

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ  
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЛИНЗЫ ФРЕНЕЛЯ**

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF DIRECTIONAL PROPERTIES  
OF THE MODIFIED FRESNEL LENS**

**Аннотация.** Представлены результаты измерений диаграмм направленности осесимметричной модифицированной линзы Френеля. Проведено сравнение этих результатов с расчетами, основанными на численном методе решения интегральных уравнений.

**Summary.** Results of pattern measurements of the modified Fresnel lens with rotational symmetry are submitted. Comparison of this results with calculations based on a numerical method of the decision of the integrated equations is carried out.

Расширение круга задач, рассматриваемых современной радиоэлектроникой стимулировало решение проблемы формирования волновых фронтов в оптических и радиосистемах с использованием антенных и фокусирующих устройств дифракционного типа, основным элементом которых являются дискретные поверхности. В связи с этим дальнейшего развития требуют теоретические и экспериментальные исследования основных закономерностей и характеристик, присущих апертурным антеннам с дискретной рабочей поверхностью.

Геометрическая конфигурация дискретной поверхности формируется в процессе дискретизации, когда выбранная поверхность (либо совокупность поверхностей) разделяется на зоны согласно заданному алгоритму и из этих зон выделяется некоторое подмножество. В качестве примера можно указать на известные из оптики [1] зонные пластинки Френеля-Сорэ. Их рабочая поверхность формируется путем разбиения плоской поверхности на полуволновые зоны Френеля [2]. Такие (классические) линзы Френеля (ЛФ) и их модификации находят применение не только в оптике [2,3], они используются в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн, например, в качестве антенных либо фокусирующих элементов [4 ... 9].

Основным недостатком ЛФ является то, что, используемые в качестве элементов антенн, они формируют два главных лепестка диаграммы направленности (ДН): в прямом и в обратном направлениях. Наряду с этим, отраженные от поверхности ЛФ волны фокусируются в месте расположения облучателя, то есть заметно выражен эффект «реакции зеркала на облучатель». Эти недостатки в определенной мере ограничивают применение ЛФ в антенной технике.

Модифицированные линзы Френеля (МЛФ), упомянутые в работах [10, 11], практически не имеют перечисленных выше недостатков. При этом численный анализ, проведенный на двухмерных математических моделях, и сравнение характеристик МЛФ и ЛФ [12] указали на преимущества МЛФ, подтвердив корректность исходных положений, на основе которых формируются поверхность МЛФ. Однако аналогичные исследования характеристик трехмерных моделей МЛФ до настоящего времени не проводились, что обусловлено математическими трудностями, встречающимися при решении подобных задач.

Для того чтобы восполнить этот пробел, изучить свойства реальной модели линзовой антенны, основным элементом которой является МЛФ, а также сопоставить полученные данные с результатами анализа двухмерных моделей, поставлена цель провести экспериментальные исследования.

**1. Конструктивные особенности испытываемой линзовой антенны.** При определении геометрических параметров осесимметричной МЛФ плоская поверхность раскрыва будущей линзы разбивается на полуволновые зоны (зоны Френеля) с использованием канонической формулы для радиусов этих зон при разбиении (дискретизации) параболического типа [11, 13]

$$\rho_n = \sqrt{z_n^2 + y_n^2} = \sqrt{f_0 n \lambda_0 / 2 + (n \lambda_0 / 2)^2}, \quad (\rho_n \leq \frac{d}{2}),$$

где  $n$  – номер зоны Френеля;  $\rho_n$  – радиус  $n$ -й зоны Френеля;  $f_0$  – фокусное расстояние;  $d$  – размер раскрыва;  $\lambda_0$  – расчетная длина волны.

С учетом имеющихся технических возможностей при изготовлении экспериментального макета антенны были выбраны следующие параметры экспериментального макета антенны:  $d = 21\lambda_0$ ,  $f/d = 0,4$  при  $\lambda_0 = 0,0308$  м (что соответствует частоте 9740 МГц).

На основе формул, приведенных в работе [13], рассчитаны радиусы зон Френеля и значения размеров  $l_n$  (рис. 1, а) цилиндрических кольцевых элементов, затеняющих четные зоны. Относительные значения этих величин приведены в табл. 1, а профиль МЛФ изображен на рис. 1, а.

Таблица 1 – Радиусы зон Френеля и размеры элементов МЛФ

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

$\rho_n / \lambda_0$	3,05	4,38	5,45	6,36	7,2	8,02	8,77	9,48	10,16	10,84
$l_n / \lambda_0$	2,63	–	1,27	–	0,88	–	0,65	–	0,55	–

Макет линзовой антенны изготовлен следующим образом: основанием, в котором жестко закрепились элементы линзы, служил лист пеностирола, а сами элементы представляли собой тонкостенные круговые цилиндры радиусом  $\rho_n$  ( $n$  – нечетное), изготовленные из медного сплава (рис. 1, б).

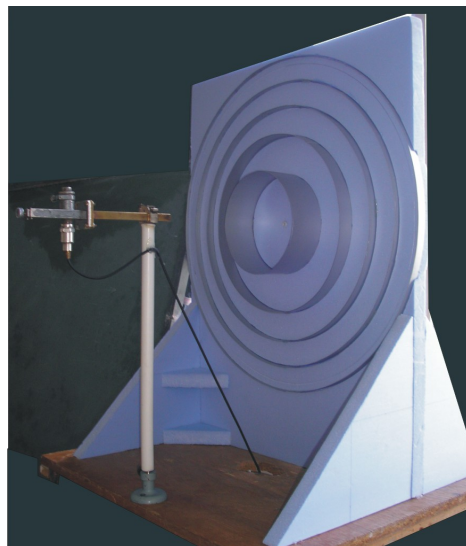
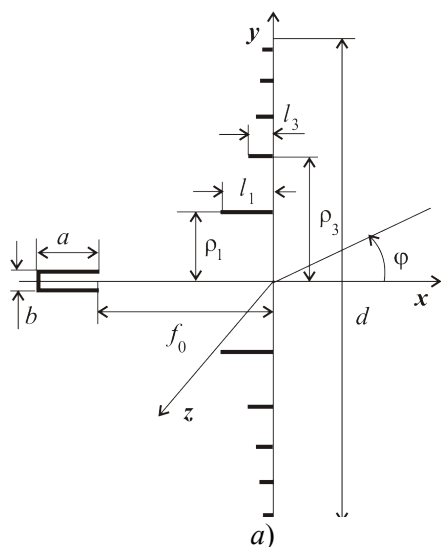


Рисунок 1 – Профиль (а) и внешний вид (б) антенны с МЛФ

Конструкция линзы механически достаточно прочная и обеспечивала хорошую взаимную фиксацию элементов МЛФ.

Облучатель представляет собой волновод прямоугольного сечения (23x10) мм<sup>2</sup>, укрепленный на стойке из диэлектрика. При этом мешающее влияние всех диэлектрических частей, предназначенных для крепления элементов линзы незначительно, поскольку относительная диэлектрическая проницаемость материала и потери в нем невелики.

**2. Измерительная установка и результаты измерений.** Исследуемая антенна использовалась в качестве приемной, при этом измерительная установка включала в себя:

- генератор СВЧ типа Г4-83;
- исследуемую МЛФ с облучателем;
- вспомогательную рупорную антенну;
- приемно-регистрирующее устройство.

Приемно-регистрирующее устройство состояло из волноводной СВЧ детекторной секции и селективного усилителя У2-8. Измерения ДН проводились в закрытом помещении при расстоянии между исследуемой и вспомогательной антеннами около 12 м.

В связи с этим сектор, в пределах которого измерялась ДН, включал в себя только первый боковой лепесток ДН, а расстояние от линзы до облучателя варьировалось. Принятые в процессе измерений технические меры позволили обеспечить динамический диапазон измерений в 20...25 дБ и методическую погрешность измерений ДН не превышающую 1%.

Результаты экспериментальных исследований ДН МЛФ в плоскости  $E$  на расчетной частоте при трех положениях облучателя иллюстрирует рис. 2, а. Здесь положение раскрытия облучающего волновода на продольной оси линзы ( $x_0$ ), а также соответствующие ему ширина главного лепестка ДН ( $\Delta \varphi$ ) и максимальный уровень первого бокового лепестка ДН ( $\xi_1$ ) отмечены цифрами:

$$1 - x_0 = f_0 - 0,325\lambda_0, \Delta \varphi \cong 5,3^\circ, \xi_1 \cong -10 \text{ дБ};$$

$$2 - x_0 = f_0, \Delta \varphi \cong 5,9^\circ, \xi_1 \cong -11,2 \text{ дБ};$$

$$3 - x_0 = f_0 + 0,325\lambda_0, \Delta \varphi \cong 49^\circ, \xi_1 \cong -13 \text{ дБ}.$$

Видно, что наиболее узкий главный лепесток ДН имеет место при небольшом удалении раскрытия облучателя относительно «геометрического» фокуса. По всей видимости, это обусловлено условиями проведения эксперимента, а именно: при таком смещении испытываемая антенна фокусируется на ту область пространства, где в данном случае расположена вспомогательная антенна.

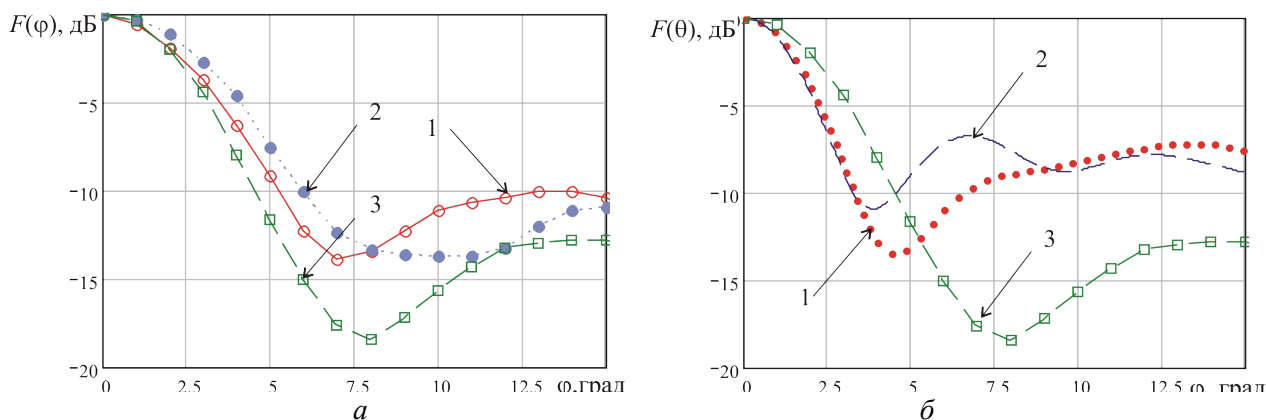


Рисунок 2 – Диаграммы направленности антенны с МЛФ

На рис. 2, б сравниваются ДН: измеренная и рассчитанные для двумерной модели антенны (раскрыв облучателя в фокусе,  $a = 3\lambda_0$ ,  $b = 0,77\lambda_0$ , см. рис. 1, а). Здесь обозначено: 1 – ДН антенны с МЛФ (расчет); цифрой 2 – ДН аналогичной антенны с классической ЛФ (расчет); 3 – ДН антенны с МЛФ (измерение). При этом можно отметить следующие особенности.

Во-первых, уровень бокового лепестка ДН реальной (трехмерной модели) антенны примерно на 5...6 дБ ниже, чем в расчетах с использованием двумерных моделей. Этот факт совпадает с аналогичным предположением, отмеченным в работе [11].

Во-вторых, заметные на рис. 2, б несовпадения в ширине главного лепестка ДН антенн с МЛФ и ЛФ также объясняются отличием расчетной и экспериментальной моделей. Аналогичная особенность имеет место и при сравнении ДН прямоугольного и кругового излучающих раскрывов.

В заключение отметим, что проведенный эксперимент показал реальную возможность создания антенны с дискретной рабочей поверхностью, основным элементом которой является осесимметричная модифицированная линза Френеля.

### Литература

1. Френель О. Избранные труды по оптике. М.: Гостехиздат, 1955. – 605 с.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
3. Сойфер В.А. Компьютерная оптика. Часть 1. Дифракционные оптические элементы // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 4. – С. 110-115.
4. Андреев Г.А., Базарский О.В., Колесников А.И., Хлявич Я.Л. Формирующие свойства линз Френеля в миллиметровом диапазоне // Радиотехника и электроника. – 1982. – № 10. – С. 2027-2030.
5. Garret J.E., Wiltse J.S. Fresnel zone antennas at millimeter wavelengths // Int. J. Infrared and Millimeter Waves. – Mar. 1991. – Vol. 12. – P. 195-220.
6. Hristov H. D. Fresnel Zones in Wireless Links, Zone Plate Lenses and Antennas. – Artech House Publishers. – 2000. – 345 p.
7. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г. Пассивные ретрансляторы для радиорелейных линий. – М.: Связь, 1973. – 208 с.
8. Van Buskirk L.F., Hendrix C.E. The zone plate as a radio frequency focusing element // IRE Trans. on Antennas and Propagation. – 1961. – Vol. 9. – P. 319-320.
9. Wiltse J. C., J. E. Garret. The Fresnel zone plate antenna // Microwave J. – 1991. – № 34. – P. 101-114.
10. Цалиев Т.А., Лещук И.И. Экспериментальное исследование плоских линзовых антенн Френеля // Труды УНИИРТ. – 1995. – № 1. – С. 94-97.
11. Воробийченко П.П., Цалиев Т.А. Антенны с дискретными рабочими поверхностями // Электросвязь. – 2005. – № 9. – С. 40-44.
12. Цалиев Т.А., Велиев З.М. Анализ направленных, фокусирующих и частотных свойств модифицированных дискретных излучающих поверхностей // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – № 1. – С. 57-63.
13. Цалиев Т.А. Электродинамические свойства дискретных поверхностей. Часть I. Однослойные поверхности // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43. – № 5. – С. 13-22.