

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАЗМОВОЇ РЕБРИСТО-СТЕРЖНЕВОЇ АНТЕНИ

© Тепляков І. Ю., 2018

Досліджено вплив параметрів плазми на просторовий розподіл поля плазмових антен. Розроблено числову модель плазмової ребристо-стержневої антени завдовжки 4λ з поперечним розподілом поля за значень $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$. Адекватність чисельної моделі плазмової ребристо-стержневої антени перевірено експериментально. Наведено діаграми спрямованості плазмової ребристо-стержневої антени, отримані в результаті чисельного та експериментального моделювання.

Ключові слова: плазма, ребристо-стержнева антена, діаграма спрямованості.

I. Teplyakov

Lviv Polytechnic National University

MODELING OF THE PLASMA CORRUGATED-ROD ANTENNA

© Teplyakov I., 2018

This paper regards modern state of plasma antennas and the main modeling methods of electrodynamic parameters of radiative means based on plasma discharge. The author gives several references on the works which have been dedicated comparison analysis of metal and plasma antennas, where it is shown the main advantages and disadvantages of such antennas, basic usage ways and software tools for automatic calculation of electrodynamic parameters of plasma antennas such as radiation patterns and return losses. As a result of the done theoretical research the author have proposed to use surface wave antennas for creation of principally new plasma antenna construction. As a prototype of surface wave antenna it has been taken traditional metal corrugated-rod antenna. To achieve this goal it is necessary to change the central metal rod by plasma discharge. HFSS technology has been used for numerical modeling of the investigated plasma antenna. The main constructive parameters of plasma corrugated-rod antenna are width and period of radial inhomogeneities. As a result of numerical modeling, the plasma corrugated-rod antenna of relative length 4λ with a transverse field distribution at relative constructive parameters $d_1/\lambda = 0.62$ and $d_1/\lambda = 0.63$ has been developed. The plasma parameter influence on the spatial field distribution of the plasma antenna was investigated. The author has used Drude theory for development of new material that has electrical parameters like plasma. If plasma discharge is missing in the antenna structure the transverse field distribution will disappear, but the radiation level of side lobe will increase by 30° . The numerical model adequacy of the plasma corrugated-rod antenna was verified experimentally. Amplitude normalized radiation patterns of the plasma corrugated-rod antenna, obtained as a result of numerical and experimental modeling, are presented in the paper.

Key words: plasma, corrugated-rod antenna, radiation pattern.

Вступ

Останнім часом спостерігається значне підвищення інтересу до задач, пов'язаних з дослідженням просторового розподілу електромагнітного поля плазмових антен (ПА), методів їх аналізу та моделювання хвильових процесів, що збуджуються ПА [1–4]. На відміну від звичайних

металевих антен, у ПА замість металевих дрітків або поверхонь використовується іонізований газ як провідне середовище для випромінювання та приймання сигналів [5–6]. Високоіонізована плазма є хорошим провідником, тому її можна використати як лінію передачі для поширення електромагнітних хвиль. Використання плазми замість твердого металу зумовлене істотними можливостями для різних застосувань у дослідницьких, інженерних та військових задачах [1, 8–10]. В загальному випадку ПА складається зі скляної трубки, заповненої інертним газом або парами ртуті. В ПА використовують два типи сигналів: сигнал живлення, який іонізує газ у трубці, приводячи до утворення плазми, та НВЧ сигнал для передавання інформації [6].

Порівняльний аналіз металевих та плазмових антен, їхні переваги, недоліки та шляхи використання викладено в роботі [9]. Коли газ в ПА не є іонізованим, зменшуються розсіяване нею електромагнітне поле та наведені нею завади на інші близько розташовані антени [10]. Така антена стає електрично невидимою для радарів та інших засобів РЕБ. Вплив насиченості плазми на електродинамічні особливості ПА досліджено в роботі [2]. Отже, ПА можуть бути динамічно налаштовані та переконафігуровані, тому можуть замінити використання декількох звичайних антен. Покоління ПА здатне забезпечити велику швидкість передавання даних, а також, на відміну від звичайних металевих антен, для них характерний набагато менший тепловий шум [10]. Згідно з результатами теоретичних досліджень, проведених в роботі [9], основні недоліки ПА спричинені високою вартістю та складністю виготовлення.

У роботах [2, 5, 7] наведено результати розрахунків діаграм спрямованості (ДС) ПА. Для чисельного моделювання ПА автори використали програмний код КАРАТ (метод скінченних різниць у часовій області) [2], системи автоматизованого проектування EMpro та Ansoft HFSS (метод скінченних елементів) [2, 5, 7]. У роботі [6] досліджено вплив довжини газорозрядної трубки на ефективність роботи ПА. Визначено оптимальну провідність плазми, яка залежить від відстані між електродами. Результати отримано за допомогою чисельного моделювання в CST Microwave Studio. За допомогою цього ж програмного продукту обчислено втрати потужності сигналу та наведено схему досліджуваного взірця на базі 12 люмінесцентних ламп, заповнених сумішшю парів ртуті та аргону [9]. Результати чисельного моделювання, які запропоновані в роботах [2, 5–7, 9], підтверджено експериментально.

Відомі [11–13] антени поверхневих хвиль (АПХ), які призначені для передавання та приймання радіосигналів дециметрового та сантиметрового діапазону хвиль. Конструкція таких антен складається з металевого стержня, модульованого діелектричного покриття та металевих неоднорідностей. Діелектричне покриття використовують як сповільнювальну структуру поверхневої електромагнітної хвилі (ПЕХ). Сповільнювальний ефект в АПХ можна отримати, якщо замість діелектрика використати систему з металевих кілець [12]. АПХ, в яких діелектрик замінено металевими кільцями, називають ребристо-стержневими антенами (РСА). Враховуючи актуальність використання плазмового розряду в сучасних антенно-фідерних пристроях та традиційне використання АПХ та РСА як компонентів інфокомунікаційної техніки, у цій роботі розроблено та досліджено плазмову РСА – РСА, в якій металевий стержень замінено плазмою.

Мета та завдання дослідження

У роботі поставлено завдання дослідження впливу конструктивних параметрів плазмової РСА на форму ДС. Поставлене завдання вирішується двома шляхами: в першому розділі наведено результати розроблення моделі плазмової РСА за допомогою Ansoft HFSS. В другому розділі подано результати експериментальних досліджень плазмової РСА, які підтверджують адекватність чисельної моделі. З метою виявлення особливості ПА, за якої вона стає електрично невидимою, автор проводив дослідження в режимі роботи плазмової РСА та за відсутності плазми.

У цій роботі об'єктом дослідження є плазмова РСА, предметом дослідження – ДС, утворені збудженням плазмової РСА.

Чисельне моделювання плазмової РСА

В цьому розділі наведено результати чисельного моделювання плазмової РСА, виконаного за допомогою Ansoft HFSS; було створено 3D модель плазмової РСА завдовжки 4λ. Плазма в моделі

задана як середовище, що описується за теорією Друде [1–2, 5, 14], згідно з якою діелектрична проникність плазми визначається за формулою:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i * \nu_e)}, \quad (1)$$

де ω_p – плазмова частота, визначається за таким співвідношенням:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e * e^2}{\epsilon_0 * m_e}}, \quad (2)$$

ω – циклічна частота радіосигналу; i – уявна одиниця. Провідність плазми σ здійснено за такою формулою [15]:

$$\sigma = \frac{n_e * e^2}{m_e * \nu_e}. \quad (3)$$

У таблиці наведено відомі [1, 5, 9] параметри плазми, за яких здійснено моделювання плазмової РСА.

Параметри плазми

Назва	Позначення	Величина
Концентрація плазми	n_e	$4 * 10^{17} \text{ м}^{-3}$
Частота зіткнень електронів у плазмі	ν_e	10^8 Гц
Відносна магнітна проникність плазми	μ_r	1 Н/А^2
Діелектрична проникність вакууму	ϵ_0	$8,85 * 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Маса електрона	m_e	$9 * 10^{-31} \text{ кг}$
Заряд електрона	e	$1,6 * 10^{-19} \text{ Кл}$

На рис. 1 зображено структуру плазмової РСА, яка складається із таких елементів: 1 – скляна трубка, заповнена парами ртуті; 2 – металеві кільця; 3 – випромінювальні металеві радіальні неоднорідності. Основними конструктивними параметрами плазмової РСА є період металевих неоднорідностей d_1 та їх ширина Δ [13]. Оскільки ці параметри легко змінювати під час досліджень, в роботі досліджено вплив різних значень d_1/λ на форму ДС плазмової РСА. Параметри плазми, наведені в табл. 1, залишалися незмінними упродовж дослідження. Діелектричну проникність та провідність плазми обчислено за формулами (1) та (3).

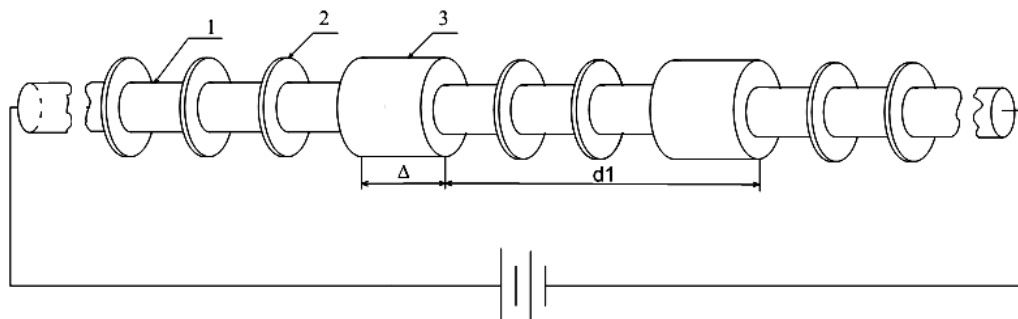


Рис. 1. Плазмова ребристо-стержнева антена

ДС плазмової РСА отримано за значень $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$ в режимі роботи та за відсутності плазми. Результати чисельного моделювання наведено на рис. 2.

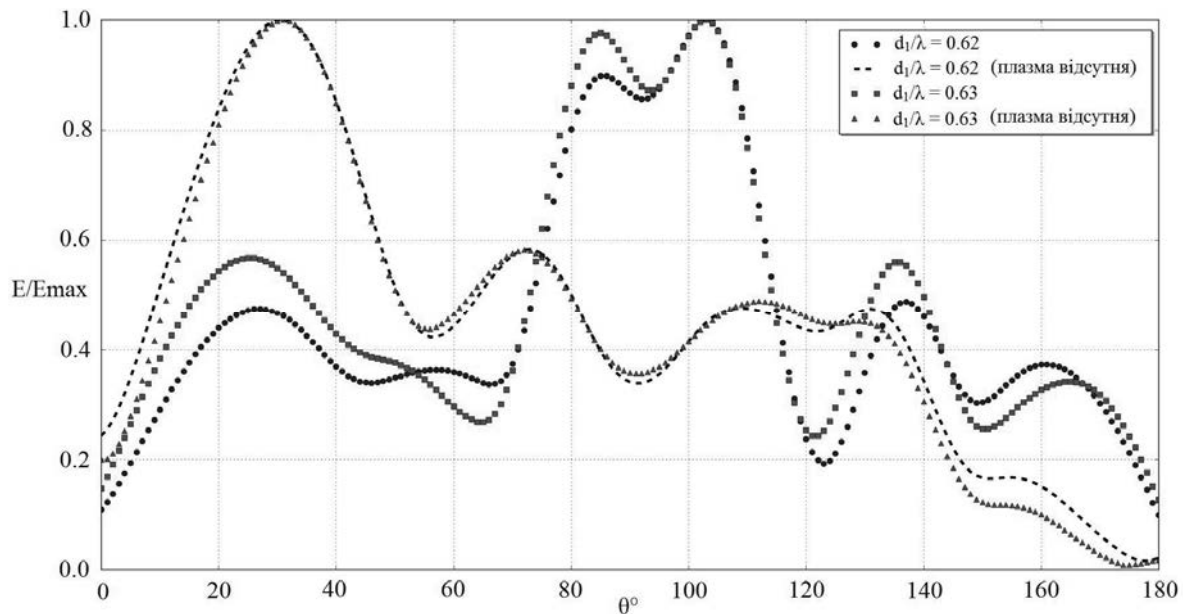


Рис. 2. Діаграма спрямованості плазмової РСА

Як видно з рис. 2, напрям основного випромінювання коливається від 75° до 112° на рівні 0,7. Рівні бічних пелюстків значно менші за рівень головного пелюстка. За відсутності плазми зникає поперечне випромінювання. В такому режимі спостерігається значне бічне випромінювання під кутом 30° . На рис. 2 видно, що форма ДС плазмової РСА залежить від співвідношення d_1/λ , а головний пелюсток роздвоюється. Такі особливості плазмової РСА можна використати під час виготовлення елементів інфокомунікаційної техніки, наприклад, інтерферометрів або комутаторів. Подібні ефекти описано в роботі [13], де отримано математичну модель металеві РСА. Порівняно з ДС, отриманими в згаданій роботі, головний пелюсток плазмової РСА ширший, а бічні пелюстки мають вищі рівні. Це зумовлено тим, що в роботі [13] математична модель описує металеві АПХ та РСА безмежних розмірів. Під час поширення рухомої ПЕХ вздовж структури АПХ та РСА безмежних розмірів енергія ПЕХ повністю випромінюється у вільний простір і не дифрагує на випромінювальних металевих радіальних неоднорідностях, якими є краї АПХ та РСА. В моделі, отриманій в цій роботі, враховано ефект відбиття рухомої ПЕХ від кінця структури та поширення в ній зворотної ПЕХ. Також було забезпечено випромінювання рівної кількості енергії випромінювальними металевими радіальними неоднорідностями.

Результати експериментального моделювання

Щоб підтвердити адекватність результатів, отриманих під час чисельного моделювання, автор провів експериментальне дослідження. Розроблено експериментальний макет плазмової РСА довжиною 4λ , схема якого наведена на рис. 1. Дослідження виконано в екранованій камері, стіни якої покриті радіопоглинальним матеріалом задля зменшення впливу зовнішніх завад та інтерференції, яка виникає через відбиття від стін електромагнітних хвиль. Плазмова РСА збуджувалася електромагнітним синусоїдальним сигналом з відомою λ . Від плазмової РСА наведене електромагнітне поле через коаксіальний кабель подавалося на АЦП. ДС отримано за значень $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$ в режимі роботи плазмової РСА та за відсутності плазми.

На рис. 3 видно, що для плазмової РСА характерне поперечне випромінювання, яке зникає, як і у разі чисельного моделювання, за відсутності плазми. Ширина головних пелюстків змінюється від 85° до 95° на рівні 0,7. Під час експериментального дослідження ефект роздвоєння головних пелюстків не проявляється за заданих відношень d_1/λ . Рівень бокових пелюстків значно менший від головного пелюстка. Ріст бокових пелюстків під кутом 30° , як і у чисельному моделюванні, проявляється за відсутності плазми. Бічне випромінювання виникає через явище інтерференції двох ПЕХ: тієї, що рухається вздовж структури, та зворотної, відбитої від кінця структури, внаслідок перевипромінювання випромінювальними металевими радіальними неоднорідностями плазмової РСА.

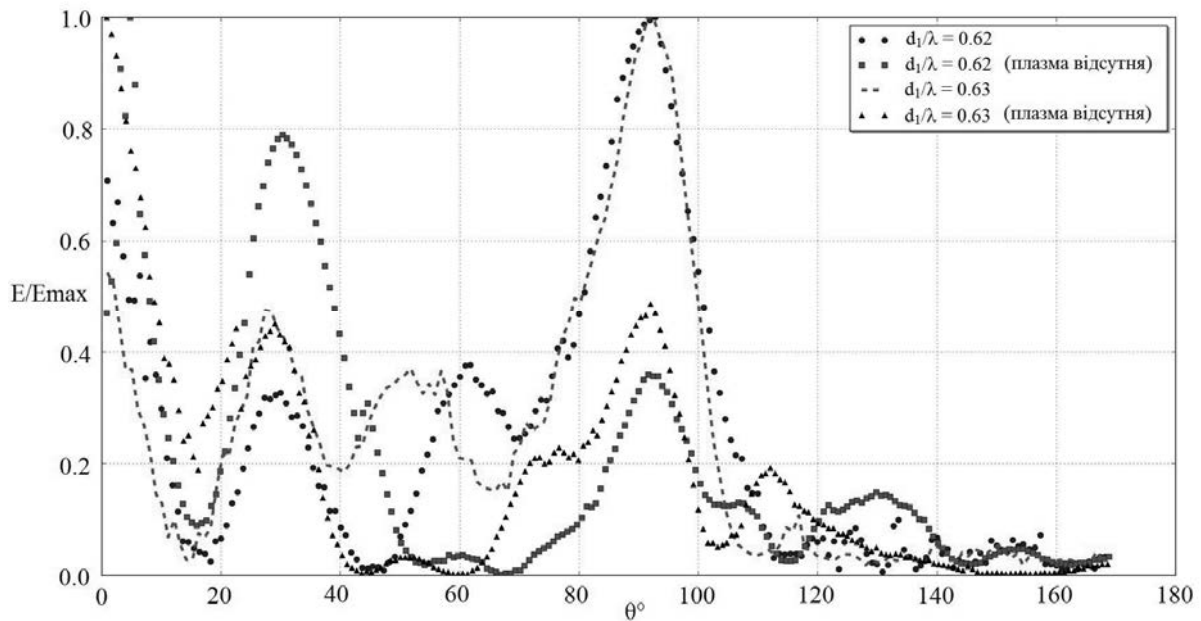


Рис. 3. Діаграма спрямованості плазмової РСА

Висновок

У роботі продемонстрована можливість використання плазмового розряду як одного з компонентів структури РСА. На основі проведеного огляду літературних джерел розроблено чисельну модель плазмової РСА довжиною 4λ . Досліджено параметри плазми та вплив конструктивних параметрів на форму ДС плазмової РСА. Виявлено, що ДС розробленої плазмової РСА за конструктивних параметрів $d_1/\lambda = 0,62$ та $d_1/\lambda = 0,63$ має форму поперечного випромінювання до осі антени, яке зникає за відсутності плазми. Плазму в чисельній моделі задавали як середовище, що описується теорією Друде. Адекватність результатів, отриманих шляхом чисельного моделювання, підтверджена експериментальними дослідженнями.

1. Jenn D. C. *Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art* / D. C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189. – San Diego, 2003. – 27 p.
2. Богачев Н. Н., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г. Моделирование режимов работы плазменной антенны // *Прикладная физика*, 2014, № 4.
3. Кириченко Ю. В., Карлов В. Д., Кійко А. С. Особливості використання плоского шару плазми з малим вигином в антенних системах // *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 2017, 4(53).
4. Сергейчев К. Ф., Минаев И. М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах // *Труды Института общей физики им. А. М. Прохорова Т. 7*, 2014.
5. Zong-sheng Chen, Li-fang Ma and Jia-chun Wang. Modeling of a Plasma Antenna with Inhomogeneous Distribution of Electron Density. *International Journal of Antennas and Propagation*. Vol. 2015, Article ID 736090, 5 p.
6. Vecchioni E., Cerri G., Russo P., Mariani Primiani V. *Experimental and Theoretical Investigation on Plasma Antennas*. Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, 60131 Ancona.
7. Prince Kumar and Rajneesh Kumar. Simulation of Plasma Antenna Parameters. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*. May 2016, Vol. 4, Issue 5, ISSN 2349-4476.
8. Syed Mohammad Adnan, PallaviAsthana, O. P. Singh, Mohd. Maroof Siddiqui. Comparative Study of Plasma and Metallic Antenna. *ACEIT Conference Proceeding 2016*, pp. 229–232.
9. Raviprakash Shriwas and Sayali Gulhane. Up gradation of Plasma Antenna by Using Fluorescent Tubes. *IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IJEC)*, Vol. 3, Issue 1, January 2015.
10. Chintan Patel, Nadeem Masani, Tushar Parekh. Plasma Antenna. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* – Vol. 15 Number 6 – Sep 2014.
11. Драбкин А. Л., Зуенко В. Н., Кислов А. Г. *Антенно-фидерные устройства*. Изд. 2-е. Москва: Советское радио, 1974.
12. Thomas A. Milligan. *Modern antenna design* // by Thomas A. Milligan. – 2nd ed. p. cm / TK7871.6. M54 2005.
13. Hoblyk V. V.

Mathematical model antennas, based on modulated plazmon-polariton structures. National University Lviv Polytechnic, Lviv, Ukraine. ISSN 1562-6016. ВАХТ. 2015. No. 4(98). 14. Podgorny I. M. Topics in Plasma Diagnostics. Plenum Press, New York, 1971. 15. Kadomtsev B. B. and Pogutse O. P. Electric conductivity of a plasma in a strong magnetic field. Soviet physics jetp, vol. 26, number 6, june, 1968.

References

1. Jenn D. C. *Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art* / D. C. Jenn; Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189. – San Diego, 2003. – 27 p.
2. Богачев Н. Н., Богданкевич И. Л., Гусейн-заде Н. Г. Моделирование режимов работы плазменной антенны. *Прикладная физика*, 2014, № 4. 3. Кириченко Ю. В., Карлов В. Д., Кійко А. С. Особливості використання плоского шару плазми з малим вигином в антенних системах. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил*, 2017, 4(53) ISSN 2073-7378.
4. Сергейчев К. Ф., Минаев И. М. Плазменные антенны на поверхностных электромагнитных волнах. *Труды Института общей физики им. А. М. Прохорова Том 7*, 2014. 5. Zong-sheng Chen, Li-fang Ma and Jia-chun Wang. *Modeling of a Plasma Antenna with Inhomogeneous Distribution of Electron Density. International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2015, Article ID 736090, 5 p.
6. Vecchioni E., Cerri G., Russo P., Mariani Primiani V. *Experimental and Theoretical Investigation on Plasma Antennas. Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, 60131 Ancona.* 7. Prince Kumar and Rajneesh Kumar. *Simulation of Plasma Antenna Parameters. International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. May 2016, Vol. 4, Issue 5, ISSN 2349-4476.*
8. Syed Mohammad Adnan, PallaviAsthana, O. P. Singh, Mohd. Maroof Siddiqui. *Comparative Study of Plasma and Metallic Antenna. ACEIT Conference Proceeding 2016, pp. 229–232.* 9. Raviprakash Shriwas and Sayali Gulhane. *Up gradation of Plasma Antenna by Using Fluorescent Tubes. IPASJ International Journal of Electronics & Communication (IJEC), Volume 3, Issue 1, January 2015, ISSN 2321-5984.*
10. Chintan Patel, Nadeem Masani, Tushar Parekh. *Plasma Antenna. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 15 Number 6 – Sep 2014.* 11. А. Л. Дрabbкин, В. Н. Зузенко, А. Г. Кислов. *Антенно-фидерные устройства. Изд. 2-е, Москва: Советское радио, 1974.* 12. Thomas A. Milligan. *Modern antenna design // by Thomas A. Milligan. – 2nd ed. p. cm / TK7871.6. M54 2005.*
13. V. V. Hoblyk. *Mathematical model antennas, based on modulated plazmon-polariton structures. National University Lviv Polytechnic, Lviv, Ukrain. ISSN 1562-6016. ВАХТ. 2015. No.4(98).*
14. I. M. Podgorny, *Topics in Plasma Diagnostics. Plenum Press, New York 1971.* 15. B. B. Kadomtsev and O. P. Pogutse. *Electric conductivity of a plasma in a strong magnetic field. Soviet physics jetp, vol. 26, number 6, june, 1968.*