

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ НА ЦИЛІНДРИЧНИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРАХ

Трубін О.О., Шмиглюк Г.С.

Запропоновано модель антенної решітки, яка має вигляд планарної структури розміром 3×3 з діелектричних резонаторів (ДР). Виведено узагальнені аналітичні співвідношення для коефіцієнтів взаємного зв'язку ДР у відкритому просторі. Наведено дані моделювання амплітудно-частотних характеристик і діаграм спрямованості.

Вступ. Постановка задачі

На сьогодні відомо чимало антенних пристроїв, в якості випромінюючих елементів яких застосовуються одиночні ДР [1-5]. Але слід зазначити, що саме системи ДР, які надають великі можливості для застосування, поки що мало досліджені. Цей процес стримується насамперед недостатнім розвитком теорії резонансного розсіювання електромагнітних хвиль на діелектричних структурах у відкритому просторі.

У даній роботі пропонується модель розсіювання, що може бути застосована для діелектричних багатоланкових антен. Отримані результати дозволяють провести практичне конструювання, розрахувати й оптимізувати всі необхідні параметри антен даного класу. Як приклад наведений розрахунок характеристик антенної решітки розміром 3×3 , виконаної на основі циліндричних ДР, яка збуджується через апертуру у фланці прямокутного хвилеводу в режимі короткого замикання.

Теоретичні викладки

Розглянемо багатоланкову структуру, що представляє собою систему зв'язаних між собою N ДР, попередньо настроєних на частоту ω_0 одного із власних коливань, та розташованих поблизу апертури в металевій стінці лінії передачі. У загальному випадку поле, що випромінюється такою системою, досить точно апроксимується полем вироджених власних коливань N -зв'язаного ДР.

Поле власних коливань системи ДР, у випадку застосування високочастотних діелектриків ($tg \delta \ll 1$), можна представити у вигляді розкладання:

$$\vec{e} = \sum_{s=1}^N b_s \vec{e}_s ; \quad \vec{h} = \sum_{s=1}^N b_s \vec{h}_s , \quad (1)$$

де \vec{e}_s, \vec{h}_s - електричний і магнітний компонент поля власних коливань з частотою ω_0 s -го ізольованого ДР; b_s - шукані коефіцієнти.

Припустимо також, що нам відоме поле кожного ізольованого резонатора у хвильовій зоні [7]:

$$(\vec{e}_s, \vec{h}_s)_{|\vec{r}| \rightarrow \infty} \approx (\vec{e}_s^\infty, \vec{h}_s^\infty). \quad (2)$$

Коефіцієнти розкладання й комплексні частоти власних коливань системи ДР можна одержати із системи рівнянь Максвелла, використовуючи теорію збурення. Сформулюємо її у вигляді задачі визначення власних значень оператора зв'язку $K = \|\kappa_{sn}\|$:

$$\sum_{s=1}^N \kappa_{sn} b_s - \lambda b_n = 0, \quad (3)$$

де

$$\lambda = 2 \cdot \left(\frac{\delta\omega}{\omega_0} + i \frac{\omega''}{\omega_0} \right);$$

$$\kappa_{sn} = \frac{i}{2\omega_0 w_n (1 + \delta_{sn})} \oint_{S_n} \left\{ [\vec{e}_s, \vec{h}_n^*] + [\vec{e}_n^*, \vec{h}_s] \right\} \vec{n} ds;$$

\vec{n} - нормаль до поверхні S_n ; w_n - енергія, що запасється в матеріалі n -го резонатора; $\delta\omega = \text{Re}(\omega - \omega_0)$, $\omega_0 = \text{Re} \omega_s$ ($s = 1, 2, \dots, N$) - дійсна частина частоти власних коливань ізольованих ДР; $\omega'' = \text{Im}(\omega)$, ω - комплексна частота власних коливань системи ДР у цілому.

Рішення системи рівнянь (3) дозволяє приблизно обчислити комплексні частоти й амплітуди парціальних коливань N -зв'язного ДР.

Рішення задачі розсіювання хвиль \vec{E}^+ , \vec{H}^+ на системі з N ДР шукаємо у вигляді:

$$\vec{E} = \vec{E}^+ + \sum_{k=1}^N a_k \vec{e}_k; \quad \vec{H} = \vec{H}^+ + \sum_{k=1}^N a_k \vec{h}_k, \quad (4)$$

де невідомі амплітуди a_k задовольняють наступній системі рівнянь, яка справедлива в області власних частот багатозв'язного ДР:

$$\sum_{k=1}^N a_k \left(\sum_{t=1}^N w_t b_t^{n*} b_t^k \right) Q_k = - \frac{Q^D}{\omega_0} \sum_{t=1}^N b_t^{n*} c_t^{+*}, \quad (5)$$

де $Q^D = 1/\operatorname{tg}\delta$ - параметр, що визначає втрати в матеріалі резонаторів; а величина Q_k визначається формулою

$$Q_k = \frac{\omega}{\omega_0} + 2iQ^D \left(\frac{\omega}{\omega_0} - 1 - \frac{\lambda_k}{2} \right).$$

Розрахувавши з (3), (5) значення коефіцієнтів розкладання, невідоме поле у хвильовій зоні (4) знаходимо у вигляді

$$\vec{E} \approx \vec{E}^+ + \sum_{s=1}^N A_s \vec{e}_s^\infty; \quad \vec{H} \approx \vec{H}^+ + \sum_{s=1}^N A_s \vec{h}_s^\infty, \quad (6)$$

де $A_s = \sum_{k=1}^N a_k b_s^k$ - амплітуди вимушених коливань парціальних ДР.

Поле резонаторів у хвильовій зоні $\vec{e}_s^\infty, \vec{h}_s^\infty$ [7] необхідно розраховувати вже з урахуванням відносного розташування резонаторів в системі.

Коефіцієнти зв'язку циліндричних ДР у відкритому просторі

Виходячи з даних (3-6), всі необхідні параметри системи ДР можуть бути розраховані, якщо відомі коефіцієнти взаємного зв'язку між резонаторами $\kappa_{s,n}$. На рис. 1 показані відносні положення пари циліндричних ДР у відкритому просторі, що були розглянуті.

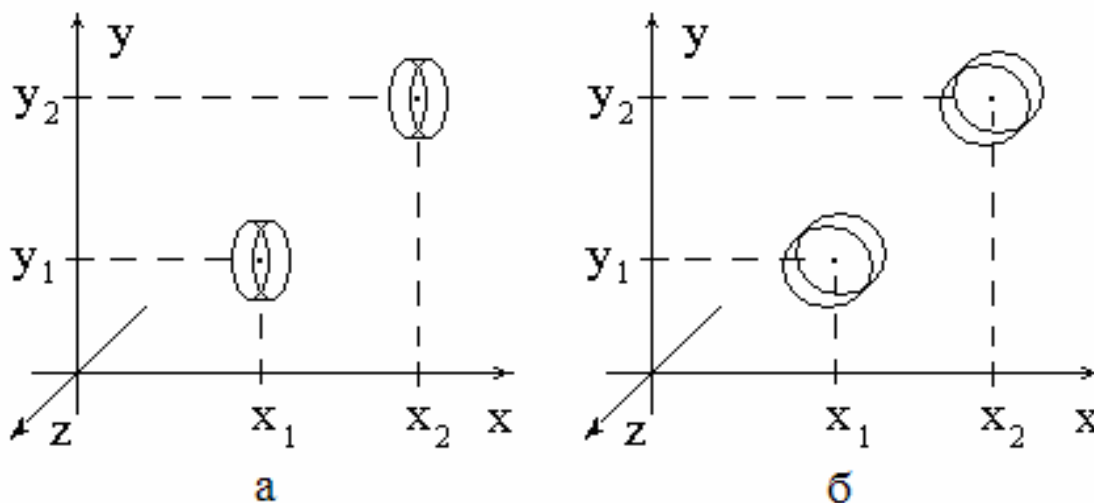


Рис. 1. Взаємне розташування ДР у відкритому просторі;
а - положення А, б - положення Б

Розрахунок коефіцієнтів взаємного зв'язку проведено методом розкладання зовнішнього поля ДР по полю хвилеводу, після чого стінки хвилеводу уявно були спрямовані до нескінченності. В результаті були розраховані в аналітичному вигляді коефіцієнти взаємного зв'язку циліндричних ДР із магнітними азимутально однорідними коливаннями H_{n0l}^+ .

При розташуванні ДР згідно положенню А (рис. 1а):

$$\kappa_{1,2} = \frac{16}{\pi} \cdot \frac{p_z}{q_z} \cdot \frac{(\varepsilon_{1r} - 1)^2}{\varepsilon_{1r}} \cdot \frac{J(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z; k_0(\vec{r}_1 - \vec{r}_2))}{v_{n0l}}, \quad (7)$$

де $v_{n0l} = v_{n0l}(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z)$ - функція, детально описана в [8];
 $(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z)$ - характеристичні параметри циліндричного ДР.

Для $|z_1 - z_2| \geq 2r_0$

$$J(p_{\perp}, \dots) = \frac{\pi}{2} \int_0^1 \frac{Y_0(k_0 \delta z \sqrt{1 - \xi^2}) + iJ_0(k_0 \delta z \sqrt{1 - \xi^2})}{\left[\left(\frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} \right)^2 + \xi^2 - 1 \right]^2 \left[\left(\frac{p_z}{q_z} \right)^2 - \xi^2 \right]^2} \cdot \left\{ \frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sqrt{1 - \xi^2}) - \sqrt{1 - \xi^2} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp} \sqrt{1 - \xi^2}) \right\}^2 \cdot \cos[k_0(x_1 - x_2)\xi] \cdot \left[\frac{p_z}{q_z} \sin p_z \cos q_z \xi - \xi \cos p_z \sin q_z \xi \right]^2 \cdot d\xi + \int_1^{\infty} \frac{K_0(k_0 \delta z \sqrt{\xi^2 - 1})}{\left[\left(\frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} \right)^2 + \xi^2 - 1 \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{p_z}{q_z} \right)^2 - \xi^2 \right]^2} \cdot \left\{ \frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} J_0(p_{\perp}) I_1(q_{\perp} \sqrt{\xi^2 - 1}) - \sqrt{\xi^2 - 1} J_1(p_{\perp}) I_0(q_{\perp} \sqrt{\xi^2 - 1}) \right\}^2 \cdot \cos[k_0(x_1 - x_2)\xi] \cdot \left[\frac{p_z}{q_z} \sin p_z \cos q_z \xi - \xi \cos p_z \sin q_z \xi \right]^2 \cdot d\xi, \quad (8)$$

де $\delta z = |z_1 - z_2|$, $J_n(z)$ - звичайна функція Бесселя, $I_n(z)$, $K_n(z)$ - модифіковані функції Бесселя.

При розташуванні ДР у положенні Б (рис. 1б) для $|z_1 - z_2| \geq L$:

$$\kappa_{1,2} = 8 \cdot \frac{p_z}{q_z} \cdot \frac{(\varepsilon_{1r} - 1)^2}{\varepsilon_{1r}} \cdot \frac{G(p_{\perp}, p_z, q_{\perp}, q_z; k_0 |r_1 - r_2|)}{v_{n0l}}, \quad (9)$$

$$G(p_{\perp}, \dots) = - \int_0^{\infty} \frac{e^{-\gamma k_0 \delta z} J_0(k_0 \rho_{\perp} \sqrt{1 + \gamma^2})}{\left[\left(\frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} \right)^2 - 1 - \gamma^2 \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{p_z}{q_z} \right)^2 + \gamma^2 \right]^2} \cdot \left\{ \frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sqrt{1 + \gamma^2}) - \sqrt{1 + \gamma^2} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp} \sqrt{1 + \gamma^2}) \right\}^2 \cdot \left[\frac{p_z}{q_z} \sin p_z \operatorname{ch} q_z \gamma + \gamma \cos p_z \operatorname{sh} q_z \gamma \right]^2 d\gamma +$$

$$+ i \int_0^1 \frac{e^{-i k_0 \delta z \xi} J_0(k_0 \delta \rho_{\perp} \sqrt{1 - \xi^2})}{\left[\left(\frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} \right)^2 - 1 + \xi^2 \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{p_z}{q_z} \right)^2 - \xi^2 \right]^2} \cdot \left\{ \frac{p_{\perp}}{q_{\perp}} J_0(p_{\perp}) J_1(q_{\perp} \sqrt{1 - \xi^2}) - \sqrt{1 - \xi^2} J_1(p_{\perp}) J_0(q_{\perp} \sqrt{1 - \xi^2}) \right\}^2 \cdot \left[\frac{p_z}{q_z} \sin p_z \cos q_z \xi - \xi \cos p_z \sin q_z \xi \right]^2 d\xi, \quad (10)$$

де $\delta \rho_{\perp} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.

Залежність коефіцієнтів взаємного зв'язку циліндричних ДР з типами коливань H_{101}^+ і параметрами: $\varepsilon_{1r} = 82$, $\Delta = L / 2r_0 = 0.2$, $k_0 \delta z = 3$ наведені на рис. 2 для розташування резонаторів у положенні А та на рис. 3 для розташування резонаторів у положенні Б.

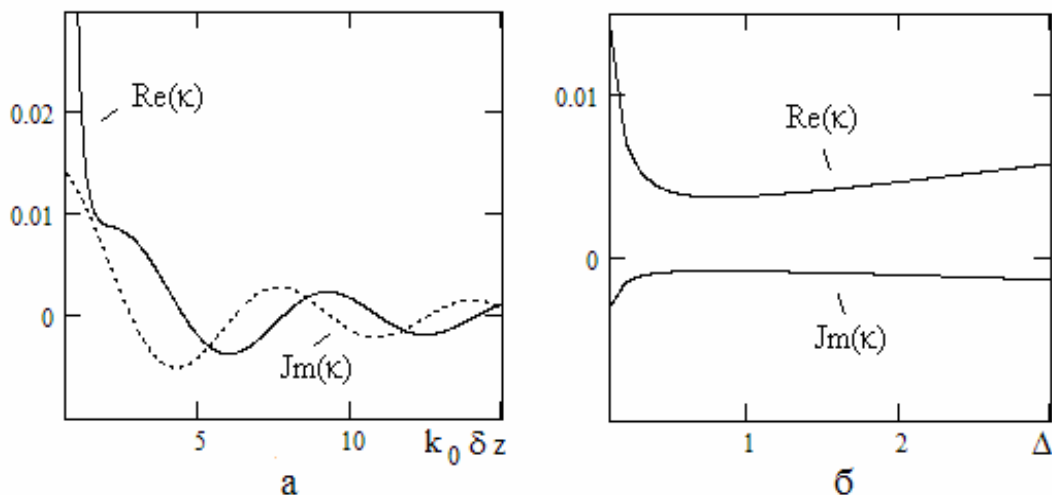


Рис. 2. Коефіцієнти взаємного зв'язку циліндричних ДР (положення А)

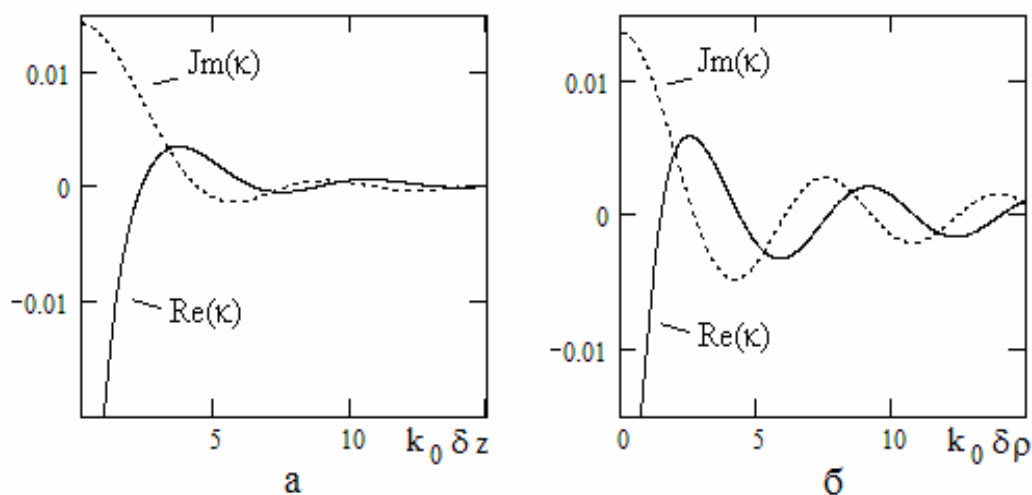


Рис. 3. Коефіцієнти взаємного зв'язку циліндричних ДР (положення Б)

Конструювання антени на системі зв'язаних ДР

Отримані теоретичні результати були використані для розрахунку параметрів антенної решітки, конструкція якої зображена на рис. 4а. Були використані ДР з $\Delta = 0.25$, $\epsilon_{1r} = 82$, $Q_D = 1/\text{tg}\delta = 1800$. Один з резонаторів зв'язувався з прямокутним хвилеводом перетином $a \times b = 58 \times 25 \text{ мм}^2$ через щілину в металевому екрані. Зв'язані коливання, що виникали в системі ДР, були джерелом випромінювання, формуючи діаграму спрямованості у хвильовій зоні. Розташування ДР у решітці вибиралося згідно з комп'ютерною моделлю, виходячи з умови одержання найменшої ширини головного пелюстка діаграми спрямованості.

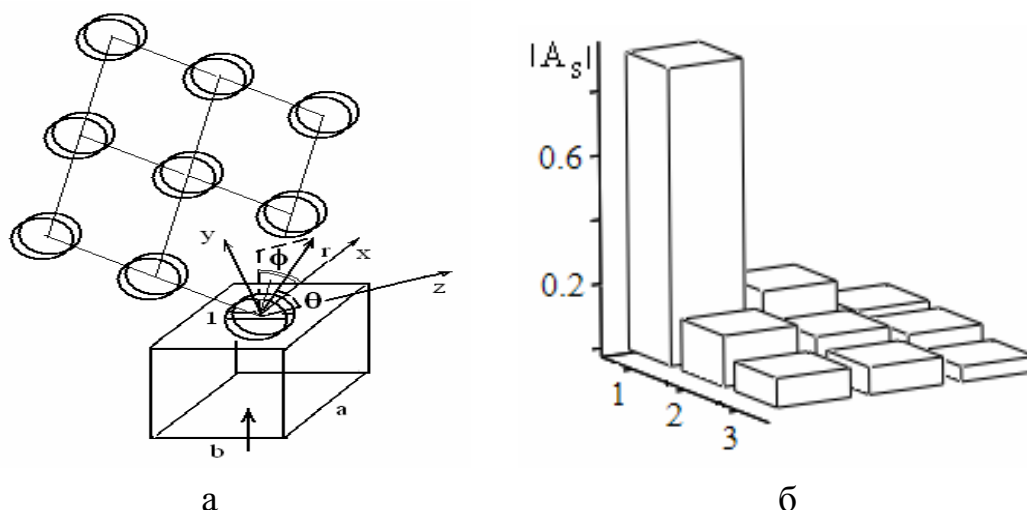


Рис. 4. Антенна решітка на 3x3 циліндричних ДР (а) та розподіл амплітуд змущених коливань у резонаторах (б) на центральній частоті.

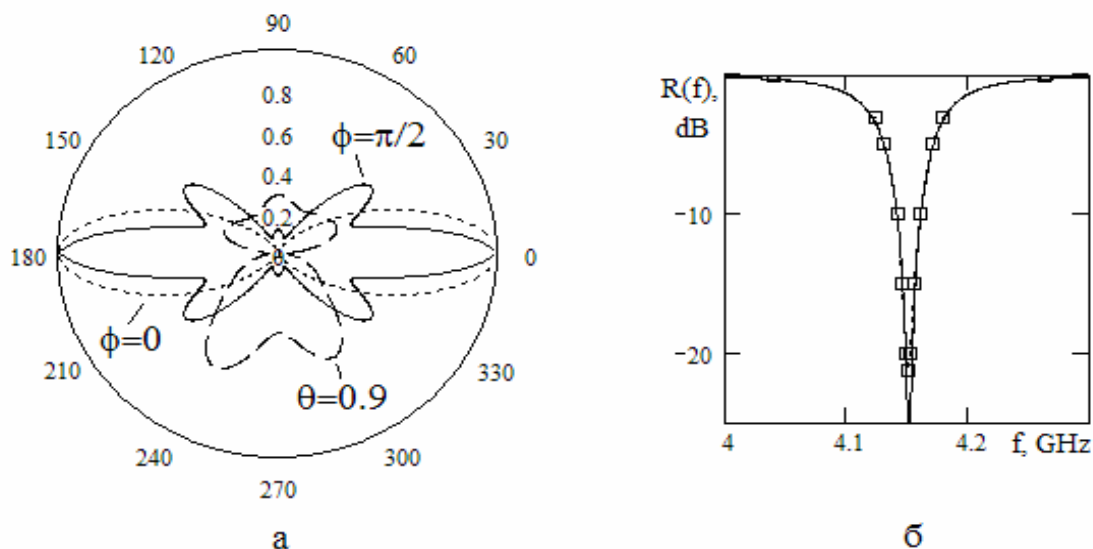


Рис. 5. Оптимізована діаграма випромінювання 3x3 решітки (а) та її коефіцієнт відбиття (б)

Результати розрахунку модулів амплітуд вимушених коливань для оптимізованої структури зв'язаних ДР, показані на рис. 4б, а характеристика випромінювання пасивної решітки - на рис. 5а.

Проведені експериментальні дослідження антенної решітки виявились у відповідності до результатів теоретичних розрахунків. Ширина головного пелюстка випромінювання досліду дорівнює приблизно 30-40 градусів у площинах θ , ϕ , відповідно. На рис. 5б наведені результати виміру (крапки) і розрахункові залежності коефіцієнта відбиття хвилі прямокутного хвилеводу від решітки.

Висновки

Запропонований теоретичний метод моделювання системи діелектричних резонаторів у відкритому просторі й пов'язаних з лінією мікрохвильовою лінією передачі, заснований на застосуванні теорії збурень, дозволяє розраховувати основні електродинамічні параметри досліджуваної системи.

Отримані теоретичні й експериментальні результати свідчать про можливість створення пасивних антенних решіток, в якості випромінюючих елементів яких застосовують ДР.

Проведення подальших досліджень пристроїв даного класу дозволить більш якісно використати їхні потенційні можливості, такі як відносно невеликі розміри, селективність параметрів, малі дисипативні втрати.

Література

1. Ильченко М.Е. Исследование антенны с открытым диэлектрическим резонатором // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1978. – Т. 11, № 1. – С. 15-18.
2. Mc. Allister M., Long S., Conway G. The Rectangular Dielectric Resonator Antenna // IEEE Trans. – 1983. – v. MTT- S. P. 696-699.
3. Long S., Mc. Allister M., Shen L. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna // IEEE Trans. MTT.- 1983.- v. AP-31, № 3. P. 406-411.
4. Hall C., Andrasic G., Jams J. Microstrip Planar Arrays with Dielectric Sphere Overlays // Electron Lett. – 1985. – V. 21, № 8. – P. 356-357
5. Kishk A., Auda H., Ahn B. Radiation Characteristics of Cylindrical Dielectric Resonator Antennas // IEEE Trans. – 1988. – V. MTT- S. – P. 556-560.
6. Trubin A. Scattering of Electromagnetic Waves on a System of Coupling High-Q Dielectric Resonators // VI - th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – 1996. – Lviv. Ukraine. P. 350-353.
7. Трубин А.А. Исследование характеристик излучения дискового диэлектрического резонатора // Вестн. Киев. политехн. Ин-та. Радиотехника. – 1984. – Вып. 21. С. 29-33.
8. Ильченко М.Е., Трубин А.А. Электродинамика диэлектрических резонаторов. Киев. 2004. “ Наукова думка ”, 265 с.

<p>Трубин А.А., Шмыглюк А.С. Моделирование параметров антенной решетки на цилиндрических диэлектрических резонаторах.</p> <p>Предложена модель антенной решетки, имеющей вид планарной структуры, состоящей из 3x3 диэлектрических резонаторов (ДР). Выведены общие аналитические соотношения для коэффициентов взаимной связи ДР в открытом пространстве. Приведены данные моделирования амплитудно-частотных характеристик и диаграмм направленности.</p>	<p>Trubin A.A., Shmyglyuk G.S. The modeling of the antenna lattice parameters on cylindrical dielectric resonators.</p> <p>It's proposed a model of Antenna Lattice that's having the planar structure on 3x3 Dielectric Resonators (DR). The general analytical relation for mutual coupling coefficient of DR-s in the open space is obtained. The data of gain-frequency characteristic and radiation pattern simulation is given.</p>
--	--

Надійшла до редакції 20 травня 2006 року