

УДК 621.396.677

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛИНЗОВОЙ АНТЕННЫ С ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Н. И. Бобков, С. С. Ивакина, В. В. Проживальский

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент», 344010, г. Ростов-на-Дону, пр. Соколова, 96

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2018 г., после доработки – 4 марта 2018 г.

**Аннотация.** Для многолучевых линзовых антенн предложен метод формирования частотно-независимых характеристик излучения в широкой полосе частот, основанный на выборе конфигурации раскрыва, формирующего спадающее амплитудное распределение эквивалентного линейного излучателя и введении частотнозависимого квадратичного фазового распределения. На примере цилиндрической линзы из однородного диэлектрика показано, что эффект стабилизации парциальных диаграмм направленности может быть достигнут в полосе частот шириной не менее октавы. Приведены результаты экспериментальных исследований макета многолучевой линзовой антенны. Материал статьи докладывался на V Всероссийской Микроволновой Конференции 29 ноября – 1 декабря 2017 года.

**Ключевые слова:** линзовая антенна, амплитудно-фазовое распределение, диаграмма направленности.

**Abstract.** For cylindrical multi-beam lens antennas, a method for the formation of frequency-independent radiation characteristics in a wide frequency band is proposed. The method is based on the choice of the aperture configuration, forming the decreasing amplitude distribution of an equivalent linear radiator and introducing an additional frequency-dependent quadratic phase aperture distribution, formed by defocusing the lens. In this case, the decrease in the width of the pattern with increasing frequency is compensated by an increase in the dephasing of the aperture. The electrodynamic simulation confirmed the possibility of stabilizing the width of

the partial patterns of the lens antenna in the frequency range with overlap of 2.25: 1. The prototype of the lens antenna is made of polystyrene and includes seven sectorial horns irradiators. Amplitude excitation in the aperture of the lens, given by the horns, is practically uniform. Using an absorbing diaphragm of a special shape mounted on the illuminated side of the lens, an amplitude distribution of an equivalent linear radiator of the form "cosine in square" with a pedestal  $\Delta = 0.2$  is formed in its aperture. The prototype of a multibeam lens antenna, forming seven beams in the sector  $\pm 18^\circ$ , was tested. The experimental values of the width of the partial-beam patterns in the frequency band are  $5.45^\circ$  with a maximum deviation of  $\pm 0.85^\circ$ , while maintaining a stable level of intersection of the partial patterns and the steepness of the direction-finding characteristics. The relative level of intersection of partial patterns is  $3 \pm 1$  dB. The proposed method for constructing broadband multi-beam lens antennas with frequency-independent radiation characteristics can be used in the development of antenna systems for various purposes.

**Key words:** lens antenna, amplitude-phase distribution, radiation pattern.

## 1. Введение

При проектировании широкополосных многолучевых линзовых антенн в ряде случаев актуальной задачей является поддержание неизменных параметров диаграмм направленности (ДН) в полосе рабочих частот. Как показано в [1], эффект стабилизации характеристик излучения (ширины и формы главного лепестка ДН, а также огибающей боковых лепестков) для линейного раскрыва в широкой полосе частот может быть достигнут при выполнении следующих условий: 1- в раскрыве должно быть сформировано спадающее амплитудное распределение; 2 - должно быть целенаправленно введено соответствующее дополнительное частотнозависимое фазовое распределение, при котором убывание ширины ДН с ростом частоты компенсируется возрастанием расфазировки раскрыва. Однако в некоторых случаях, например, при разработке многолучевых линзовых антенн для систем пеленгации и сопровождения, для повышения уровня пересечения парциальных

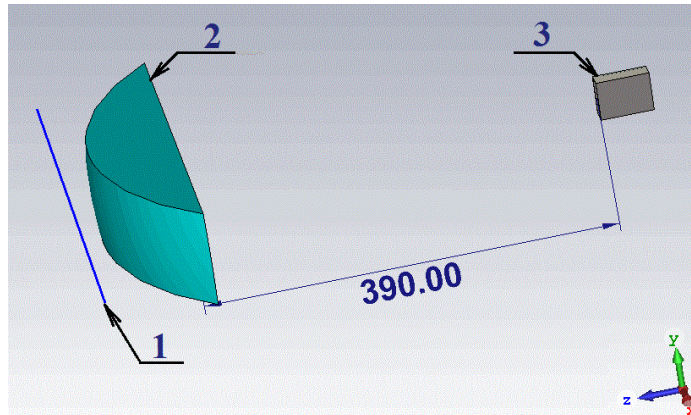
ДН применяются облучатели в виде открытого конца волновода [2], создающие практически равномерное распределение амплитуды. В таких случаях для формирования спадающего амплитудного распределения в одной из плоскостей целесообразно выбрать цилиндрическую линзу с раскрывом такой формы, которая обеспечивает требуемое спадающее амплитудное распределение эквивалентного линейного излучателя. Задавая соответствующее частотнозависимое фазовое распределение в плоскости фокусировки, можно достичь эффекта стабилизации параметров ДН в полосе частот. Метод, основанный на выборе формы раскрыва, был в свое время предложен Кохом [3] и реализован в зеркальных антеннах для достижения низкого уровня бокового излучения. Рассмотрим подробнее особенности формирования частотно-независимых ДН на примере цилиндрической линзовой антенны из однородного диэлектрика.

## 2. Моделирование линзовой антенны

Для подтверждения возможности стабилизации ДН линзовой антенны в полосе частот проведено моделирование в пакете программ FEKO. Моделирование проведено в сантиметровом диапазоне длин волн с перекрытием по частоте 2,25:1 для цилиндрической линзы [4], выполненной из диэлектрика с относительной проницаемостью  $\epsilon_r=2,6$  с размерами раскрыва  $380 \times 90$  мм и с фокусным расстоянием 390 мм (рис. 1).

В качестве облучателя взят секториальный рупор с размерами раскрыва  $2,4\lambda_0 \times 0,35\lambda_0$  ( $\lambda_0$  – длина волны на нижней рабочей частоте  $f_0$ ). Задаваемое облучателем амплитудное распределение в первом приближении можно считать равномерным: относительный уровень возбуждения на краях линзы составляет около 0,9 для частоты  $f_0$  и снижается до 0,7 на частоте  $2,25f_0$ . На освещенной стороне линзы установлена поглощающая диафрагма с конфигурацией, обеспечивающей реализацию амплитудного распределения эквивалентного линейного излучателя вида «косинус в квадрате» с пьедесталом  $\Delta=0,2$  (для средней частоты  $1,5 f_0$ ), что в совокупности с частотнозависимым квадратичным фазовым распределением обеспечивает формирование

практически частотно-независимых ДН [1,5]. На рис. 2 графически показано указанное амплитудное распределение и конфигурация поглощающей диафрагмы, реализующей требуемое распределение амплитуды эквивалентного линейного излучателя в плоскости фокусировки линзы.



1 - линия расчета фазового распределения;  
2- линза; 3 - облучатель

Рис.1. Модель линзовой антенны.

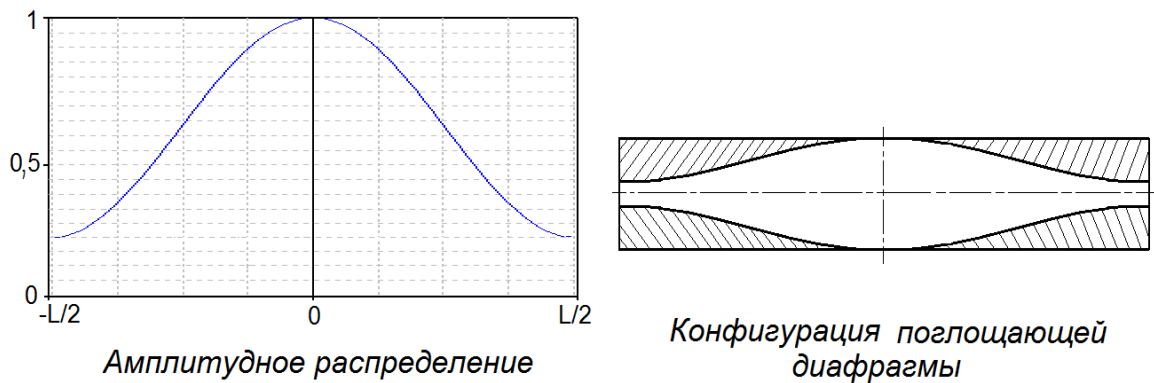
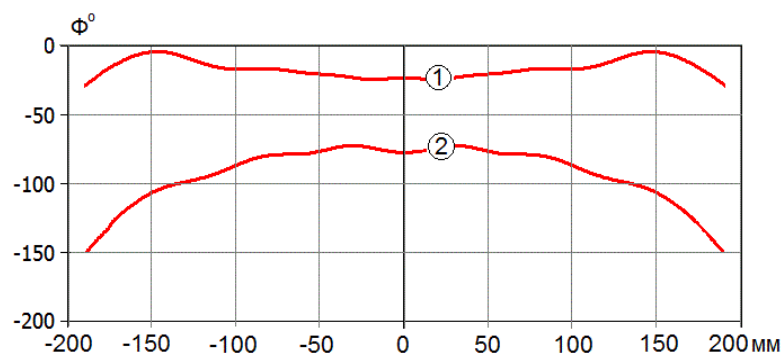


Рис. 2. Амплитудное распределение эквивалентного линейного

излучателя и конфигурация поглощающей диафрагмы для его реализации.

Для синфазного раскрытия с указанным амплитудным распределением с ростом частоты ширина ДН монотонно уменьшается от  $5,75^\circ$  на частоте  $f_0$  до  $2,55^\circ$  на частоте  $2,25f_0$ . Дополнительное фазовое распределение целесообразно ввести путем дефокусировки линзы, так как известно, что при смещении облучателя в небольших пределах фазовое распределение в раскрыве

приближенно можно считать квадратичным. Проведенные ранее исследования [1,5,6] показали, что для достижения минимального отклонения ширины ДН в полосе частот начальная расфазировка раскрыва (разность фаз между центром и крайними точками раскрыва на нижней границе полосы рабочих частот  $f_0$ ) должна составлять  $90^\circ \dots 120^\circ$ . При смещении облучателя линзы на рис. 1 в положение 290 мм, расфазировка раскрыва на частоте  $f_0$  составляет  $90^\circ$  и возрастает пропорционально изменению частоты. На рис. 3 показано расчетное фазовое распределение в раскрыве линзы на частоте  $f_0$  для двух положений облучателя: 1 – в фокусе, 2 – на расстоянии 290 мм от линзы.



1 – облучатель в фокусе; 2 – облучатель на расстоянии 290 мм от линзы.

Рис. 3. Расчетные фазовые распределения на частоте  $f_0$

Для оценки возможности формирования частотно-независимых ДН линзы в режиме сканирования проведен расчет ДН для центрального (неотклоненного) луча и для трех лучей, отклоненных на  $6^\circ$ ,  $12^\circ$  и  $18^\circ$  соответственно. Графические зависимости изменения ширины ДН указанных лучей в диапазоне частот с перекрытием 2,25:1 приведены на рис. 4 (кривые 1...4). Здесь же для сравнения приведена зависимость изменения ширины ДН центрального луча при размещении облучателя в фокусе (кривая 5).

На рис. 5 приведены нормированные расчетные ДН центрального луча для расфазированного раскрыва линзы. Ширина ДН по уровню минус 3 дБ в полосе частот от  $f_0$  до  $2,25f_0$  составляет  $5,6^\circ \pm 0,7^\circ$ , по уровню минус 10 дБ -

$10^{\circ} \pm 1,8^{\circ}$ . На более низком уровне ДН на различных частотах различаются более заметно.

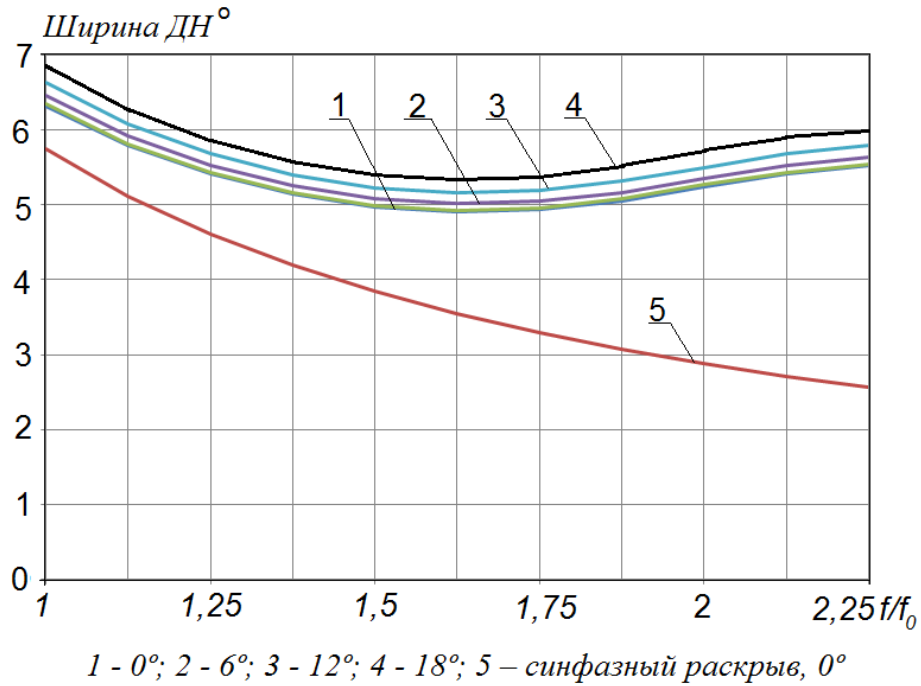


Рис. 4. Зависимость изменения ширины ДН расфазированной линзы в диапазоне частот для лучей с отклонением

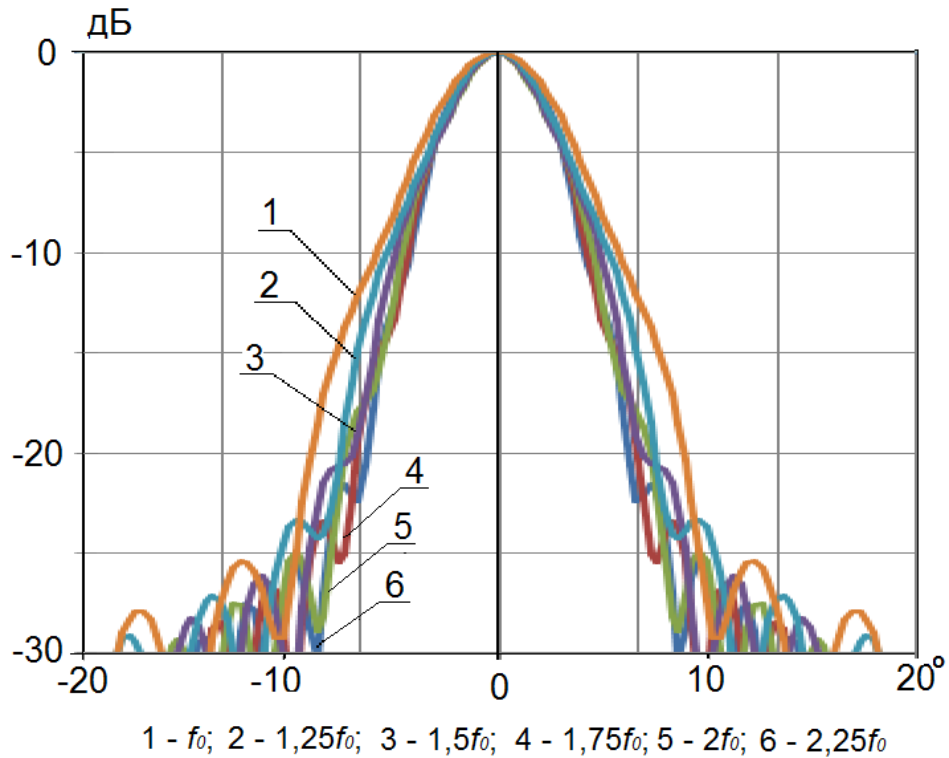


Рис. 5. Расчетные ДН для центрального луча расфазированного раскрыва линзы

### 3. Описание макета линзовой антенны

Для подтверждения возможности формирования частотно-независимых ДН проведено экспериментальное исследование макета линзовой антенны. Цилиндрическая линза изготовлена из полистирола с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=2,6$  без просветления с геометрией, соответствующей расчетной модели. Линза установлена между пластинами, образующими плоскопараллельный волновод сечением 90 мм.

Для снижения переотражений боковые стенки макета выполнены с изломом и покрыты поглощающим материалом (РПМ) марки В2(Ф3). Диафрагма с конфигурацией, показанной на рис. 2 выполнена из того же РПМ, наклеенного на тонкую металлическую подложку, прижатую к плоской поверхности линзы. Фото макета приведено на рис. 6.

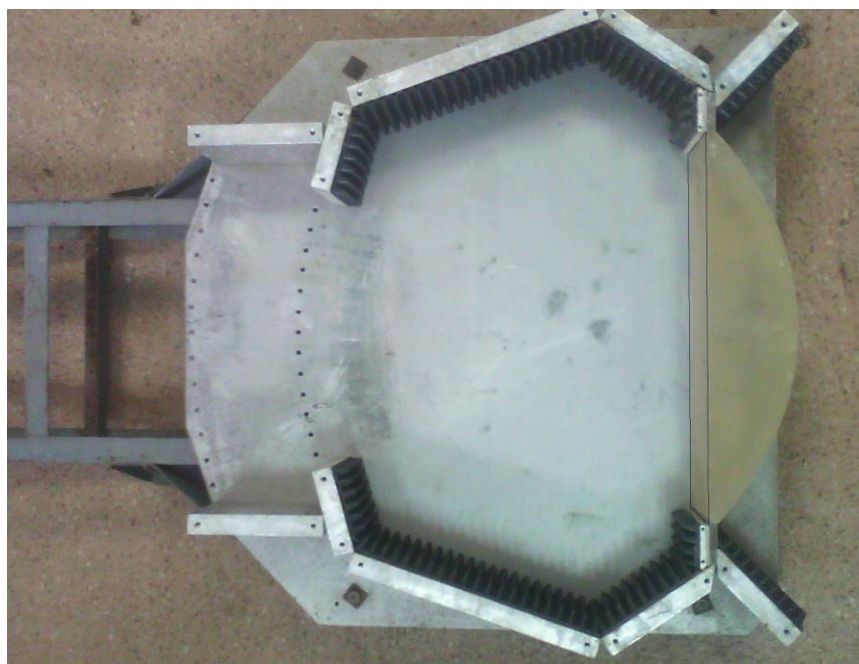


Рис. 6. Фото макета линзовой антенны в плане без облучателей и диафрагмы со снятой верхней плоскостью

### 4. Результаты экспериментального исследования

Измерения ДН и коэффициента усиления парциальных лучей макета линзовой антенны проводились на открытой площадке на шести частотах с

равномерным шагом в полосе от  $f_0$  до  $2,25f_0$  для случая одиночного облучателя, расположенного в фокусе, и для случая многолучевой расфазированной антенны, формирующей пучок из семи парциальных лучей в секторе  $\pm 18^\circ$ . Коэффициент усиления измерялся в направлении максимума парциальных ДН методом замещения с помощью эталонной антенны. На рис. 7 приведено фото макета, установленного на стойке поворотной платформы для измерения ДН.



Рис. 7. Фото макета линзовой антенны, установленного на стойке поворотной платформы для измерения ДН

На рис. 8 приведены экспериментальные зависимости ширины парциальных ДН от частоты для семи лучей в секторе  $\pm 18^\circ$ . Среднее значение ширины ДН по всем лучам в полосе рабочих частот равно  $5,45^\circ$  при максимальном отклонении  $\pm 0,85^\circ$ . Для облучателя, расположенного в фокусе на оси линзы, ширина ДН с возрастанием частоты изменяется в пределах от  $5,6^\circ$  до  $2,75^\circ$ . Результаты эксперимента согласуются с расчетом.



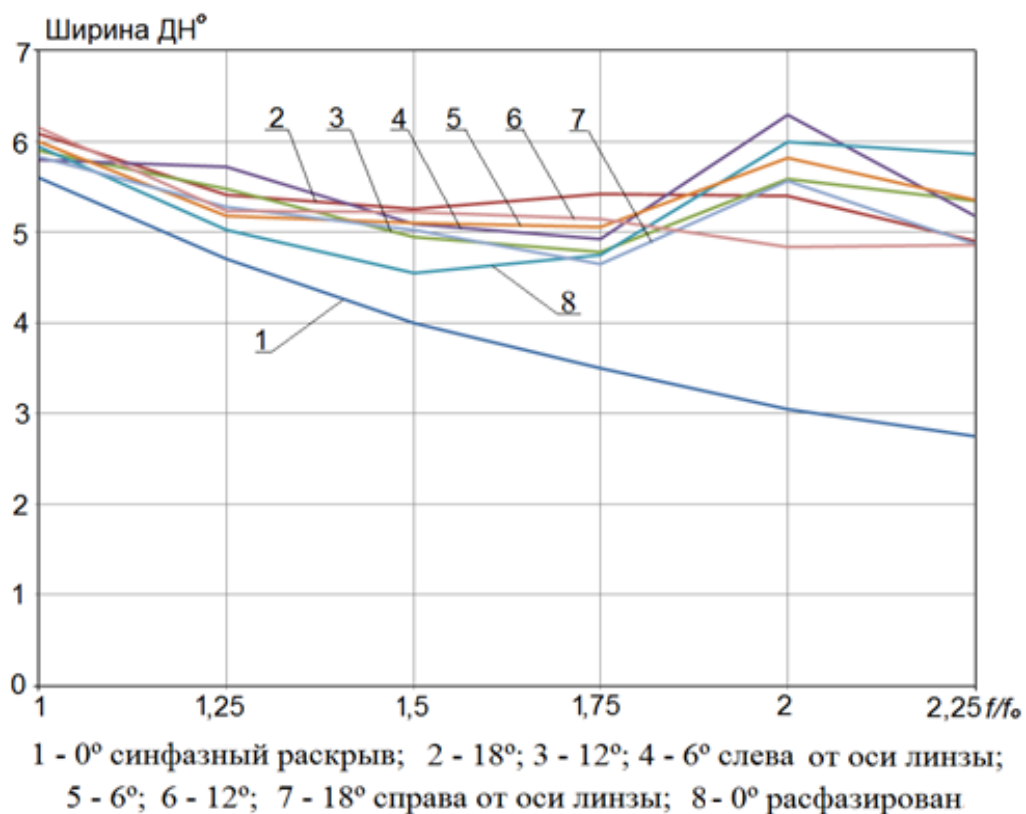


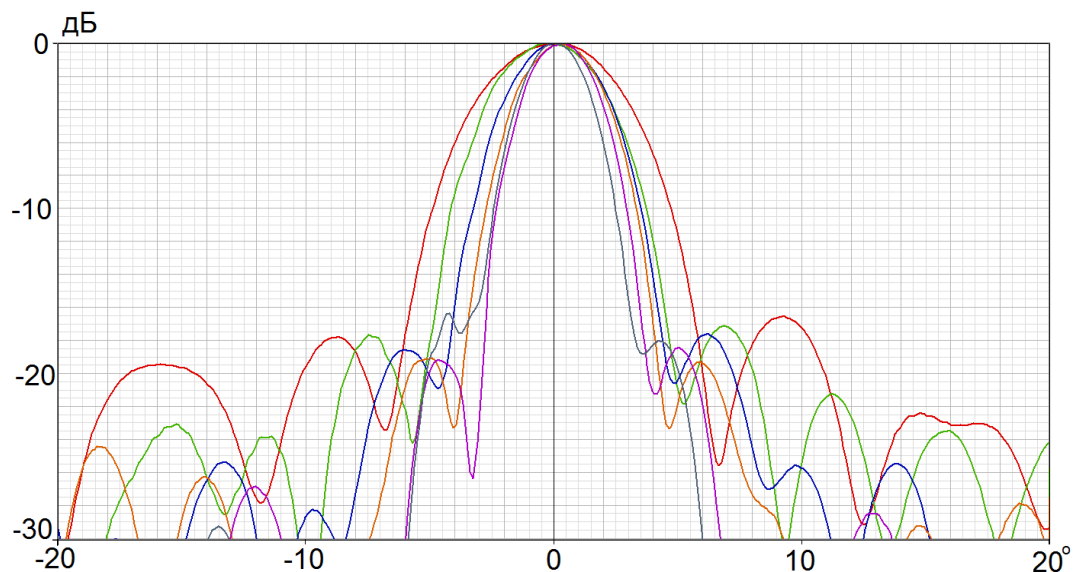
Рис. 8. Экспериментальные зависимости ширины ДН для семи лучей в секторе  $\pm 18^\circ$

Значения ширины парциальных ДН макета антенны, измеренные на шести частотах, приведены в таблице 1.

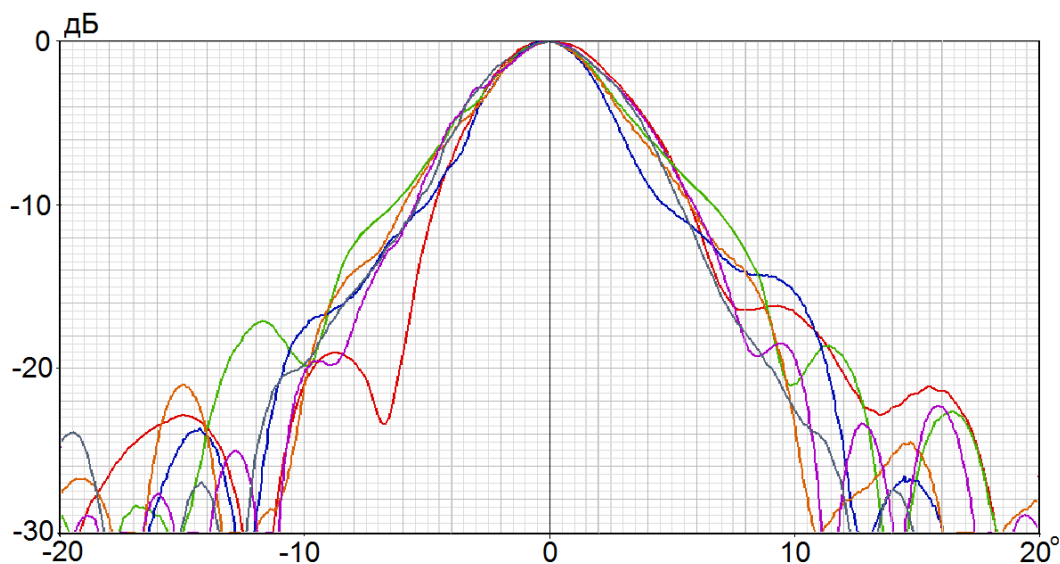
Таблица 1. Значения ширины парциальных ДН макета линзовой антенны.

Положение луча	-18°	-12°	-6°	0°	6°	12°	18°
Частота	Ширина ДН по уровню минус 3 дБ, градус						
$f_0$	6,09	5,9	5,8	5,94	6,0	5,83	6,15
$1,25f_0$	5,41	5,48	5,79	5,03	5,18	5,28	5,24
$1,5f_0$	5,26	4,95	5,1	4,6	5,1	5,02	5,23
$1,75f_0$	5,42	4,78	4,93	4,75	5,06	4,65	5,15
$2f_0$	5,4	5,59	6,3	6,0	5,82	5,56	4,84
$2,25f_0$	4,9	5,34	5,18	5,87	5,36	4,87	4,86

Экспериментальные ДН центрального луча антенны в полосе частот приведены на рис. 9 а) для облучателя, расположенного в фокусе, и на рис. 9 б) для облучателя, расположенного на расстоянии 290 мм от линзы. На рис. 10-12 приведены нормированные ДН семи парциальных лучей расфазированной линзовой антенны, измеренные на частотах  $f_0$ ,  $1,5f_0$ ,  $2,25f_0$ .



а



б

Рис. 9. Экспериментальные ДН для центрального луча сфокусированной (а) и расфазированной линзовой антенны (б)

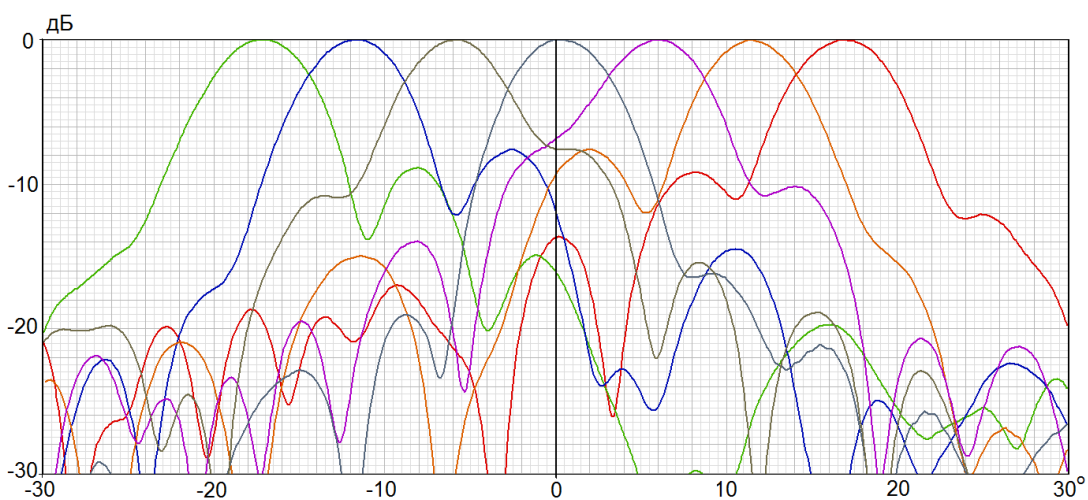


Рис. 10. Экспериментальные ДН многолучевой линзовой антенны на частоте  $f_0$

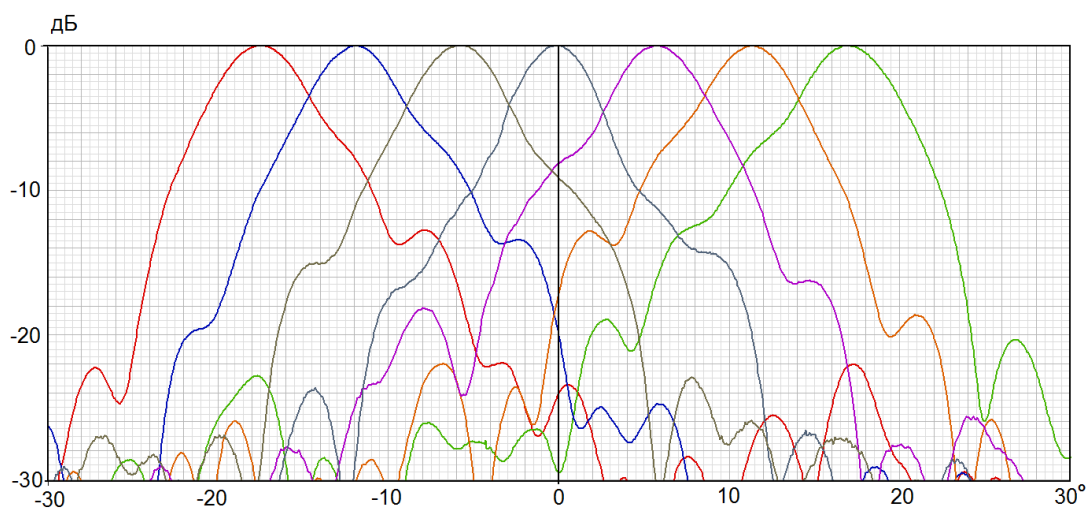


Рис. 11. Экспериментальные ДН многолучевой линзовой антенны на частоте  $1,5f_0$

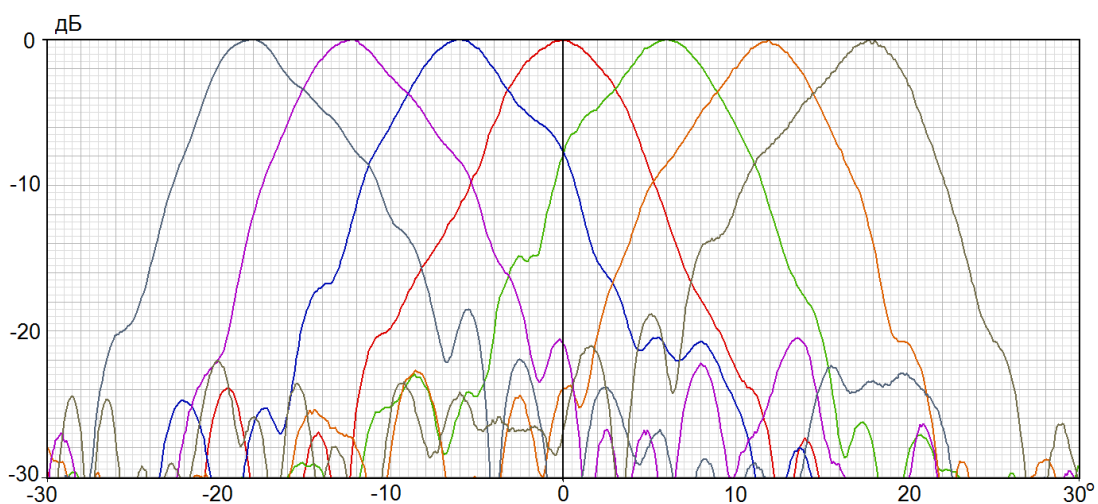


Рис. 12. Экспериментальные ДН многолучевой линзовой антенны на частоте  $2,25f_0$

Результаты измерения коэффициента усиления парциальных лучей приведены в таблице 2.

Таблица 2. Коэффициент усиления парциальных лучей линзовой антенны.

Положение луча	-18°	-12°	-6°	0°		6°	12°	18°
				рас- фазир.	в фо- кусе			
Частота	Коэффициент усиления, дБ							
$f_0$	17,8	17	17,2	18,2	18,7	17	16,8	16,7
$1,25f_0$	19,3	19,2	19,4	18,8	19,5	19,1	18,7	18,8
$1,5f_0$	19,9	20,3	19,3	19,8	20,6	20,8	20	20,5
$1,75f_0$	21,2	22,7	21,9	22,1	23,3	21,9	20,7	20,7
$2f_0$	21,1	21,1	21,4	21,5	23,6	21,8	21,1	20,6
$2,25f_0$	23,1	22,9	23,9	24,1	25,8	24,1	24,1	22,8

Анализ результатов испытаний макета показывает, что наряду со стабилизацией ширины парциальных ДН, форма главного лепестка претерпевает искажения, наблюдается асимметрия, повышен уровень бокового излучения. Для устранения указанных искажений необходима корректировка профиля линзы, поскольку для выбранного варианта линзы условие синусов выполняются приближенно и только для сфокусированного режима. Кроме этого, свой вклад в частотную зависимость фазового распределения вносит дисперсия в плоскопараллельном волноводе, работающем на волне типа  $H$ .

Как следует из таблицы 2, дефокусировка линзы приводит к снижению коэффициента усиления центрального луча в полосе рабочих частот на 0,5...2,1 дБ по сравнению со сфокусированным режимом, при этом разница с повышением частоты возрастает по мере роста расфазировки раскрыва. Для остальных шести лучей в пределах сектора сканирования  $\pm 18^\circ$  значения коэффициентов усиления на каждой из частот по сравнению с центральным лучом отличаются не более чем на 1 дБ в сторону повышения и на 1,5 дБ в

сторону понижения, что в большей степени обусловлено погрешностью измерения, оценка которой составляет  $\pm 1,2$  дБ.

Для рассматриваемой линзовой антенны имеют место потери энергии, вносимые поглощающей диафрагмой. Следует отметить, что поглощающие диафрагмы, используемые для придания освещенной стороне линзы определенной конфигурации с целью снижения бокового излучения или формирования неосесимметричных ДН, нередко применяются в приемных линзовых антеннах. Для антенны с диафрагмой, приведенной на рис. 2, потери энергии составляют 1,8 дБ на средней частоте  $1,5f_0$ .

На основе анализа экспериментальных результатов необходимо отметить также следующие обстоятельства.

Во-первых, несмотря на снижение коэффициента усиления парциальных лучей в максимальных направлениях, в направлениях пересечения смежных ДН значения коэффициента усиления в сравнении со сфокусированным режимом практически не изменяются за счет расширения ДН при дефокусировке линзы.

Во-вторых, стабильные по ширине парциальные ДН, близкие по форме к треугольным, способствуют выравниванию крутизны пеленгационных характеристик в пределах сектора обзора в широкой полосе частот.

С учетом отмеченных свойств многолучевых линзовых антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения их исследование представляет собой перспективное направление в технике широкополосных пеленгационных антенных систем.

## 5. Заключение

Выполненные исследования доказывают возможность формирования частотно-независимых ДН многолучевых линзовых антенн, предназначенных для работы в широкой полосе частот. Соответствующий выбор конфигурации раскрыва и введение дефокусировки для создания частотнозависимого фазового распределения позволяют сохранить ширину парциальных ДН в пределах  $\pm 16\%$  в секторе сканирования  $\pm 18^\circ$  в полосе частот с перекрытием 2,25:1. Для приемных многолучевых антенн с фиксированным положением

лучей при этом поддерживается постоянный уровень пересечения парциальных ДН и крутизна пеленгационных характеристик. Предложенный метод построения широкополосных многолучевых линзовых антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения может найти применение при разработке антенных систем различного назначения.

### **Литература**

1. Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Ивакина С.С., Пархоменко Н.Г. Построение апертурных антенн с частотно-независимыми характеристиками излучения//«Радиотехника», № 1, 2016 г., с.42-49.
2. U.S. Patent 3404405. Luneburg lens with staggered waveguide feed/ W.J. Young, Jr. Oct. 1. 1968.
3. Koch G.F. Flächenstrahler mit kleinen Nebenmaxima. Fernmeldetech. Z., 7 (1954), S. 498-509.
4. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны/М.: Сов. Радио. – 1974. – 280 с.
5. Горин А.М., Радченко Н.А. Сканирующая антенная решётка со стабильной диаграммой направленности в широком диапазоне частот. Вопросы специальной радиоэлектроники (научно-технический сборник). ОВР, вып. 1, Москва-Таганрог, 2014, с. 77-80.
6. Бобков Н.И., Габриэльян Д.Д., Ивакина С.С., Проживальский В.В. Исследование частотно-независимых характеристик излучения антенн с круглой апертурой//«Радиотехника», №11, 2016 г., с.170-176.

#### **Ссылка на статью:**

Н. И. Бобков, С. С. Ивакина, В. В. Проживальский. Исследование многолучевой линзовой антенны с частотно-независимыми характеристиками излучения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/1/text.pdf>