линзы является фокусом для излучения, падающего с противоположной стороны. Диэлектрическая проницаемость материала, составляющего линзу, изменяется

с 2 в его центре до 1 на ее поверхности, в соответствии с законом $n(r) = \sqrt{2 - (r/a)^2}$, где a – внешний радиус линзы (на представленном рисунке 1), r является радиальной координатой в сферической системе [1].

Объектив имеет два фокуса. Первый, F1, находится на освещенной поверхности линзы. Обычно в этой точке располагается антенна. Вторая фокусная точка F2 находится на теневой стороне объектива на бесконечном расстоянии. В этой точке формируется картина излучения дальнего поля линзы Люнебурга. Основными недостатками линзовой антенны являются размеры и масса, которые определяются материалом линзы. Этот недостаток можно частично устранить, отбросив теневую половину объектива и заменив ее плоским

© Денисов Д. В., Тангамян А. А., 2021



экраном. В этом случае вторая фокальная точка $F2$ находится на освещенной стороне линзы, а лучи первичного источника проходят в два раза дальше тела линзы. Линза Лüneбургa теряет свою геометрическую симметрию. Для такого типа линзовой антенны Лüneбургa диаграмма направленности излучения ориентирована на местоположение объекта.

Рассматриваемая конструкция изображена на рисунке 1 и представляет собой полусферическую линзу Лüneбургa, установленную на проводящем экране с диаметром d [2, 3].

Линзовая антенна Лüneбургa может быть выполнена в виде объемной полусферы. При этом могут быть получены диаграммы направленности специального типа, расширяя тем самым области применения такой антенны.

Между экраном и корпусом линзы находится подложка, изготовленная из диэлектрического материала, имеющего диэлектрическую проницаемость, близкую к 2. Высота подложки h , угол поворота облучателя θ и диаметр экрана d определяют характеристики диаграммы направленности и могут быть использованы для ее трансформации и контролировать уровень излучения. Благодаря своей конструкции эта антенная система может быть

установлена на поверхности как стационарных (фасадов зданий), так и движущихся (транспортных) объектов. Также рассматриваемая конструкция имеет высокую прочность и меньше подвержена влиянию ветра, а благодаря увеличенной площади проводящего экрана антенна имеет достаточную опору при установке [4]. Электромагнитное решение представленной линзовой антенны осуществляется с использованием высокочастотного структурного симулятора ANSYS HFSS с использованием решателя Driven Modal и численного метода конечных элементов (рис. 2).

Поскольку обычно решение задачи согласования дает приближенное решение (даже по точным формулам), то с помощью систем электрофизического 3D-моделирования результат может быть уточнен. Это связано с тем, что такие системы учитывают множество дополнительных эффектов, таких как затухание в диэлектрике, краевые эффекты и т. д.

В таблице 1 приводятся геометрические размеры линзы, диаграммы которой изображены на рисунке 2.

Значениями относительного радиуса a , представленными в таблице 1, обозначены относительные радиусы слоев антенной системы.

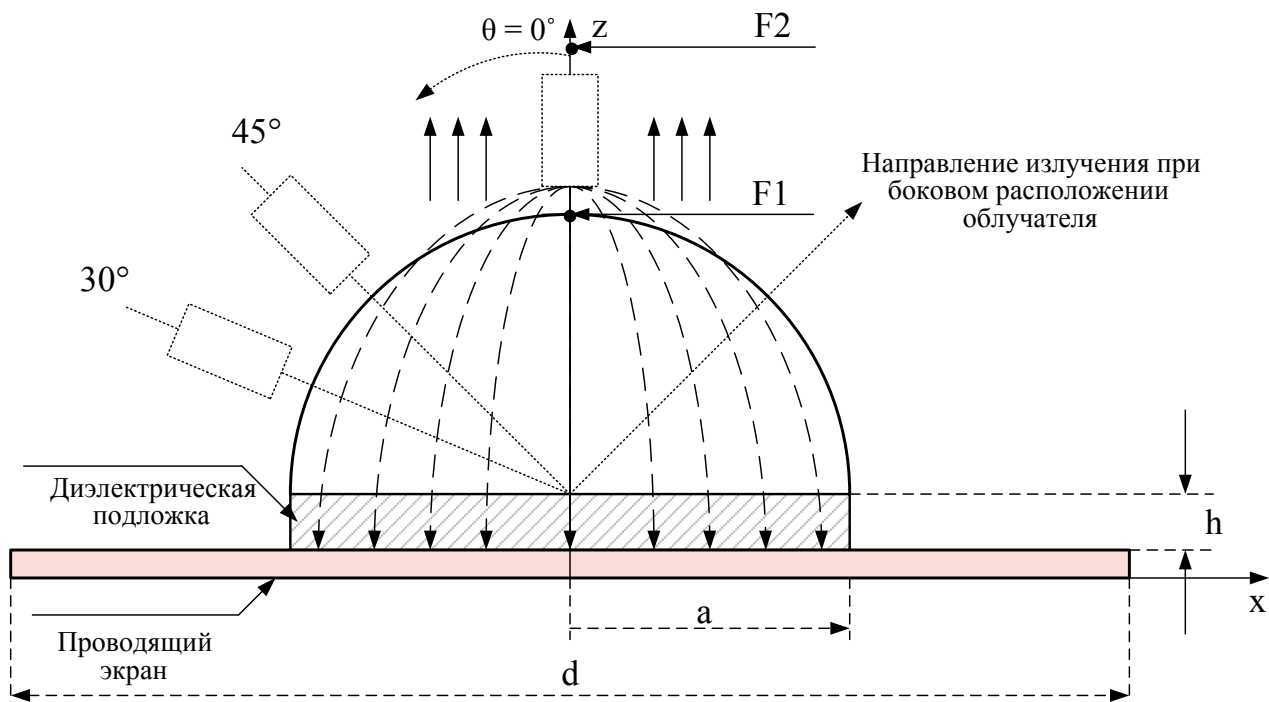


Рис. 1. Схема исследуемой полусферической линзы Лüneбургa

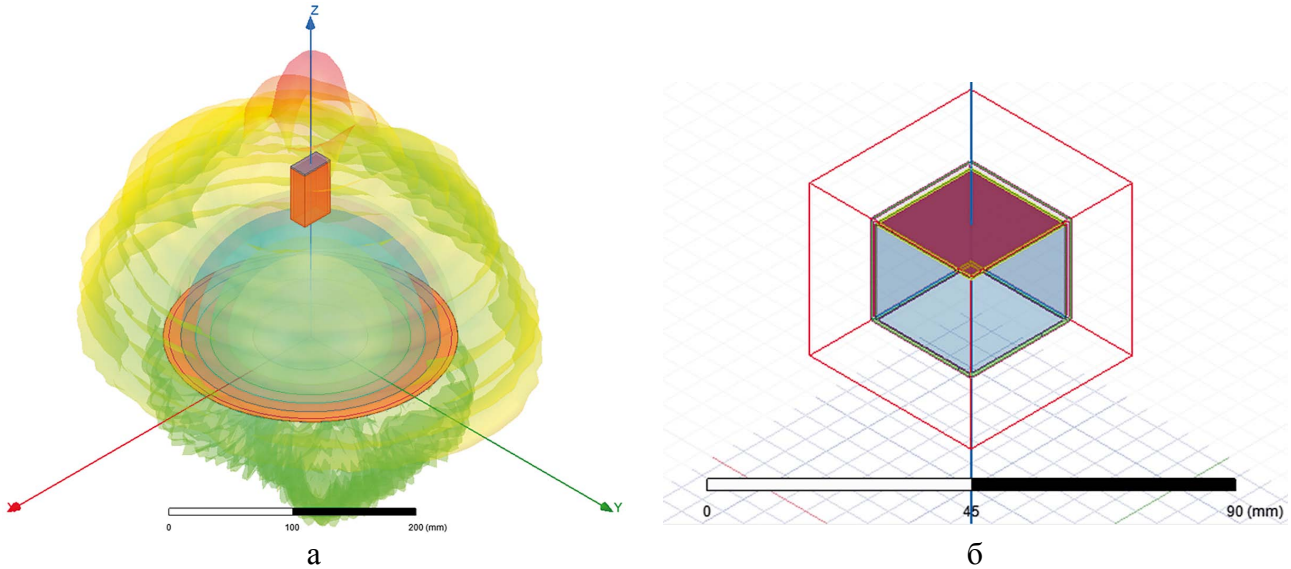


Рис. 2. Модель антенны полусферической линзы Лüneбурга в HFSS (а) и прямоугольный волновод с открытым концом (б)

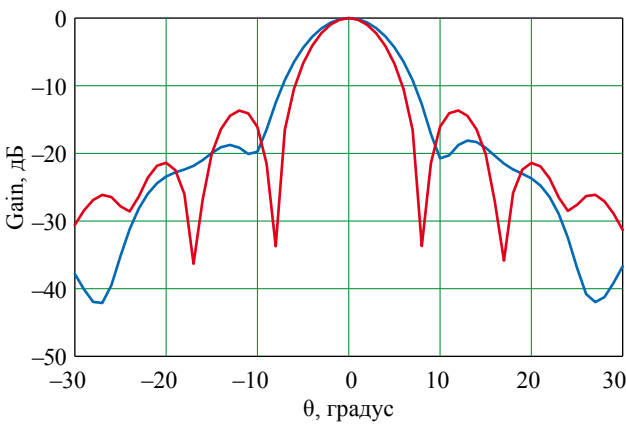


Рис. 3. Диаграмма направленности оптимизированной 6-слойной линзы Лüneбурга при облучении под углами 90 и 0 градусов
— – 90 градусов, — – 0 градусов

В качестве седьмого слоя используется воздух, а в качестве облучателя использовался стандартный прямоугольный волновод с открытым концом, формирующий волну типа H_{10} [5, 6]. Анализ параметров проводился на частоте 10 ГГц, что соответствует длине волны $\lambda \sim 30$ мм. Линзовые антенные системы является широкополосными антеннами. Исследования на других частотах также проводились, и результаты

таких исследований показали, что при изменении частоты облучения для данной антенной системы результаты имеют характерную для поведения ЭМП зависимость (изменение ширины ДН при изменении длины волны). Для исключения громоздкости результатов исследования и повторения предыдущих результатов представлены результаты только на одной из исследуемых частот.

На рисунке 3 приведены сечения амплитудной диаграммы направленности в плоскостях Н при облучении под углом 90 и 0 градусов без зазора между полусферой и экраном ($h = 0$) и проводящим экраном в виде идеальной проводящей плоскости.

При этом полусферическая линза Лüneбурга сохраняет свои направляющие свойства и продолжает работать как антенна [7]. Обозначения на графике: Gain – коэффициент усиления (дБ), θ – угол облучения (градус).

При разработке антенных систем возможны также незначительные изменения на графике ДН, выраженные в потере осесимметричности, связанные с применением такого типа волноводов.

Таблица 1

Параметры полусферической линзы Лüneбурга

Слой линзы, L	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Относительный радиус слоя, a	0,39	0,56	0,68	0,78	0,88	0,96	1
Относительная проницаемость, ϵ	1,93	1,77	1,61	1,46	1,31	1,16	1
Радиус слоя для частоты 10 ГГц, мм	46,8	67,2	81,6	93,6	105,6	115,2	120,0



2. Диаграммы направленности специального типа

Для радиолокации часто требуются антенны, имеющие узкую диаграмму направленности в одной плоскости и широкую в ортогональной плоскости. Для получения такой диаграммы направленности применяют обычно два метода: профилирование зеркала и использование системы распределенных облучателей [7]. В конструкциях антенн с диаграммой специальной формы, в которых используются распределенные облучатели, амплитудой и фазой отдельных излучателей управляют таким образом, чтобы и фазовое, и амплитудное распределения в апертуре соответствовали требуемой диаграмме направленности. Возможности расчета таких систем ограничены недостаточными знаниями о распределении поля в области фокальной точки зеркала, а также физическими ограничениями, связанными с размещением излучающих элементов в пространстве, и эффектами взаимной связи.

Антенны с диаграммами специального типа используются для определения направления на источник излучения или для исследования положения многих источников излучения в окружающем пространстве. Поэтому задача оперативного управления формой и характеристиками направленности антенны остается актуальной [8].

Так, например, у самолетных радиолокаторов, предназначенных для обнаружения наземных целей (рис.4), желательно иметь

такую диаграмму направленности антенны, которая обеспечивала бы при узкой диаграмме направленности в горизонтальной плоскости одинаковую интенсивность отражений от одинаковых объектов, находящихся в радиусе действия радиолокатора.

Чтобы любые наземные объекты в пределах от минимального угла места ϵ_{\min} до максимального ϵ_{\max} облучались одинаково, необходимо получение такой диаграммы, при которой напряженность излучаемого станцией поля была бы пропорциональна расстоянию D_n от самолета до земли.

Так как напряженность поля при распространении радиоволн от радиолокатора до объекта обнаружения убывает обратно пропорционально расстоянию, то радиус-вектор диаграммы направленности по полю должен изменяться обратно пропорционально синусу угла места ϵ или пропорционально косекансу этого угла – $\text{cosec } \epsilon$.

Диаграмма, показанная на рисунке 4а, имеет форму, приближенную к косекансной. В данном случае аналогичными должны быть и диаграммы направленности у антенн наземных радиолокаторов, предназначенных для обнаружения воздушных целей.

Известные способы создания диаграммы направленности косекансной формы для традиционных типов антенн не обеспечивают излучения и приема сверхширокополосных сигналов. Задача создания антенных систем для таких сигналов и на сегодняшний день

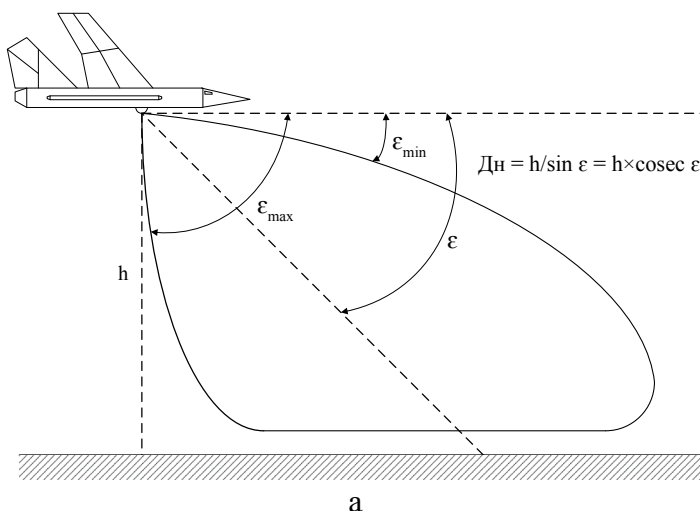


Рис. 4. Установка и использование самолетных радиолокаторов: а – диаграмма косекансного типа, б – пример установки на фюзеляже самолета

Таблица 2

Геометрические параметры проводящего экрана

	1	2	3	4
Диаметр экрана, d	120 мм	180 мм	240 мм	300 мм
Диаметр экрана для частоты 10 ГГц	4λ	6λ	8λ	10λ
Ширина диаграммы направленности $\Delta\theta$, градус	64,7	65,4	76,1	74,8
Уровень первого бокового лепестка, дБ	-32,8	-28,3	-25,4	-25,5
Уровень коэффициента усиления Gain, дБ	27,2	31,6	29,6	29,7

является актуальной. Поэтому применение широкополосной линзовой антенны для формирования диаграммы косекансного типа также является актуальной [9, 10].

Кроме того, полусферическая конструкция также может быть установлена на фюзеляже самолета, как это показано на рисунке 4б.

На рисунке 5 приведены графики косекансного типа для полусферической линзы. Для полученной серии графиков угол поворота облучателя составляет $\theta = 83^\circ$ диаметр экрана изменяется в значениях от 4λ до 10λ .

В таблице 2 приводятся геометрические размеры и основные характеристики экрана, диаграммы которого изображены на рисунке 5.

Из приведенных графиков косекансного типа для полусферической линзы с изменяющимся диаметром проводящего экрана видно, что при значениях диаметра экрана 8λ (240 мм) диаграмма направленности линзовой антенны в большей степени приближена к характеристикам косекансной диаграммы.

При установке на идеально проводящую плоскость полусферическая линза формирует диаграмму направленности с боковым лепестком на уровне ниже -25дБ, что не является

существенным значением в приведенном исследовании (рис. 6).

3. Заключение

Анализ результатов расчета разрабатываемого антенного устройства показал, что описанная методика построения диаграммы направленности специальной формы позволяет с достаточно высокой точностью решать задачи такого рода.

Полученная модель антенны полусферической линзы Люнебурга позволяет получить диаграмму направленности специального типа (csc – косеканс) с целью обнаружения воздушных и наземных объектов при ее использовании в радиолокационных станциях. Данная модель позволяет адаптировать распределение излучения и обеспечивает более идеальное сканирование пространства. Полученная диаграмма направленности антенны обеспечивает требуемое покрытие по высоте, когда принимаемая мощность не зависит от дальности действия радара для наземных целей.

При этом установка на идеально проводящую плоскость полусферической линзы формирует диаграмму с низким уровнем

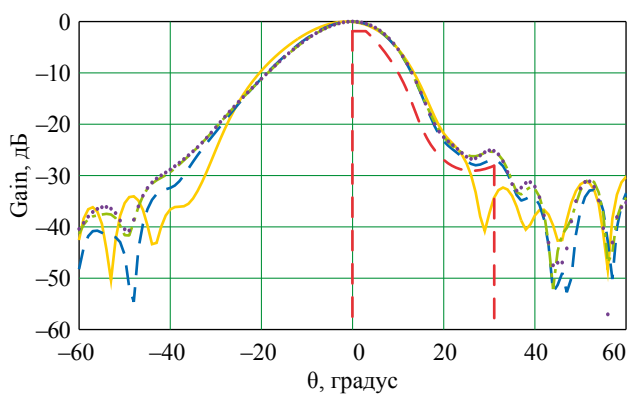


Рис. 5. Графики косекансного типа для полусферической линзы
 — 120 мм, — 180 мм, — 240 мм,
 — 300 мм, — csec

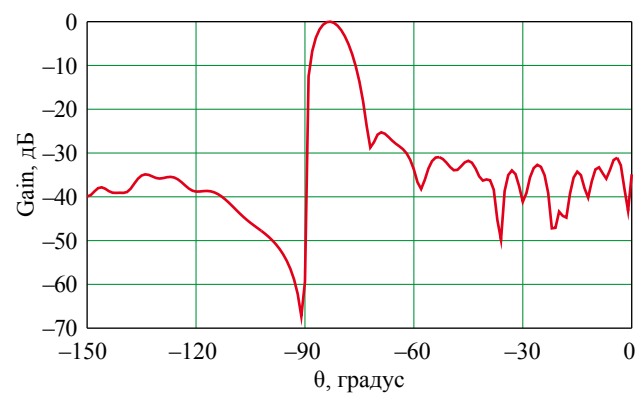


Рис. 6. Диаграмма направленности антенны на идеально проводящей плоскости
 — 83 градуса



бокового лепестка (ниже -25 дБ), что позволит исключить появление дополнительных помех в радаре.

Исследуемая модель антенной системы может быть применена в широком диапазоне частот.

Список литературы

1. Luneburg R.K. The Mathematical Theory of Optics. Providence, RI: Brown Univ. Press, 1944.
2. Thornton J. Wide-scanning multilayer hemispherical lens antenna for Ka band. IET Proc. Microw. Antennas Propag. 2006. Vol. 153, No. 6. P. 573–578.
3. Fuchs B., Palud S., Le Coq L., Lafond O., Himdi M., Rondineau S. Scattering of spherically and hemispherically stratified lenses fed by any real source. IEEE Trans. Antennas Propag. 1998. Vol. 56, no. 2. P. 450–460.
4. Panchenko B., Shabunin S., Denisov D. Fast Analysis of Luneburg Lens Radiation by Green's Function Method. Proc. of European Radar Conf. EuRAD 2015. Paris, France, 2015. P. 568–571.
5. Fuchs B., Le Coq L., Lafond O., Rondineau S. Design Optimization of Multishell Luneburg Lenses. IEEE Trans. Antennas and Propag. 2007. Vol. 55, no. 2. P. 283–289.
6. Панченко Б.А. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными телами. Монография. М.: Радиотехника, 2013. 264 с.
7. Veselov A., Gavrilova Y. Surface synthesis of the reflector antenna with radiation pattern of special form. Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring, PIERS 2017 St. Petersburg, 22–25 May. P. 2058–2064. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262088
8. Nikolic N., Weily A.R. Dual-Polarized Planar Feed for Low-Profile Hemispherical Luneburg Lens Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. Vol. 60, np 1. P. 402–407. DOI: 10.1109/tap.2011.2167941
9. Santos R.A., Fré G.L., Mejia F.B., Spadoti D.H. Reconfigurable Hemispherical Dielectric Lens. IEEE Antennas in MM-Waves. 2018. P. 456–459.
10. Fuchs S., Palud L., Le Coq O., Lafond M., Rondineau S. Scattering of Spherically and Hemispherically Stratified Lenses Fed by Any Real Source. IEEE Trans. Antennas and Propag. 2008. Vol. 56, no. 2. P. 450–460.

Об авторах

Денисов Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Уральского технического института связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге, Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: телекоммуникации, теория и техника антенн.

Тангамян Анатолий Анатольевич – аспирант, преподаватель кафедры информационных систем и технологий Уральского технического института связи и информатики (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» в г. Екатеринбурге, Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: теория дифракции, теория и техника антенн.



Special beamforming by means of a semi-spherical Lüneburg lens

Denisov D. V., Tangamyayn A. A.

Ural Technical Institute of Communications and Informatics – branch of the Federal State Institution of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Information Science” in Ekaterinburg, Ekaterinburg, Russian Federation

The paper considers a semi-spherical Lüneburg lens with a conductive shield. In certain conditions a lens of such design may form radiation patterns without the side lobe or cosecant-type patterns. Such radiation patterns can be formed by controlling the following parameters: antenna feed angle, conductive shield diameter, dielectric substrate thickness. The paper focuses on particular cases of obtaining special-type radiation patterns.

Keywords: Lüneburg lens, radiation pattern, cosecant-squared pattern

Information about the authors

Denisov Dmitry Vladimirovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Department of Information Systems and Technologies, Ural Technical Institute of Communications and Informatics – branch of the Federal State Institution of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Information Science” in Ekaterinburg, Ekaterinburg, Russian Federation.

Science research interests: telecommunications, antenna theory and technology.

Tangamyayn Anatoly Anatolyevich – Post-graduate student, Faculty Member, Department of Information Systems and Technologies, Ural Technical Institute of Communications and Informatics – branch of the Federal State Institution of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Information Science” in Ekaterinburg, Ekaterinburg, Russian Federation.

Science research interests: diffraction theory, antenna theory and technology.