

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДИРЕКТОРНОЇ АНТЕНИ

Розглядаються основні положення методики розрахунку оптимізованих конструктивних параметрів директорної антени. Наведений приклад використання автоматизованого проектування директорної антени.

Вступ. Відомі методики проектування директорних антен не дають можливості створювати електродинамічний пристрій з оптимальними розмірами як довжин вібраторів, так і відстані між ними. Ці недоліки методів випливають з того, що розрахунок електричних параметрів антени ґрунтується на заздалегідь визначених довжинах вібраторів, оскільки їх взаємні опори знаходять або з таблиць, або з графіків [1, 2]. До того ж і автоматизація такого проектування антени стає проблематичною.

Зважаючи на те, що директорні антени знаходять широке застосування як окремі випромінювачі, так і як елементи антенних решіток, виникає нагальна проблема в розробці більш досконалих методиках проектування, за допомогою яких вдавалося б повністю використати потенційні можливості антени.

Постановка завдання. Теоретичні методи аналізу поля випромінювання створюють підґрунтя побудови директорних антен з гранично можливими коефіцієнтами підсилення. Для цього потрібно враховувати амплітудно-фазовий розподіл в елементах антени і його залежність від конструктивних параметрів. На жаль, у відомих методиках розрахунку антен не використовується залежність фазового розподілу від довжини вібраторів. А в деяких методиках приймають відстань між сусідніми елементами антени незмінною. Але, як впливає з теоретичних положень принципу дії і досвіду експлуатації директорних антен, ефективність випромінювання підвищується, якщо використовуються можливості вкорочення вібраторів і зміни відстаней між ними. При цьому суттєво ускладнюється процес настроювання антени. Отже, нова методика проектування директорної антени повинна використовувати в повній мірі сучасну обчислювальну техніку, тобто нова методика повинна забезпечити автоматизоване проектування. Крім того, спроектована антена мусить мати оптимальні конструктивні параметри щоб забезпечити максимальне значення коефіцієнта підсилення. Очевидно, що під конструктивними параметрами необхідно розуміти відстані між рефлектором і активним вібратором, між активним вібратором і директором та між сусідніми директорами, а також відносні довжини вібраторів.

Основні положення методики розрахунку антени. Вихідними даними для проектування антени будемо вважати величини, які зазвичай

використовуються при розробці антени. Це середнє значення робочої частоти f , відносна смуга робочих частот δf % та коефіцієнт спрямованої дії D .

Конструктивну схему антени представляємо у вигляді, зображеному на рис. 1.

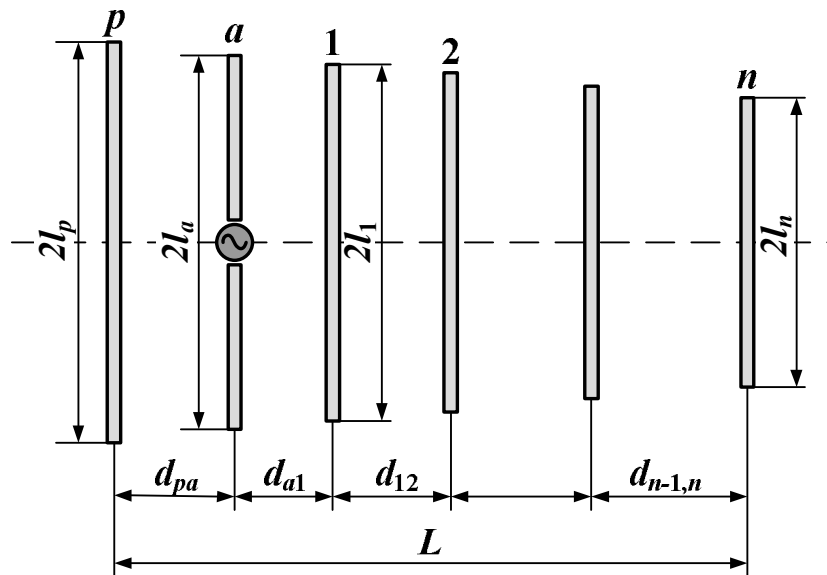


Рис. 1. Конструктивна схема директорної антени.

Літерою « p » позначений рефлектор, « a » – активний вібратор. Директори пронумеровані від 1 до n . Відстані між сусідніми вібраторами мають значення $d_{s,s+1}$, де $s = p, a, 1, 2, \dots, n-1$, а під індексом $s+1$ розуміємо $a, 1, 2, \dots, n$. Довжина q -го вібратора визначається як $2l_q$.

Загальну довжину антени L знаходимо за відомою наближеною формулою

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{D - 5,5}{4,5},$$

де D – задане значення коефіцієнта спрямованої дії.

Початкові значення відстані між антенами можна взяти в інтервалі від $0,1\lambda$ до $0,35\lambda$, при чому вважаємо, що відстані між директорами розподіляються за геометричною прогресією. Знаменник геометричної прогресії обчислюємо за граничними значеннями відстаней рефлектор-активний вібратор d_{pa} , активний вібратор-перший директор d_{a1} і передостанній-останній директори $d_{n-1,n}$:

$$q = \frac{L + d_{n-1,n} - d_{pa} - d_{a1}}{L - d_{pa}}.$$

Це дає змогу обмежитися вибором лише трьох початкових значень відстаней і обчислити необхідну кількість директорів

$$n = \frac{\lg d_{n-1,n}}{\lg q} - \frac{\lg d_{a1}}{\lg q} + 1$$

та відстані між ними

$$\frac{d_{s-1,s}}{\lambda} = \frac{d_{a1}}{\lambda} q^{s-1}.$$

Довжину плеч вібраторів розраховуємо за формулою

$$l_q = l_n + \frac{l_p - l_n}{L} \sum_{s=q}^{n-1} d_{s,s+1}, \quad (1)$$

де $2l_a = 0,95 \frac{\lambda}{2}$ – початкова довжина активного вібратора; $2l_p = \frac{\lambda}{2}$ – початкова довжина рефлектора; $2l_n = 0,4275\lambda$ – довжина останнього директора.

Виходячи з конструктивних міркувань, вибираємо діаметри поперечних перерізів вібраторів і за формулами, які наведені в монографії [1], розраховуємо взаємні та власні опори вібраторів. Значення взаємних опорів Z_{sq} визначається відстанню між вібраторами, їх довжинами і поперечними розмірами. В результаті складаємо таку систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \dot{I}_p Z_{pp} + \dot{I}_a Z_{pa} + \dot{I}_1 Z_{p1} + \dot{I}_2 Z_{p2} + \dots + \dot{I}_n Z_{pn}; \\ 1 &= \dot{I}_p Z_{pa} + \dot{I}_a Z_{aa} + \dot{I}_1 Z_{a1} + \dot{I}_2 Z_{a2} + \dots + \dot{I}_n Z_{an}; \\ 0 &= \dot{I}_p Z_{p1} + \dot{I}_a Z_{a1} + \dot{I}_1 Z_{11} + \dot{I}_2 Z_{12} + \dots + \dot{I}_n Z_{1n}; \\ &\dots \\ 0 &= \dot{I}_p Z_{pn} + \dot{I}_a Z_{an} + \dot{I}_1 Z_{1n} + \dot{I}_2 Z_{2n} + \dots + \dot{I}_n Z_{nn}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Розв'язуючи систему лінійних алгебраїчних рівнянь, знаходимо струми:

$$\dot{I}_p = I_p e^{i\psi_p'}, \quad \dot{I}_a = I_a e^{i\psi_a'}, \quad \dot{I}_1 = I_1 e^{i\psi_1'}, \dots, \quad \dot{I}_n = I_n e^{i\psi_n'}.$$

Обчислюємо відносну інтенсивність збудження кожного вібратора

$$m_p = \frac{I_p}{I_a}; \quad m_1 = \frac{I_1}{I_a}; \quad \dots \quad m_n = \frac{I_n}{I_a},$$

а також фазові зсуви $\psi_p = \psi_p' - \psi_a'$; $\psi_1 = \psi_1' - \psi_a'$; \dots $\psi_n = \psi_n' - \psi_a'$.

Обчислюємо значення множника системи

$$\tilde{f}_n(\theta) = m_p e^{-i(kd_{pa} \cos \theta - \psi_p')} + 1 + \sum_{s=1}^n m_s e^{i(kd_s \cos \theta + \psi_s)}, \quad (3)$$

де θ – кут між віссю антени і напрямом в точку спостереження; d_s – відстань від активного вібратора до s -го директора ($d_1 = d_{a1}$; при $s \geq 2$ відстань дорівнює $d_s = d_{a1} + \sum_{j=1}^{s-1} d_{j,j+1}$).

Оскільки вібратори в площині H ненапрявлені, то множник системи $f_n(\theta)$ і буде ненормованою характеристикою спрямованості в площині H , тобто

$$f(\theta^H) = |\tilde{f}_n(\theta)|. \quad (4)$$

В площині E можемо прийняти, що характеристика спрямованості будь-якого елемента антени визначається як

$$F(\theta^E) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta},$$

де кут θ^E відраховується від перпендикуляра до осі вібратора. Отже $\theta^E = \theta$ і в площині E маємо

$$f(\theta^E) = F(\theta^E) f_n(\theta^E).$$

Відношення напруженості поля у зворотному напрямі $E(180^\circ)$ до напруженості поля у прямому напрямі $E(0^\circ)$ визначається як

$$\frac{E(180^\circ)}{E(0^\circ)} = \frac{m_p e^{i(kd_{pa} + \psi_p)} + 1 + \sum_{s=1}^n m_s e^{-i(kd_s - \psi_s)}}{m_p e^{-i(kd_{pa} - \psi_p)} + 1 + \sum_{s=1}^n m_s e^{i(kd_s + \psi_s)}}. \quad (5)$$

Шляхом зміни відстаней між рефлектор-активний вібратор і директорами із заздалегідь визначеним кроком шукаємо мінімальне значення $[E(180^\circ)/E(0^\circ)] = \min$. Після цього процес обчислення повторюється при зміні довжин вібраторів. Тут також можна задати закон зміни приростів рефлектора і останнього директора. При цьому оцінюється відношення $E(180^\circ)/E(0^\circ)$ і вибирається варіант геометричних розмірів, який забезпечує

$$\left[\frac{E(180^\circ)}{E(0^\circ)} \right] = \min \min. \quad (6)$$

Для вибраного варіанту конструктивних параметрів розраховуємо вхідний опір антени

$$Z_A = m_p Z_{pa} e^{i\psi_p} + Z_{aa} + m_1 Z_{a1} e^{i\psi_1} + m_2 Z_{a2} e^{i\psi_2} + \dots + Z_{an} e^{i\psi_n}. \quad (7)$$

Для компенсації реактивної складової вхідного опору антени X_A вкорочуємо активний вібратор на величину

$$\frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{-X_A}{2\pi W_A},$$

де $W_A = 120 \left(\ln \frac{l_a}{a} - 1 \right)$ – хвильовий опір вібратора; a – радіус поперечного перерізу вібратора; l_a – довжина плеча вібратора.

Коефіцієнт спрямованої дії обчислюється за формулою

$$D = \frac{120}{R_A} \left[m_p e^{-i(kd_{pa} - \psi_p)} + 1 + \sum_{s=1}^n m_s e^{i(kd_s + \psi_s)} \right]^2. \quad (8)$$

Автоматизоване проектування. Як було зазначено раніше, вихідними даними для розробки антени є середня робоча частота f (або довжина хвилі λ), коефіцієнт спрямованої дії D . Після обчислення наближеного значення довжини антени і прийнятих відстаней між рефлектором і активним вібратором d_{pa} , активним вібратором і першим директором d_{a1} та усередненим значенням відстаней між директорами, розраховується кількість

директорів і формується квадратна матриця відстаней між елементами антени

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & d_{pa} & d_{p1} & \dots & d_{pn} \\ d_{ap} & 0 & d_{a1} & \dots & d_{an} \\ d_{1p} & d_{1a} & 0 & \dots & d_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{np} & d_{na} & d_{n1} & \dots & 0 \end{bmatrix},$$

де d_{sq} – відстань між s -м і q -м елементами (вібраторами) антени.

Виходячи із можливих початкових значень довжин плеч рефлектора l_p , активного вібратора l_a і останнього директора l_n розраховуємо матрицю-стовпець довжин вібраторів за формулою (1)

$$[l]^T = [l_p \quad l_a \quad l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_n].$$

Вибираємо діаметр поперечного перерізу вібраторів і розраховуємо матрицю власних і взаємних опорів

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{pp} & Z_{pa} & Z_{p1} & \dots & Z_{pn} \\ Z_{ap} & Z_{aa} & Z_{a1} & \dots & Z_{an} \\ Z_{1p} & Z_{1a} & Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{np} & Z_{na} & Z_{n1} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}.$$

У матричній формі рівняння (2) мають вигляд

$$[U] = [Z][I].$$

Звідси знаходимо матрицю-стовпець струмів

$$[I] = [Z]^{-1}[U].$$

За відомими струмами визначаються відношення їх амплітуд і фазові зсуви ($[m]$ і $[ш]$) та будується діаграма спрямованості згідно з формулами (3) і (4).

Встановлюємо кроки зміни відстаней між вібраторами і довжин плеч вібраторів, враховуючи граничні значення цих величин. В результаті розрахунку заданої кількості варіантів геометричних параметрів за мінімумом відношення (5) вибираються оптимальні конструктивні розміри, що забезпечують умову (6). Для оптимальної конструкції розраховується вхідний опір (7) та коефіцієнт спрямованої дії (8).

Ефективність розробленої методики ілюструється електричними параметрами антени, для якої вихідними даними були частота 4-го каналу телебачення $f = 85,2$ МГц і мінімальне значення коефіцієнта спрямованої дії 11. Діаграма спрямованості антени з шістьма директорами зображена на рис.2.

Коефіцієнт спрямованої дії даної антени $D = 24,68$, що наближається до теоретичного максимуму. Відношення (6) має значення 0,044, що

практично забезпечує однонапрямлений прийом радіохвиль, при низькому рівні бічних пелюсток. Аналогічні директорні антени, характеристики яких наведені в літературних джерелах, мають значно гірші параметри.

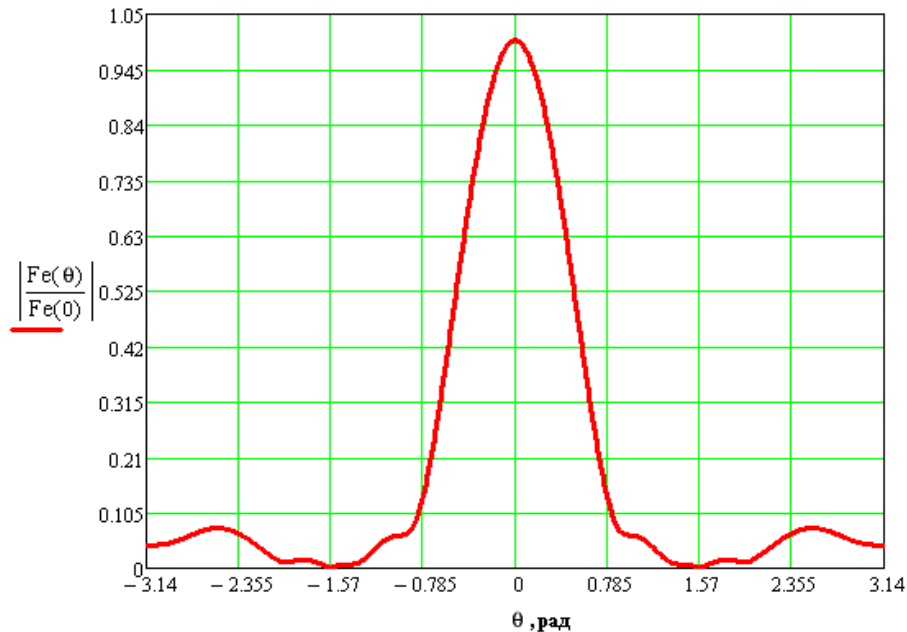


Рис. 2. Діаграма спрямованості директорної антени, яка має у своїй конструкції шість директорів.

Висновки.

З досвіду використання розробленої методики проектування директорної антени можна зробити такі висновки:

1. Методика дає можливість максимально автоматизувати визначення оптимальних конструктивних параметрів антени.

2. Критерієм оптимальності може бути як відношення інтенсивності випромінювання в прямому і зворотному напрямках, так і коефіцієнт спрямованої дії, ширина діаграми спрямованості, або рівень бічних пелюсток.

3. Автоматичне обчислення відстаней між вібраторами і їх довжини може ґрунтуватися на різних функціональних залежностях. Наприклад, замість геометричної прогресії, якій підкоряються відстані між вібраторами, можна використати експоненціальну функцію. Така гнучкість програмного забезпечення методики сприяє використанню всіх потенціальних можливостей конструкцій антени.

4. У розробленій методиці повністю враховані особливості функціонування антени – основи створення однонапрямленого випромінювання, тому така методика забезпечує створення антени з високими електродинамічними показниками.

Література.

1. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг, С.П. Белоусов, Э.М. Журбенко и др.: Под ред. Г.З. Айзенберга. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.

2. Антенны и устройства СВЧ. Под ред. Д.И. Воскресенского. – М.: Сов. радио, 1972. – 320 с.