

Процедура та особливості оптимізації профілю компактних діелектричних лінз для інтегрованих антен мм діапазону

А. В. Борискін

*Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: a_boriskin@yahoo.com*

Стаття надійшла до редакції 30 травня 2007 р.

Досліджується можливість підвищення коефіцієнта спрямованої дії та зменшення розмірів інтегрованих лінзових антен шляхом оптимізації форми лінзи. Задача дифракції розв'язана чисельно у двовимірному формулюванні з використанням методів граничних інтегральних рівнянь типу Мюллера у поєднанні з методом аналітичної регуляризації та дискретизацією за схемою Гальоркіна. Алгоритм оптимізації побудовано за принципом генетичного алгоритму. Розроблений алгоритм гарантує контрольовану точність обчислення полів для будь-яких параметрів лінзи та швидкий пошук екстремуму цільової функції. Числові результати наведено для рексолітової лінзи, яка опромінюється E - та H -поляризованим точковим джерелом.

Вступ

Діелектричні лінзи є ключовими компонентами інтегрованих антен в системах мм та субмм діапазону хвиль, таких, як системи локального, мобільного та супутникового зв'язку [1-5], системи забезпечення безпеки руху [6], радіозору [7, 8], ТГц-спектроскопії [9] тощо. Вони використовуються для колімації, фокусування та розсіювання або керування пучком електромагнітних хвиль у залежності від передбаченого застосування.

Традиційно дизайн більшості діелектричних лінзових антен (ДЛА) базується на еліптичних лінзах або їх похідних (рис. 1, а) [10, 11]. Це пояснюється тим, що в наближенні геометричної оптики еліптична форма є ідеальною, тобто такою, що дозволяє зібрати усі паралельні промені у дальньому фокусі еліпса, якщо його ексцентриситет співвідноситься з діелектричною проникністю як $e = 1/\sqrt{\epsilon}$. З метою зменшення розмірів антен та адаптації їх технічних характеристик до вимог сучасних застосувань

було запропоновано використання лінз більш складної форми (рис. 1, б) [2, 12, 13]. Розробка таких антен є можливою лише шляхом попереднього комп'ютерного моделювання, яке дозволяє значно скоротити час на їх проектування та уникнути кошового виготовлення прототипів та тривалих вимірювань. Найбільш вразливим місцем на цьому шляху є недосконалість існуючих числових алгоритмів, які використовуються для аналізу ДЛА. Дотепер більшість програм аналізу та синтезу ДЛА спиралась на оптичні наближення типу геометричної та фізичної оптики [1-3, 9-11, 13], що унеможливило врахування резонансних ефектів усередині лінз [14]. Проте, як було нещодавно продемонстровано, внутрішні резонанси відіграють важливу роль у поведінці компактних діелектричних лінз [15]. Використання більш досконалих алгоритмів може дозволити дослідити електромагнітні властивості діелектричних лінз скінченних розмірів та знайти шляхи покращення робочих характеристик ДЛА.

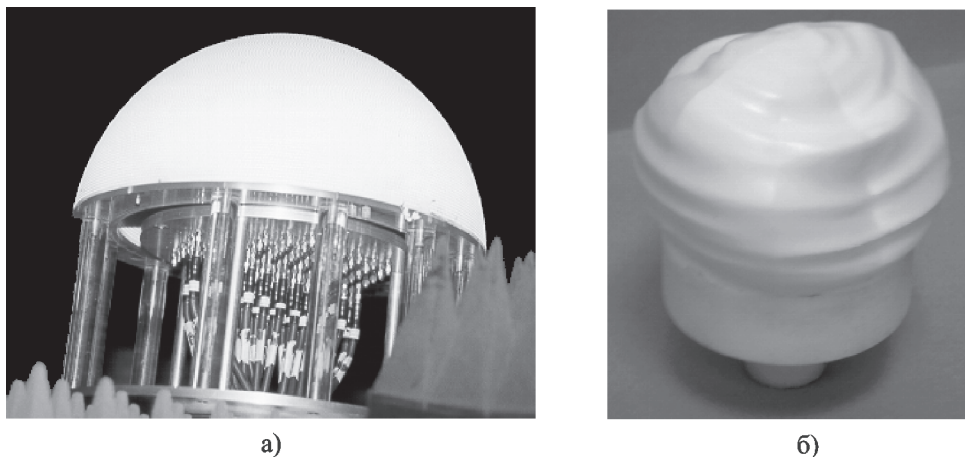


Рис. 1. Прототипи ДЛА для систем зв'язку, виготовлені на базі: а) напівеліптичної лінзи [5]; б) лінзи з синтезованим профілем [4]

Метою цієї роботи є розробка ефективного числового алгоритму для точного аналізу та швидкої оптимізації форми компактних діелектричних лінз типу, що використовується в інтегральних ДЛА, та дослідження особливостей оптимізацій їх профілю з метою зменшення геометричних розмірів та підвищення коефіцієнту спрямованої дії (КСД). Розроблений алгоритм спирається на методи граничних інтегральних рівнянь (ГІР) типу Мюллера та генетичний алгоритм (ГА), що забезпечує контрольовану точність та швидкодію.

Постановка задачі та методи дослідження

У роботі діелектрична лінза моделюється однорідним діелектричним циліндром із довільним поперечним перерізом, контур якої описано за допомогою кубічних сплайнів. Така двовимірна модель є спрощеною, проте вона дозволяє дослідити резонансні явища усередині лінзи та з'ясувати основні принципи та особливості оптимізації форми лінз з малими хвильовими розмірами. У якості первинного джерела використане точкове джерело (коло зі струмом), розташоване ззовні лінзи на відстані

$\delta_s = \lambda_0/50$ (λ_0 – довжина хвилі у вакуумі) від її основи (рис. 2). Основа лінзи проходить через геометричний фокус повного еліпса, що відповідає оптимальному дизайну, відомому із променевої теорії. Осьова симетрія лінзи враховується через віддзеркалення.

Для розв'язання задачі дифракції використовується метод ГІР Мюллера, що га-

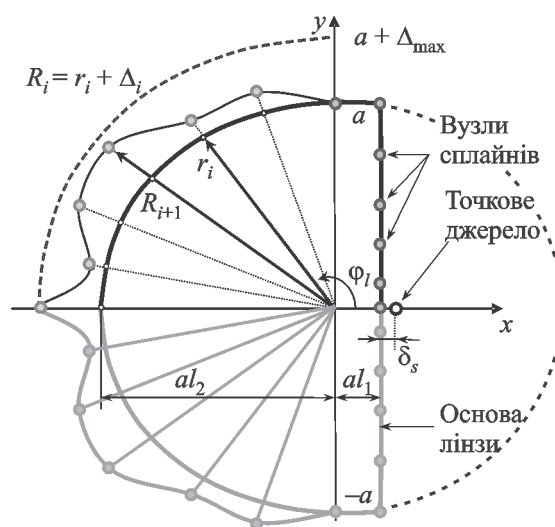


Рис. 2. Геометрія задачі та прийняті позначення. Сірим кольором зображено віддзеркалену половину профілю лінзи

рантує збіжність розв’язку для будь-якого набору параметрів лінзи, та є відомим для двовимірних (2D) та тривимірних (3D) розсіювачів [16]. У поєднанні з методом аналітичної регуляризації [17] та схемою дискретизації Гальборкіна цей метод гарантує швидку збіжність та контрольовану точність числового розв’язку задачі [14, 18]. Так, час обчислення коефіцієнта спрямованої дії для лінзи із фіксованою геометрією становить 1 год 8 хв для Pentium 4, 1.6 ГГц (або 23 хв для Athlon 64, 3500+). Слід відзначити, що розв’язання тривимірної задачі є значно складнішим, ніж для скалярної, через необхідність одночасного розв’язку задачі відносно усіх шести компонент поля, що ускладнює математичне формулювання задачі та потребує значно більших системних ресурсів та розрахункового часу. Саме тому синтез двовимірних антен є важливим та доцільним, як такий, що дозволяє отримати швидку попередню відповідь про принципову можливість досягнення мети оптимізації.

Схему оптимізації профілю лінзи побудовано за принципом ГА, який копіює природний механізм відбору та еволюції. Це реалізується таким чином. Кожній антені із довільною конфігурацією ставиться у відповідність бінарний рядок, який містить у закодованому вигляді всю необхідну інформацію про її форму, розмір, матеріал тощо. Такий бінарний рядок є аналогом хромосоми живої істоти. Користуючись термінологією, запозиченою із генетики, антену, яка відповідає такому рядку, називають “індивідом”. Для пошуку найбільш привабливого індивіду, тобто такого, що матиме найбільше (або найменше) значення цільової функції, спочатку генерується значна популяція індивідів із довільними наборами параметрів. Єдине обмеження на цьому етапі – випадково обрані параметри антени повинні лежати у дозволеному інтервалі значень. Для кожного із індивідів обчислюється цільова функція, після чого уся популяція сортується відповідно до її значення. Це дозволяє визначити найбільш “перспективних” індивідів. Нові індивіди

створюються за допомогою двох простих бінарних операцій, а саме: “схрещування” та “мутації”. Ці терміни теж запозичені з генетики та щонайкраще визначають суть операцій: при схрещуванні використовуються два вже існуючих індивіди, які обмінюються частинами своїх бінарних рядків з метою “покращення виду”; при мутаціях частина бінарного рядка змінюється випадковим чином (та відповідно змінюються значення одного або декількох фізичних параметрів антени), що є джерелом “генетичного матеріалу”, необхідного для пошуку нових вдалих індивідів (рис. 3). Сукупність індивідів, утворену шляхом схрещування та/або мутації індивідів існуючої популяції, називають популяцією наступної генерації.

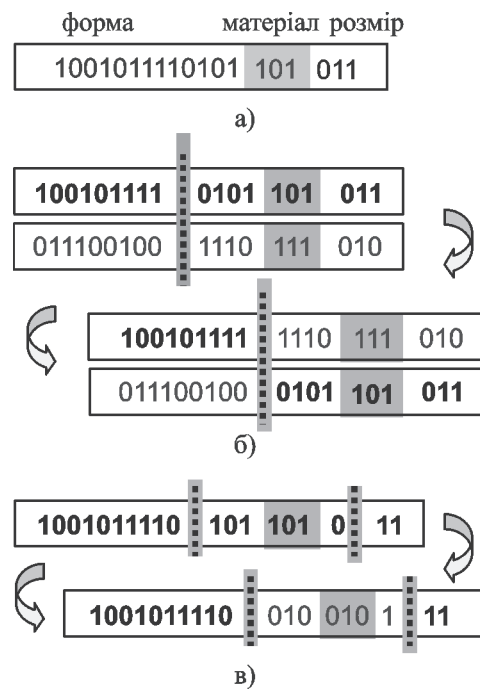


Рис. 3. Ілюстрація до принципу дії ГА: а) бінарний рядок, що містить закодовану інформацію про фізичні параметри лінзи довільної форми; б) ілюстрація до процедури схрещування двох індивідів; в) ілюстрація до процедури мутації. Пунктирні лінії вказують на точки розриву рядків, положення яких є випадковим

Така псевдовипадкова схема пошуку глобального екстремуму забезпечує швидку збіжність та є захищеною від “зависання” у локальних максимумах (або мінімумах). Вперше ГА був запропонований для оптимізації характеристик випромінювання антен близько 10 років тому [19, 20] і зарекомендував себе як потужний інструмент синтезу різноманітних мікрохвильових приладів [21].

Числові результати

Використання кубічних сплайнів для опису профілю лінзи забезпечує гнучкість контуру та існування першої та другої похідних, що є необхідним для стабільності роботи алгоритму, який базується на ГР Мюллера. За базову форму обрано подовжений напівеліпс, параметри якого відповідають оптимальній, з точки зору променевої теорії, конфігурації лінзи. Параметризація контуру здійснюється за допомогою полярного кута з рівномірною кутовою сіткою. Кількість вузлів N_p обирається достатньою для утворення довільної форми контуру лінзи. Параметрами, що визначають форму фронтальної половини лінзи та підлягають оптимізації, є додатки до радіус-векторів відповідних вузлів (рис. 2). Цільовою функцією було обрано КСД точкового джерела у присутності лінзи. Таким чином, задача оптимізації зводиться до пошуку максимуму функції $D(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{N_p})$.

Процес оптимізації відображено на рис. 4 та рис. 5. Кожна крива на рис. 4 відповідає одній популяції, індивідууми якої відсортовані згідно до величини цільової функції, тобто КСД. Горизонтальна пунктирна лінія відображає значення КСД для точкового джерела, що збуджує напівеліптичну лінзу. Як видно, навіть у популяції першої генерації існують індивіди, цільова функція яких є більшою за таку для класичної напівеліптичної лінзи. Подальша оптимізація форми контуру лінзи дозволяє підвищити КСД майже на 25% порівняно з КСД антени напівеліптичної форми.

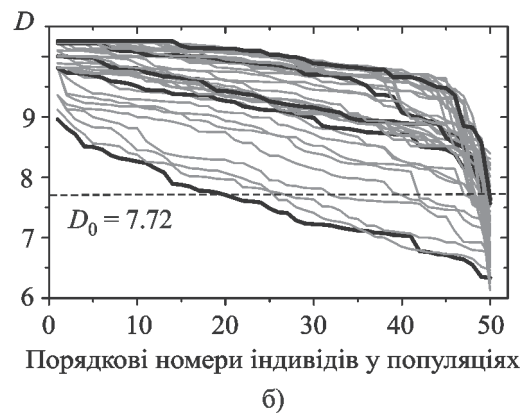
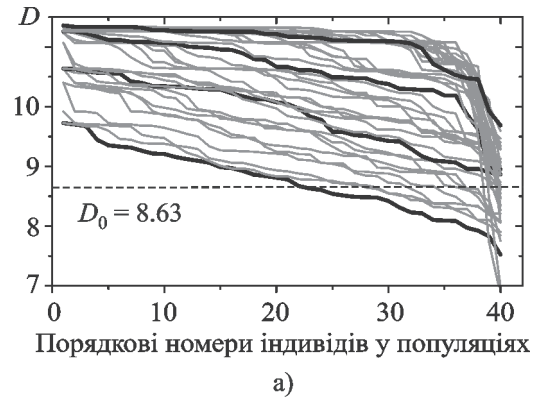


Рис. 4. Значення цільових функцій індивідів у популяції кожної генерації: а) E-поляризація; б) H-поляризація. Жирними лініями виділені популяції кожної десятої генерації. Пунктирна горизонтальна лінія позначає КСД точкового джерела в присутності напівеліптичної лінзи

Профілі лінз, обчислені у декількох незалежних симуляціях із випадковими початковими умовами, наведено на рис. 6. Як видно, отримані профілі відрізняються незначною мірою між собою так само, як і значення КСД для цих оптимізованих лінз (рис. 5). Це пояснюється властивостями генетичного алгоритму, який дозволяє швидко наблизитися до околу глобального максимуму функції, незалежно від початкового наближення, але потім демонструє досить повільну збіжність до максимуму, що видно із рис. 5. Усунення цього недоліка є можливим шляхом адаптації параметрів алгоритму в процесі роботи або шляхом поєднання ГА з градієнтни-

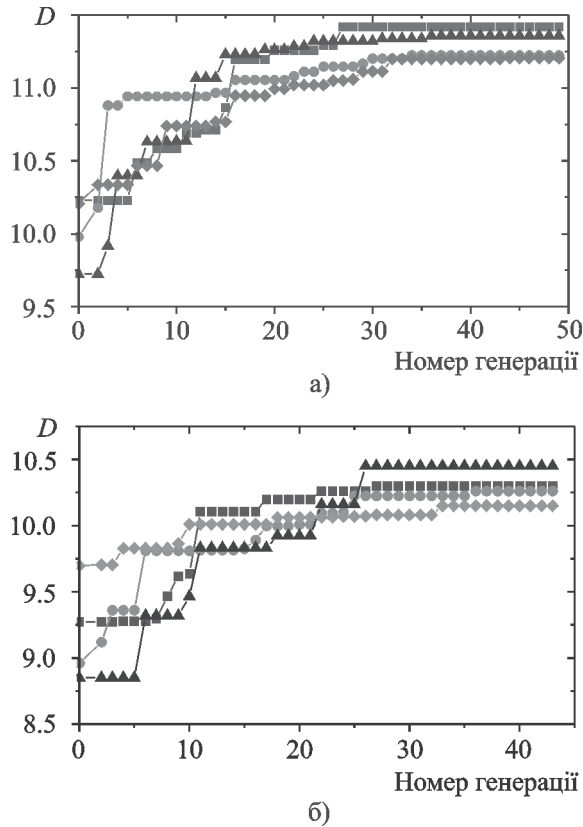


Рис. 5. Значення цільових функцій найкращих індивідумів у популяціях різних генерацій для декількох незалежних симуляцій: а) *E*-поляризація; б) *H*-поляризація

ми алгоритмами, які гарантують швидку збіжність за умов вдало обраного початкового наближення.

Розподіл інтенсивності полів усередині та в ближній зоні лінз із напівеліптичним профілем та профілем, отриманим шляхом оптимізації (у подальшому будемо називати таку лінзу оптимізованою), наведено на рис. 7. Видно, що завдяки формі оптимізованої лінзи усі максимуми поля знаходяться всередині лінзи, окрім того, що лежить у напрямку випромінювання антени, забезпечуючи таким чином умови для максимальної спрямованості випромінювання. Відзначимо, що розмір “горбів” на поверхні лінзи не перевищує половину довжини хвилі у діелектрику, чого досить для адаптації профілю лінзи до сформованого завдяки

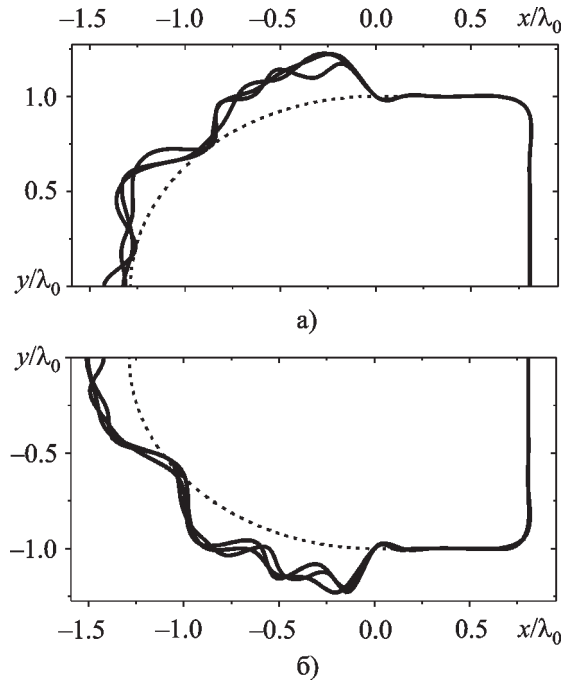


Рис. 6. Профілі рексолітової лінзи ($\epsilon = 2.53$, $ka = 6.28$), отримані шляхом оптимізації: а) *E*-поляризація; б) *H*-поляризація

внутрішнім відображенням розподілу поля. Отже можна передбачити, що оптимізація форми лінзи із будь-якою цільовою функцією також призведе до формування контуру із хвилястою поверхнею, максимальний радіус кривизни якої буде близьким до $\lambda_e / (4\sqrt{\epsilon})$. Таким чином, можна сформулювати вимогу до методу аналізу – він повинен бути придатним для коректного розв’язання задачі дифракції на діелектричному розсіювачі з відповідною кривизною контуру поперечного перерізу.

Цікаво, що розподіл поля всередині оптимізованої лінзи (рис. 7, б) нагадує так званий резонанс типу шепочучої галереї, добре відомий для кругових резонаторів та їх похідних [22]. Такі резонанси мають високу добротність і тому можуть суттєво впливати на характеристики випромінювання. Проведений аналіз не виявив таких паразитних ефектів для рексолітової лінзи, але вони можуть проявитися для лінз, виготовлених із більш щільних матеріалів.

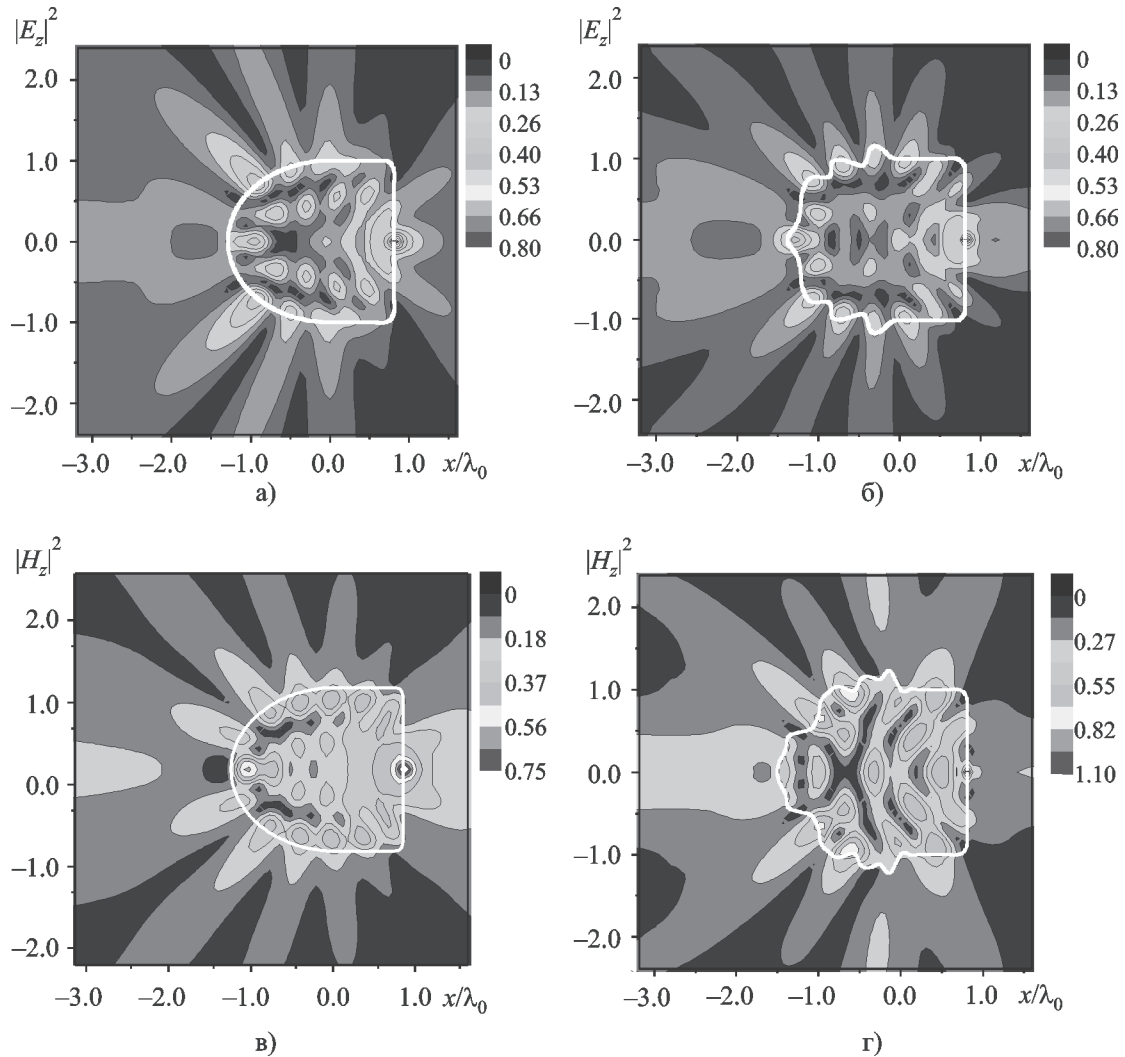


Рис. 7. Розподіл поля у ближній зоні напівеліптичної та оптимізованої лінзи ($a/\lambda_0 = 1.0$; $\epsilon = 2.53$, $ka = 6.28$): а), б) – E -поляризація; в), г) – H -поляризація

На рис. 8 наведено залежність КСД точкового джерела у присутності діелектричних лінз з еліптичними та оптимізованими профілями. Контур було оптимізовано для лінзи із шириною основи $2\lambda_0$. Відповідні значення нормованої частоти показано на графіках пунктирною лінією. Видно, що на заданій частоті приріст КСД становить майже 25 % порівняно з КСД для класичної лінзи з еліптичним профілем. Наголосимо, що частотний діапазон, у якому спостерігається підвищення КСД, становить близько 6 % від центральної

частоти, що робить цей ефект достатньо широкосмуговим для використання при конструюванні систем мм діапазону (наприклад, систем зв'язку).

З іншого боку, отриманий результат можна трактувати як можливість зменшення геометричних розмірів лінзи, що є дуже важливим для деяких застосувань, наприклад, для систем зв'язку, реалізованих на базі висотних аероплатформ [23]. Із графіка видно, що оптимізована лінза з шириною основи $2\lambda_0$ забезпечує КСД на рівні, що відповідає КСД еліптичної лінзи з ши-

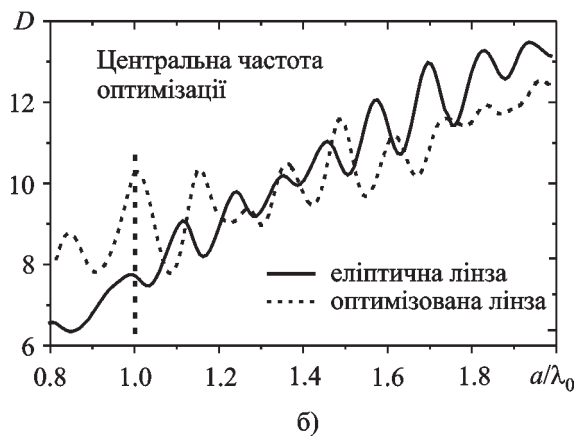
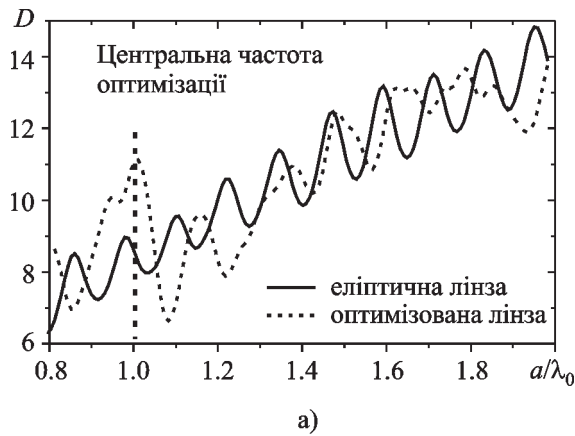


Рис. 8. Залежність КСД точкового джерела у присутності діелектричних ($\epsilon = 2.53$) еліптичної та оптимізованої лінз від нормованої частоти: а) E -поляризація; б) H -поляризація. Значення параметра, що відповідає частоті, на якій було здійснено оптимізацію, відмічено пунктиром

риною основи близько $2.7\lambda_0$. Таким чином, передбачене зменшення розміру лінзи становить близько 25 %.

На рис. 9 можна побачити діаграму спрямованості E - та H -поляризованого точкового джерела у присутності діелектричних лінз із еліптичними та оптимізованими профілями. Видно, що оптимізована лінза забезпечує нижчий рівень бокових пелюстків, ніж лінза класичної форми, завдяки чому і досягається підвищення КСД.

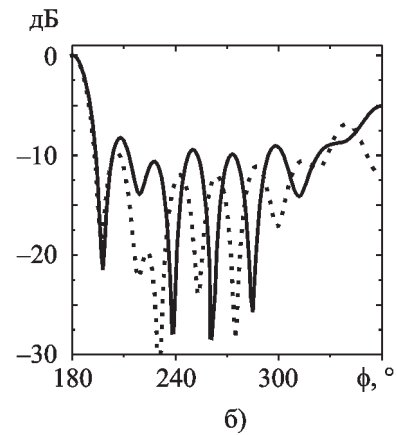
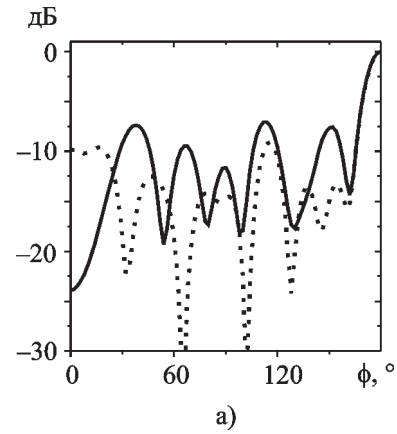


Рис. 9. Нормована діаграма спрямованості точкового джерела у присутності діелектричних еліптичної (—) та оптимізованої (····) лінз: а) E -поляризація; б) H -поляризація

Висновки

Розроблено ефективний числовий алгоритм оптимізації форми лінз для інтегрованих антен, який базується на методі ГР Мюллера (у поєднанні з методом аналітичної регуляризації та дискретизацією за схемою Гальоркіна) та ГА оптимізації. У двовимірній постановці досліджено модельну задачу про покращення робочих характеристик ДЛА шляхом оптимізації форми лінзи. Продемонстровано можливість підвищення КСД випромінювача та зменшення розмірів антени. Аналіз числових результатів щодо характеристик полів у ближній та далеких зонах дозволив сформулювати та обґрунтувати основні фізичні принципи оптимізації компактних діелектричних лінз.

Роботу було виконано за підтримки Фонду фундаментальних досліджень: грант президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених (GP/F11/8-2006).

Література

1. Filippovic D. F., Gearhart S. S., Rebeiz G. M. Double slot on extended hemispherical and elliptical silicon dielectric lenses // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1993. – Vol. 41, No. 10. – P. 1738-1749.
2. Fernandes C. A., Fernandes J. G. Shaped dielectric lenses for wireless millimeter-wave communications // *IEEE Antennas Propag. Magazine.* – 1999. – Vol. 41, No. 5. – P. 141-152.
3. Wu X., Eleftheriades G. V., van Deventer-Perkins T. E. Design and characterization of single- and multiple-beam mm-wave circularly polarized substrate lens antennas for wireless communications // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 2001. – Vol. 49, No. 3. – P. 431-441.
4. Godi G., Sauleau R., Thouroude D. Performance of electrically small substrate lens antennas for millimeter-wave communications // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – Vol. 53, No. 4. – 2005. – P. 1278-1286.
5. Martin L., Pierre A., Albo L., Caille G., Piton G., Lopez J.-M. Matériaux diélectriques hautes performances pour antennes spatiales à lentille // *Journées de Caractérisation Micro-Ondes et Matériaux (JCMM'2002).* – Toulouse (France) – 2002. – P. 214-219.
6. Schoenlinner B., Wu X., Ebling J. P., Eleftheriades G. V., Rebeiz G. M. Widescan spherical-lens antennas for automotive radars // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 2002. – Vol. 50, No. 9. – P. 2166-2175.
7. Raman S., Barker N. S., Rebeiz G. M. A W-band dielectric-lens-based integrated monopulse radar receiver // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1998. – Vol. 46, No. 12. – P. 2308-2316.
8. Uehara K., Miyashita K., Natsume K. I., Hatakeyama K., Mizuno K. Lens-coupled imaging arrays for the mm and sub-mm-wave regions // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1992. – Vol. 40, No. 5. – P. 806-811.
9. Rudd J. V., Mittleman D. Influence of substrate-lens design in terahertz time-domain spectroscopy // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2002. – Vol. 19, No. 2. – P. 319-328.
10. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. – М.: Сов. Радио, 1974. – 280 с.
11. Salema C., Fernandes C., Jha R. T. Solid Dielectric Horn Antennas. – Boston: Artech House, 1998. – 241 p.
12. Silveirinha M. G. M. V., Fernandes C. A. Shaped double-shell dielectric lenses for wireless millimeter wave communications. // *Proc. IEEE AP-S Int. Symp. Dig.* – Salt Lake City (USA) – 2000. – Vol. 3. – P. 1674-1677.
13. Chantraine-Barès B., Sauleau R., Le Coq L., Mahdjoubi K. A new accurate design method for millimeter-wave homogeneous dielectric substrate lens antennas of arbitrary shape // *IEEE Trans. Antennas and Propag.* – 2005. – Vol. 53, No. 3. – P. 1069-1075.
14. Борискін А. В., Годі Г., Ролланд А., Соло Р., Носич О. Й. Порівняльний аналіз чисельних алгоритмів на базі ГО/ФО, FDTD та інтегральних рівнянь для аналізу компактних діелектричних лінз для інтегральних антен мм та суб-мм діапазону // *Радіофізика та електроніка.* – Харків: ІРЕ НАН України. – 2007. – №2 (ухвалено до друку).
15. Boriskina A. V., Boriskina S. V., Nosich A. I., Benson T. M., Sewell P., Altintas A. Lens or resonator? – electro-magnetic behavior of an extended hemielliptical lens for a sub-mm wave receiver // *Microwave Opt. Tech. Lett.* – 2004. – Vol. 43, No. 6. – P. 515-518.
16. Muller C. Foundations of the mathematical theory of electromagnetic waves. – Berlin: Springer, 1969. – 350 p.
17. Nosich A. I. MAR in wave-scattering and eigenvalue problems: foundations and review of solutions // *IEEE Antennas Propag. Magazine.* – 1999. – Vol. 41, No. 3. – P. 34-49.
18. Boriskina S. V., Benson T. M., Sewell P., Nosich A. I. Accurate simulation of 2D optical microcavities with uniquely solvable boundary integral equations and trigonometric-Galerkin discretization // *J. Opt. Soc. Am. A.* – 2004. – Vol. 21, No. 3. – P. 393-402.
19. Haupt R. L. An introduction to genetic algorithms for electromagnetics // *IEEE Antennas Propag. Magazine.* – Vol. 37, No. 2. – 1995. – P. 7-15.
20. Johnson J. M., Rahmat-Samii Y. Genetic algorithms in engineering electromagnetics // *IEEE Antennas Propag. Magazine.* – Vol. 39, No. 4. – 1997. – P. 7-21.
21. Hoorfar A. Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization: A Review // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2007. – Vol. 55, No. 3. – P. 523-537.
22. Boriskina S. V., Benson T. M., Sewell P., Nosich A. I. Optical Modes in 2-D Imperfect Square and Triangular Microcavities // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2005. – Vol. 41, No. 6. – P. 857-862.
23. Thornton J. A low sidelobe asymmetric beam antenna for high altitude platform communications // *IEEE Microwave Wireless Components Lett.* – 2004. – Vol. 14, No. 2. – P. 59-61.

**Процедура и особенности оптимизации
профиля компактных диэлектрических
линз для интегрированных антенн
мм диапазона**

А. В. Борискин

Исследуется возможность повышения коэффициента направленного действия и уменьшения размеров интегрированных линзовых антенн путем оптимизации формы линзы. Задача дифракции решена численно в двумерной постановке с использованием методов граничных интегральных уравнений типа Мюллера в сочетании с методом аналитической регуляризации и дискретизации по схеме Галеркина. Алгоритм оптимизации построен по принципу генетического алгоритма. Разработанный алгоритм гарантирует контролируемую точность вычисления полей для любых параметров линзы и быстрый поиск экстремума целевой функции. Численные результаты приводятся для рексолитовой линзы, облучаемой E - и H -поляризованным точечным источником.

**Procedure and Peculiarities
of Profile Optimization of Compact
Dielectric Lenses for Integrated
mm-Wave Antennas**

A. V. Boriskin

The possibility for increasing the directivity factor and reducing the size of the integrated lens antennas by optimization of a lens shape is studied. The diffraction problem is solved numerically in a two-dimensional formulation using the Muller-type boundary integral equations methods together with the Galerkin trigonometric discretization scheme and the method of analytical regularization. The optimization algorithm is constructed using the genetic algorithm principle. The algorithm developed guarantees convergence and controlled accuracy for an arbitrary set of lens parameters as well as fast search for the cost function global extremum. The numerical results are shown for a rexolite lens fed by an E - and H -polarized point sources.