УДК 621.396.677.85

А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов

Влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика

Рассмотрено влияние наличия оправы на характеристики линзовых антенн из неоднородного диэлектрика. Оправа представляет собой полый цилиндр, охватывающий боковую поверхность линзы. Установлено, что оправка влияет на КИП линзовой антенны, причём данное влияние имеет характер периодической зависимости КИП от ширины оправы (разность между внутренним и внешним радиусами цилиндра). Установлены значения ширины оправы, при которых КИП сохраняет значение, равное КИП линзы без оправы. Обнаружено, что данные значения не зависят от радиуса и диэлектрической проницаемости линзы, а зависят только от диэлектрической проницаемости материала оправы, причём данная зависимость имеет гиперболический вид.

Ключевые слова: линзовая антенна, неоднородный диэлектрик.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-7-11

Цилиндрическая линза Микаэляна

Линзы из неоднородного диэлектрика находят применение в различных системах передачи данных [1–7]. Авторами были предложены конструкции линз для применения в составе антенных решёток (АР) в качестве дополнительного фокусирующего элемента, позволяющего увеличить период АР и расширить полосу рабочих частот [8–10]. В качестве линзы в данных АР применяется линза Микаэляна (ЛМ) [11, 12], которая изготавливается из искусственного неоднородного диэлектрика [13–15]. Линза Микаэляна представляет собой цилиндр, в котором диэлектрическая проницаемость меняется вдоль радиуса по закону [9]

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_0 / \operatorname{ch} \left(\frac{r}{r_0} \operatorname{Arch} \sqrt{\varepsilon_0} \right),$$

где ε_0 – значение диэлектрической проницаемости на оси линзы, r_0 – радиус линзы. Облучатель ЛМ примыкает к торцу цилиндра в его центре.

При использовании ЛМ в качестве самостоятельной линзовой антенны, а также при применении в составе линейных антенных решёток её необходимо изготавливать совместно с оправой. Оправа представляет собой полый цилиндр, охватывающий боковую поверхность линзы. При изготовлении ЛМ в соответствии с методом, предложенным в [9], где линза набирается из элементарных слоёв в форме «цветка», оправка выполняет несущую функцию, удерживая «лепестки» каждого слоя за их концы (рис. 1). Кроме того, на оправе можно разместить элементы крепления линзы к несущим частям антенной системы (рис. 2).

Рис. 1. Линза с цилиндрической оправой

Рис. 2. Линзы в составе линейной АР, снабженные общей оправой, на которой имеются элементы для крепежа

Влияние ширины оправы на КИП линзы

При экспериментальных исследованиях АР, изображенной на рис. 2, был обнаружен следующий эффект: когда линза снабжена оправой, её КИП существенно зависит от ширины оправы $L_{\text{опр}}$. На рис. 3 представлена расчётная зависимость коэффициента использования площади (КИП) линзы радиусом 2λ с облучателем в виде открытого конца круглого волновода от $L_{\text{опр}}$, выраженной в длинах волн в диэлектрике $\lambda_{\text{эопр}}$. Диэлектрическая проницаемость оправы в данном случае была равна её значению в центре линзы ε_0 .

Рис. 3. Зависимость апертурного КИП линзы радиуса 2λ от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике

Как можно видеть, данная зависимость носит приблизительно периодический характер. Исходный КИП, равный 0,9, при увеличении $L_{\text{опр}}$ снижается до 0,4, после чего возрастает до практически исходного уровня.

Очевидно, что при реализации линзы с оправой ширина оправы должна соответствовать второму максимуму данной зависимости. На рис. 3 ему соответствует значение $L_{\text{опр}} = \lambda_{\text{опр}}$.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования линз различных радиусов с оправой различной ширины.

Рис. 4. Зависимости апертурного КИП линз различных радиусов R_0 от ширины оправы, выраженной в длинах волн в диэлектрике

Как можно видеть, положение второго максимума на данных графиках практически не зависит от радиуса линзы.

Влияние материалов линзы и оправы на КИП

Для выявления того, какие параметры материалов линзы и оправы влияют на характеристики, приведённые на рис. 3, 4, проводилось моделирование ЛМ с различными значениями ϵ_0 , снабжённой оправой с различными значениями $\epsilon_{\text{опр}}$. На рис. 5 представлены зависимости КИП от $L_{\text{опр}}$, рассчитанные для разных ϵ_0 и $\epsilon_{\text{опр}} = 3$. Радиус линзы равен 3λ .

Рис. 5. Зависимости апертурного КИП линзы от ширины оправы, рассчитанные для разных значений диэлектрической проницаемости в центре линзы

Из графиков можно видеть, что положение второго максимума не зависит от ϵ_0 .

Зависимость положения второго максимума КИП от $\epsilon_{\text{опр}}$ приведена на рис. 6. Для каждого значения $\epsilon_{\text{опр}}$ положение максимума КИП вычислялось усреднением по данным расчётов для различных радиусов линзы (см. рис. 4). Сплошной линией на графике изображена аппроксимирующая кривая, описываемая выражением

$$L_{\text{опр}} / \lambda_{\epsilon_{\text{опр}}} (\epsilon_{\text{опр}}) \approx \frac{0,268}{\epsilon_{\text{опр}} - 0,917} + 0,952.$$

Рис. 6. Зависимость усреднённой электрической толщины оправы для второго максимума КИП от значения диэлектрической проницаемости оправы ($\epsilon_{\text{опр}}$)

Влияние на КИП оправы, частично охватывающей линзу

С целью определения области оправы, наиболее критично влияющей на КИП, было проведено моделирование линзы с оправой, которая имеет толщину $t_{\text{опр}}$, меньшую толщины линзы $t_{\text{л}}$. При этом возможны два случая примыкания оправы к линзе: 1) оправка расположена «сзади» так, чтобы её задний край находился в одной плоскости с задним торцом линзы (рис. 7, слева); 2) оправка расположена «спереди» линзы, так, чтобы её передний край совпадал с передним краем линзы (рис. 7, справа).

Рис. 7. Оправка с толщиной, меньшей толщины линзы, и варианты её ориентации относительно линзы

В ходе расчётов менялась относительная толщина оправы $t_{\text{опр}}/t_{\text{л}}$ с сохранением её ориентации относительно линзы («спереди» или «сзади»). Ширина оправы соответствовала худшему значению КИП, который она обеспечивала при полной толщине $-0,5\lambda_{\text{опр}}$. Зависимость КИП от $t_{\text{опр}}/t_{\text{л}}$ для двух случаев приведена на рис. 8.

Рис. 8. Зависимость КИП от относительной толщины оправы

Из рис. 8 видно, что оправка, расположенная «сзади», не оказывает существенного влияния на КИП вплоть до относительной толщины 0,4, а при её дальнейшем утолщении КИП линейно падает. Если оправка расположена «спереди», то при увеличении её относительной толщины КИП быстро падает до минимальных значений.

Моделирование оправы без линзы

Такое поведение КИП можно объяснить, предположив наличие в линзе с оправой парциальных волноводных мод, возникающих в отрезке диэлектрического волновода, которым является оправка. При этом от толщины стенок волновода будет зависеть степень канализации волны таким волноводом.

Для проверки данного предположения было проведено моделирование только оправы с облучателем без линзы (рис. 9).

Волноводный облучатель

Рис. 9. Оправка с волноводным облучателем без линзы

На графике коэффициента направленного действия (КНД) в направлении оси (рис. 10) также имеется периодичность с приблизительно тем же периодом, как и у зависимости КИП линзы от ширины оправы (рис. 3), что служит подтверждением объяснения ухудшения КИП с линзой наличием парциальной волноводной моды в оправе.

Рис. 10. КНД облучателя с оправой в направлении оси

Аналогичная зависимость проявляется на графике неравномерности амплитудного распределения $\sigma_{ампл}$ (рис. 11). Данная величина представляет собой среднеквадратическое отклонение амплитудного распределения линзы с оправой от амплитудного распределения линзы без оправы. Минимумы данной величины примерно соответствуют минимумам КНД на рис. 3.

Неравномерность фазового распределения $\sigma_{фаз}$ не имеет периодичности (рис. 12).

Рис. 11. Неравномерность амплитудного распределения в раскрыве линзы с оправой

Рис. 12. Неравномерность фазового распределения в раскрыве линзы с оправой

Диапазонные свойства линзы с оправой

Наличие зависимости КИП от ширины оправы оказывает влияние на частотные свойства линзовой антенны. В качестве параметра, описывающего эти свойства, выступает уменьшение КНД — разность между КНД линзы без оправы и КНД линзы с оправой. Частотная зависимость данной величины приведена на рис. 13. График был рассчитан для линзы радиусом 3λ с оправой шириной λ , обеспечивающей максимум КИП на центральной частоте f_0 . Если определить полосу частот по допустимому уменьшению КНД в 0,5 дБ, то коэффициент перекрытия составит 1,5, а при допустимом уменьшении КНД в 1 дБ — 1,65.

Рис. 13. Уменьшение КНД, вызванное наличием оправы, в полосе частот

Заключение

В статье рассмотрено влияние оправы на характеристики линзы из неоднородного диэлектрика. Установлено, что оправка существенно влияет на КИП, причём КИП периодически зависит от ширины оправы. Эффект объясняется наличием парциальных волноводных мод в оправе, что было подтверждено моделированием оправы с облучателем без линзы, в результате которого получилась аналогичная периодическая зависимость. При практической реализации линзы с оправой необходимо выбирать ширину оправы такой, чтобы обеспечить максимальный КИП. Зависимость ширины оправы, удовлетворяющей данному условию, от материала оправы носит приближённо гиперболический характер и для широко используемых полистирола или полиэтилентерефталата составляет примерно 1,2 длины волны в материале.

Наличие эффекта подтверждается экспериментально при исследованиях линейной АР, включающей в себя линзы в общей оправе.

Линза с оправой может работать в полосе частот с коэффициентом перекрытия примерно 1,5 при максимальном ухудшении КНД на 0,5 дБ.

Литература

1. Многолучевая широкополосная антенная система на основе линзы Люнеберга / Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак, Н.А. Павлов, М.Е. Силин // *Нелинейный мир*. – 2014. – № 5. – С. 37–44.
2. Антенная система с круговой поляризацией на основе плоскостной сферической линзы Люнеберга / Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов, А.М. Александрин, С.А. Дранишников // 24-я Междунар. Крым. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). – Севастополь, 2014. – 465 с.
3. Ryazantsev R.O. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens / R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov, M.I. Sugak // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*. – 2013, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693605
4. Ryazantsev R.O. Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation / R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov, V.S. Panko, M.I. Sugak // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk. 12–4 May 2016. – Красноярск, 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491863
5. Kwon D.-H. Beam Scanning Using Flat Transformation Electromagnetic Focusing Lenses / D.-H. Kwon, D.H. Werner // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2009. – Vol. 8. – DOI: 10.1109/LAWP.2009.2033619
6. Lu B.Q. Transformation-optics Antenna Lens Design Using Complex Coordinate Transformation / B.Q. Lu, Z.H. Jiang, D.H. Werner // *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*. – 2014. – Vol. 1. DOI: 10.1109/APS.2014.6904361
7. Aghanejad I. High-Gain Planar Lens Antennas Based on Transformation Optics and Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology / I. Aghanejad, H. Abiri, A. Yahaghi // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2016. – Vol. 68. – July. – P. 45–55. DOI: 10.2528/PIERC16070807
8. Александрин А.М. Плоская гибридная антенная решётка проходного типа / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Труды 67-й науч.-техн. конф., посвященной Дню радио*. – 12–27 апреля 2012 г. – СПб.: Санкт-Петербургская организация «Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова» (СПб НТОРЭС), 2012. – С. 14–15.
9. Александрин А.М. Широкополосная антенная решётка с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Доклады ТУСУР*. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 7–10.
10. Александрин А.М. Построение плоских апертурных антенн с использованием структур из искусственного неоднородного диэлектрика / А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов // *Вестник Сибирского гос. аэрокосмического ун-та им. акад. М.Ф. Решетнёва*. – 2012. – Вып. 6 (46). – С. 8–10.
11. Микаэлян А.Л. Применение слоистой среды для фокусировки волн // *Доклады Академии наук СССР*. – 1951. – Т. 81. – 569 с.
12. Зелкин Е.Г. Линзовые антенны / Е.Г. Зелкин, Р.А. Петрова. – М.: Советское радио, 1974. – 259 с.
13. Alexandrin A.M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings*. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, Russia, September 12–13, 2013. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
14. Реализация радиально-неоднородного диэлектрика и создание апертурных антенн на его основе / А.М. Александрин, Е.Р. Гафаров, К.В. Лемберг, В.С. Панько, С.В. Поленга, Р.О. Рязанцев, Ю.П. Саломатов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 6 [Электронный ресурс]. – URL: www.science-education.ru/113-10789
15. Aleksandrin A.M. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens / A.M. Aleksandrin, R.O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov // *International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016. Proceedings*. – 14 June 2016. – DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491859

Александрин Антон Михайлович

Ст. преп. каф. радиотехники
Сибирского Федерального университета (СФУ)
Свободный пр-т., д. 79, г. Красноярск, Россия 660041
Тел.: +7-965-897-67-92
Эл. почта: aalexandrin@sfu-kras.ru

Саломатов Юрий Петрович

Зав. каф. радиотехники СФУ
Свободный пр-т., д. 79, г. Красноярск, Россия 660041
Тел.: +7 (391-2) 91-22-78
Эл. почта: ysalamatov@sfu-kras.ru

Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P.

Effect of the rim presence on the characteristics of inhomogeneous dielectric lens antennas

The article considers the effect of the presence of a dielectric rim on the characteristics of inhomogeneous dielectric lens antennas. The rim is a hollow cylinder covering the side surface of the lens. It was shown that the rim influences the aperture efficiency of the lens antenna, which comes out in a peri-

odic dependence of the aperture efficiency on the width of the rim (the difference between the inner and outer radii of the cylinder). The values of the widths of the rim are obtained at which the aperture efficiency keeps the value equal to aperture efficiency of the lens without the rim. It was found that these values do not depend on the radius or the permittivity of the lens, but depend only on the permittivity of the rim material, and this relationship has a hyperbolic character.

Keywords: lens antennas, inhomogeneous dielectric.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-7-11

References

1. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Sugak M.I., Pavlov N.A., Sinitin M.E. Multibeam wideband antenna system based on the Luneburg lens. *Nelineyniy Mir*, 2014, No. 5, pp. 37–44 (in Russ.)
2. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Aleksandrin A.M., Dranishnikov A.S. Circularly polarized antenna system based on flat-layered spherical Luneburg lens. *24th International Crimean Conference «Microwave engineering and telecommunications» (CriMiCo 2014)*, Sevastopol, 2014, p. 465 (in Russ.)
3. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Sugak M.I. Concave Spherical Feed Array for Luneberg Lens. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk, September 12–13, 2013. DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693605
4. Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P., Panko V.S., Sugak M.I., Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation, *2013 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) Proceedings*, Russia, Krasnoyarsk, 12–4 May 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491863
5. Kwon D.-H., Werner D.H. Beam Scanning Using Flat Transformation Electromagnetic Focusing Lenses, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, vol. 8. DOI: 10.1109/LAWP.2009.2033619
6. Lu B.Q., Jiang Z.H., Werner D.H. Transformation-optics Antenna Lens Design Using Complex Coordinate Transformation. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, vol. 1. DOI: 10.1109/APS.2014.6904361
7. Aghanejad I., Abiri H., Yahaghi A. High-Gain Planar Lens Antennas Based on Transformation Optics and Substrate-Integrated Waveguide (SIW) Technology. *Progress In Electromagnetics Research*, 2016, vol. 68, no. July, pp. 45–55. DOI: 10.2528/PIERC16070807
8. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P. Flat hybrid transmitarray. *Proceedings of 67th Conference dedicated to the Radio day*, 12–27 April, 2012, pp. 14–15 (in Russ.)
9. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P., Wideband antenna array using artificial inhomogeneous dielectric structures. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 2 (26), part 1, pp. 7–10 (in Russ.)
10. Aleksandrin A.M., Salomatov Y.P. Constructing flat aperture antennas using artificial inhomogeneous dielectric structures. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2012, issue 6 (46), pp. 8–10 (in Russ.)
11. Mikaelian A.L. Application of layered media for wave focusing. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1951, vol. 8, p. 569 (in Russ.)
12. Zelkin E.G., Petrova R.A. *Linzovye anteny*. Moscow, Sovetskoye Radio, 1974, 259 p. (in Russ.)
13. Aleksandrin A.M. Implementation of a Radially Inhomogeneous Medium and Construction of the Aperture Antennas on its Basis // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Krasnoyarsk: Siberian Federal University. Russia, September 12–13, 2013. – DOI: 10.1109/SIBCON.2013.6693593
14. Aleksandrin A.M., Gafarov E.R., Lemberg K.V., Panko V.S., Polenga S.V., Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P. Radially Inhomogeneous Medium and Aperture Antennas on its Basis. *Modern problems of science and education*, 2013, No. 6, URL: www.science-education.ru/113-10789 (in Russ.)
15. Aleksandrin A.M., Ryazantsev R.O., Salomatov Y.P. Numerical optimization of the discrete Mikaelian lens. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 Proceedings*, 14 June 2016, DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491859.

Anton M. Aleksandrin

Senior Lecturer
Radio Engineering Department,
Siberian Federal University
79 Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7-965-897-67-92
Email: aalexandrin@sfu-kras.ru

Yury P. Salomatov

Head of Radio Engineering Department
Siberian Federal University
79 Svobodny st. Krasnoyarsk, Russia, 660041
Phone: +7 (391-2) 91-22-78
Email: ysalomatov@sfu-kras.ru