

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Радіофізичний факультет

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

прикладної електродинаміки

доктор фіз.-мат.наук, професор

_____ М.М.Горобець

«__» _____ 2023р.

Кваліфікаційна робота магістра

На тему: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В БЛИЖНІЙ
ЗОНІ АНТЕННИХ РЕШТОК ІЗОТРОПНИХ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

Керівник роботи:

доктор. фіз.-мат. наук проф.

Горобець М.М.

Виконав: студент II курсу

магістратури, групи РР-67

спеціальності

105 – прикладна фізика та наноматеріали

Лянник П.М.

Рецензент:

доктор фіз.- мат.наук проф.

Шульга С.М.

Харків – 2023 рік

УДК 621.396.67

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить 34 рис., 64 стор., 10 бібліографічних посилань.

Розроблено математичне забезпечення - розв'язано векторну зовнішню задачу електродинаміки та отримано в аналітичному вигляді розрахункові формули, розроблено алгоритми та комп'ютерні програми для розрахунків амплітудних, фазових і поляризаційних характеристик електромагнітних полів у ближній, проміжній і дальній зонах основних типів лінійних та апертурних антенних решіток слабкоспрямованих випромінювачів. Розрахунковим шляхом досліджено закономірності формування просторового розподілу амплітуди та фази електромагнітного поля поблизу лінійних і квазілінійних антенних решіток та апертурних дискретних антен з розкриттям круглої, квадратної та прямокутної форми. Вивчено поведінку поля в прожекторному промені апертурних антен.

ABSTRACT

The diploma project contains 34 fig., 64 p., 10 bibliographic references.

Mathematical support is developed - vector external problem of electrodynamics is solved and calculation formulas are obtained in analytical form, algorithms and computer programs for calculations of amplitude, phase and polarisation characteristics of electromagnetic fields in the near, intermediate and far zones of the main types of linear and aperture antenna arrays of weakly directed radiators are developed. By calculating and investigating the regularities of the spatial distribution of the amplitude and phase of the electromagnetic field in the vicinity of linear and quasi-linear antenna arrays and aperture discrete antennas with round, square and rectangular openings. The behaviour of the field in the searchlight beam of aperture antennas is studied.

ЗМІСТ

Зміст	4
1 Вступ.....	5
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	7
3.ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ	9
4. ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ ЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК.....	21
5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ І ХВИЛІ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ КВАЗІЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК.....	33
6. ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	66

1 ВСТУП

Антенні решітки є важливими елементами радіоелектронних систем і знаходять широке та різноманітне застосування в різних галузях радіоелектроніки. Це пояснюється, передусім, зручною конструкцією антени з круговою апертурою, її високими експлуатаційними характеристиками, високими характеристиками напрямленості та низьким рівнем бічних лепесток у всьому просторі спостереження (а не лише в головних площинах спостереження).

Для кращого розуміння фізики явищ, що відбуваються у зв'язку з цим, особливо важливою для практики є обставина, що кільцеву решітку випромінювачів в кожній площині спостереження зазвичай моделюють як еквівалентну лінійну решітку. Легко переконатися в тому, що така еквівалентна лінійна решітка у будь-якій площині спостереження: а) не є рівномірною за відстанями; б) має амплітудний розподіл джерел поля, що спадає до країв навіть у випадку рівномірного збудження кільцевих решіток; в) фазовий розподіл поля на решітці постійний.

Всі ці особливості формування просторового розподілу випромінювання кільцевих решіток призводять до зменшення рівня бічних пелюсток діаграми напрямленості.

На даний час електромагнітні поля та хвилі на кінцевій відстані від розкриву кільцевих дискретних і неперервних антен та їх просторовий розподіл в ближній та проміжній зонах антени в достатній для практики мірі не досліджено. Зокрема, показано, що при розмірах розкриву будь-якої форми, які не перевищують 1-1,5 довжини хвилі, амплітуди векторів напруженості електричного та магнітного полів в ближній зоні рівномірно спадають зі збільшенням відстані від випромінювача. Було показано, що

неперервні апертурні антени з розкритом круглої форми при діаметрах, більших 1-1,5 довжини хвилі, в ближній зоні формують так званий "прожекторний промінь". Він являє собою сукупність паралельних променів у напрямку головного максимуму діаграми направленості антени, яка описується плоскою локальною слабо неоднорідною біжучою хвилею. Протяжність та конфігурація прожекторного променя в просторі визначаються передусім електричними розмірами та формою випромінювального розкриття антени, а також амплітудним і фазовим розподілом джерел випромінювання в розкритті. В поперечних перетинах форма прожекторного променя поблизу антени відповідає формі та розмірам розкриття.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є теоретичне дослідження фізичних закономірностей формування амплітудних та фазових характеристик електромагнітних полів лінійних антенних решіток ізотропних випромінювачів в їх ближній та проміжній зонах спостереження при зміні розмірів, відстані між випромінювачами та довжини хвилі в широких межах.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для розв'язання поставленої задачі, яка полягає у виявленні загальних закономірностей формування просторового розподілу електромагнітного поля в ближній та проміжній зонах спостереження лінійних антенних решіток, спростимо задачу та редуційно зведемо її до найпростішої фізико-математичної моделі.

Згідно з принципом суперпозиції, будемо визначати амплітуду та фазу векторів напруженості електричного та магнітного полів в кожній точці спостереження як суму комплексних амплітуд векторних полів кожного випромінювача в відповідній точці спостереження:

$$\vec{E}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \vec{E}_n(\vec{R}); \vec{H}(\vec{R}) = \sum_{n=-N}^N \vec{H}_n(\vec{R})$$

При цьому врахуємо стан поляризації випромінювання кожного елемента решітки досліджуваної антени. Найпростіше це зробити, розкладаючи вектори електричного та магнітного полів кожного випромінювача решітки в кожній точці спостереження в ортогональній тривимірній лінійно поляризованій базі. Таким чином, будуть адекватно враховані повздовжні компоненти електричного та магнітного полів в довільній точці спостереження в ближній та проміжній зонах антени. Варто відзначити, що в випадку синфазних антенних решіток у напрямку нормалі до розкриву антени продольні компоненти електричного та магнітного полів рівні нулю при будь-якій відстані точки спостереження від розкриву.

Для подальшого спрощення задачі і забезпечення її загальності, розглядаємо випромінювач - елемент решітки - як точковий ізотропний випромінювач, електричні та магнітні поля якого описуються однорідною сферичною хвилею. Поляризацію цього випромінювання розглядаємо для

визначеності як лінійну вертикальну. Взаємовплив випромінювачів у решітці ми вважаємо занадто малим. Амплітудний та фазовий розподіл поля в розкриві антени вважаємо сталим.

За таких припущень результати обчислень амплітуд, фаз та стану поляризації електричного та магнітного полів в точках спостереження на кінцевих відстанях від антени дозволять вивчити закономірності формування прожекторного променя, його протяжність та конфігурацію залежно від електричних розмірів розкриву, кількості випромінювачів та відстані між ними.

3. ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Розрахунки були проведені за наступними припущеннями, що значно спрощують фізико-математичну модель ближньої зони антенних решіток з великими електричними розмірами:

- Ефекти ближньої зони кожного випромінювача - елемента антенної решітки не враховуються. Електричне та магнітне поля вважаються поперечними та синфазними, а відношення їхніх амплітуд, яке має фізичний зміст хвильового опору простору в ближній зоні, вважається постійним.
- Кожен випромінювач - елемент решітки вважається ізотропним.
- Поляризація випромінювання кожного випромінювача вважається лінійною і для визначеності приймається, що вектор напруженості електричного поля лежить в площині XOZ.

Для вивчення динаміки формування прожекторного променя при зміні кількості випромінювачів, відстані між ними та їх електричних розмірів розраховувалися амплітуди та фази напруженості електричного поля в напрямку нормалі до апертури та на поперечних площинах для варіантів діаметрів однорідних кільцевих антенних решіток, які приблизно дорівнюють 2, 5, 10, 25, 50, 100 і 200 довжин хвилі.

Решітки моделювалися таким чином, щоб відстані від кожного випромінювача до найближчого до нього випромінювача були однаковими.

Зокрема, встановлювалися відстані $d = 0,5$ довжини хвилі (для класичних фазованих антенних решіток), $d = 0,9$ довжини хвилі (для нефазованих розріджених антенних решіток, які забезпечують глобальний максимум досяжного коефіцієнта направленої дії та коефіцієнта підсилення) та $d = 1,1$ довжини хвилі (коли виникає ефект "осліплення" нефазованих антенних

решіток), як і у випадку кільцевих антенних решіток з малими електричними розмірами.

Результати розрахунків показали, що при малих електричних розмірах апертури глобальний максимум коефіцієнта направленої дії виникає при менших відстанях між випромінювачами, а саме $d = 0,72\lambda$, і глобальний мінімум - при більших відстанях, а саме $d = 1,23\lambda$. Також варто відзначити, що через чітку визначеність геометричної конфігурації антенних решіток та одночасно однозначно задану відстань між випромінювачами не вдається забезпечити однакові значення діаметра випромінювального розкриву антени при різних відстанях між випромінювачами. Тому вибиралися найближчі можливі значення. Наприклад, для діаметра апертури 100 довжин хвилі при $d = 0,9\lambda$ найближчий діаметр розкриву виявився рівним 100,8 довжини хвилі, а при $d = 1,1\lambda$ - рівним 101,2 довжини хвилі. Кількість випромінювачів в решітках відповідно змінювалася. Наприклад, при тому ж діаметрі апертури 100 довжин хвилі та $d = 0,5\lambda$ кількість випромінювачів $N = 30301$, при $d = 0,9\lambda$ - $N = 9577$, і при $d = 1,1\lambda$ - $N = 6487$. У першому випадку всі випромінювачі розташовувалися на 100 колах, у другому - на 56, а в третьому - на 46.

З результатів розрахунків також виявилось, що довжина області осцилювань та кількість осциляцій амплітуди поля в напрямку нормалі до апертури визначається діаметром апертури D/λ і не залежить від відстані між випромінювачами d/λ , кількості випромінювачів та амплітудного розподілу джерел поля в апертурі. При цьому кількість осциляцій поля в ближній зоні дорівнює кількості довжин хвилі, які вкладаються на діаметрі апертури антени.

Принципові відмінності

Однією з ключових характеристик поля в прожекторному промені антенних решіток з круглим розкритвом є надзвичайно велика глибина

осциляцій, що вказує на високі продольні градієнти амплітуди векторів поля. Ця властивість відрізняє антенні решітки з круглою апертурою від інших варіантів форм розкриву, таких як лінійні, квазілінійні, прямокутні та квадратні. Кількість інтенсивних осциляцій поля значно перевищує ті, які можна спостерігати в інших антенних решітках із різними формами апертури.

Якісна характеристика поля

Поле в ближній зоні фазованих антенних решіток з круглим розкритвом рис.3.1 і 3.2 залишається якісно схожим при збільшенні діаметра антени, але з'являються нові ефекти, які варто враховувати:

- Збільшення діаметра апертури призводить до більшої глибини осциляцій векторів поля, що може вплинути на характер просторового розподілу електромагнітного випромінювання в ближній зоні антени.
- Величина повздовжних градієнтів амплітуди поля стає більшою, особливо при розгляді ближньої зони.
- Нові ефекти можуть виникнути через особливості круглого розкритву, які відрізняються від інших форм апертури.

Вивчення цих особливостей дозволяє краще розуміти і використовувати антенні решітки з круглими апертурами в різних радіоелектронних застосуваннях.

100 кругів з 30301 джерелами сферичних хвиль,
 $d/\lambda = 0.5$, $D/\lambda = 100$, та $R/\lambda = 20000$.

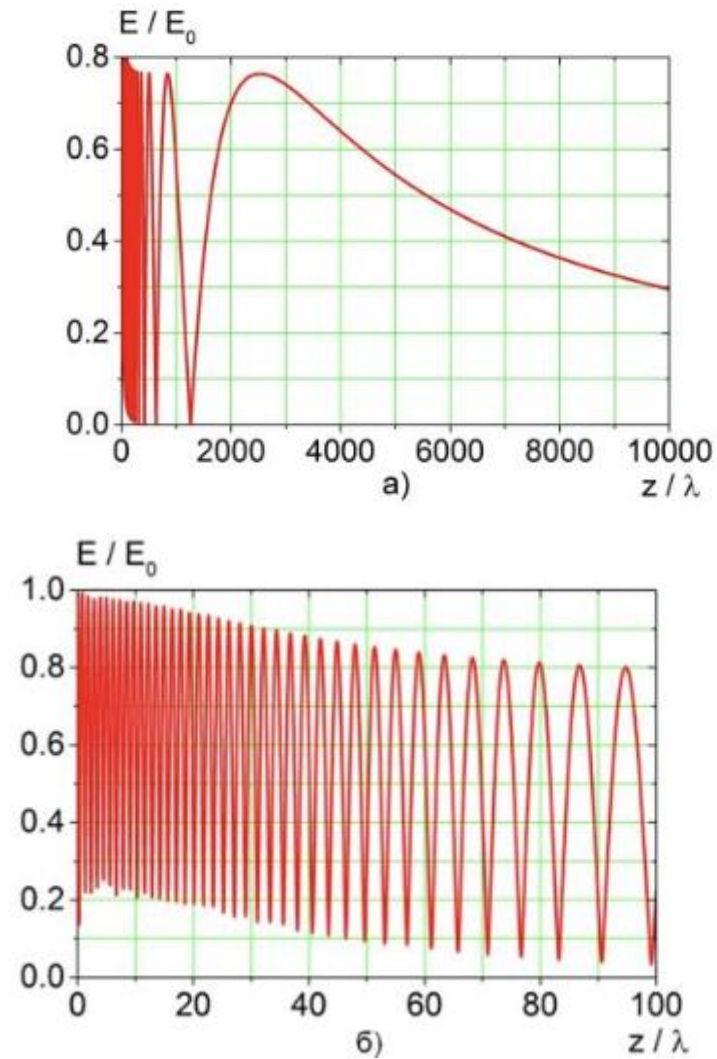


Рис. 3.1. Залежність амплітуди поля фазованої решітки ($d = 0.5\lambda$) з круглим розкритвом діаметром 100λ від відстані в напрямку, перпендикулярному до розкритву: а) - до відстані, рівної половині відстані до дальньої зони; б) - до відстані, рівної розміру розкритву 100 кіл з 30301 джерелами сферичних хвиль.

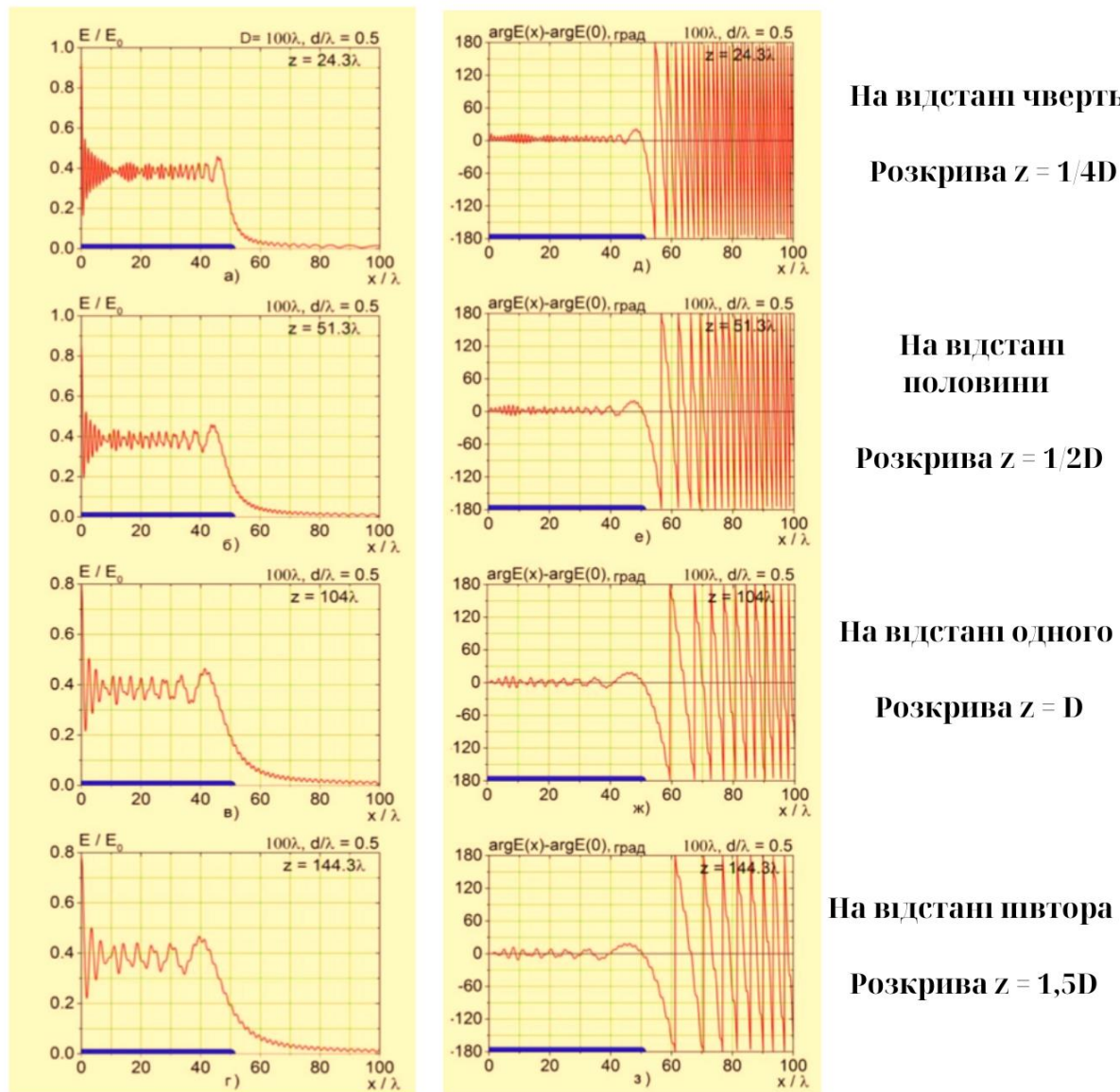


Рис. 3.2. Залежність амплітуди та фази поля фазованої решітки ($d = 0.5\lambda$) з круглим розкривом 100λ від поперечної координати x при різних відстанях z від розкриву антени.

- Збільшення діаметра антени призводить до зменшення амплітуди поля у його мінімумах. Отже, в ближній зоні радіолокаційних і телекомунікаційних радіоелектронних систем з багатокільцевими антенними решітками формуються "мертві зони", які потрібно враховувати на практиці.
- Протяжність прожекторного променя і області осциляцій амплітуди і потужності електромагнітного поля збільшується зі збільшенням діаметра антенних решіток приблизно за квадратичним законом.

Розглянемо подальші особливості розподілу амплітуди і фази електромагнітних полів у просторі в ближній зоні рівновіддалених синфазних багатокільцевих антенних решіток ізотропних випромінювачів при зміні їх діаметра і відстані між випромінювачами. Розрахунки, подібні до тих, що представлені вище, були проведені для діаметрів розкриву решіток від 2 до 200 довжин хвиль при зміні відстані між найближчими випромінювачами від 0,5 до 2,0 довжин хвиль. На Рис. 3.3 і 3.4 представлені розрахунки розподілу амплітуди і фази електричного поля в ближній зоні найбільш важливого для практики випадку розрідженої нефазованої рівновіддаленої антенної решітки з максимально досяжним коефіцієнтом направленої дії при відстані між випромінювачами $d=0,9\lambda$. На Рис. 3.5 і 3.6 представлені такі ж розрахунки для розрідженої решітки при $d=1,1\lambda$. У цьому випадку КНД антенної решітки зменшується через виникнення в межах видимих кутів дифракційних пелюстків діаграми направленості до мінімального можливого значення.

Як було відзначено вище, в обраних варіантах розрахунку діаметр розкриву було вибрано максимально близьким до вказаного $D=100\lambda$. З результатів розрахунків, зокрема, на Рис. 3.3-3.6 видно, що в залежності від відстані від антени до поточних точок спостереження в ближній зоні амплітуда електричного поля змінюється за осцилюючими

закономірностями, подібними до фазованих кільцевих решіток (Рис. 3.1, 3.2) і неперервних апертурних антен з круглим розкритом. При цьому, з віддаленням точки спостереження від розкриття, період осциляцій збільшується. Це пояснюється тим, що в будь-якій точці спостереження в ближній зоні антенної решітки амплітуда поля є сумарним ефектом інтерференції електромагнітних хвиль, які випромінюються кожним елементом решітки. При цьому, з віддаленням точки спостереження від розкриття, період осциляцій збільшується. Розмах осциляцій амплітуди поля в залежності від продольної координати z в напрямку, перпендикулярному до розкриття, тобто продольні градієнти амплітуди поля, в досліджуваних випадках досить великі, близькі до градієнтів поля в ближній зоні неперервних апертурних антен з круглим розкритом. Суттєві відмінності в поведінці поля спостерігаються безпосередньо поблизу розкриття антенної решітки. З Рис. 3.1, 3.3, 3.5 видно, що амплітуда поля поблизу решітки зменшується не лише в мінімумах поля, але і в його максимумах. Розрахунки показали, що близькі до характерних для прожекторного проміння без значущої зміни максимальних рівнів амплітуди поля при збільшенні відстані, відбуваються на відстанях, більших діаметра розкриття. Розподіли амплітуди і фази поля в поперечних перерізах $z = \text{const}$ при зміні відстані між випромінювачами від 0,5 до 0,9 довжини хвилі такі ж, як у прожекторному промені (див. Рис. 3.2, 3.4). Варто відзначити, що подібні залежності мають місце і у випадку лінійних антенних решіток. Розглянемо далі поведінку поля в ближній зоні розрідженої антенної решітки при збільшенні відстані між випромінювачами більше однієї довжини хвилі, коли в діаграмі направленості в області реальних кутів спостереження з'являються перші дифракційні пелюстки. На Рис. 3.5, 3.6 представлені відповідні розрахунки у випадку $1,1d/\lambda$, з яких слідують важливі для практики висновки:

- У розріджених кільцевих антенних решітках потужність електромагнітного поля в ближній зоні концентрується безпосередньо поблизу розкриву антени, так само, як і у випадку лінійних неперервних і дискретних антен, на відміну від неперервних антен з круглим розкриттям, де потужність концентрується на значній відстані від розкриву.
- На малих відстанях від розкриву решітки (не більше $0,25 D/\lambda$), амплітуда поля збільшується майже в 9 разів порівняно з амплітудою поля на випромінювачах.

Це явище "псевдофокусування" електромагнітних полів в ближній зоні кільцевих розріджених антенних решіток може призвести до електричного пробоя антени, перегріву матеріального середовища в деякій локальній області та інших небажаних явищ, тому це повинно враховуватися на практиці. У поперечних площинах на малих відстанях від розкриву поле зміннофазне, а його амплітуда змінюється за нерегулярними осцилюючими закономірностями.

56 кіл с 9577 джерелами сферичної хвилі

$$d\lambda=0,9 \quad D\lambda=100,8 \quad d_3R\lambda=20321.$$

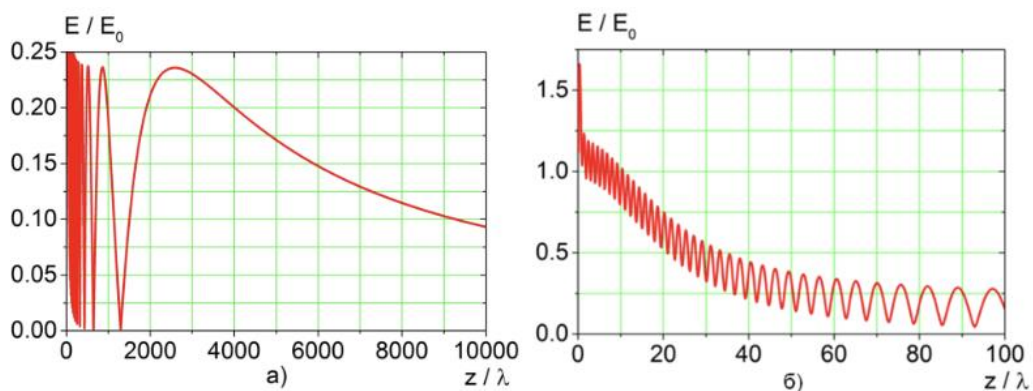
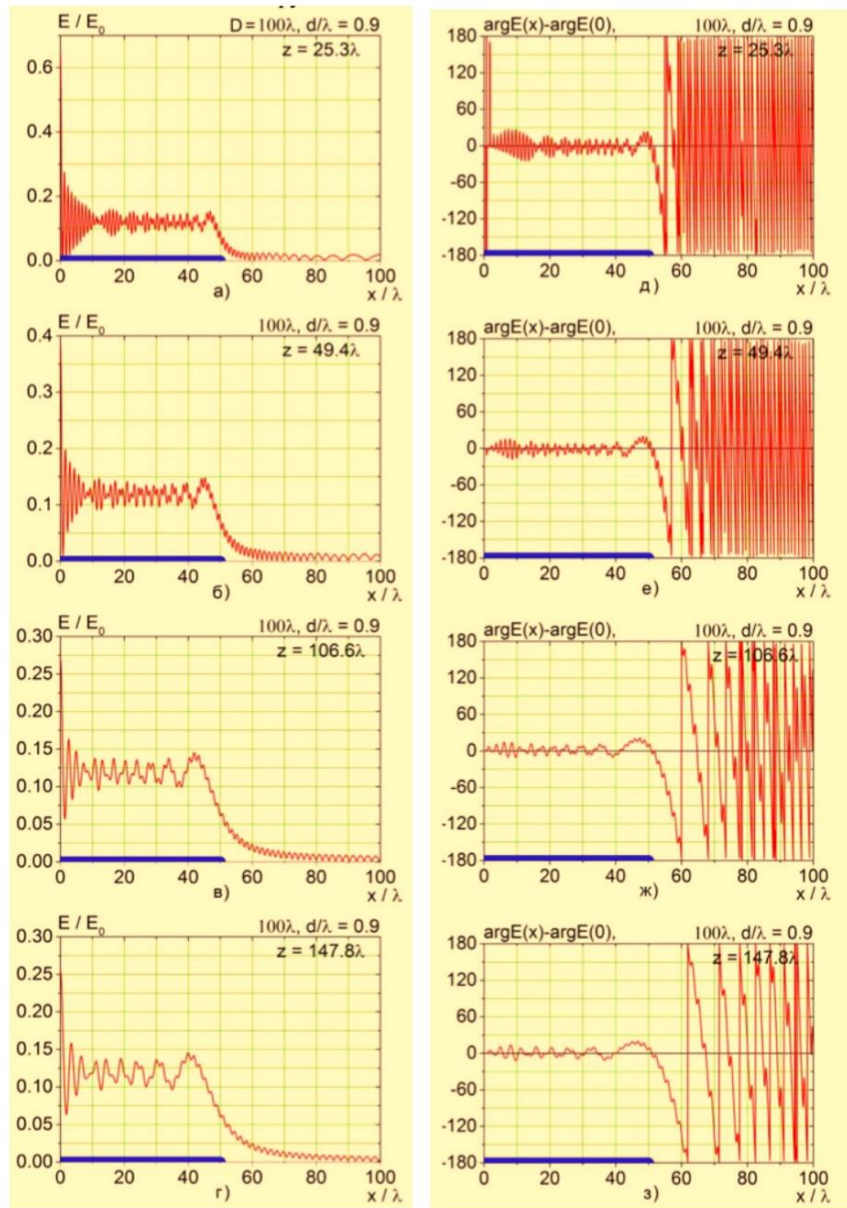


Рис. 3.3. Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0,9\lambda$) з круглим розкриттям діаметром 100λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а) -

до половини відстані дальньої зони; б) - до відстані, що дорівнює розміру розкриву.

56 кіл с 9577 джерелами сферичної хвилі



На відстані чверть

Розкрива $z = 1/4D$

На відстані
половини

Розкрива $z = 1/2D$

На відстані одного

Розкрива $z = D$

На відстані півтора

Розкрива $z = 1.5D$

Рис. 3.4. Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d = 0.9\lambda$) з круглим розкриттям 100λ від поперечної координати x на різних відстанях z від розкриття антени.

46 кіл з 6487 джерелами сферичних хвиль.

$$d\lambda=1.1, D\lambda=101.2, dzR\lambda=20481.$$

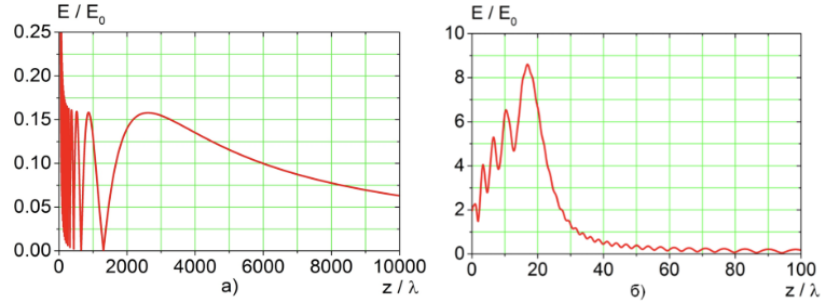
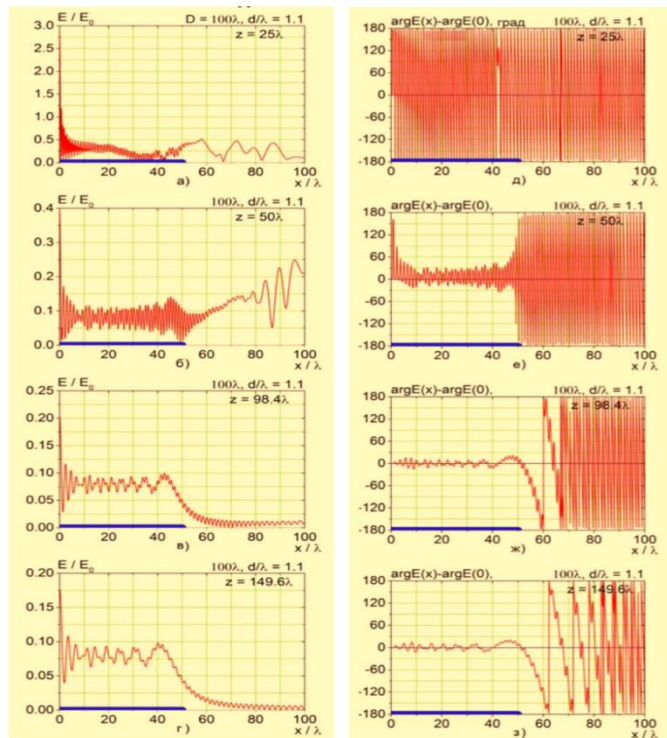


Рис. 3.5. Залежність амплітуди поля решітки ($d = 1.1\lambda$) з круглим розкритом діаметром 100λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а) - до половини відстані дальньої зони; б) - до відстані, що дорівнює розміру розкриття.

46 кіл з 6487 джерелами сферичних хвиль.



На відстані чверть

Розкрива $z = 1/4D$

На відстані половини

Розкрива $z = 1/2D$

На відстані одного

Розкрива $z = D$

На відстані швтора

Розкрива $z = 1,5D$

Рис. 3.6. Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d = 1.1 \lambda$) з круглим розкритом діаметром 100λ від поперечної координати x на різних відстанях z від розкриву антени.

На відстані, рівній приблизно половині діаметра розкриву розрідженої антенної решітки, залежність амплітуди поля від поперечної координати набула регулярного характеру (Рис.6). Проте в поперечному перерізі простору спостереження на цій відстані виникла аномалія - збільшення амплітуди поля за межами кругового циліндра з діаметром, що дорівнює діаметру розкриву багатокільцевої антенної решітки. Очевидно, що це явище пов'язане з появою дифракційних пелюсток у діаграмі направленості дослідженої антени. Фазовий розподіл поля в цьому перерізі, як видно з рис.3.6 осцилює в обмежених границях та в середньому близький до постійного всередині циліндра, а за межами циліндра - змінюється фаза.

На відстанях, приблизно рівних або більших діаметра розкриву розрідженої антенної решітки, просторовий розподіл амплітуди і фази поля в ближній зоні набуває характеру прожекторного променя. Варто зазначити, що такі явища в ближній зоні розріджених багатокільцевих антенних решіток - поява "сліду" інтерференційних пелюсток діаграми направленості в ближній зоні на відстані, яка дорівнює приблизно половині ширини антени і формування близького до плоского фронту хвилі в перерізі, де розташована антена, на відстанях, рівних або більших діаметру антени, мають місце і в розріджених лінійних антенних решітках великих електричних розмірів. При збільшенні відстані між випромінювачами порушується рівномірний характер осциляцій амплітуди поля в ближній зоні антени. Зокрема, в розріджених антенних решітках з параметром $d=1.1\lambda$, по мірі віддалення точки спостереження від розкриву амплітуда поля збільшується, а потім досить швидко зменшується. Також в цьому випадку має місце збільшення амплітуди і потужності поля в областях простору поза прожекторним

променем, що не спостерігається у випадку неперервних антен з круглим розкритом та в апертурних кільцевих антенних решітках з меншими відстанями між випромінювачами.

4. ПОЛЯ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ ЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Моделювання в Матлабі:

- графіків залежності амплітуд векторів напруженості електричного поля лінійних антенних решіток різної довжини від відстані у напрямку нормалі до антени: а) Довжина дорівнює 10 довжин хвиль; б) Довжина дорівнює 50 довжин хвиль; в) Довжина дорівнює 100 довжин хвиль. Відстані між випромінювачами різні $d=0.5\lambda; 0.9\lambda; 1.1\lambda$, та різне також число випромінювачів.
- Залежність амплітуди і фази поля лінійної антенної решітки довжиною 50λ при відстані між випромінювачами а) $d = 0.5\lambda$; б) $d = 0.5\lambda$; в) $d = 1.1\lambda$ від поперечних координат x і y на різних відстанях z_n від розкриття антени.

Розрахункові формули:

$$\vec{E} = \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \vec{E}_n \quad (1)$$

$$E_n = |A_n| \frac{e^{-ikR_n}}{R_n} \quad (2)$$

$$\text{де } A_n=1; R_{n \text{ не пар}} = \sqrt{R_0^2 + (nd)^2}; R_{n \text{ пар}} = \sqrt{R_0^2 + \left[\frac{d}{2}(2n-1)\right]^2}$$

R_0 це відстань від першого випромінювача до точки спостереження по нормалі.

У формулі (2) використовується $R_{n \text{ не пар}}$; $R_{n \text{ пар}}$ для парного або непарного числа випромінювачів.

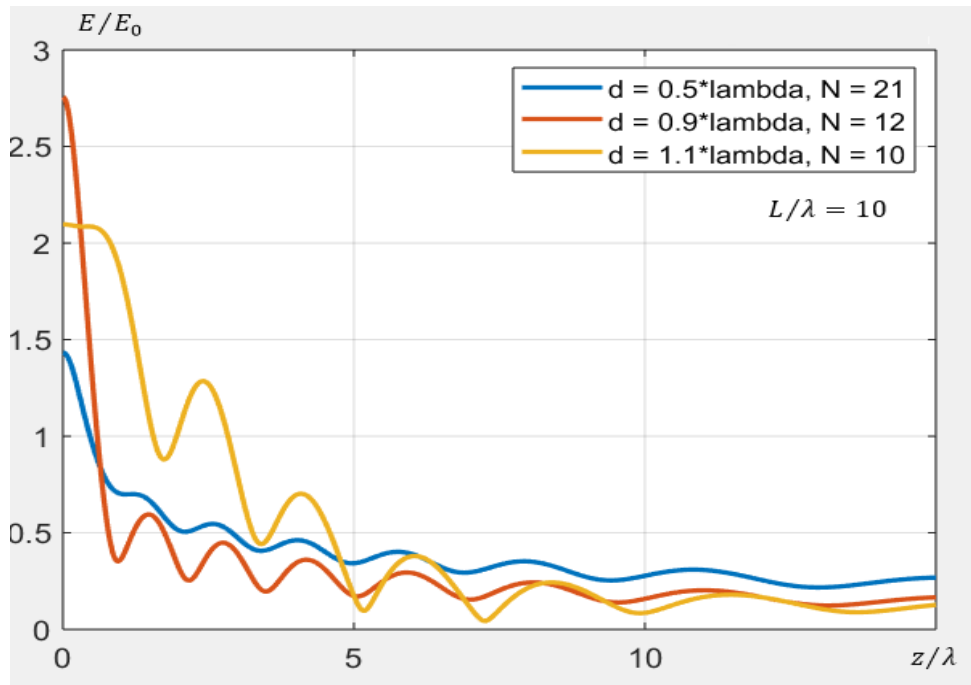


Рис. 4.1 Залежності амплітуд векторів напруженості електричного поля лінійної антенної решітки різної довжини від відстані у напрямку нормалі до антени: а) Довжина дорівнює 10 довжин хвиль

На рис.4.1 представлені залежності відносних амплітуд напруженості електричного поля лінійної антенної решітки довжиною 10 довжин хвиль при зазначених вище відстанях між випромінювачами 0,5; 0,9 та 1,1 довжини хвилі. З зображення можна зробити висновок для практичного застосування за будь-яких розмірів антен і за будь-яких інтервалів між випромінювачами: в лінійній решітці випромінювачів у ближній зоні зі збільшенням відстані амплітуда поля зменшується. Отже, лінійні антени, на відміну від апертурних безперервних і дискретних, прожекторний промінь не формують. Видно, що у наведених на рис. 4.1 варіантах антен на рівномірно спадаючу залежність E/E_0 від z/λ накладається осцилююча залежність, причому період та глибина осциляцій залежать і від електричних розмірів антени, і від відстані між випромінювачами.

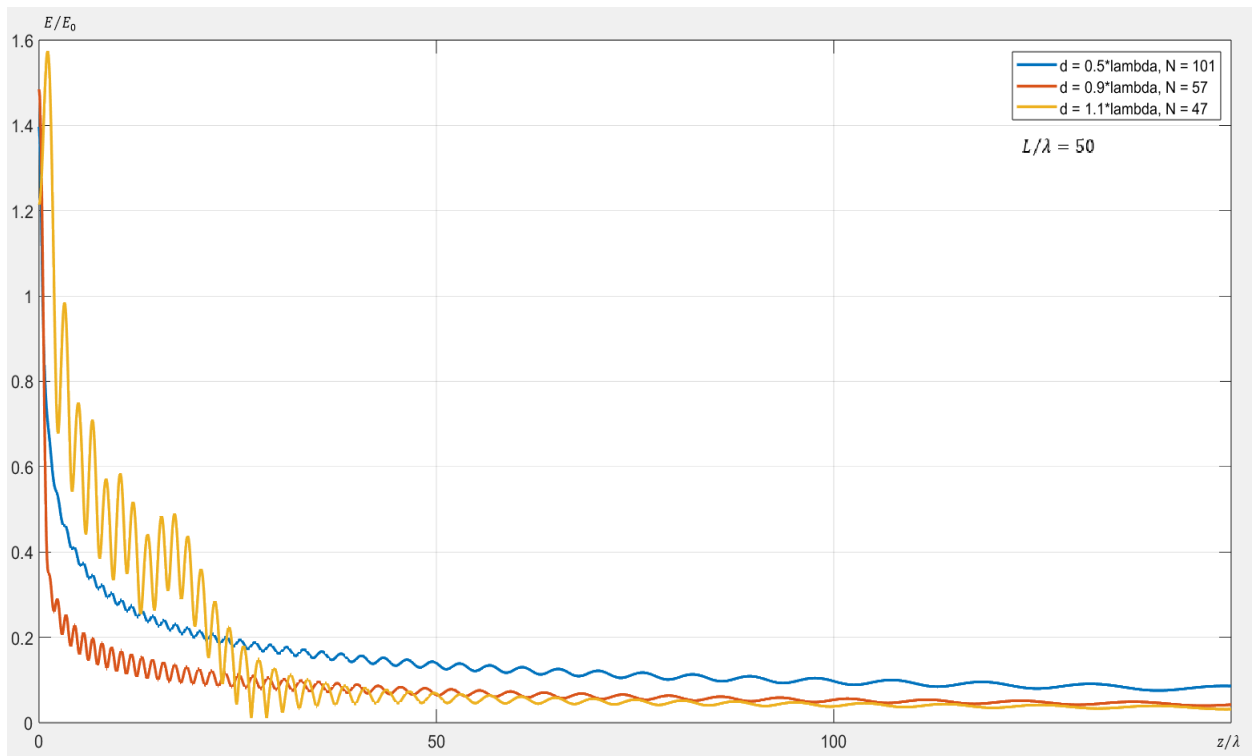


Рис. 4.2 Залежності амплітуд векторів напруженості електричного поля лінійної антенної решітки різної довжини від відстані у напрямку нормалі до антени: б) Довжина дорівнює 50 довжин хвиль

Зазначимо, що осцилюючий характер залежності амплітуди поля від відстані від середини антени до точки спостереження в ближній і проміжній зоні порушується тільки при мінімальних електричних розмірах антени. Показано, що при $N = 2$ досліджувана залежність у напрямку нормалі до антени має рівномірно спадаючий характер при будь-якій відстані між випромінювачами. Але вже при трьох чи чотирьох випромінювачах у цій залежності з'являються осцилюючі доданки, причому мінімумами амплітуди поля тим ближчі до антени, чим менша відстань між випромінювачами у решітках.

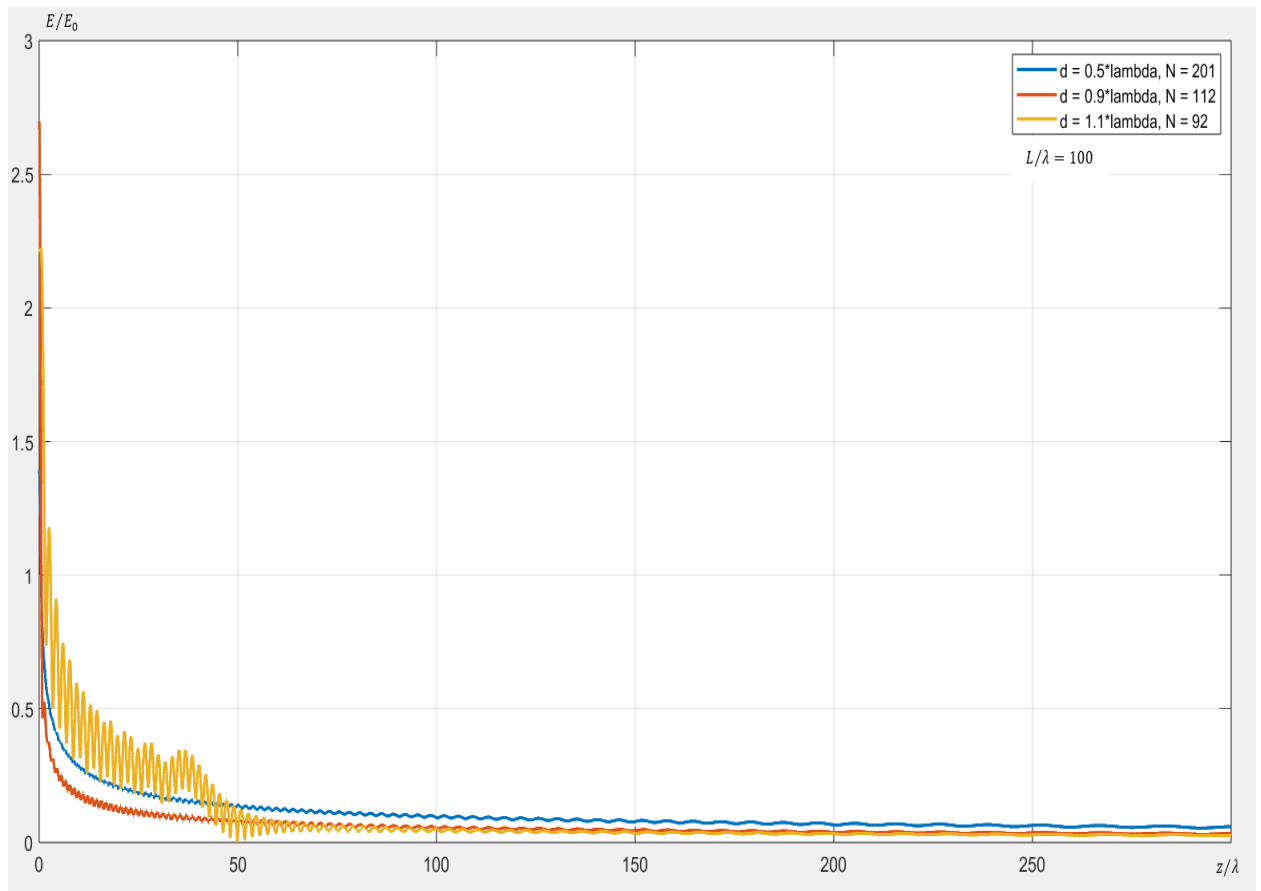


Рис. 4.3 Залежності амплітуд векторів напруженості електричного поля лінійної антенної решітки різної довжини від відстані у напрямку нормалі до антени: б) Довжина дорівнює 100 довжин хвиль

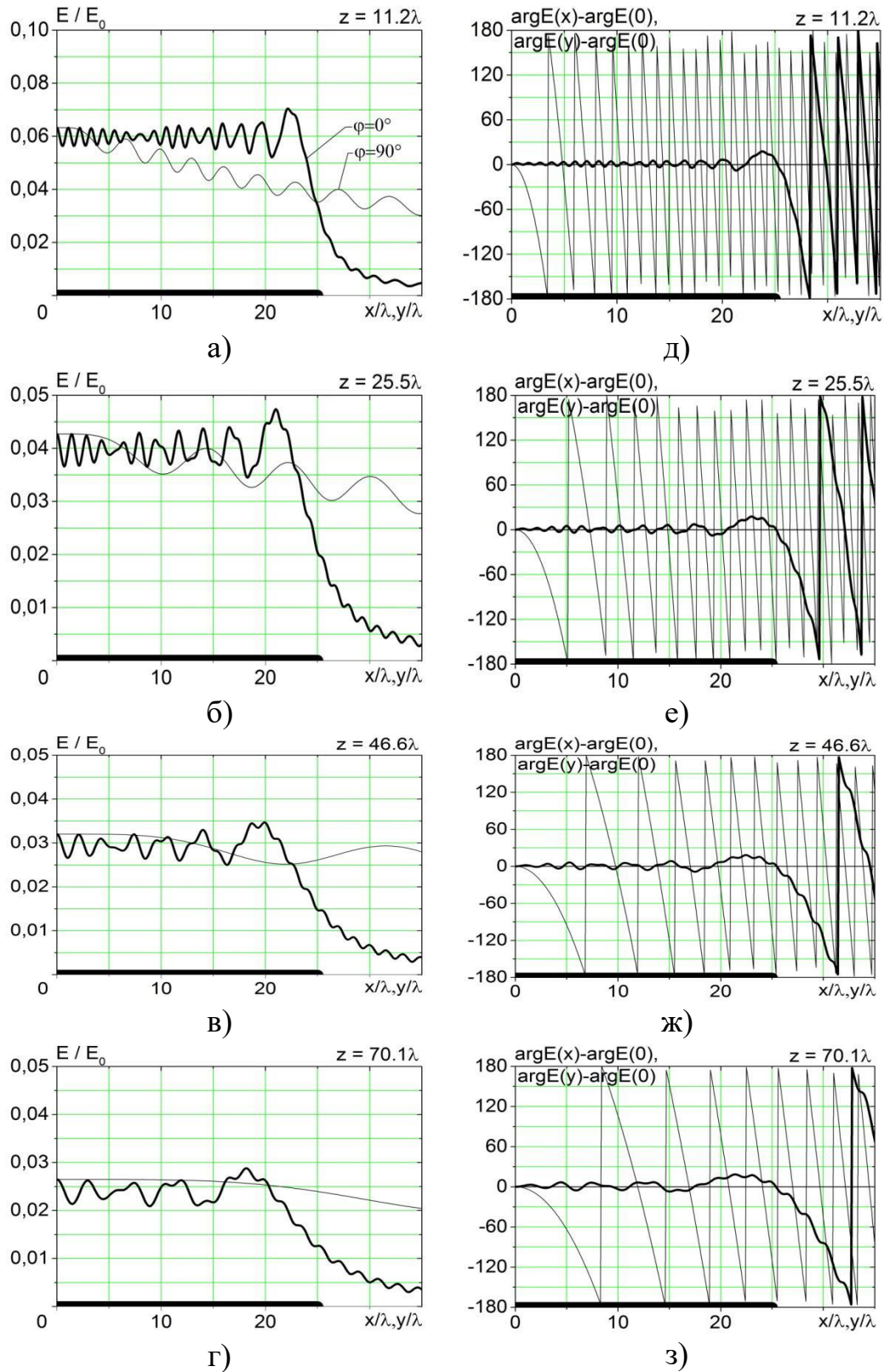


Рис.4.4 – Залежність амплітуди і фази поля лінійної антенної решітки довжиною 50λ при відстані між випромінювачами $d=0.5\lambda$ від поперечних координат x і y на різних відстанях z_n від розкриття антени

На рис. 4.4 наведені розрахунки на відстанях від антени, приблизно рівних одній чверті її довжини (рис. 4.4а), половини довжини (рис. 4.4б), однієї довжини (рис. 4.4в) і півтори довжини (рис. 4.4г). Як і вище, амплітуди поля нормовані до E_0 , а фази поля - до їх значень в точці $x=0; y=0; z=z_n$.

З рисунка видно, що в площині $\varphi = 0$, де розташована лінійна антена, розподіл амплітуди і фази електричного поля близький до рівномірного розподілу поля на антені і має просторово табличну форму. У той же час, зі зміною абсциси точки спостереження відбуваються коливання як амплітуди, так і фази електричного поля. По мірі віддалення точки спостереження від антени період коливань амплітуди і фази електричного поля збільшується, а кількість коливань зменшується. Ці особливості поведінки поля спостерігаються як при збільшенні координати x при $z_n = \text{const}$, так і при збільшенні відстані z_n від антени до поверхні спостереження при $z_n = \text{const}$.

На рис 4.4 показано також довжину лінійної антенної решітки вздовж осі x/λ . Видно, що амплітуда поля зменшується приблизно вдвічі до довжини антени 1,5 на кінці $x/\lambda = L/2\lambda$ у площині спостереження z_n . Розподіл фази в цьому ж діапазоні близький до постійного. У перпендикулярній площині спостереження, залежно від координати y/λ , як амплітуда, так і фаза поля або зменшуються з коливаннями (до $z_n/\lambda \leq L/\lambda$), або рівномірно зменшуються при великих z_n/λ .

Розрахунки також показують, що в площині спостереження $\varphi=0$, з лінійною антенною решіткою спостерігається рівномірно спадна амплітуда поля і квадратичний розподіл фази на відстанях $z_n = \text{const}$, що перевищують половину дальньої межі z_n , тобто $z_n/\lambda \geq L^2/\lambda^2$.

Порівнюючи дані, наведені на рис. 4.4, з аналогічними розрахунками поля в ближній зоні лінійної антени з неперервним розподілом джерела вздовж антени, можна побачити, що при відстані $d=0,5\lambda$ між

випромінювачами просторовий розподіл поля біля лінійної антени з дискретним розподілом джерела має такий же вигляд.

При збільшенні відстані між випромінювачами до $0,9$ довжини хвилі поблизу синфазної антенної решітки, де коефіцієнт спрямованості максимальний, характеристики просторового розподілу електричного поля в ближній зоні істотно змінюються:

- в напрямку нормалі до антени амплітуда поля зменшується з великою швидкістю (рис. 4.1-4.3);
- число осциляцій в залежності амплітуди поля від відстані до точки спостереження збільшується (рис. 4.1-4.3);
- протяжність області осциляцій амплітуди поля в залежності від z/λ незначно, але збільшується;
- Коливання амплітуди поля в напрямку нормалі до антени відбуваються навіть при мінімальній кількості випромінювачів ($N=2$);
- У поперечній площині спостереження $z_n = \text{const}$ амплітудні та фазові коливання поля зростають, особливо на малих відстанях від антени (рис. 4.5);
- Амплітуда коливань зростає не тільки в площині XOZ , де розташована антена (товсті лінії на рис. 4.5), але і в ортогональній площині (тонкі лінії на рис. 4.5);
- осциляції амплітуди поля в поперечних перетинах зникають і просторовий розподіл поля в обох площинах спостереження набуває монотонно спадного виду, характерного для дальньої зони спостереження, на великих відстанях – порядку половини відстані дальньої зони.

Зі збільшенням відстані між випромінюючими елементами згадані вище особливості поведінки електромагнітного поля в ближній зоні лінійної антенної решітки ще більше посилюються. На рис. 4.1-4.3 показано

залежність відносної амплітуди електричного поля від ординати z/λ , на рис. 4.3 - абсциси x/λ і y/λ на відстані $d = 1,1\lambda$ між випромінюючими елементами антенної решітки. У цьому випадку, як зазначалося вище, крім головної пелюстки, в діаграмі спрямованості формуються дві дифракційні пелюстки, що збільшує кількість і рівень бічних пелюсток і значно зменшує коефіцієнт напрямленої дії антени.

Розрахунки, наведені на рис. 4.1-4.3 і 4.6, показують, що в цьому випадку поведінка електричного поля в ближній зоні антени якісно змінюється. Зокрема, на відстані чверті довжини антени як амплітуда, так і фаза поля змінюються за сильними коливальними залежностями, які суттєво відрізняються від постійного розподілу амплітуди і фази джерела поля на антені. На половині відстані дальньої зони від антени коливання амплітуди поля значно зменшуються, розподіл фази (хвильовий фронт) наближається до плоского, а коливання стають меншими.

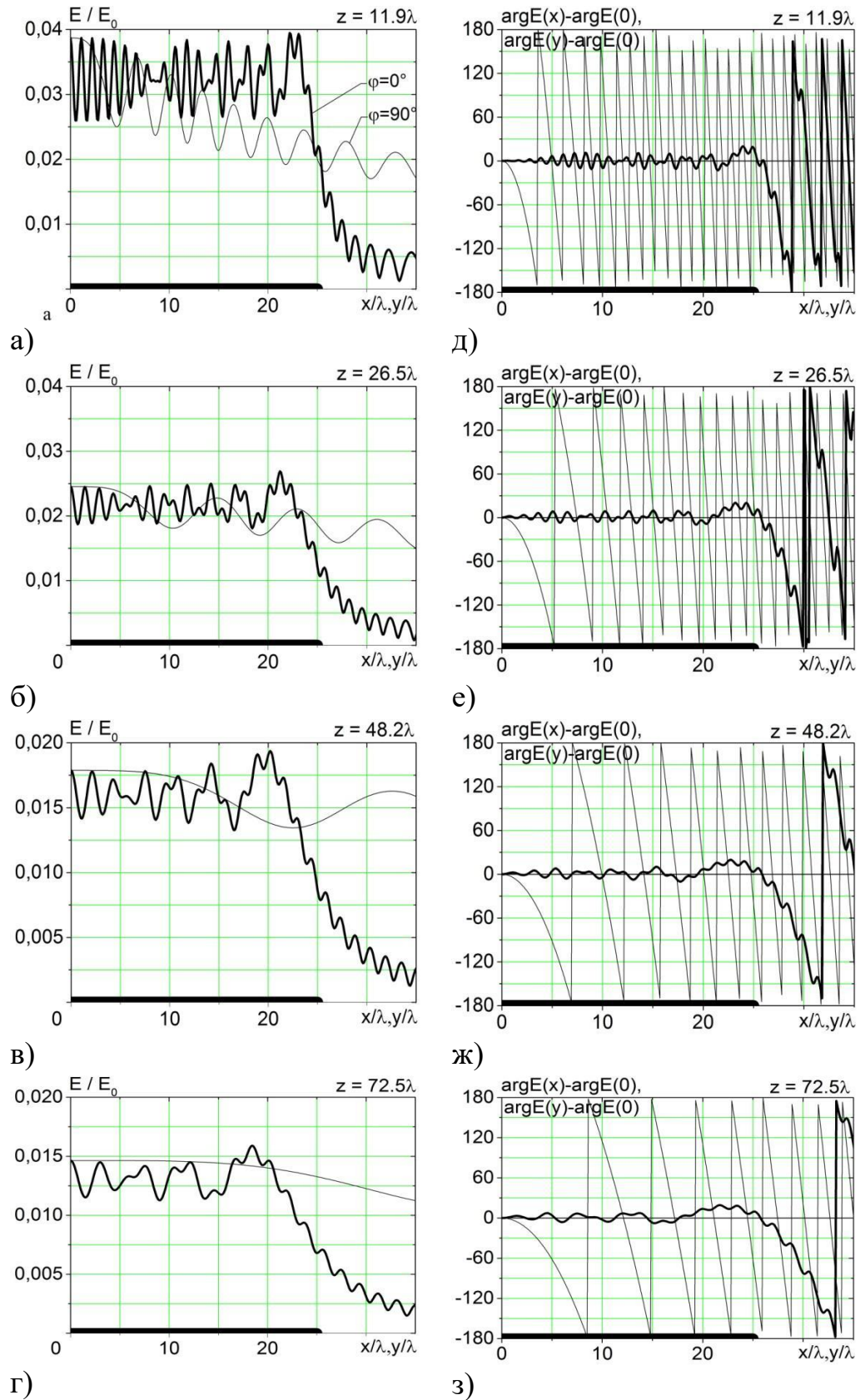


Рис.4.5 – Залежність амплітуди і фази поля лінійної антенної решітки довжиною 50λ при відстані між випромінювачами $d = 0.9\lambda$ від поперечних координат x і y на різних відстанях z_n від розкриття антени

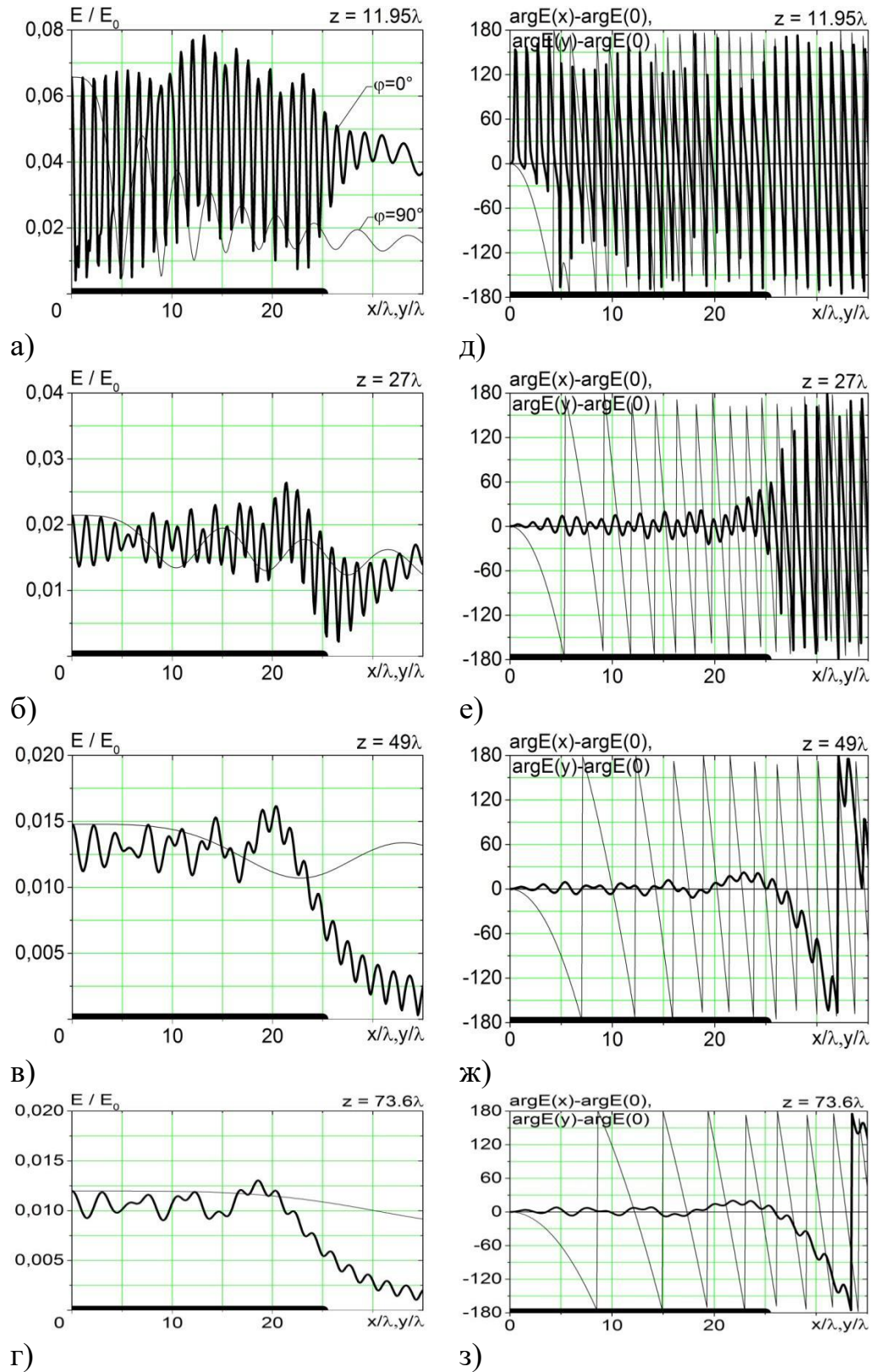


Рис.4.6 – Залежність амплітуди і фази поля лінійної антенної решітки довжиною 50λ при відстані між випромінювачами $d=1.1\lambda$ від поперечних координат x і y на різних відстанях z_n від розкриття антени

З рис.4.1-4.6 видно, що в площині $\varphi = 0$, де розташована лінійна антена, розподіл амплітуди і фази електричного поля близький до рівномірного розподілу поля на антені. У той же час, зі зміною абсциси точки спостереження відбуваються коливання як амплітуди, так і фази електричного поля. По мірі віддалення точки спостереження від антени період коливань амплітуди і фази електричного поля збільшується, а кількість коливань зменшується. Ці особливості поведінки поля спостерігаються як при збільшенні координати x при $z_n = \text{const}$, так і при збільшенні відстані z_n від антени до поверхні спостереження при $z_n \text{const}$.

5. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ І ХВИЛІ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ КВАЗІЛІНІЙНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

Як зазначалося вище, електромагнітні поля і хвилі, що поширюються у вільному просторі, найбільш широко використовуються в таких інформаційних технологіях, як радіомовлення і телебачення, телекомунікаційні наземні та космічні мережі і системи, радіолокація, радіонавігація і радіотелеметрія

Принциповою особливістю цієї радіоелектронної техніки є використання радіовипромінювання антен в їх дальній зоні. Однак є важливі галузі науки і техніки, в яких вимушено використовуються радіохвилі в ближній і проміжній зонах спостереження. Це насамперед радіозв'язок, включаючи мобільний і технічний зв'язок; мережі зв'язку в підземних тунелях, залізничному транспорті, шахтах, офісах і кампусах та безконтактні радіосистеми для збору і передачі радіотелеметричних даних. Останнім часом активно досліджується тема безконтактної зарядки акумуляторів мобільних електромобілів за допомогою електромагнітних хвиль. Технічна складність використання радіолокаційних систем малого радіусу дії для забезпечення безпеки дорожнього руху на автомобільному, залізничному, водному та повітряному транспорті залишається актуальною. Тому такі проблеми, як розрахунок і аналіз електромагнітних хвильових явищ, просторовий розподіл амплітуди і напруженості електричних і магнітних полів, поляризаційні властивості залишаються важливими питаннями, що мають практичне значення.

Метою цього розділу є порівняльний аналіз розподілу в просторі амплітуди вектора напруженості електричного поля на кінцевій відстані від розкриття в ближній і проміжній зонах лінійних і квазілінійних апертурних антенних решіток.

Проаналізуємо цю проблему детальніше. Сьогодні завдання бездротового зв'язку, наприклад, у підземних тунелях, вирішується за допомогою щілинних антен на випромінюючих кабелях, що випускаються промисловістю. При цьому зазвичай робоча область системи радіозв'язку включає ближню і проміжну зону антени. Особливістю розглянутих систем є те, що електрична довжина випромінюючого кабелю зазвичай дуже велика, тому що вона в принципі дорівнює довжині тунелю. Відомо, що в ближній зоні лінійних антенних решіток амплітуда поля експоненційно убиває зі збільшенням відстані до точки спостереження. З іншого боку, відомо, що антени з прямокутною апертурою можуть створювати "прожекторний промінь" в ближній зоні, де амплітуда, потужність і поляризаційні характеристики електромагнітного поля змінюються з відстанню від антени по коливальному закону без значного ослаблення. Якщо глибина осциляцій не дуже велика, що характерно, для апертурних антен із розкритом прямокутної форми, то в області прожекторного променя в деякому об'ємі просторовий розподіл поля практично постійний. Розглянемо можливості формування прожекторного променя в еквідистантній плоскій решітці електрично довгих лінійних решіток, наприклад, із коаксіально-щілинних випромінювачів. Електричну довжину лінійних решіток будемо приймати досить великою, а поперечні розміри, які визначаються числом лінійок, малими. Зрозуміло, що такі антени слід називати квазілінійними.

Поля в ближній та проміжних областях спостереження антенної решітки описуються складними і громіздкими рівняннями, головним чином через громіздкість опису полів в ближній зоні типового випромінюючого елемента антенної решітки. Рішення задачі і кількісний аналіз характеристик полів можна значно спростити, якщо немає необхідності знати характеристики полів на малих відстанях від розкриття антени, які не перевищують відстані ближньої зони випромінювача - елемента решітки.

Тоді можна використати просту математичну модель залежності електричного поля в дальній зоні елементів решітки, в їх дальній зоні, а поля ближньої і проміжної зон антенної решітки та просторового розподілу електричного поля в залежності від електричних розмірів і форми випромінюючої апертури, знаходимо явно враховуючи кінцеве значення відстані від випромінюючої антени до точки спостереження, для кожного випромінюючого елемента решітки в точці спостереження при будь-якій відстані між випромінюючими елементами поля всієї антени визначається простою сумою комплексних амплітуд полів двох випромінюючих тіл, тобто за принципом суперпозиції.

Для подальшого спрощення задачі за математичні моделі випромінювачів, тобто елементів решітки, взято точкові ізотропні випромінювачі. Добре відомо, що такого випромінювача в природі не існує, але така модель дозволяє абстрагуватися від конкретного типу або виду випромінювача-елемента решітки і дослідити в першу чергу вплив розмірів і параметрів решітки на просторовий розподіл електричного поля в ближній зоні антени.

Для розв'язання задачі з розкритом решітки зв'яжемо декартову систему координат, а точки спостереження будемо описувати в сферичній або в тій же декартовій системі координат в залежності від того які саме просторові розподіли поля необхідно знати в конкретній задачі. Для визначеності поперечну координату x зв'яжемо з лінійною коаксіально-щілинною антеною. У площині XOY будемо мати у своєму розпорядженні коаксіально-щілинні лінійні антенні решітки. Прийmemo також, що поляризація випромінювання кожного випромінювача плоскої решітки лінійна вертикальна і математична модель випромінювача в векторизований формі має вигляд в декартовій системі координат

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{x}^0 \frac{E_0}{R(x, y, z)} e^{-ikR(x, y, z)} \text{ і в сферичній системі координат}$$

$$\vec{E}(\theta, \varphi, R) = \vec{\theta^0} \frac{E_0}{R(\theta, \varphi, R)} e^{-ikR(\theta, \varphi, R)}$$

Для подальшого спрощення задачі і отримання найзагальніших висновків про вплив відстані між випромінювачами в лінійці d_x і відстані між лінійками d_y на розподіл поля в ближній зоні антенних решіток взаємний вплив випромінювачів в антені ні по зовнішньому, ні по внутрішньому простору враховувати не будемо.

Перейдемо до аналізу фізичних закономірностей, пов'язаних з формуванням просторового розподілу амплітуди вектора напруженості поля в ближній зоні квазілінійної антенної решітки.

Щоб не збільшувати кількість аналізованих варіантів антен, тут розглядається однорідна антенна решітка. Тобто вважається, що кожен випромінювач на кожній лінії випромінює поле з однаковою комплексною амплітудою $E_{0x} = E_0$.

Розрахунки амплітуди електричного поля, віднесеної до амплітуди цього поля в середині досліджуваних антенних решіток, в залежності від поздовжньої координати z/λ в напрямку нормалі до розкриву проводилися для однієї лінійки, а також для плоских решіток з 2, 3, 4, 5 і 10 антенних лінійок довжиною 10 ; 50 і 100 довжин хвиль. Для визначеності відстань між випромінювачами в кожній лінійці прийнято рівною половині довжини хвилі $d_x = 0,5\lambda$, а відстані між лінійками змінювалося $d_y = 0,25; 0,5; 0,9; 1,1$ і $2,5$ довжини хвилі. Тут при $d_x = 0,25\lambda$ і $0,5\lambda$ характеристики полів антенної решітки близькі до характеристик безперервної апертурної антени, при $d_y = 0,9\lambda$, антенна решітка при фіксованих розмірах апертури має максимум максимум коефіцієнта напрямленої дії, а при $d_y = 1,1\lambda$ - його мінімум мінімумом. На рис. 5.1 представлені ці розрахунки, з яких, по-перше, підтверджується висновок про те, що у випадку однієї лінійної решітки

неможливо сформувати прожекторний промінь в ближній зоні антени; по-друге, ознаки формування прожекторного променя мають місце при числі лінійок, більшому 3-4 при малій відстані між лінійками (рис. 5.1а) і вже при двох лінійках при великій (більшій довжини хвилі) відстані між лінійками.

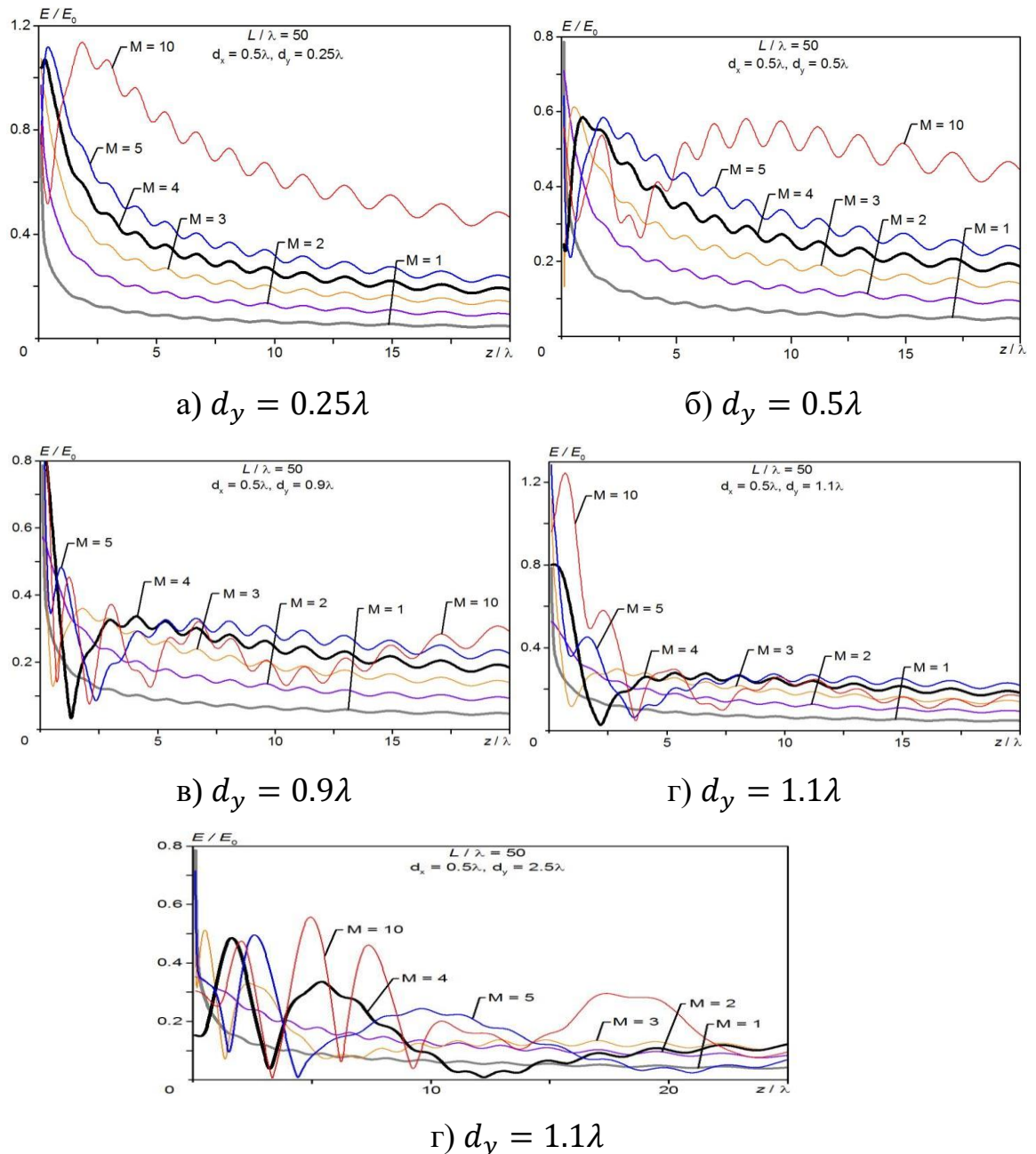


Рис. 5.1 - Залежність амплітуди електричного поля решітки з розкритом 50λ від поздовжньої координати z/λ в напрямку нормалі до розкритву при різних відстанях між лінійками.

Амплітуда і фаза електричного поля також були розраховані в плоскому перерізі $z = \text{const}$, перпендикулярному до напрямку, нормального до апертури антени. Результати показують, що особливість прожекторного променя проявляється навіть тоді, коли в площині, де розташована лінійна решітка, є лише одна лінія. В ортогональних площинах прожекторний промінь формуються лише тоді, коли кількість ліній становить три-чотири і більше.

Для практично важливого випадку, коли потужність генератора (передавача) постійна, а кількість випромінюючих отворів і випромінювачів в антенній решітці змінюється, розглянемо фізичну закономірність формування просторового розподілу електромагнітного поля в ближній зоні квазілінійної антенної решітки. Іншими словами, припустимо, що кількість лінійних решіток квазілінійних апертурних антен умовно збільшено з 1 до 10, але кожна лінія живиться від генератора з використанням діляника амплітуди.

Розраховувалися залежності відносної амплітуди електричного поля, нормованої до її значенням на початку координат E_0 , від поздовжньої координати z/λ . Для зручності і повноти аналізу розрахунки представлені в різних масштабах:

- а - від середини розкриву до відстані дальньої зони (2500λ);
- б - від середини розкриву до половини довжини лінійної решітки (25λ);
- в - від середини розкриву до відстані ближньої зони (105λ).

Відзначимо, що оскільки фазовий розподіл джерел поля в розкритті прийнято постійним, напрямок нормалі до площини розкриття в розрахунках збігається з напрямком головного максимуму діаграми спрямованості досліджуваних антен.

Розраховувалися також розподіл амплітуди і фази електричного поля в поперечних площинах спостереження $z = \text{const}$ на різних відстанях від антенної решітки в площині XOZ ($\varphi = 0$), в якій розташовані лінійні решітки великої електричної довжини, і в площині YOZ ($\varphi = 90^\circ$).

Результати серії розрахунків для випадку електричної довжини протяжних лінійних антенних решіток, що дорівнює 50 довжин хвиль, і зміни в серії числа таких лінійок від однієї до десяти, тобто при максимальних розмірах апертури решітки $50 \times 4,5$ довжин хвиль, представлені на рис. 5.2-5.22. У розрахунках відстань між випромінювачами в лінійках прийнято рівною $d_x = 0.5\lambda$ і між лінійками $d_y = 0.5\lambda$. Як добре відомо, цей варіант антенних решіток найбільш часто використовується на практиці, так як саме в цьому випадку забезпечується близькі до оптимальних характеристики спрямованості плоских антенних решіток.

Наведені на рис. 5.2-5.22 результати розрахунків ілюструють динаміку зміни просторового розподілу амплітуди і потужності електромагнітного поля на кінцевій відстані в ближній зоні лінійних і квазілінійних антенних решіток. З цих даних і особливо з розрахунків фронтів хвилі у всіх випадках можна зробити наступні важливі для практики висновки:

1. Лінійні антенні решітки не дозволяють сформувати в ближній зоні прожекторний промінь ні при якій як завгодно великій довжині антени і ні за яких відстанях між випромінювачами, в тому числі - і в розріджених антенних решітках.

2. У квазілінійних антенних решітках, в яких довжина багато більша ширини, формується квазіпрожекторний промінь, характерними особливостями якого є наступні:

в площинах $z = \text{const}$ залежності амплітуди поля від поперечних координат, паралельних лінійці, мають слабкоосцилюючий характер, а амплітуда поля близька до значення поля поблизу випромінювача на досить значних

відстанях. Іншими словами, просторовий розподіл амплітуди поля в поперечних перетинах простору спостереження, паралельних лінійним решіткам великої електричної довжини, має ознаки локальної плоскої квазіоднорідної хвилі, як в прожекторному промені плоских апертурних і дискретних випромінюючих систем;

Характеристики прямокутної решітки:

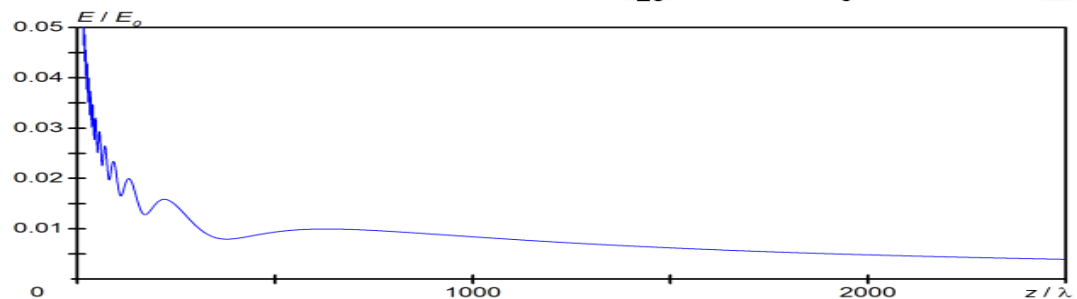
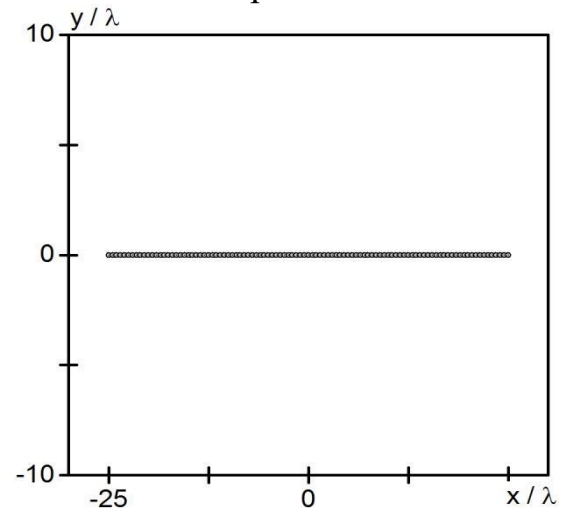
Розкриття: $L / \lambda = 50$

Вздовж Ox : $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

Вздовж Oy : $M = 1$

Амплітуда: $E_{M_line} = E_0 / M$

Вид решітки:



a)

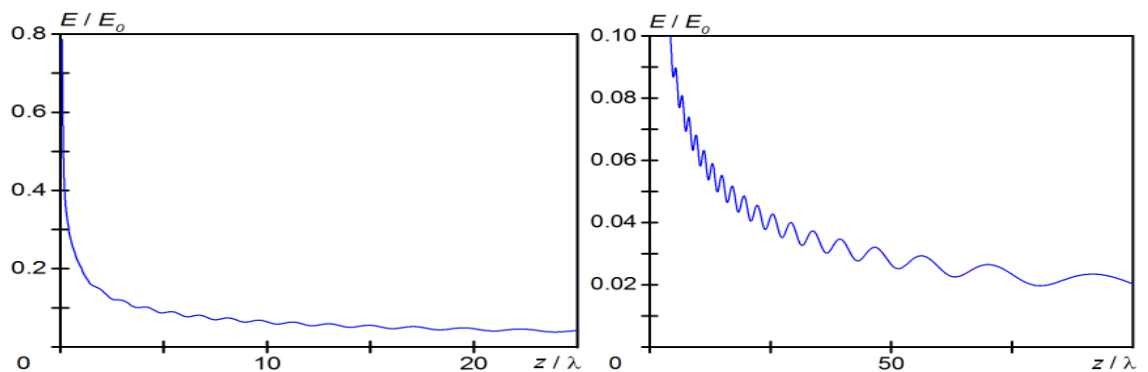


Рисунок 5.2 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5 \lambda$) з лінійним розкриттям 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$).

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 1;$$

$$E_{M_line} = E_0$$

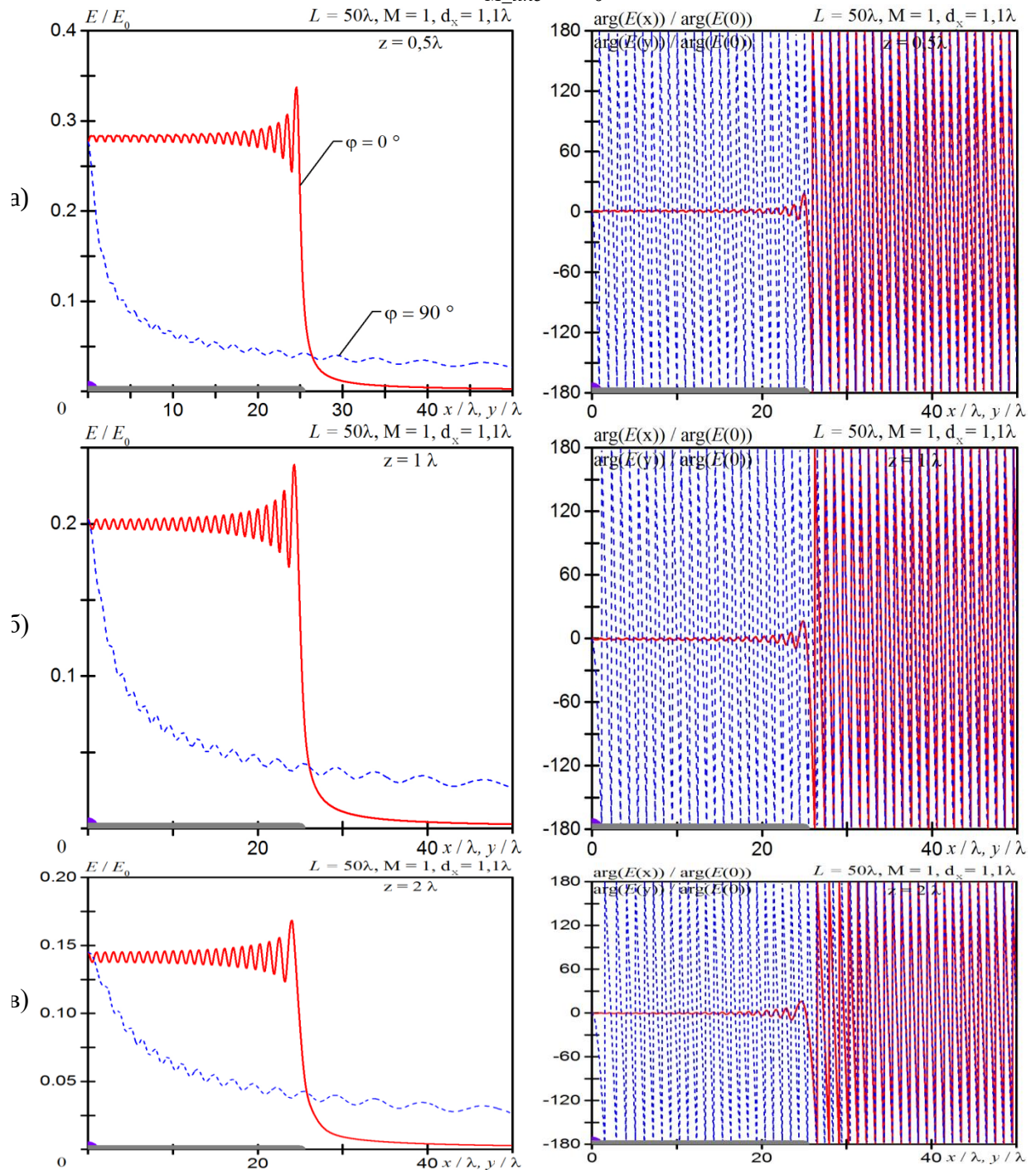


Рисунок 5.3 - Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x = 0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 1;$$

$$E_{M_line} = E_0 / M$$

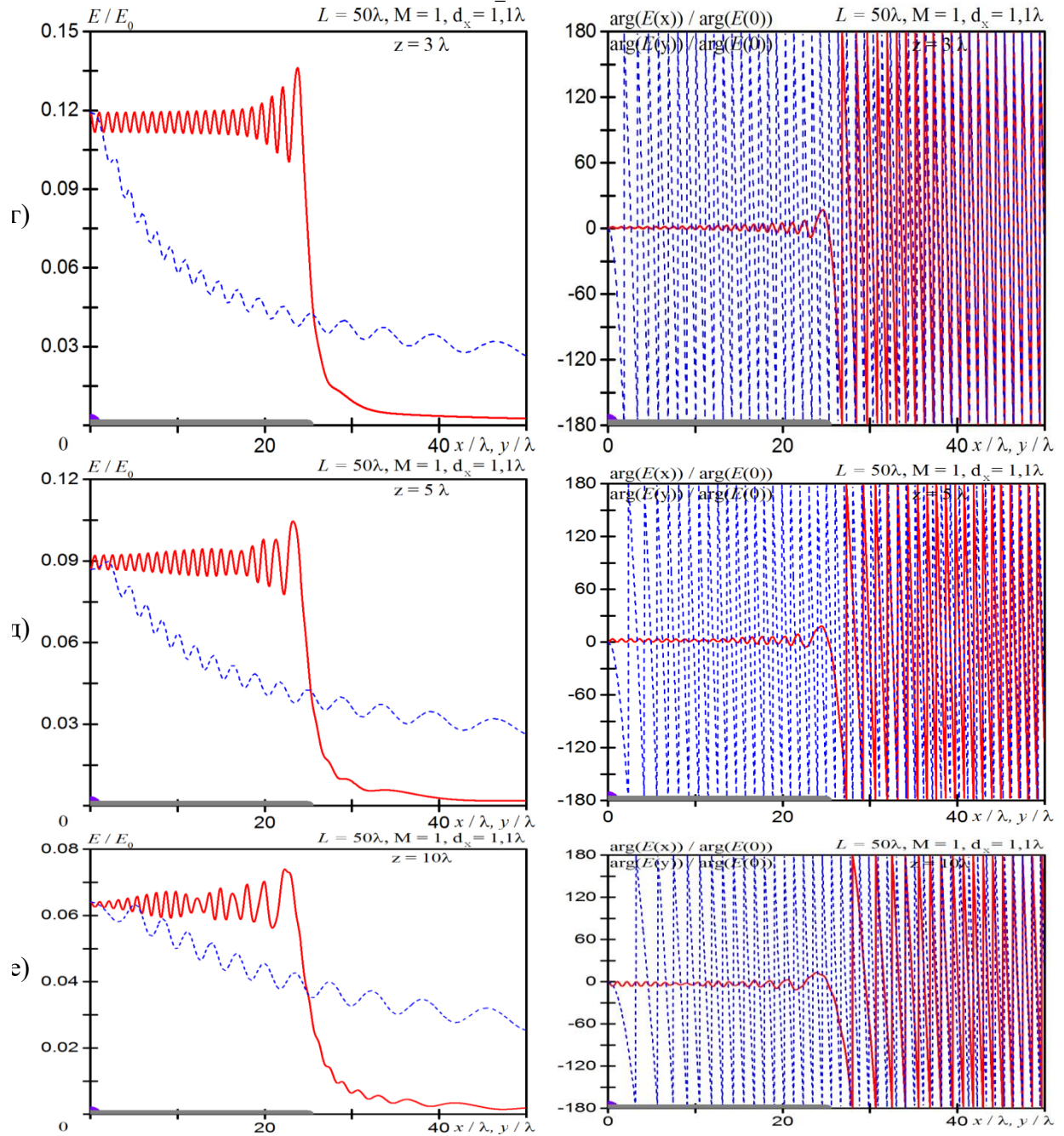


Рисунок 5.4 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Характеристики прямокутної
решітки:

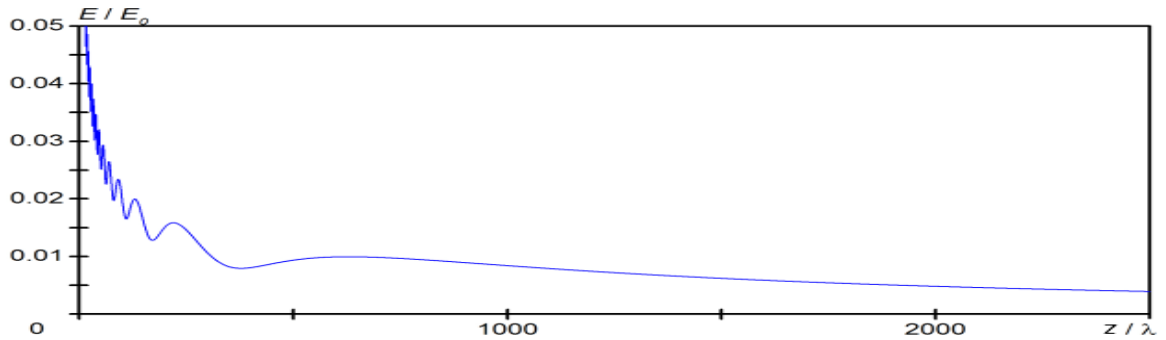
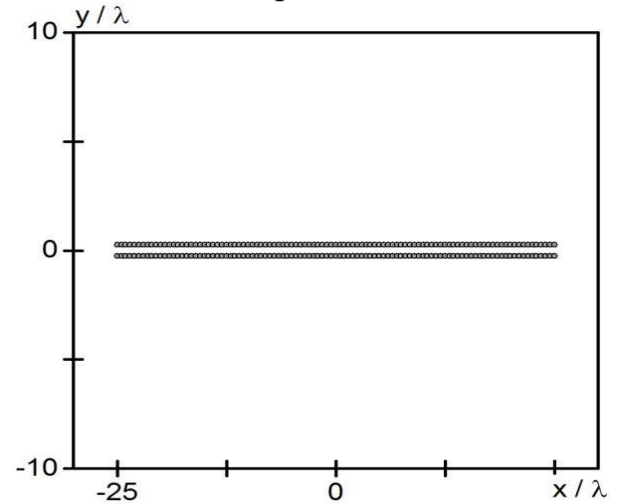
Розкриття: $L / \lambda = 50$

Вздовж Ох: $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

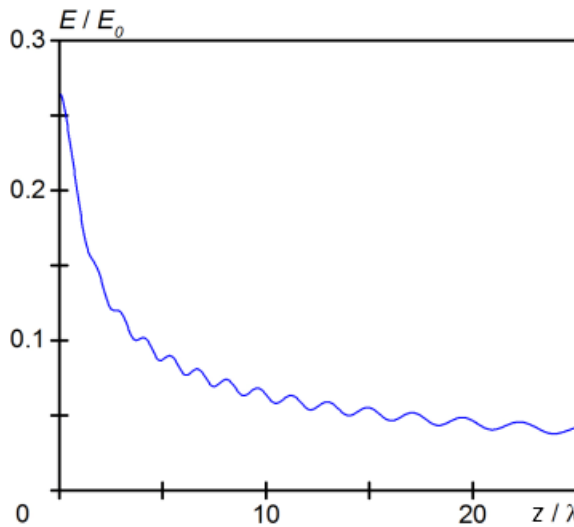
Вздовж Оу: $M = 2$; $d_y = 1.1\lambda$

Амплітуда: $E_{M_line} = E_0 / 2$

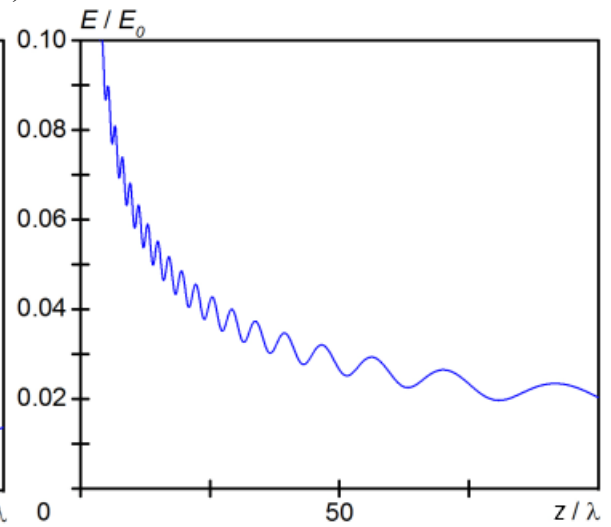
Вид решітки:



а)



б)



в)

Рисунок 5.5 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5\lambda$) з лінійним розкриттям 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$).

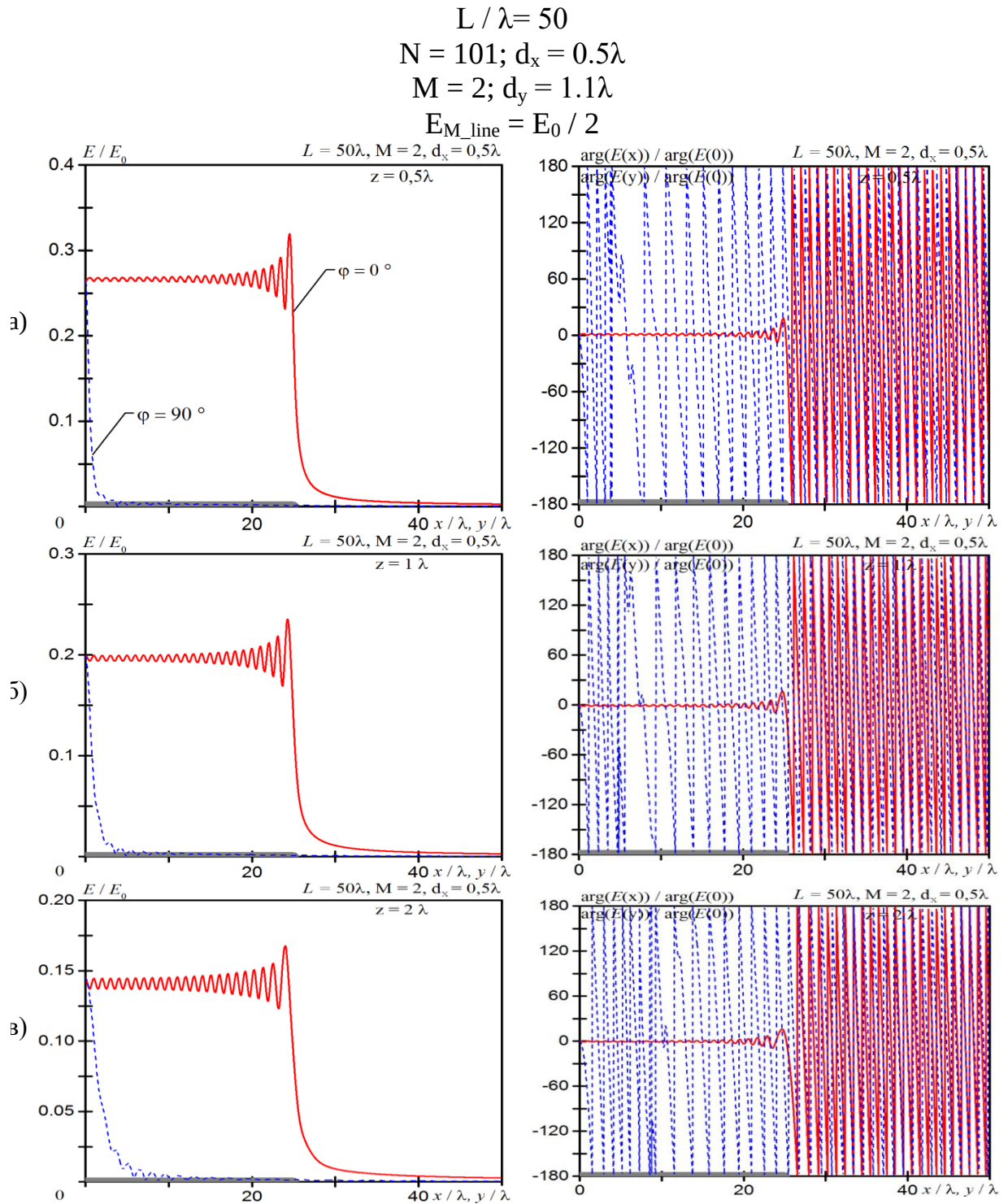


Рисунок 5.6 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$

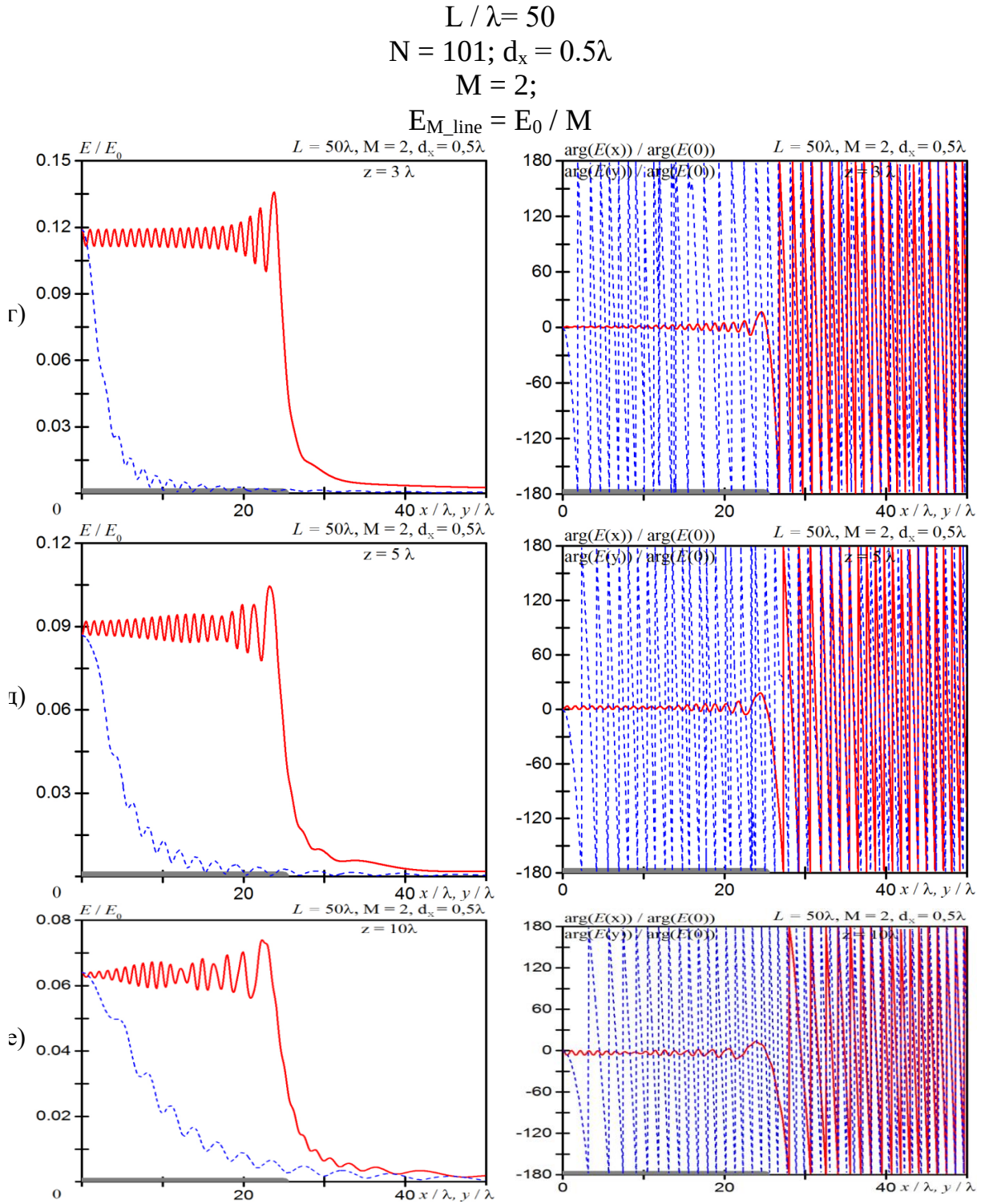


Рисунок 5.7 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Характеристики прямокутної решітки:

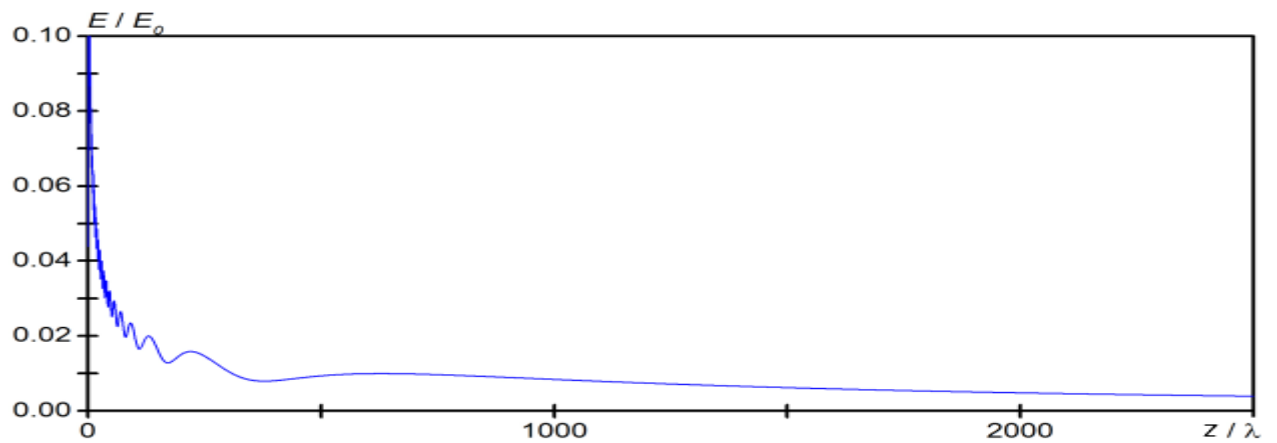
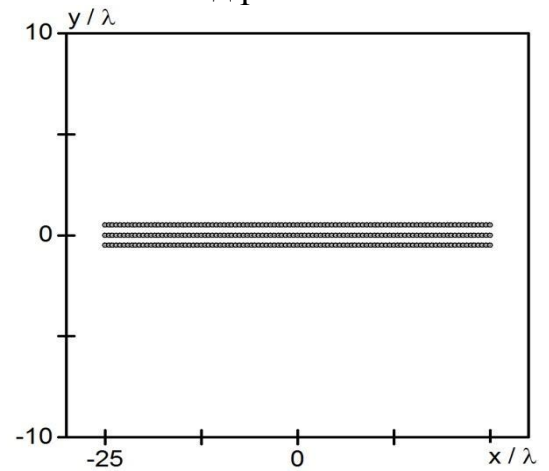
Розкриття: $L / \lambda = 50$

Вздовж Ох: $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

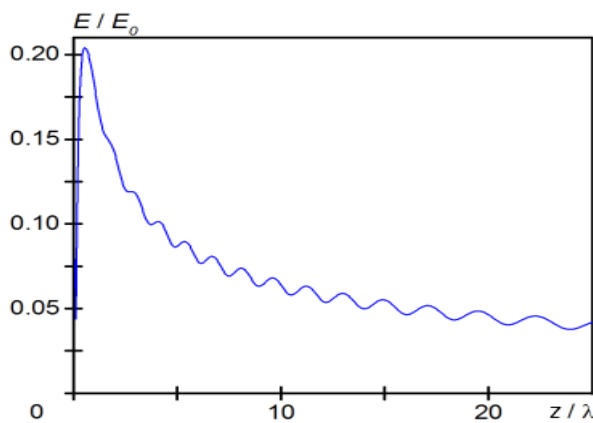
Вздовж Оу: $M = 3$;

Амплітуда: $E_{M_line} = E_0 / M$

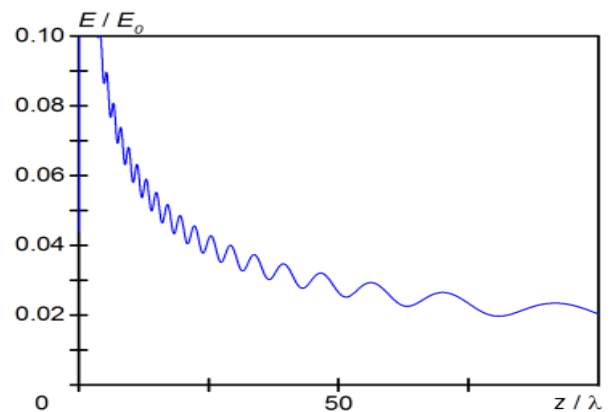
Вид решітки:



а)



б)



в)

Рисунок 5.8 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5 \lambda$) з лінійним розкриттям 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$)

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 3;$$

$$E_{M_line} = E_0 / 3$$

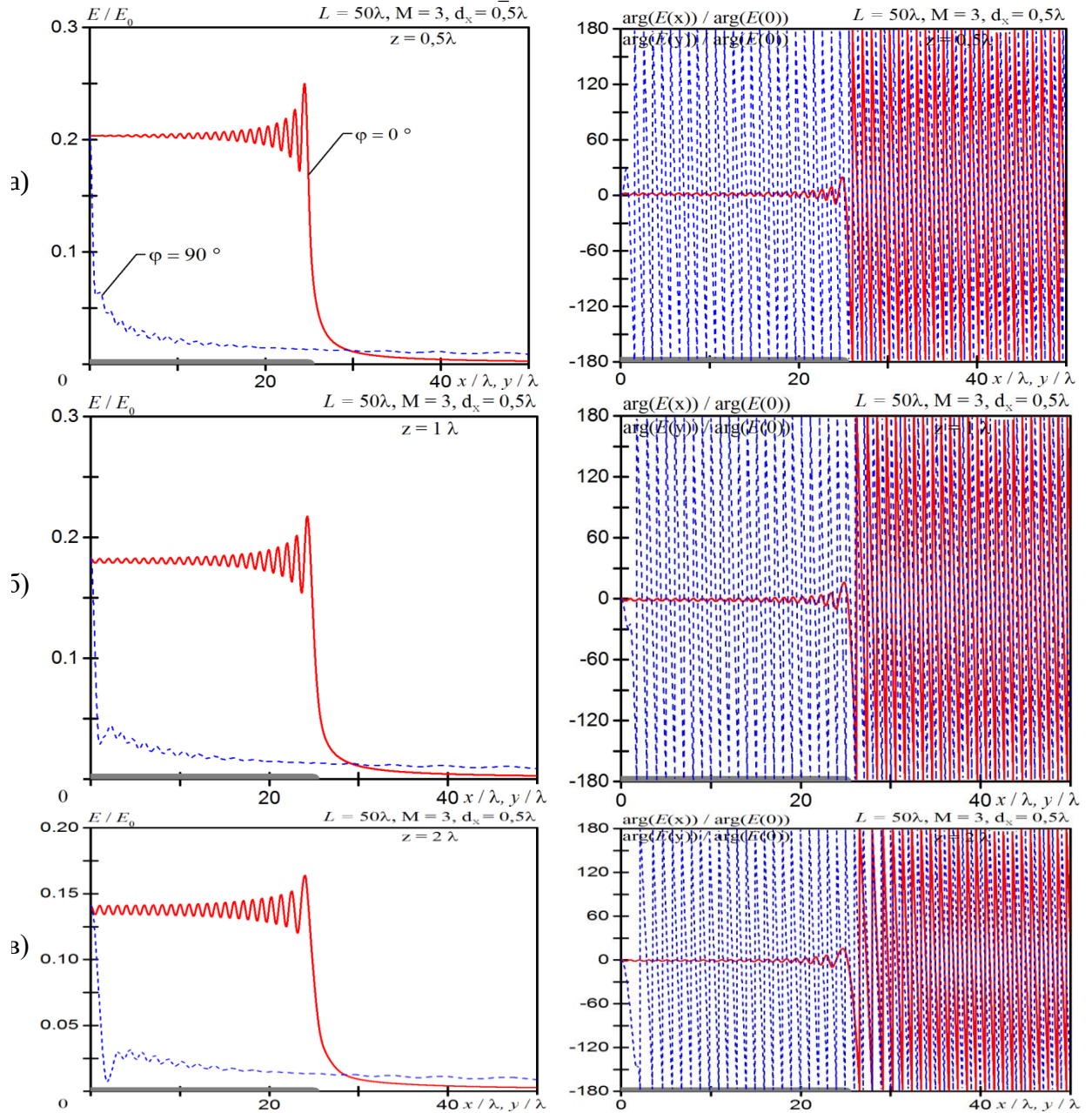


Рисунок 5.9 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

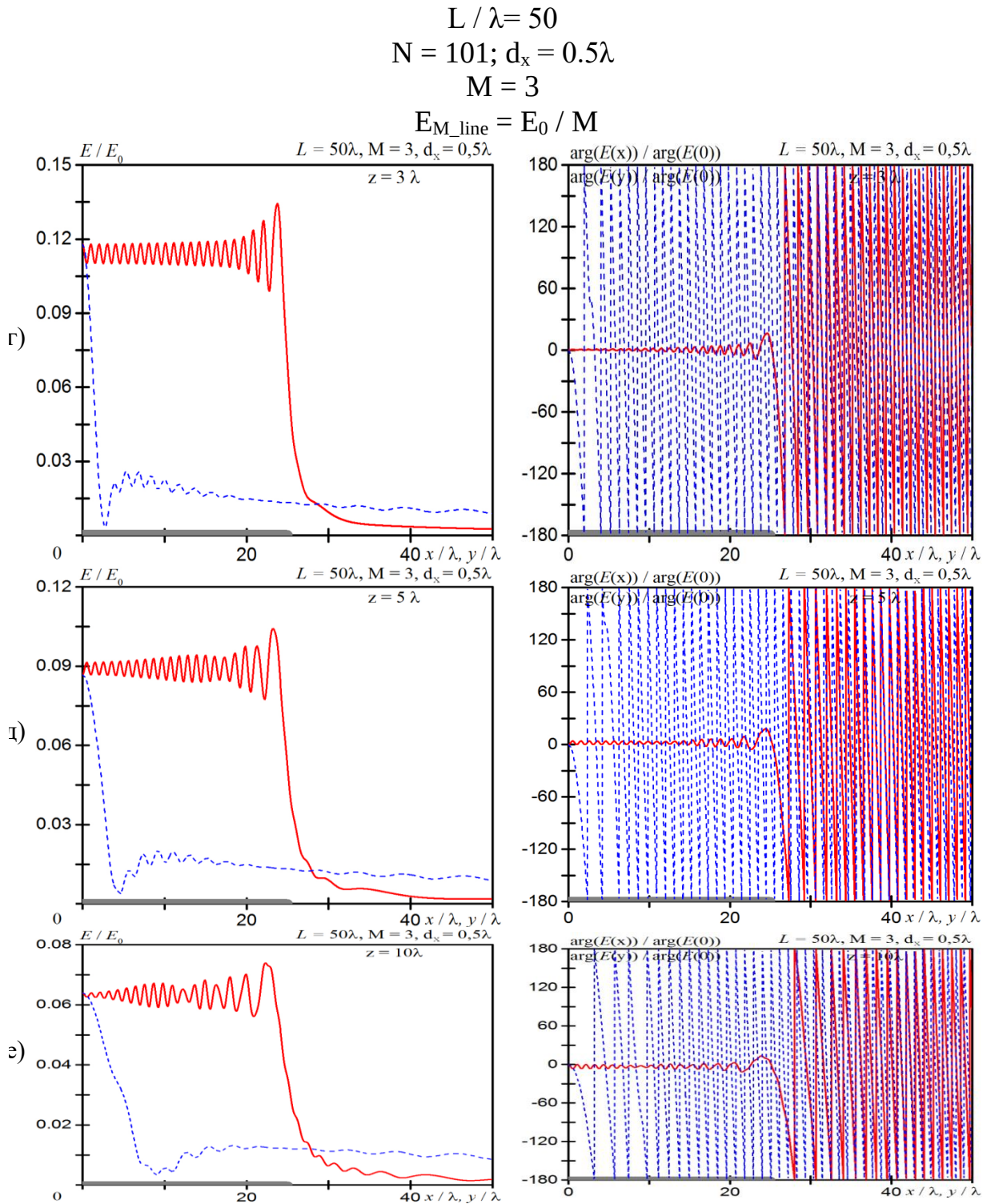


Рисунок 5.10 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Вид решітки:

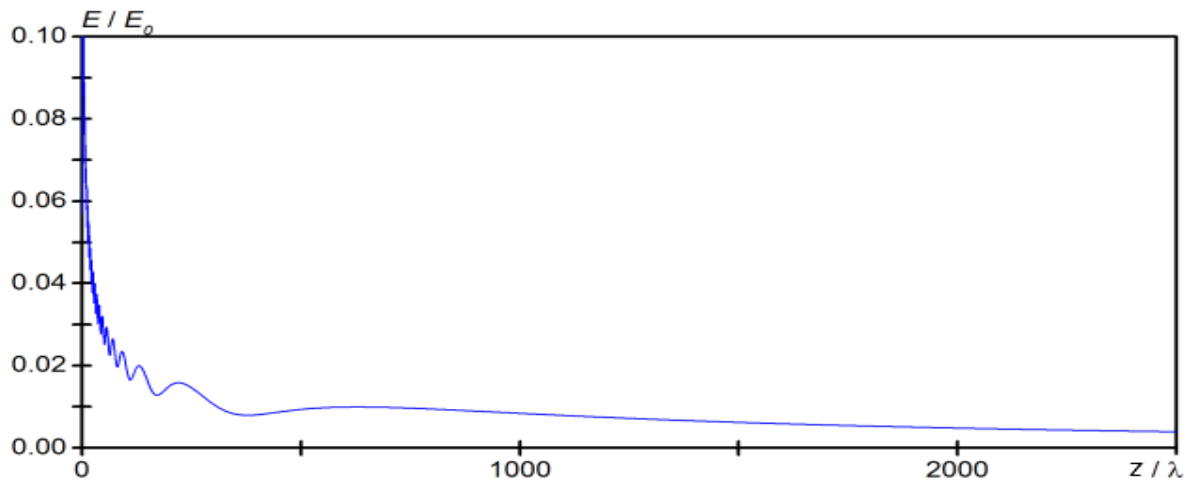
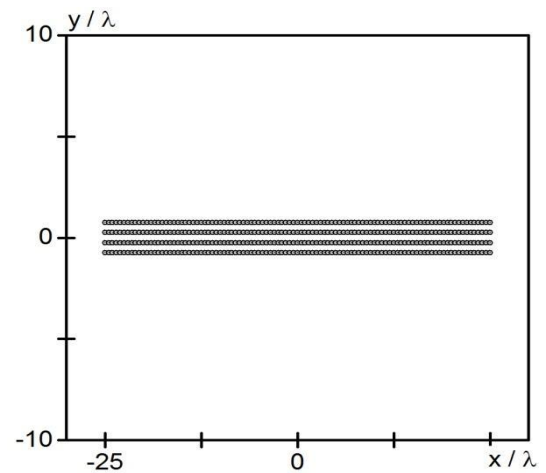
Характеристики прямокутної решітки:

Розкрив: $L / \lambda = 50$

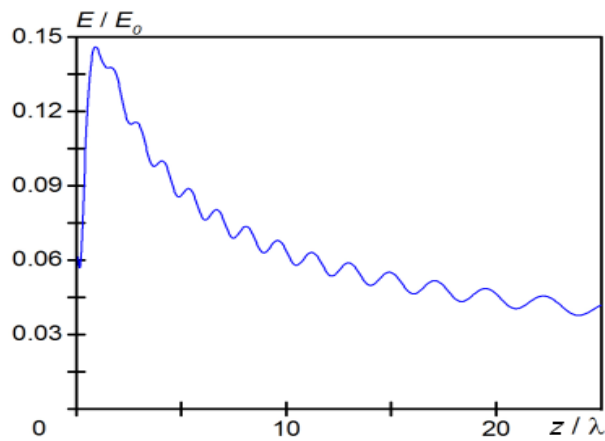
Вздовж Ох: $N = 101; d_x = 0.5\lambda$

Вздовж Оу: $M = 4$

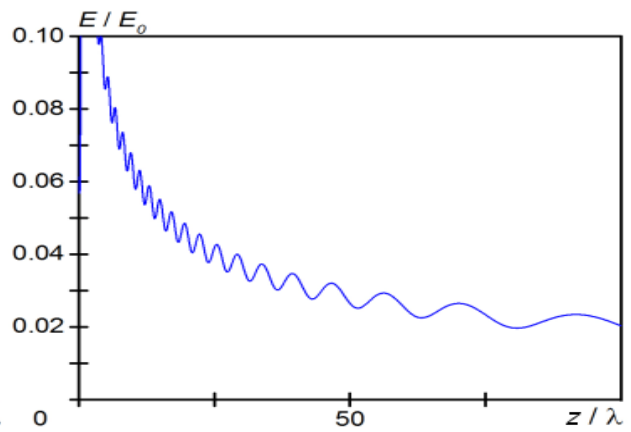
Амплітуда: $E_{M_line} = E_0 / M$



а)



б)



в)

Рисунок 5.11 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5\lambda$) з лінійним розкривом 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриву: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$).

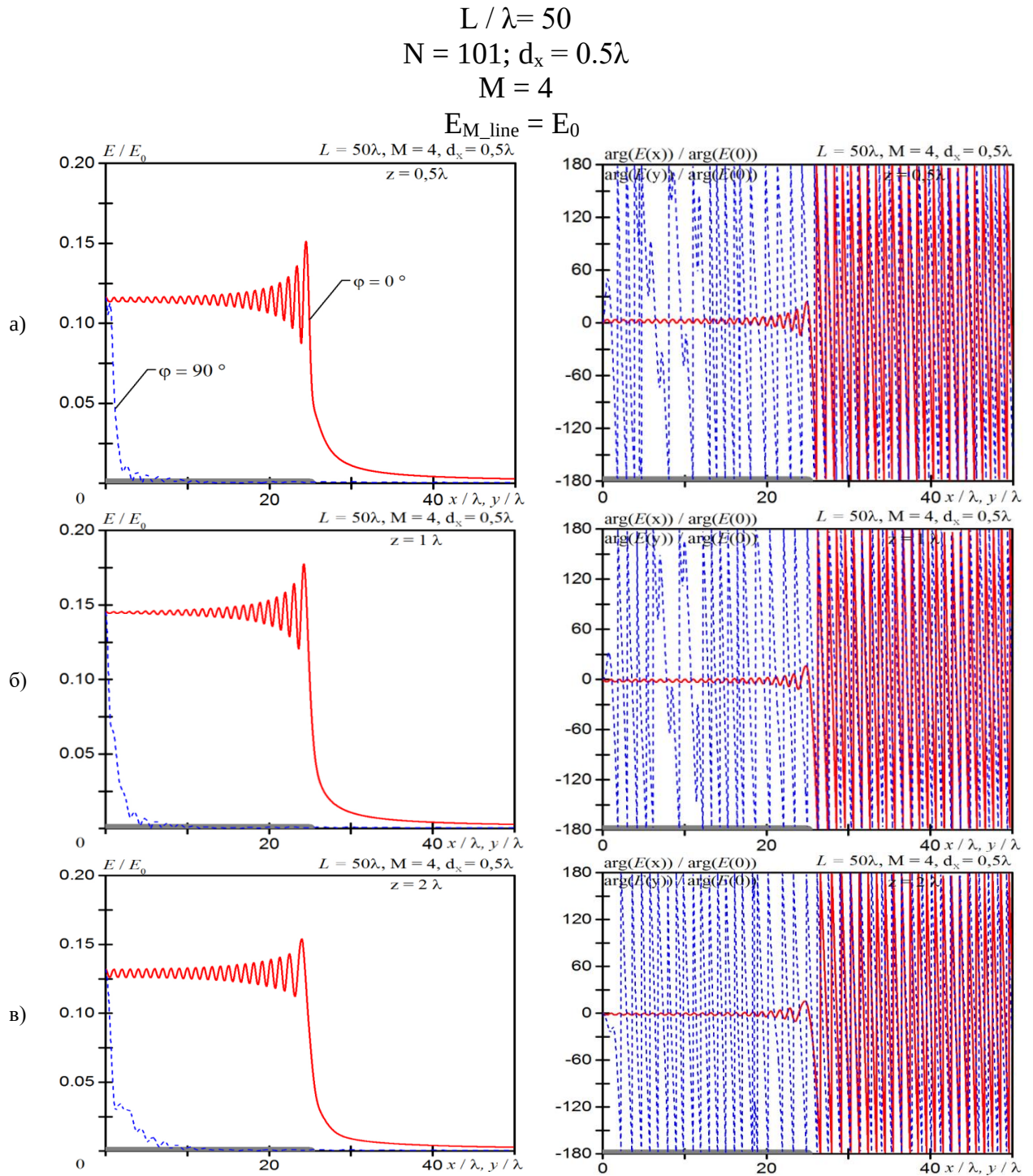


Рисунок 5.12 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 4$$

$$E_{M_line} = E_0 / 4$$

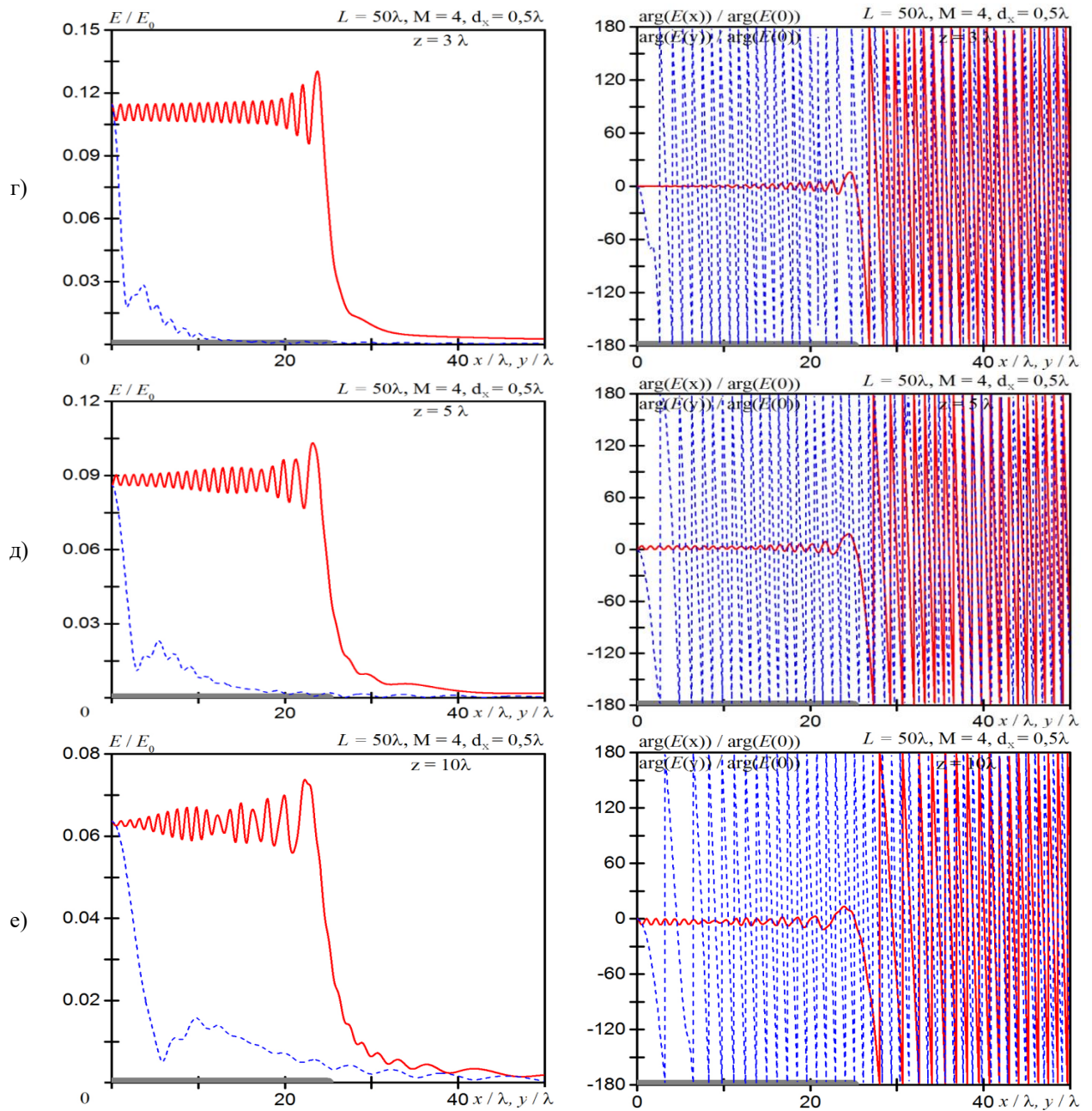


Рисунок 5.13 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Вид решітки:

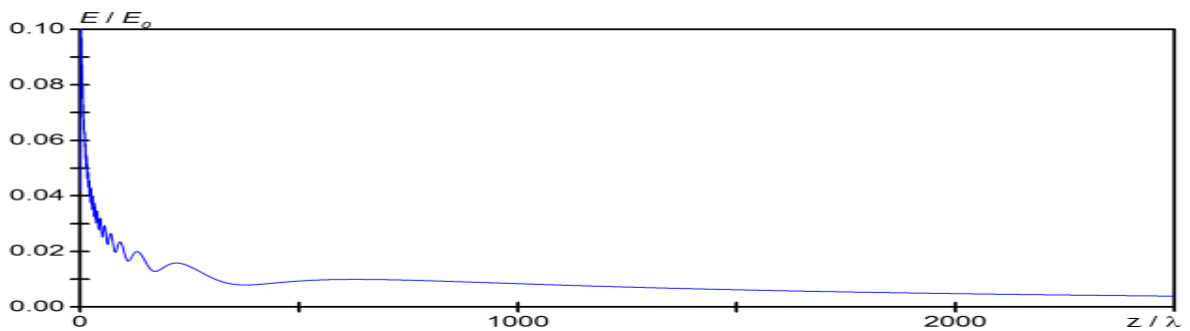
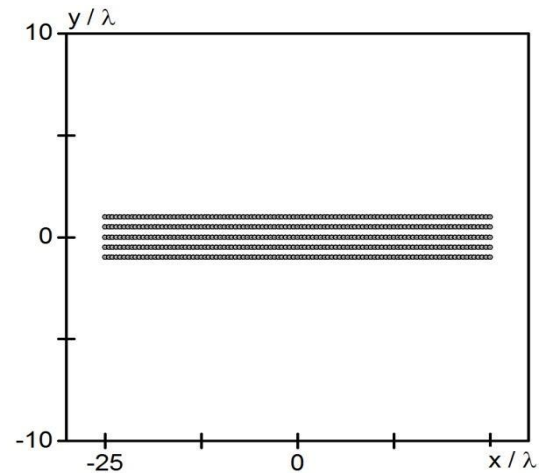
Характеристики прямокутної решітки:

Розкрив: $L / \lambda = 50$

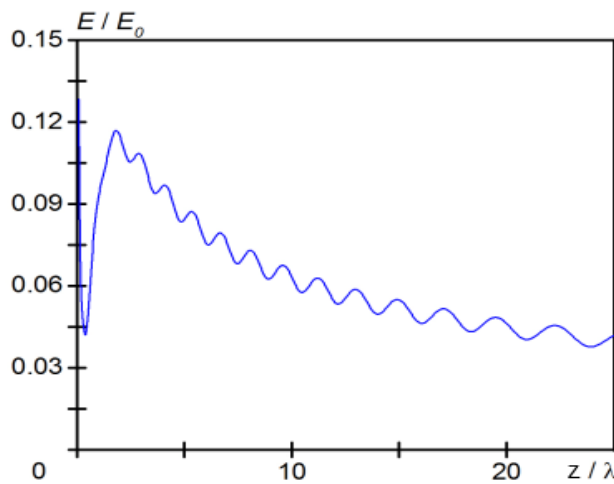
Вздовж Ох: $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

Вздовж Оу: $M = 5$;

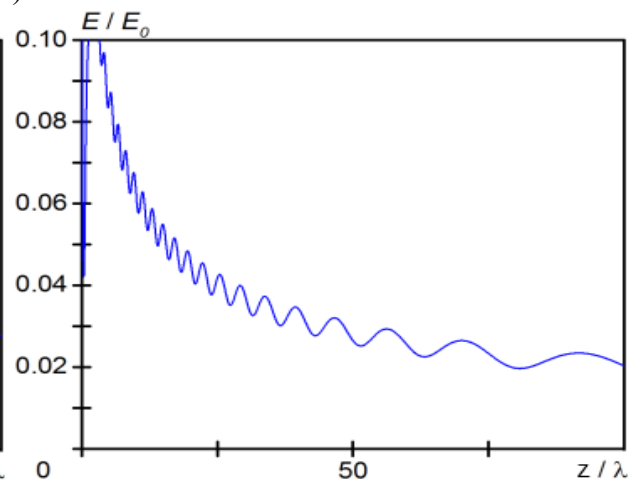
Амплітуда $E_{M_line} = E_0 / M$



а)



б)



в)

Рисунок 5.14 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5 \lambda$) з лінійним розкривом 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриву: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$).

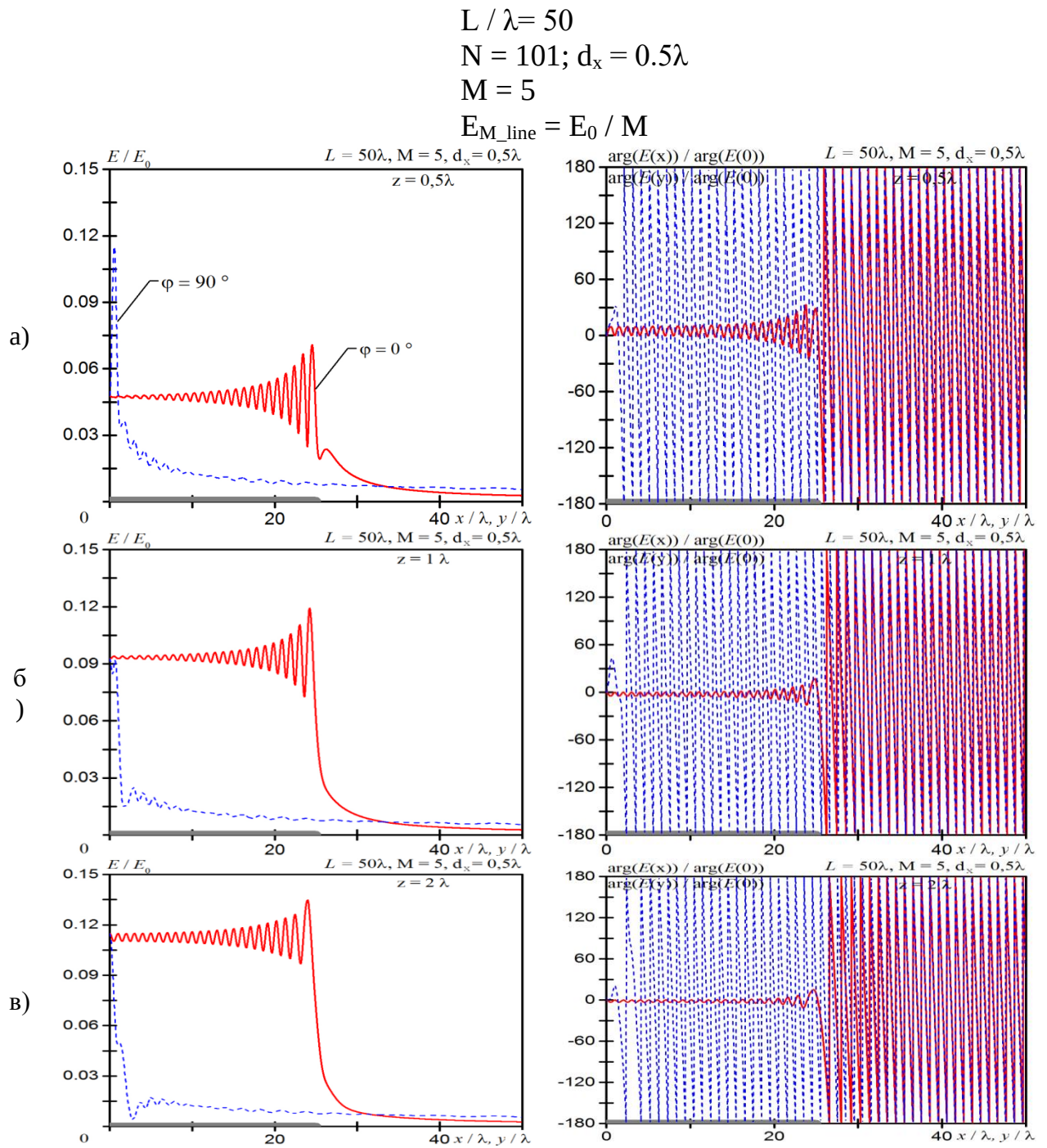


Рисунок 5.15 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

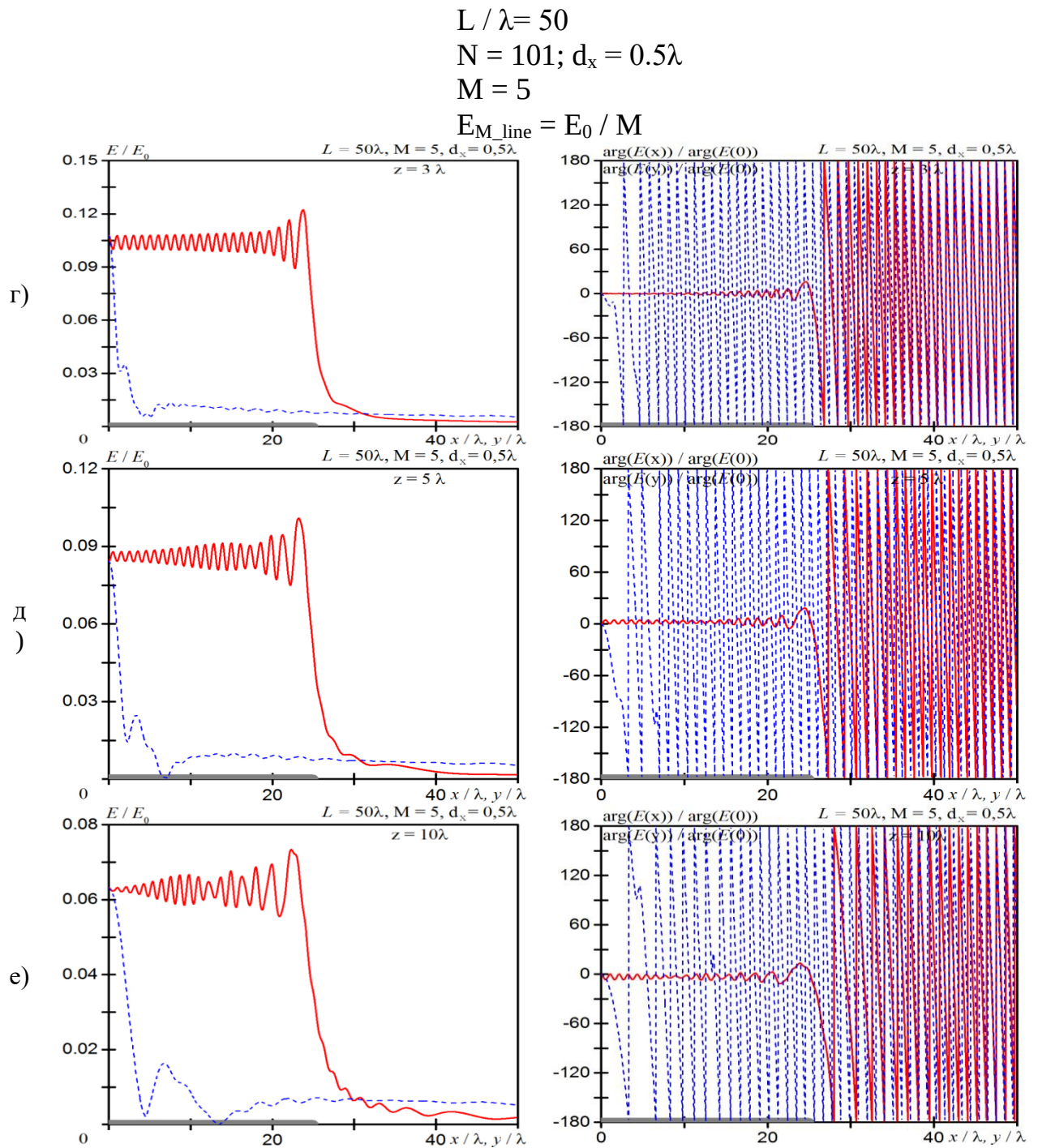


Рисунок 5.16 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкриття антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Характеристики прямокутної решітки:

Розкрив: $L / \lambda = 50$

Вздовж Ох: $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

Вздовж Оу: $M = 10$

Амплітуда $E_{M_line} = E_0 / M$

Вид решітки:

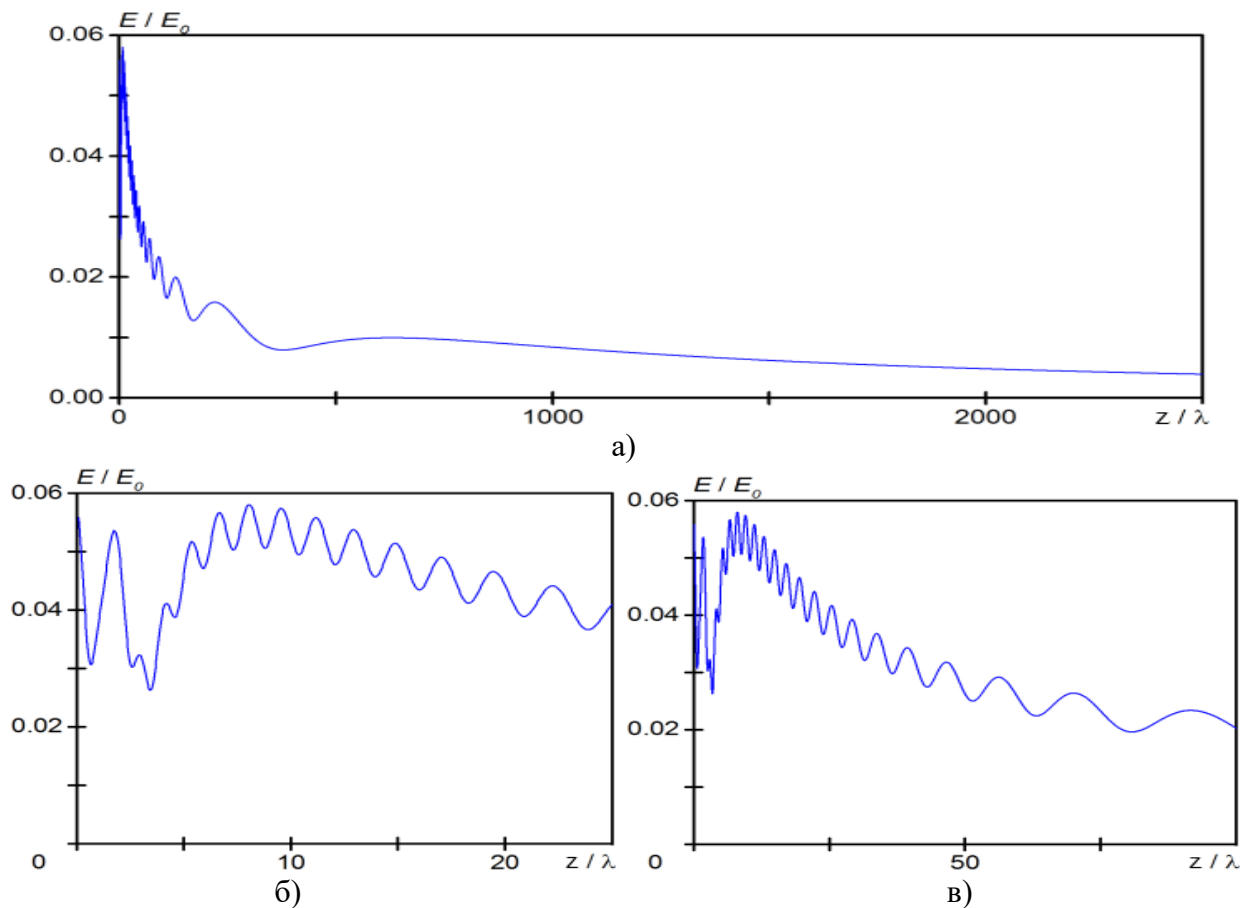
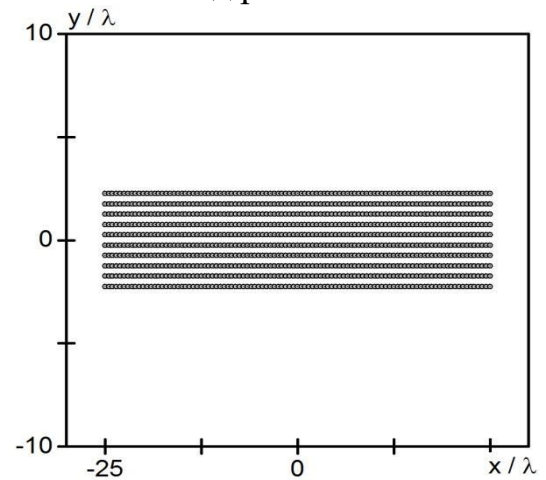


Рисунок 5.17 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5\lambda$) з лінійним розкривом 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриву: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6\lambda$)

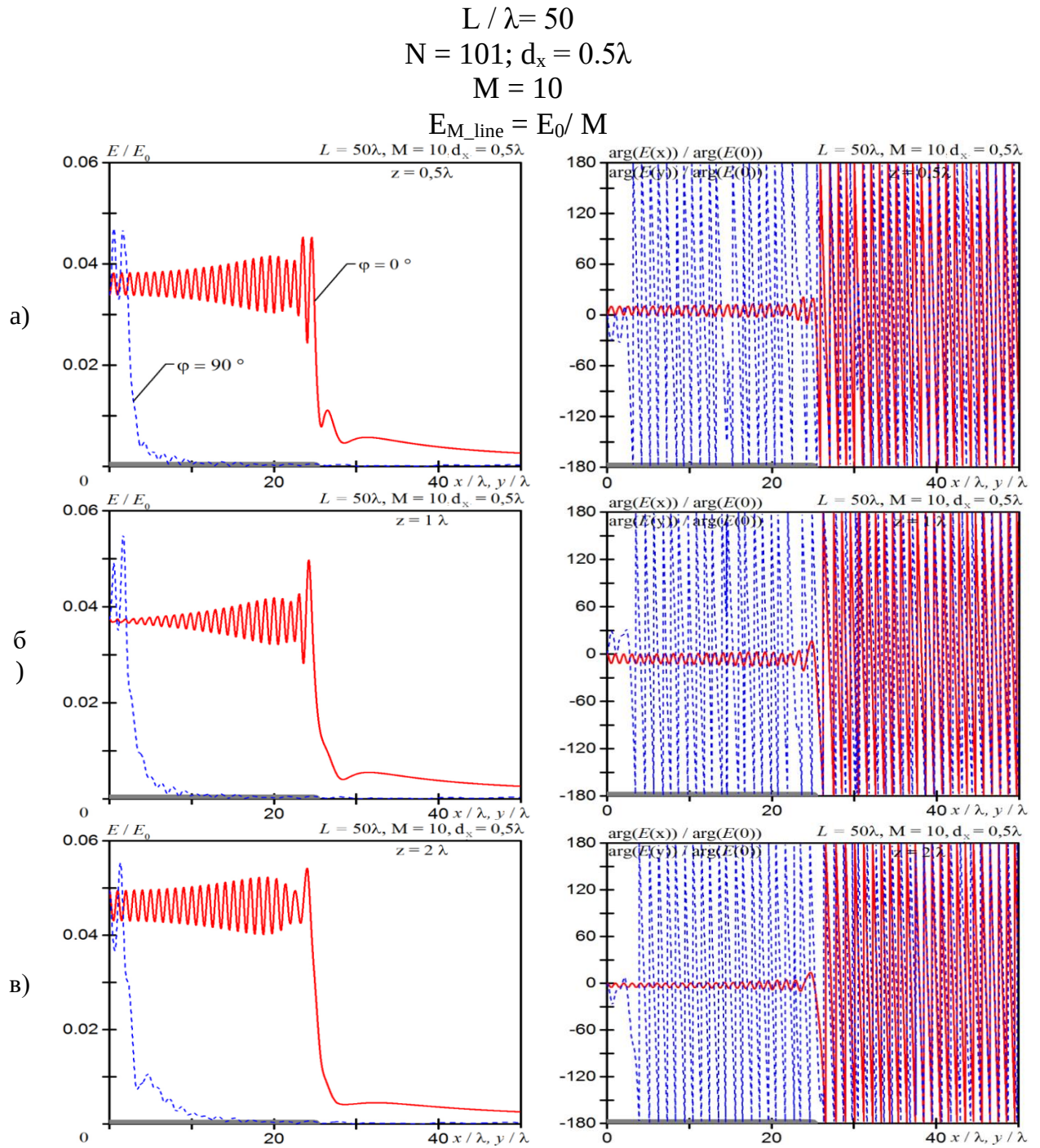


Рисунок 5.18 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкриття антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

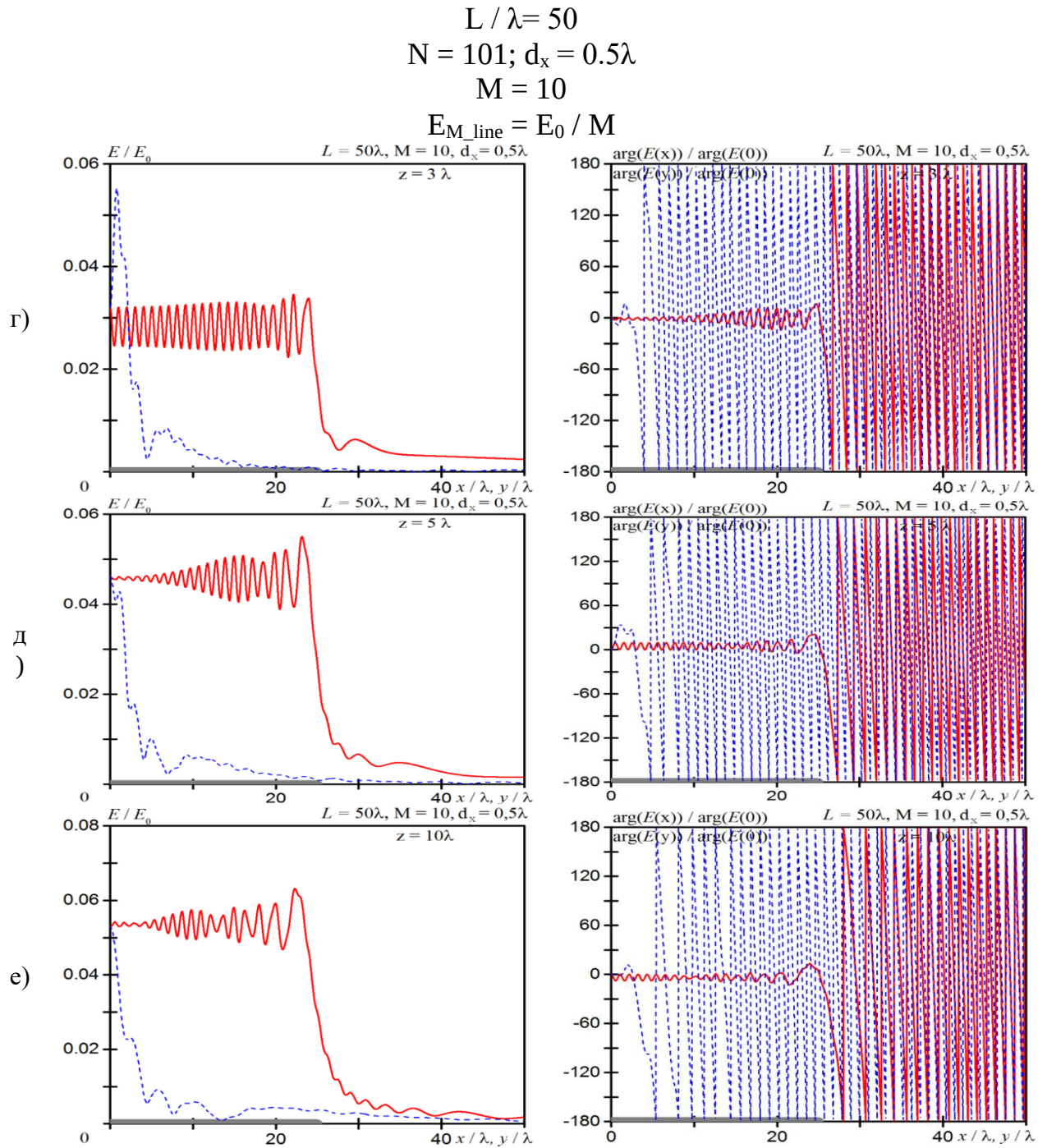


Рисунок 5.19 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

Вид решітки:

Характеристики прямокутної решітки:

Розкриття: $L / \lambda = 50$

Вздовж Ox : $N = 101$; $d_x = 0.5\lambda$

Вздовж Oy : $M = 101$

Амплітуда: $E_{M_line} = E_0 / M$

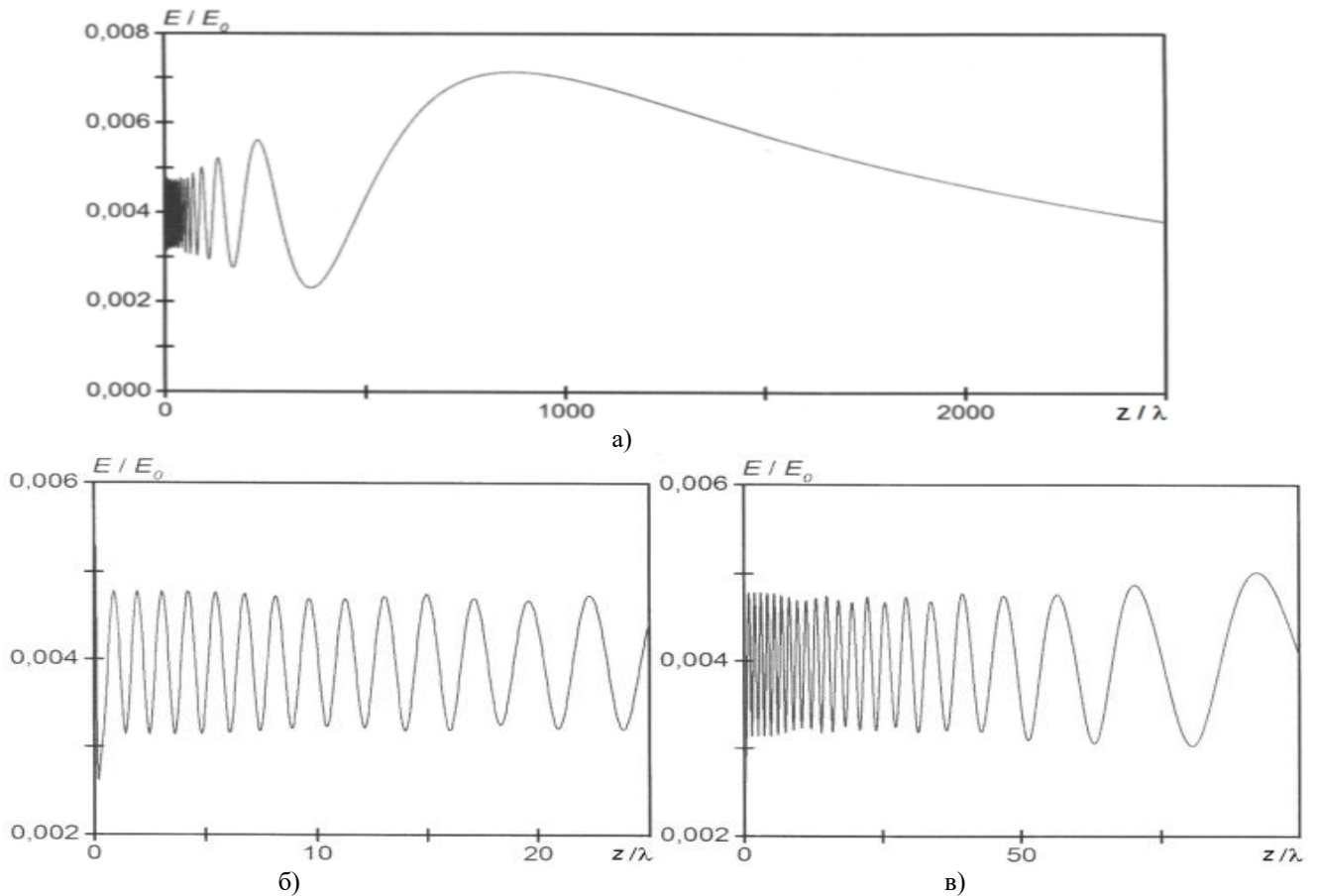
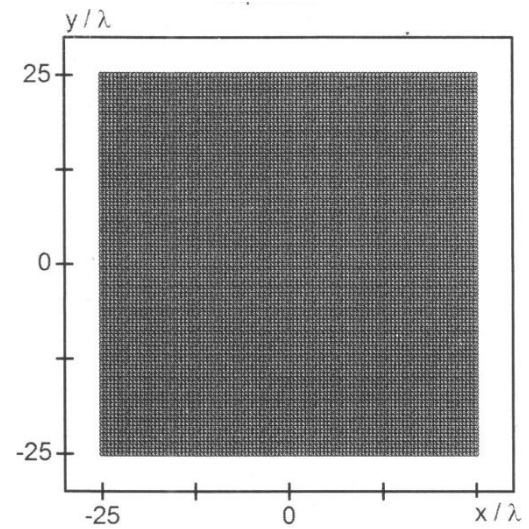


Рисунок 5.20 – Залежність амплітуди поля решітки ($d = 0.5 \lambda$) з лінійним розкриттям 50λ від відстані в напрямку нормалі до розкриття: а - до відстані дальньої зони (2500λ); б - до відстані 25λ ; в - до відстані ближньої зони ($104,6 \lambda$).

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 101;$$

$$E_{M_line} = E_0/M$$

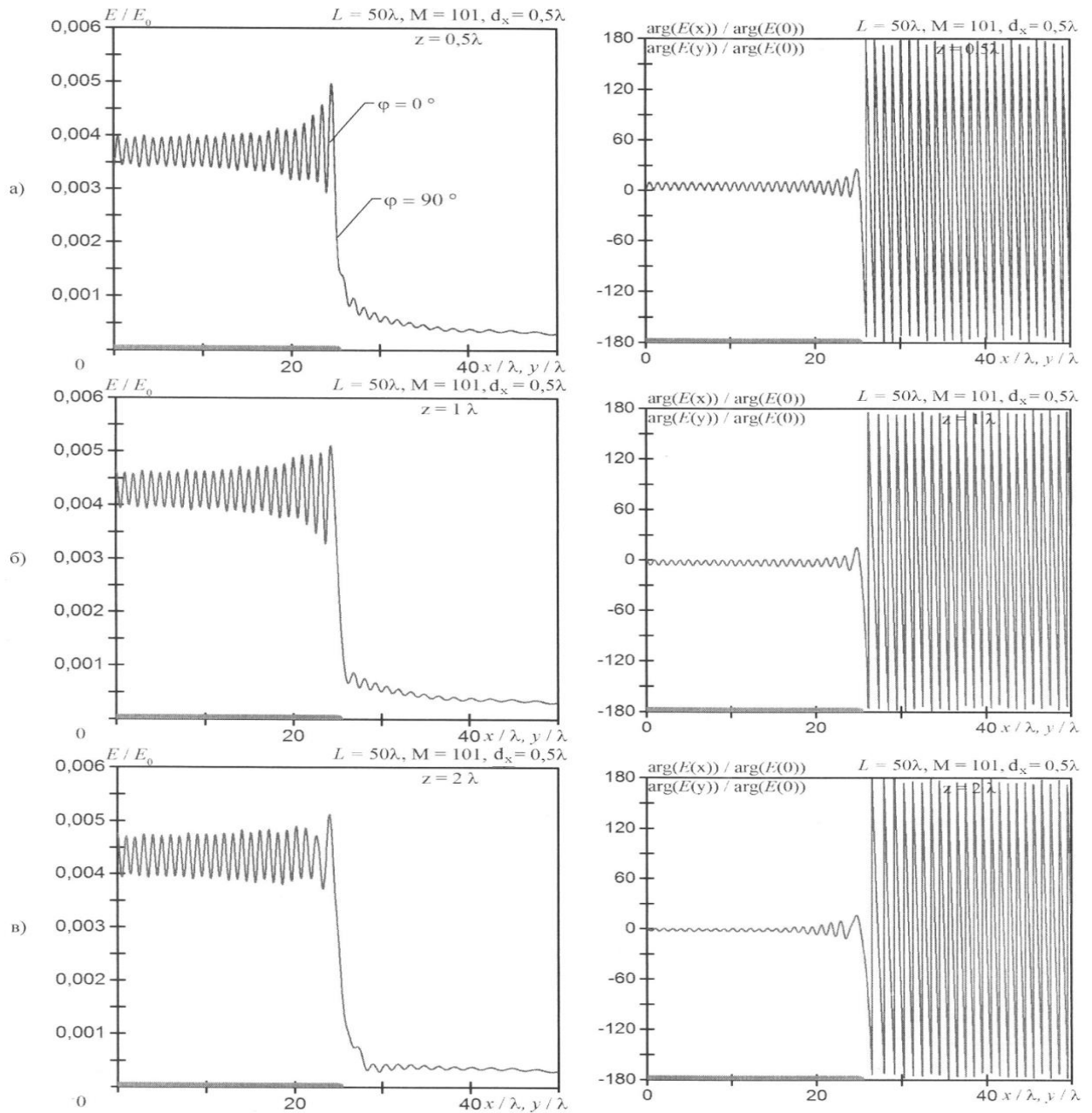


Рисунок 5.21 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

а) $z = 0.5\lambda$; б) $z = 1\lambda$; в) $z = 2\lambda$;

$$L / \lambda = 50$$

$$N = 101; d_x = 0.5\lambda$$

$$M = 101;$$

$$E_{M_line} = E_0 / M$$

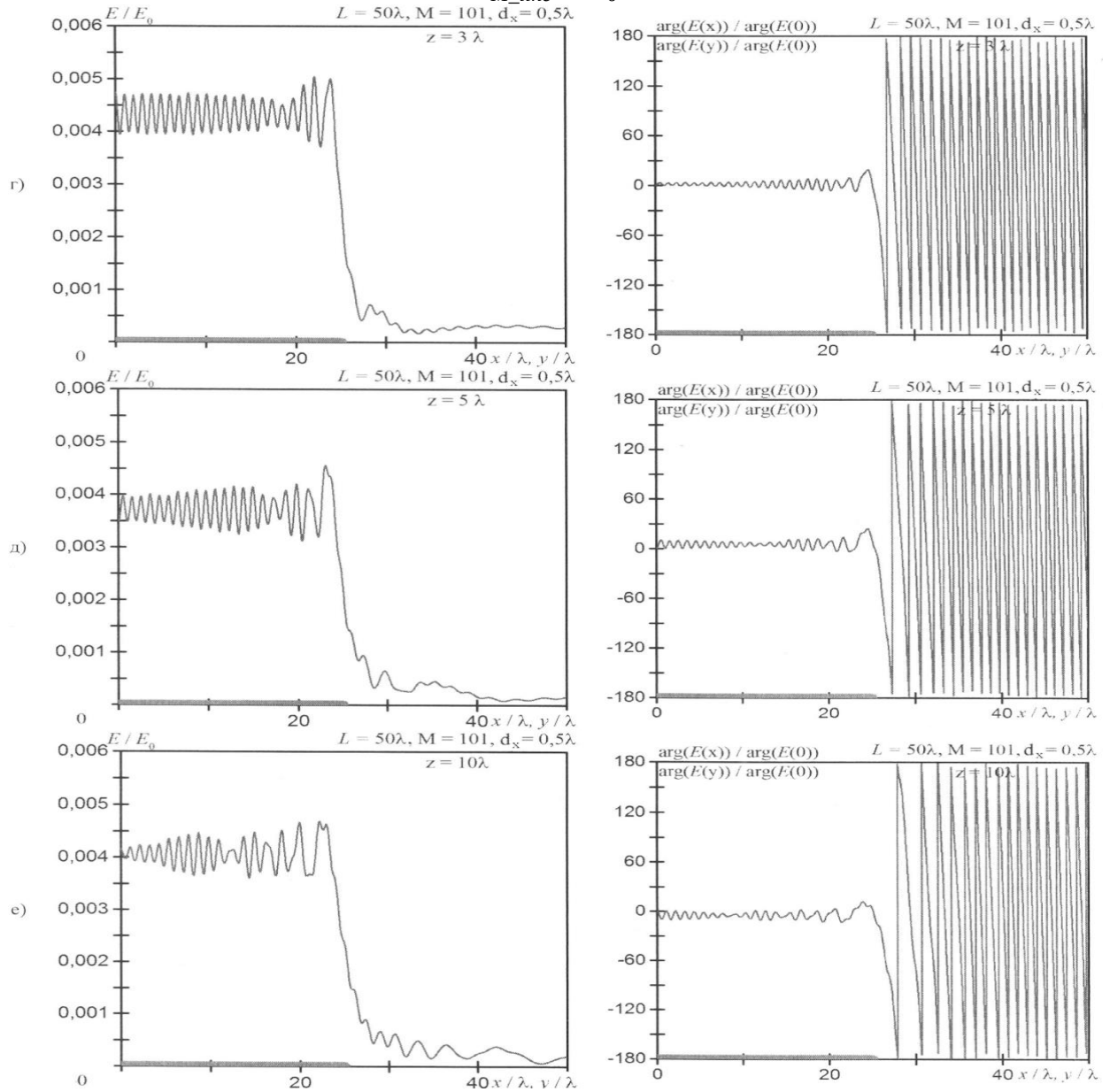


Рисунок 5.22 – Залежність амплітуди і фази поля решітки ($d_x=0.5\lambda$) з розкритом 50λ від поперечних координат на різних відстанях z від розкритву антени:

г) $z = 3\lambda$; д) $z = 5\lambda$; е) $z = 10\lambda$;

- в тих же площинах і тих же поперечних перетинах простору спостереження розрахунки фронту хвилі підтверджують отриманий висновок: в цих областях простору спостереження формується локально плоска слабконеоднорідна електромагнітна хвиля, як в прожекторному промені апертурних антен з розкритом круглої або квадратної форми;
- в напрямку нормалі до квазілінійної антенної решітки амплітуда поля в залежності від поздовжньої координати z має характер швидко спадної функції зі слабкими осциляціями, тобто принципово відрізняється від такої залежності у випадку прожекторного променя.

Для порівняння на рис. 5.20-5.22 наведені такі ж розрахунки для квадратної антенної решітки з електричними розмірами 50×50 довжин хвиль і тих же відстанях між випромінювачами, рівних половині довжини хвилі. Така решітка в ближній зоні формує типовий прожекторний промінь. Порівняння результатів розрахунків, наведених на рис. 5.20-5.22, і наведених вище для квазілінійних решіток ілюструє всі особливості квазіпрожекторних променів.

В результаті наведені вище розрахунки амплітуд і фаз електромагнітних полів квазілінійних антенних решіток, доводять можливості формування квазіпрожектора подібного до прожекторного променя при постійній потужності збудження антени і кількості розширень більше трьох-чотирьох, тобто при відношенні ширини апертури до її довжини більше 1:30, як у випадку однорідної квазілінійної антенної решітки. Зауважимо, що це доводить також можливість формування локального пучка променів у напрямку головного максимуму діаграми направленості антенної решітки.

6. ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичне забезпечення для розв'язання зовнішньої векторної задачі електродинаміки щодо випромінювання рівномірних однорідних синфазних плоских багатокільцевих антенних решіток з круглим розкритом в ближній і проміжній зонах спостереження. Детальні обчислення амплітудних і фазових характеристик електромагнітних полів, як у напрямку нормалі до розкриття, так і в залежності від поперечних координат при зміні діаметра розкриття від 0,5 до 200 довжин хвиль і відстаней між випромінювачами від 0,25 до 2 довжин хвиль, дозволили вивчити фундаментальні ефекти у формуванні просторового розподілу електромагнітних полів в ближній зоні антенних решіток.

2. З аналізу результатів обчислень встановлено, що якщо розміри апертури подібних антен не перевищують однієї - півтори довжини хвилі, амплітуда поля в напрямку нормалі до розкриття рівномірно та досить швидко зменшується, і прожекторні промені не формуються, як і у випадку лінійних антен. Відстань дальньої зони таких антен приблизно дорівнює двом довжинам хвиль.

3. У випадку апертурних антенних решіток з розкритом круглої форми з діаметром від половини до двох довжин хвиль в ближній зоні формується прожекторний промінь, який являє собою локально обмежену слабо неоднорідну плоску хвилю, в якій в процесі поширення зберігається незмінною середня амплітуда поля. На відміну від неперервних апертурних антен з розкритом круглої форми, в яких в прожекторному промені середня амплітуда поля дорівнює її значенню в центрі розкриття, у багатокільцевих рівномірних апертурних антенних

решітках середня амплітуда поля в ближній зоні залежить від кількості випромінювачів, відстані між ними та електричних розмірів розкриву.

4. Показано, що різниця амплітуди поля в прожекторному промені в напрямку нормалі до розкриву, тобто продольні градієнти амплітуди поля, у випадку багатокільцевих антенних решіток значно більші, ніж у випадку лінійних, квазілінійних, прямокутних і квадратних апертур. При збільшенні діаметрів круглих апертур значно зменшуються мінімальні значення амплітуд полів в ближній зоні, тобто утворюються "мертві зони" в радіолокаційних, телекомунікаційних і технологічних радіоелектронних системах, які працюють в ближній зоні антенних пристроїв. Збільшення відстані між випромінювачами призводить до порушення рівномірного характеру осциляцій амплітуди та потужності електромагнітного поля в ближній зоні однорідних апертурних антенних решіток осьової симетрії. Виявлено явище збільшення амплітуди поля поза прожекторним променем в ближній зоні розріджених кільцевих антенних решіток.

5. У ближній зоні лінійної еквідистантної антенної решітки амплітуда поля в напрямку головного максимуму діаграми напрямленості має швидко спадаючий характер з осциляціями, просторовий період яких збільшується при збільшенні відстані між антеною і точкою спостереження. При відстані між випромінювачами решітки, що не перевищує половину довжини хвилі, характер просторового розподілу поля в її ближній зоні такий же, як і в ближній зоні лінійної антени з безперервним розподілом джерел. При збільшенні відстані між випромінювачами, тобто в розріджених антенних решітках, характер просторового розподілу поля в ближній зоні лінійних антенних решіток відрізняється збільшенням рівня осциляцій амплітуди і фази поля і більш складним нерегулярним характером.

6. На основі розробленого математичного забезпечення рішення задачі розрахунку амплітудних, фазових та поляризаційних характеристик електромагнітних полів в ближній зоні квазілінійних антенних решіток досліджено просторовий розподіл поля поблизу таких решіток великої електричної довжини. Показано, що в таких решітках в площинах спостереження, в яких розташовані електрично довгі антенні лінійки, формується квазіпрожекторний промінь, в якому амплітуда і фаза поля в залежності від поперечної координати змінюється мало, а залежність від поздовжньої координати в напрямку поширення хвилі має вигляд швидко спадної функції зі слабкими осциляціями. Показано, що в квазілінійних антенних решітках великої електричної довжини прожекторний промінь формується при числі лінійних підрешіток, більшому 3-4, тобто при відношенні ширини розкриття антени до її довжини, більшому 1:30. Показано також, що при заданій електричній довжині квазілінійної антенної решітки вибором числа лінійних підрешіток і відстані між ними можна вирішити задачу конструктивного синтезу антенної решітки для мобільного і/або технологічного радіозв'язку в тунелях метрополітену, шахтах і подібних складних для поширення радіохвиль комунікаційних системах зі значним зменшенням амплітуди і потужності електромагнітного поля поза робочою областю, тобто вирішити задачу забезпечення електромагнітної безпеки в екстремальних умовах поширення електромагнітних хвиль.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Катрич В.О., Нестеренко М.В., Пенкін Ю.М., Бердник С.Л., Думін О.М., Горобець М.М., Єлісеєва Н.П., Дробахін О.О., Почанін Г.П. Випромінювач і структури багатофункціональних радіоелектронних систем. LAPLAMBERT Academic Publishing. 2017. - 400с.
2. Горобець М.М., Овсянникова О.Є. Хвильові процеси в ближній зоні слабкоспрямованих апертурних випромінювачів електромагнітних хвиль. Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник "Радіотехніка". 2015. Вип. 183. С. 105–115.
3. Горобець М.М., Овсянникова О.Є. Хвильові процеси в ближній зоні апертурних антен з розкритом круглої форми. Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія "Радіофізика та електроніка". 2017. Вип. 26. С. 24-34.
4. Горобець М.М., Лебедєв А.С. Електромагнітні поля в ближній зоні лінійних антенних решіток. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія "Радіофізика та електроніка". 2016, Вип. 25. С. 3-11.
5. Булгакова Г.О., Горобець М.М., Катрич В.О., Лященко В.О. Коефіцієнт направленої дії антенних решіток. Радіофізика і радіоастрономія. 2016, Т. 21, № 4. С. 285–297.
6. Institute of Radio Engineers. Professional Group on Antennas and Propagation, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Antennas and Propagation Group. IRE Transactions on Antennas and Propagation, Том 8. IEEE, 1960. С.344-346.
7. Gorobets M. M., Lebedev A.S. Electromagnetic waves near antenna arrays male electric size // 8th International Conference on Ultrawideband and

Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS'2016). September 05 - 11, 2016. Odessa, Ukrain. - p. 225-227.

8. Gorobets M.M., Lebedev A.S. Electromagnetic waves in the searchlight beam of antenna arrays of electrical size //9-th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24, 2016: Proc. Kharkiv, 2016.

9. Gorobets N. N., Ovsyannikova Ye. Ye. Wave processes in the near-field zone of large aperture antenna // 9-th International Kharkiv Symposium на Physics i Engineering of Microwaves, Millimeter, i Submillimeter Waves (MSMW-2016), June 20-24, 2016: Proc. Kharkiv, 2016.

10. Laybros S., Combes P.F., Mametsa H.J. The “Very-Near-Field”Region of Equipphase Radiating Apertures. // IEEE Antennas Propagation Magazin.Angust 2005. Vol.47, №4.-pp.50-66.