

УДК 621.396.67:621.396.967, 621.396.969

В. П. БУНАКОВ, начальник наук.-дослід. лабораторії;

Д. С. ЗАВАДСЬКИЙ, мол. наук. співробітник;

Ю. К. СТЕПАНЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співробітник,

Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних сил України, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОГОПЕРІОДИЧНИХ ВІБРАТОРНИХ АНТЕН

Запропоновано методику розрахунку діаграми спрямованості логоперіодичної вібраторної антени з використанням інтегрального рівняння Халлена. На основі запропонованої методики змодельовано діаграми спрямованості логоперіодичної вібраторної антени з урахуванням впливу на неї земної поверхні.

Ключові слова: антена; діаграма спрямованості; логоперіодична антена.

Вступ

Вітчизняні виробники успішно працюють над створенням нових твердотільних цифрових радіотехнічних засобів (РТЗ). Як антенні системи таких РТЗ використовують так звані *логоперіодичні вібраторні антени* (ЛПВА).

Мета статті — розроблення методики розрахунку діаграми спрямованості ЛПВА з урахуванням впливу віддзеркалень від земної поверхні, а також здійснення моделювання характеристик ЛПВА.

Задача розрахунку ДС такої ЛПВА може бути зведена до розв'язування системи інтегрально-диференціальних рівнянь відносно струмів полів випромінювачів.

Основна частина

Подамо ЛПВА у вигляді моделі, зображеної на рис. 1 (використані тут позначення розкриваються далі в тексті).

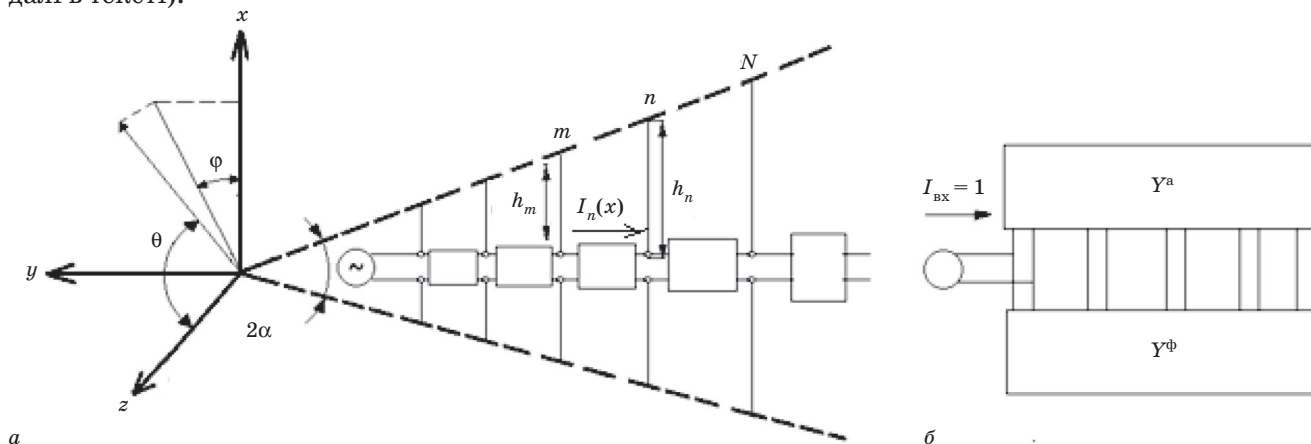


Рис. 1. Модель (а) та еквівалентна схема (б) логоперіодичної антени

Завдання розрахунків ЛПВА полягає у відшуванні струмів на вібраторах, вхідного імпедансу та діаграми спрямованості (ДС) при підімкненні генератора до клем першого вібратора, тобто до вхідних клем антени.

Надалі припускати, що розподільний фідер електромагнітно не пов'язаний із вібраторами й не бере участі у випромінюванні антени. Це припущення дозволяє при опису розподільного фідера користуватися методами теорії кіл, а для системи вібраторів застосовувати добре розвинені методи електродинамічного аналізу паралельних провідників, із використанням усіх наближень, характерних для тонких вібраторів.

Зауважимо, що ЛПВА можна подати у вигляді паралельного з'єднання двох багатополіусників, один з яких описує систему вібраторів, інший — розподільний фідер антени (див. рис. 1, б).

Позначивши матриці провідності цих багатополіусників відповідно $[Y^a]$ і $[Y^\phi]$ та взявши до уваги, що при паралельному з'єднанні матриці провідності додаються, дістанемо матричне рівняння відносно вектора V_a напруг на клемі вібраторів:

$$\left([Y^a] + [Y^\phi] \right) V_a = I_a. \quad (1)$$

Тут I_a — вектор-стовпець струмів, які втікають на клемі сумарного багатополіусника, має єдиний відмінний від нуля компонент:

$$I_a \rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

що відповідає джерелу струму одиничної амплітуди, підімкненому до клем першого вібратора.

Ураховуючи, що напруги $V_a \rangle$ і струми, які втікають на клемі вібраторів $I_a \rangle$, пов'язані між собою за допомогою матриці взаємних імпедансів системи вібраторів $[Z^a]$ залежністю

$$V_a \rangle = [Z^a] I_a \rangle, \quad (2)$$

дістанемо з (1) і (2) матричне рівняння відносно струмів $I_a \rangle$:

$$([E] + [Y^\Phi][Z^a]) I_a \rangle = I \rangle. \quad (3)$$

Тут $[E]$ — одинична матриця.

Чисельний аналіз ЛПВА з використанням системи рівнянь (3) уперше виконав Керрел у 1961 році [1]. При цьому основне припущення, яке зробив автор, полягало в тому, що матриця $[Z^a]$ обчислювалася за методом наведених електричних рушійних сил (ЕРС) з урахуванням єдиної синусоїдної гармоніки струму на кожному вібраторі. Згідно з цим припущенням клемні струми $I_n(x)$ (компоненти вектора $I_a \rangle$), знайдені в результаті розв'язування (3), дозволяють визначити ДС антени:

$$f(\theta, \varphi) = 60 \sum_{n=1}^N I_n \frac{\cos(kh_n \sin \theta \cos \varphi) - \cos kh_n}{\sin kh_n \sqrt{1 - (\sin \theta \cos \varphi)^2}} \exp(-ikh_n \operatorname{ctg} \alpha \sin \theta \cos \varphi). \quad (4)$$

Вхідний імпеданс ЛПВА чисельно дорівнює напрузі на клеммах першого вібратора, оскільки вхідний струм за припущенням дорівнює одиниці:

$$Z_{\text{вх}} = \sum_{n=1}^N Z_{I_n}^a I_n. \quad (5)$$

Виконаємо розрахунок ДС ЛПВА за допомогою інтегрального рівняння Халлена.

Метод інтегрального рівняння Халлена задовільно описує систему тонких симетричних паралельних вібраторів у разі використання трьох незалежних гармонік на кожному вібраторі [2; 3]. Тричленне подання струму справджується для вібраторів, довжина яких становить не більш як півтори-дві довжини хвилі λ .

Розглянемо систему, яка складається з паралельних вібраторів, збуджених у центрі напругами V_n . Вісь x зорієнтуємо вздовж осі вібраторів, струм на m -му вібраторі, що підлягає визначенню, позначимо $I_m(x)$. Площина $x = 0$ збігається з розподільним фідером і клемми вібраторів, тому $I_m(0)$ являє собою струм на вібраторних клеммах.

Як відомо, перетворення на нуль тангенціального компонента електричного поля на поверхні n -го вібратора приводить до такого виразу для векторного потенціалу на цьому вібраторі [2; 3]:

$$A_n(x) = C_n \cos kx + \frac{V_n}{i60} \sin k|x|, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

Водночас той самий векторний потенціал може бути виражений через струми на всіх вібраторах і функцію Гріна, що приводить до системи інтегральних рівнянь

$$\sum_{m=1}^N \int_{-h_m}^{h_m} I_m(x') \frac{e^{-ikr_{mn}}}{r_{mn}} dx' = C_n \cos kx + \frac{V_n}{i60} \sin k|x|. \quad (7)$$

Тут r_{mn} — відстань між точкою інтегрування на осі m -го вібратора і точкою спостереження на поверхні n -го вібратора. Згідно з рис. 1, а маємо:

$$r_{mn} = \left[(x - x')^2 + \operatorname{ctg}^2 \alpha (h_m - h_n)^2 + \alpha_n^2 \right]^{1/2}.$$

Невідомі константи C_n визначаються безпосередньо із (7), якщо взяти в цьому рівнянні $x = 0$:

$$C_n = \sum_{m=1}^N \int_{-h_m}^{h_m} I_m(x') \frac{e^{-ikr_{mn}^0}}{r_{mn}^0} dx', \quad (8)$$

де $r_{mn}^0 = \left[(x')^2 + \operatorname{ctg}^2 \alpha (h_m - h_n)^2 + \alpha_n^2 \right]^{1/2}$.

Скориставшись позначенням

$$K_{mn}(x, x') = \frac{e^{-ikr_{mn}}}{r_{mn}} - \cos kx \frac{e^{-ikr_{mn}^0}}{r_{mn}^0}, \quad (9)$$

перепишемо (2) у вигляді

$$\sum_{m=1}^N \int_{-h_m}^{h_m} I_m(x') K_{mn}(x, x') dx' = \frac{V_n}{i60} \sin k|x|. \quad (10)$$

Для ЛПВА напруги на клеммах вібраторів V_n , що входять у праву частину рівняння (10), невідомі; їх слід подати через значення клемних струмів $I_m(0)$. Із цієї метою звернемося до рис. 1, б, зауваживши, що напруги на вібраторах дорівнюють напругам на клеммах розподільного фідера. Увівши для розподільного фідера матрицю $[Z_{mn}^\Phi]$, дістанемо

$$V_n = \sum_{m=1}^N Z_{mn}^\Phi I_m^\Phi. \quad (11)$$

Тут I_m^Φ — струми, що втікають на клеми розподільного фідера, які просто пов'язані зі струмами, що втікають на клеми вібраторів $I_m(0)$:

$$I_m^\Phi + I_m(0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m = 1, \\ 0, & \text{якщо } m \neq 1. \end{cases} \quad (12)$$

З урахуванням (11) і (12) перетворимо (10) до такого вигляду:

$$\sum_{m=1}^N \left[\int_{-h_m}^{h_m} I_m(x') K_{mn}(x, x') dx' + I_m(0) \frac{Z_{mn}^\Phi}{i60} \sin k|x| \right] = \frac{Z_{n1}^\Phi}{i60} \sin k|x|. \quad (13)$$

Для відшукування струму $I_m(x)$, що тече по m -му вібратору, подамо його згідно з методом моментів у вигляді ряду за деякими обраними базисними функціями $\varphi_m^\mu(x)$:

$$I_m(x) = \sum_{\mu=1}^Q I_m^\mu \varphi_m^\mu(x), \quad (14)$$

де I_m^μ — невідомі коефіцієнти розкладання.

У розкладанні (14) можна використовувати наведені далі три функції, які запропонував Кінг:

$$\begin{aligned} \varphi_m^1(x) &= \sin kh_m - \sin k|x|, \\ \varphi_m^2(x) &= \cos kh_m - \cos kx, \\ \varphi_m^3(x) &= \cos \frac{kh_m}{2} kh_m - \cos \frac{kx}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Тоді ДС прямолінійного струму, записаного у вигляді (14), визначається за формулою

$$\begin{aligned} f_m(\theta, \varphi) &= 60 \sin \gamma \left\{ I_m^1 \frac{\cos \gamma [1 - \cos kh_m \cos(kh_m \cos \gamma)] - \sin kh_m \sin(kh_m \cos \gamma)}{\sin^2 \gamma \cos \gamma} + \right. \\ &+ I_m^2 \frac{\cos \gamma \sin kh_m \cos(kh_m \cos \gamma) - \cos kh_m \sin(kh_m \cos \gamma)}{\sin^2 \gamma \cos \gamma} + \\ &\left. + I_m^3 \frac{2 \cos \gamma \sin \frac{kh_m}{2} \cos(kh_m \cos \gamma) - \cos \frac{kh_m}{2} \sin(kh_m \cos \gamma)}{\cos \gamma (1 - 4 \cos^2 \gamma)} \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

де $\cos \gamma = \sin \theta \cos \varphi$, а ДС всієї логоперіодичної антени (див. рис. 1) подається сумою за складовими її вібраторів:

$$F_1(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^N f_m(\theta, \varphi) \exp(-ikh_m \sin \theta \sin \varphi \operatorname{ctg} \alpha). \quad (17)$$

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) антени зручно обчислювати, не вдаючись до інтегрування діаграми. Подавши КСД через поле $E(\theta, \varphi)$ в далекій зоні і випромінювану потужність P_Σ , дістанемо:

$$\text{КСД}(\theta, \varphi) = |E(\theta, \varphi)|^2 r^2 / 60 P_\Sigma. \quad (18)$$

За відсутності в антені омичних втрат випромінювана потужність визначається дійсною частиною вхідного імпедансу, тобто $P_\Sigma = \frac{1}{2} \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}$. Тоді згідно з використовуваним тут нормуванням діаграми маємо:

$$\text{КСД}(\theta, \varphi) = \frac{|f(\theta, \varphi)|^2}{30 \operatorname{Re} Z_{\text{вх}}}. \quad (19)$$

Якщо в антені присутні омичні втрати (наприклад, розподільний фідер закінчується погодженим навантаженням), то вираз (19) набуває змісту коефіцієнта підсилення.

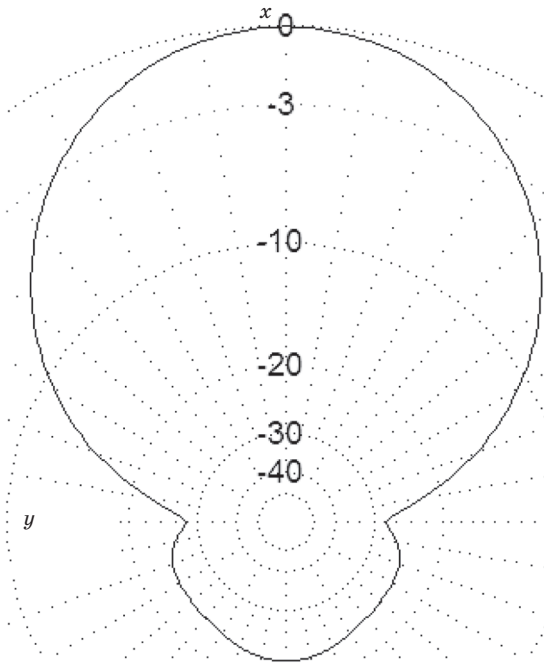


Рис. 2. ДС ЛПВА в азимутальній площині для частоти 1415 МГц без урахування впливу земної поверхні ($G_a = 7,5$ дБ)

Вплив земної поверхні на ДС синфазної антени, найбільш значущий у вертикальній площині, для поверхні з ідеальною провідністю може бути врахований множителем [4]

$$F_4(\theta) = \sin(kH_{cp} \sin\theta), \quad (20)$$

де $H_{cp} = H_1 + (p_N - 1)\lambda/4$;

θ — кут між променем і площиною землі;

H_1 — висота нижнього поля антени;

p_N — кількість поверхів в антені.

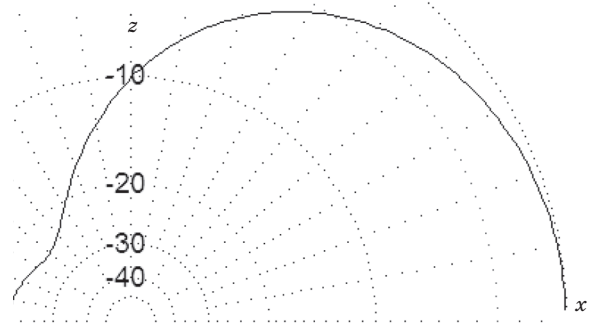


Рис. 3. ДС ЛПВА в кутomisній площині для частоти 1415 МГц без урахування впливу земної поверхні ($G_a = 7,5$ дБ)

Тоді результуюча ДС ЛПВА може бути розрахована за формулою

$$F_{\Sigma}(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^N f_m(\theta, \varphi) \exp(-ikh_m \sin\theta \sin\varphi \operatorname{ctg}\alpha) \cdot \sin(kH_{cp} \sin\theta). \quad (21)$$

На основі здобутих виразів (17) і (21) проведемо моделювання ДС ЛПВА для частоти 1415 МГц (рис. 2–5).

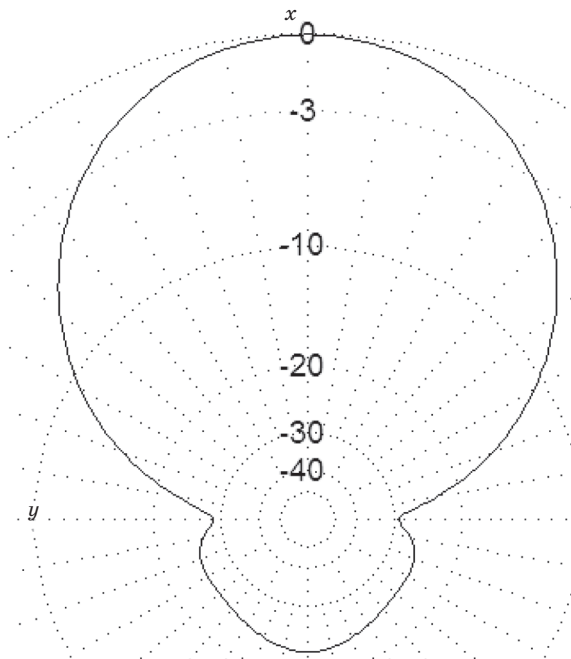


Рис. 4. ДС ЛПВА в азимутальній площині для частоти 1415 МГц з урахуванням впливу земної поверхні для висоти підйому ЛПВА, що дорівнює 7 м ($G_a = 13,7$ дБ)

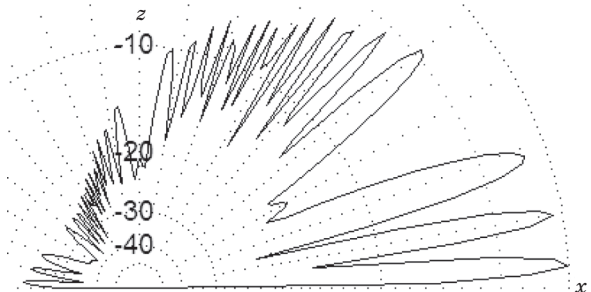


Рис. 5. ДС ЛПВА в кутomisній площині для частоти 1415 МГц з урахуванням впливу земної поверхні для висоти підйому ЛПВА, що дорівнює 7 м ($G_a = 13,7$ дБ)

Висновок

Для аналізу характеристик ЛПВА застосовано метод інтегральних рівнянь. При цьому систему інтегральних рівнянь Халлена відносно невідомих функцій розподілу електричних струмів на елементах ЛПВА зведено за допомогою методу узгодження в точках до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, розв'язуваної методом Гаусса. Як базисні функції (використовувані для розкладання невідомих функцій розподілу струмів) взято набір із трьох тригонометричних функцій повної

області, що його запропонував Кінг (King R. W. P.). Завдяки цьому вдалося реалізувати точний і достатньо швидкий алгоритм розв'язування згаданої системи інтегральних рівнянь. Згідно з визначеним розподілом струмів на елементах ЛПВА обчислено розподіл поля в далекій зоні та електричні характеристики ЛПВА.

Література

1. Керрел, Р. Расчет логопериодических вибраторных антенн / Р. Керрел // Сверхдиапазонные антенны: сб. статей / Под ред. Л. С. Бенненсона.— М.: Мир, 1964.— С. 296–319.
2. Широкодиапазонные фазированные решетки из логопериодических вибраторных антенн: сб. науч.-метод. статей по прикладной электродинамике / [Б. А. Верига, Г. А. Полухин, Ю. С. Ушаков, В. А. Яцкевич].— М.: Высш. шк., 1980.— Вып. 4.— С. 132–163.
3. Петров, Б. М. Логопериодические вибраторные антенны: учеб. пособие для вузов / Б. М. Петров, Б. И. Костромитин, Е. В. Горемыкин.— М.: Горячая линия-Телеком, 2005.— 239 с.
4. Справочник офицера противовоздушной обороны / Под ред. Г. В. Зимина.— М.: Воениздат, 1981.— 431 с.

В. П. Бунаков, Д. С. Завадский, Ю. К. Степаненко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ВИБРАТОРНЫХ АНТЕНН

Предложена методика расчета диаграммы направленности логопериодической вибраторной антенны с использованием интегрального уравнения Халлена. На основе предложенной методики смоделированы диаграммы направленности логопериодической вибраторной антенны с учетом влияния на нее земной поверхности.

Ключевые слова: антенна; диаграмма направленности; логопериодическая антенна.

V. P. Bunakov, D. S. Zavadzkiy, Yu. K. Stepanenko

MODELING OF CHARACTERISTICS OF LOG-PERIODIC DIPOLE ANTENNA

In the article was proposed design procedure of log-periodic dipole antenna diagram with usage of Hallen integral equation. On the basis on proposed methodology were modeled log-periodic dipole antenna diagram with accounting of influence of Earth surface on it.

Keywords: antenna; pattern; log-periodic antenna.

