

УДК 537.8

Ю. В. Крушевський, к. т. н., доц.; Ю. І. Кравцов;**В. В. Чернига, к. т. н., доц.****ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОЛЯ І СПРЯМОВАНОСТІ
ЕЛЕКТРИЧНОГО ЕЛЕМЕНТАРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА В БЛИЖНІЙ
І ПРОМІЖНІЙ ЗОНАХ**

У роботі проведено теоретичні дослідження структури поля елементарного електричного випромінювача в ближній і проміжній зонах. Побудовано діаграми спрямованості цього вібратора по електричній складовій його поля на відстанях 1,0 ... 35 см від нього.

Ключові слова: елементарний випромінювач, ближня, проміжна зони, діаграма спрямованості.

Вступ

Масове використання мобільних радіотелефонів (МРТ) є на сьогодні незаперечним фактом. Цей вид комунікації передбачає роботу системи стільникового мобільного зв'язку з використанням апаратури певних стандартів. Найпоширенішими з них на сьогодні є стандарти GSM-900 та GSM-1800. МРТ цих стандартів працюють у режимі передавання відповідно у частотних діапазонах 890...915 МГц та 1710...1785 МГц [3, 4].

Оскільки МРТ при його використанні знаходиться біля голови (біля мозку) користувача, має місце вплив його випромінювання на здоров'я людини. Про шкідливість цього впливу можна судити, порівнявши фактичну інтенсивність опромінювання голови з санітарною нормою, прийнятою в Україні.

Іншою актуальною на сьогодні задачею є вимірювання інтенсивності випромінювання МРТ з розробкою методів і засобів вимірювання.

Фактичну ж інтенсивність розрахувати чи виміряти не можливо, не дослідивши поле випромінювача в ближній та проміжній зонах.

Густина потоку потужності залежить від потужності випромінювання МРТ, відстані до точки спостереження, структури електромагнітного поля в цій точці та спрямованих властивостей антени радіотелефону. У сучасних МРТ використовуються дипольні, або спіральні антени. Дипольна антена представляє собою несиметричний чвертьхвильовий вібратор. Спіральна антена – циліндричної форми намотка дроту, довжина витка спіралі якого є значно менша за довжину хвилі, що випромінюється. Така антена, як відомо, характеризується поперечним до осі спіралі напрямком випромінювання. Її ж діаграма спрямованості буде такою ж, як і вібратора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Антени МРТ можна вважати короткими в масштабі випромінюваних ними довжин електромагнітних хвиль. Спрямованість коротких симетричних вібраторів довжиною $2l \leq 0,5\lambda$ практично збігається зі спрямованістю електричного вібратора Герца – фізичної моделі елементарного електричного випромінювача. Так, наприклад, ширина діаграми спрямованості симетричного напівхвильового вібратора ($2l = 0,5\lambda$) дорівнює 80° , а вібратора Герца – 90° , коефіцієнти спрямованої дії дорівнюють відповідно 1,64 і 1,50 [2,3].

Відомо, що симетричний електричний вібратор Герца випромінює електромагнітне поле, три складові якого у сферичних координатах дорівнюють [1]:

$$\dot{E}_{mr} = \frac{I_m l k^3}{2\pi \omega \varepsilon_a} \left[\left(\frac{1}{kr} \right)^2 - j \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m l k^3}{4\pi \omega \varepsilon_a} \left[\frac{1}{kr} - j \left(\frac{1}{kr} \right)^2 - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = j \frac{I_m l k^2}{4\pi} \left[\frac{1}{kr} - j \left(\frac{1}{kr} \right)^2 \right] \cdot e^{-jkr} \cdot \sin \theta, \quad (3)$$

де \dot{E}_{mr} , $\dot{E}_{m\theta}$ та $\dot{H}_{m\phi}$ – комплексні амплітуди відповідно радіальної, меридіональної складових електричного поля та екваторіальної складової магнітного поля; I_m – амплітуда гармонічного струму, що протікає у вібраторі Герца; l – довжина вібратора; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота електромагнітного поля; ε_a – абсолютна діелектрична проникність середовища, що оточує вібратор; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число (коефіцієнт фази) електромагнітної хвилі; θ – меридіональна кутова координата точки спостереження поля вібратора; r – відстань від вібратора до точки спостереження; λ – довжина хвилі поля вібратора.

Усі задачі радіозв'язку передбачають, що точка спостереження знаходиться в далекій зоні, де $kr \gg l$, і складовою \dot{E}_{mr} у порівнянні з $\dot{E}_{m\theta}$ можна знехтувати, тобто у цій зоні беруться до уваги лише дві ортогональні складові поля:

$$\dot{E}_{m\theta} = \frac{I_m l k}{4\pi \omega \varepsilon_a r} e^{-jkr} \cdot \sin \theta,$$

$$\dot{H}_{m\phi} = j \frac{I_m l k}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot \sin \theta.$$

Тут середнє значення вектора густини потоку потужності має тільки одну радіальну складову [1, 2]

$$\bar{\Pi}_{сер} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\dot{E}_{m\theta} \dot{H}_{m\phi}^* \right],$$

яку можна визначити за простою формулою [2]

$$\Pi_{сер} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi r^2}, \quad (4)$$

де P_{Σ} – потужність випромінювання вібратора Герца.

У випадку дослідження поля МРТ, який опромінює голову користувача, відстань r є такою, що сильна нерівність $kr \ll 1$ або $kr \gg 1$ не виконується. Так, наприклад, при $r \approx 5$ см – найменшій відстані від випромінювача до головного мозку людини, на частоті 912,5 МГц (середнє значення частоти стандарту GSM-900) значення $kr \approx 1$. Отже, у виразах (1)...(3) у квадратних дужках жодних спрощень зробити не можна. На таких відстанях знаходяться точки простору, які належать до проміжної зони [2], де електромагнітне поле матиме складнішу структуру, бо визначатиметься трьома складовими, описаними виразами (1)...(3). Отже, при розрахунку густини потоку потужності використання формули (4) дасть значну похибку.

По магнітній складовій, як видно з виразу (7), діаграма спрямованості випромінювача повністю збігається з відомими результатами [1, 2] і для досліджуваного випадку представлена на рис.1.

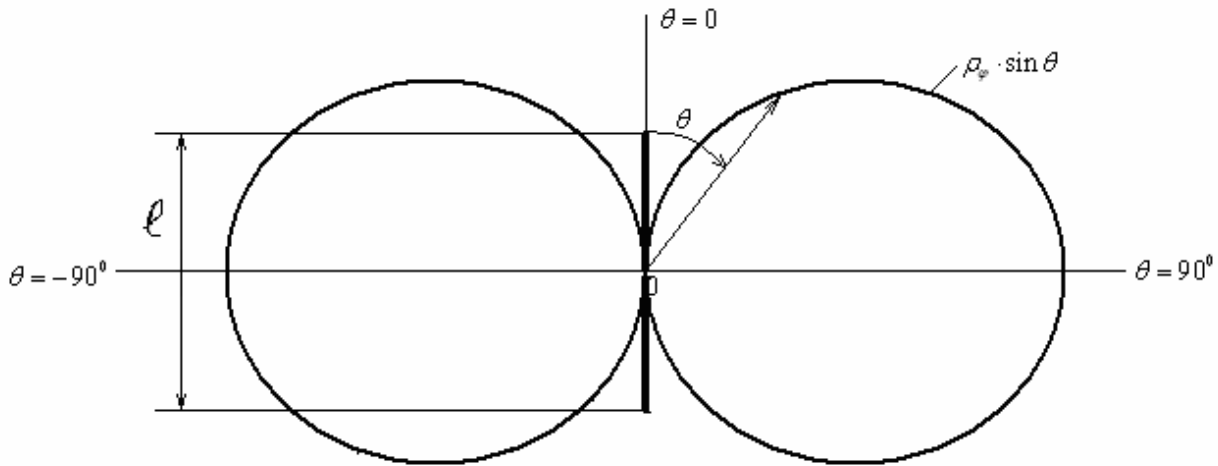


Рис. 1. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по магнітній складовій поля

Постановка завдання

Електромагнітне поле антен базових станцій представляє інтерес тільки у дальній зоні. Воно добре вивчене й описане в технічній літературі та підручниках.

Практичний інтерес є до поля антени мобільного радіотелефону в ближній і проміжній ($kr = 0,5 \dots 5$) зонах, опис якого в літературі відсутній.

Оскільки основні параметри антен МРТ є практично однаковими з відповідними параметрами елементарного електричного випромінювача, проведемо дослідження структури поля та діаграм спрямованості останнього, а отримані результати узагальнимо на антени МРТ. Такий підхід до поставленого завдання дозволить суттєво уточнити розподіл поля, що опромінює користувача мобільника.

Основні матеріали статті

Якщо комплексні величини у квадратних дужках виразів (1)...(3) представити в показниковій формі і

врахувати, що $\frac{k}{\omega \varepsilon_a} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$, то вони перепишуться так:

$$\dot{E}_{mr} = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot e^{-j\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

$$\dot{E}_{m\theta} = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr - \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (6)$$

$$\dot{H}_{m\phi} = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot e^{-j\left(kr - \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{1}{kr}\right)} \cdot \sin \theta, \quad (7)$$

де $E_0 = \frac{I_m l k^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}$, $H_0 = \frac{I_m l k^2}{4\pi}$.

Вирази (5)...(7) є комплексними амплітудами складових гармонічного електромагнітного поля елементарного випромінювача. Їм будуть відповідати миттєві значення напруженостей у будь-який момент часу t :

$$E_r = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot \cos\left(\omega t - kr - \arctg \frac{1}{kr}\right) \cdot \cos \theta, \quad (8)$$

$$E_\theta = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(\omega t - kr + \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1}\right) \cdot \sin \theta, \quad (9)$$

$$H_\varphi = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(\omega t - kr - \arctg \frac{1}{kr}\right) \cdot \sin \theta. \quad (10)$$

Вибравши $t=0$, вирази (8)...(10) перепишемо так:

$$E_r = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6} \cdot \cos\left(kr + \arctg \frac{1}{kr}\right) \cdot \cos \theta, \quad (11)$$

$$E_\theta = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(kr + \arctg \frac{kr}{k^2 r^2 - 1} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta, \quad (12)$$

$$H_\varphi = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4} \cdot \cos\left(kr + \arctg \frac{1}{kr} - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \theta. \quad (13)$$

або:

$$E_r = E_{mr} \cos \theta, \quad (14)$$

$$E_\theta = E_{m\theta} \sin \theta, \quad (15)$$

$$H_\varphi = H_{m\varphi} \sin \theta, \quad (16)$$

де

$$E_{mr} = 2E_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^4 + \left(\frac{1}{kr}\right)^6}$$

$$E_{m\theta} = E_0 \sqrt{\left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr}\right)^3\right]^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4}$$

$$H_{m\varphi} = H_0 \sqrt{\left(\frac{1}{kr}\right)^2 + \left(\frac{1}{kr}\right)^4}$$

є амплітудними значеннями відповідних складових поля випромінювача на відстані r від нього.

Форма діаграми спрямованості випромінювача по складовій H_φ залишається однаковою для будь-яких відстаней r до точки спостереження і представлена у меридіональній площині

(рис. 1).

Форма діаграми спрямованості випромінювача по електричній складовій E , яка є сумою ортогональних складових E_r та E_θ , що знаходиться за формулою:

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_\theta^2}, \quad (17)$$

буде залежати від співвідношення цих складових, яке, у свою чергу, залежатиме від відстані r до точки спостереження. Співвідношення між зазначеними складовими буде змінюватись, бо, по-перше, їх амплітуди зі зростанням r будуть зменшуватись із різною швидкістю, і, по-друге, між ними існує фазовий зсув $\Delta\varphi = \left(\arctg \frac{1}{kr} - \arctg \frac{kr}{k^2r^2 - 1} + \frac{\pi}{2} \right)$, який теж залежить від r . Отже складова E може бути знайдена як сума миттєвих значень ортогональних складових цього поля за виразом (17) з урахуванням (12), (13):

$$E = E_0 \sqrt{4 \left[\left(\frac{1}{kr} \right)^4 + \left(\frac{1}{kr} \right)^6 \right] \cdot \cos^2 \left(kr + \arctg \frac{1}{kr} \right) \cdot \cos^2 \theta + \left[\frac{1}{kr} - \left(\frac{1}{kr} \right)^3 \right]^2 + \left(\frac{1}{kr} \right)^4} \cdot \cos^2 \left(kr + \arctg \frac{kr}{k^2r^2 - 1} - \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin^2 \theta} \quad (18)$$

За виразом (18) побудуємо залежність $E(\theta)$ для різних відстаней r , вважаючи елементарний електричний випромінювач антеною мобільника за стандартом GSM-900 ($\lambda_{\text{сеп}} = 32,8$ см).

Випадок, коли $r = 1$ см ($kr = 0.2$), $E_{mr} = 2,04 E_m \theta$.

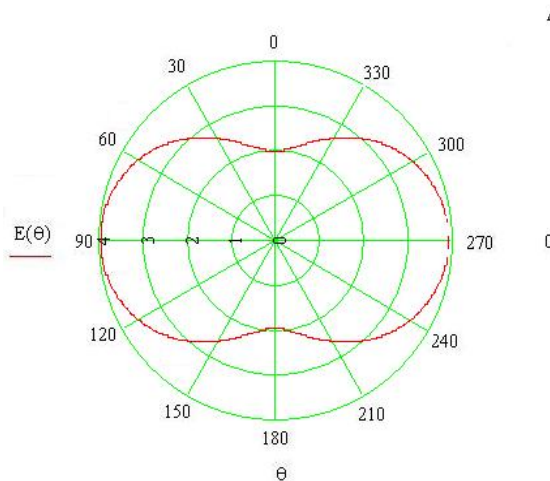


Рис. 2. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 1$ см

Випадок, коли $r = 5$ см ($kr = 1$), $E_{mr} = 2,82 E_m \theta$.

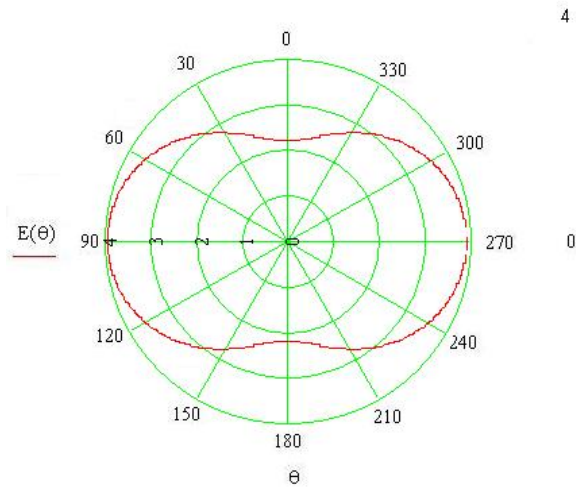


Рис. 3. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 5$ см

Випадок, коли $r = 10$ см ($kr = 2$), $E_{mr} = 1,24 E_m \theta$.

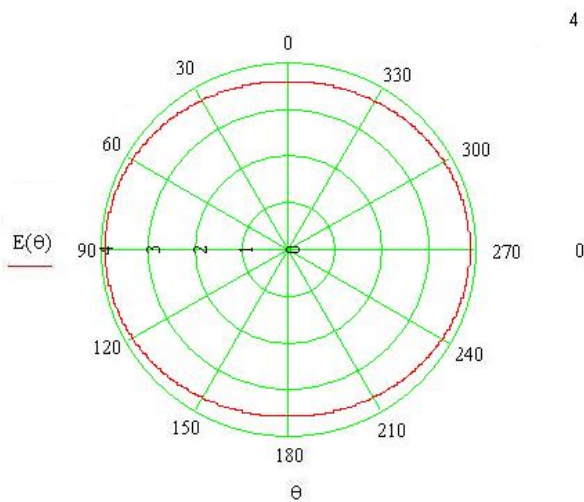


Рис. 4. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 10$ см

Випадок, коли $r = 12.5$ см ($kr = 2.5$), $E_{mr} = 0,93 E_m \theta$.

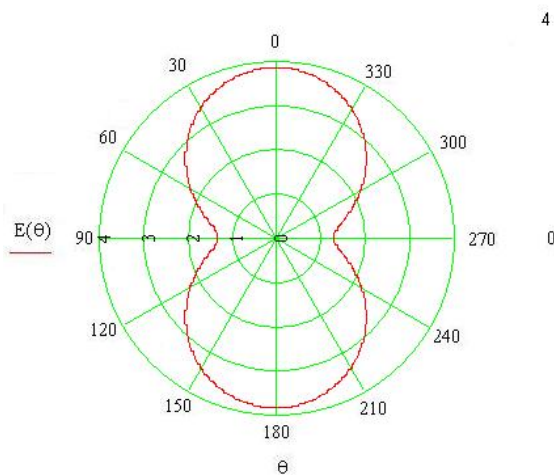


Рис. 5. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 12.5$ см

Випадок, коли $r = 14,1 \text{ см}$ ($kr = 2,75$), $E_{mr} = 0,77 E_m \theta$.

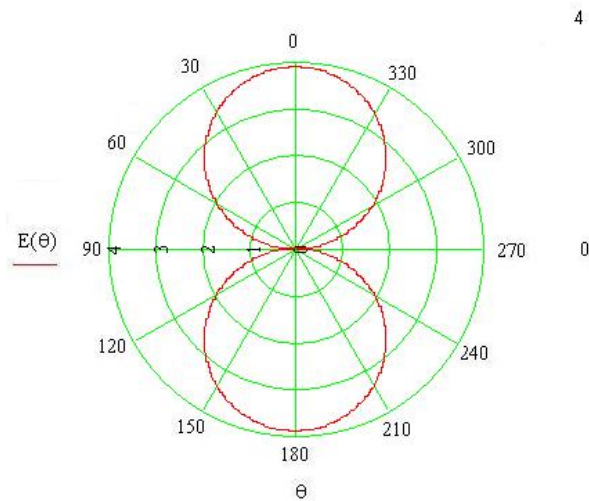


Рис. 6. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r=14,1 \text{ см}$

Випадок, коли $r = 15 \text{ см}$ ($kr = 3$), $E_{mr} = 0,74 E_m \theta$.

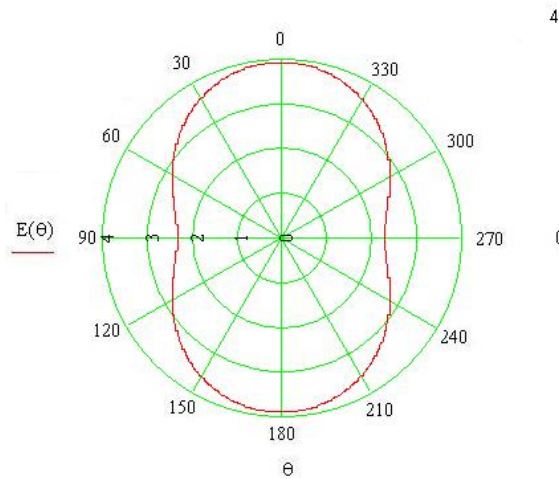


Рис. 7. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 15 \text{ см}$.

Випадок, коли $r = 16 \text{ см}$ ($kr = 3,2$), $E_{mr} = 0,71 E_m \theta$.

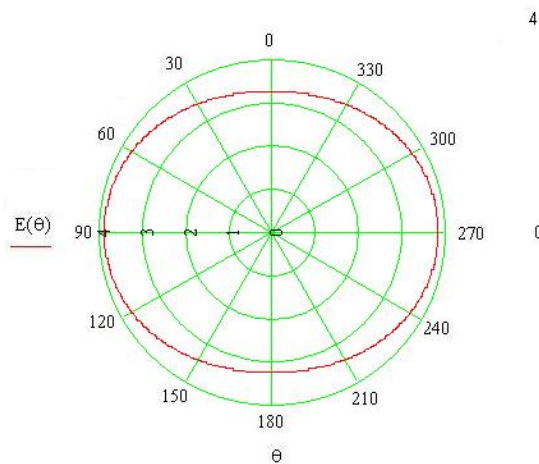


Рис. 8. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 16 \text{ см}$.

Випадок, коли $r = 17\text{см}$ ($kr = 3.4$). $E_{mr} = 0,68E_m \theta$.

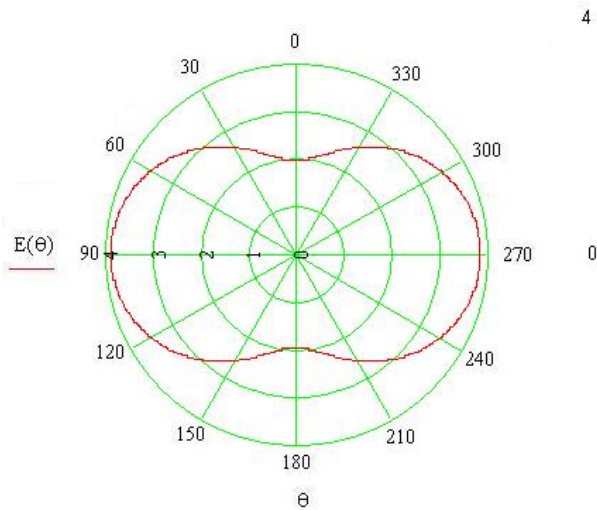


Рис. 9. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 17\text{ см}$.
Випадок, коли $r = 20\text{см}$ ($kr = 4$), $E_{mr} = 0,53 E_m \theta$.

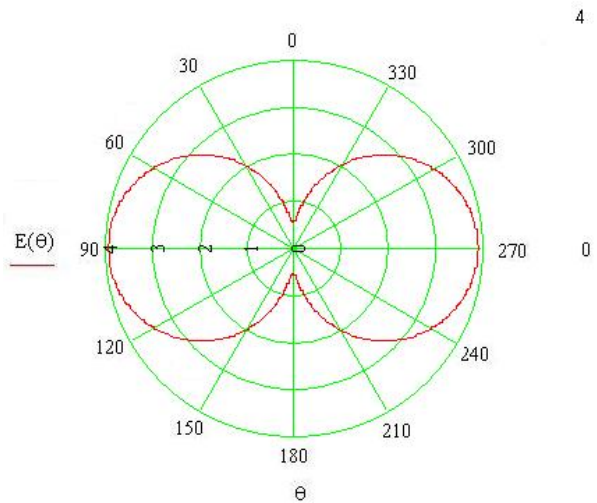


Рис. 10. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 20\text{ см}$.

Випадок, коли $r = 35\text{см}$ ($kr = 7$). $E_{mr} = 0,29 E_m \theta$.

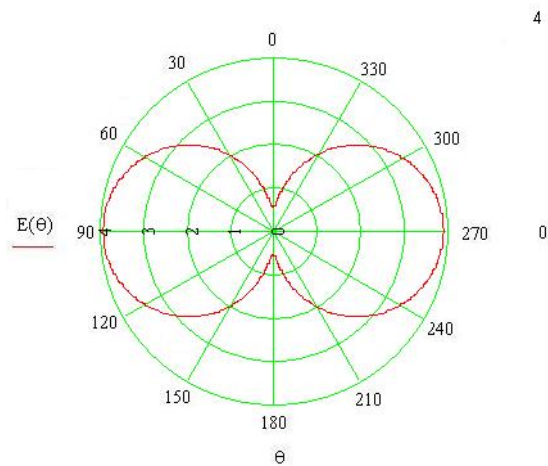


Рис. 11. Діаграма спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричному полю при $r = 35\text{ см}$.

Аналіз отриманих результатів

На малих відстанях, коли $kr \leq 5$, амплітуди складових електричного поля E_{mr} і $E_{m\theta}$ є величинами одного порядку і на результат векторного додавання буде мати великий вплив фазовий зсув $\Delta\varphi$. Так, у межах $0 \leq kr \leq 5$ $\Delta\varphi(r)$ зміниться від π до майже $\pi/2$, а $\cos\Delta\varphi$ – от 0 до 1. Через це діаграми спрямованості випромінювача по електричному полю змінюються від горизонтальної «вісімки» (рис.2) до вертикальної (рис.6) й знову до горизонтальної (рис.10).

На відстані приблизно 12,33см ($kr \approx 2,36$) амплітуди складових електричного поля стають рівними між собою. Далі амплітуда радіальної складової E_{mr} , зменшуючись швидше за амплітуду меридіональної складової $E_{m\theta}$, на відстані 100 см ($kr = 19,57$) $E_{mr} = 0,1E_{\theta}$. Фазовий зсув на відстанях $r \geq 25$ см стає постійним, рівним $\pi/2$, і практично перестає впливати на форму діаграми спрямованості.

А, отже, на відстанях $r > 100$ см ($r \geq 3\lambda$) радіальною складовою у порівнянні з меридіональною ($E_{mr} < 0,1E_{m\theta}$) можна знехтувати і вважати діаграму спрямованості випромінювача остаточно сформованою.

Висновки

1. Форма діаграми спрямованості елементарного електричного випромінювача по електричній складовій його поля в ближній і проміжній зонах суттєво залежить від відстані до точки спостереження, що зумовлюється залежністю від цієї відстані не тільки відношення амплітуд радіальної і меридіональної складових поля, але і, головним чином, зсуву фаз між ними.

2. На межі між ближньою і проміжною зонами ($0,5 \leq kr \leq 5$) амплітуди складових електричного поля є величинами одного порядку і тому основний вплив на форму діаграми спрямованості буде мати фазовий зсув між цими складовими..

3. На відстанях, коли $kr \geq 5$, фазовий зсув між складовими електричного поля практично стає незалежним від відстані r і дорівнює постійній величині. Через це форма діаграми спрямованості стає залежною тільки від співвідношення амплітуд складових електричного поля і набуває остаточно вигляду на відстанях не менших за 3λ .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1971 – 481 с.
2. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1972 – 471 с.
3. Попов В.И. Основы сотовой связи стандарта GSM. – М.: Трениздат, 2005 – 178 с.
4. Ратынский М.В. Основы сотовой связи. – М.: Радио и связь, 1998 – 316 с.

Крушевський Юрій Володимирович – доцент кафедри радіотехніки;

Кравцов Юрій Іванович – старший викладач кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури;

Чернига В'ячеслав Васильович – доцент кафедри радіотехніки.

Вінницький національний технічний університет