

УДК 621.396.67(045)

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ УНІВЕРСАЛЬНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АНТЕНИ

Л. Я. Ільницький, д-р техн. наук, проф.

О. А. Щербина, канд. техн. наук, доц.

К. В. Мартиновченко

Національний авіаційний університет

olchik_sunday@ukr.net

Розглянуто принцип побудови універсальної п'ятиелементної вимірювальної антени, яка може застосовуватись у мобільних станціях радіомоніторингу. Подано основні теоретичні принципи і співвідношення, що використовуються при конструюванні антенної системи.

Ключові слова: вимірювальна антена; вібраторна антена; лінійний ортогональний поляризаційний базис; характеристика напрямленості; діюча довжина; коефіцієнт підсилення; поляризаційні властивості антени.

Construction principle of universal five-element measuring antenna is considered, which can be used in mobile radio monitoring stations. The main theoretical principles and ratios are present which can be used when designing the antenna system.

Keywords: measuring antenna; dipole antenna; linear polarization orthogonal basis; directional characteristic; effective length; gain; polarization properties of the antenna.

Вступ

Для забезпечення виконання правил та норм регламенту радіозв'язку користувачами радіочастотного ресурсу створені державні служби, які контролюють параметри випромінювання радіоелектронних засобів і які оснащуються апаратурою для радіомоніторингу електромагнітної обстановки та вимірювань параметрів електромагнітних полів.

Одним із основних елементів такої апаратури є вимірювальна антена.

Зв'язок між параметрами електромагнітного поля і електрорушійною силою (ЕРС) на виході антени визначається характеристикою напрямленості, діючою довжиною, діючою площею, коефіцієнтом підсилення та поляризаційними властивостями антени. Наведені параметри вимірювальної антени повинні бути відомими і визначені з великою точністю.

Якщо напрямок поширення хвилі не збігається з максимумом діаграми напрямленості, то виникають похибки у вимірюваннях напруженості електричного поля та параметрів поляризації радіохвилі.

Для усунення таких похибок необхідно розкрити антени орієнтувати перпендикулярно напрямку падіння радіохвилі. Просторова орієнтація антени в процесі вимірювання потребує певного часу і супроводжується додатковими по-

хибками. Це ускладнює вимірювання у випадках рухливого у просторі джерела випромінювання. Такий недолік вимірювальних антен робить їх використання в службах радіоконтролю неефективним.

Постановка завдання

Під час використання електромеханічного приводу з автоматичним пошуком напрямку надходження радіохвилі проблема вирішується не повною мірою, оскільки швидкодія буде обмежена інерційними властивостями електромеханічного приводу і масою антени.

Більш вдалий спосіб розв'язання проблеми — створення антенної системи із застосуванням інформаційних технологій визначення будь-яких параметрів електромагнітного поля. При такому підході антенна система не змінює свого положення відносно вибраної системи координат, тобто її просторове положення встановлюється так, щоб зберігались лише кутові координати між характерними напрямками діаграми напрямленості і географічними лініями перерізу земної кулі. При цьому наведені ЕРС будуть відображати параметри електромагнітного поля з урахуванням діаграми напрямленості антенної системи, напряму поширення радіохвилі і її поляризації.

Поляризацію електромагнітної хвилі визначають, використовуючи лінійні ортогональні поляризаційні базиси [1]:

$$\left. \begin{aligned} e_{\theta} &= E_{\max}^{\theta} \cos \omega t; \\ e_{\varphi} &= E_{\max}^{\varphi} \cos(\omega t + \psi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де E_{\max}^{θ} — амплітуда складової, площина поляризації якої збігається з меридіональною площиною сферичної системи координат ($\varphi = \text{const}$);

E_{\max}^{φ} — амплітуда складової, площина поляризації якої збігається з азимутальною площиною ($\theta = \pi/2$); ω — колова частота коливань; ψ — фазовий зсув векторів напруженості складових електричного поля з ортогональною поляризацією.

Для обчислення поляризаційних параметрів (коефіцієнт еліптичності, напрямок обходу вектором напруженості поляризаційного еліпса, кут нахилу поляризаційного еліпса) необхідно виміряти три параметри: E_{\max}^{θ} , E_{\max}^{φ} і ψ .

Напрямок поширення електромагнітної хвилі визначається меридіональним кутом θ і азимутальним кутом φ .

Для однозначного вимірювання кута θ можна використати систему, що складається з двох ан-

тен, розташованих по вертикалі, оскільки кут θ знаходиться в двох квадрантах ($0 \leq \theta \leq \pi$). Однозначне визначення азимутального кута φ потребує використання антенної системи, що складатиметься не менше ніж з трьох елементів, але розташованих у горизонтальній площині. Отже, використовуючи антенну систему, побудовану з п'яти елементів лінійної поляризації, можна визначити всі необхідні параметри електромагнітного поля.

Завдання дослідження полягає у створенні аналітичного апарату, який би за мінімальної кількості елементів в антенній решітці забезпечував за вимірними ЕРС обчислення всіх параметрів електромагнітного поля.

Основні теоретичні положення

Антенну систему для вимірювань параметрів поляризації радіохвилі в лінійному поляризаційному ортогональному базисі доцільно утворити з п'яти елементів лінійної поляризації (симетричні або несиметричні вібратори). Розташуємо вібратори так, щоб осі трьох із них були взаємно перпендикулярними (рис. 1).

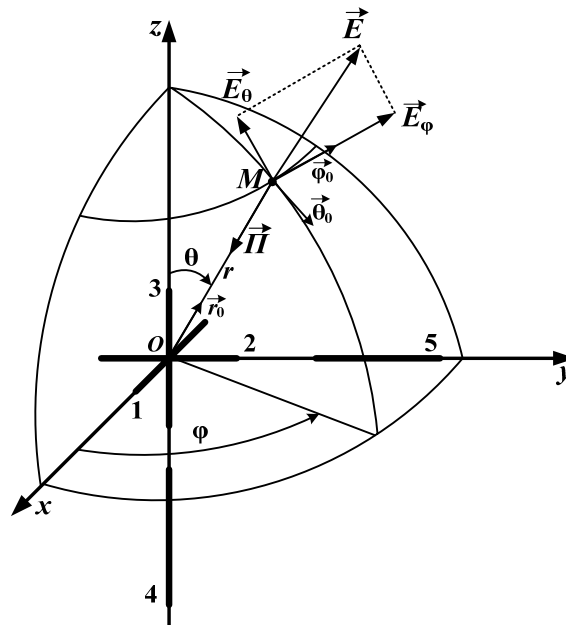


Рис. 1. Просторове положення елементів антенної системи

Решта (два) вібраторів установлюються співвідносно з вібратором 3 і вібратором 2.

Вібратор 1 орієнтують у заздалегідь вибраному напрямі, наприклад, паралельно лінії меридіану, а вісь вібратора 3 встановлюють перпендикулярно поверхні Землі. Тоді вісь вібратора 2 буде паралельна лініям географічної широти. Прив'язуємо до антени прямокутну і сферичну системи координат. Нехай електромагнітна хвиля з вектором напруженості електричного поля

\vec{E} падає на антенну систему під довільно взятими кутами θ і φ . M — точка спостереження на відстані r від початку системи координат (r, θ, φ) . Будемо використовувати комплексні методи. Вектор Пойтінга \vec{P} спрямований у точку O — фазовий центр антенної системи. Всі вібратори мають однакову діючу довжину l_d . Фазові центри вібраторів 2 і 5, 3 і 4 віддалені один від одного на відстань d .

За допомогою вібраторів 3 і 4 визначають меридіональний кут θ . Електрорушійна сила на затискачах вібратора 3 дорівнюватиме

$$\dot{\varepsilon}_3 = I_3 \dot{E}_0 F_3(\theta), \quad (2)$$

де $F_3(\theta)$ — характеристика напрямленості вібратора 3.

ЕРС на затискачах вібратора 4 буде такою

$$\dot{\varepsilon}_4 = I_4 \dot{E}_0 F_4(\theta) e^{-ikd \cos \theta}, \quad (3)$$

де $F_4(\theta)$ — характеристика напрямленості вібратора 4.

Характеристики напрямленості вібраторів 3 і 4 завдяки осевій симетрії не залежать від азимутального кута φ . Використовуючи ідентичні конструкції вібраторів 3 і 4 та однакові відносні довжини плеч, отримаємо однакові характеристики напрямленості. Тобто, вважаючи, що $F_3(\theta) = F_4(\theta) = F(\theta)$, знайдемо різницю ЕРС (3) і (2)

$$\dot{\varepsilon}_\Delta = \dot{\varepsilon}_4 - \dot{\varepsilon}_3 = i2\dot{\varepsilon}_3 e^{-i\frac{kd}{2} \cos \theta} \sin\left(\frac{kd}{2} \cos \theta\right). \quad (4)$$

Аналогічно знаходимо суму напруг

$$\dot{\varepsilon}_\Sigma = \dot{\varepsilon}_4 + \dot{\varepsilon}_3 = 2\dot{\varepsilon}_3 e^{-i\frac{kd}{2} \cos \theta} \cos\left(\frac{kd}{2} \cos \theta\right). \quad (5)$$

Вирази (4) і (5) дають можливість визначити меридіональний кут θ

$$\frac{|\dot{\varepsilon}_\Delta|}{|\dot{\varepsilon}_\Sigma|} = \operatorname{tg}\left(\frac{kd}{2} \cos \theta\right). \quad (6)$$

Кут θ може змінюватись від 0 до π . Реально кут θ може набувати значень більших $\pi/2$. Але вираз (6) дає можливість однозначно обчислити кут θ лише для випадку, якщо задовольняється нерівність ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$), оскільки ліва частина виразу (6) може набувати лише позитивні значення. Для однозначного результату обчислень кута θ подамо модулі напруг (4) і (5) у вигляді [2]

$$|\dot{\varepsilon}_\Delta| = |\dot{\varepsilon}_4 - \dot{\varepsilon}_3| = \sqrt{\varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 - 2\varepsilon_3\varepsilon_4 \cos(kd \cos \theta)} = \varepsilon_\Delta; \quad (7)$$

$$|\dot{\varepsilon}_\Sigma| = |\dot{\varepsilon}_3 + \dot{\varepsilon}_4| = \sqrt{\varepsilon_3^2 + \varepsilon_4^2 + 2\varepsilon_3\varepsilon_4 \cos(kd \cos \theta)} = \varepsilon_\Sigma. \quad (8)$$

Тоді, підносячи у квадратах вирази (7) і (8), отримаємо

$$\cos(kd \cos \theta) = \frac{\varepsilon_\Sigma^2 - \varepsilon_\Delta^2}{4\varepsilon_3\varepsilon_4} = \frac{\varepsilon_\Sigma^2 - \varepsilon_\Delta^2}{4\varepsilon_3^2}. \quad (9)$$

Вважатимемо, що $d = \lambda/2$, тоді $kd = \pi$. На жаль, із виразу (9) однозначний кут θ не можна розрахувати.

Це добре видно з графіка залежності $y_1 = f(\theta)$, зображеного на рис. 2, де $f(\theta) = \cos(\pi \cos \theta)$.

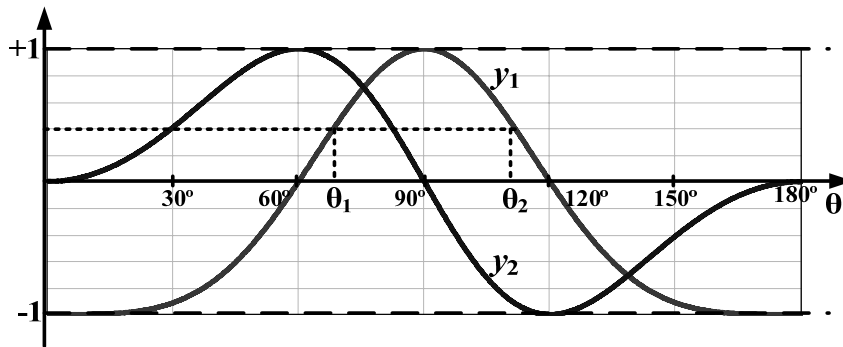


Рис. 2. Графіки залежностей $y_1 = \cos(\pi \cos \theta)$ і $y_2 = \sin(\pi \cos \theta)$

Функція має максимум при $\theta = 90^\circ$ і тому для одного і того самого значення правої частини рівняння (9) дістаємо два значення кута θ . На рис. 2 показано, що для y_1' маємо два значення θ_1 і θ_2 .

Щоб розширити область однозначного розрахунку азимутального кута за межі інтервалу $0 \dots 90^\circ$, використаємо зсув фази напруги $\dot{\varepsilon}_4$ на кут $\pi/2$. При цьому вираз (3) набуває вигляду

$$\dot{\varepsilon}_4 = \dot{\varepsilon}_3 e^{-i\left(kd \cos \theta - \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (10)$$

Оскільки $\cos(\pi \cos \theta - \pi/2) = \sin(\pi \cos \theta)$, то вирази (7) і (8) матимуть такі значення:

$$\tilde{\varepsilon}_\Delta = \varepsilon_3 \sqrt{2 - 2 \sin(\pi \cos \theta)};$$

$$\tilde{\varepsilon}_\Sigma = \varepsilon_3 \sqrt{2 + 2 \sin(\pi \cos \theta)}.$$

Звідси

$$\sin(\pi \cos \theta) = \frac{\tilde{\varepsilon}_\Sigma^2 - \tilde{\varepsilon}_\Delta^2}{4\varepsilon_3^2}. \quad (11)$$

Функція $y_2 = \sin(\pi \cos \theta)$ також зображена на рис. 2. Функції y_1 і y_2 сумісно дають змогу однозначно виміряти меридіональний кут. Права частина рівнянь (9) і (11), незважаючи на те, що

туди входять амплітуди змінних величин, залежно від співвідношень між сумою і різницею ЕРС, можуть бути і додатними, і від'ємними. Значення кута θ за обчисленими значеннями правих частин (y_1 і y_2) знаходяться в результаті таких логічних операцій:

- 1) якщо $\text{sign}y_1 = -1$ і $\text{sign}y_2 = +1$, то кут θ знаходиться в інтервалі $(0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$;
- 2) якщо $\text{sign}y_1 = +1$ і $\text{sign}y_2 = +1$, то кут θ знаходиться в інтервалі $(60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$;
- 3) якщо $\text{sign}y_1 = +1$, а $\text{sign}y_2 = -1$, то кут θ знаходиться в інтервалі $(90^\circ \leq \theta \leq 120^\circ)$;
- 4) якщо $\text{sign}y_1 = -1$, а $\text{sign}y_2 = -1$, то кут θ знаходиться в інтервалі $(120^\circ \leq \theta \leq 180^\circ)$.

На перший погляд випадок 4 здається малоімовірним, але при встановленні вимірювальної апаратури на літаку або гелікоптері кут надходження хвилі θ може суттєво переважати 120° . Випадок 3 трапляється частіше, оскільки вимірювальну антену можна розмішувати на щоглах, висотних спорудах, дахах будинків тощо. Отже, за допомогою вібраторів 3 і 4 однозначно вимірюється кут θ у всій області його існування:

$$\theta_{1,2} = \arccos \left[\frac{1}{\pi} \arccos \left(\frac{\varepsilon_\Sigma^2 - \varepsilon_\Delta^2}{4\varepsilon_3^2} \right) \right];$$

$$\theta_{3,4} = \arcsin \left[\frac{1}{\pi} \arccos \left(\frac{\tilde{\varepsilon}_\Sigma^2 - \tilde{\varepsilon}_\Delta^2}{4\varepsilon_3^2} \right) \right].$$

З чотирьох можливих варіантів реальне значення кута θ визначається або за допомогою логічних операцій, або із рівняння $\theta_p = \theta_q$, де $p = 1, 2$ $q = 3, 4$.

Отриманий меридіональний кут θ використовуємо для обчислення меридіональної складової вектора напруженості електричного поля. Для цього знаходимо амплітудне значення ЕРС ε_3 і вираз (2) перетворюємо до вигляду

$$E_{\max}^\theta = \frac{\varepsilon_3}{l_0 F(\theta)}.$$

Для визначення азимутального кута φ , під яким падає на антенну систему електромагнітна хвиля, та азимутальної складової вектора напруженості електричного поля E_{\max}^φ використовуємо вібратори 1, 2, 5 (див. рис. 1).

Передусім потрібно їх характеристики напрямленості представити як функції кутів θ і φ . Очевидно, що всі вібратори мають однакові ха-

рактеристики напрямленості, які у власних сферичних системах координат описуються ідентичними формулами. Для вібраторів 2 і 5 власна система координат (r, α, β) .

Полярна вісь системи збігається з віссю Oy . Меридіональна площина ($\beta = \text{const}$) проходить крізь вісь Oy і точку спостереження M , координати якої в новій системі r, α, β . Орт \vec{r}_0 є спільним для обох сферичних систем координат, що дає можливість знайти зв'язок між координатами r, θ, φ і r, α, β .

У власній системі координат вібратора 1 меридіональний кут γ відраховується від осі Ox . Азимутальний кут δ точки спостереження M є кутом між координатами xOy і меридіональною площиною, яка проходить через вісь Ox і точку M . Отже, орт \vec{r}_0 є спільним і для системи координат r, γ, δ і r, θ, φ .

Оскільки ці три сферичні системи координат прив'язані до однієї і тієї самої прямокутної системи координат x, y, z , то представимо вектор \vec{r}_0 через орти $\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$.

В основній сферичній системі координат

$$\vec{r}_0 = \vec{x}_0 \sin \theta \cos \varphi + \vec{y}_0 \sin \theta \sin \varphi + \vec{z}_0 \cos \theta. \quad (12)$$

У власній системі координат вібраторів 2 і 5

$$\vec{r}_0 = \vec{x}_0 \sin \alpha \sin \beta + \vec{y}_0 \cos \alpha + \vec{z}_0 \sin \alpha \cos \beta. \quad (13)$$

У власній системі координат вібратора 1

$$\vec{r}_0 = \vec{x}_0 \cos \gamma + \vec{y}_0 \sin \gamma \cos \delta + \vec{z}_0 \sin \gamma \sin \delta. \quad (14)$$

Враховуючи, що орт \vec{r}_0 для систем координат спільний, з виразів (12)–(14) знаходимо:

$$\left. \begin{aligned} \cos \alpha &= \sin \theta \sin \varphi; \\ \sin \alpha &= R_\alpha = \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi}; \\ \cos \beta &= \cos \theta / R_\alpha; \\ \sin \beta &= \sin \theta \cos \varphi / R_\alpha; \\ \cos \gamma &= \sin \theta \cos \varphi; \\ \sin \gamma &= R_\gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}; \\ \cos \delta &= \sin \theta \sin \varphi / R_\gamma; \\ \sin \delta &= \cos \theta / R_\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

У власних сферичних системах координат характеристика напрямленості всіх п'яти вібраторів визначається однаковими формулами, аргументом яких є лише меридіональний кут, тобто для вібраторів 3 і 4 це $F(\theta)$, для вібраторів 2 і 5 це $F(\alpha)$ і для вібратора 1 це $F(\gamma)$. ЕРС на затисках будь якого вібратора і фазовий центр якого збігається з початком системи координат, визначається аналогічно формулі (2)

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= l_\vartheta \dot{E}_\gamma F(\gamma); \\ \dot{\varepsilon}_2 &= l_\vartheta \dot{E}_\alpha F(\alpha). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\dot{\varepsilon}_5 = l_\vartheta \dot{E}_\alpha F(\alpha) e^{ikd \cos \delta}. \quad (17)$$

ЕРС вібратора 5 визначається виразом аналогічним, що і для ЕРС вібратора 4,

Щоб записати формули (16) і (17) через координати θ і φ , використовуємо зв'язок між ортами сферичних систем координат і ортами прямокутної системи координат [1]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\theta}_0 &= \bar{x}_0 \cos \theta \cos \varphi + \bar{y}_0 \cos \theta \sin \varphi - \bar{z}_0 \sin \theta; \\ \bar{\alpha}_0 &= \bar{z}_0 \cos \alpha \cos \beta + \bar{x}_0 \cos \alpha \sin \beta - \bar{y}_0 \sin \alpha; \\ \bar{\gamma}_0 &= \bar{y}_0 \cos \gamma \cos \delta + \bar{z}_0 \cos \gamma \sin \delta - \bar{x}_0 \sin \gamma; \\ \bar{\varphi}_0 &= -\bar{x}_0 \sin \varphi + \bar{y}_0 \cos \varphi; \\ \bar{\beta}_0 &= -\bar{z}_0 \sin \beta + \bar{x}_0 \cos \beta; \\ \bar{\delta}_0 &= -\bar{y}_0 \sin \delta + \bar{z}_0 \cos \delta. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Враховуючи співвідношення (15) і (18), дістаємо скалярні добутки одиничних векторів

$$\left. \begin{aligned} (\bar{\theta}_0, \bar{\alpha}_0) &= -\cos \theta \sin \varphi / R_\alpha; \\ (\bar{\theta}_0, \bar{\gamma}_0) &= -\cos \theta \cos \varphi / R_\gamma; \\ (\bar{\varphi}_0, \bar{\theta}_0) &= -\cos \varphi / R_\alpha; \\ (\bar{\varphi}_0, \bar{\gamma}_0) &= \sin \varphi / R_\gamma. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

За допомогою співвідношень (15) і (19) вирази (16) і (17) для напруг на затискачах вібраторів 1, 2 і 5 перетворимо до вигляду

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= l_\vartheta \left[-\cos \theta \cos \varphi \dot{E}_\theta + \sin \varphi \dot{E}_\varphi e^{i\psi} \right] F(\gamma) / R_\gamma; \\ \dot{\varepsilon}_2 &= l_\vartheta \left[-\cos \theta \sin \varphi \dot{E}_\theta - \cos \varphi \dot{E}_\varphi e^{i\psi} \right] F(\alpha) / R_\alpha; \\ \dot{\varepsilon}_5 &= l_\vartheta \left[-\cos \theta \sin \varphi \dot{E}_\theta - \cos \varphi \dot{E}_\varphi e^{i\psi} \right] e^{ikd \sin \theta \sin \varphi} F(\alpha) / R_\alpha. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Для спрощення залежностей (20) використаємо короткі вібратори, для яких характеристика напрямленості має вигляд $F(\theta) = \sin(\theta)$, $F(\gamma) = \sin(\gamma)$, $F(\alpha) = \sin(\alpha)$. Найбільш придатними для такої мети можуть бути несиметричні активні вібратори. В цьому випадку формули (2) і (20) набувають вигляду

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= l_\vartheta \left(-\cos \theta \cos \varphi \dot{E}_\theta + \sin \varphi \cos \psi \dot{E}_\varphi + i \sin \varphi \sin \psi \dot{E}_\varphi \right); \\ \dot{\varepsilon}_2 &= l_\vartheta \left(-\cos \theta \sin \varphi \dot{E}_\theta - \cos \varphi \cos \psi \dot{E}_\varphi - i \cos \varphi \sin \psi \dot{E}_\varphi \right); \\ \dot{\varepsilon}_3 &= l_\vartheta \dot{E}_\theta \sin \theta; \\ \dot{\varepsilon}_5 &= l_\vartheta \left(-\cos \theta \sin \varphi \dot{E}_\theta - \cos \varphi \cos \psi \dot{E}_\varphi - i \cos \varphi \sin \psi \dot{E}_\varphi \right) e^{ikd \sin \theta \sin \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Сума квадратів модулів ЕРС $\dot{\varepsilon}_1$ і $\dot{\varepsilon}_2$ дає можливість визначити складову E_φ . Справді

$$\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 = l_\vartheta^2 (\cos^2 \theta E_\theta^2 + E_\varphi^2).$$

Отже, обчислюємо амплітуду азимутальної складової за формулою

$$E_\varphi = \sqrt{\frac{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}{l_\vartheta^2} - \cos^2 \theta E_\theta^2}. \quad (22)$$

Напругу $\dot{\varepsilon}_3$ використаємо, щоб розділяти дійсні і уявні складові $\dot{\varepsilon}_1$ та $\dot{\varepsilon}_2$.

Оскільки дійсні складові знаходяться у фазі з напругою $\dot{\varepsilon}_3$, то кути між векторами $\dot{\varepsilon}_1$ і $\dot{\varepsilon}_3$; $\dot{\varepsilon}_2$ і

$\dot{\varepsilon}_3$ будуть дорівнювати кутам між векторами $\dot{\varepsilon}_1$ та $\dot{\varepsilon}_2$ і їх дійсними складовими. Використовуючи обчислення кутів методом підсумовування і віднімання, можемо записати значення фазового зсуву між векторами $\dot{\varepsilon}_1$ і $\dot{\varepsilon}_3$

$$\chi_1 = \arccos \frac{\varepsilon_{\Sigma 1}^2 - \varepsilon_{\Delta 1}^2}{4\varepsilon_1 \varepsilon_3}, \quad (23)$$

$$\text{де } \varepsilon_{\Sigma 1} = |\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_3| = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2 + 2\varepsilon_1 \varepsilon_3 \cos \chi_1} \text{ і}$$

$$\varepsilon_{\Delta 1} = |\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_3| = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_3^2 - 2\varepsilon_1 \varepsilon_3 \cos \chi_1}.$$

Аналогічно знаходимо фазовий зсув χ_2 для напруг $\dot{\varepsilon}_2$ і $\dot{\varepsilon}_3$

$$\chi_2 = \arccos \frac{\varepsilon_{\Sigma 2}^2 - \varepsilon_{\Delta 2}^2}{4\varepsilon\varepsilon_3}, \quad (24)$$

де $\varepsilon_{\Sigma 2} = |\dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3| = \sqrt{\varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 + 2\varepsilon_1\varepsilon_2 \cos \chi_2}$ і

$$\varepsilon_{\Delta 2} = |\dot{\varepsilon}_2 - \dot{\varepsilon}_3| = \sqrt{\varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 - 2\varepsilon_1\varepsilon_2 \cos \chi_2}.$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 \cos \chi_1 &= l_\theta (\cos^2 \theta \cos^2 \varphi E_\theta^2 + \sin^2 \varphi \cos^2 \psi E_\varphi^2 - 2 \cos \theta \cos \varphi \sin \varphi \cos \psi E_\theta E_\varphi)^{\frac{1}{2}}; \\ \varepsilon_1 \sin \chi_1 &= l_\theta (\sin^2 \varphi \sin^2 \psi E_\varphi^2)^{\frac{1}{2}}; \\ \varepsilon_1 \cos \chi_2 &= l_\theta (\cos^2 \theta \sin^2 \varphi E_\theta^2 + \cos^2 \varphi \cos^2 \psi E_\varphi^2 + 2 \cos \theta \sin \varphi \cos \varphi \cos \psi E_\theta E_\varphi)^{\frac{1}{2}}; \\ \varepsilon_2 \sin \chi_2 &= l_\theta (\cos^2 \varphi \sin^2 \psi E_\varphi^2)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Використовуючи друге та четверте рівняння системи (25), знаходимо

$$\cos 2\varphi = \frac{\varepsilon_2^2 \sin^2 \chi_2 - \varepsilon_1^2 \sin^2 \chi_1}{\varepsilon_1^2 \sin^2 \chi_1 + \varepsilon_2^2 \sin^2 \chi_2}. \quad (26)$$

Для того щоб звузяти область існування кутів φ , які визначаються за формулою (26), необхідно знайти значення величини $\sin 2\varphi$. Слід врахувати, що при розкладанні електромагнітної хвилі в лінійному поляризаційному базисі кут ψ може знаходитися в межах від -90° до $+90^\circ$ [3].

Отже, для всіх кутів ψ функція $\cos \psi \geq 0$. З другого з рівняння системи (25) маємо

$$\sin \psi = \pm \frac{\sqrt{\varepsilon_1^2 \sin^2 \chi_1 + \varepsilon_2^2 \sin^2 \chi_2}}{l_\theta E_\varphi}; \quad (27)$$

$$\cos \psi = \frac{\sqrt{l_\theta^2 E_\varphi^2 - \varepsilon_1^2 \sin^2 \chi_1 - \varepsilon_2^2 \sin^2 \chi_2}}{l_\theta E_\varphi}. \quad (28)$$

Значення $\cos \psi$ за формулою (28) підставляємо в перше і третє рівняння системи (25). Використовуємо значення $\cos 2\varphi$ з формули (26). Отримуємо знак і модуль функції $\sin 2\varphi$

$$\sin 2\varphi = \frac{A - B - C}{D}, \quad (29)$$

де $A = \frac{\varepsilon_2^2 \cos^2 \chi_2}{l_\theta^2}$; $B = \frac{\varepsilon_1^2 \cos^2 \chi_1}{l_\theta^2}$;

$$C = \cos^2 \theta \cos 2\varphi E_\theta^2 - \cos 2\varphi \cos^2 \psi E_\varphi^2 \text{ і}$$

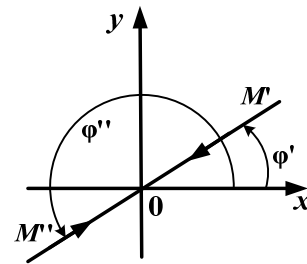
$$D = \cos \theta \cos \psi E_\varphi.$$

Формула (26) або (29) визначає азимутальний кут з точністю до 180° . Цей висновок впливає з методики вимірювання кута φ .

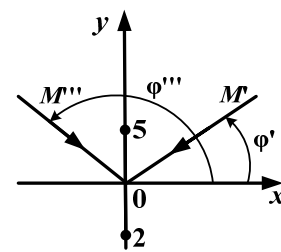
Оскільки фазові зсуви між напругами можуть набувати значення в інтервалі від 0° до 180° , то формули (23) і (24) зумовлюють однозначне обчислення фазових зсувів χ_1 і χ_2 .

За відомими кутами χ_1 і χ_2 перші два рівняння системи (21) перетворимо до вигляду

На рис. 3, а зображено координатні осі прямокутної системи координат у горизонтальній площині. $M'O$ і $M''O$ — проєкції надходження хвилі до фазових центрів вібраторів 1, 2, 3. Очевидно, що значення $\cos 2\varphi'$ і $\cos 2\varphi''$ будуть збігатися, незважаючи на те, що $\varphi'' = \varphi' + 180^\circ$. Отже, похибка може дорівнювати 180° .



а



б

Рис. 3

Значення знаків функцій $z_1 = \cos 2\varphi$ і $z_2 = \sin 2\varphi$ наведені в таблиці.

Як видно з таблиці, напрямок надходження хвилі за формулою (27) або (29) визначається як можливість його знаходження в квадрантах I і III, або II і IV. Для уточнення кута φ використовуємо напруги $\dot{\varepsilon}_2$ і $\dot{\varepsilon}_3$ (21).

	Квадрант I		Квадрант II		Квадрант III		Квадрант IV	
Кут φ	$0^\circ-45^\circ$	$45^\circ-90^\circ$	$90^\circ-135^\circ$	$135^\circ-180^\circ$	$180^\circ-225^\circ$	$225^\circ-270^\circ$	$270^\circ-315^\circ$	$315^\circ-360^\circ$
2φ	$0^\circ-90^\circ$	$90^\circ-180^\circ$	$180^\circ-270^\circ$	$270^\circ-360^\circ$	$360^\circ-450^\circ$	$450^\circ-540^\circ$	$540^\circ-630^\circ$	$630^\circ-720^\circ$
Значення $\cos 2\varphi$	+	-	-	+	+	-	-	+
	$1\dots 0$	$0\dots -1$	$-1\dots 0$	$0\dots 1$	$1\dots 0$	$0\dots -1$	$-1\dots 0$	$0\dots 1$
Значення $\sin 2\varphi$	$0\dots 1$	$1\dots 0$	$0\dots -1$	$-1\dots 0$	$0\dots 1$	$1\dots 0$	$0\dots -1$	$-1\dots 0$
	+	+	-	-	+	+	-	-

Напругу $\dot{\varepsilon}_5$ наведемо так

$$\dot{\varepsilon}_5 = \dot{\varepsilon}_2 e^{i\xi \sin \varphi}, \quad (30)$$

де $\xi = kd \sin \theta$

Зсуємо напругу $\dot{\varepsilon}_5$ на кут $\pi/2$. Тоді

$$\dot{\tilde{\varepsilon}}_5 = \dot{\varepsilon}_2 e^{i(\xi \sin \varphi - \pi/2)}.$$

Обчислимо модуль різниці напруг

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon}_{\Delta 5} &= |\dot{\tilde{\varepsilon}}_5 - \dot{\varepsilon}_1| = \varepsilon_2 \sqrt{2 - 2 \cos(\xi \sin \varphi - \pi/2)} = \\ &= \varepsilon_2 \sqrt{2 - 2 \sin(\xi \sin \varphi)} \end{aligned}$$

і модуль суми різниць

$$\tilde{\varepsilon}_{\Sigma 5} = |\dot{\varepsilon}_2 + \dot{\tilde{\varepsilon}}_5| = \varepsilon_2 \sqrt{2 + 2 \sin(\xi \sin \varphi)}.$$

За допомогою обчислених величин знаходимо фазовий зсув

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_{\Sigma 5}^2 - \tilde{\varepsilon}_{\Delta 5}^2}{4\varepsilon_2^2} = \sin(\xi \sin \varphi). \quad (31)$$

Звідси

$$\sin \varphi = \frac{1}{\xi} \arcsin \left(\frac{\tilde{\varepsilon}_{\Sigma 5}^2 - \tilde{\varepsilon}_{\Delta 5}^2}{4\varepsilon_2^2} \right). \quad (32)$$

Величина ξ може набувати малих значень, оскільки кут θ приймає значення від 0 до 180° (30).

Незважаючи на це, як впливає з виразів (32) і (33), знак функції $\sin \varphi$ збігається зі знаком лівої частини рівняння (31). Отже, оцінка кута φ також супроводжується певною невизначеністю. Але в цьому випадку кут φ' між віссю Ox і напрямом приходу хвилі OM' (рис. 3, б) може знаходитися у двох суміжних квадрантах. Так, з рис. 3, б видно, що значення функції $\sin \varphi'$ буде таким самим як і функції $\sin \varphi''$, оскільки $\varphi''' = 180^\circ - \varphi'$.

При значеннях $\xi > 90^\circ$ доцільно використовувати для обчислень азимутального кута сумарну і різницеву ЕРС без зсуву фази на 90° , тобто

$$\sin \varphi = \frac{1}{\xi} \arccos \left(\frac{\varepsilon_{\Sigma 5}^2 - \varepsilon_{\Delta 5}^2}{4\varepsilon_2^2} \right), \quad (33)$$

де $\varepsilon_{\Sigma 5} = |\dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_5|$ і $\varepsilon_{\Delta 5} = |\dot{\varepsilon}_5 - \dot{\varepsilon}_2|$.

Порівнюючи результати обчислень за формулами (26), (29) і (32), (33), визначаємо квадрант,

у якому знаходиться напрямок надходження хвилі і азимутальний кут φ . У результаті отримуємо значення величин E_θ , E_φ , θ і φ .

Залишається уточнити фазовий зсув ψ . Для цього напругу $\dot{\varepsilon}_1$ (перше рівняння системи (21)) помножуємо на величину $\sin \varphi$, а напругу $\dot{\varepsilon}_2$ (друге рівняння системи (21)) на величину $\cos \varphi$ і знаходимо різницю ЕРС

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{12} &= \dot{\varepsilon}_1 \sin \varphi - \dot{\varepsilon}_2 \cos \varphi = \\ &= l_\sigma (\cos \psi \dot{E}_\varphi + i \sin \psi \dot{E}_\varphi) = l_\sigma \dot{E}_\varphi e^{i\psi}. \end{aligned}$$

Очевидно, що модуль азимутальної складової дорівнює

$$E_\varphi = \frac{|\dot{\varepsilon}_{12}|}{l_\sigma}.$$

Це значення повинне збігатися з величиною, обчисленою за формулою (22).

Зсуваємо фазу напруги $\dot{\varepsilon}_{12}$ на 90°

$$\dot{\tilde{\varepsilon}}_{12} = l_\sigma \dot{E}_\varphi e^{i(\psi - \pi/2)}.$$

Знаходимо модуль різниці напруг

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Delta 12} &= |\dot{\tilde{\varepsilon}}_{12} - \dot{\varepsilon}_3| = \\ &= \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{12}^2 + \varepsilon_3^2 - 2\tilde{\varepsilon}_{12}\varepsilon_3 \cos(\psi - \pi/2)} \end{aligned} \quad (34)$$

і модуль суми напруг

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Sigma 12} &= |\dot{\tilde{\varepsilon}}_{12} + \dot{\varepsilon}_3| = \\ &= \sqrt{\tilde{\varepsilon}_{12}^2 + \varepsilon_3^2 + 2\tilde{\varepsilon}_{12}\varepsilon_3 \cos(\psi - \pi/2)}. \end{aligned} \quad (35)$$

У результаті простих перетворень знаходимо

$$\sin \psi = \frac{\varepsilon_{\Sigma 12}^2 - \varepsilon_{\Delta 12}^2}{4\tilde{\varepsilon}_{12}\varepsilon_3}. \quad (36)$$

З виразів (34), (35) і (36) видно, що при $\psi = \pi/2$ функція $\sin \psi$ набуває значення $+1$, а при $\psi = -\pi/2$ — $\sin \psi = -1$. Отже, вираз (36) дає можливість визначити кут ψ і його знак.

Аналітичне дослідження підтверджує можливість вимірювання запропонованою універсальною антеною напрямку надходження радіохвилі, напруженості електричного поля хвилі і параметрів поляризації.

При побудові структурної схеми антени необхідно враховувати наведені теоретичні положен-

ня. Теоретичне дослідження зв'язків між ЕРС, що наводяться на вібраторах антенної системи, і параметрами електромагнітної хвилі (кутові координати джерела випромінювання θ і φ , а також амплітуди меридіональної і азимутальної складової вектора напруженості електричного поля E_θ і E_φ та фазовий зсув ψ), встановлює необхідність використання двадцяти електричних величин. З них п'ять значень ЕРС на затискачах вібраторів: $\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3, \dot{e}_4, \dot{e}_5$ і п'ятнадцять допоміжних величин $\dot{e}_{\Delta 1}, \dot{e}_{\Sigma 1}, \dot{e}_{\Delta 2}, \dot{e}_{\Sigma 2}, \dot{e}_{12}, \dot{e}_{\Delta 12}, \dot{e}_{\Sigma 12}, \dot{e}_\Delta, \dot{e}_\Sigma, \tilde{e}_\Delta, \tilde{e}_\Sigma, \dot{e}_{\Delta 5}, \dot{e}_{\Sigma 5}, \tilde{e}_{\Delta 5}, \tilde{e}_{\Sigma 5}$. Формування допоміжних величин доцільно здійснювати на одній фіксованій частоті, що забезпечить як простоту структурної схеми пристрою первинної обробки сигналів, так і мінімізацію спотворень оброблюваних сигналів.

Структурна схема універсальної п'ятиелементної антенної системи буде наведена у наступному етапі дослідження.

Висновки

Результати аналітичного дослідження показують, що антенна система, яка складається з

п'яти активних несиметричних вібраторів, однозначно пеленгує місцеположення джерела випромінювання і вимірює параметри електромагнітного поля. При цьому антенну систему не потрібно орієнтувати у просторі згідно з напрямком падіння електромагнітної хвилі. Це істотно збільшує швидкодію вимірювального пристрою і підвищує точність вимірювань.

Використання активних несиметричних вібраторів в антенній системі дає можливість працювати у широкій смузі частот, оскільки діюча довжина кожного із вібраторів мало залежить від частоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Ільницький Л. Я.* Антени та пристрої надвисоких частот: підручник для ВНЗ / Л. Я. Ільницький, О. Я. Савченко, Л. В. Сібрук; за ред. Л. Я. Ільницького. — К. : Укртелеком, 2003. — 496 с.
2. *Бронштейн И. Н.* Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Наука, 1986. — 544 с.
3. *Антени телекомунікаційних і моніторингових систем* / Л. Я. Ільницький, Л. В. Сібрук, П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний. — К. : Український державний центр радіочастот, 2012. — 240 с.

Стаття надійшла до редакції 25.12.2013