

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ І ПРИСТРОЇВ

УДК 621.396.67

### АЛГОРИТМ СИНТЕЗУ ПАРАБОЛІЧНОЇ АНТЕНИ З ЕЛІПТИЧНИМ ДОПОМІЖНИМ ДЗЕРКАЛОМ ДЛЯ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ

І. Прудіус, Й. Захарія, Р. Андрущак

*Національний університет „Львівська політехніка”  
вул. С. Бандери, 12, Львів 79013, Україна*

Методом геометричної оптики розглянуто алгоритм синтезу параболічної антени з еліптичним допоміжним дзеркалом. Алгоритм ґрунтується на умовах до електромагнітного поля в структурі антени. В міліметровому діапазоні хвиль запропоновано закріплювати допоміжне дзеркало на діелектричній захисній пластині антени. Наведено приклад синтезу антени.

*Ключові слова:* дводзеркальна антена, синтез антени.

Дводзеркальні антени з еліптичним малим дзеркалом мають відомі переваги над однодзеркальними [2, 3]: відсутність тінювого ефекту; відсутність впливу антени на імпеданс опромінювача; трансформація розподілу поля в апертурі антени в бік більшої рівномірності. Це дає змогу застосувати в міліметровому діапазоні хвиль найпростіші рупорні опромінювачі. Відомо, однак, що збільшення радіуса малого еліптичного дзеркала  $r_0$  спричинює зростання бокових пелюсток діаграми напрямленості (ДН) антени. Проте у гостро напрямлених антенах площа головного параболічного дзеркала є порівняно великою, і згаданим впливом можна знехтувати. Зменшені розміри антени в міліметровому діапазоні хвиль дають змогу застосовувати нестандартне кріплення малого дзеркала.

Алгоритм синтезу антени не є однозначним. Він залежить від заданих вихідних величин, умов синтезу. У випадку дзеркальних антен обмеженням на процедуру синтезу є значення коефіцієнта використання площі виходу (апертури) антени  $k$ , яке повинно бути більшим від прийнятого для синтезу ( $k_1$ ), тобто  $k > k_1$ . Звичайно  $k_1 \geq 0,8$  [2]. Оцінка цього коефіцієнта можлива, якщо відомі геометричні розміри антени й опромінювача, показані на рис. 1.

У випадку короткофокусних антен ( $\psi_0 > \pi/2$ ) завдяки структурі дзеркал розподіл напруженості поля в апертурі антени рівномірнішим. Покажемо це, визначивши числовим методом коефіцієнт  $k_{aE}$  використання площі виходу з нерівномірним розподілом напруженості поля в  $E$ -площині. Як відомо [1],

$$k_a = \frac{\left| \int E dS \right|^2}{\int E^2 dS}, \tag{1}$$

де  $S$  – площа апертури виходу антени.

Напруженість електричного поля в площині виходу антени можна записати у вигляді

$$E = A \cdot F_1(\phi_2) \cdot f(r), \tag{2}$$

де  $A$  – сталий множник;  $F_1(\phi_2)$  – нормована ДН рупора опромінювача;  $f(r)$  – функція, що характеризує вплив дзеркал антени на амплітудний розподіл напруженості поля в апертурі антени.

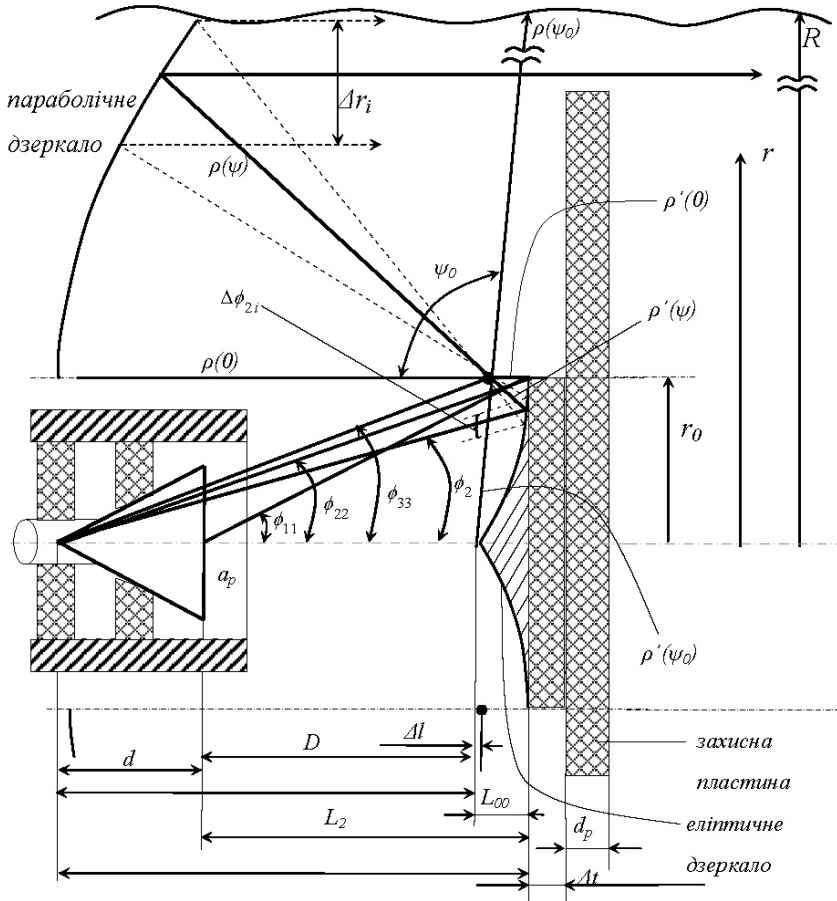


Рис. 1. Геометричні параметри параболічної антени з еліптичним допоміжним дзеркалом.

Рівномірний поділ кута  $\phi_2 = 0 \dots \phi_{22}$  на  $N$  кутів  $\Delta\phi_{2i} = \phi_{22}/N$  виконано так, що для малих  $\Delta\phi_{2i}$   $F_{Ei}(\phi_2)$  є незмінним. Для середнього кута  $\phi_{2c}$  в проміжку  $\Delta\phi_{2i}$  позначимо  $F_{ic} = F_{Ei}(\phi_{2c})$ . Завдяки впливу дзеркал проміжок  $\Delta r_i$  змінюється відносно  $\Delta r = (R - r_0)/N$  для відповідного  $\Delta\phi_{2i}$ . За відомих розмірів дзеркал можна визначити  $\Delta r_i/\Delta r$  залежно від  $r_i$  (див. рис. 1). В  $E$ -площині знайдемо

$$EdS = A \cdot F_{ic} \cdot f(r_i) \cdot \Delta r = A \cdot F_{ic} \cdot \Delta r_i. \quad (3)$$

Звідси  $f(r_i) = \Delta r_i/\Delta r$ . Тоді, замінюючи інтеграли сумами, запишемо

$$k_{aE} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N F_{ic} \cdot (\Delta r_i/\Delta r) \cdot \Delta r \right|^2}{N \cdot \Delta r \cdot \sum_{i=1}^N (F_{ic})^2 \cdot (\Delta r_i/\Delta r)^2 \cdot \Delta r} = \frac{\left| \sum_{i=1}^N F_{ic} \cdot (\Delta r_i/\Delta r) \right|^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N (F_{ic})^2 \cdot (\Delta r_i/\Delta r)^2}. \quad (4)$$

На рис. 2 показана залежність  $\Delta r_i/\Delta r$  від координати  $r_i = n\Delta r$  в  $N$  точках.

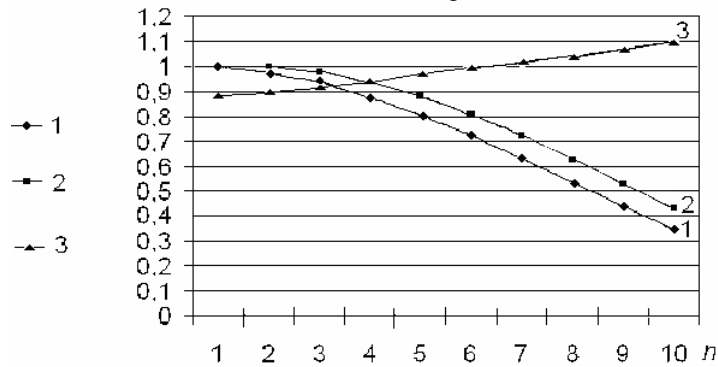


Рис. 2. Залежність від радіальної координати  $r=n\Delta r$ :  
1 – ДН рупорного опромінювача  $F_{Ei}$ ; 2 – розподілу поля в апертурі антени  $F_{Ei}(\Delta r_i/\Delta r)$ ; 3 – відношення  $\Delta r_i/\Delta r$ .

Величину  $F_i(\phi_{2c}) = F_{ic}(n)$  визначено в  $E$ -площині для рупорного опромінювача. З рис. 2 видно, що  $F_{ic}\Delta x_i > F_{ic}\Delta x$ , тобто амплітудний розподіл у виході антени поліпшено. Відповідне значення  $k_{aE} = 0,943$ . Завдяки такій властивості дводзеркальної антени мінімальне  $F_i(\phi_{22})$  можна знижувати до 0,3.

Підсумковий коефіцієнт використання площі виходу антени ( $k$ ) помітно залежить від коефіцієнта використання потужності опромінювача [1, 3]:

$$k_{0E} = \frac{P_{\Sigma}(\phi_{22})}{P_{\Sigma}}, \quad (5)$$

де  $P_{\Sigma}$  – повна потужність випромінювання опромінювача, визначена в проміжку кутів  $\phi_2 = \pm\phi_{22}$   $E$ -площини.

Отже,  $P_{\Sigma}(\phi_{22})$  – потужність, яку спрямовує в простір головне дзеркало.

Залежності  $k_{0E}$  та  $k_{0H}$  у  $H$ -площині рупорного опромінювача від кута  $\phi_1$  показані на рис. 3.

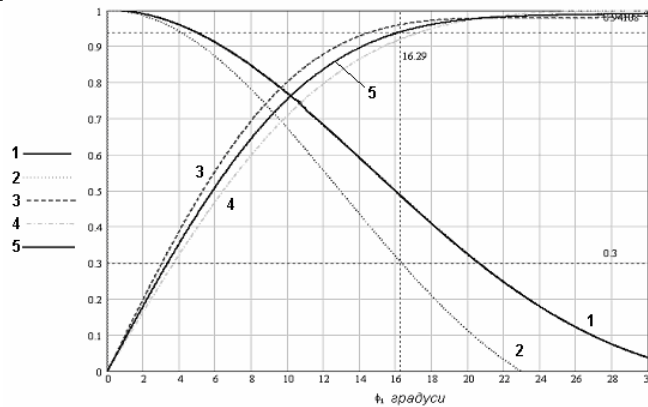


Рис. 3. Умова визначення коефіцієнта використання потужності рупора  $k_0$  і кута використання ДН рупора  $\phi_{11}$  для  $\lambda_0 = 3,19$  мм і радіуса рупора  $a_p = 5$  мм:

$$1 - F_H(\phi_1); 2 - F_E(\phi_1); 3 - k_{0E}(\phi_{11}); 4 - k_{0H}(\phi_{11}); 5 - k_0(\phi_{11}).$$

Підсумковий коефіцієнт використання потужності опромінювача, відповідно, [2]

$$k_0 = \sqrt{k_{0E} \cdot k_{0H}}. \tag{6}$$

З рис. 3 видно, що існує кут  $\phi_1$ , для якого  $k_{0E} = k_{0H}$ , однак це виконується для  $F_1(\phi_1) < 0,3$ . Відповідно до визначеного вище, радіус конічного рупорного опромінювача  $a_p$  вибираємо для  $F_1(\phi_{11}) = 0,3$  в разі живлення рупора  $TE_{11}$  хвилею у циліндричному хвилеводі. Очевидно, зменшення радіуса  $a_p$  супроводжується збільшенням відбиття від його виходу (коефіцієнт відбиття  $|p_p|$ ), яке обмежуємо до  $|p_p| \leq 0,1$ . Отже, за таких обмежень для хвилі  $\lambda_0 = 3,19$  мм технікою числових методів, відповідно до рис. 3, вибрано  $a_p = 5$  мм, коли  $|p_p| = 0,089$ ;  $\phi_{11} = 16,29^\circ$ ;  $k_0 = 0,941$ . Довжину рупора опромінювача  $d$  визначаємо з умови допустимих квадратичних фазових перекручень у виході рупора.

Головним питанням синтезу дводзеркальної антени є визначення радіуса малого еліптичного дзеркала  $r_0$ . Для цього зручно використати умову  $l_1 = l_2$  синфазності крайніх променів, що падають на еліптичне дзеркало (див. рис. 1). Тут

$$l_1 = \sqrt{L_1^2 + r_0^2} + \rho'(0); \quad l_2 = d + D + \rho'(\psi_0), \tag{7}$$

де  $\rho'(0)$  і  $\rho'(\psi_0)$  – крайні значення радіальної координати еліпса малого дзеркала (див. рис. 1),  $L_1 = L_2 + d$ ,  $L_2 = r_0 \cdot \text{ctg}\phi_{11}$ .

Однак в цьому алгоритмі треба спочатку задати відстань  $D$ . Ця відстань і радіус дзеркала  $r_0$  повинні запобігти розфазування поля внаслідок розташування малого дзеркала в ближній зоні поля рупора. Завдяки цьому поле випромінювання рупора можна записувати формулами для далекої зони. Кут  $\psi_0$  між фокусним кільцем та краєм головного дзеркала знайдемо за формулою (див. рис. 1)

$$\text{tg}(\psi_0 - \pi/2) = (L_1 + \Delta t - d - D) / R, \quad (8)$$

у якій  $\Delta t$  – прийнятий конструктивний параметр;  $R$  – радіус периметра головного дзеркала, що визначений за кутом розхилу головного пелюстка ДН антени і прийнятим коефіцієнтом використання  $k_1$ .

Відомі вирази для радіальної координати профілю еліпса малого дзеркала  $\rho'(\psi)$  [2], за якими можна розрахувати довжини  $l_1$  і  $l_2$  для заданого  $r_0$ . На рис. 4 точка перетину залежностей  $l_1$  і  $l_2$  від  $r_0$  визначає необхідний радіус малого дзеркала  $r_0$ . Лише тепер можна перевірити розфазування поля променів, що падають на мале дзеркало в ближній зоні поля випромінювання рупора. Відоме  $r_0$  дає змогу розрахувати практично всі геометричні розміри дводзеркальної антени.

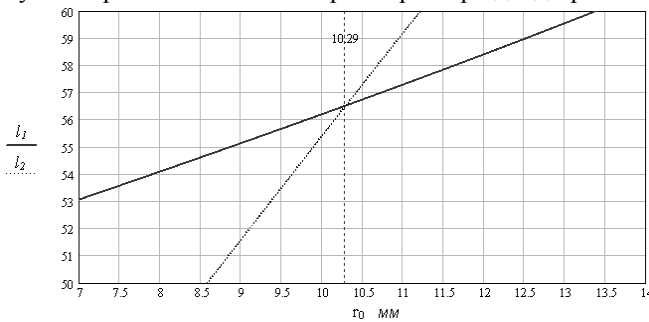


Рис. 4. Визначення  $r_0$  – радіуса малого дзеркала.

Завдяки малим розмірам апертури виходу антени простіше вирішити питання кріплення малого дзеркала. Зокрема, мале дзеркало можна прикріпити до захисної діелектричної пластини (див. рис. 1). Така пластинка є прозорою для електромагнітної хвилі, якщо її товщина  $d_n$  кратна довжині півхвилі в діелектрику. Однак у смузі робочих частот можуть виникати відбиті хвилі, а також їх загасання, що знижує коефіцієнт використання площі виходу антени. Найменший вплив на поширення хвиль і достатню механічну міцність має фторопластова діелектрична пластинка ( $\varepsilon=2$ ,  $\text{tg}\Delta_\varepsilon = 3 \cdot 10^{-4}$ , [4]). Цей немагнітний ізотропний діелектрик не поглинає води, не змінює властивостей у межах від  $-50$  до  $+150^\circ\text{C}$ . Його коефіцієнт температурного розширення  $\alpha_r=8 \cdot 10^{-5}$ . Неважко порахувати, що для  $\lambda_0=3,19$  мм коефіцієнт відбиття  $|p|$  від пластини товщиною  $d_n=4,513$  мм визначений зміною частоти в смузі  $\Delta f=\pm 2$  ГГц та поглинанням пластини і дорівнює 2,3% (коефіцієнт проходження хвилі  $|\tau|=0,996$ ). Тому коефіцієнт використання потужності антени

$k_{пл} = (1 - |p|^2) \cdot |z|^2$  дорівнює 0,991. Підсумковий коефіцієнт використання площі виходу антени визначений добутком [2]

$$k = k_0 \cdot k_a \cdot k_\phi \cdot k_T \cdot k_{пл}, \tag{9}$$

де  $k_T = 0,962$  залежить від точності виготовлення дзеркал  $\delta_1 = 0,05$  мм, а  $k_\phi = 0,928$  зумовлений зміщенням фазових центрів у  $E$ - і  $H$ -площинах [1, 2].

Отже, підсумковий коефіцієнт використання знижується лише до  $k = 0,801$ .

У пропонованому кріпленні малого дзеркала до фторопластової захисної пластини допускаємо, що конструкція кріплення пластини може стабілізувати вісь малого дзеркала з достатньою точністю. Однак температурне збільшення товщини пластини спричинює відбиття від пластини  $|p_i|$ , наближена формула для якого

$$|p_i| = \frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \alpha_t \cdot \Delta t^\circ \cdot q, \tag{10}$$

де  $\alpha_t$  – температурний коефіцієнт лінійного видовження фторопласту;  $\Delta t^\circ$  – зміна температури.

За формулою (10)  $|p_i| = 0,02$  при  $\Delta t^\circ = \pm 50^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_t = 8 \cdot 10^{-5}$ . Отже, коефіцієнт використання площі виходу антени  $k_i = (1 - |p_i|^2)$  дуже близький до одиниці.

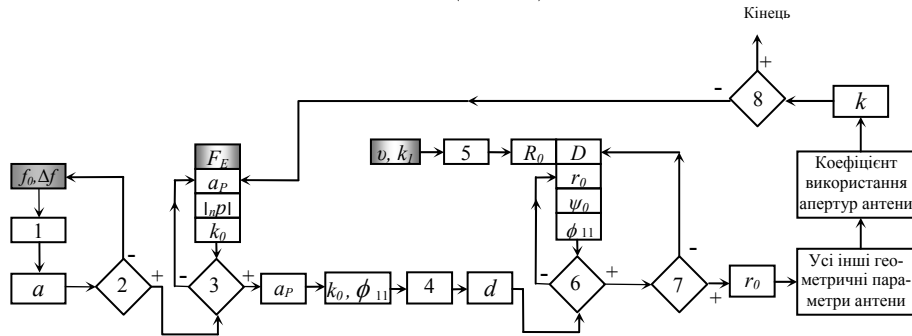


Рис. 5. Блок-схема алгоритма синтезу параболічної антени з малим еліптичним дзеркалом.

Ми з'ясували окремі етапи синтезу параболічної антени з еліптичним допоміжним дзеркалом. Загальний алгоритм синтезу починаємо з визначення радіуса циліндричного хвильовода  $a$ . Алгоритм, зображений на рис. 5, має два принципові блоки – вибір радіуса рупора опромінювача  $a_p$  і радіуса малого дзеркала  $r_0$ . Власне  $r_0$  пов'язує параметри опромінювача з параметрами дзеркал антени. В основі алгоритму – принцип перебирання для забезпечення восьми умов:

- 1 – загасання хвилі небажаного виду  $TE_{21}$  у циліндричному хвильоводі на найвищій частоті  $f_{max}$ ;
- 2 – незначна дисперсія хвильовода на найнижчій частоті  $f_{min}$ ;
- 3 – допустимі значення  $|p_p|$  і  $k_0$ ;
- 4 – допустимі квадратичні розфазування у виході рупора;
- 5 – забезпечення заданого коефіцієнта спрямованості при  $r_0 > 0$ ;
- 6 – синфазності крайніх променів у точці фокусного кільця;

7 – встановлення малого дзеркала в далекій зоні поля опромінювача;

8 –  $k > k_1$ , де  $k_1$  – коефіцієнт використання площі виходу для вибору  $r_0$ .

Умови 1, 2 – для вибору радіуса хвилевода; умови 3, 4 – для вибору параметрів рупора опромінювача; умови 5, 6, 7 – для вибору радіуса малого дзеркала; умова 8 – для контролювання розрахунку.

Очевидно, якщо окремі умови синтезу не виконуються, необхідно змінювати шукані величини  $a_p$ ,  $\Delta t$ ,  $D$ .

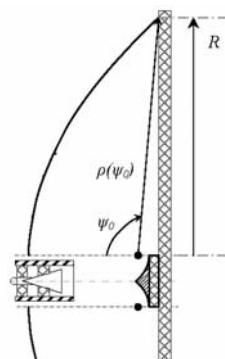
Лише в разі вибору радіуса хвилевода за дуже широкої смуги  $\Delta f$  може виникати потреба у додаткових заходах для розширення смуги хвилевода. За невиконання умови  $k \geq k_1$  розрахунок повторюють, починаючи від значення  $a_p$ .

Числові значення геометричних параметрів і коефіцієнтів використання площі виходу параболічної антени з еліптичним малим дзеркалом

Умови розрахунку	Хвилевід живлення	Рупор опромінювача	Еліптичне дзеркало	Параболічне дзеркало	Захисна пластина фторопласт ФФ-4
Задані значення величини	$f_0 = 94$ ГГц $\Delta f = \pm 2$ ГГц	$F_E = 0,3$		$2\nu_{0,5} = 1^\circ$	
Прийняті значення величини		$ p_p  = 0,089$	$D = 30$ мм $\Delta t = 4$ мм	$k_1 = 0,8$ $\delta_1 = 0,05$	$\Delta t = \pm 50^\circ\text{C}$ $d_n = 4,513$ мм $ p  = 0,023$
Розраховані значення величини	$a = 1,443$ мм	$a_p = 5$ мм $d = 16$ мм $\phi_{2p} = 17,35^\circ$	$r_0 = 10,29$ мм $\phi_{33} = 12,377^\circ$ $L_2 = 35,212$ мм $L_{00} = 5,211$ мм $L_1 = 51,211$ мм $\rho'(0) = 4,282$ мм $\psi_0 = 94,929^\circ$ $\phi_{22} = 11,361^\circ$ $\rho'(\psi_0) = 10,123$ мм	$R = 106,806$ мм $F_I = 44,275$ мм $\rho(\psi_0) = 96,875$ мм	$ p_t  = 0,02$
Результати розрахунку коефіцієнтів		$k_0 = 0,941$		$k_a = 0,962$ $k_\phi = 0,928$ $k_T = 0,962$	$k_{nl} = 0,991$
Результуючий коефіцієнт					$k = 0,801$

За розробленим алгоритмом розраховано дзеркальну антену з еліптичним допоміжним дзеркалом для робочої частоти  $f_0 = 94$  ГГц зі смугою  $\Delta f = \pm 2$  ГГц. Кут розхилу головного пелюстка ДН  $2\nu_{0,5} = 1^\circ$ . Геометричні параметри антени (див. рис. 1) зведені у таблицю.

Наголосимо, що для розрахунку прийнято середньоквадратичне значення точності виготовлення профілю дзеркал  $\delta_1 = 0,05$  мм. За даними таблиці на рис. 6 показано профіль розрахованої дводзеркальної антени.



Пропонований вище елементарний

Рис. 6. Радіальний переріз профілів дзеркал та їхнього опромінювача для хвилі  $\lambda_0 = 3,19$  мм і кута розхилу головного пелюстка антени  $2\nu_{0,5} = 1^\circ$  (масштаб 1:2).

алгоритм ґрунтується на сучасній техніці обчислень. Усі необхідні формули для реалізації алгоритму впливають з геометричних співвідношень або наведені у зазначених вище джерелах.

1. Айзенберг Г.З., Ямпольський В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 1. 280 с.
2. Айзенберг Г.З., Ямпольський В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 280 с.
3. Фрадин А.З. Антенны СВЧ. М.: Сов. радио, 1957. 647 с.
4. Отраслевой стандарт ОСТ 4.023.000. Устройства СВЧ. Полосковые линии. Платы. Материалы для диэлектрических оснований. Официальное издание СССР. ГР. 802563 от 10.02.77. ст. 52

#### ALGORITHM FOR SYNTHESIS OF DOUBLE-REFLECTOR-TYPE ANTENNA WITH ELLIPTICAL AUXILIARY REFLECTOR IN MILLIMETER WAVEBAND

I. Prudyus, Y. Zakharia, R. Andrushchak

*Lviv Polytechnic National University  
Bandera Str., 12, Lviv 79013, Ukraine*

By geometrical optic method an algorithm for synthesis of double-reflector-type antenna with elliptical auxiliary reflector is considered. Such algorithm is based on some number of conditions, which fulfil the electromagnetic field in antenna structure. For millimeter waveband, it is proposed to fasten the auxiliary reflector on the antenna-protection dielectric plate. An example of antenna synthesis is added.

*Key words:* double-reflector-type antenna, antenna synthesis.

Стаття надійшла до редколегії 20.06.2005



