

КОМПЕНСАЦІЯ ВІДБИТИХ ХВИЛЬ ПРИ ВИМІРЮВАННЯХ ДІЮЧОЇ ДОВЖИНИ АНТЕНИ

Інститут електроніки і систем управління Національного авіаційного університету

Розглядається принцип компенсації відбитих хвиль при компаруванні антенних систем. Розроблено новий спосіб вимірювання діючої довжини антени, який ґрунтується на використанні явищ інтерференції прямої і відбитої хвилі. Запропонований спосіб вимірювання дає можливість виключити вплив відбиваючої поверхні на похибки обчислювання діючої довжини.

Вступ

Діюча довжина є одним з найважливіших параметрів антени. Особливо велике значення цей параметр набуває при вимірюваннях напруженості поля. Для визначення діючої довжини використовують різні способи: порівняння із зразковою антеною, вимірювання електрорушійної сили на затискачах при розміщенні антени в еталонному полі і деякі інші методи. Але для будь-яких способів вимірювання необхідно забезпечувати однопроменеве поширення електромагнітної хвилі, щоб напруженість випробувального поля визначалась однозначно з високою точністю. На жаль, створити такі умови можна лише в безехових камерах, або на антенних полігонах, обладнаних зразковими антенами з вузькими діаграмами спрямованості. У загальному випадку необхідно враховувати не тільки поширення прямих хвиль від однієї до другої антени, але і відбиті хвилі від поверхні землі або від інших об'єктів.

Постановка завдання

Оскільки умови для вимірювання діючої довжини антени у більшості випадків будуть далекі від умов у ехокамерах або на зразкових антенних полігонах, то бажано розробити таку методику в якій би інтенсивність відбитих хвиль враховувалась у результатах вимірювань. Очевидно, що можливі різні підходи до розв'язання цієї проблеми. Так, наприклад, можна створити штучну відбиваючу поверхню з коефіцієнтом відбиття, що дорівнює ± 1 . В цьому випадку визначення напруженості поля відбитої хвилі не

створюватиме певних проблем. Можна, використовуючи додаткове когерентне джерело випромінювання, компенсувати відбиту хвилю, що випромінюється досліджуваною антеною. Можливі і інші варіанти побудови вимірювального комплексу. Недоліком їх є значне ускладнення процесу вимірювань і суттєве збільшення вартості вимірювальної апаратури.

Якщо ж обмежитися стандартною апаратурою, що зазвичай використовується для антенних вимірювань, то можна змінити метрологічну технологію так, щоб за результатами вимірювань визначити з достатньою для практики точністю діючу довжину. Отже, завдання полягає в розробці такої методики, за допомогою якої за результатами вимірювань можна було б визначити як напруженість прямої хвилі, так і напруженість відбитої хвилі. При цьому необхідно передбачити реалізацію цієї методики стандартним набором вимірювальної апаратури.

Теоретичні відомості

Розглянемо вимірювання діючої довжини антени в режимі випромінювання. Діюча довжина l_0 передавальної антени визначається як

$$l_0 = \frac{E_{\max} r}{30kI_A}, \quad (1)$$

де E_{\max} – максимальне значення напруженості поля випромінювання на відстані r від антени; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число; I_A – струм, що протікає через затискачі досліджуваної антени.

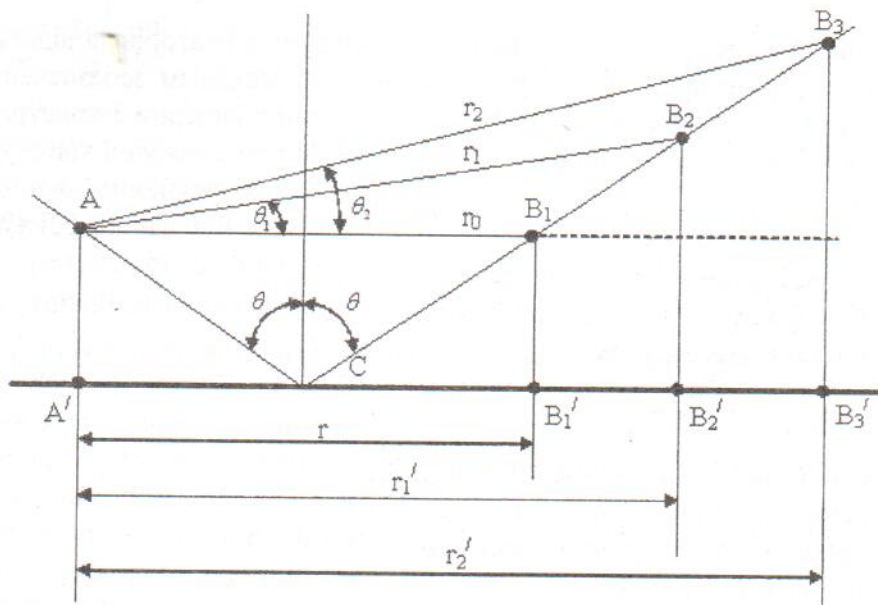


Рис. 1. Ілюстрація методики вимірювання

Схема вимірювання зображена на рис. 1.

Досліджувана антена А розміщується над поверхнею землі на висоті h . Допоміжна антена знаходиться на тій же висоті h у точці B_1 . Як видно з рис. 1 у загальному випадку до антени у точці B_1 приходять пряма хвиля вздовж напрямку AB_1

$$\dot{E}_1 = i \frac{30kI_{A'} l_0}{r} e^{-ikr} \quad (2)$$

і відбита хвиля від точки С

$$\dot{E}_C = i \frac{30kI_{A'} l_0}{r_2} \tilde{R}F(\theta) e^{-ikr_C}, \quad (3)$$

де r – відстань від точки А до точки B_1 ; r_C – відстань, яку проходить відбита хвиля шляхом ACB_1 ; l_0 – діюча довжина антени; $F(\theta)$ – характеристика спрямованості досліджуваної антени; \tilde{R} – комплексний коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні землі в зоні, що охоплює точку С; θ – кут падіння електромагнітної хвилі.

Вираз (2) справедливий за умови, що досліджувана антена, фазовий центр якої збігається з точкою А, орієнтована таким чином, щоб напрям максимального випромінювання проходив через фазовий центр допоміжної антени, тобто через то-

чку B_1 . Наявність відбитої хвилі (3) не дає можливості обчислити діючу довжину хвилі за формулою (1) у випадку слабонапрявленої допоміжної антени. Використання гостронапрявленої антени особливо в діапазоні метрових хвиль досить проблематичне. Очевидно, що гостронапрявлена допоміжна антена буде ефективною тоді, коли ширина її діаграми спрямованості за нульовим випромінюванням дорівнюватиме 2θ . Розглянемо, яким вимогам повинна задовольняти схема вимірювань у цьому випадку.

Якщо r – відстань між антенами, що знаходяться у точках А і B_1 , а h – висоти їх підвісу, то, як впливає з рис. 1,

$$\theta = \arctg \frac{r}{2h}. \quad (4)$$

З іншого боку, відстань r повинна задовольняти умову

$$r \geq \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (5)$$

де L – максимальний розмір допоміжної антени.

Як відомо [1], розмір L визначається за шириною діаграми спрямованості співвідношенням

$$L = A \frac{\lambda}{\theta},$$

де A – певний коефіцієнт, який у випадку рівноамплітудної еквідистантної решітки, що складається з двох синфазних випромінювачів, обчислюється з виразу

$$L = \frac{2\lambda}{\cos \theta} \quad (6)$$

Використовуючи значення розміру антени (6) у формулі (5), знаходимо мінімальну відстань між антенами

$$r \geq \frac{\lambda}{\cos^2 \theta} \quad (7)$$

Для мінімальної довжини хвилі метрового діапазону і при $\theta = 45^\circ$ з формули (7) отримаємо $r \geq 4$ м. Висоти підвісу антен згідно з формулою (4) повинні бути 2 м. Але при максимальній довжині хвилі висоти підвісу становитимуть 20 м, що вже вимагає суттєвих затрат на облаштування території для вимірювання діючої довжини. При збільшенні кута θ зменшується висота підвісу h , але при цьому зростає розмір апертури допоміжної антени і відстань між антенами r . Звідси впливає найбільш істотний недолік способу вимірювання I_0 за допомогою прямого променя. Він проявляється як у метровому, так і у дециметровому діапазонах.

Як видно з формули (6), зміна довжини хвилі λ для відстроювання від відбитої хвилі вимагає зміни відстані між елементами антенної решітки. Це призведе до необхідності настроювання допоміжної антени за її напрямленими властивостями. Але при цьому виникне необхідність і в настроюванні пристроїв узгодження, оскільки система, наприклад, двох вібраторів має активну і реактивну складову вхідного опору. Компенсація реактивного опору і трансформація активної складової опору здійснюється відрізами лінії з певною відносною довжиною. Зміна довжини хвилі призведе до порушення відносних довжин елементів узгоджувального пристрою і вимагатиме перенастроювання. Вважаючи на те, що допоміжна антена використовується для вимірювання напруженості поля, необхідно передбачити не тільки механізми настро-

ювання вібраторів та відстаней між ними, але й механізм забезпечення узгодження антени з фідером і пристрої вимірювання коефіцієнта біжучої хвилі у фідері.

Для усунення основних недоліків вимірювання діючої довжини за допомогою прямого променя пропонується спосіб визначення величини E_{\max} за результатами двох вимірювань у точках B_2 і B_3 (рис. 1). Точки B_2 і B_3 знаходяться на прямій, що збігається з відбитим променем при сталому куті падіння електромагнітної хвилі. Допоміжною антеною є синетричний вібратор з горизонтальним розташуванням відносно поверхні землі. Це вимагає встановлювати досліджувану антену таким чином, щоб поляризація хвилі була горизонтальною.

Напруженість поля у точці B_2 визначатиметься у результат інтерференції двох хвиль. Напруженість прямої хвилі дорівнюватиме

$$\dot{E}_1 = i \frac{30kl_0 \dot{I}_A}{r_1} F(\theta_1) e^{-ikr_1},$$

де r_1 – відстань між точками A і B_2 ; θ_1 – кут між горизонталлю AB_1 і променем AB_2 .

Напруженість відбитої хвилі дорівнюватиме

$$\dot{E}_{1C} = i \frac{30kl_0 \dot{I}_A}{r_{1C}} \tilde{R} F(\theta) e^{-ikr_{1C}},$$

де r_{1C} – довжина шляху відбитої хвилі ACB_2 ; θ – кут падіння хвилі на поверхню землі.

Оскільки використовується горизонтальна поляризація, то вектори \dot{E}_1 і \dot{E}_{1C} колінеарні і їх сума знаходиться як

$$\dot{E}_{B_2} = \dot{E}_1 + \dot{E}_{1C}$$

або

$$\dot{E}_{B_2} = \dot{E}_1 \sqrt{1 + m_1^2 + 2m_1 \cos(k\Delta r_1 + \phi)}, \quad (8)$$

де $\Delta r_1 = r_{1C} - r_1$ – різниця ходу шляхів променів; $m_1 = R \frac{F(\theta)}{F(\theta_1)} \frac{r_1}{r_{1C}}$ – відносна амплітуда напруженості поля відбитого променя; R – модуль коефіцієнта відбиття; ϕ – фаза коефіцієнта відбиття.

При горизонтальній поляризації кут ϕ наближається до 180° при будь-яких кутах падіння θ , а перший максимум поля випромінювання антени буде спрямований під малим кутом місця вище точки B_1 . Враховуючи ці обставини, вибираємо положення точки B_2 з максимумом напруженості поля, який легко визначити за показами вимірювача напруженості поля. Отже, у формулі (8) необхідно прийняти, що

$$k\Delta r_1 + \phi = 2s\pi, \text{ де } s = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

і

$$\dot{E}_{B_2} = \dot{E}_1(1 + m_1).$$

Перший мінімум напруженості поля знаходиться у точці B_3 – дещо вище точки B_2 .

Значення напруженості поля визначається аналогічно виразу (8), тобто

$$\dot{E}_{B_3} = \dot{E}_2 \sqrt{1 + m_2^2 + 2m_2 \cos(k\Delta r_2 + \phi)},$$

де $\dot{E}_2 = i \frac{30kl_0 I_A}{r_2} F(\theta_2) e^{-ikr_2}$ – напруже-

ність поля прямої хвилі; $m_2 = R \frac{F(\theta)}{F(\theta_2)} \frac{r_2}{r_{2C}}$

– відносна амплітуда напруженості поля відбитої хвилі; $\Delta r_2 = r_{2C} - r_2$ – різниця ходу променів прямої і відбитої хвилі; r_2 – відстань між точками А і B_3 ; r_{2C} – відстань між точками А і B_3 вздовж променя відбитої хвилі АС B_3 .

За наявності мінімуму у точці B_3 виконується рівність

$$k\Delta r_2 + \phi = (2s + 1)\pi, \text{ де } s = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

Отже, напруженість поля у точці B_3 визначається як

$$\dot{E}_{B_3} = \dot{E}_2(1 - m_2). \quad (11)$$

Оскільки вимірюються амплітуди напруженостей поля, то

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{30kl_0 I_A}{r_1} F(\theta_1) \\ E_2 &= \frac{30kl_0 I_A}{r_2} F(\theta_2) \end{aligned} \right\}$$

$$A_0 = \frac{1}{2} \left[E_{B_1} r_1'' + E_{B_2} r_2'' - (E_{B_1} r_1'' - E_{B_2} r_2'') \frac{r_1'' r_{2C}'' - r_2'' r_{1C}''}{r_1'' r_{2C}'' + r_2'' r_{1C}''} \right]. \quad (15)$$

Діаграма спрямованості досліджуваної антени повинна бути відомою. Це дозволяє ввести значення умовних відстаней

$$\left. \begin{aligned} r_1'' &= \frac{r_1}{F(\theta_1)} \\ r_2'' &= \frac{r_2}{F(\theta_2)} \end{aligned} \right\}$$

Введемо позначення

$$A_0 = 30kl_0 I_A.$$

Очевидно, що

$$A_0 = E_1 r_1'' = E_2 r_2''.$$

Домножуючи амплітуди повних напруженостей поля, що визначені в точках B_2 і B_3 , на умовні відстані, отримуємо такі вирази

$$\left. \begin{aligned} E_{B_2} r_1'' &= A_0 \left(1 + R \frac{r_1''}{r_{1C}''} \right) \\ E_{B_3} r_2'' &= A_0 \left(1 - R \frac{r_2''}{r_{2C}''} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

де введені умовні відстані

$$\left. \begin{aligned} r_{1C}' &= \frac{r_{1C}}{F(\theta)} \\ r_{2C}' &= \frac{r_{2C}}{F(\theta)} \end{aligned} \right\}$$

Різниця першого і другого рівняння системи (12) визначається як

$$E_{B_2} r_1'' - E_{B_3} r_2'' = A_0 R \left(\frac{r_1''}{r_{1C}''} + \frac{r_2''}{r_{2C}''} \right). \quad (13)$$

Сума цих рівнянь дорівнює

$$E_{B_2} r_1'' + E_{B_3} r_2'' = 2A_0 + A_0 R \left(\frac{r_1''}{r_{1C}''} - \frac{r_2''}{r_{2C}''} \right). \quad (14)$$

Визначимо з виразу (13) добуток $A_0 R$ і підставимо його у рівняння (14). Це дає можливість отримати значення коефіцієнта A_0 .

Значення A_0 є добутком $E_{\max} r$ і за формулою (1) визначаємо діючу довжину антени.

Методика вимірювання діючої довжини ілюструється рис.1.

Допоміжна антена встановлюється на відстані r_1' від антени, параметри якої вимірюються, у точці B_2' . Точку B_2 знаходять у результаті піднесення допоміжної антени над лінією горизонту AB_1 . У точці B_2 напруга на затискачах допоміжної антени максимальна, тобто виконується умова (9). Вимірюємо висоту підвісу антени досліджуваної $h=AA'$ і допоміжної $h_1=B_2B_2'$. Обчислюємо кут θ_1 за формулою

$$\theta_1 = \text{arctg} \frac{h_1 - h}{r_1'}$$

Визначаємо кут падіння хвилі

$$\theta = \text{arctg} \frac{r_1'}{h_1 + h}$$

і відстань AB_1

$$r = 2h \frac{r_1'}{h_1 + h}$$

У результаті цих обчислень стають відомими положення точок B_1, B_1', C і напрям відбитого променя CB_2 .

Шляхом зміщення допоміжної антени вздовж променя CB_2 знаходимо точку B_3 , у якій напруга на затискачах мінімальна (11). Вимірюємо висоту $h_2=B_3B_3'$ і відстань r_2' . Розраховуємо кут θ_2

$$\theta_2 = \text{arctg} \frac{h_2 - h}{r_2'} \quad (16)$$

Обчислюємо відстані, які проходять промені,

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r_1' / \cos \theta_1 \\ r_2 &= r_2' / \cos \theta_2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Обчислюємо довжини шляхів відбитих променів

$$\left. \begin{aligned} r_{1c} &= r_1' / \cos \theta \\ r_{2c} &= r_2' / \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

За відомою діючою довжиною допоміжної антени розраховуємо напруженості поля у точках B_2 і B_3 (E_{B_2} і E_{B_3}) та за формулою (16) і (1) знаходимо значення l_0 .

Визначимо, у яких межах необхідно зміщувати допоміжну антену, щоб виявити точки B_2 і B_3 . За формулами (9) і (10) знаходимо, що

$$r_{2c} - r_2 - (r_{1c} - r_1) = \lambda / 2$$

Використовуючи вирази (17) і (18) і вважаючи, що $\theta_1 \approx \theta_2 < \theta$, Отриманий вираз перетворимо до такого вигляду

$$r_2' - r_1' \approx \frac{\cos \theta}{1 - \cos \theta} \frac{\lambda}{2}$$

Звідси випливає, що при малих значеннях кута падіння різниця відстані $r_2' - r_1' = B_2'B_3'$ може складати декілька довжин хвиль. При великих значеннях θ відстань $B_2'B_3'$ зменшується. Так, наприклад, при $\theta = 60^\circ$ відстань $B_2'B_3'$ дорівнюватиме близько половини довжини хвилі.

Отже, при зростанні довжини хвилі доцільно зменшувати висоту підвісу антени. Тоді зміщення допоміжної антени при пошуку екстремумів напруженості поля також зменшуватиметься.

У діапазоні дециметрових хвиль висота підвісу антен може становити декілька довжин хвиль. При цьому різниця між кутами θ_1 і θ_2 може бути досить малою (декілька градусів), що дає змогу нехтувати різницею значень характеристик спрямованості досліджуваної антени в напрямках θ_1 і θ_2 , тобто можна прийняти

$$F(\theta_1) \approx F(\theta_2).$$

За такої умови спрощується обчислення коефіцієнта A_0 за формулою (15), оскільки значення відстані з великою точністю замінюються на такі:

$$r_1'' \rightarrow r_1; r_2'' \rightarrow r_2; r_{1c}'' \rightarrow r_{1c}; r_{2c}'' \rightarrow r_{2c}$$

Похибка вимірювання діючої довжини знаходиться за допомогою розкладання характеристики спрямованості у ряд Тейлора

$$F(\theta_2) = F(\theta_1) + \frac{\partial F(\theta = \theta_1)}{\partial \theta} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 F(\theta = \theta_1)}{\partial \theta^2} (\theta_2 - \theta_1)^2 + \dots$$

Звідси знаходимо значення похибки

$$\Delta = F(\theta_2) - F(\theta_1) = A_1(\theta_2 - \theta_1) + A_2(\theta_2 - \theta_1)^2 + \dots,$$

$$\text{де } A_1 = \left[\frac{\partial F(\theta)}{\partial \theta} \right]_{\theta=\theta_1}, \quad A_2 = \left[\frac{\partial^2 F(\theta)}{\partial \theta^2} \right]_{\theta=\theta_1}, \dots$$

З наведеної формули випливає, що при невеликій різниці кутів θ_1 і θ_2 похибка Δ може визначитися лише першим членом ряду і становитиме одиниці відсотків. Так, наприклад, нехай характеристика спрямованості досліджуваної антени описується виразом

$$F(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\frac{\pi}{2} \sin \theta}.$$

Прийемо, що $\theta_1 = 3^\circ$ і $\theta_2 = 6^\circ$.

Значення $F(\theta_2)$ і $F(\theta_1)$ відрізнятимуться одне від одного лише на 0.0033, що, практично, можна в антенних вимірюваннях не враховувати.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що:

1. Вимірювання діючої довжини антени з використанням прямої хвилі можливе на спеціально обладнаних полігонах з застосуванням гостроспрямованої допоміжної антени.

2. Розроблено новий спосіб вимірювання діючої довжини антени, який ґрунтується на використанні явищ інтерференції прямої і відбитої хвилі.

3. Діюча довжина антени обчислюється за даними, які отримують у двох точках простору. Ці точки визначаються за показами мікрвольтметра, що приєднується до затискачів допоміжної антени.

4. Запропонований спосіб вимірювання дає можливість виключити вплив відбиваючої поверхні на похибки обчислення діючої довжини.

5. Запропонований спосіб не вимагає використання високих щогл, що важливо при вимірюваннях у довгохвильовій частині метрового діапазону.

6. Перевагою запропонованого методу є також і простота радіотехнічного обладнання. Дійсно, для проведення вимірювань необхідні генератор з каліброваним виходом, вимірювальний приймач і як допоміжна антена – симетричний вібратор.

Список літератури

1. Ільницький Л. Я., Савченко О. Я., Сібрुक Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот: Підручник для ВНЗ / За ред. Л. Я. Ільницького. – К.: Укртелеком, 2003. – 496 с.