

# СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ПЛАНАРНОЙ ТРЕХЗЕРКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

А. С. Венецкий, В. А. Калошин, К. Т. Нгуен, Е. В. Фролова

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2017 г.

**Аннотация.** Проведен синтез трехзеркальной системы с цилиндрической симметрией. В результате оптимизации параметров реализован сектор сканирования  $\pm 50$  градусов. Результаты эксперимента подтвердили величину сектора сканирования и широкополосные свойства многолучевой планарной антенны на базе синтезированной трехзеркальной системы.

**Ключевые слова:** антенны, сверхширокополосные, многолучевые, трехзеркальные, планарные.

**Abstract.** Cylindrical mirror and mirror - lens systems are used as radiating systems for multibeam antenna arrays. In this case, the planar waveguide, in which the feed element is located, makes a 180-degree turn and forms a two-layer structure, the second floor of which is occupied by an array. Such a design is more compact than a one-story one, in which the Rotman lens is usually used as a focusing element. A two-mirror aplanatic system allows reducing aberrations and expanding the scanning sector in comparison with a single-mirror one, however, for the arrangement of the grating above the planar waveguide, one more rotation of the planar waveguide is required, i.e. a transition to a three-mirror system is necessary. This construction is considered in this paper. It is shown that the third mirror allows reducing aberrations in comparison with the two-mirror system. The work consists of two parts. In the first part, problems of synthesis and minimization of aberrations of a cylindrical three-mirror aplanatic system are considered. As a result of optimization of the parameters, the angle of view of 100 degrees is realized. In the second part, the scanning properties of a four-layer antenna based on a synthesized three-mirror system were studied. The results of the experiment confirmed the size of the scanning sector and

the broadband properties of the multi-beam antenna based on a synthesized three-mirror system.

**Keywords:** antennas, ultra-wideband, multi-beam, three-mirror, planar.

## **Введение**

Цилиндрические зеркальные и зеркально – линзовые системы используются в качестве облучающих систем для многолучевых антенных решеток. При этом планарный волновод, в котором располагается облучающая система, делает 180-градусный разворот и образует двухэтажную конструкцию, второй этаж которой занимает решетка. Такая конструкция [1, 2] является более компактной по сравнению с одноэтажной, в которой в качестве фокусирующего элемента обычно используется линза Ротмана [3]. Двухзеркальная апланатическая система позволяет уменьшить aberrации и расширить сектор сканирования по сравнению с однозеркальной [4-7], однако при этом для расположения решетки над планарным волноводом необходим еще один разворот планарного волновода, т.е. необходим переход к трехзеркальной системе. Именно такая конструкция рассматривается в данной работе. При этом показано, что третье зеркало позволяет уменьшить aberrации по сравнению с двухзеркальной системой. Работа состоит из двух частей. В первой части рассмотрены задачи синтеза и минимизации aberrаций цилиндрической трехзеркальной апланатической системы, а во второй - проведен анализ сканирующих свойств четырехслойной антенны на основе синтезированной трехзеркальной системы.

### **1. Синтез и оптимизация трехзеркальной системы**

Рассмотрим задачи синтеза и минимизации aberrаций цилиндрической трехзеркальной апланатической системы, которая преобразует цилиндрический сферический фронт с центром в начале декартовой системы координат (точка  $O$  на рис.1) в плоский фронт. Могут быть четыре варианта реализации такой системы. Образующие зеркала одного из вариантов показаны на рис. 1 .

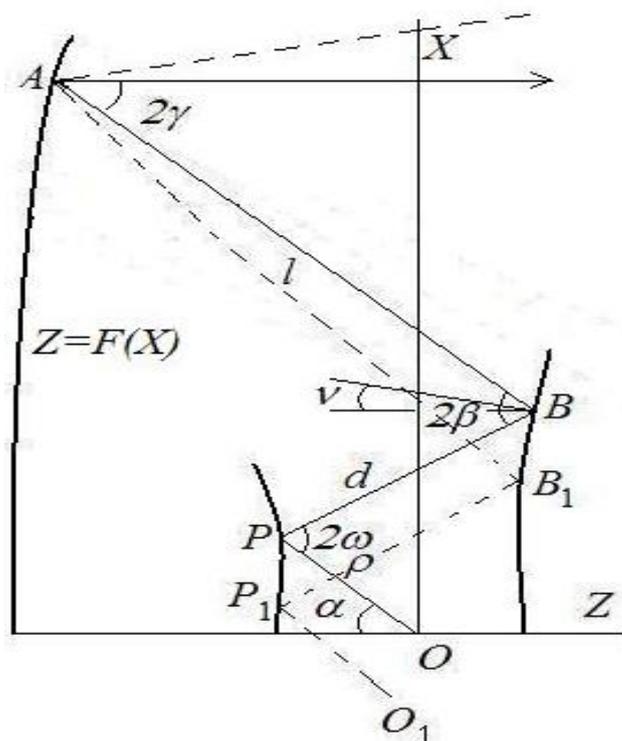


Рис.1. Образующие трехзеркальной системы

Предположим, что форма образующей главного зеркала (на рис. 1 - слева) известна и задана в декартовой системе полиномом 8 степени

$$Z = F(X) = \sum_{n=0}^4 F_{2n} X^{2n}, \tag{1}$$

где все коэффициенты известны. Тогда два других зеркала определяются однозначно из условия фокусировки и выполнения условия апланатизма

$$r_A = |X_A| = f_e \sin \alpha, \tag{2}$$

где  $f_e = \text{const}$  – фокальный радиус, угол  $\alpha$  показан на рис.1.

Цель данной работы – найти формулу для эйконала, как функцию величины продольного и поперечного смещения источника из фокуса  $O$  и параметров системы  $\rho_0, d_0, l_0, m (f_e), F(X)$ , и с ее использованием минимизировать aberrации. Параметры  $\rho, d, l$  показаны на рис.1, нижний нулевой индекс соответствует значению параметра на оси системы.

Для решения задачи синтеза формы образующей вспомогательных зеркал используем результаты, полученные в работе [8]. Если задано положение фокуса  $O$  и образующая главного зеркала, то геометрия задачи определяется четырьмя параметрами:  $\rho_0, d_0, l_0, f_e$ .

Задача сводится к интегрированию дифференциального уравнения

$$\frac{d}{d\alpha} \left( \frac{1}{\rho} \right) = \left( \frac{1}{\rho} \right) S(\alpha) + T(\alpha),$$

решение которого имеет вид двукратного интеграла

$$\frac{1}{\rho} = C \exp \left[ \int S(\alpha) d\alpha \right] + \exp \left[ \int S(\alpha) d\alpha \right] \int T(\alpha) \exp \left[ - \int S(\alpha) d\alpha \right] d\alpha,$$

где

$$S(\alpha) = \frac{(C_0 - \Phi_A - Z_*) \tan(\gamma) - (C_0 - \Phi_A + Z_*) \tan(\alpha/2)}{(C_0 - \Phi_A + Z_*) + (C_0 - \Phi_A - Z_*) \tan(\gamma) \tan(\alpha/2)},$$

$$T(\alpha) = \frac{2(\tan(\alpha/2) - \tan(\gamma))}{(C_0 - \Phi_A + Z_*) + (C_0 - \Phi_A - Z_*) \tan(\gamma) \tan(\alpha/2)},$$

$$C_0 = 2\rho_0 + 2l_0, \Phi_A = -F(X_A) + X_A / \sin(2\gamma), Z_* = X_A / \tan(2\gamma) + F(X_A).$$

Для апланатической системы решение приводится к однократному интегралу:

$$\frac{1}{\rho} = \left[ \frac{1}{2(\rho_0 - \hat{l}_0)} + \frac{1}{2d_0} \right] + \left[ \frac{1}{2(\rho_0 - \hat{l}_0)} - \frac{1}{2d_0} \right] \cos \alpha - \frac{\hat{l}_0}{\rho_0(\rho_0 - \hat{l}_0)} \exp \Psi,$$

$$\Psi = \int_0^\alpha \frac{(\rho_0 - \hat{l}_0) \tan \gamma - d_0 \tan(\alpha/2)}{d_0 + (\rho_0 - \hat{l}_0) \tan \gamma \tan(\alpha/2)} d\alpha,$$

$$\hat{l}_0 = Z_*^0 - d_0 + \rho_0 = \frac{1}{4F_2} - l_0.$$

Эйконал на поверхности зеркала в произвольной точке  $A(X)$  можно вычислить непосредственно сложением оптических путей

$$\Phi(X) = |O_1 P_1| + |P_1 B_1| + |B_1 A| = \sqrt{(x_1 + \delta_x)^2 + (z_1 + \delta_z)^2} + \sqrt{(X_1 - x_1)^2 + (Z_1 - z_1)^2} + \sqrt{(X - X_1)^2 + (F(X) - Z_1)^2}, \quad (3)$$

где смещенный источник  $O_1$  имеет координаты  $(-\delta_x, -\delta_z)$ , а координаты  $P_1(x_1, z_1)$

и  $B_1(X_1, Z_1)$  вычисляются с помощью формул:

$$x_1 = x_p + \Delta x \text{sign}(X),$$

$$z_1 = f(x_1) - \text{уравнение образующей первого зеркала},$$

$$X_1 = X_B + \Delta X \text{sign}(X),$$

$Z_1 = G(X_1)$  - уравнение образующей второго зеркала.

Неизвестные  $\Delta x$ ,  $\Delta X$ , –можно найти, предварительно разложив  $\Phi(X)$ , определенную в (3), в ряд по по степеням  $\Delta x$ ,  $\Delta X$ , включая члены второго порядка и записать условие экстремума согласно принципу Ферма

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \Delta x} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \Delta X} = 0. \quad (4)$$

Из приведенных уравнений можно найти:

$$\Delta x = -\frac{\cos(\omega - \alpha)}{\cos \omega} \frac{(r'd + l\rho)}{(r')^2(1 - C_A l)} (\delta_X \cos \alpha \text{sign}(X) + \delta_Z \sin \alpha), \quad (5)$$

$$\Delta X = -\frac{l \cos \nu}{f_e \cos \alpha \cos \beta} (\delta_X \cos \alpha \text{sign}(X) + \delta_Z \sin \alpha).$$

Если смещенный источник расположен на фокальной кривой, то формулы для  $\Delta x$ ,  $\Delta X$  в (5) упрощаются:

$$\Delta x = -\frac{\cos(\omega - \alpha)}{\cos \omega} \frac{(r'd + l\rho)}{(r')^2(1 - C_A l)} \delta_X \cos \alpha \text{sign}(X),$$

$$\Delta X = -\frac{l \cos \nu}{f_e \cos \alpha \cos \beta} \delta_X \cos \alpha \text{sign}(X),$$

где  $\omega = \arctg(-S(\alpha) - \rho T(\alpha))$ ,  $\beta = \gamma + \omega - \alpha/2$ ,  $\nu = \gamma - \omega + \alpha/2$ ,  
 $\gamma = \arctg(F'(X_A))$ ,  $C_A = 2K_A / \cos \gamma$ ,  $K_A > 0$  - кривизна зеркала в точке  $A$ .

Однако иногда удобнее использовать представление формул для эйконала в виде разложения по степеням  $\delta$ . Для этого рассмотрим пучок лучей с малым угловым размером  $d\alpha$ , падающий на первое зеркало. Найдем  $d\tilde{\alpha}$  и  $\tilde{\rho}$  отраженного пучка (Рис. 2).

Можно показать [9], что при отражении тонкого пучка, выходящего из точки  $O$  выполняются соотношения для измененных малых углов и длин (обозначены волнистой чертой сверху), выраженные через значения кривизны на зеркалах и углы между нормалью и падающим лучом.

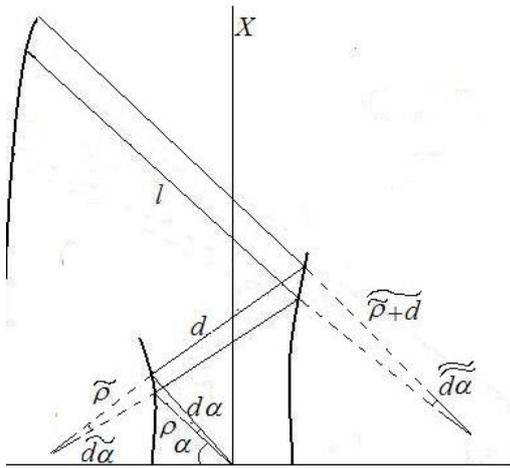


Рис.2. К выводу формул (6)-(11).

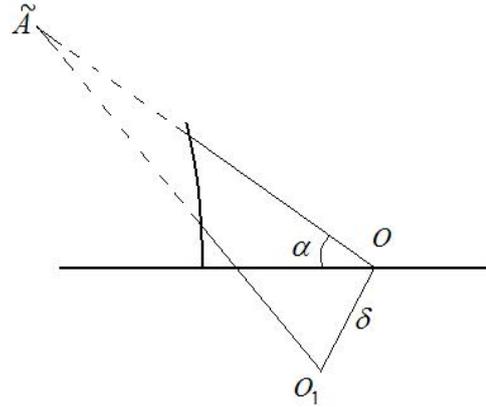


Рис.3. К выводу формулы (12).

$$\tilde{\rho} = \rho / (1 + C_P \rho), \quad d\tilde{\alpha} = (1 + C_P \rho) d\alpha,$$

$$(\tilde{\rho} + d) = \frac{\tilde{\rho} + d}{1 + C_B(\tilde{\rho} + d)} = \frac{\rho + d + C_P \rho d}{1 + C_P \rho + C_B(\rho + d + C_P \rho d)},$$

$$d\tilde{\alpha} = [1 + C_B(\tilde{\rho} + d)] d\tilde{\alpha} = [1 + C_P \rho + C_B(\rho + d + C_P \rho d)] d\alpha,$$

$$[(\tilde{\rho} + d) + l] d\tilde{\alpha} = r'(\alpha) d\alpha,$$

$$L_0 + C_P \rho(d + l) + C_B l(\rho + d) + C_B C_P l \rho d = r'(\alpha) \tag{6}$$

$$L_0 = \rho + d + l, \quad r(\alpha) = |X_A|, \quad C_P = 2K_P / \cos \omega, \quad C_B = 2K_B / \cos \beta,$$

$K_P, K_B$  – кривизны в точках  $P$  и  $B$  (рис.1).

$$C_B = \frac{r'(\alpha) - L_0 - C_P \rho(d + l)}{l(\rho + d + C_P \rho d)} \tag{7}$$

$$C_P C_B = \frac{1}{\rho d l} [r'(\alpha) - L_0 - C_P \rho(d + l) - C_B l(\rho + d)] \tag{8}$$

Теперь, если рассмотреть пучок, исходящий из точки  $A$ , и проходящий через точки  $O$  и  $O_1$ , то можно найти измененную длину  $L_1$  от точки  $A$  до точки  $O_1$ .

$$L_1 = (\tilde{l} + d) + \rho, \quad \tilde{l} = l / (1 + C_B l),$$

$$(\tilde{l} + d) = \frac{\tilde{l} + d}{1 + C_P(\tilde{l} + d)},$$

$$(\tilde{l} + d) + \rho = \frac{L_0 + C_P \rho(d + l) + C_B l(\rho + d) + C_B C_P l \rho d}{1 + C_B l + C_P(l + d) + C_B C_P l d},$$

Из (6), (7), (8) следует, что

$$L_1 = \frac{r'(\alpha)(\rho + d + C_P \rho d)}{r'(\alpha)(1 + C_P d) - l} \quad (9)$$

В точке  $A$  условие соответствия падающего и отраженного пучков можно записать в виде:

$$1 - C_A [(\tilde{\rho} + d) + l] = 0 \quad (10)$$

С учетом (6)-(8) (10) можно записать в виде:

$$1 + C_P d = (r' - C_A l r' - d) / \rho$$

С учетом последнего равенства выражение (9) для  $L_1$  примет вид:

$$\frac{1}{L_1} = \frac{r'[r'(1 - C_A l) - d] - l \rho}{\rho(r')^2(1 - C_A l)} \quad (11)$$

Так как система является апланатической, то  $r(\alpha) = f_e \sin \alpha$ , и  $r'(\alpha) = f_e \cos \alpha$ .

Теперь для произвольной точки  $A$  на зеркале можно найти значение эйконала при смещении источника в точку  $O_1$  с координатами  $(-\delta_x, -\delta_z)$ . В треугольнике на рис.3  $L_1 = |\tilde{A}O_1|$ , по теореме косинусов:

$$|\tilde{A}O_1|^2 = L_1^2 + \delta^2 - 2\delta L_1 \cos \langle \tilde{A}OO_1, \delta^2 = \delta_x^2 + \delta_z^2.$$

Выражая из последнего равенства  $|\tilde{A}O_1| = \Phi(AO_1)$  в виде ряда по  $\delta_x, \delta_z$ , получаем

$$\begin{aligned} \Phi(X) = L_0 + \delta_x \sin \alpha \operatorname{sign}(X) + \delta_z \cos \alpha + \frac{\delta_x^2 \cos^2 \alpha}{2 L_1} + \\ + \frac{\delta_z^2 \sin^2 \alpha}{2 L_1} - \frac{1}{2} \frac{\delta_x \delta_z}{L_1} \sin 2\alpha \operatorname{sign}(X) + \dots \quad (12) \end{aligned}$$

где  $\alpha = \arcsin(|X| / f_e)$ .

При смещении источника из фокуса в точке  $O(0,0)$  в точку  $O_1(-\delta_x, -\delta_z)$  фронт выходящей волны поворачивается на некоторый угол  $\Theta$ . Найдем

уравнение фокальной кривой  $\delta_Z = f_1(\delta_X)$ , по которой будет перемещаться источник  $O_1$ , из условия минимума среднеквадратической аберрации (СА):

$$S_A(\Theta) = \sqrt{\int_{-1/2}^{1/2} (\Phi(X) - \Phi(0) - X \sin \Theta - Z \cos \Theta)^2 dX}, \quad (13)$$

где  $\Theta$  - угол наклона выходного волнового фронта к оси системы.

Эйконал в точке  $A$  на третьем зеркале с координатами  $(X, F(X))$  определяем по формуле (3) или (12).

При смещении источника из фокуса система формирует выходной фронт, близкий к плоскости, уравнение которой имеет вид

$$Z \cos \Theta + X \sin \Theta - Z_0 \cos \Theta = 0, \quad (14)$$

где  $\Theta = \arcsin(\delta_X / f_e)$  - угол наклона фронта ( $f_e$  - фокальный радиус),  $Z_0$  - координата точки пересечения плоскости с осью  $Z$  и выбрана так, что  $Z_0 > d_0$ .

Найдем расстояние от произвольной точки  $A$  на поверхности зеркала до этой плоскости. Пусть точка  $A$  имеет координаты  $(X, F(X))$ . Тогда расстояние от точки  $A$  до плоскости (14) равно:

$$D = Z_0 \cos \Theta - X \sin \Theta - F(X) \cos \Theta, \quad (15)$$

где  $Z = F(r)$  - уравнение зеркала.

Прибавляя к значению эйконала в точке  $A$ , найденному по формуле (12), величину  $D$  из формулы (15) и учитывая, что и  $\rho + d + l + Z_0 - F(r) = C$  ( $C$  - константа),  $\sin \alpha = |X| / f_e$  можно получить:

$$\begin{aligned} \Phi(X) + D = C + (F(X) - Z_0)(1 - \cos \Theta) + \delta_Z \cos \alpha + \\ + \frac{\delta_X^2 \cos^2 \alpha}{2 L_1} - \frac{\delta_X \delta_Z}{2 L_1} \sin 2\alpha \operatorname{sign}(X) + \frac{\delta_Z^2}{2 L_1} \sin^2 \alpha. \end{aligned}$$

Последнее выражение можно представить в виде суммы:  $\Phi + D = \Phi_1 + \Phi_2$ , где

$$\Phi_1 = -\frac{\delta_X \delta_Z}{2 L_1} \sin 2\alpha \operatorname{sign}(X),$$

$$\Phi_2 = C + (F(r) - Z_0)(1 - \cos \Theta) + \delta_Z \cos \alpha + \frac{\delta_X^2 \cos^2 \alpha}{2 L_1} + \frac{\delta_Z^2 \sin^2 \alpha}{2 L_1}$$

Величину надо выбрать из условия, чтобы выполнялось равенство:

$$\Phi_2(0) = \Phi_2(r_1), \tag{16}$$

где  $r_1 = r(\alpha_1)$  – точка внутри апертуры.

Используя условие (16) и выражение  $\cos \Theta = \sqrt{1 - \delta_X^2 / f_e^2} = 1 - \delta_X^2 / (2 f_e^2)$ , можно получить уравнение фокальной кривой системы:

$$\delta_Z (1 - \cos \alpha_1) - \frac{\delta_Z^2}{2 L_1(\alpha_1)} \sin^2 \alpha_1 = \frac{\delta_X^2}{2} \left( \frac{\cos^2 \alpha_1}{L_1(\alpha_1)} - \frac{1}{L_1(0)} - \frac{1}{f_e^2} (F(0) - F(r_1)) \right) \tag{17}$$

При минимизации СА по параметрам  $\rho_0, f_e, F_2, F_4, F_6, F_8$  при угле  $\Theta = 25^\circ$  использовалась формула (13), а в качестве начального приближения – параметры двухзеркальной системы. При этом главное зеркало трехзеркальной системы полагалось плоским, а эйконал вычислялся по формуле (3). После завершения процесса оптимизации полученные значения параметров брались как начальные значения для минимизации СА методом геометрической оптики.

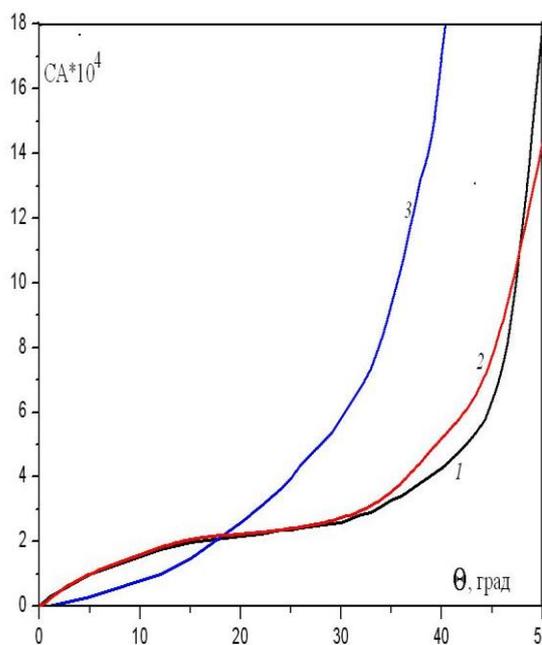


Рис. 4. Зависимость аберрации от угла сканирования

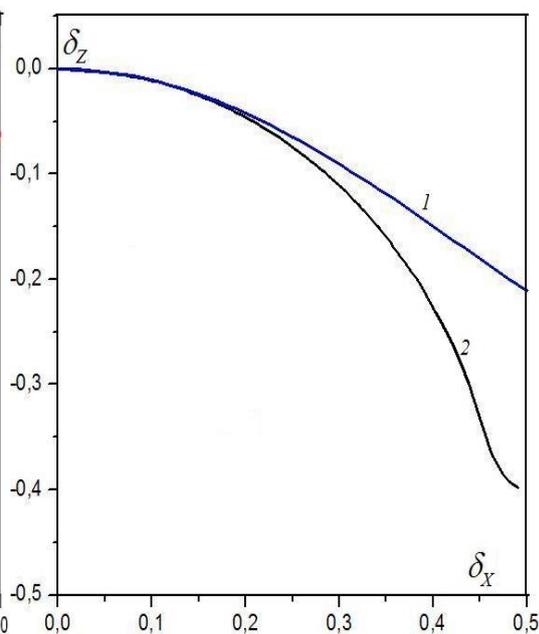


Рис.5. Фокальные кривые для трехзеркальной системы.

В результате оптимизации были получены следующие значения параметров:  $\rho_0=0.79$ ,  $f_e=0.82$ ,  $F_2=0.1365$ ,  $F_4=0.00776$ ,  $F_6=-0.01123$ ,  $F_8=-0.04529$ . Параметры  $l_0=0.1$ ,  $d_0=0.1$  взяты из двухзеркальной системы. На рис.4 кривой 1 приведена зависимость среднеквадратической аберрации от угла отклонения луча в оптимальной трехзеркальной системе, рассчитанная геометрико-оптическим методом, а кривой 2 – аналогичная зависимость, рассчитанная по формуле (3). Для сравнения кривой 3 на рисунке показана СА в оптимальной двухзеркальной системе [7]. Видно, что третье зеркало позволяет существенно уменьшить величину СА для больших углов зрения.

На рис.5 кривой 1 приведена фокальная кривая для трехзеркальной системы, вычисленная по формуле (17), а кривой 2 – полученная в результате оптимизации. При этом первая кривая использовалась как начальное приближение для вычисления второй.

## 2. Исследование трехзеркальной четырехслойной антенны

Схема макета трёхзеркальной антенны в виде четырехслойной структуры изображена на рис.12. Каждый из четырёх слоёв этой структуры представляет собой планарный волновод с воздушным заполнением, образованный двумя металлическими пластинами. При моделировании многолучевой антенны облучатель в виде Н-секториального рупора, расположенный внутри планарного волновода 1, перемещается по фокальной кривой 2, показанной на рис.11. Планарные волноводы объединены попарно цилиндрическими зеркалами: слои 1,2 – зеркалом 1, слои 2,3 – зеркалом 2, слои 3,4 – зеркалом 3. Образующие зеркала 1,2,3 представляют собой, соответственно, синтезированные выше образующие первого, второго вспомогательных зеркал и главного зеркала. Связь между слоями осуществляется через щели, форма которых аналогична форме образующих зеркал. Ширина щели перехода в каждом слое определена в результате оптимизации.

Поле облучателя, падая на первое вспомогательное зеркало и отражаясь, проходит через согласованную щель 1 на второй слой. Далее, на втором слое, волна, отражаясь от второго зеркала, переходит через щель 2 на третий слой и

т.д. На четвертом слое волна, отразившись от главного зеркала, излучается в свободное пространство из открытого конца планарного волновода, расширенного в виде рупора в Е-плоскости.

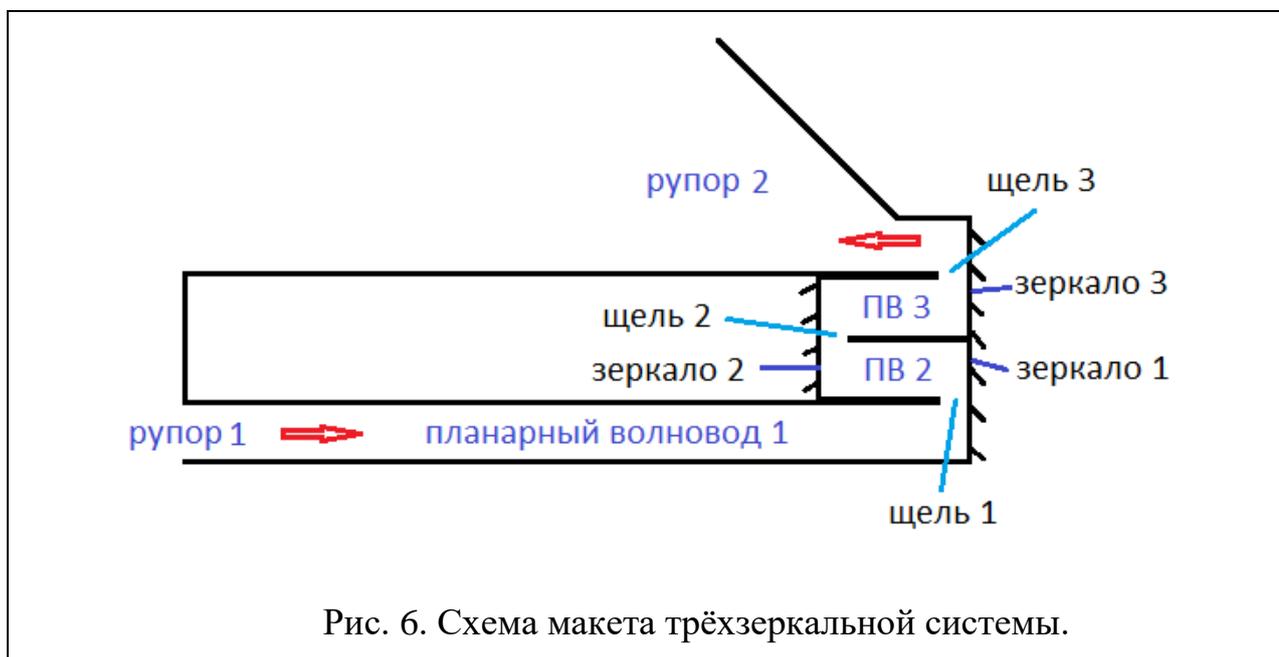


Рис. 6. Схема макета трёхзеркальной системы.

На рис.7 синей, красной и зеленой кривыми приведены диаграммы направленности в Н- плоскости центрального луча антенны при положении рупора в фокусе на оси системы, соответственно на частотах 12, 15, 20 ГГц.

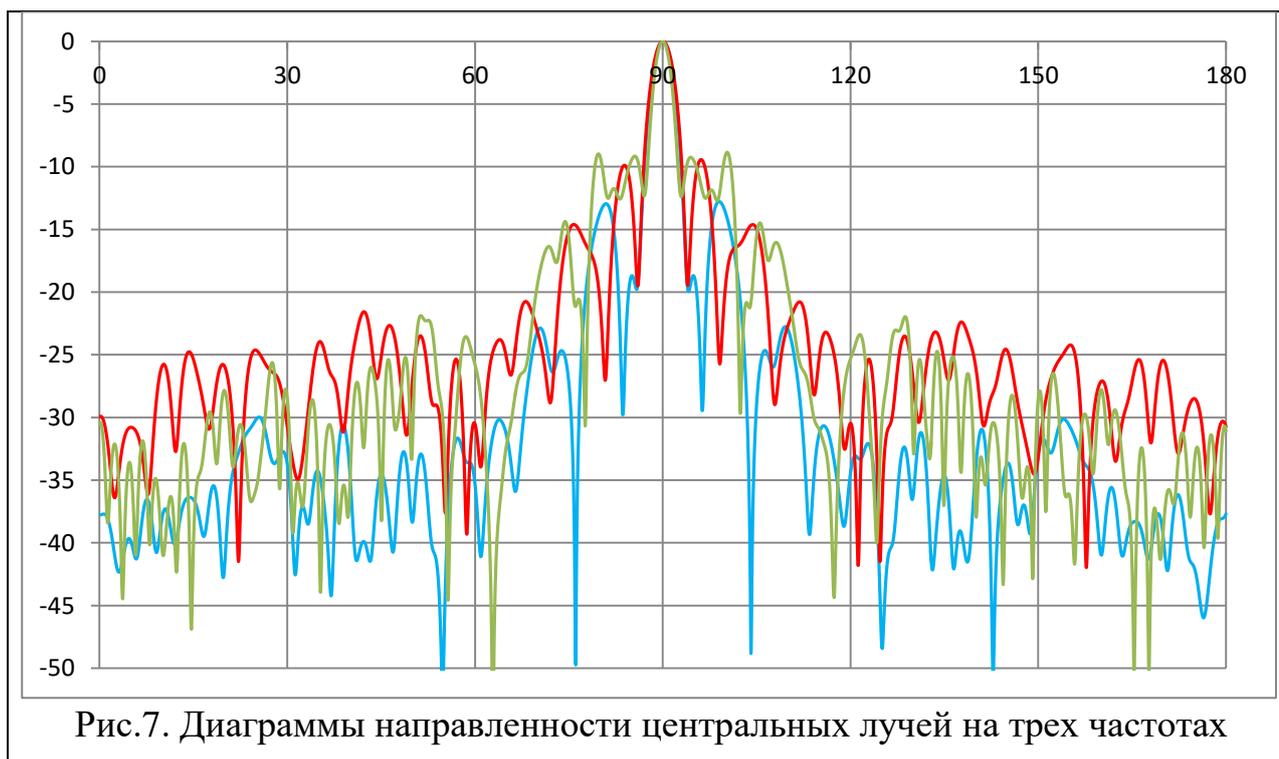


Рис.7. Диаграммы направленности центральных лучей на трех частотах

На рис. 8 красной, зеленой и синей кривыми представлены диаграммы направленности в Н-плоскости в режиме сканирования антенны при положении рупора в точках фокальной кривой, соответствующих смещению луча на  $0^\circ$ ,  $25^\circ$  и  $50^\circ$  на частоте 15 ГГц, соответственно.

Полученные результаты подтверждают величину сектора сканирования и широкополосные свойства многолучевой планарной антенны на базе синтезированной трехзеркальной системы.

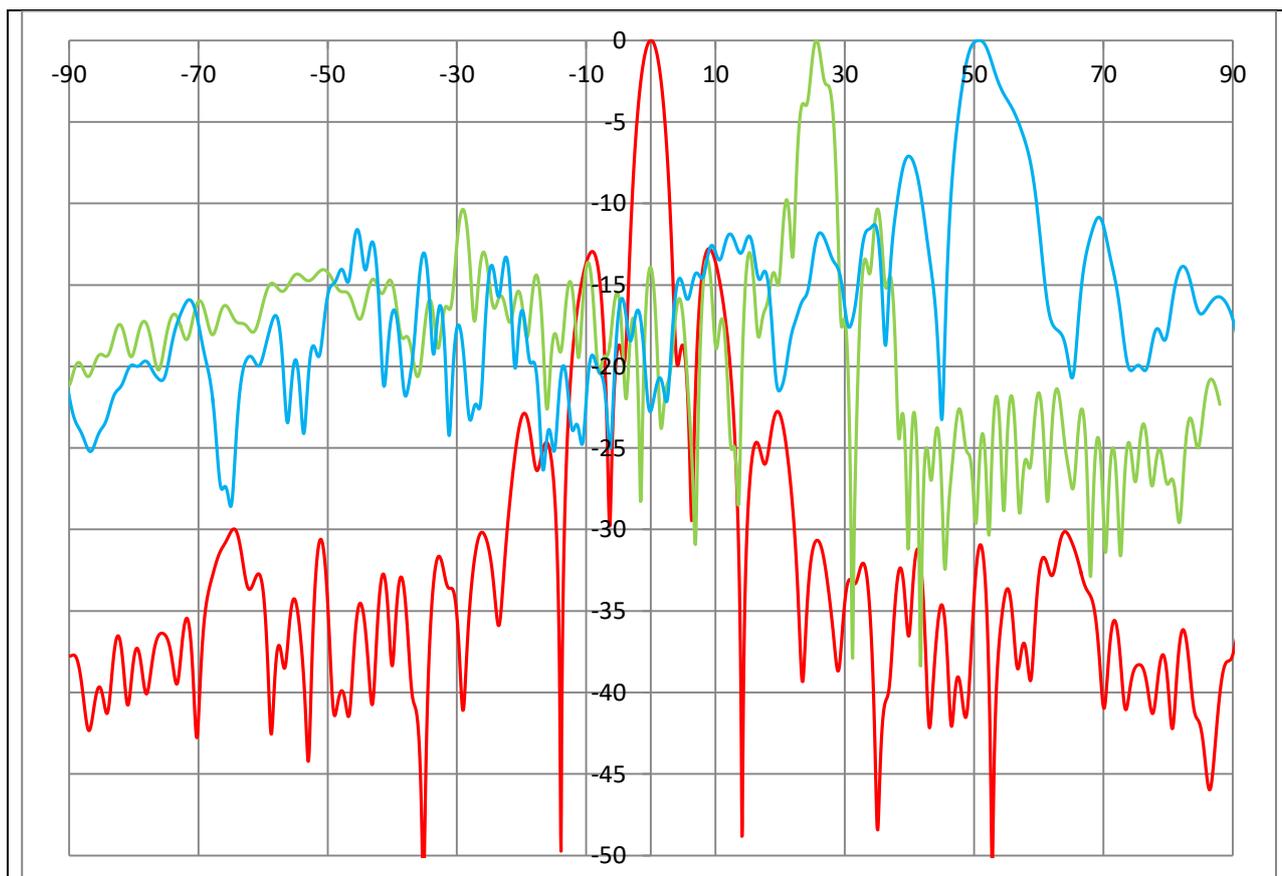


Рис.8. Диаграммы направленности на частоте 15 ГГц в режиме сканирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-07-07797

### Литература

1. В.А.Калошин Многолучевые гибридные антенны // Труды 13 Междун. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии, Crimico-2003», Севастополь, сентябрь 2003г., с.383-390.

2. ErioGandini, Mauro Ettore, Massimiliano Casaletti, Karim Tekkouk, Laurent Le Coq, and Ronan Sauleau “SIW Slotted Waveguide Array With Pillbox.Transition for Mechanical Beam Scanning” // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, Vol. 11, pp.1572-1577.
3. Yu Jian Cheng, Wei Hong, Ke Wu, Zhen Qi Kuai and others, Substrate Integrated Waveguide (SIW) Rotman Lens and Its Ka-Band Multibeam Array Antenna Applications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, Vol.56, № 8, pp.2504-2513.
4. Калошин В.А., Фролова Е.В. Метод анализа и минимизации аберраций в многолучевых планарных зеркальных системах // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2014. №1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/16/text.pdf>.
5. Венецкий А.С., Калошин В.А., Аберрации эйконала в планарных двухзеркальных антеннах // РЭ, 2014, Т.59, №11, С.1102-1110.
6. Банков С.Е, Калошин В.А., Фролова Е.А. Оптимизация планарных зеркальных систем по совокупности показателей качества // РЭ, 2014, Т.59, № 11, С.1090-1101.
7. Банков С.Е, Фролова Е.В. Проектирование и экспериментальное исследование планарной многолучевой двухзеркальной апланатической системы // РЭ, 2017, Т.62, № 5, С. 463-469.
8. Head A.K., A Class of Aplanatic Optical Systems // Proc. Phys. Soc. LXXI, 1958, 4. pp. 546-551.
9. Венецкий А.С., Калошин В.А. О распределении эйконала в апертуре двухзеркальной телескопической системы // РЭ, 2012, Т.57, №9, С.1004-1011.

**Для цитирования:**

А. С. Венецкий, В. А. Калошин, К. Т. Нгуен, Е. В. Фролова. Синтез и исследование сверхширокополосной планарной трехзеркальной системы. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan18/4/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719-2018-1-5