

В. О. Одінцов

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПРОМІНЮВАЧА ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ ДІАПАЗОНУ 4,5 – 4,7 ГГц

Анотація. У статті розроблена методика конструктивного синтезу рупора з окремих провідників для оптимізації характеристик опромінювача параболічної антени діапазону 4,5–4,7 ГГц перспективної радіорелейно-тропосферної станції зв'язку, яка основана на математичному апараті, що враховує відомий метод теорії антен – наведених ЕРС. Цей метод дає змогу визначити наведені та власні опори довільно розташованих вібраторів, а також амплітуди та фази струмів у цих вібраторах та отримав подальший розвиток для розрахунку рупорів, що будуються з окремих провідників. Завдання методики формулюється зокрема так: для заданої просторової діаграми спрямованості антенної системи засобу радіозв'язку та діаграми спрямованості дзеркала (відбивача) антенної станції потрібно визначити діаграму спрямованості опромінювача (розв'язати зовнішню задачу теорії антен) та знайти конструкцію рупора з окремих провідників, що реалізує необхідний вид амплітудно-фазового розподілу електромагнітного поля у розкриві рупора (розв'язати внутрішню задачу теорії антен). Об'єктом дослідження є рупор з окремих провідників, конструктивною особливістю якого є зміна його геометричних розмірів, характеристики якого відповідають цільнометалевому рупору. Результатом практичного використання методики є запропонований опромінювач параболічної антени для перспективної радіорелейно-тропосферної станції зв'язку у вигляді конічного рупора. Особливістю конструкції конічного рупора є те, що він складається з окремих провідників, які змінюють довжину, що у свою чергу дає змогу змінювати загальні геометричні розміри рупора. Властивості розробленого конічного рупора відповідають властивостям цільнометалевого рупора з аналогічними електричними характеристиками. Методику доцільно застосовувати в загальній теорії антен для конструктивного (інженерного) синтезу рупорних антен з окремих провідників за заданими електричними характеристиками.

Ключові слова: параболічна антена; рупор з окремих провідників; опромінювач, розрахунок.

Вступ

Для конструктивного синтезу обрано опромінювач параболічної антени на основі рупора діапазону 4,5–4,7 ГГц, побудований на основі окремих провідників із змінною геометрією для антенної системи перспективної радіорелейно-тропосферної станції спецзв'язку. Для такої станції побудуємо новий опромінювач на основі рупорної антени, побудованої з окремих провідників відповідно до заданих технічних характеристик.

Постановка завдання. Завдання методики формулюється зокрема так: для заданої просторової ДС антенної системи засобу радіозв'язку та діаграми спрямованості дзеркала (відбивача) АС потрібно визначити ДС опромінювача (розв'язати зовнішню задачу теорії антен) та знайти конструкцію рупора з окремих провідників, що реалізує необхідний вид амплітудно-фазового розподілу ЕМП у розкриві рупора (розв'язати внутрішню задачу теорії антен).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Суміжною з даною тематикою, було проведення НДР "МІРАЖ" над якою працювали співробітники НДІ технологій кібербезпеки Держспецзв'язку та ІСЗІ КПШ ім. Ігоря Сікорського, результати якого були успішними та доведеними але мають місце на вдосконалення - розробка більш зручних в експлуатації антен з розширенням можливостей (наприклад сканування діаграмою спрямованості). Класичною задачею синтезу є пошук амплітудно-фазового розподілу струму або електромагнітного поля (ЕМП) в розкриві антени, відповідно до заданих електричних характеристик АС [5]. При вирішенні такої задачі тип відби-

вача особливого значення не має, важливим є знання характеристик опромінюючої антени [6, 7]. Самої методики оптимізації опромінювача параболічної антени як такої до нашого часу не існує, тому передумовами створення методики є складність розв'язання електродинамічних задач для цільнометалевого рупора методом наведених ЕРС, та відсутність математичного апарату для конструктивного синтезу рупора з окремих провідників [4-7, 10].

Методика призначена для побудови рупорної антени з окремих провідників як опромінювача параболічної антени перспективної радіорелейно-тропосферної станції зв'язку.

Основна частина

Об'єктом дослідження є рупор з окремих провідників, конструктивною особливістю якого є зміна його геометричних розмірів, характеристики якого відповідають цільнометалевому рупору.

Основними обмеженнями є те, що для опромінювання параболічних антен засобів зв'язку розглядаються випромінювачі на основі рупорних антен, які синтезуються з окремих провідників.

Головним припущенням є те, що цільнометалевий рупор можна представити у вигляді рупора, побудованого з окремих провідників, відстань між якими становить менше ніж $1/20$ робочої довжини хвилі. Таке значення отримано практичними дослідженнями за умов того, що взаємні струми, які виникають у двох окремих провідниках відповідають струмам, які виникають на цільнометалевій поверхні.

Показником є відповідність електричних характеристик розробленого за методикою конструктив-

ного синтезу рупора з окремих провідників характеристикам аналогічного за розмірами цільнометалевого кінцевого рупора, діаграма спрямованості якого вимірюється практичними дослідженнями. Оцінку критерію відповідності електричних характеристик доцільно проводити за показником – ширини діаграми спрямованості рупору.

Структура методики синтезу рупорних антен з окремих провідників:

Математичний апарат:

- Метод наведених ЕРС;
- Рівняння Максвелла;
- Теорія диполя Герца;

Етапи методики:

1 Запропонувати розгляд суцільно металевого рупора у вигляді рупора з окремих провідників.

2 Розрахунок поля випромінювання рупора як суперпозицію полів від окремих провідників.

3 Порівняння результатів розрахунку суцільнометалевого рупора з окремих провідників.

Вхідні дані:

- діапазони робочих частот;
- потужність передавача РРТ станції;
- ДС антенної системи станції зв'язку антенної системи станції зв'язок;
- конструкція та характеристики дзеркала АС;
- опромінювач параболічної антени для АС;

Результат:

Опромінювач параболічної антени для АС перспективної РРТ станції зв'язку у вигляді кінцевого рупора з окремих провідників, що змінює що змінює геометричні розміри.

Обмеження:

цільнометалевий рупор можна представити у вигляді рупора, побудованого з окремих провідників, відстань між якими становить менше ніж 1/20 робочої довжини хвилі.

Припущення:

цільнометалевий рупор можна представити у вигляді рупора, побудованого з окремих провідників, відстань між якими становить менше ніж 1/20 робочої довжини хвилі. Вихідними даними для методики є діапазони робочих частот та потужність передавача перспективної радіорелейно-тропосферної станції зв'язку, характеристики діаграми спрямованості всієї антенної системи станції зв'язку, конструкція та характеристики дзеркала (відбивача) АС.

Перспективним напрямом синтезу антен є побудова опромінювачів параболічних антен на основі рупорів із змінною геометрією для станцій радіозв'язку, але, на сьогодні, методи синтезу таких антен є складними у практичному застосуванні, а методика конструктивного синтезу рупорів зі змінною геометрією не розроблені.

В якості конструкції пропонуються кінчні рупори, що складаються з окремих елементів (провідників), що змінюють геометричну довжину на основі вібраторів або провідників, що створюють бігучу хвилю. Живлення такого рупора доцільно здійснювати за допомогою закороченого відрізка колового хвильоводу, в якому розміщений вібратор (шпир) живлення.

Використання одного вібратора живлення дає змогу сформувати електромагнітну хвилю лінійної поляризації, а розміщення другого вібратора живлення у перпендикулярній площині формує ЕМХ колової поляризації. У подальшому при розрахунках будемо вважати, що використовується тільки ЕМХ лінійної поляризації.

Математичний апарат, який використовується для конструктивного синтезу рупора з окремих провідників для оптимізації характеристик опромінювача параболічної антени діапазону 4,5–4,7 ГГц перспективної радіорелейно-тропосферної станції зв'язку базується на відомому методі наведених ЕРС.

Математична модель конструктивного синтезу рупора з окремих провідників описана далі:

1. З урахуванням частотного діапазону обирається діаметр живлячого хвильоводу:

$$\lambda_{кр} (H_{1,1}) = \frac{2\pi a}{y_{1,1}}, \quad (1)$$

$$\lambda_{кр} (E_{01}) = \frac{2\pi a}{x_{01}}, \quad (2)$$

де $y_{1,1}$ – перший корінь похідної функції Бесселя першого порядку; x_{01} – нульовий корінь функції Бесселя першого роду.

2. Вибір математичного апарату згідно методу наведених ЕРС:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_{11} + I_2 Z_{12} + \dots + I_n Z_{1n}; \\ U_2 = I_1 Z_{12} + I_2 Z_{22} + \dots + I_n Z_{2n}; \\ U_n = I_1 Z_{1n} + I_2 Z_{n2} + \dots + I_n Z_{nn}, \end{cases} \quad (3)$$

де Z_{mm} – власний опір конкретного вібратора; Z_{mn} – взаємний опір m -го і n -го вібраторів; U_m – напруга на конкретному вібраторі; I_m – струм на конкретному вібраторі, який необхідно знайти

3. З урахуванням розрахунку власних та взаємних опорів для запропонованої антенної решітки система матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_{1\text{власне}} + I_m \Delta Z_{12} + \dots + I_n \Delta Z_{1-25}; \\ 0 = I_1 (Z_{1\text{власне}} + \Delta Z_{12}) + I_m \Delta Z_{\text{власне}} + \\ + \dots + I_n (Z_{\text{власне}} + \Delta Z); \\ \dots \\ 0 = I_1 (Z_{1\text{власне}} + \Delta Z_{1n}) + I_m \Delta Z + \\ + \dots + I_n (Z_{n\text{власне}}); \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_{\text{власне}} + I_n (24 \Delta Z_{1-25}); \\ 0 = I_1 \Delta Z_{1-25} + I_n (Z_{\text{власне}} + 24 \Delta Z); \\ \dots \\ 0 = I_1 \Delta Z_{1-25} + I_n (Z_{\text{власне}} + 24 \Delta Z), \end{cases} \quad (5)$$

де Z_{mn} – взаємні опори між вібраторами. Визначаються з графіків або з таблиць Пістолькорса. З урахуванням наших допущень, система перейде в іншу систему; ΔZ – взаємні опори будуть визначатися, як середні взаємні опори (це для попереднього розрахунку); ΔZ_1 – взаємний опір 1-го і n -го вібратора; ΔZ_n – взаємний опір між двома будь-якими вібраторами зі складу рупору.

4. Усереднивши взаємні опори вібраторів врахуємо, що у нас тільки 2 невідомих I_1 та I_m . Знайдемо особисті та взаємні опори

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_{1\text{власне}} + I_n 24 \Delta Z_{1-25}; \\ O = I_1 \Delta Z_{1-25} + I_n (Z_{\text{власне}} + 24 \Delta Z), \end{cases} \quad (6)$$

де $Z_{1\text{власне}} \approx -200 \text{ Ом}; Z_{\text{власне}} \approx 2000 \text{ Ом}; \Delta Z_{1-25} \approx 4 \text{ Ом}; \Delta Z \approx 1,2 \text{ Ом}.$

5. Підставивши значення отримаємо:

$$\begin{cases} U_1 = -I_1 \times 200 \text{ Ом} + I_n \times 96 \text{ Ом}; \\ O = I_1 \times 40 + I_n \times 2028 \text{ Ом}. \end{cases} \quad (7)$$

6. Отриманий результат підставимо в формулу напруженості поля кожної пластини:

$$E_m = \frac{0.15 U_1}{r} \times \frac{\cos\left[\left(180^\circ \frac{l}{\lambda}\right) \sin(\theta + \varphi_{\text{розкр}})\right] * \cos\left(180^\circ \frac{l}{\lambda}\right)}{\cos(\theta + \varphi_{\text{розкр}})}. \quad (8)$$

7. Знайдемо поле випромінювання живлячої жили:

$$E_n = \frac{2 * U_1}{r} \times \frac{\cos\left[\left(180^\circ \frac{l}{\lambda}\right) \sin(\theta + \varphi_{\text{розкр}})\right] - \cos\left(180^\circ \frac{l}{\lambda}\right)}{\cos(\theta + \varphi_{\text{розкр}})}. \quad (9)$$

8. Знайдемо загальне поле випромінювання рупора:

$$E_{\text{рупора}} = E_n + E_{\text{ж}}. \quad (10)$$

9. Оцінка порівняння розрахунків рупорів:

$$E_{\text{рупора}} = \frac{0.15 v_1}{1 - \sin(\theta + \varphi)} \times \frac{r}{\lambda} \sin[180^\circ \frac{l}{\lambda} (1 - \sin(\theta + \varphi))]. \quad (11)$$

Порядок реалізації методики:

1 Запропонувати конструкцію рупора з окремих провідників на основі цільнометалевого рупора.

2 Розрахунок рупора з окремих провідників як системи випромінювачів, що створюють загальне поле випромінювання.

3 Порівняння розрахунків рупорів з окремих провідників та суцільнометалевих з однаковими довжинами та кутами розкриву рупору.

Розсувні провідники, з яких складається рупор з окремих провідників є його продовженням приєднаним до опору навантаження через діелектричну прокладку товщиною $\frac{\lambda}{4}$.

Товщина прокладки є змінним (за товщиною) фактором. При товщині прокладки $\frac{\lambda}{4}$ основне випромінювання буде являти собою суму напів воронки з провалом в напрузі провідника рупора. При цьому передбачається, що можна зменшити кількість вібраторів.

Загальне випромінювання буде складатися з випромінювання жили та випромінювання на ділянці провідників на поверхні рупора випромінювання жили буде визначатися також як і для вібраторного рупора струм на пластині рупора буде визначатися так само, а вісь випромінювання буде розраховуватися за виразом для проводу з бігучою хвилею струму:

$$E_{\text{пр}} = \frac{60 I_{\text{пр}}}{r} \times \frac{\sin \varphi}{1 - \cos \Psi} \times \sin[180^\circ \frac{l}{\lambda} (1 - \cos \varphi)] \quad (12)$$

для нашого випадку з урахуванням кута розкриву рупору формула зміниться

$$E_{\text{рупора}} = \frac{0.15 v_1}{r} \times \frac{\cos(\theta + \varphi)}{1 - \sin(\theta + \varphi)} \times \sin[180^\circ \frac{l}{\lambda} (1 - \sin(\theta + \varphi))], \quad (13)$$

тут вже враховано що рупор має 25 провідників з бігучою хвилею струму.

З попередніх розрахунків можна зробити наступні висновки:

Розрахунки рупора вібраторного типу і рупора з провідників з бігучою хвилею струму якісно збігається з розрахунком цільнометалевого рупора, тобто відстежується тенденція звуження ДС зі збільшенням кута розкриву (рис. 1):

$$E = E_{\text{рупора}} + E_{\text{ж}}. \quad (14)$$

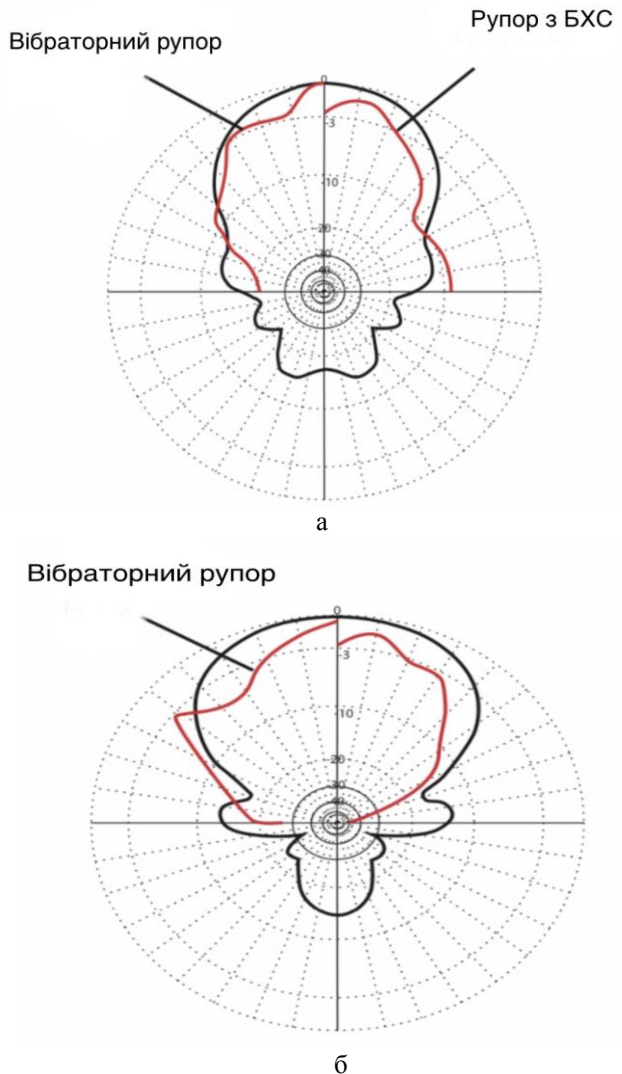


Рис. 1. Діаграма спрямованості:
а – з розкритом 20°
б – з розкритом 30°

Є можливість розглядати цільнометалевий рупор у вигляді рупора з окремих провідників і розраховувати його по більш простий методиці.

Провал в напрямку осі рупора з провідників з бігучою хвилею струму, пояснюється тим що нахил ДС такого провідника залежить не тільки від кута розкриття по та від відношення довжини рупора до його довжини хвилі.

Простіше за все такий рупор підбирати експериментальним шляхом. Діаграма у вертикальній площині не було сенсу розраховувати так як був використований живильний елемент набагато менше довжини хвилі.

Висновки

Результатом практичного використання методики є запропонований опромінювач параболічної антени для АС перспективної радіорелейно-

тропосферної станції зв'язку у вигляді конічного рупора.

Особливістю конструкції конічного рупора є те, що він складається з окремих провідників, які змінюють довжину, що у свою чергу дає змогу змінювати загальні геометричні розміри рупора. Властивості розробленого конічного рупора відповідають властивостям цільнометалевого рупора з аналогічними електричними характеристиками.

Також можна спростити важкі і великі методи розрахунку цільнометалевого рупора, представити його рупором із окремих провідників, а потім розрахувати за допомогою спрощеного методу навідних ЕРС.

Методику доцільно застосовувати в загальній теорії антен для конструктивного (інженерного) синтезу рупорних антен з окремих провідників за заданими електричними характеристиками.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антени телекомунікаційних і моніторингових систем. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Слободянюк П.В., Благодарний В.Г.; за ред Ільницького Л.Я. Київ : ТехноПоліграф, 2012. 240 с.
2. Проблемы антенной техники. Воскресенский Д.И., Бей Н.А., Братчиков Н.А. и др. ; под ред. Л.Д. Бахрака. Москва : Радио и связь, 1989. 386 с.
3. Минкович Б.М., Яковлев В.П. Теория синтеза антенн. Москва : Советское радио, 1969. 298 с.
4. Бондаренко Л.В. Синтез антенн. Владивосток : ДВГТУ, 2009. 130с.
5. Наумов Н. Д. Оптимизированный метод расчета рупорной антенны. Москва: Успехи прикладной физики, 2017, Том 5, № 5. 17 с.
6. Кочержевский Г.Н. Антенно-фидерные устройства. Москва : Радио и связь, 1989. 356 с.
7. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование антенно-фидерных устройств. Москва: Энергия, 1966. 648 с.
8. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот. Київ : Укртелеком, 2003. 496 с.
9. Закин И.П., Тощий А.В., Абрамов С.К. Проектирование антенных устройств систем связи. Учеб. пособие. Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т "ХАИ", 2007. 78 с.
10. Клоков В. В., Павликов С.Н. Рупорные антенны: методические указания к лабораторным работам. Владивосток : Морской государственный университет имени адм. Г. И. Невельского, 2008. 34 с.

Received (Надійшла) 18.03.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.05.2021

Development of a technique for a radiator of a parabolic antenna in the range of 4.5-4.7 GHz

Vladislav Odintsov

Abstract. The article develops a method of constructive synthesis of a loudspeaker from individual conductors to optimize the characteristics of the irradiator of a parabolic antenna in the range of 4.5-4.7 GHz promising radio relay-tropospheric communication station, which is based on a mathematical apparatus that takes into account the known method of antenna theory. This method makes it possible to determine the induced and intrinsic resistances of arbitrarily located vibrators, as well as the amplitudes and phases of currents in these vibrators and has been further developed for the calculation of horns built from individual conductors. The task of the technique is formulated in particular as follows: for a given spatial pattern of the antenna system of the radio and the pattern of the mirror (reflector) of the antenna station you need to determine the pattern of the irradiator (solve the external problem of antenna theory) and find the design of the mouthpiece the required type of amplitude-phase distribution of the electromagnetic field in the opening of the horn (to solve the internal problem of antenna theory). The object of the study is a loudspeaker made of individual conductors, the design feature of which is a change in its geometric dimensions, the characteristics of which correspond to an all-metal loudspeaker. The result of the practical application of the technique is the proposed parabolic antenna irradiator for a promising radio relay-tropospheric communication station in the form of a conical horn. The peculiarity of the design of the conical horn is that it consists of individual conductors that change the length, which in turn allows you to change the overall geometric dimensions of the horn. The peculiarity of the design of the conical horn is that it consists of individual conductors that change the length, which in turn allows you to change the overall geometric dimensions of the horn. The properties of the developed conical horn correspond to the properties of an all-metal horn with similar electrical characteristics. The technique should be used in the general theory of antennas for constructive (engineering) synthesis of horn antennas from individual conductors according to the specified electrical characteristics.

Keywords: parabolic antenna; horn with separate conductors; emitter; calculation.