

## Плоская линза Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы

К.А. Быков<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>2</sup>, В.А. Пендюрин<sup>3</sup>, Ф.С. Сафонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSR Corporation  
394030, Россия, г. Воронеж,  
ул. Свободы, 69

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет  
394006, Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия Октября, 84

<sup>3</sup> АО НПП «Автоматизированные системы связи»  
394062, Россия, г. Воронеж,  
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

**Аннотация** – Для запитки сверхширокополосных фазированных антенных решеток с полноазимутальным сканированием перспективным является использование печатной линзы Люнеберга. В данной статье описана модель построения плоской линзы Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы. На покрытой медью подложке был вытравлен определенный узор (шаблон) с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r \approx 1$ . Это делалось для того, чтобы реализовать значение показателя преломления. Путем печати сетки из пересекающихся проводящих линий в центре линзы был достигнут показатель преломления  $\sqrt{2}$ . Диаметр линзовой антенны Люнеберга был выбран равным 28,6 см, что соответствует  $12,4\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны свободного пространства) для достижения ширины луча половинной мощности  $\approx 5^\circ$  при расчетной частоте до 20 ГГц. Поскольку конструкция линзы Люнеберга основана на геометрической оптике, диаметр линзы должен быть кратен длине волны, чтобы ограничить дифракционные эффекты. Были выбраны рабочие частоты до 20 ГГц. Линза была дискретизирована на единичные ячейки. При достаточно малом размере элементарных ячеек линза может быть описана как среда с определенным эффективным показателем преломления. В результате эта теория распространения может быть применена для проектирования линзы. Подложка, взятая для линзы, была толщиной 1 мм, используемый материал – Rohacell 31HF, который имеет диэлектрическую проницаемость 1,046 и тангенс потерь  $\text{tg}(\delta) = 0,002$ .

**Ключевые слова** – широкополосные антенны, линза Люнеберга, многолучевые антенные системы, изготовление печатных плат.

### Введение

Для запитки сверхширокополосных фазированных антенных решеток (ФАР) с полноазимутальным сканированием перспективным является использование печатной линзы Люнеберга. Линзы Люнеберга обладают способностью преобразовывать точечный источник возбуждения в плоскую волну, которая образуется на другом крае линзы. Это свойство делает линзы Люнеберга привлекательными для использования в широкополосных сканирующих антенных системах и обеспечивает им высокий коэффициент усиления и радиальную симметрию.

Линзы Люнеберга имеют значение показателя преломления ( $n$ ), заданное отношением:

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

где  $r$  – нормализованный радиус.

Традиционно эти линзы изготавливались с использованием дискретных слоев материалов с различной диэлектрической проницаемостью, приближенной к показателю преломления (1) [2; 3].

В работе [3] было показано, что использование 10 слоев было достаточно для имитации непрерывного изменения показателя преломления, необходимого для проектирования объектива диаметром 45,7 см в X-диапазоне. Необходимые значения показателя преломления были достигнуты путем изменения толщины параллельного пластичного волновода, работающего в режиме  $TE_{01}$ . В работах [5; 6] для того, чтобы контролировать показатель преломления, диэлектрик был введен внутрь пластичного параллельного волновода с небольшими отверстиями.

Добавление небольших отверстий снизило эффективную диэлектрическую проницаемость подложки за счет уменьшения количества диэлектрика на единицу объема. Все эти способы изготовления являются трудоемкими и дорогостоящими, так как они включают в себя связывание различных диэлектриков, контурирование диэлектрика или сверление многочисленных отверстий. Совсем недавно была изготовлена линза Люнеберга для варьирования показателей пре-

ломления при помощи вытравливания небольших отверстий на одной стороне печатной платы [7]. Работая в режиме  $TE_{01}$ , эта линза и вытравленные отверстия меняли индуктивность волновода или показатель преломления. Однако эти расстояния между прямоугольными отверстиями приводили к анизотропии. Кроме того, этот режим по своей сути является ограниченной полосой пропускания. В статье описана модель построения плоской линзы Люнеберга на основе печатной схемы с проводниками криволинейной формы [8].

## 1. Концепция

На покрытой медью подложке был вытравлен определенный узор (шаблон) с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r \approx 1$ . Это делалось для того, чтобы реализовать значение показателя преломления, заданного формулой (1). Путем печати сетки из пересекающихся проводящих линий в центре линзы был достигнут показатель преломления  $\sqrt{2}$ .

Рассмотрим распространение радиоволн вдоль одной из главных осей, как показано на рис. 1.

Для симметрии, магнитные стенки размещены по обе стороны от проводящих линий. В разомкнутом поперечном контуре каждая линия является проводящей. Учитывая добавленную емкость разомкнутых заглушек [9–11] и предполагая, что расстояние между линиями намного меньше управляемой длины волны, постоянная распространения нагруженной линии в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем у ненагруженной линии. Поскольку линии передачи, используемые в этой линзе, неидеальны, для увеличения показателя преломления до  $\sqrt{2}$  потребовалась некоторая степень извилистости сетки. С помощью простого параллельного пластинчатого волновода показатель преломления, на краю линзы был достигнут  $n \approx 1$ . Плавный переход между извилистыми, пересекающимися передающими линиями и параллельным плоским волноводом использовался для изменения показателя преломления от  $n \approx \sqrt{2}$  до  $n \approx 1$ . Переход между центром и краем заключался в уменьшении меандра и увеличении ширины линий. Проволочно-сеточные линзовые антенны Люнеберга [9] работают по сходным принципам. Однако в этих антеннах переход от  $n \approx \sqrt{2}$  до  $n \approx 1$  выполняется за счет увеличения расстояния между верхним проводником сетки и плоскостью заземления, вместо того чтобы просто печатать микрополосковые линии на подложке с равномерной толщиной, как это делается здесь.

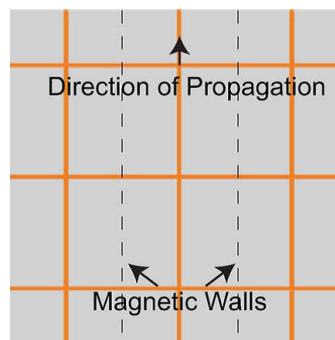


Рис. 1. Вид сверху на сетку из проводящих линий. Постоянная распространения радиоволн в сетке в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем в отдельной линии

Fig. 1. Top view of a grid of conducting lines. The propagation constant of radio waves in the grid is  $\sqrt{2}$  times greater than in a separate line

## 2. Конструкция линзы

Диаметр линзовой антенны Люнеберга был выбран равным 28,6 см, что соответствует  $12,4\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны свободного пространства) для достижения ширины луча половинной мощности  $\approx 5^\circ$  при расчетной частоте до 20 ГГц. Поскольку конструкция линзы Люнеберга основана на геометрической оптике, диаметр линзы должен быть кратен длине волны, чтобы ограничить дифракционные эффекты. Были выбраны рабочие частоты до 20 ГГц. Линза была дискретизирована на единичные ячейки. При достаточно малом размере элементарных ячеек линза может быть описана как среда с определенным эффективным показателем преломления. В результате эта теория распространения может быть применена для проектирования линзы. Подложка, используемая для линзы, была толщиной 1 мм, используемый материал – Rohacell 31HF, имеет диэлектрическую проницаемость 1,046 и тангенс потерь  $\text{tg}(\delta) = 0,002$ .

Поскольку размер элементарной ячейки и высота подложки сопоставимы, микрополосковые линии не являются идеальными линиями передачи. Следовательно, эффективный индекс элементарной ячейки не может быть увеличен до 101,6 мкм простым пересечением микрополосковых линий. Поэтому для увеличения фазовой задержки по всей элементарной ячейке (или эквивалентного увеличения показателя преломления) проводящие линии в центре линзы были извилистыми в виде синусоидальной волны. Амплитуда синусоидальной волны уменьшалась по мере увеличения расстояния от центра линзы. Это позволило добиться постепенного снижения показателя преломления. Как только амплитуда синусоидального меандра

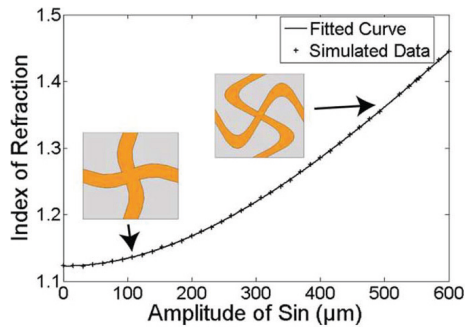
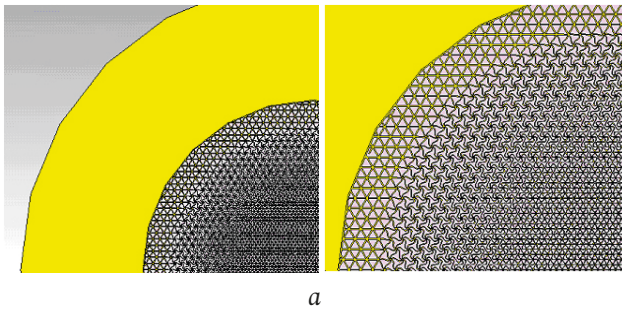
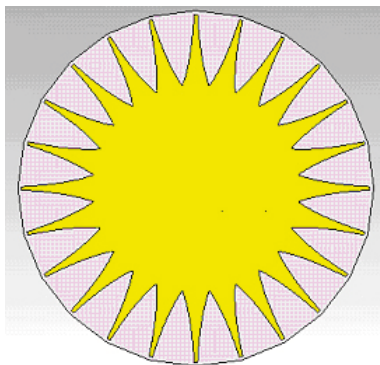


Рис. 2. Результаты параметрических разверток и влияние элементарной ячейки на показатель преломления  
 Fig. 2. Results of parametric scans and the effect of the unit cell on the refractive index



a

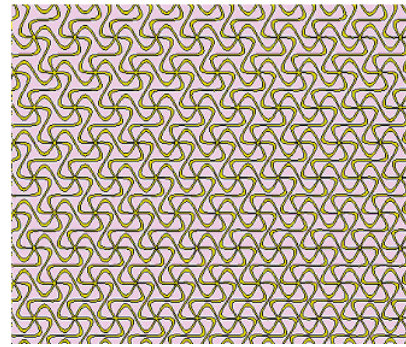


б

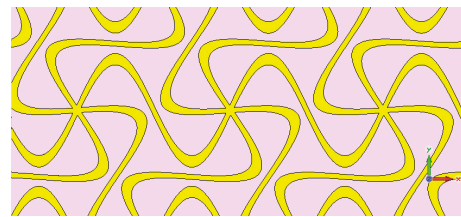
Рис. 3. Печатная линза Лüneберга: а - фрагмент стороны линзы с печатной замедляющей структурой (рис. 4); б - трансформаторы на основе НПЛ, запитывающие линзу  
 Fig. 3. Printed Luneberg lens: a - a fragment of the lens side with a printed retarding structure (Fig. 4); b - NPL-based transformers that power the lens

была снижена до нуля, ширина пересекающихся микрополосковых линий была увеличена, чтобы еще больше уменьшить показатель преломления и достичь  $n = \sqrt{2}$  на краю линзы. Чтобы определить, как амплитуда синусоидальной волны влияет на показатель преломления элементарной ячейки, была выполнена параметрическая развертка (рис. 2).

Чтобы смоделировать показатель преломления в зависимости от стреловидной переменной, к данным была применена полиномиальная подгонка. Данная конструкция может работать и на более высоких частотах (более 20 ГГц), но для это-



a



б

Рис. 4. Топология замедляющей системы печатной линзы Лüneберга: а - стандартном виде; б - увеличенном виде, соответствует изменению коэффициента замедления по закону

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$$

Fig. 4. The topology of the slow-wave system of the printing lens in Luneburg: a - standard; b - the increased form corresponds to the change in the deceleration coefficient according to the law

$$n(r) = \sqrt{2 - (r/r_0)^2}$$

го необходимо уменьшать ширину линии и толщину подложки. Известные методы литографии печатных плат могут уменьшить ширину линии в 10 раз. Толщина подложки также может быть дополнительно уменьшена. Однако минимальная толщина подложки Rohacell, которая может быть достигнута, все еще нуждается в исследовании. Для получения представления о максимально возможном показателе преломления, который может быть достигнут с помощью этой меандровой линейной методики, было проведено моделирование ячейки с большей амплитудой синусоидальной волны и более узкой шириной линии. Было показано, что можно достичь показателя преломления  $n = 1,72$ , если уменьшить ширину линии до 34 мкм и увеличить амплитуду синусоидальной волны до 700 мкм. Если высоту подложки дополнительно уменьшить до 250 мкм, то можно достичь показателя преломления  $n = 2,34$ . В данном случае была выбрана подложка толщиной 1 мм, поскольку это минимальная толщина подложки, имеющаяся в продаже. На рис. 3 показан внешний вид печатной линзы Лüneберга с диаметром платы 500 мм. Диаметр ДОС  $2r_0 = 286$  мм. Толщина устройства - 1 мм. Материал - Rohacell 31 HF ( $\epsilon_r = 1,046$ ,  $\text{tg}(\delta) = 0,002$  на частотах до 20 ГГц.

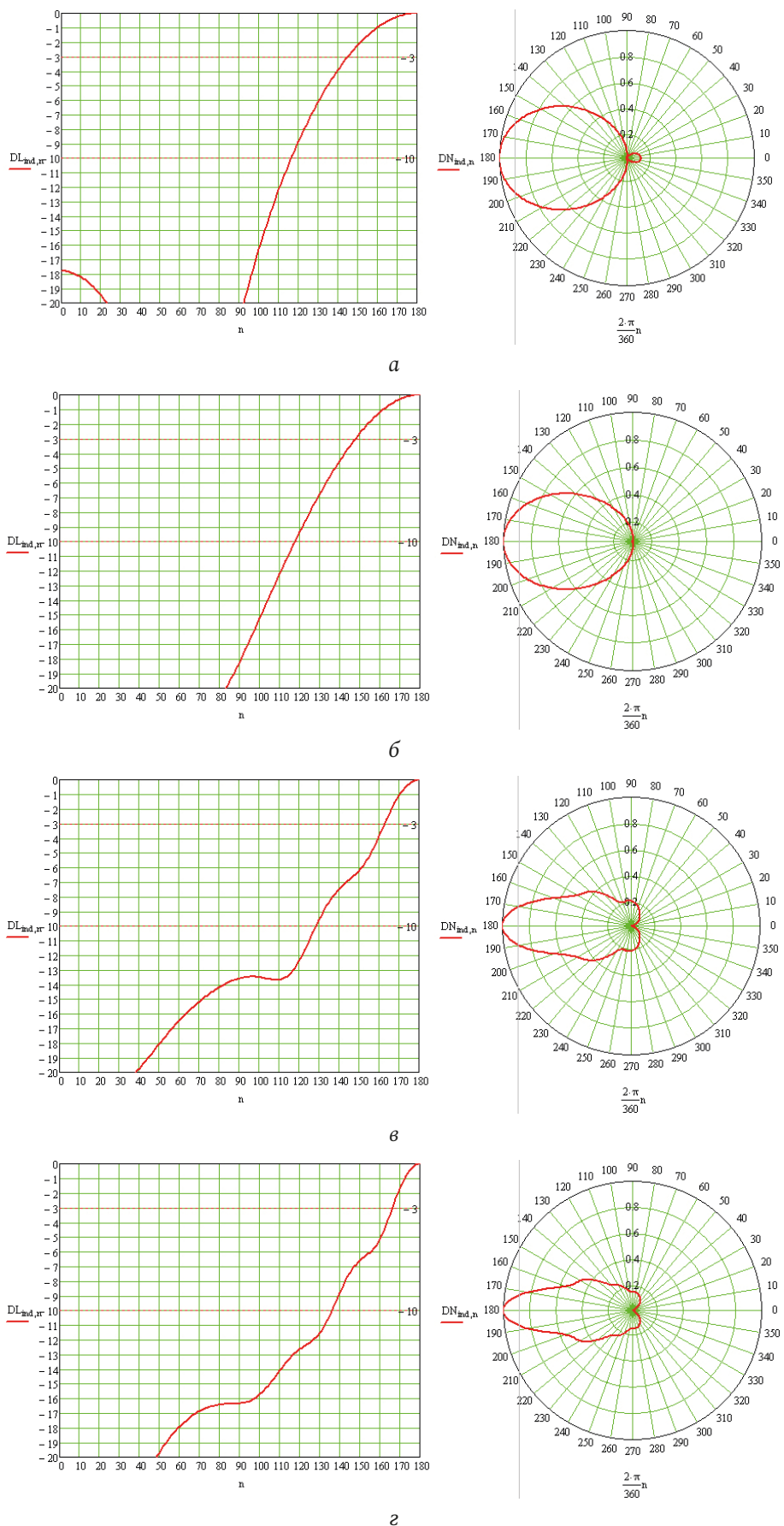


Рис. 5. Диаграммы направленности в азимутальной плоскости (слева – в дБ, справа – в линейном масштабе): а –  $f = 0,5$  ГГц; б –  $f = 1,0$  ГГц; в –  $f = 2,0$  ГГц; г –  $f = 2,75$  ГГц  
 Fig. 5. Azimuthal radiation patterns (left – in dB, right – in linear scale): а –  $f = 0,5$  GHz; б –  $f = 1,0$  GHz; в –  $f = 2,0$  GHz; г –  $f = 2,75$  GHz

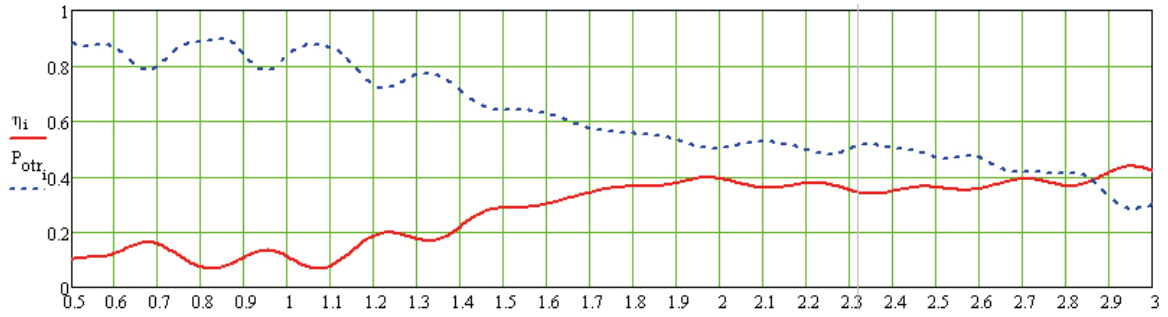


Рис. 6. Частотная зависимость КПД (сплошная линия) и мощность рассеянная в балластах (штриховая линия)  
 Fig. 6. Frequency dependence of the efficiency (solid line) and the power scattered in the ballasts (dashed line)

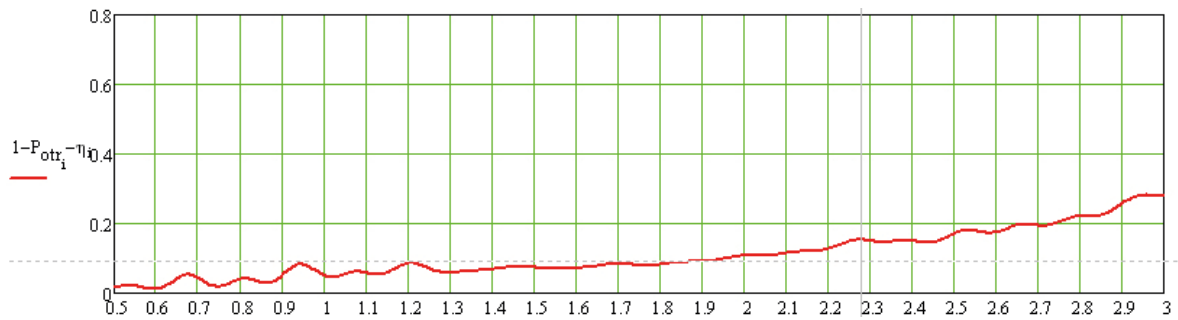


Рис. 7. Частотная зависимость омических и тепловых потерь в материалах линзы  
 Fig. 7. Frequency dependence of ohmic and thermal losses in the lens materials

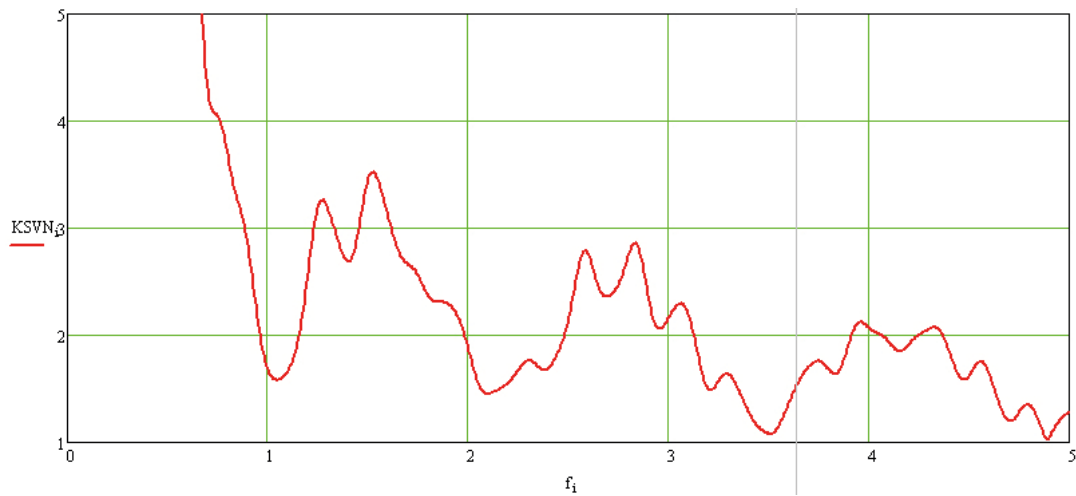


Рис. 8. Частотная зависимость КСВН  
 Fig. 8. VSWR frequency dependence

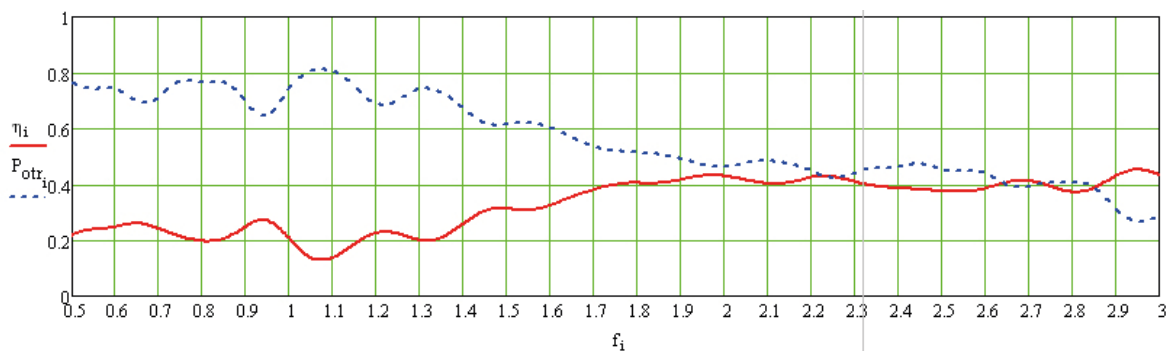


Рис. 9. КПД и доля мощности в балластах при нагрузке по 3 порта с каждой стороны от активного порта (всего 6) на балластные резисторы 50 Ом  
 Fig. 9. Efficiency and power share in ballasts when loading 3 ports on each side of the active port (6 in total) on 50 Ohm ballast resistors

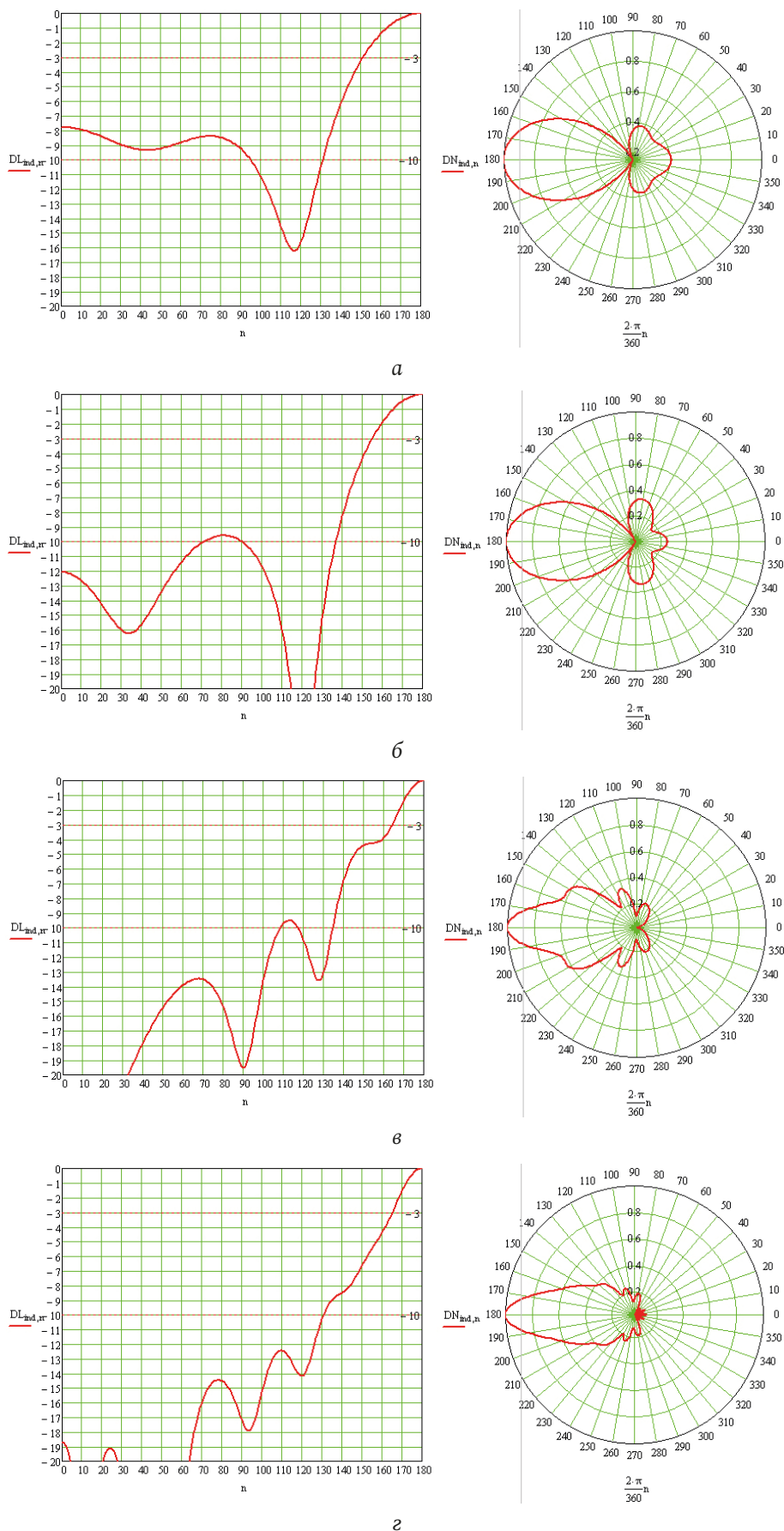


Рис. 10. ДН в азимутальной плоскости (слева – в дБ, справа – в линейном масштабе): а –  $f = 0,5$  ГГц; б –  $f = 1,0$  ГГц; в –  $f = 2,0$  ГГц; г –  $f = 2,75$  ГГц  
 Fig. 10. DN in the azimuthal plane (left – in dB, right – in linear scale): а –  $f = 0,5$  GHz; б –  $f = 1,0$  GHz; в –  $f = 2,0$  GHz; г –  $f = 2,75$  GHz

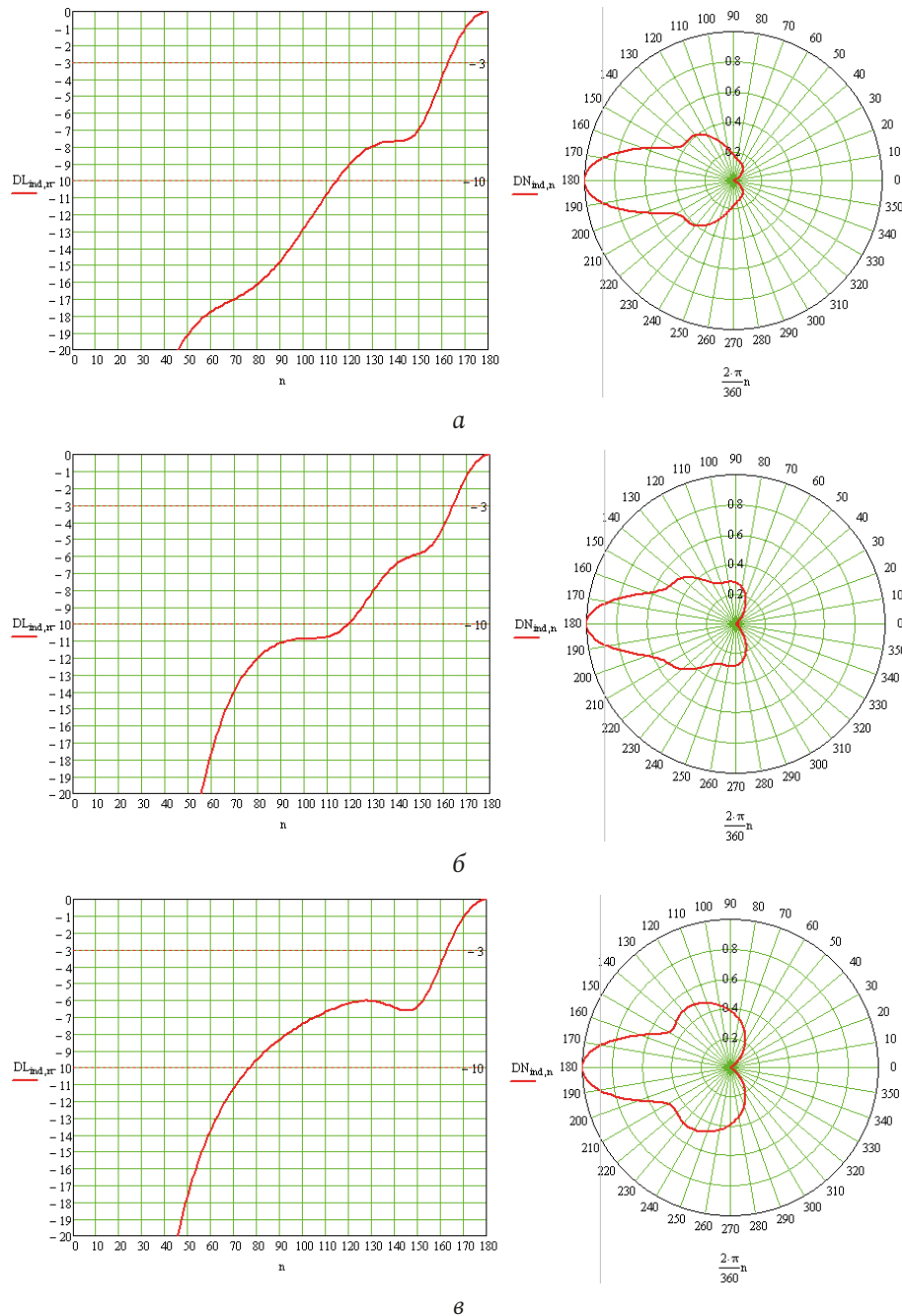


Рис. 11. ДН в азимутальной плоскости (слева – в дБ, справа – в линейном масштабе): а –  $f = 3,0$  ГГц; б –  $f = 4,0$  ГГц; в –  $f = 4,5$  ГГц  
 Fig. 11. DN in the azimuthal plane (left – in dB, right – in linear scale): а –  $f = 3,0$  GHz; б –  $f = 4,0$  GHz; в –  $f = 4,5$  GHz

### 3. Результаты численного моделирования

Диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости кольцевой ФАР диаметром 286 мм с элементами, обладающими кардиоидной ДН, запитанной с помощью печатной линзы Люнеберга, состоящей из элементов с кардиоидной ДН по 6 портов с каждой стороны от активного порта (всего 12), нагружены на балластные резисторы 50 Ом и показаны на рис. 5 (линейный масштаб).

Частотная зависимость коэффициента полезного действия (КПД) (сплошная линия) и мощность,

рассеянная в балластах (штриховая линия), показаны на рис. 6.

Частотная зависимость омических и тепловых потерь в материалах линзы отражена на рис. 7, частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) – на рис. 8.

Для изучения свойств построенной линзы Люнеберга мы прибегли к изменению различных параметров антенной системы, одним из которых было уменьшение числа портов, нагруженных на балластные резисторы. Уменьшение вдвое числа портов, нагруженных на балластные резисторы,

позволило нам увеличить КПД, но диаграмма направленности, наоборот, стала искажаться. Это продемонстрировано на рис. 9, 10.

На рис. 10 показаны искаженные диаграммы направленности (в связи с уменьшением числа портов, нагруженных на балластные резисторы) кольцевой АР диаметром 286 мм, состоящей из элементов с кардиоидной ДН по 3 порта с каждой стороны от активного порта (всего 6) нагружены на балластные резисторы 50 Ом

Далее мы предположили, что увеличение числа портов, нагруженных на балласты, даст обратный эффект и мы сможем расширить диаграмму направленности, то есть увеличить диапазон функционирования антенной системы вверх по частоте. В результате моделирования и численного измерения, увеличивая число портов, нагруженных на балласты (по 9 портов с каждой стороны от активного порта, всего 18), т. е. функционируют всего 5 элементов ФАР, мы добились расширения диапазона функционирования антенной системы вверх по частоте у кольцевой АР диаметром 286 мм, состоящей из элементов с кардиоидной ДН по 9 портов с каждой стороны от активного порта (всего 18) нагружены на балластные резисторы 50 Ом (рис. 11).

## Заключение

Как видно, на основе печатной линзы Лüneберга возможно построение ФАР, функционирующих в полосе частот с перекрытием до 9.

Отметим основные факторы, ограничивающие полосу рабочих частот при заданном секторе сканирования:

- частотная зависимость комплексной ДН элементов ФАР в составе решетки;
- геометрия ФАР (в частности ее период, зависящий от размеров антенных элементов);

– характеристики портов, запитывающих тело линзы Лüneберга: направленные свойства, частотная зависимость коэффициента отражения и развязка между соседними портами.

Достоинством линзы Лüneберга в печатном исполнении является осесимметричность, вследствие чего диаграммы направленности ФАР значительно отличаются друг от друга при запитке от передающего средства различных портов. При этом степень анизотропии тела линзы несущественна благодаря использованию треугольной сетки замедляющей структуры.

Линза Лüneберга может быть реализована по технологии изготовления несимметричных печатных плат (замедляющая структура расположена между двумя земляными металлическими пластинами). Пластичность материала Rohacell 31 HF позволяет свернуть подобную линзу в рулон, тем самым уменьшив ее габаритные размеры. Пространственное распределение электромагнитной волны при этом изменяется незначительно.

Отметим также, что линза Лüneберга с печатными проводниками может быть реализована также на материалах с диэлектрической проницаемостью около 2 – в этом случае линза должна быть с оболочкой.

Основное направление совершенствования печатных линз Лüneберга мы видим в совершенствовании характеристик портов с целью расширения полосы рабочих частот и повышения КПД устройств, для чего необходимо снижать мощность рассеяния волн в балластных резисторах.

Сверхширокая полоса рабочих частот, возможность использования усилителей мощности в каждом из каналов печатных ДОС, высокая технологичность делают перспективным их использование в аппаратуре радиопеленгации.

## Список литературы

1. Luneburg R.K. *Mathematical Theory of Optics*. Providence: Brown University Press, 1944. 401 p. DOI: <https://doi.org/10.1525/9780520328266>
2. Gunderson L.C., Holmes G.T. Microwave Luneburg lens // *Applied Optics*. 1968. Vol. 7, no. 5. P. 801–804. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.7.000801>
3. Peeler G., Coleman H. Microwave stepped-index Luneburg lenses // *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. 1958. Vol. 6, no. 2. P. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1958.1144575>
4. Peeler G., Archer D. A two-dimensional microwave Luneberg lens // *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*. 1953. Vol. 1, no. 1. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/t-ap.1953.27321>
5. Xue L., Fusco V.F. 24 GHz automotive radar planar Luneburg lens // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2007. Vol. 1, no. 3. P. 624–628. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map:20050203>
6. Sato K., Ujiie H. A plate Luneberg lens with the permittivity distribution controlled by hole density // *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*. 2002. Vol. 85, no. 9. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecja.1120>
7. Xue L., Fusco V.F. Printed holey plate Luneburg lens // *Microwave and Optical Technology Letters*. 2008. Vol. 50, no. 2. P. 378–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.23087>



8. Pfeiffer C., Grbic A. A 2D broadband, printed Luneburg lens antenna // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2009. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/aps.2009.5171945>
9. Tanner R., Andreasen M. A wire-grid lens antenna of wide application part I: The wire-grid lens – Concept and experimental confirmation // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1962. Vol. 10, no. 4. P. 408–415. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1962.1137888>
10. Johns P.B., Beurle R.L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1971. Vol. 118, no. 9. P. 1203–1208. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1971.0217>
11. Brewitt-Taylor C.R., Johns P.B. On the construction and numerical solution of transmission-line and lumped network models of Maxwell's equations // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1980. Vol. 15, no. 1. P. 13–30. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.1620150103>

## References

1. Luneburg R.K. *Mathematical Theory of Optics*. Providence: Brown University Press, 1944, 401 p. DOI: <https://doi.org/10.1525/9780520328266>
2. Gunderson L.C., Holmes G.T. Microwave Luneburg lens. *Applied Optics*, 1968, vol. 7, no. 5, pp. 801–804. DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.7.000801>
3. Peeler G., Coleman H. Microwave stepped-index Luneburg lenses. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1958, vol. 6, no. 2, pp. 202–207. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1958.1144575>
4. Peeler G., Archer D. A two-dimensional microwave Luneberg lens. *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*, 1953, vol. 1, no. 1, pp. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/t-ap.1953.27321>
5. Xue L., Fusco V.F. 24 GHz automotive radar planar Luneburg lens. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2007, vol. 1, no. 3, pp. 624–628. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-map:20050203>
6. Sato K., Ujiie H. A plate Luneberg lens with the permittivity distribution controlled by hole density. *Electronics and Communications in Japan (Part I: Communications)*, 2002, vol. 85, no. 9, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecja.1120>
7. Xue L., Fusco V.F. Printed holey plate Luneburg lens. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 378–380. DOI: <https://doi.org/10.1002/mop.23087>
8. Pfeiffer C., Grbic A. A 2D broadband, printed Luneburg lens antenna. *2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2009, pp. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/aps.2009.5171945>
9. Tanner R., Andreasen M. A wire-grid lens antenna of wide application part I: The wire-grid lens – Concept and experimental confirmation. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1962, vol. 10, no. 4, pp. 408–415. DOI: <https://doi.org/10.1109/tap.1962.1137888>
10. Johns P.B., Beurle R.L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1971, vol. 118, no. 9, pp. 1203–1208. DOI: <https://doi.org/10.1049/piee.1971.0217>
11. Brewitt-Taylor C.R., Johns P.B. On the construction and numerical solution of transmission-line and lumped network models of Maxwell's equations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1980, vol. 15, no. 1, pp. 13–30. DOI: <https://doi.org/10.1002/nme.1620150103>

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 1, pp. 48–57

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.1.48-57

Received 12 January 2021  
 Accepted 15 February 2021

### Flat Luneberg lens based on a printed circuit with curved conductors

Konstantin A. Bykov<sup>1</sup>, Yuri G. Pasternak<sup>2</sup>, Vladimir A. Pendyurin<sup>3</sup>, Fyodor S. Safonov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DSR Corporation

69, Svobody Street,

Voronezh, 394030, Russia

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University

84, 20-letiya Oktyabrya Street,

Voronezh, 394006, Russia

<sup>3</sup> JSC NPP «Automated communication systems»

108, Peshe-Streletskaia Street,

Voronezh, 394062, Russia

*Abstract* – The use of a printed Luneberg lens is promising for powering ultra-wideband phased array antennas with full-azimuth scanning. This article describes in detail the model for constructing a flat Luneberg lens based on a printed circuit with curved conductors. A certain pattern (pattern) with a relative permittivity  $\epsilon_r \approx 1$  was etched on the copper-coated substrate. This was done in order to realize the value of the refractive index. By printing a grid of intersecting conducting lines, a refractive index of  $\sqrt{2}$  was achieved in the center of the lens. The diameter of the Luneberg lens antenna was chosen to be 28.6 cm, which

corresponds to  $12,4\lambda_0$  ( $\lambda_0$  is the wavelength of free space) to achieve a half-power beam width of  $\approx 5^\circ$  at an estimated frequency of up to 20 GHz. Since the design of the Luneberg lens is based on geometric optics, the lens diameter must be a multiple of the wavelength to limit diffraction effects. Operating frequencies up to 20 GHz were selected. The lens was sampled into single cells. If the unit cell size is small enough, the lens can be described as a medium with a certain effective refractive index. As a result, this propagation theory can be used for lens design. The substrate used for the lens was 1 mm thick, the material used was Rohacell 31HF, which has a permittivity of 1,046 and a loss tangent of  $\text{tg}(\delta) = 0,002$ .

*Keywords* – wideband antennas, Luneberg lens, multibeam antenna systems, the manufacture of printed circuit boards.

## Информация об авторах

**Быков Константин Александрович**, программист DSR Corporation, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.  
*E-mail:* bykov.konst.al@mail.ru

**Пастернак Юрий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.  
*E-mail:* pasternakyg@mail.ru

**Пендюрин Владимир Андреевич**, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.  
*E-mail:* infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Сафонов Федор Сергеевич**, аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, директор регионального консультационного центра «ОПОРА», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.  
*E-mail:* safonov\_fedia93@mail.ru

## Information about the Authors

**Konstantin A. Bykov**, programmer at DSR Corporation, Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.  
*E-mail:* bykov.konst.al@mail.ru

**Yuri G. Pasternak**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.  
*E-mail:* pasternakyg@mail.ru

**Vladimir A. Pendyurin**, Director General of JSC NPP «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

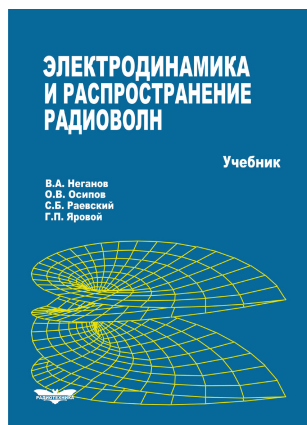
*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.  
*E-mail:* infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Fyodor S. Safonov**, post-graduate student of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Director of the regional consulting center «ОПОРА», Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.  
*E-mail:* safonov\_fedia93@mail.ru

**Неганов, В.А.**

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)

ББК 22.3

Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

*Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.*