

АНТЕНИ ТА ПРИСТРОЇ НВЧ

УДК 621.372.852

Є. Яковенко

Національний університет "Львівська політехніка"

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗБУДЖУВАЧА НА ДОБРОТНОСТІ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНOSTІ ДЛЯ НИЖЧИХ МОД ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗОНАТОРНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

© Яковенко Є., 2009

Подано результати числового моделювання впливу елементів збудження на добротності випромінювання та діаграми спрямованості для нижчих мод діелектричних циліндричних резонаторних випромінювачів.

Numerical simulations influence of feed structures on radiation Q-factors and radiation patterns for lower modes of cylindrical dielectric resonance radiators are presented.

Вступ

Один із шляхів побудови малогабаритних адаптивних антенних решіток полягає у застосуванні діелектричних резонаторних випромінювачів (ДРВ) з діаграмою спрямованості, близькою до ізотропної, що працюють у доволі широкій смузі частот. Вирішення цієї проблеми є неможливим без визначення частот власних коливань об'ємних діелектричних резонаторів (ОДР) для різних типів коливань (мод), а також відповідних їм структур поля, що було зроблено у роботах [1–4] для циліндричних резонаторів. Однак при цьому розглядалися частоти власних коливань та їх структури для резонаторів у вільному просторі або у півпросторі над металевою плоскою поверхнею. Оскільки збуджувач ОДР знаходиться у ближньому полі випромінювача, то його впливом як на частоти власних коливань, так і їх структури поля не можна нехувати. Діаграма спрямованості (ДС) ДРВ визначається структурою збуджуваного поля, на яку впливають такі чинники, як тип коливань в ОДР, структура поля збуджувача та наявність одночасного існування кількох мод. Останнє залежить як від характеристик збуджувача, так і від відношення радіуса циліндра до його висоти. Ці ж чинники впливають і на добротності випромінювання (зовнішні добротності) ОДР, яка визначає рівень зв'язку із зовнішнім простором і відповідно ефективність випромінювання ДРВ. Оскільки тип збуджувача впливає на основні характеристики випромінювання ДРВ, то предметом дослідження у цій роботі і було визначення величини такого впливу.

Умови моделювання та його результати

У [1–3] було показано, що для циліндричних ОДР найнижчим частотам власних коливань відповідають коливання типів $H_{01\delta}$, $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$ та $E_{01\delta}$, де індекси визначають кількість варіацій поля (півхвиль) по координатах ϕ , r та z циліндричної системи координат. Третій індекс $\delta < 1$ відображає той факт, що в ОДР висота резонатора h є коротшою від половини довжини хвилі. У класифікації типів хвиль, наприклад HE , перший символ – це переважаюча складова поля по осі z резонатора, другий – наявність іншого поля по осі z . Частоти власних коливань залежать не тільки від типу коливань, але і від відношення радіуса a до висоти h резонатора: $K = a/h$. Від цього параметра залежить також і рознесення резонансних частот для різних мод та можливість їх одночасного збудження [3].

До останнього часу піддавалася сумніву можливість використання ОДР для випромінювання електромагнітних хвиль через високу концентрацію поля в об'ємі ОДР і відповідно малість полів розсіяння. Однак останні дані вказали на перспективність побудови антен на основі ОДР за умови, що їх діелектрична проникність є помірною ($\epsilon \leq 40$) [2, 3]. Випромінювальна здатність таких антен оцінюється добротністю випромінювання та коефіцієнтом зв'язку із зовнішнім простором, які вводяться так. Розрахунок резонансних частот за характеристичним рівнянням для різних мод в діелектричних резонаторах дає комплексний вираз для резонансної частоти:

$$S_{mn} = \sigma_{mn} + j\omega_{mn},$$

де уявна частина визначає частоти власних коливань, а дійсна – втрати, пов'язані з випромінюванням. Відношення дійсної частини до уявної відповідно до виразу

$$Q_r = \frac{\omega_{mn}}{2 \cdot \sigma_{mn}} \quad (1)$$

визначає добротність випромінювання (зовнішню добротність) ОДР.

Коефіцієнт зв'язку резонатора з зовнішнім простором знаходять як відношення власної добротності ОДР (добротності діелектрика) до добротності випромінювання [2, 3]:

$$k_3 = \frac{Q_0}{Q_r}. \quad (2)$$

Інший спосіб визначення коефіцієнта зв'язку ґрунтується на використанні співвідношення

$$k_3 = \frac{P_\Sigma}{P_D}, \quad (3)$$

де P_Σ – потужність випромінювання; P_D – потужність втрат у матеріалі ОДР.

Наближений аналітичний розв'язок задачі випромінювання ОДР показав [2], що для сферичних та циліндричних ОДР за $\epsilon > 5$ для магнітних типів коливань зростання діелектричної проникності супроводжується зменшенням k_3 у степені 3/2, а для електричних типів коливань – у степені 5/2. Однак за умови $\epsilon \leq 40$ зв'язок ОДР із зовнішнім простором залишається достатньо високим. Це підтверджується величинами добротностей випромінювання, одержаними методом моментів і розрахованими за апроксимуючими формулами для ОДР у вільному просторі [3] (рис. 1).

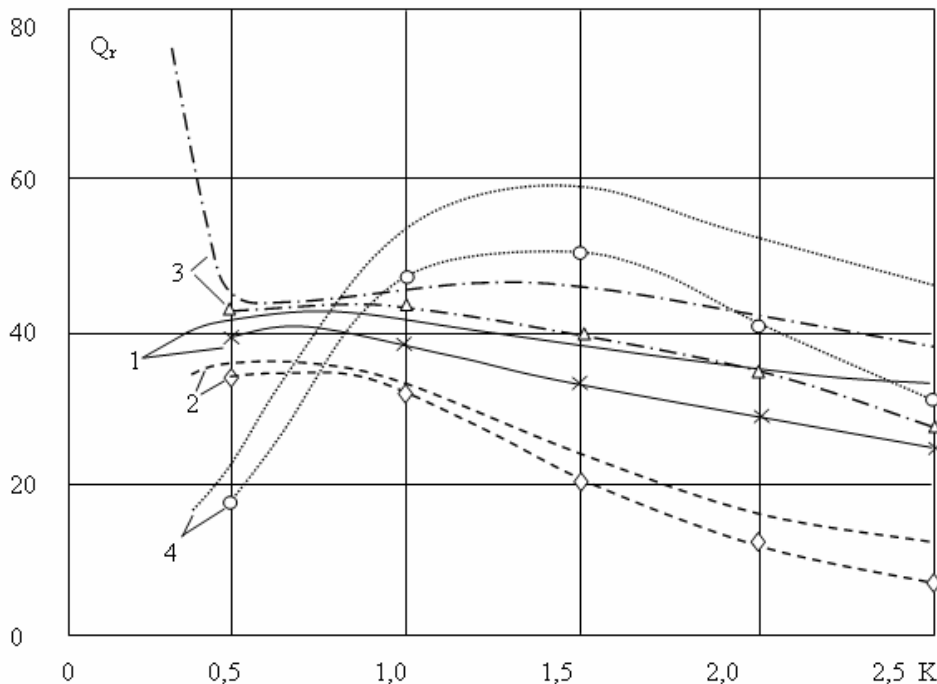


Рис. 1. Залежність добротностей випромінювання ОДР від параметра $K=a/h$ для різних типів коливань. Графіки 1, 2, 3 та 4 відповідають коливанням типу: $H_{01\delta}$, $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$, $E_{01\delta}$. Діелектрична проникність ОДР $\epsilon = 38$; втрати $tg\delta = 0,00045$

Для визначення впливу збуджувачів на характеристики випромінювання ОДР було проведено числове моделювання залежностей добротностей випромінювання від відносної висоти резонаторів для нижчих мод за допомогою програми, що працює за методом FDTD. Умови моделювання були такими. Зона моделювання являла собою паралелепіпед, в якому знаходилися досліджувані циліндричний резонатор та елементи його збудження. Над випромінювачем знаходився шар повітря, завтовшки не менше половини довжини хвилі на найнижчій частоті досліджуваного діапазону. На усіх поверхнях зони, крім нижньої, були встановлені граничні умови, що відповідали вільному простору з хвильовим опором 120π Ом. Нижня поверхня була провідною із заданою величиною провідності. Просторова дискретизація зони моделювання здійснювалася генератором комірок, що давало змогу відтворювати досліджувану структуру з мінімальною похибкою дискретизації. Розмір комірки відповідав критерію Найквіста, за яким максимальний розмір комірки не повинен перевищувати половину довжини хвилі у середовищі з максимальним значенням ϵ . У нашому випадку відносний розмір комірки становив 0,05 від довжини хвилі у діелектрику резонатора, що за оцінками, наведеними у [5], давало похибку моделювання за рахунок дискретизації простору не більше 0,41 %.

Були досліджені впливи трьох достатньо поширених типів збуджувачів (рис. 2) на добротності випромінювання та діаграми спрямованості ОДР.

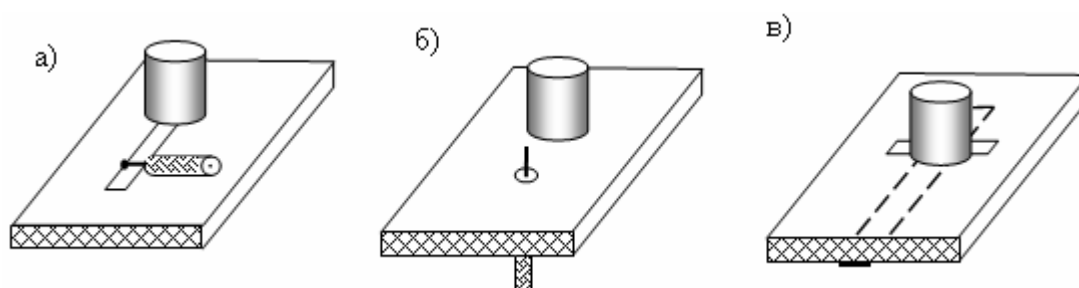


Рис. 2. Коаксіально-щілинний (а), коаксіально-штировий (б) та смужково-щілинний (в) збуджувачі ОДР

Усі збуджувачі виконані на матеріалі ФАФ-4 з двостороннім фольгуванням, з діелектричною проникністю $\epsilon=2,5$ і товщиною 1,5 мм. Поздовжні розміри щілин вибиралися з умови резонансу на найнижчій частоті власних типів коливань ОДР. Поперечні розміри коаксіальної та смужкової лінії відповідали хвильовому опору 50 Ом. Місце під'єднання центрального провідника коаксіала до краю щілини (рис. 2, а) вибрано з умови узгодження. Штир збуджувача (рис. 2, б) прилягав до поверхні резонатора, а його висота дорівнювала висоті ОДР.

Результати моделювання добротності випромінювання ОДР під час застосування коаксіально-щілинного збуджувача показано на рис. 1 маркованими лініями. Виявлена загальна тенденція зменшення зовнішньої добротності ОДР під час його розташування на провідній поверхні плати порівняно з цією самою величиною для ОДР у вільному просторі. Найбільший спад зовнішньої добротності ОДР досягав 45 % за $K=2,5$. Для інших типів збуджувачів результати моделювання були подібними, з тією різницею, що за малих відносних висот ОДР ($K>1,5$) резонанси для мод $HE_{12\delta}$ та $H_{01\delta}$ не спостерігалися через малу ефективність їх збудження за цих умов.

Одержані результати можна пояснити так. Поле випромінювання ДРВ складається з поля випромінювання ОДР, поля збуджувача та поля наведених на провідних елементах струмів. Зі зменшенням висоти ОДР відносний рівень поля наведених струмів зростає, що призводить до зростання сумарного поля випромінювання і відповідно до зменшення зовнішньої добротності ОДР, що знаходиться на провідній поверхні, порівняно з ОДР у вільному просторі. На рис. 3 проілюстрована картина розподілу поверхневих струмів, що складаються зі струмів збуджувача та наведених струмів для смужково-щілинного збуджувача. Показано значну концентрацію струмів в області щілини та високий рівень наведених струмів на поверхні плати.

За даними моделювання згідно з виразом (2) були визначені коефіцієнти зв'язку ДРВ із зовнішнім простором для різних мод та оцінена ефективність випромінювання (коефіцієнт корисної дії):

$$\eta_a = \left(1 - \frac{1}{k_3}\right) \cdot 100\% \quad (4)$$

За цією оцінкою коефіцієнт корисної дії ДРВ з поданими параметрами діелектрика (рис. 1) виявився не меншим за 97 %.

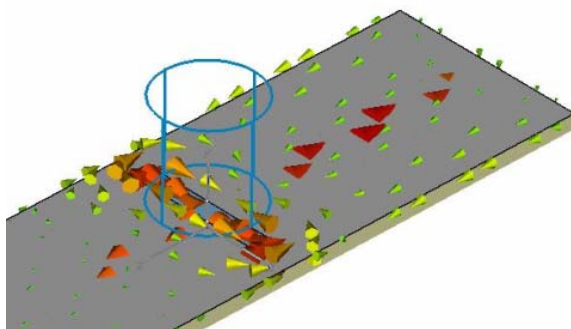


Рис. 3. Розподіл поверхневих струмів на платі смужкової-щілинного збуджувача

Для визначення впливу збуджувачів на діаграми спрямованості ДРВ було проведено моделювання і порівняння ДС за вектором Пойтинга для ОДР у вільному просторі і при встановленні їх на плату збуджувача для різних мод. На рис. 4 з лівого боку показано ДС ОДР у вільному просторі, а з правого – під час використання коаксіально-щілинного збуджувача.

Під час моделювання ДС ОДР у вільному просторі збуджувалися плоскою хвилею, яка поширювалася вздовж осі z циліндричного резонатора з параметром $K=0,5$. Для мод $H_{10\delta}$ та $HE_{11\delta}$ (рис. 4 а, б – лівий бік) були одержані максимуми випромінювання вздовж осі z з рівнями 4,8 і 2,7 дБ відповідно. За формою діаграми виявилися подібними до ДС коротких стрижневих антен, збуджуваних падаючою та відбитою осьовими хвилями. За моди $H_{12\delta}$ виникав режим поперечного випромінювання з двома симетричними пелюстками, розташованими ортогонально до осі z. Для моди $E_{01\delta}$ ДС тороїдної форми була подібною до ДС диполя Герца.

Встановлення ОДР на плату коаксіально-щілинного збуджувача викликало істотні зміни у формах ДС, які насамперед полягали у значному зменшенні рівня випромінювання у нижній півсфері. Детальніше уявлення про коефіцієнти напрямленої дії ДРВ за різних мод D та про різниці максимальних рівнів випромінювання у верхній та нижній півсферах Δ дає таблиця.

Параметри випромінювання ДРВ за різних мод

Мода	D, дБ	Δ , дБ
$H_{10\delta}$	3,4	9,4
$HE_{11\delta}$	7,1	18,7
$HE_{12\delta}$	4,6	11,2
$E_{01\delta}$	5,6	12,4

Особливо помітні зміни в ДС відбулися під час встановлення ОДР на плату для мод $HE_{12\delta}$ та $E_{01\delta}$. У першому випадку ДС набула багатопелюсткового характеру і стала несиметричною. У другому – порушилася ізотропність у горизонтальній площині і різниця рівнів випромінювання становила 2,6 дБ. Для інших типів збуджувачів також спостерігалися значні зміни у формах ДС. Найменшими були зміни ДС ДРВ з коаксіально-штировим збуджувачем для моди $E_{01\delta}$. Особливістю цього збуджувача – відсутність коливань інших типів в ОДР.

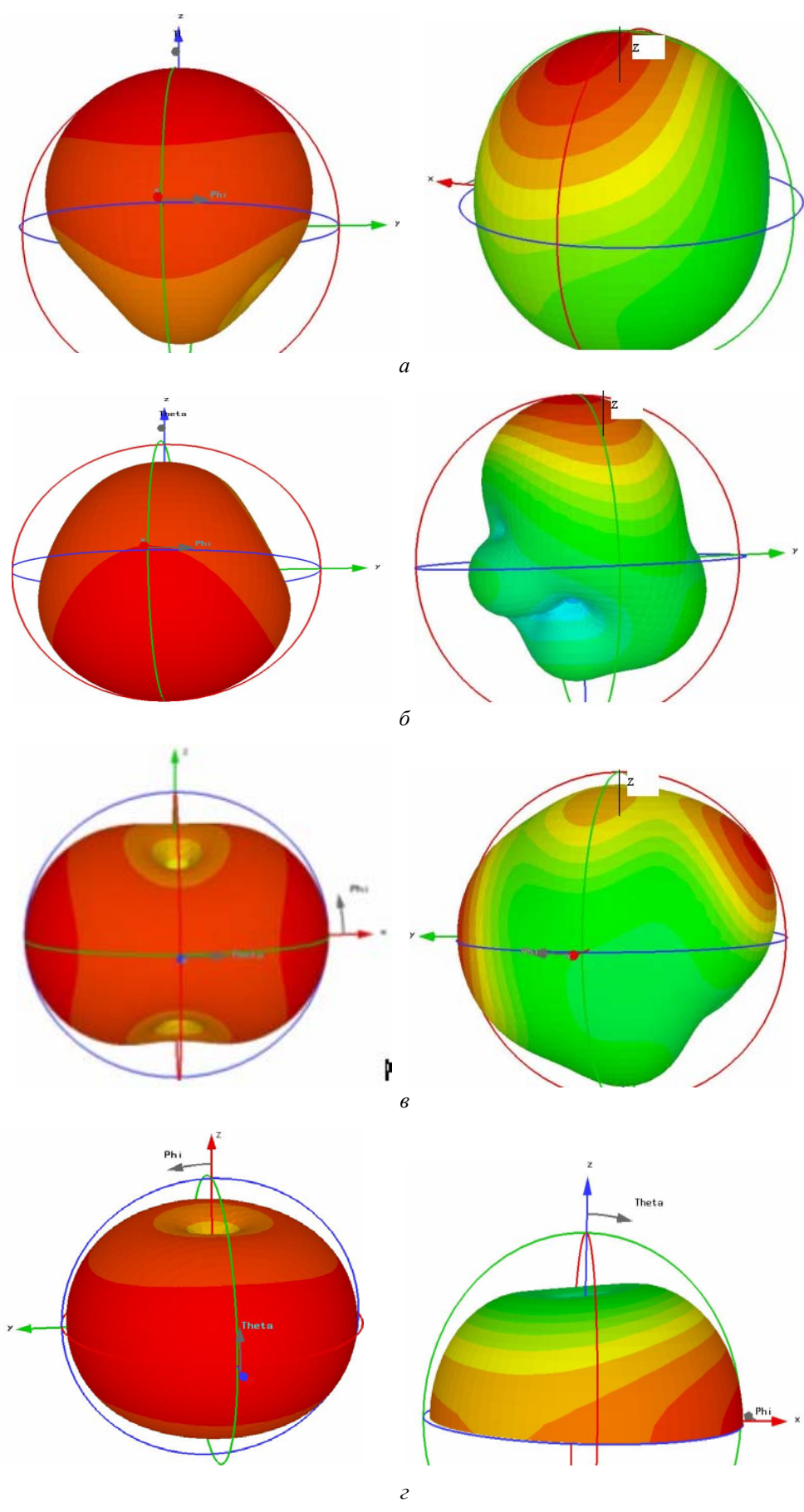


Рис. 4. Діаграми спрямованості циліндричних ДРВ для ОДР у вільному просторі (зліва) та ОДР, встановлених на плиті збуджувача (справа) для мод: $H_{10\delta}$ (а); $HE_{11\delta}$ (б); $HE_{12\delta}$ (в); $E_{01\delta}$ (z)

Висновки

За отриманими результатами моделювання можна зробити висновки про істотний вплив збуджувачів на зовнішні добротності ОДР. Спадання зовнішніх добротностей ОДР, порівняно з їх добротностями у вільному просторі, збільшувалося за зменшення відносної висоти резонатора і досягало 45 % за $K = a/h = 2,5$. Така тенденція зберігалася при збудженні в ОДР нижчих мод: $H_{01\delta}$, $HE_{11\delta}$, $HE_{12\delta}$, $E_{01\delta}$. Виявлена залежність була пов'язана зі збільшенням відносного рівня поля наведених на елементах збуджувача струмів, що призводило до зростання сумарного поля випромінювання і відповідного зниження добротності випромінювання (зовнішньої добротності) ОДР. Завдяки високому рівню зв'язку ОДР з зовнішнім простором та малим втратам в діелектрику резонатора за результатами моделювання коефіцієнт корисної дії випромінювача виявився не меншим за 97 %.

Вплив збуджувачів на діаграми спрямованості ОДР проявився в істотній зміні форми та характеристик ДС. До найважливіших змін ДС можна віднести помітне зменшення рівня випромінювання у нижню півсферу, розташовану під платою збуджувача, порушення симетрії та появу додаткових пелюсток. Ці зміни були пов'язані зі специфічним розподілом струмів збуджувача та наведених струмів, які залежали від конструкції збуджувача та взаємного розташування збуджувача і ОДР. Відмінність ДС для різних мод та різних конструкцій збуджувачів може бути використана під час формування випромінювачів з заданими характеристиками, наприклад, для створення ізотропних випромінювачів для фазованих антенних решіток.

1. Ильченко М.Е., Трубин А.А. Теория диэлектрических резонаторов. – К.: Либідь, 1993. – 216 с. 2. Ильченко М.Е., Трубин А.А. Электродинамика диэлектрических резонаторов. – К.: Наукова думка, 2004. – 265 с. 3. Kishk A.A., Glisson A.W., Junker G.P. Bandwidth Enhancement For Split Cylindrical Dielectric Resonator Antennas. *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 33, 97–118, 2001. 4. Kajfez D., Kishk A. Dielectric Resonator Antenna – Possible Candidate For Adaptive Antenna Arrays. *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 33, 2001. 5. Яковенко Є.І., Гоблик В.В. Оцінка точності математичної моделі розподілу електромагнітного поля зовнішніх джерел у фантомі людини // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 2004. – № 508.