

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-04>

УДК 538.3:621.396.67

М.М. ГОРОБЕЦЬ, д. ф.-м. наук, проф.

e-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3022-9044>

А.С. ЛЕБЕДЄВ, с.н.с.

e-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

О.М. ГОРОБЕЦЬ, к.ф.-м.н.

e-mail: liolik.work@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3582-3659>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ АПЕРТУРНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З РОЗКРИВОМ КВАДРАТНОЇ ФОРМИ

Актуальність. У роботі досліджені хвильові явища в ближній і проміжній зонах апертурних еквідистантних плоских антенних решіток з розкритом квадратної форми з довільними електричними розмірами розкрива і відстанями між випромінювачами.

Мета роботи. – теоретичне дослідження поведінки амплітуди і фази електромагнітних хвиль в ближній та проміжній зонах апертурних дискретних антен.

Матеріали та методи. Задача вирішена методом суперпозиції в електродинаміці. В розробленому математичному забезпеченні на форму розкрива, геометричні та електричні розміри антени, амплітудні й фазові розподіли джерел поля в розкриті не накладається ніяких обмежень.

Результати. Показано, що при відстанях між випромінювачами, не більшими половини довжини робочої хвилі, просторовий розподіл поля в ближній зоні апертурних антенних решіток близький до розподілу поля в ближній зоні неперервних апертурних антен оптичного й акустичного типу. При розмірах розкрива, що не перевищують дві довжини хвилі, амплітуди полів в ближній зоні спостереження при збільшенні відстані рівномірно зменшуються. При середніх ($L \approx 5 \div 10$ довжин хвилі) і великих електричних розмірах розкрива в ближній зоні антени формується прожекторний промінь, що являє собою слабо неоднорідну локально плоску хвилю, що біжить, середня амплітуда якої в процесі поширення постійна до відстані, рівній половині відстані дальньої зони, тобто до L^2/λ . При збільшенні відстані між випромінювачами більше однієї довжини хвилі просторовий розподіл поля набуває каскадної форми. У першому каскаді протяжністю до $0,25$ розміру розкрива середня амплітуда поля близька до $0,8$ від амплітуди поля в середині розкрива E_0 . Другий каскад із середньою амплітудою поля близько $0,08 E_0$ формується на відстанях від $0,3L$ до половини відстані дальньої зони. В розріджених антенних решітках при $d > \lambda$ в ближній зоні поза прожекторним променем формуються локальні сплески амплітуди поля до $0,25 E_0$. Вони розташовані на відстані розміру розкрива й зміщені від осі прожекторного променя на $0,8$ розміру розкрива L .

Висновки. Просторовий розподіл електромагнітних полів поблизу апертурних антенних решіток малих електричних розмірів, що характерно для датчиків електричного чи магнітного поля в радіовимірній техніці, відзначається рівномірно убуваючими і в поздовжньому, і поперечних напрямках амплітудами електричних і магнітних полів. При великих розмірах апертури, що характерно для гостронаправлених антен, цей розподіл відзначається формуванням прожекторного променя, який являє собою слабо неоднорідну локально плоску хвилю, середня амплітуда якої в процесі поширення постійна до відстані, рівній половині відстані дальньої зони. При відстанях між випромінювачами, більшими однієї довжини хвилі, прожекторний промінь має каскадну форму.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електромагнітні поля й хвилі, антенні решітки, ближня зона, прожекторний промінь.

Як цитувати: Горобець М.М., Лебедев А.С., Горобець О.М. Електромагнітні хвилі в ближній зоні апертурних антенних решіток з розкритом квадратної форми. Вісник Харківського національного

© Горобець М.М., Лебедев А.С., Горобець О.М. 2024

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2024;41:37-49. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-04>

In cites: Horobets M.M., Lebedev A.S., Horobets O.M. Electromagnetic waves in the near zone of aperture antenna arrays with a square opening. Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series "Radio Physics and Electronics". 2024;40:37-49 (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2024-41-04>

ВСТУП

До теперішнього часу можливості застосування електромагнітних хвиль у науці та техніці далеко не вичерпані. Особливо привертають увагу можливості розробок екологічно чистих виробництв у харчовій, сільськогосподарській, фармацевтичній і хімічній промисловості. Принципове значення має захист технічного персоналу, який обслуговує радіоелектронні системи, що випромінюють електромагнітні хвилі великої потужності. Перспективні і інтенсивно розвиваються в усьому світі застосування електромагнітних хвиль різних частотних діапазонів у медицині для ранньої діагностики й лікування онкологічних захворювань методом мікрохвильової гіпертермії. Велике значення має подальший розвиток ближньої підповерхневої радіолокації, особливо для виявлення мін та інших боєприпасів в періоди війни та після неї. У зв'язку з викладеним дослідження електромагнітних хвиль, їх характеристик і розподіл в просторі поблизу антени актуальні й важливі в практичному відношенні.

Дотепер досить повно вивчені хвильові процеси в ближній зоні безперервних лінійних і апертурних антен [1]. Доведено, що в напрямку головного максимуму діаграми напрямленості лінійної безперервної антени амплітуди полів рівномірно зменшуються. У випадку апертурних антен з розмірами розкрива, більшими 1 – 1,5 довжини хвилі, у ближній зоні формується прожекторний промінь, який являє собою локально плоску слабо неоднорідну хвилю, що біжить, із близькою до постійної середньою амплітудою [1, 2]. Однак, до цих пір залишаються невивченими хвильові процеси в ближній зоні антенних решіток, зокрема, вплив електричних розмірів і форми апертури й відстані між випромінювачами на характер розподілу в просторі амплітуд електричних і магнітних хвиль на кінцевій відстані від апертури в ближній зоні. Для обґрунтування актуальності та важливості для практики такого дослідження відмітимо найбільш важливі особливості фазованих і нефазованих антенних решіток.

Апертурні антенні решітки як альтернатива гостронаправленим неперервним антенам оптичного й акустичного типів – дзеркальним, лінзовим, рупорним, їх численним варіантам і модифікаціям – мають певні достоїнства і переваги. Найбільш важливі з них, що мають принципове значення, наступні:

- можливість реалізації електронного («миттєвого») сканування простору головною пелюсткою діаграми напрямленості у фазованих антенних решітках (ФАР);
- можливість необмежено збільшувати потужність випромінювання активними антенними решітками з випромінюючими елементами, інтегрованими з синхронізованими по частоті й по фазі генераторами й/або підсилювачами;
- можливість збільшувати роздільну здатність радіотелескопів і радіометрів шляхом збільшення відстані між випромінювачами – елементами антенної решітки;
- можливість збільшувати чутливість радіоприймальних систем у радіоастрономії, радіометрії, пасивній радіолокації за рахунок збільшення кількості приймальних слабконаправлених антен – елементів антенної решітки, інтегрованих із малoshумлячими підсилювачами;
- можливість реалізації плоских або конформних конструкцій антен літальних апаратів і наземних транспортних засобів;
- нефазовані та зфокусовані в ближню зону антенні решітки забезпечують функціонування перспективних космічних і наземних систем безпроводної безконтактної дистанційної передачі електричної енергії мікрохвильовим променем.

В останній час активно розвивається теорія ближньої зони безперервних апертурних антен, зфокусованих у ближню або проміжну зону [3] (див. також численну літературу у цій статті). Зфокусовані антенні решітки відкривають додаткові можливості поліпшення якості лікування онкологічних захворювань методом мікрохвильової гіпертермії, а також створення принципово нових приладів для діагностики захворювань, наприклад, аналогів тепловізорів у більш довгохвильових діапазонах електромагнітних хвиль. За рахунок більшої глибини проникнення електромагнітного випромінювання з'являється можливість більш раннього виявлення температурних аномалій, зокрема, у тілі людини.

Малоелементні антенні решітки можуть бути використані в їх ближній зоні для створення високочутливих датчиків електромагнітного поля з високою роздільною здатністю для наукового й медичного приладобудування.

Апертурні антенні решітки дозволяють створити задане, наприклад, однорідне на заданій площині або в заданому об'ємі простору в ближній зоні «еталонне електромагнітне поле» для цілей метрології.

Ціль статті – теоретичне дослідження фізичних закономірностей формування розподілу електромагнітних хвиль на кінцевій відстані від апертурних еквідистантних плоских антенних решіток з

розкритом квадратної форми в ближній і проміжній зонах спостереження при зміні розмірів їх розкрива, числа випромінювачів і відстані між ними в широких межах.

ПОСТАНОВКА Й РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ

Згідно з принципом суперпозиції в електродинаміці задача розрахунку амплітудних і фазових характеристик векторів напруженості електричних і магнітних полів в ближній та проміжній зонах спостереження антенних решіток зводиться до сумування комплексних амплітуд векторів $\dot{\vec{E}}$ і $\dot{\vec{H}}$ усіх дискретних джерел електромагнітних хвиль в заданих точках спостереження поза розкритом антени. В математичному відношенні задача не викликає труднощів принципового характеру.

До теперішнього часу поля неперервних слабконаправлених випромінювачів невеликих електричних розмірів, які можуть бути елементами антенних решіток, в ближній та проміжній зонах досить добре вивчені. Особливості цих полів проявляються до відстані ближньої зони елементарного випромінювача антенної решітки

$$\frac{R_{02}}{\lambda} \leq \frac{l}{4\lambda} + \frac{l}{2\lambda} \sqrt{\frac{l}{\lambda}}. \quad (1)$$

Тут l – максимальний розмір випромінювача – елемента решітки.

Для дослідження ефектів ближньої зони (1) антенних решіток, обумовлених дискретним характером розташування випромінювачів, відстанями між ними, електричними розмірами і формою апертури, тобто в самому загальному випадку, необхідно передусім в фізико-математичній моделі антенної решітки виключити вплив типу випромінювача решітки на хвилі в її ближній зоні. Для цього використаємо фізичну модель у варіанті точкового ізотропного випромінювача. Так як його діаграма напрямленості ізотропна $\dot{F}_0(\theta, \varphi) = 1$, напрямлені амплітудні і фазові характеристики елементарного випромінювача решітки дійсно виключаються з розгляду. Поляризаційні характеристики випромінювання прийнятого точкового випромінювача також ізотропні.

Математичною моделлю такого випромінювача є сферична хвиля з амплітудами електричного і магнітного полів у вигляді

$$\dot{\vec{E}} = \frac{\dot{\vec{E}}_0}{R} e^{-ikR}; \quad \dot{\vec{H}} = \frac{\dot{\vec{H}}_0}{R} e^{-ikR}, \quad (2)$$

де $\dot{\vec{E}}_0$, $\dot{\vec{H}}_0$ – комплексні амплітуди електричних і магнітних полів в точці початку координат в середині випромінювача, R – відстань від випромінювача до точки спостереження зовні апертури антенної решітки в будь-якому напрямку, $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число.

Для подальшого аналізу необхідно врахувати векторну природу електромагнітних полів і хвиль. Прийемо, що точковий ізотропний випромінювач випромінює сферичну поперечну хвилю з лінійною горизонтальною поляризацією. Тоді поля в фазових центрах довільного випромінювача з координатами в розкритві x_{nm} , y_{nm} , які визначають амплітудно-фазовий розподіл джерел електромагнітних хвиль на розкритві антенної решітки $\dot{\vec{A}}_{nm}$, описуються співвідношенням

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_{nm} &= \vec{y}^0 \dot{\vec{E}}_{nm}(x_{nm}, y_{nm}) = \vec{y}^0 \dot{\vec{E}}_0 \dot{\vec{A}}_{nm}(x_{nm}, y_{nm}); \\ \dot{\vec{H}}_{nm} &= -\vec{x}^0 \dot{\vec{H}}_{nm}(x_{nm}, y_{nm}) = -\vec{x}^0 \dot{\vec{H}}_0 \dot{\vec{A}}_{nm}(x_{nm}, y_{nm}). \end{aligned} \quad (3)$$

Кожний точковий випромінювач поза розкритвом антени випромінює сферичну хвилю, яка в точці спостереження на відстані r_{nm} має комплексні амплітуди

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_{nm} &= \vec{y}^0 \dot{\vec{E}}_{onm} [\exp(-ikr_{nm})/r_{nm}]; \\ \dot{\vec{H}}_{nm} &= -\vec{x}^0 \dot{\vec{H}}_{onm} [\exp(-ikr_{nm})/r_{nm}]. \end{aligned} \quad (4)$$

Для аналізу просторового розподілу полів в дальній зоні антени звичайно використовується розв'язок зовнішньої задачі електродинаміки і представлення характеристик хвиль у сферичній системі координат. У випадку аналізу хвиль у ближній і проміжній зонах антен довільних електричних розмірів більш доцільно представляти амплітудні і фазові характеристики полів в декартових координатах. Наприклад, в багатьох практичних використаннях, особливо при обробці мікрохвилями тих чи інших продуктів, розміщених на стрічці конвеєра, яка рухається, необхідно знати амплітуди чи потужність електромагнітних хвиль і їх розподіл на площині або в деякому об'ємі [4].

Поперечні компоненти електромагнітної хвилі на довільній відстані від апертури антенної решітки дорівнюють

$$\begin{aligned}\dot{\vec{E}}_y &= \dot{y}^0 \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M \frac{\dot{E}_{onm}}{r_{nm}} e^{-ikr_{nm}} \cos \alpha_{nm}; \\ \dot{\vec{H}}_x &= -\dot{x}^0 \sum_{n=-N}^N \sum_{m=-M}^M \frac{\dot{H}_{onm}}{r_{nm}} e^{-ikr_{nm}} \cos \alpha_{nm}.\end{aligned}\quad (5)$$

Тут множник $\cos \alpha_{nm}$ описує проекцію вектора $\dot{\vec{E}}$ або $\dot{\vec{H}}$ на вісь Oy декартової системи координат. Кут α_{nm} є кут між напрямком нормалі до n -го випромінювача і напрямком на точку спостереження з фазового центра того ж випромінювача. Кут α_{nm} визначається координатами випромінювача і точки спостереження співвідношенням

$$\operatorname{tg} \alpha_{nm} = \frac{x - x_{nm}}{Z}. \quad (6)$$

При розрахунках залежності електричних і магнітних полів від координати x множник $\cos \alpha_{nm}$ дорівнює одиниці, так як орієнтація вектора $\dot{\vec{E}}$ в випромінювачах решітки співпадає з відповідними проекціями $\dot{\vec{E}}_y$ і $\dot{\vec{H}}_x$ векторів $\dot{\vec{E}}$ і $\dot{\vec{H}}$.

В першому випадку вирішення задачі в сферичній системі координат відстань від довільного випромінювача решітки з координатами x_{nm} , y_{nm} до довільної точки спостереження з координатами R, θ, φ

$$r_{nm} = \sqrt{R^2 - 2x_{nm}R \sin \theta \cos \varphi - 2y_{nm} \sin \theta \sin \varphi + x_{nm}^2 + y_{nm}^2}. \quad (7)$$

У другому випадку декартові координати точок спостереження є x, y, z і відстань від довільного випромінювача дорівнює

$$r_{nm} = \sqrt{(x - x_{nm})^2 + (y - y_{nm})^2 + z^2}. \quad (8)$$

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ

Для верифікації визначення амплітуд і фаз електричних та магнітних полів в напрямку нормалі до розкриття розрахунки поперечних компонент проводилися додатково в сферичній і декартовій системах координат. Результати співпали в точності. Крім того, розрахунки просторових розподілів полів вздовж і поперек (5) порівнювалися з тими ж розрахунками для безперервних апертурних антен із тією ж формою розкриття та тими ж електричними розмірами. Розрахунки підтверджують отримані результати при малих $d \leq \lambda/2$ відстанях між випромінювачами.

З урахуванням потреб практики математичне забезпечення задачі розроблене для випадку опису координат точок спостереження в декартовій і сферичній системах координат. Прийнято, що вісь Oz збігається з напрямком зовнішньої нормалі до розкриття й осі Oz декартової і сферичної систем співпадають.

При зазначених вище припущеннях, що спрощують аналіз й зменшують кількість незалежних параметрів задачі, амплітуди векторів напруженості електричних і магнітних полів, нормовані відповідно на $\dot{\vec{E}}_0$ та $\dot{\vec{H}}_0$, тобто на їх значення в середині розкриття. Як виявилось в процесі розрахунків, при прийнятих вище допущеннях нормовані значення E - і H - полів збігаються між собою, тому далі представлені розрахунки тільки електричного поля.

Вивчення хвильових явищ у ближній зоні антенних решіток природно почати із з'ясування умов формування прожекторного променя при прийнятій формі апертури в залежності від числа випромінювачів, відстані між ними й електричних розмірів розкриття. Характерною ознакою прожекторного променя є поведінка амплітуд векторів напруженості електричного й магнітного полів в залежності від відстані від розкриття в напрямку нормалі до розкриття, що збігається в розглянутому випадку з напрямком головного максимуму діаграми напрямленості антени. Для вивчення й аналізу цієї залежності були проведені розрахунки для досить великої кількості варіантів антенних решіток - від гранично малих їх електричних розмірів $0,5\lambda \times 0,5\lambda$ і числа випромінювачів 2×2 ; до досить великих $200\lambda \times 200\lambda$.

Підкреслимо, що в математичному забезпеченні розв'язку задачі не накладається ніяких обмежень на всі можливі варіанти антенних решіток відносно їх електричних розмірів, форми розкриття й відстані між випромінювачами. Розрахунки показали, що найважливішим параметром, що визначає характер

просторового розподілу полів у ближній і проміжній зонах антенних решіток із заданими електричними розмірами й заданою формою розкрива, як і в дальній зоні, є відстань між випромінювачами. В результаті розгляду і аналізу для обмеження об'єму розрахунків вибрано три фіксовані варіанти d/λ , при яких діаграми напрямленості решіток відрізняються якісно. Перший варіант $d = 0,5\lambda$ відповідає класичному випадку фазованої антенної решітки із ширококутовим скануванням, коли діаграма напрямленості антенної решітки мало відрізняється від діаграми напрямленості безперервної антени з такими ж електричними розмірами й такою ж формою розкрива. Другий варіант відповідає випадку максимального значення коефіцієнта напрямленої дії антенної решітки. Як показано в [5], при малих електричних розмірах апертури (до 5 довжин хвиль) оптимальне значення d/λ близьке до 0,7. Для середніх і більших апертур $d/\lambda = 0,9$. Третій варіант відповідає мінімуму КНД антенної решітки через формування дифракційних максимумів у діаграмі напрямленості й у цих випадках $d \approx 1,1, \dots, 1,25$ довжини хвилі.

З точки зору фізики явищ із цих припущень випливає, що кожен елемент антени випромінює сферичну електромагнітну хвилю, у якій вектори напруженості електричного й магнітного полів синфазні, випромінювана антенною решіткою потужність активна, стоячі хвилі відсутні, реактивна потужність електромагнітних хвиль дорівнює нулю, фазові швидкості електричної й магнітної складових електромагнітної хвилі рівні одна одній й дорівнюють швидкості світла.

Насамперед дослідимо електромагнітні хвилі поблизу антенних решіток малих електричних розмірів. Такі решітки на практиці особливо потрібні в тих випадках, коли слабконаправлені антени служать датчиками електромагнітного поля в науковому й медичному приладобудуванні. Розрахунки показали, що у квадратній решітці з мінімальним можливим числом випромінювачів 2×2 елемента амплітуди електричного й магнітного полів у напрямку нормалі до розкрива рівномірно убувають і ознак формування прожекторного променя в ближній зоні не спостерігається при будь-якій відстані між випромінювачами. Підкреслимо, що такі ж явища характерні для полів в ближній зоні безперервних лінійних і апертурних антен із круглим розкритом малих електричних розмірів [1]. Найбільші амплітуди поля при збільшенні відстані z від антени мають місце при найменшій відстані d/λ між випромінювачами. При збільшенні відстані поздовжні градієнти амплітуди поля зменшуються. Відзначимо, однак, що поздовжні градієнти електромагнітного поля малоелементних антенних решіток менші в порівнянні з поздовжніми градієнтами поля безперервних апертурних антен з тими ж електричними розмірами розкрива [1].

При збільшенні числа випромінювачів до 4×4 елементів залежність амплітуди поля від відстані до розкрива антенної решітки приймає осцилюючий характер. На Рис.1 представлені залежності від відстані z/λ амплітуди електричного поля, нормованої до її значення E_0 на початку координат, розраховані для трьох значень відстані між випромінювачами: $d = 0,5\lambda$ для випадку фазованої антенної решітки з ширококутовим скануванням, при $d = 0,83\lambda$ - для нефазованої решітки з максимальним КНД і $d = 1,14\lambda$ для нефазованої антенної решітки з мінімальним значенням КНД. З результатів розрахунків видно, що перша ознака формування прожекторного променя – осцилюючий характер залежності амплітуди поля від відстані z/λ спостерігається вже в цьому випадку, однак головної ознаки – малої зміни амплітуди поля в міру віддалення точки спостереження від антени – в такій антенній решітці не спостерігається, амплітуда поля убуває, а збільшення відстані між випромінювачами приводить тільки до зменшення поздовжнього градієнта амплітуди електромагнітної хвилі. При $d = 0,5\lambda$ розподіл поля в ближній зоні антенної решітки близький до розподілу поля поблизу безперервної апертурної антени з такою ж конфігурацією й електричними розмірами розкрива [1].

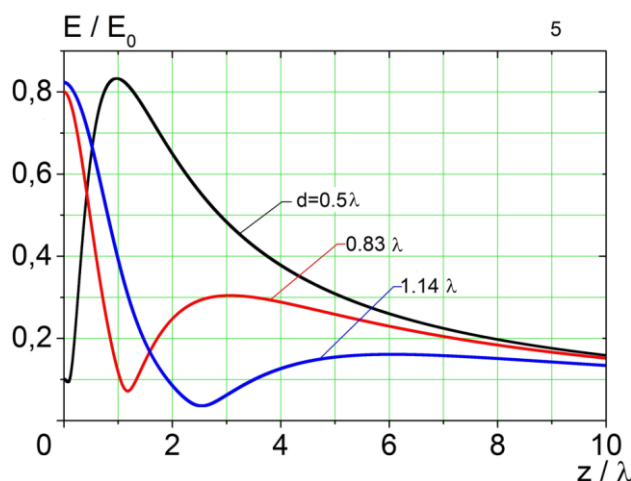


Рис. 1. Залежність амплітуди електричного поля квадратної решітки 4×4 ізотропних випромінювачів від відстані z/λ в напрямку нормалі до розкриття.

Fig. 1. Dependence of the amplitude of the electric field of a square array of 4×4 isotropic emitters on the distance in the direction of the normal to the openings

Подальше збільшення розмірів розкриття до 10-20 довжин хвиль приводить до формування прожекторного променя в ближній зоні й у розріджених антенних решітках.

Відсутність прожекторного променя в ближній зоні антенних решіток малих електричних розмірів, як і в антенах оптичного й акустичного типів з безперервним розкритвом, пояснюється зсувом фаз хвиль, які приходять у точку спостереження в ближній зоні антенної решітки від кожного випромінювача. Незавжди бачити, що при розмірах розкриття антени, які не перевищують однієї довжини хвилі, при будь-яких відстанях до точки спостереження на антені укладається одна зона Френеля або її частина. Тому сумарна амплітуда поля в напрямку нормалі до розкриття в міру віддалення точки спостереження убиває рівномірно. При збільшенні розмірів розкриття антени для точок спостереження в ближній зоні на антені формуються зони Френеля другого й наступних номерів, тому залежність сумарної амплітуди хвиль від відстані приймає осцилюючий характер.

При подальшому збільшенні розмірів розкриття й числа випромінювачів у решітці відзначені вище особливості просторового розподілу поля зберігаються. Так, для решітки з розмірами розкриття 5×5 довжин хвиль при $d = 0,5\lambda$ прожекторний промінь сформований як і у безперервній антені, а його протяжність збільшилася до 6 значень ширини розкриття. При більших же відстанях між випромінювачами в напрямку нормалі до розкриття прожекторний промінь не формується й зберігається убиваючий характер залежності амплітуди й потужності поля від відстані z/λ .

Розглянемо далі докладно структуру прожекторного променя й поведінку електромагнітної хвилі в ближній зоні еквідистантної плоскої антенної решітки з розкритвом квадратної форми середніх і великих електричних розмірів.

Для вивчення умов збудження прожекторного променя, динаміки його змін й формування розподілу поля у всьому просторі спостереження, поведінки хвиль і змін їх амплітудних і фазових характеристик у процесі поширення й у результаті інтерференції випромінювання всіх елементарних випромінювачів у кожній точці спостереження в ближній зоні антени проведені розрахунки залежності амплітуди вектора напруженості електричного поля від поздовжньої координати точок спостереження z у напрямку зовнішньої нормалі до розкриття, а також залежності амплітуди й фази цього поля від поперечної координати x на різних відстанях від розкриття решітки. Для повноти аналізу розрахунки проведені для решіток з розмірами від 5×5 довжин хвиль до 200×200 довжин хвиль при трьох, відзначених вище, варіантах відстані між випромінювачами $0,5\lambda$; $0,9\lambda$; та $1,1\lambda$. Максимальне число випромінювачів при $d = 0,5\lambda$ в першому випадку для решітки з розмірами $5\lambda \times 5\lambda$ рівне 101 випромінювач. В останньому випадку решітки $200\lambda \times 200\lambda$ це число рівне 160 801 випромінювач. Відстані від розкриття решітки до площини спостереження вибиралися кратними приблизно чверті розміру сторони розкриття. Розрахунки були проведені для розкриттів 5×5 ; 10×10 ; 25×25 ; 50×50 ; 100×100 і 200×200 довжин хвиль.

На Рис. 2-4 представлені типові результати розрахунків розподілу в просторі в ближній і проміжній зонах спостереження відносної амплітуди й фази вектора напруженості електричного поля у випадку еквідистантної решітки ізотропних випромінювачів. Розміри апертури решітки близькі до 100×100 довжин хвиль. Відстань між випромінювачами змінювалася в широких межах. На рисунках представлені

розрахунки для класичного варіанта відстані $d = 0,5$ довжини хвилі й для двох варіантів $d = 0,9$ і $1,1$ довжини хвилі, коли КНД решітки при заданому числі випромінювачів має глобальний максимум і глобальний мінімум відповідно.

З Рис.2 видно, що у випадку однорідної квадратної антенної решітки з відстанню між випромінювачами не більше половини довжини хвилі картина просторового розподілу амплітуди й фази електричних і магнітних полів, віднесених до їх значення в середині розкрива (для амплітуди) або до значення на осі Oz (для фази) якісно така ж, як і для однорідної безперервної апертури [1]. Однак, якщо у випадку антен з безперервною апертурою амплітуда поля в прожекторному промені близька до амплітуди поля в середині розкрива (незалежно від його електричних розмірів), то у випадку антенних решіток таких же розмірів вона суттєво менша. Число осциляцій амплітуди поля поблизу розкрива антенної решітки таке ж, як і у випадку безперервної апертурної антени й визначається електричними розмірами апертури. Розмах осциляцій у межах відстаней, не перевищуючих розмір розкрива (Рис. 2b) $\Delta E/E_{сер}$, не перевищує 0,25. Підкреслимо, що навіть у цьому випадку позовжні градієнти поля значно менші, ніж у випадку безперервних і дискретних антен із круглим розкривом [1]. Глобальний максимум амплітуди поля, який досягається в результаті інтерференції електромагнітних хвиль від усіх елементарних випромінювачів решітки на відстані від середини розкрива 34 електричних розмірів сторони розкрива, не перевищує $0,72E_0$. Глобальний мінімум амплітуди поля не нижче $0,24E_0$ й має місце на відстані 15 розмірів сторони розкрива. Протяжність області осциляцій визначимо як відстань від середини розкрива антенної решітки до точки в напрямку осі Oz , найбільш віддаленої від антени, у якій амплітуда поля дорівнює амплітуді поля в середині розкрива. З Рис. 2а видно, що для розглянутого випадку $L = 100\lambda$ ця відстань дорівнює 9500 довжин хвиль, тобто майже відстані половини відстані дальньої зони $R = L^2/\lambda$. Просторовий розподіл відносної амплітуди електричних і магнітних полів у поперечних площинах, паралельних площині розкрива, на різних відстанях від антени при $d \leq \lambda/2$, як видно з Рис. 2 с, d, e, f, також мало відрізняється від розподілів амплітуд полів у ближній і проміжній зонах безперервних апертурних антен із квадратним розкривом [1]. На Рис. 2 с – f і g – j на осях x/λ відзначені розміри розкрива. У результаті такого подання розрахунків у декартових координатах видно, що в напрямку головного максимуму діаграми напрямленості у межах переднього півпростору в ближній зоні досліджуваної антени утворюється хвильова трубка з поперечними розмірами, близькими до розмірів випромінюючої апертури. У межах цієї трубки довжиною до L^2/λ амплітуда поля осцилює, але в середньому приблизно дорівнює значенню $0,4E_0$. Розрахункове середнє значення амплітуди електричного поля $E \approx 0,4E_0$ виявилось однаковим для всіх варіантів апертурних антенних решіток з розмірами L , що змінюються від 5 до 200 довжин хвиль при $d = 0,5\lambda$.

З Рис. 2 g – j, на яких представлені різниці фаз електричного поля в різних поперечних перетинах хвильової трубки, також видно, що в межах тієї ж хвильової трубки в поперечних перетинах фаза поля в середньому постійна. Осциляції й амплітуди, і фази поля мають меншу амплітуду й менший період поблизу осі трубки й збільшуються до її країв. Поза хвильовою трубкою амплітуда поля швидко зменшується й загасає зі слабкими осциляціями, а фаза змінюється в межах $0 \div 360^\circ$.

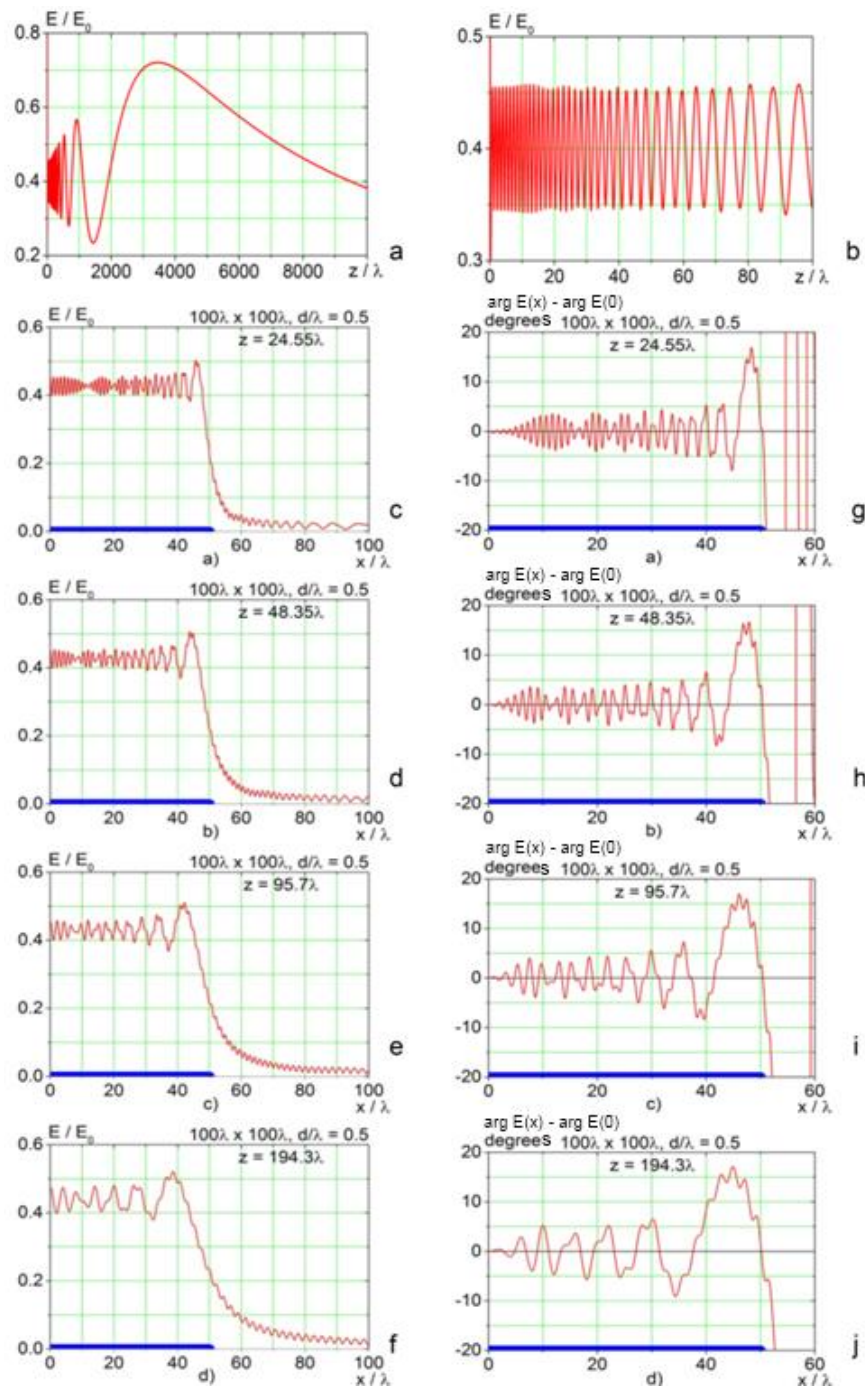


Рис. 2 – Залежність амплітуди й фази електричного поля квадратної решітки розміром $100\lambda \times 100\lambda$ від відстані при $d=0,5\lambda$: а – до відстані половини відстані дальньої зони у напрямку нормалі до розкриття; б – до відстані, рівній розміру розкриття; с-ф – залежність амплітуди поля від поперечної координати x/λ на відстанях $1/4$ розкриття (с); $1/2$ розкриття (д); одного розкриття (е); двох розкриттів (ф); г – ж – залежність фази поля від поперечної координати x/λ при тих же відстанях.

Fig. 2. Dependence of the amplitude and phase of the electric field of a square array of size $100\lambda \times 100\lambda$ on the distance at $d=0.5\lambda$: а – to a distance of half the distance of the far zone in the direction normal to the opening; б – to a distance equal to the opening size; с-ф - dependence of the field amplitude on the transverse coordinate x/λ at distances of $1/4$ of the opening (с); $1/2$ opening (д); one opening (е); two opening (ф); г – ж – dependence of the field phase on the transverse coordinate x/λ at the same distances

Таким чином, у ближній зоні апертурних антенних решіток з розкритвом квадратної форми з відстанями між випромінювачами, які не перевищують половину довжини хвилі, як і в безперервних апертурних антенах з таким же розкритвом, утворюється хвильова трубка, у якій середні амплітуди й фази

хвилі, що біжить, постійні в процесі поширення. Ця хвильова трубка звичайно називається прожекторним променем і хвиля в прожекторному промені являє собою слабо неоднорідну локально плоску електромагнітну хвилю, що біжить.

При збільшенні відстані між випромінювачами більше $0,5\lambda$ картина розподілу електромагнітного поля в просторі в ближній і проміжній зонах змінюється якісно. На Рис. 3 а – j представлені розрахунки амплітуди й фази електричного поля для антенної решітки із квадратним розкритом з розмірами 100×100 довжин хвиль і відстанню між випромінювачами $d = 0,9$ довжини хвилі. Видно з рисунка, що загалом картина просторового розподілу поля схожа на попередню: в напрямку нормалі до розкриття амплітуда поля змінюється по осцилюючій закономірності (Рис. 3а) і хвильова трубка (прожекторний промінь) також утворюється (Рис. 3 с - j). Однак з'явилися й істотні відмінності. Насамперед, змінився характер поведінки поля безпосередньо поблизу розкриття антенної решітки (Рис. 3b): середня амплітуда поля у всьому прожекторному промені зменшилось від $0,4E_0$ до $0,125E_0$; поздовжні градієнти поля $\Delta E/E_{\text{сеп}}$ на відстанях, менших $0,1L$, збільшилися до 1.6, а на відстанях більших L/λ , зменшилися до 0,05; глобальний максимум амплітуди поля поменшав до $0,225E_0$, а глобальний мінімум – до $0,075E_0$; збільшилися також і поперечні градієнти амплітуди й фази поля (Рис. 3 с - j).

При подальшому збільшенні відстані між випромінювачами ці ефекти підсилюються аж до появи нових якісних явищ. На Рис. 4 наведені розрахунки просторового розподілу амплітуди й фази електричного поля в ближній і проміжній зонах розрідженої квадратної антенної решітки з тим же розкритом 100×100 довжин хвиль при відстані між випромінювачами, рівній $1,1$ довжини хвилі. Нагадаємо, що в такій решітці значно зменшується коефіцієнт підсилення через появу в діаграмі напрямленості дифракційних пелюсток першого порядку в напрямках, близьких до $\pm 90^\circ$.

На Рис. 4 а, b видний новий прояв у формуванні прожекторного променя в ближній і проміжній зонах розріджених антенних решіток – двокаскадний розподіл амплітуди ближнього поля. Дійсно, з Рис. 4 видно, що на відстані, меншій $0,25L$, досліджувана антена в самій ближній зоні формує локальний прожекторний промінь із середньою амплітудою $E_{\text{сеп}} = 0,08E_0$ й протяжністю до $R_1 = 0,25L$. Далі зі збільшенням відстані z/λ всього на $0,1L$ амплітуда поля швидко зменшується по слабоосцилюючій залежності й на більших відстанях формується другий каскад прожекторного променя довжиною аж до відстані половини відстані дальньої зони. Характерно, що сумарна довжина області прожекторного променя така ж, як і в проаналізованих вище випадках $d = 0,5$ і $0,9$ довжини хвилі. Отже, протяжність області прожекторного променя, у якому середня амплітуда електричних і магнітних полів змінюється незначно, визначається електричними розмірами антенної решітки й не залежить від відстані між випромінювачами. Цей висновок підтверджують і розрахунки полів у ближній зоні антенних решіток інших зазначених вище електричних розмірів.

Другу якісну відмінність хвильових процесів в ближній зоні розріджених антенних решіток видно з Рис. 4 с – f. Це явище збільшення поперечних градієнтів амплітуди і фази електромагнітного поля в прожекторному промені безпосередньо біля апертури антенної решітки. З рисунка 4с видно, що значно збільшилась не тільки кількість осциляцій, але і їх розмах. В мінімумах амплітуда вектора $\vec{E}$ майже досягає нуля. Протяжність області великих осциляцій поля досягає половини розміру апертури. Таким чином, у випадку необхідності використання електромагнітних полів на малих відстанях від антени (наприклад, для безконтактної передачі електричної енергії мікрохвильовим променем) розріджені антенні решітки використовувати недоцільно.

Третю якісну відмінність, що не має аналога у випадку безперервних апертурних антен – особливість хвильових процесів у ближній зоні розріджених антенних решіток – видно з Рис. 4d – поява локальних сплесків амплітуди електричного й магнітного полів поза прожекторним променем. З Рис. 4 видно, що цей сплеск амплітуди поля локалізується на межі першого й другого каскаду прожекторного променя розрідженої антенної решітки й амплітуда його досягає $0,25E_0$, тобто в чотири рази менша середньої амплітуди поля поблизу розкриття антени й приблизно в три рази більша середньої амплітуди поля в другому каскаді прожекторного променя розрідженої антенної решітки.

З результатів розрахунків видно також, що відстань між випромінювачами не впливає на ширину області прожекторного променя. Цей висновок справедливий і для розріджених антенних решіток.

Відзначимо, що розроблене математичне забезпечення дозволяє розраховувати просторовий розподіл електричного й магнітного полів на кінцевих відстанях від плоских однорідних і неоднорідних антенних решіток реальних слабконаправлених випромінювачів у декартових і сферичних системах координат.

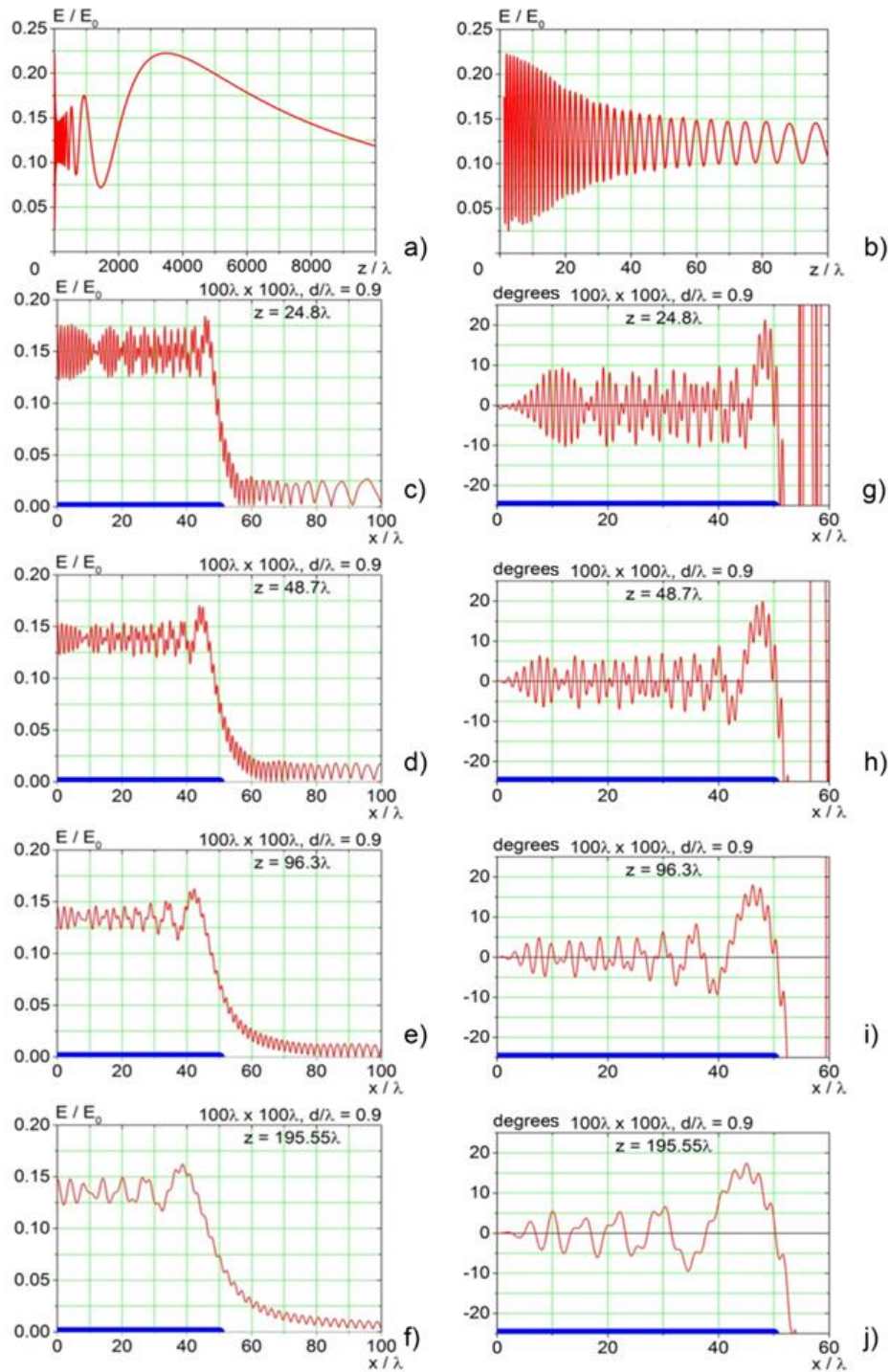


Рис. 3. Залежність амплітуди й фази електричного поля квадратної решітки розміром $100\lambda \times 100\lambda$ від відстані при $d=0,9\lambda$: а – до відстані половини відстані дальньої зони у напрямку нормалі до розкриття ; у напрямку нормалі до відстані половини відстані дальньої зони; б – до відстані, рівній розміру розкриття; с-ф - залежність амплітуди поля від поперечної координати x/λ на відстанях $1/4$ розкриття (с); $1/2$ розкриття (д); одного розкриття (е); двох розкриттів (ф); г – ж – залежність фази поля від поперечної координати x/λ при тих же відстанях

Fig. 3. Dependence of the amplitude and phase of the electric field of a square array of size $100\lambda \times 100\lambda$ on the distance at $d=0.9\lambda$: а – to a distance of half the distance of the far zone in the direction normal to the opening; in the direction of the normal to a distance of half the distance of the far zone; б – to a distance equal to the opening size; с-ф - dependence of the field amplitude on the transverse coordinate x/λ at distances of $1/4$ of the opening (с); $1/2$ opening (д); one opening (е); two opening (ф); г – ж is the dependence of the field phase on the transverse coordinate x/λ at the same distances

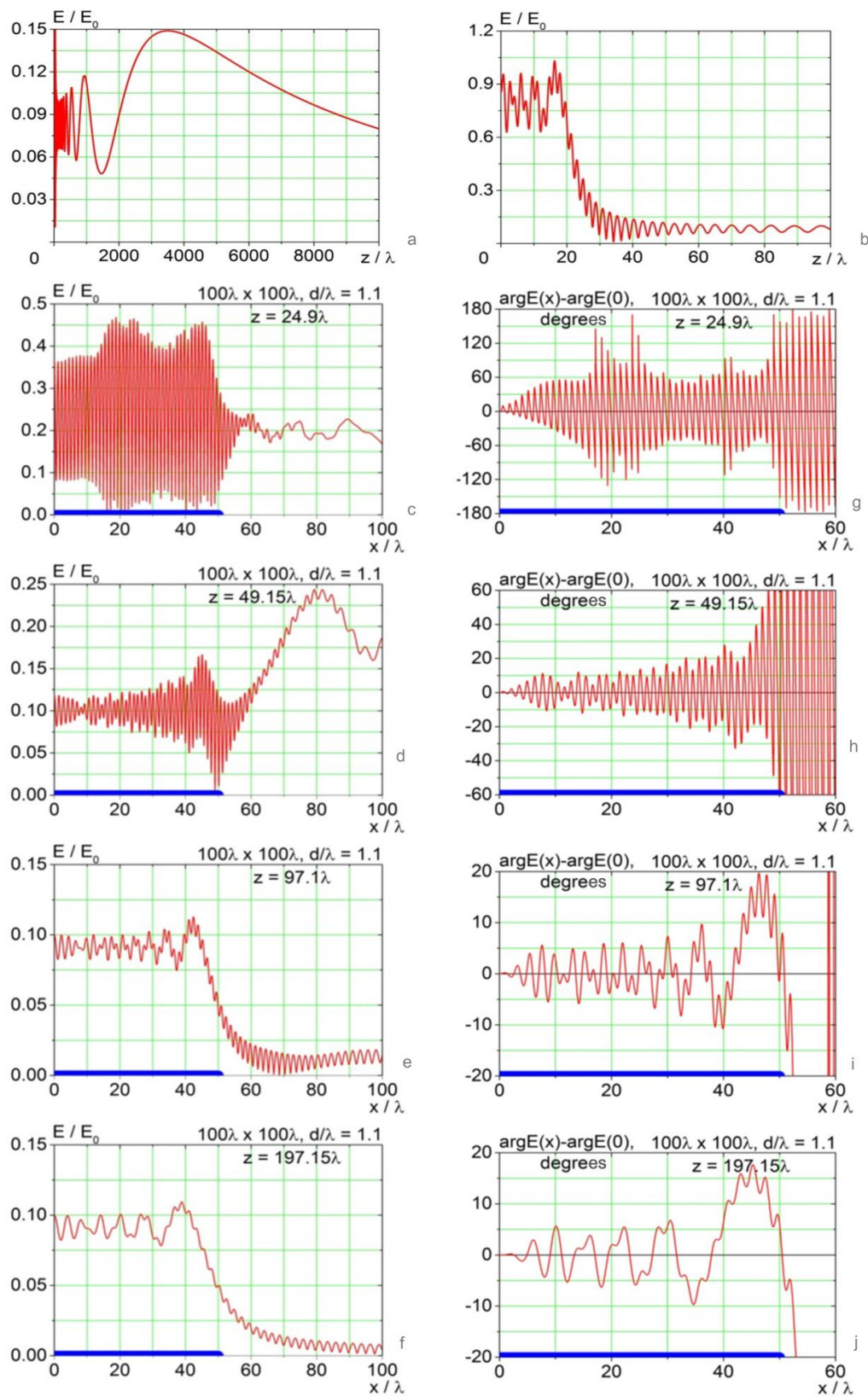


Рис. 4. Залежність амплітуди і фази електричного поля квадратної решітки розміром $100\lambda \times 100\lambda$ від відстані при $d=1,1\lambda$

Fig. 4. Dependence of the amplitude and phase of the electric field of a square array of size $100\lambda \times 100\lambda$ on the distance at $d=1,1\lambda$

ВИСНОВКИ

1. На підставі розв'язку зовнішньої векторної задачі електродинаміки про випромінювання антенних решіток слабконаправлених випромінювачів в ближній, проміжній і дальній зонах розроблене математичне забезпечення розрахунків просторового розподілу електричних і магнітних полів на кінцевій відстані від апертурних антенних решіток. На електричні розміри розкрива, число випромінювачів і відстань між ними не накладається ніяких обмежень. Показано, що у випадку однорідних решіток з розкритом квадратної форми прожекторний промінь формується при розмірах розкрива, більших $1,5 \div 2$ довжини хвилі. Прожекторний промінь являє собою слабо неоднорідну локально плоску електромагнітну хвилю, середня амплітуда якої не змінюється в процесі поширення до відстані половини відстані дальньої зони, тобто до $R = L^2/\lambda$.

2. Показано, що просторовий розподіл полів у ближній і проміжній зонах спостереження антенних решіток суттєво залежить від відстані між випромінювачами. При відстанях, менших або рівних половині довжини робочої хвилі, розподіл поля такий же, як і поблизу безперервних апертурних антен. При збільшенні відстані між випромінювачами зростають осциляції амплітуди й фази електричних і магнітних полів у прожекторному промені.

3. При збільшенні відстані між випромінювачами більше однієї довжини хвилі, коли в діаграмі напрямленості антенної решітки крім головної пелюстки формуються дифракційні пелюстки, у розподілі поля поблизу розкрива дискретної антени з'являються аномалії, що не мають аналогів у безперервних апертурних антенах:

- прожекторний промінь формується у вигляді двох каскадів; перший безпосередньо поблизу розкрива решітки великої амплітуди й довжиною до 0,2 розміру сторони розкрива; другий значно меншої амплітуди довжиною до половини відстані дальньої зони;

- безпосередньо біля антени і на відстанях до половини розміру її апертури спостерігається збільшення і кількості, і величини осциляцій амплітуди поля, причому в мінімумах амплітуда поля майже досягає нуля;

- поза прожекторним променем формуються локальні області зі збільшеною амплітудою хвилі, розташовані на відстані близько половини розміру розкрива й зміщені від осі прожекторного променя на 0,8 розміру розкрива, в яких амплітуда поля в чотири рази менша амплітуди поля в середині розкрива й приблизно в 3 рази більша середньої амплітуди поля в другому каскаді прожекторного променя.

4. Протяжність і ширина області прожекторного променя визначається електричними розмірами розкрива антени і не залежить від відстані між випромінювачами.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Овсяннікова О. Є. Електромагнітні поля в ближній зоні апертурних антен. Дис... кандидата фізико-математичних наук. Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна. 2019. -183 с.
2. Gorobets N. N., Ovsyannikova E. E. Electromagnetic fields and waves near aperture antennas of large electrical sizes // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. Issue 12. P. 1041-1050. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v75.i12.10](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i12.10)
3. WEIMIN WANG, HUAQIANG GAO, YONGLE WU, YUANAN LIU. Impact on focal parameters for near-field-focused aperture antennas. Journal of Numerical Modelling. 2018; e2510. DOI:<https://doi.org/10.1002/jnm.2510>
4. Овсяніков В. В., Горобець М. М., Герасимов В. В. Дослідження точності визначення якості речовин радіохвильовими методами. Radio Physics and Radio Astronomy. Vol. 28, No.3, 2023. pp. 234 – 242 DOI:<https://doi.org/10.15407/rpra28.03.234>
5. Горобець М. М., Булгакова Г.О. Характеристики напрямленості розріджених антенних решіток. // Вісник Харківськ. нац. ун-ту імені В.Н. Каразіна. №834, Серія «Радіофізика та електроніка», 2008, Вип.13, с.89-94

REFERENCES

1. Ovsyannikova O. E. Electromagnetic fields in the near zone of aperture antennas. Dis.... candidate of physical and mathematical sciences. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University. 2019. -183 p.
2. Gorobets N. N., Ovsyannikova E. E. Electromagnetic fields and waves near aperture antennas of large electrical sizes // Telecommunications and Radio Engineering. 2016. Vol. 75. Issue 12. P. 1041-1050. DOI: [10.1615/TelecomRadEng.v75.i12.10](https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i12.10)

3. WEIMIN WANG, HUAQIANG GAO, YONGLE WU, YUANAN LIU. Impact on focal parameters for near-field-focused aperture antennas. Journal of Numerical Modelling. 2018; e2510. <https://doi.org/10.1002/jnm.2510>
4. Ovsyanikov V. V., Gorobets M. M., Gerasimov V. V. Investigation of the accuracy of the measurement of speech bones using radio-frequency methods. Radio Physics and Radio Astronomy. Vol. 28, No.3, 2023. pp. 234 – 242 DOI:<https://doi.org/10.15407/rpra28.03.234>
5. Gorobets M. M., Bulgakova G. O. Characteristics of directivity of sparse antenna arrays. // Bulletin of Kharkiv V. N. Karazin Kharkiv National University. No. 834, Series “Radiophysics and Electronics”, 2008, V.13, p.89-94

Стаття надійшла до редакції: 25 жовтня 2024 р.
Рекомендовано до друку: 03 грудня 2024 р.

ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE NEAR ZONE OF APERTURE ANTENNA GRIDS WITH A SQUARE-FORM OPENING

M.M. Horobets, A.S. Lebedev, O.M. Horobets

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance. The paper investigates wave phenomena in the near and intermediate zones of aperture equidistant flat antenna arrays with a square aperture with arbitrary electrical dimensions of the aperture and distances between the radiators.

Purpose - theoretical study of the behavior of the amplitude and phase of electromagnetic waves in the near and intermediate zones of aperture discrete antennas.

Materials and methods. The problem is solved by the method of superposition in electrodynamics. In the developed mathematical support, no restrictions are imposed on the shape of the opening, the geometric and electrical dimensions of the antenna, the amplitude and phase distributions of the field sources in the opening.

Results. It is shown that at distances between emitters not greater than half the working wavelength, the spatial distribution of the field in the near zone of aperture antenna arrays is close to the field distribution in the near zone of continuous aperture antennas of the optical and acoustic type. Aperture sizes that do not exceed two wavelengths, field amplitudes in the near observation zone is decrease uniformly as the distance increased. At medium ($L \approx 5-10$ wavelengths) and large electrical dimensions of the opening in the near zone of the antenna, a spotlight beam is formed, which is a weakly inhomogeneous locally plane traveling wave, the average amplitude of which during propagation is constant up to a distance equal to half the distance of the far zone, i.e. to L^2/λ .

When the distance between the emitters is increased by more than one wavelength, the spatial distribution of the field takes on a cascade shape. In the first cascade with a length of up to 0.25 of the opening size, the average field amplitude is close to 0.8 of the field amplitude in the middle of the opening. The second cascade with an average field amplitude of about 0.08 is formed at distances from 0.3L to half the distance of the far zone. In sparsed antenna arrays, local bursts of field amplitude up to 0.25 are formed in the near zone outside the spotlight beam. They are located at one distance of the size of the opening and are offset from the axis of the spotlight beam by 0.8 of the size of the opening L.

Conclusions. The spatial distribution of electromagnetic fields near aperture antenna arrays of small electrical dimensions, which is typical for electric or magnetic field sensors in radio measuring equipment, is characterized by uniformly decreasing amplitudes of electric and magnetic fields in both the longitudinal and transverse directions. With large aperture sizes, which is typical for highly directional antennas, this distribution is characterized by the formation of a spotlight beam, which is a weakly inhomogeneous locally plane wave, the average amplitude of which during propagation is constant up to a distance equal to half the distance of the far zone. At distances between emitters greater than one wavelength, the spotlight beam has a cascade shape.

KEY WORDS: electromagnetic fields and waves, antenna arrays, near zone, spotlight beam.

The article was received by the editors: October 25 2024

The article is recommended for printing: December 03 2024