

“Ідеальна” напівеліптична діелектрична лінзова антена

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 24 січня 2008 р.

Досліджуються електромагнітні властивості двовимірної моделі подовженої напівеліптичної діелектричної лінзової антени (ДЛА) з метою з'ясувати ефективність формування високоспрямованої діаграми випромінювання. Особливістю дослідження є точне врахування ефектів, пов'язаних зі скінченними хвильовими розмірами діелектричної лінзи та спрямованим характером випромінювання первинного джерела. Це досягається завдяки використанню вискоефективного числового алгоритму, що базується на методі граничних інтегральних рівнянь типу Мюллера у поєднанні з методом аналітичної регуляризації. Показано, що поняття “рівня освітлення краю”, відоме для рефлекторних антен, може бути визначено і для ДЛА, а вірний вибір величини цього параметра є ключовим для формування високоспрямованої діаграми випромінювання.

Вступ

Діелектричні лінзові антени (ДЛА) широко використовуються у багатьох сучасних пристроях у мм та субмм діапазонах довжин хвиль, серед яких: радары, системи зв'язку, радіозору, ТГц-спектроскопії тощо [1]. Такі антени є найбільш привабливими для використання у високочастотному діапазоні (ГГц – ТГц) через компактні розміри, простоту виготовлення та низьку собівартість. Наявність високоякісних матеріалів з низькими втратами та розвиток технологій виготовлення діелектричних лінз довільної форми дозволяє створювати вискоефективні ДЛА із вузькими або заданими діаграмами спрямованості, що мають значні переваги перед існуючими аналогами, такими, як друковані та рефлекторні антени [2].

Слід відзначити, що, незважаючи на понад сторічну історію використання лінзових антен, яка розпочалася з першими експериментами О. Лоджа, спрямованими на з'ясування чинності теорії Максвелла щодо хвильової природи електромагнітного поля, ідея створення

ДЛА, конструкція яких передбачає безпосереднє поєднання випромінювача та діелектричної лінзи, є досить новою. Така конструкція дозволила значно зменшити розміри ДЛА та покращити їх механічну та корозійну стійкість. Крім того, використання лінз, виготовлених із однорідного матеріалу та таких, що мають складний (спеціально підібраний) профіль перерізу замість шаруватих сферичних лінз (типу лінзи Люнебурга), значно спростило виготовлення та зменшило собівартість таких антен. Наступним кроком стала спроба створення компактних ДЛА, розмір лінз яких дорівнює лише кільком довжинам хвиль (для порівняння, типові хвильові розміри рефлекторних антен становлять десятки або навіть сотні одиниць, а лінз типу Люнебурга – десятки). Розробка таких антен зі специфічними діаграмами спрямованості для сучасних систем мм та субмм діапазонів сьогодні є предметом досліджень у багатьох наукових центрах Європи та світу. Так, однією з важливих задач є пошук компромісу між зменшенням розмірів ДЛА, забезпеченням необхідних характеристик випромінювання та роз-

ширенням робочого частотного діапазону [2, 3]. Розв'язання цієї задачі є складним через хвильові (резонансні) явища, що починають відігравати домінуючу роль, як тільки розміри лінз зменшуються до декількох довжин хвиль.

Слід нагадати, що на практиці найчастіше для ДЛА використовують лінзу у вигляді подовженого напівеліпса. Така форма, як і взагалі теорія ДЛА, була запозичена із оптики, де великі хвильові розміри лінз дозволяють успішно користуватися наближеними високочастотними методами. Так, з променевої теорії відомо, що еліпс із ексцентриситетом, який співвідноситься до діелектричної проникності матеріалу лінзи як

$$e = \epsilon^{-1/2}, \quad (1)$$

трансформує частину фронту сферичної хвилі, що випромінюється точковим джерелом, розміщеним в одному із фокусів еліпса, у плоску хвилю [4]. Проте зрозуміло, що це наближення втрачає вірогідність, якщо врахувати скінченні електричні розміри лінзи та наявність спрямованої діаграми випромінювання у первинного джерела (друкованої антени або відкритого кінця хвилеводу). Більше того, як було нещодавно продемонстровано [5], компактні діелектричні лінзи не можна розглядати лише як квазіоптичні елементи, тому що добротність внутрішніх резонансів у таких лінзах може досягати десятків та сотень, особливо для лінз, виготовлених із щільних матеріалів (наприклад кварцу або силікону). Такі лінзи фактично перетворюються на відкриті резонатори, опис електромагнітних властивостей яких потребує розв'язання задачі у строгій постановці з урахуванням кривизни контуру та відповідних граничних умов та умов випромінювання. Це доводить важливість створення та використання для моделювання ДЛА методів і алгоритмів, здатних запровадити контрольовану точність результату. Найбільш ефективним для розв'язання такої задачі є метод граничних інтегральних рівнянь типу Мюллера (ГІРМ), який дозволяє звести задачу розсіяння заданої електромагнітної хвилі на діелектричному розсію-

вачі довільної форми до системи інтегральних рівнянь типу Фредгольма другого роду, що гарантує єдиничність розв'язку задачі та швидку збіжність числового алгоритму його пошуку [6]. На відміну від методів геометричної та фізичної оптики (ГО, ФО) та метода кінцевих різностей у часовій області (FDTD), які широко використовуються для моделювання ДЛА, метод ГІРМ дозволяє точно описати електромагнітні властивості діелектричних лінз довільної форми та електричних розмірів [7, 8].

Метою роботи є вивчення умов формування високоспрямованої діаграми випромінювання подовженою напівеліптичною ДЛА. Для цього використовується розроблений раніше числовий алгоритм, котрий базується на методі ГІРМ, що гарантує точне врахування хвильових ефектів усередині лінзи. Задача розв'язується у двовимірній постановці. Випромінювач моделюється комплексним джерелом (КД), що надає можливість контролювати його спрямованість та, на відміну від гауссового пучка, зберігає строгість формулювання задачі [9].

Постановка задачі

Геометрію двовимірної моделі напівеліптичної ДЛА показано на рис. 1. Пунктир позначає коло радіуса a , а тонка та товста лінії зображують повний еліпс та подовжений напівеліпс із ексцентриситетом, визначеному відповідно до (1).

КД, що моделює апертурний випромінювач, розташоване зовні на відстані δ від центра плоскої основи антени. Поле КД описується функцією Ханкеля першого роду комплексного аргументу:

$$U(\vec{r}, \vec{r}') = H_0^{(1)}(kR_{cs}), \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} R_{cs} &= |\vec{r} - \vec{r}'_{cs}| = \sqrt{(x - x_{cs})^2 + (y - y_{cs})^2}, \\ \vec{r}'_{cs} &= \{x_{cs}, y_{cs}\} = \vec{r}_0 + i\vec{b}, \quad k = 2\pi/\lambda_0, \\ \vec{r}_0 &= \{x_0, y_0\}, \quad \vec{b} = \{b \cos \beta, b \sin \beta\}. \end{aligned}$$

лом, є параметр “освітлення краю”. Як відомо автору, цей термін ніколи раніше не використовувався для інтегрованих ДЛА. За аналогією до теорії рефлекторних антен, рівень освітлення краю може бути визначений як

$$A = 10 \log \frac{I(0, a)}{I(0, 0)}, \quad (3)$$

де $I(0, a)$ та $I(0, 0)$ – інтенсивності поля КД на краю та у центрі лінзи відповідно. При цьому мається на увазі, що КД розташоване у просторі, заповненому діелектриком (з коефіцієнтом заломлення, як у матеріалі лінзи), та орієнтоване, як показано на рис. 1. Визначений таким чином параметр A відобразить ефективність використання напівеліптичного профілю лінзи.

Залежність параметра A , а також КС D модельної ДЛА від параметра kb , що визначає ширину хвильового пучка, випромінюваного КД, можна бачити на рис. 3. Дві пари кривих на графіку відповідають КС антени, виготовленої із рексоліту, із різними хвильовими розмірами та збуджуваної E - та H -поляризованим джерелом, розташованим на відстані $\delta = 0.05\lambda_0$ від плоскої основи лінзи (рис. 1).

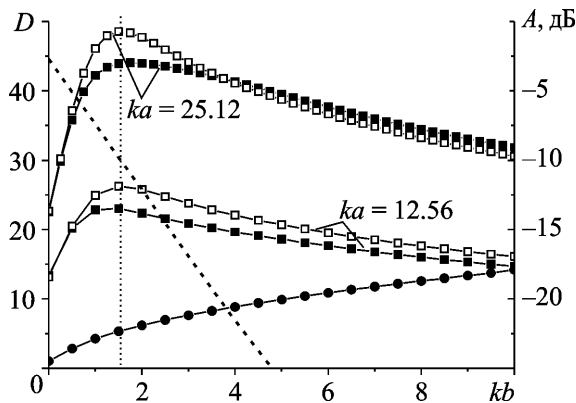


Рис. 3. Залежність КС лінзової антени (ліва вісь) та параметра освітлення краю (права вісь) від ширини хвильового пучка, що випромінюється КД: —●— — D_e ; —□— — E -поляризація; —■— — H -поляризація. Параметри лінзи: $l_1 = 0.8$, $l_2 = 1.286$, $\epsilon = 2.53$

Крива D_e відображає КС випромінювача, розташованого у просторі, заповненому діелектриком. Вона дозволяє визначити відповідність КС випромінювача та величини параметра kb , що є зручним для інтерпретації результатів. Нахилена пунктирна лінія, віднесена до правої осі, зображає рівень “освітлення краю”, визначений відповідно до (3).

Як видно із рисунка, максимальний рівень КС для лінзи обох розмірів і обох поляризацій випромінювача досягається з рівнем освітлення краю близьким до -10 дБ, що, до речі, добре співпадає з рекомендованою величиною освітлення краю для рефлекторних антен, а також з оптимальним рівнем освітлення краю, обчисленим для лінзи Люнебурга [12].

Детальніше дослідити умови формування високоспрямованої діаграми випромінювання модельної ДЛА дозволяють графіки, що демонструють залежність КС водночас від параметра kb та величини подовження напівеліптичної лінзи (див. рис. 4). Незважаючи на те що властивості рексолітової лінзи, як правило, вважаються близькими до пропонованих променевою теорією (через мале значення діелектричної проникності), на всіх графіках рис. 4 спостерігається резонансна поведінка КС відносно обох параметрів. Вона є більш визначеною для E -поляризації, що пояснюється більшою добротністю внутрішніх резонансів у відкритих резонаторах для цієї поляризації. Як видно, оптимальна, з точки зору забезпечення максимуму КС, величина параметра подовження лінзи l_1 є близькою до пропонованої у ГО ($l_1^{GO} = 0.8$), але лише для КД з шириною пучка, що відповідає $kb = 1.5$. Це вказує на те, що оптимальний розмір основи лінзи може бути визначений лише відповідно до діаграми спрямованості випромінювача шляхом урахування рівня освітлення краю.

Порівняння розподілу амплітуди та фази поля у апертурі ДЛА (див. рис. 5, 6) доводить, що правильний вибір параметрів лінзи, відповідно до рівня освітлення краю, дозволяє створити антену, близьку до ідеальної, тобто такої, що здатна забезпечити рівномірний розподіл амплітуди та фази поля у ближній зоні. Відповідні діаграми спрямованості наведені на рис. 7.

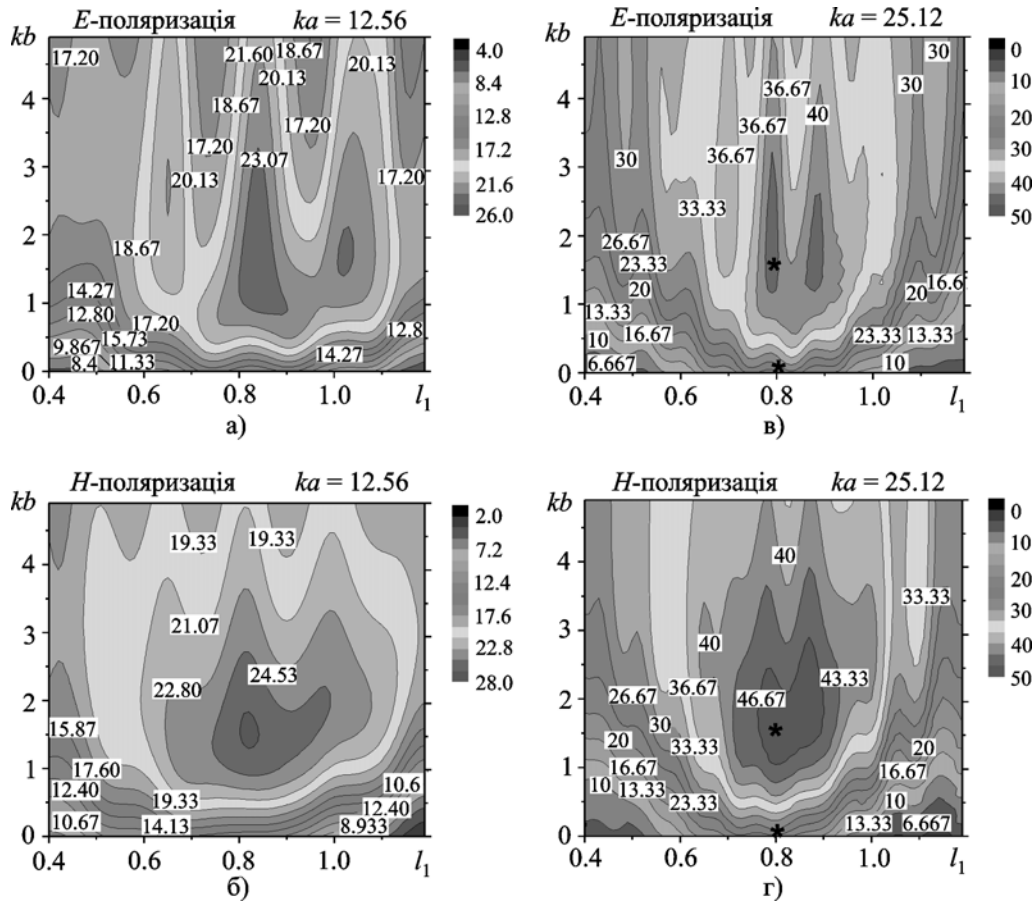


Рис. 4. Залежність КС модельної ДЛА від величини подовження напівеліптичної лінзи та ширини діаграми спрямованості випромінювача, що контролюється параметром kb , при $\epsilon = 2.53$, $l_2 = 1.286$: а) – E-поляризація, $ka = 12.56$; б) – H-поляризація, $ka = 12.56$; в) – E-поляризація, $ka = 25.12$; г) – H-поляризація, $ka = 25.12$. Символом “*” на рис. (в) і (г) позначені поєднання параметрів випромінювача і лінзи, розподіл амплітуди і фази в апертурі якої наведено на рис. 5, 6

Саме таке “ідеальне” фокусування для частини хвильового фронту точкового джерела у наближенні ГО забезпечує еліпс з відповідним ексцентриситетом. Проте спрямована діаграма випромінювання КД та наявність багаторазових внутрішніх віддзеркалень призводять до спотворення форми хвильового фронту в апертурі ДЛА. виправити це можливо або шляхом підбору розміру подовження напівеліптичної лінзи (як показано в даній роботі) або через оптимізацію її форми [13].

Для лінз, виготовлених із щільніших матеріалів, внутрішні резонанси відіграватимуть значнішу роль, і тому рельєф графіка КС як функції ширини хвильового пучка та розміру основи

лінзи матиме більш складний (осцилюючий) вигляд. Можна передбачити, що збільшення діелектричної проникності матеріалу лінзи, яке призведе до звуження діаграми спрямованості випромінювача, вимагатиме більшої величини подовження лінзи для забезпечення необхідного рівня освітлення краю. Разом з тим збільшення величини подовження лінзи призведе до згущення спектру резонансних частот та покращення добротності внутрішніх резонансів [5, 8], що матиме зворотній ефект на колімаційні властивості лінзи. Тому моделюючи ДЛА з лінзами, виготовленими із щільного матеріалу, розмір подовження слід обирати з урахуванням обох цих факторів.

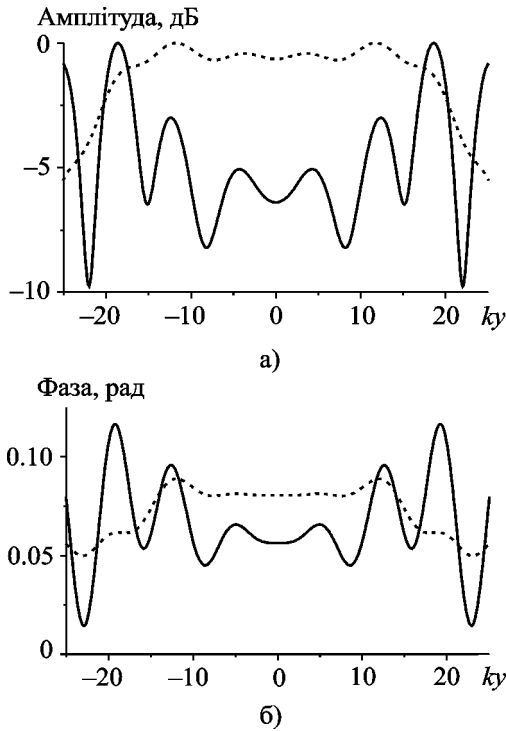


Рис. 5. Розподіл амплітуди (а) та фази (б) поля в апертурі модельної ДЛА (див. рис. 1), що знаходиться на відстані $\Delta = \lambda_0$ від переднього краю лінзи ($ka = 25.12$, $l_1 = 0.8$, $l_2 = 1.286$, $\epsilon = 2.53$, E-поляризація): — — ізотропне джерело ($kb = 0$), - - - — оптимально спрямоване джерело ($kb = 1.5$)



Рис. 7. Нормовані діаграми спрямованості модельної ДЛА, параметри якої відповідають вказаним на рис. 4, в та рис. 4, г відповідно: — — ізотропне джерело, - - - — оптимально спрямоване джерело

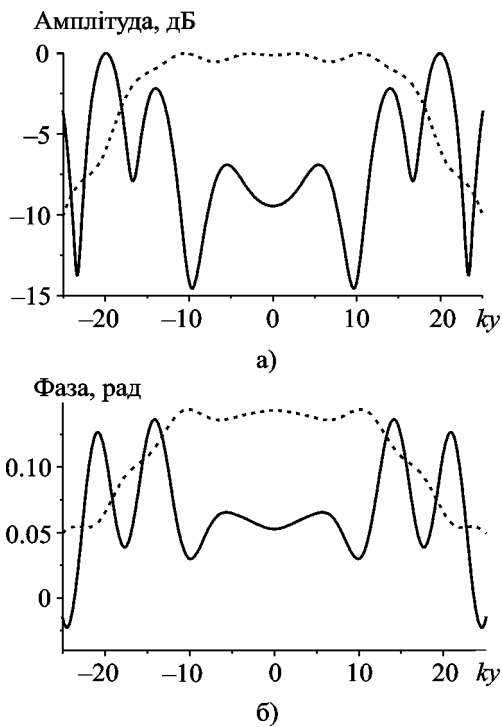


Рис. 6. Те ж саме, що і на рис. 5, для H-поляризації

Висновки

Вивчено умови формування високоспрямованої діаграми випромінювання напівеліптичною ДЛА. Аналіз виконано у двовимірному формуванні методом ГРМ, що гарантує точність отриманих результатів. Показано, що електромагнітні властивості компактної напівеліптичної лінзи, виготовленої навіть із матеріалу з невеликим коефіцієнтом заломлення, суттєво відрізняються від пропонованих променевою теорією, яка часто використовується для моделювання даного типу антен. Отримані результати пояснюють відомі раніше експериментальні дані щодо умов формування вузьких діаграм випромінювання напівеліптичних ДЛА. Запропонована методика адаптації параметрів лінзи відповідно до параметрів випромінювача шляхом урахування рівня освітлення краю лінзи дозволяє підвищити ефективність використання діелектричних лінз та може бути використана для ДЛА з лінзами різного розміру, виготовленими із будь-якого матеріалу.

Література

1. 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 Propag.* – 2005. – Vol. 53, No. 3. – P. 1069-1075.
2. Handbook of antennas in wireless communications / Chapter 15 by Fernandes C. / Ed. by Godara L. C. – Boca Raton–London–New York–Washington, D.S.: CRC Press, 2002. – 888 p.
3. Godi G., Sauleau R., Thouroude D. Performance of reduced size substrate lens antennas for millimeter-wave communications // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2005. – Vol. 53, No. 4. – P. 1278-1286.
4. Neto A., Maci S., de Maagt P. J. I. Reflections inside an elliptical dielectric lens antenna // *IEE Proc. Microwave Antennas Propag.* – 1998. – Vol. 145, No. 3. – P. 243-247.
5. Boriskin A. V., Boriskina S. V., Nosich A. I., Benson T. M., Sewell P., Altintas A. Lens or resonator? – electromagnetic behavior of an extended hemieliptical lens for a sub-mm wave receiver // *Microwave Opt. Technol. Lett.* – 2004. – Vol. 43, No. 6. – P. 515-158.
6. 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.
7. Boriskin A. V., Godi G., Sauleau R., Nosich A. I. Small hemieliptic dielectric lens analysis in 2-D: boundary integral equations vs. geometrical and physical optics // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2008. – Vol. 56, No. 2. – P. 485-492.
8. Boriskin A. V., Rolland A., Sauleau R., Nosich A. I. Validation of FDTD Accuracy in the Compact Hemielliptic Dielectric Lens Antenna Analysis // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2008. – Vol. 56, No. 3. – P. 806-811.
9. Einziger P. D., Haramaty Y., Felsen L. B. Complex rays for radiation from discretized aperture distributions // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1987. – Vol. 35, No. 9. – P. 1031-1044.
10. Filipovic D. F., Gauthier G. P., Raman S., Rebeiz G. M. Off-axis properties of silicon and quartz dielectric lens antennas // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1997. – Vol. 45, No. 5. – P. 760-766.
11. Otero P., Alvarez-Melcon A., Zurcher J.-F., Mosig J. R. A microstrip-coupled slot-loop antenna for integrated receivers in the millimeter-wave band // *Microwave Opt. Technol. Lett.* – 1998. – Vol. 18, No. 2. – P. 91-95.
12. Boriskin A. V., Nosich A. I., Whispering-gallery and Luneburg-lens effects in a beam-fed circularly-layered dielectric cylinder // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2002. – Vol. 50, No. 9. – P. 1245-1249.
13. Борискін А. Процедура та особливості оптимізації профілю компактних діелектричних лінз для інтегрованих антен мм діапазону // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2007. – Т. 12, №3. – С. 311-319.

“Идеальная” полуэллиптическая диэлектрическая линзовая антенна

А. В. Борискин

Исследуются электромагнитные свойства двумерной модели удлиненной полуэллиптической диэлектрической линзовой антенны (ДЛА) с целью выяснения эффективности формирования высоконаправленной диаграммы излучения. Особенностью исследования является строгий учет эффектов, связанных с конечными волновыми размерами диэлектрической линзы и направленным характером излучения первичного источника. Это достигается благодаря использованию высокоэффективного численного алгоритма, который базируется на методе граничных интегральных уравнений типа Мюллера в сочетании с методом аналитической регуляризации. Показано, что понятие “уровня освещенности края”, известное в теории рефлекторных антенн, может быть определено и для ДЛА, а верный выбор величины этого параметра является ключевым для формирования высоконаправленной диаграммы излучения.

“Ideal” Hemielliptic Dielectric Lens Antenna

A. V. Boriskin

Electromagnetic properties of the two-dimensional model of a hemieliptic dielectric lens antenna (DLA) are studied in order to estimate the efficiency of a highly-directed radiation pattern formation. Distinctive feature of the research is accurate accounting for the effects related to finite size of the lens and directive radiation pattern of the primary feed. This is achieved by using a previously developed highly efficient numerical algorithm based on a combination of the Muller’s boundary integral equations and the method of analytical regularization. The edge illumination parameter for DLA is introduced similarly as it is done in the theory of reflector antennas. It is shown that a proper choice of this parameter is critical for formation of the pencil-beam-type radiation patterns.