

УДК 621.372

МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ АНТЕННЫ НА ПАРАБОЛИЧЕСКИХ РЕШЕТКАХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ¹

Трубин О. О., д.т.н., профессор,

Учебно-научный институт телекоммуникационных систем.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», Киев, Украина*

atrubin@ukrpost.net

MULTIPLE-UNIT ANTENNAS ON PARABOLOIDAL LATTICES OF DIELECTRIC RESONATORS

A.Trubin, Doctor of Engineering, Professor

Educational Scientific Institute of Telecommunication Systems

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Введение

В настоящее время формирование диаграмм направленности поля излучения антенн чаще всего осуществляется путем применения металлических отражающих поверхностей различных форм, либо с помощью эффектов преломления волн в линзах, выполняемых обычно из искусственных диэлектриков [1]. Резонансные явления чаще всего рассматриваются как нежелательные и не используются. Исключением из этого являются диэлектрические резонаторы (ДР). Не смотря на то, что антенны, выполненные на основе одиночных ДР, известны достаточно давно [2], свойства многоэлементных решеток этого класса исследованы не достаточно [3–7]. Между тем, известны ДР, изготовленные из диэлектриков, обладающих очень малыми потерями по сравнению с металлическими не только в миллиметровом, но и инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн [8–9], поэтому исследование возможности их применения в качестве многоэлементных антенн в указанных диапазонах представляет значительный практический интерес. Сегодня свойства многоэлементных антенн, построенных на основе ДР, исследованы далеко не в полной мере.

Возможность реализации антенн, выполненных на основе связанных ДР, основывается на идее использования их отражающих свойств, проявляемых в резонансной области их собственных частот. При этом для достижения приемлемых параметров направленности и КПД антенн, требуется достижение достаточно высоких значений коэффициентов отражения. Подобные антенны, построенные на основе решеток ДР, выгодно использовать в компактных многочастотных системах миллиметрового и субмил-

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/834>

лиметрового діапазону довжин волн, т.к. наряду з очень малими потерями вони будуть мати удосконалені параметри електромагнітної сумісності в вигляді їх «прозорості» поза робочих частотних діапазонів.

В даному повідомленні розглядається можливість побудови антен, виконуваних на основі застосування параболічних решіток різних видів і складених з ДР циліндричної форми з нижчими магнітними типами коливань. Встановлено висока відбиваюча здатність таких решіток в резонансній області. Розраховані основні електричні параметри антен; показано можливість помітного зростання коефіцієнта посилення при збільшенні ефективної поверхні решіток.

Конструкції антен

Як показують дослідження по розсіяню ЕМВ на решітках ДР, їх відбиваючі властивості в резонансній області виявляються дуже важливими, що дозволяє запропонувати і реалізувати на їх основі новий клас антен ультракоротких діапазонів довжин волн, аналогічний металічним дзеркальним антенним. Роль металічних дзеркал в таких антенних будовах будуть грати решітки ДР різних форм.

На рис. 1, а–в наведені простіші конструкції $5 \times 5 + 1$ елементних антенних решіток. В площині (x, y) координати центрів резонаторів утворюють квадратну решітку з кроком $d = \lambda_0 / 4$, де λ_0 — довжина хвилі в відкритому просторі на частоті ω_0 основних власних коливань резонаторів H_{101}^+ . Будемо вважати, що центри резонаторів розподіляються на будь-якій параболічній поверхні [1], що утворює:

$$\begin{aligned} x^2 &= 4fz \text{ — параболічний циліндр, зображений на рис. 1, а;} \\ y^2 &= 4fz \text{ — параболічний циліндр, зображений на рис. 1, б и} \quad (1) \\ x^2 + y^2 &= 4fz \text{ — параболоїд обертання — рис. 1, в.} \end{aligned}$$

Тут f — фокусне відстань параболоїда.

Припустимо що в якості облучача антени застосовується активний циліндричний ДР, живлений петлею металічного провідника, з'єднаною, наприклад, з коаксіальною лінією передачі.

Розрахунок параметрів антени

При проведенні обчислень поле розсіяння, створюване решіткою ДР в ближній зоні, в області її резонансних частот представлялось в вигляді суперпозиції полів кожного з парціальних резонаторів:

$$\begin{Bmatrix} \vec{e}(\omega, x, y, z) \\ \vec{h}(\omega, x, y, z) \end{Bmatrix} = \sum_{s=1}^N A_s(\omega) \begin{Bmatrix} \vec{e}_s(x, y, z) \\ \vec{h}_s(x, y, z) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

де $A_s(\omega)$ — комплексна амплітуда змушених коливань s — го

парциального ДР на частоті ω [10]:

$$A_s(\omega) = -\frac{Q^D}{\omega_0} \cdot \sum_{t=1}^N \frac{\det C_t}{\det B} \cdot \frac{b_s^t}{Q_t(\omega)};$$

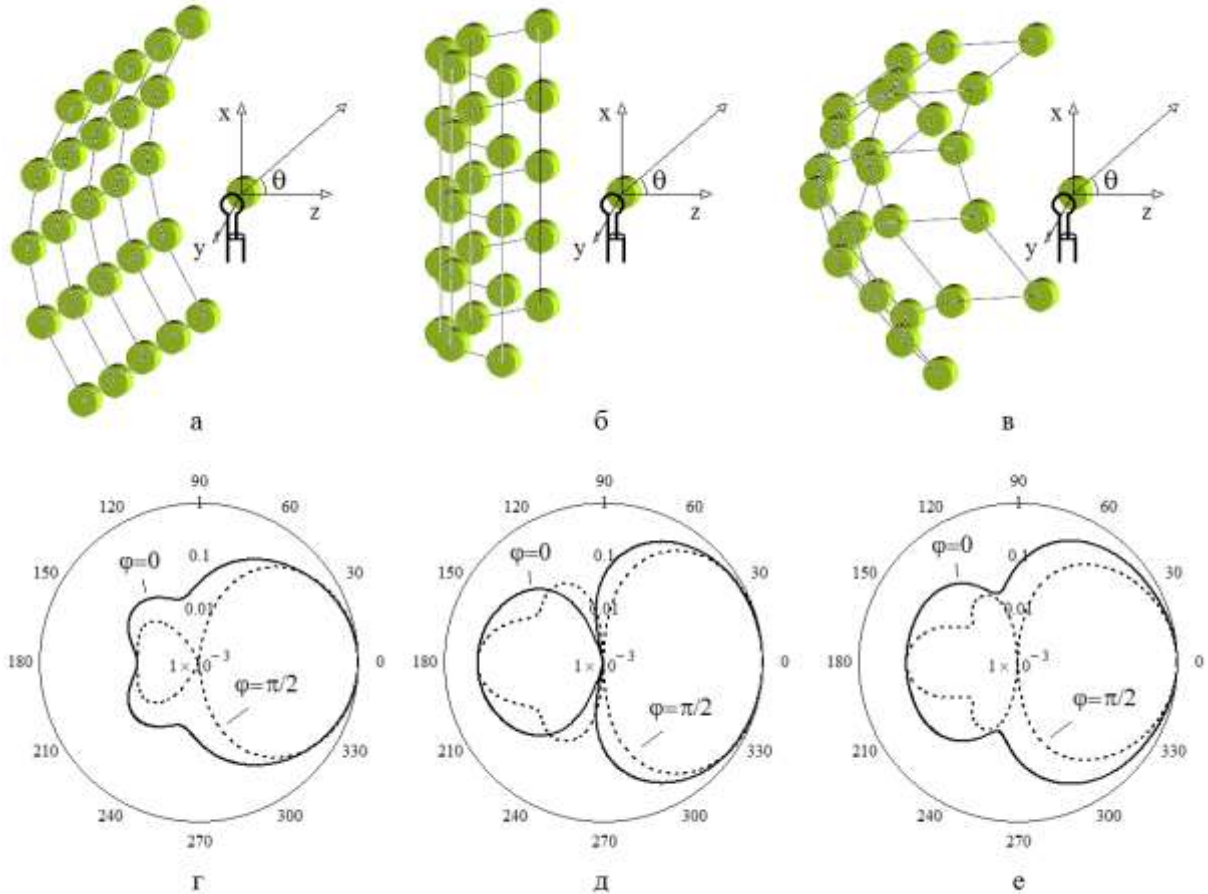


Рис 1. а–в — параболічні антенні решітки 5x5 циліндричних ДР; г–е — пунктирні криві — ДН решіток в Н площині; сплошні криві — ДН решіток в Е площині. Фокусне відстань решіток г, е: $f = 1,5d$; д: $f = 1,35d$.

(\vec{e}_s, \vec{h}_s) — поле s -го резонатора решітки в локальній прямокутній системі координат (x, y, z) ($s = 1, 2, \dots, N$); C_s і B — матриці, визначаються амплітудами зв'язаних коливань парціальних резонаторів $[b_s^t]$:

$$B = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_1^2 & \dots & b_1^N \\ b_2^1 & b_2^2 & \dots & b_2^N \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ b_N^1 & b_N^2 & \dots & b_N^N \end{bmatrix};$$

$$C_s = \begin{bmatrix} b_1^1 & b_1^2 & \dots & c_1^{+*}/w_1 & \dots & b_1^N \\ b_2^1 & b_2^2 & \dots & 0 & \dots & b_2^N \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \dots & \cdot \\ b_N^1 & b_N^2 & \dots & 0 & \dots & b_N^N \end{bmatrix};$$

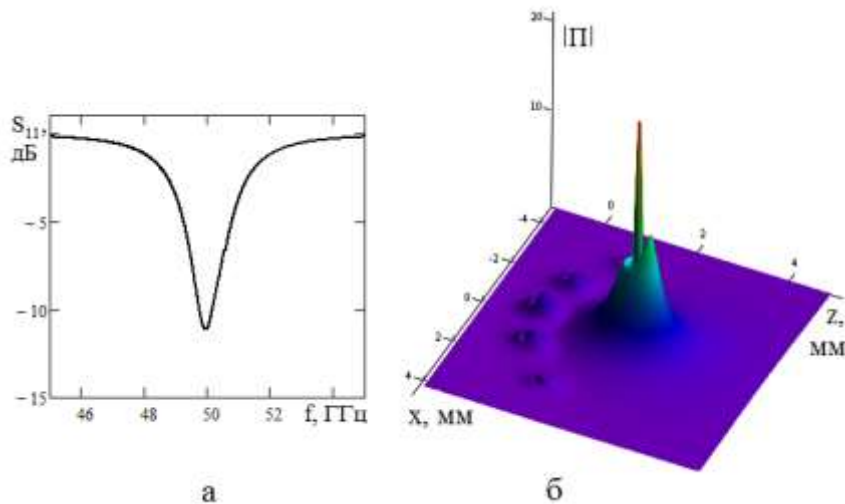


Рис. 2. а — частотная зависимость коэффициента отражения; б — распределение плотности потока мощности излучения резонаторов в ближней зоне решетки, показанной на рис. 1, а.

$Q_s(\omega) = \omega/\omega_0 + 2iQ^D(\omega/\omega_0 - 1 - \lambda_s/2)$; λ_s — собственное значение оператора K [11], соответствующее s -му собственному колебанию многосвязного ДР с вектором амплитуд парциальных резонаторов b^s ; ω — текущая частота; $Q^D = \epsilon_1/\epsilon_1''$; $\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 - i\epsilon_1''$ — относительная диэлектрическая проницаемость материала ДР; c_1^+ — коэффициент, характеризующий связь активного резонатора с коаксиальной линией; w_1 — энергия, запаасаемая в материале ДР. Коэффициенты связи рассчитывались по формулам [11].

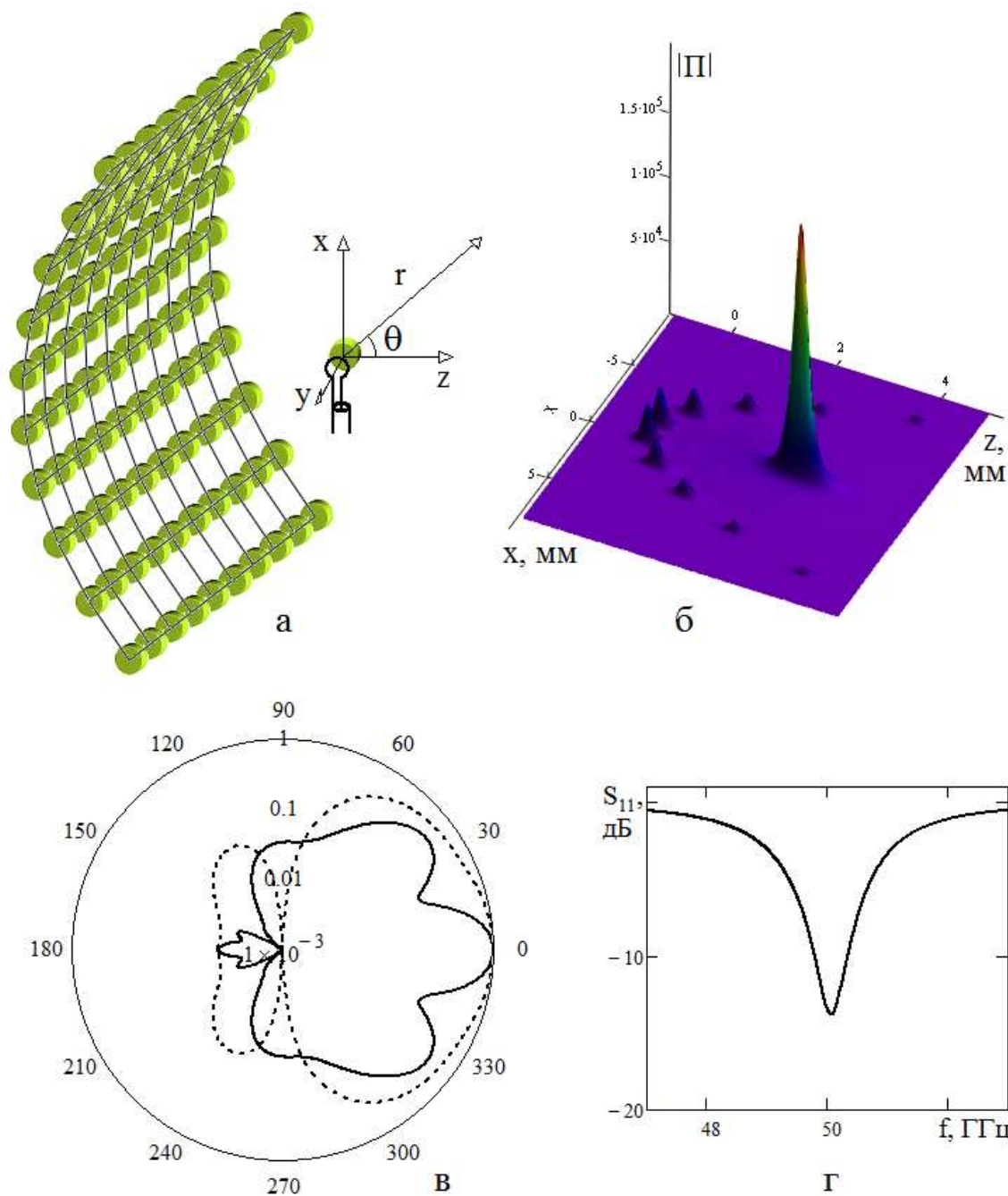


Рис. 3. а — параболическая антенная решетка 10x10 цилиндрических ДР и активного резонатора; б — распределение плотности потока мощности вблизи резонаторов решетки; в — пунктирная кривая — ДН решетки в H плоскости; сплошная кривая — в E плоскости; г — частотная зависимость коэффициента отражения. Коэффициент связи активного резонатора с линией: $kL = 0,035$; Период решетки вдоль оси x : $Lx = 2d$; оси y : $Ly = d$; фокусное расстояние $f = 1,9d$; $d = \lambda_0 / 8$.

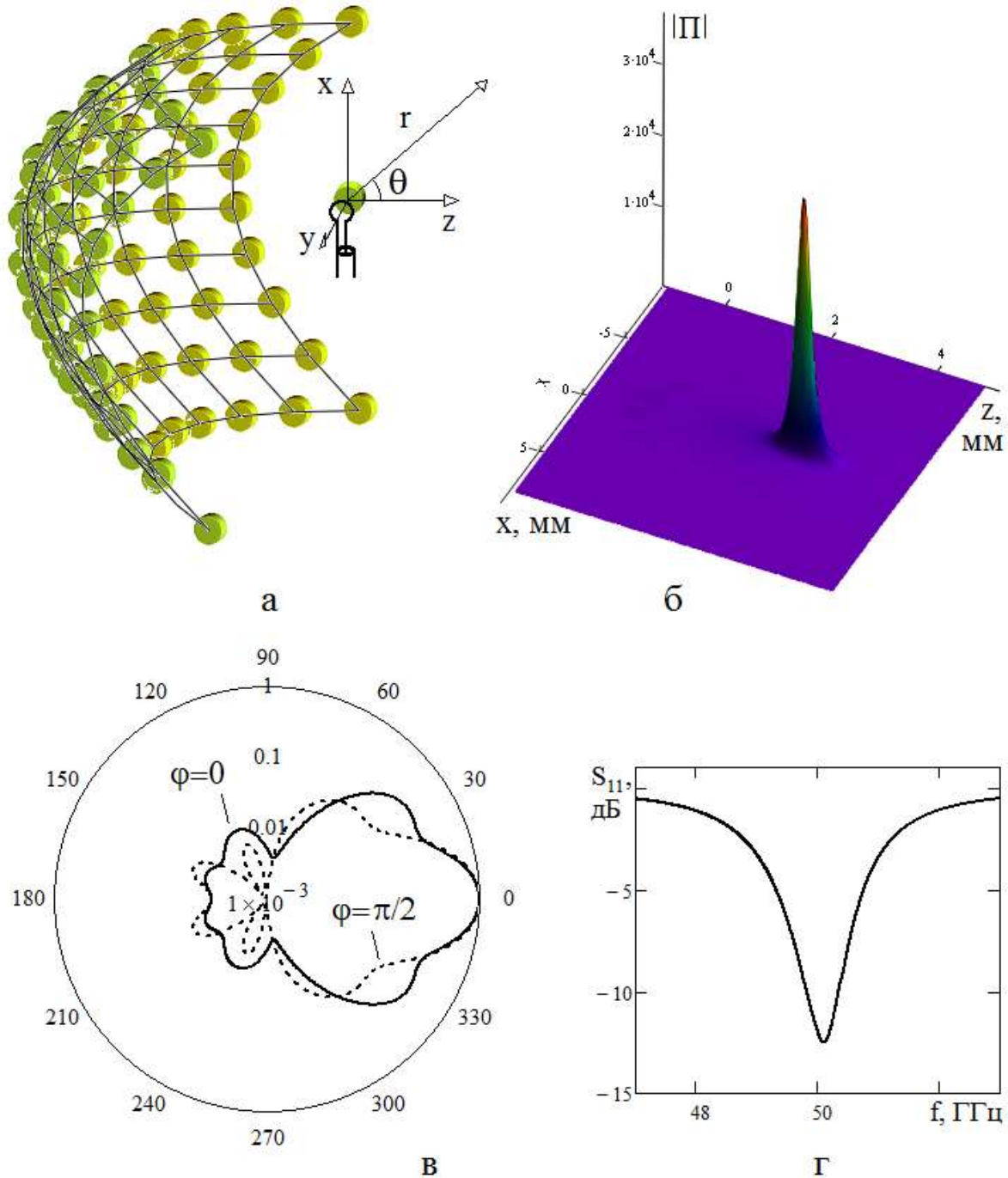


Рис. 4. а — параболічна антенна решітка 10x10 циліндричних ДР, питаєма активним резонатором; б — розподілення густоти потоку потужності вблизи резонаторів решітки; в — ДН решітки в Н плоскості — пунктирна крива; ДН решітки в Е плоскості — сплошна крива; г — частотна залежність коефіцієнта відбиття. Відстання між сусідніми резонаторами $d = \lambda_0 / 8$; коефіцієнт зв'язи активного резонатора з лінією: $kL = 0,035$; $L_x = L_y = d$; фокусне відстання $f = 2d$.

В хвильовій зоні поле парціальних ДР представлялось в сферическій системі координат (r, θ, φ) :

$$\vec{e}_s(r, \theta, \varphi) \approx \vec{e}^\infty(\theta, \varphi) \cdot e^{ik_0 d_t(\theta, \varphi)}. \quad (3)$$

Здесь $\vec{e}^\infty(\theta, \varphi)$ — поле одиночного цилиндрического ДР в волновой зоне [12]; $d_t(\theta, \varphi) = (x_t \cos \varphi + y_t \sin \varphi) \sin \theta + z_t \cos \theta$ функция, определяющая разность хода излучения парциальных ДР в направлении приемника.

Анализ параметров антенн

Взаимная связь между резонаторами приводит к перераспределению поля излучения активного ДР и как следует из данных, приведенных на рис. 1, г–е, ДН всей структуры в целом становится одно лепестковой с максимумом излучения, направленным ортогонально плоскости раскрыва решетки. Пример пространственного распределения плотности потока мощности в ближней зоне решетки приведен на рис. 2, б. Как следует из этих данных, наибольшая часть потока мощности оказывается сосредоточенной вблизи активного ДР. За решеткой поле подавлено.

Поскольку размер апертуры антенн равен $\lambda_0 \times \lambda_0$, направленные свойства их невелики; ДН решетки достаточно широкая. Увеличение числа резонаторов и соответственно площади поверхности решеток приводит к значительному улучшению их пространственной избирательности (рис. 3, 4). Так применение многоэлементных, например 10×10 решеток, в форме параболического цилиндра сжимает ДН в Е плоскости до 22° (рис. 3, в), а решеток в форме параболоидов вращения, сжимает ее более равномерно в Е и Н плоскости (рис. 4, в) приблизительно до 28° .

Ширина полосы коэффициента отражения по входу для антенн, выполненных из диэлектриков с $\varepsilon_{1r} = 81$; $\Delta = L / 2r_0 = 0,44$ (рис. 3–4, г) равна, приблизительно 1%. Здесь L — высота, $2r_0$ — диаметр ДР. Ширину рабочей полосы частот можно расширить, используя ДР с меньшими значениями диэлектрической проницаемости. Отметим, что данный недостаток не является критическим; в миллиметровом и более коротко волновых диапазонах рабочие полосы частот обычно не превышают несколько процентов.

Заключение

Таким образом, проведенные расчеты указывают на возможность практического применения решеток ДР в качестве отражающих частотно-селективных поверхностей и построения на их основе широкого класса частотно избирательных "зеркальных" антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Как следует из приведенных данных, основным недостатком таких антенн являются сравнительно узкие полосы рабочих частот, как правило не превышающие несколько процентов. Однако, этот недостаток может быть устранен за счет уменьшения величины диэлектрической проницаемости материала резонаторов, а также применения специальных структур связан-

них ДР. Крім цього, пропонувані решітки являються радіо прозорими вне рабочей полосы частот и следовательно менее подверженными воздействию помех. В дальнейшем, частотные характеристики предлагаемых антенн могут быть улучшены как за счет увеличения числа ДР, так и путем оптимизации их конструкций. Антенны на основе параболических решеток ДР могут быть использованы в базовых станциях беспроводного доступа систем WiFi и WiMax в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн.

Перечень источников

1. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ, Часть 1 / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин. – М. : Связь, 1977, 381 с.
2. Dielectric Resonator Antennas / Edited by K. M. Luk, K. W. Leung. – Research Studies Press Ltd. – 388 p.
3. Cheupe C. An Electromagnetic Bandgap Resonator Antenna / C. Cheupe, C. Serier, M. Thèvenot, T. Monédière, A. Reineix, B. Jecko // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 2002. – V. 50, №9. – P. 1285-1290.
4. Zhang Y. Analysis and Design of Wideband Dielectric Resonator Antenna Arrays for Waveguide-Based Spatial Power Combining / Y. Zhang, A.A. Kishk, A.B. Yakovlev, A.W. Glisson // Proceedings of the 36th European Microwave Conference. – 2006. – P. 642 – 645.
5. Ueda T. Leaky Wave Radiation from Left-Handed Transmission Lines Composed of a Cut-off Parallel-Plate Waveguide Loaded with Dielectric Resonators / T. Ueda, A. Lai, N. Michishita, T. Itoh // Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. – 2006. – P.1075 – 1079.
6. Kim J. Application of Cubic High Dielectric Resonator Metamaterial to Antennas / J. Kim, A. Gopinath // Antennas and Propagation Society International Symposium. – 2007. – P. 2349 – 2352.
7. Ueda T. Dielectric-Resonator-Based Composite Right/Left-Handed Transmission Lines and Their Application to Leaky Wave Antenna / T. Ueda, N. Michishita, M. Akiyama, T. Itoh // IEEE Trans. on MTT. – 2008. – v. 56, №10. – P. 2259-2269.
8. Sakuma T. Measurement of a Cylindrical Dielectric Resonator Antenna in Millimeter Wave Bands / T. Sakuma, K. Noguchi, M. Mizusawa, S. Betsudan, T. Katagi // Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE. – 2005. – vol. 3A. – P. 404-407.
9. Li J. Optical spectrometer at the nanoscale using optical Yagi-Uda nanoantennas / J. Li, J. Salandrino, N. Engheta // *Physical review B*. – 2009. – vol. 79, no. 19. – P. 1-5.
10. Трубин А.А. Рассеяние электромагнитных волн на параболических решетках диэлектрических резонаторов / А.А. Трубин // *Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение*. – 2011. – № 47. – с. 106-110.
11. Трубин О.О. Моделивання параметрів антенної решітки на циліндричних діелектричних резонаторах / О.О. Трубін, Г.С. Шмиглюк // *Вісник НТУУ «КПИ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2006. – № 33. – с. 101-108.
12. Трубин А.А. Исследование характеристик излучения дискового диэлектрического резонатора // Вестник Киев. Политехн. Ин-та, Радиотехника. – 1984 – Вып. 21. С. 29–33.

References

1. Aizenberg G.Z., Jampolsky V.G. and Tereshin O.N. (1977) *Antenny UKV, Chast' 1* [UWB Antennas, Part 1], Moskow, Svyaz' Publ., 381 p.

2. Luk K. M. eds. and Leung K. W. eds. (2003) *Dielectric Resonator Antennas*. – Research Studies Press Ltd. – 388 p.
3. Cheype C., Serier C., Thevenot M., Monediere T., Reineix A. and Jecko B. (2002) An Electromagnetic Bandgap Resonator Antenna. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 50, №9. – pp. 1285 – 1290.
4. Zhang Y., Kishk A.A., Yakovlev A.B. and Glisson A.W. (2006) Analysis and Design of Wideband Dielectric Resonator Antenna Arrays for Waveguide-Based Spatial Power Combining. *2006 European Microwave Conference*, pp. 642 – 645.
5. Ueda T., Lai A., Michishita N. and Itoh T. (2006) Leaky Wave Radiation from Left-Handed Transmission Lines Composed of a Cut-off Parallel-Plate Waveguide Loaded with Dielectric Resonators. *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 1075 – 1079.
6. Kim J. and Gopinath A. (2007) Application of Cubic High Dielectric Resonator Metamaterial to Antennas. *2007 IEEE Antennas and Propagation International Symposium*, pp. 2349 – 2352.
7. Ueda T., Michishita N., Akiyama M. and Itoh T. (2008) Dielectric-Resonator-Based Composite Right/Left-Handed Transmission Lines and Their Application to Leaky Wave Antenna. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 56, No10, pp. 2259 – 2269.
8. Sakuma T., Noguchi K., Mizusawa M., Betsudan S. and Katagi T. (2005) Measurement of a Cylindrical Dielectric Resonator Antenna in Millimeter Wave Bands // *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 3A, pp. 404 – 407.
9. Li J., Salandrino J. and Engheta N. (2009) Optical spectrometer at the nanoscale using optical Yagi-Uda nanoantennas. *Physical review B*, Vol. 79, No 19, pp. 1-5.
10. Trubin, A. A. (2011) Electromagnetic waves scattering by parabolic lattices of dielectric resonators. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparaturbuduv.*, no. 47, pp. 106-110. (in Russian)
11. Trubin, A. A., Shmyglyuk, G. S. (2006) The modeling of the antenna lattice parameters on cylindrical dielectric resonators. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparaturbuduv.*, no. 33, pp. 101-108. (in Ukrainian)
12. Trubin A.A. (1984) Issledovanie kharakteristik izlucheniya diskovogo dielektricheskogo rezonatora [Study of Disc Dielectric Resonator radiation characteristic]. *Vestnik Kiev. Politekhn. Instituta, Radiotekhnika*, No. 21, pp. 29-33.

Трубін О. О. Багатоелементні антени на параболічних решітках діелектричних резонаторів. Наведено результати розрахунків параметрів антен, побудованих на параболічних решітках циліндричних діелектричних резонаторів. Розглянуті закономірності просторового розподілу поля випромінювання в ближній та хвильовій зонах. Розраховані частотні залежності коефіцієнту відбиття антен. Показана можливість звуження ДС. Відмічено виконання частотної селекції сигналів, а також поліпшення електромагнітної сумісності запропонованих конструкцій.

Ключові слова: діелектричний резонатор, решітки, антена, діаграма спрямованості, S-матриця, електромагнітні поля.

Трубин А. А. Многоэлементные антенны на параболических решетках диэлектрических резонаторов. Приведены результаты расчетов параметров антен, построенных на параболических решетках цилиндрических диэлектрических резонаторов. Рассмотрены закономерности пространственного распределения излучаемого поля в ближней и волновой зонах. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента отражения антен. Показана возможность сужения ДН. Отмечено выполнение ча-

стотной селекции сигналов, а также повышенная электромагнитная совместимость предлагаемых конструкций.

Ключевые слова: диэлектрический резонатор, решетки, антенна, диаграмма направленности, S-матрица, электромагнитные поля.

Trubin A.A. Multiple-unit antennas on paraboloidal lattices of dielectric resonators.

Introduction. Today a multiple-unit antenna properties, containing big number DRs are studied inefficiently. At present article a possibility of the antennas building produced on paraboloidal lattices consisting DRs of the cylindrical form with lowest magnetic type resonances is considered.

The results. Calculation results of the antenna parameters on dielectric resonator paraboloidal lattices are presented. The space distribution of the radiation field patterns in the near and wave zones is considered. Reflection coefficient frequency dependence of the antennas is calculated. Possibility narrowing of the directional pattern is showed. Signals frequency selection performing as well as increased electromagnetic compatibility of the suggested structures is noticed.

Conclusion. Adduced calculations indicate capability of the practical application lattices on DRs as well as building on their base a wide class of the frequency selective antennas in millimeter and sub millimeter wavelength ranges. Such antennas will have enhanced electromagnetic compatibility.

Keywords: dielectric resonator, lattice, antenna, directional pattern, S-matrix, electromagnetic fields.