

## ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ СИГНАЛІВ

Т.В. Гаврилова\*, С.А. Провалов\*\*, Ю.Б. Сидоренко\*\*

\*Харківський національний автомобільно-дорожній університет

\*\*Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова  
gavrilova.tatyana@i.ua

В сучасному процесі розвитку фундаментальних наукових досліджень викликає інтерес точні комплекси приладів, які працюють на терагерцових частотах хвиль від 0,1 до 10 ТГц. Для передачі електромагнітних хвиль, як правило, використовують квазіоптичні лінії передачі, в яких електромагнітне випромінювання поширюється у вигляді хвильових пучків [1].

Відмітимо, що хвильові пучки володіють унікальними функціональними можливостями, які дозволяють широко використовувати поляризаційні принципи та методи у радіотехнічних вимірах. Облік поляризації сигналу значно підвищує інформативність та точність вимірювань у порівнянні з вимірами за допомогою хвилеводної радіовимірювальної апаратури. Дедалі ширшу увагу дослідників привертає еліпсометрія, під якій розуміють оптичний метод дослідження поверхонь або об'ємних середовищ, який заснований на аналізі амплітудних і фазових змін світлової хвилі при її взаємодії з досліджуваним об'єктом. Спектральний діапазон, в якому використовуються ідеї та принципи методу еліпсометрії, дуже широкий і перекриває область від мікрохвильового випромінювання (радіохвильова еліпсометрія) до м'якого рентгенівського (еліпсометрія синхротронного випромінювання).

Такий метод є високочутливим і точним, що дозволяє проводити дослідження поверхонь і меж розділу різних середовищ (твердих, рідких, газоподібних). Важливими перевагами еліпсометрії є також неруйнівний та незбурний характер вимірювань, можливість вивчення кінетики швидкоплинних явищ та вимірювань за різних фізичних умов (температурі, тиску, в агресивному середовищі). Основними сферами застосування еліпсометрії є нанотехнологія, фізика та хімія поверхні тонких плівок, оптика, кристалофізика, електрохімія.

Розвиток методів та засобів радіофізичної інтроскопії оптично непрозорих середовищ природного та штучного походження потребує вирішення електродинамічних задач в строгій постановці. Прикладом такої задачі є визначення характеристик електромагнітної хвилі у вигляді хвильового пучка після дифракції на періодичній структурі.

В роботі [2] розглядалась система, побудована стрічковою дифракційною решіткою (ДР), електродинамічно пов'язаної із планарним діелектричним шаром (рис. 1). Показано, що така система виявляється антеною дифракційного випромінювання, яка дозволяє формувати

спрямоване випромінювання в двох незалежних режимах  $E$  або  $H$  поляризації.

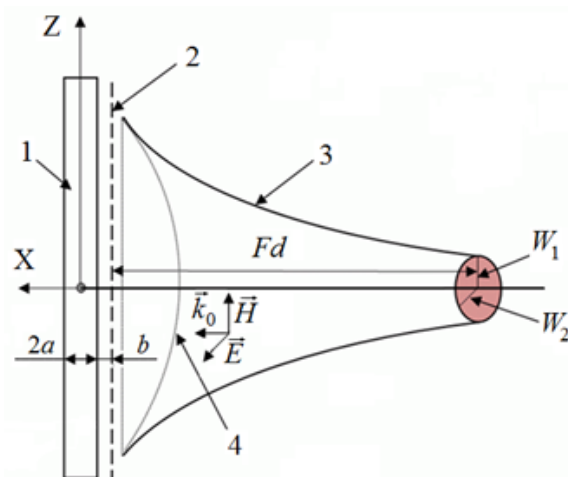


Рис. 1. Контури електродинамічної структури в задачі дифракції обмеженого гаусового хвильоводного пучка на ПДР, електродинамічно пов'язаної з ПДХ

1 – планарний діелектричний хвильовод (ПДХ) товщиною  $2a$  і діелектричною проникністю  $\epsilon_1$ ; 2 – планарна дифракційна решітка (ПДР); 3 – контур антенного променя; 4 – лінза, що фокусує промінь на невеликій відстані від антени у зоні Френеля;

$W_1$  і  $W_2$  – ширина променя у взаємно перпендикулярних напрямках  $Oy$  і  $Oz$ ;  $Fd$  – фокусна відстань;  $b$  – величина зазору між ПДХ і ПДР.

Формальне рішення задачі дифракції обмеженого гаусового хвильоводного пучка на запропонованій системі нерозривно спричиняє необхідність до вирішення нескінченної системи неоднорідних лінійних алгебраїчних рівнянь, що визначає невідомі коефіцієнти Фур'є розкладання полів [3]. Це дає можливість розраховувати структуру електромагнітних хвиль в різних областях досліджуваної системи. При цьому для отримання фізичних результатів чисельне рішення в широкому діапазоні параметрів структури, що досліджується, можна обґрунтовано одержати при застосуванні методу редукції.

Основні фізичні характеристики електромагнітного поля, розсіяного на дифракційній решітці і електродинамічно пов'язаної з діелектричним шаром, можна отримати в аналітичному вигляді, використовуючи деякі фізичні наближення. Перше з них передбачає, що решітка розташована досить близько від діелектричного шару, друга умова є резонансною і вимагає, щоб по товщині шару уздовж координати  $Ox$  вкладалося ціле число півхвиль, остання відповідає довгохвильовому наближенню стосовно параметрів дифракційної решітки.

Проводячи відповідні математичні перетворення, ми отримали вираз для ширини дифракційного гаусового пучка, яке показує форму та структуру розсіяного електромагнітного поля у разі відсутності зсуву фазових центрів:

$$W_{ig}^2 = W_i^2 \left\{ 1 + \frac{\frac{2l}{\pi} \ln \frac{1+u}{2} \left( \frac{l}{2\pi} \ln \frac{1+u}{2} - 2(x+a+b+L) \right)}{k_0^2 \tilde{W}_i^4 + 4(x+a+b+L)^2} \right\}, \quad (1)$$

де  $i=1,2$  – індекс, який стосується ширини дифракційного пучка в площинах  $xOy$  і  $xOz$ , відповідно;  $u=d/l$ ,  $d$  – ширина стрічки ДР,  $l$  – період ПДР.

З виразу (1) випливає, що зі збільшенням коефіцієнта заповнення решітки  $u$  дифракційна добавка до первісної ширини пучка зменшується. При  $u=1$ , тобто коли дифракційна решітка переходить в ідеально відбиваючу площину, дифракційні ефекти зникають і дифракційний гаусів пучок має ширини у взаємно перпендикулярних площинах, рівні відповідним ширинам в падаючому пучку. Збільшення радіусу плями поля збуджуючого гаусового пучка призводить до зменшення дифракційної добавки до ширини пучка. Фізично це пояснюється тим, що при цьому випадку радіус кривизни фазового фронту прагне нескінченності і за своїми характеристиками наближається до структури поля плоскої хвилі.

Ширина дифракційного пучка в площині  $x = const$ , яка співпадає з площиною горловини пучка, тобто в фокусі лінзи, визначається наступним виразом:

$$W_{ig}^2 = W_i^2 \left[ 1 + \frac{l^2 \ln^2 \left( \frac{1+u}{2} \right)}{\pi^2 k_0^2 \tilde{W}_1^4} \right]. \quad (2)$$

Розгляд (2) дає, що дифракційний пучок в цій площині ширше падаючого, і різниця між ними зростає зі збільшенням періоду решітки та зі збільшенням ширини щілини між її стрічками.

У випадку, коли в гаусовому пучку, що падає, існує зміщення між фазовими центрами, ширина відбитого пучка визначається з наступного співвідношення:

$$W_{ig}^2 = W_i^2 \left[ 1 + 4 \frac{\left( \tilde{c} - \frac{l}{\pi} \ln \frac{1+u}{2} \right) + \frac{1}{4} \left( \tilde{c} - \frac{l}{\pi} \ln \frac{1+u}{2} \right)^2}{k_0^2 \tilde{W}_i^4 + 4x_i^2} \right]. \quad (3)$$

Зміни амплітудної поверхні падаючого пучка пов'язане зі зсувом фазових фронтів, що призводить до збільшення ширини дифракційного

пучка. Також з (3) випливає, що при розсіюванні гаусового пучка на обраній поляризації ( $E$  – поляризація) деформація структури променя збільшується зі зменшенням коефіцієнта заповнення решітки. Періодичність перешкоди в напрямку осі  $Oz$  позначається на формі перетину дифракційного пучка у вигляді збільшення його ширини в цьому напрямку. З цього випливає, що при розробці антени дифракційного випромінювання з діелектричною лінзою необхідно збільшувати відповідний розмір апертури для досягнення симетричності приймальної діаграми.

На рис. 2 проілюстровано просторову динаміку розширення дифракційного гаусового пучка.

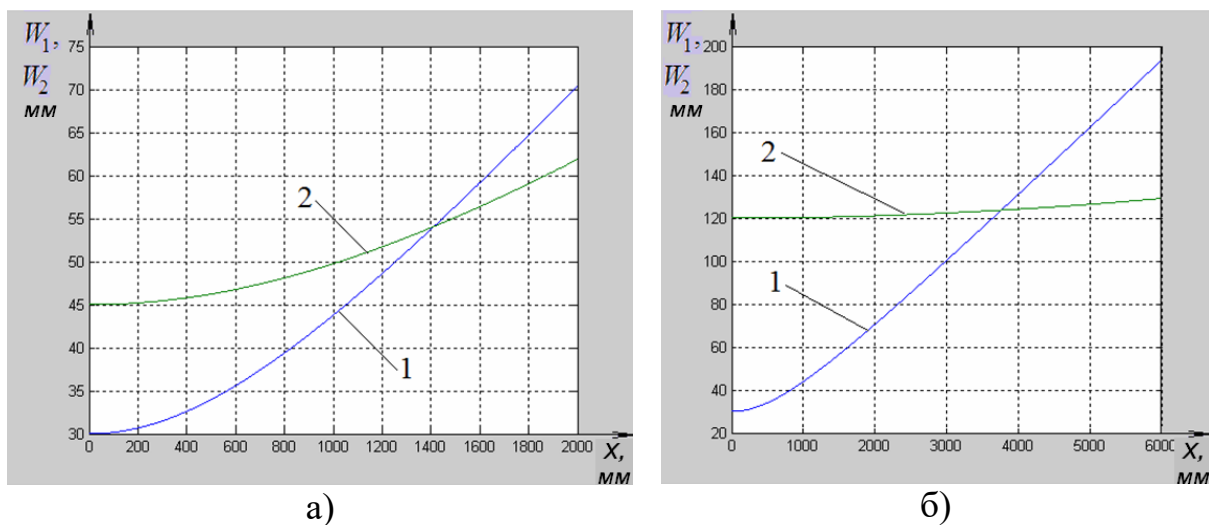


Рис. 2. Залежність ширини радіуса пучка вздовж напрямку осі  $Ox$

Параметри  $\tilde{c} = 0,0 \lambda$ ;  $\lambda = 3,0$  мм;  $l = 1,4$  мм

а)  $\tilde{W}_1 = 10 \lambda$ ,  $\tilde{W}_2 = 15 \lambda$ ; б)  $\tilde{W}_1 = 10 \lambda$ ,  $\tilde{W}_2 = 40 \lambda$ ;

позначка 1 –  $W_1$ ; позначка 2 –  $W_2$

Хвильові пучки, що мають різну початкову ширину в горловині (пучки еліптичного виду, тобто пучки з відповідними значеннями великої та малої осі еліпса в перерізі), мають різну ступінь розбіжності початкової ширини в різних напрямках, а саме, в напрямку більшої осі еліпса ступінь розширення менший, а в напрямку меншої осі – більший.

У міру просторового поширення пучка при зміні величин осей еліпса еліптичність пучка зникає, перетворюючись у круглий пучок з однаковими величинами ширин у площині  $xOy$  та  $xOz$ . На показаних кривих це відповідає точці перетину залежності ширини радіуса пучка в указаних площинах вздовж напрямку поширення.

У міру подальшого поширення пучок знову перетворюється на еліптичний, зі зміною місць великої та малої його осей. Орієнтація великої осі еліпса по осі  $Oy$  стає на місце осі  $Oz$ , а мала вісь еліпса  $Oz$  переміщується на місце осі  $Oy$ . Відбувається своєрідне обертання гаусового пучка вздовж осі, спрямованої вздовж напрямку його поширення.

Таким чином, отримані результати свідчать, що періодичність перешкоди позначається на формі перетину дифракційного пучка у вигляді розширення у одному із напрямків. Відбувається спотворення амплітудної та фазової структур дифракційного пучка. Різниця величин ширини пучка у взаємно перпендикулярних напрямках і можливе зміщення їх фазових центрів призводить до спотворення структури пучка, що виявляється в його астигматизмі. Як наслідок цього, виникає необхідність корекції лінзової системи в антенній системі, що проектується.

## Література

1. Hofmann, Tino; Herzinger, C. M.; Boosalis, A.; Tiwald, T. E.; Woollam, John A.; and Schubert, Mathias, "Variable-wavelength frequency-domain terahertz ellipsometry" (2010). Faculty Publications from the Department of Electrical and Computer Engineering. 118. <https://digitalcommons.unl.edu/electricalengineeringfacpub/118>
2. Provalov S., Sydorenko Yu., Shylo S. Estimation of the parameters of focused beams at short distances for antennas of diffraction radiation at the millimeter wave band. *American Journal of Electromagnetics and Applications*, 2022, Vol. 10, no. 2, pp. 16-24. doi: 10.11648/j.ajea.20221002.11
3. Provalov S., Sydorenko Y., Shylo S. Wheeler D. Compact MMW-band Planar Diffraction Type Antennas for Various Applications. *American Journal of Electromagnetics and Applications*, 2020, Vol. 8, no. 1, pp. 18-27.

УДК 624.132.3

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КУРСОВОЇ СТІЙКОСТІ ГРУНТОПРОКОЛЮЮЧОЇ ГОЛОВКИ ВІД ОСІ ПРИ СТАТИЧНОМУ ПРОКОЛІ ҐРУНТУ

В.М. Супонев В.М, В.М. Рагулін, В.В. Наволоков, О.О. Лемець  
*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*  
*v-suponev@ukr.net; ragulinrvn@ukr.net; slaviknavolokov@gmail.com;*  
*m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua*

В сучасних міських умовах виникає необхідність прокладання різноманітних інженерних комунікацій, які проходять під дорогами, будинками та спорудами. Для безтраншейного прокладання підземних комунікацій доцільне використання малогабаритних, легко та швидко монтованих установок. Одним з методів та його обладнання, котрий відповідає цим вимогам є установки для статичного проколу ґрунту. Метод дозволяє ефективно прокладати розподільні мережі, діаметр яких у більшості випадків не перевищує 300 мм, а довжина підземної проходки визначається шириною шляхів та трамвайних колій, які необхідно перетинати при