

Исследование характеристик диагональных рупоров с корректирующими линзами в качестве малошумящих эталонных антенн

О.Н. Чесноков¹, Ю.В. Рыбаков², О.А. Герасимов², Д.В. Дроздов²

¹ АО «СКАРД-Электроникс»
305021 г. Курск ул. К. Маркса 70-Б
E-mail: chon@skard.ru

² Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»
194021 Санкт-Петербург ул. Карбышева д. 7
E-mail: y.rybakov@mail.ru

Рассмотрены перспективы использования диагональных рупоров с корректирующими линзами в качестве малошумящих эталонных антенн. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных характеристик диагонального рупора в диапазоне 18-26 ГГц на примере антенны П6-239/5.

Ключевые слова: СВЧ, диагональный рупор, гофрированная линза, КСВн, диаграмма направленности, эталонная антенна

Diagonal horn with lens as low-noise reference antennae

O.N. Chesnokov¹, Yu.V. Rybakov², O.A. Gerasimov², D.V. Drozdov²

¹ SKARD-Electronics JSC
² Voeikov Main Geophysical Observatory

The paper considers diagonal horn antennae with lens use as low-noise reference. Theoretical and experimental specifications comparison for diagonal horn at frequencies 18-26GHz with P6-239/5 antennae as example are presented.

Keywords: microwave, diagonal horn, corrugated lens, VSWR, radiation pattern, reference antennae

Введение

Диагональные пирамидальные рупора (ДПР) впервые были рассмотрены в публикации [1]. С помощью возбуждения двух ортогональных основных мод E_{10} и E_{01} в квадратном волноводе, который далее переходит в рупор, удаётся получить симметричную диаграмму направленности (ДН) с идентичными характеристиками в E и H плоскостях. Для синфазной апертуры, что эквивалентно установке корректирующей фазовую ошибку линзы в раскрыве рупора, были получены расчётные соотношения для ширины ДН по -3 дБ, -10 дБ, угловым положениям нулей и максимумов первого и второго боковых лепестков [2].

В работе [3] выполнен анализ излучения ДПР с квадратичной фазовой ошибкой. На базе этих работ был создан раздел в онлайн-калькуляторе [4], позволяющий получать оперативные качественные оценки характеристики ДН для различных размеров рупора и рабочей частоты. Синфазную апертуру можно при этом моделировать вводя нулевую фазовую ошибку. Как показывают эти оценки, при полном совпадении ДН в E и H плоскостях и близкой к ним ДН в D -плоскости можно получить квазиосесимметричный луч до уровня 20 дБ с достаточно низким уровнем боковых лепестков. Эти характеристики сделали полезным использование ДПР для ряда применений как

эталонной антенны для безэховых камер, для измерений полей в дальней зоне, для измерений кроссполяризационного рассеяния и т.д. В этом качестве ДПР выпускаются серийно рядом фирм [5, 6]. В РФ линейка антенн П6-239, выпускаемых АО «СКАРД-Электроникс» [7] покрывает диапазон от 3,95 до 110,0 ГГц. Для использования в системах дистанционного зондирования преимуществом ДПР по сравнению с широко используемыми в настоящее время гофрированными и поттеровскими рупорами может быть более простая технология изготовления и широкополосность.

Приводимые характеристики всех серийно выпускаемых ДПР ограничены шириной ДН по -3 дБ, входным КСВн и величиной усиления G . Целью данной работы является более детальное измерение всех характеристик и сравнение их с теоретическими оценками, а также исследование изменения характеристик при установке в раскрытие корректирующей гиперболической линзы, т.е. реализации ДПР с синфазной апертурой. Специфика гиперболической линзы заключается в том, что она слегка изменяет амплитудное распределение, что может быть полезно для уменьшения боковых лепестков [8]. Но при этом линза обладает собственными омическими потерями и потерями на отражение от границ линзы, которые могут быть уменьшены введением согласующих поверхностей [9]. Все эти параметры необходимо исследовать в диапазоне 18-26 ГГц.

Исследуемое устройство

В качестве исследуемого устройства был использован диагональный рупор П6-239/5 производства АО «СКАРД-электроникс» (рисунок 1). Для апертуры $120,1 \times 120,1$ мм и высоты пирамиды $378,8$ была рассчитана гиперболическая линза из фторопласта с $\eta=1,45$. Линза 1 (Л1) представляет собой линзу с несогласованными (гладкими) поверхностями, линза 2 (Л2) – аналогичную по форме линзу, в которую с двух сторон введены согласующие элементы, имеющие вид концентрических канавок, прорезанных в теле линзы.

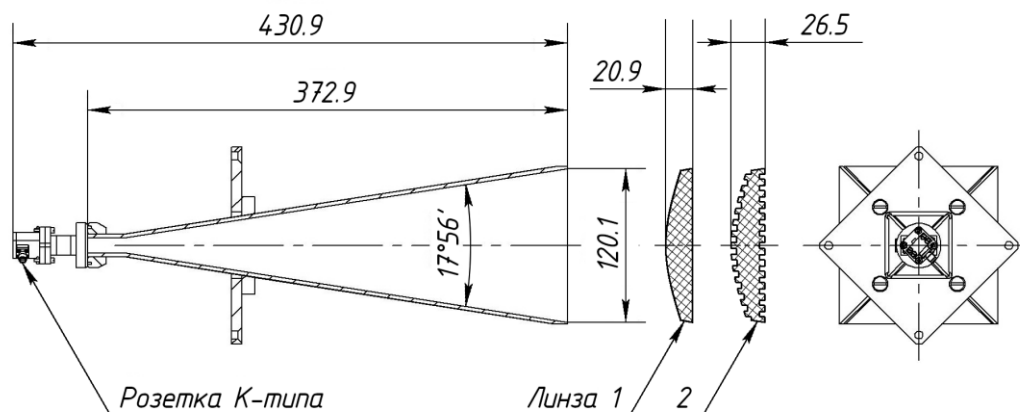


Рис. 1. Измерительная антенна П6-239/5 с линзами двух типов

На рисунке 2 показаны теоретические ДН диагонального рупора с фазовой ошибкой $t=0,3489$ на $f=22$ ГГц и ДН с $t=0,10000$ (синфазная поверхность, аналогичная апертуре рупора с линзой, но без учёта влияния самой линзы) рассчитанная с помощью [4].

Как следует из данных оценочных характеристик, установка линзы в апертуре диагонального рупора должна улучшить форму ДН (практически полная симметрия в Е, Н и D плоскостях) и увеличить коэффициент направленного действия почти на 3дБ.

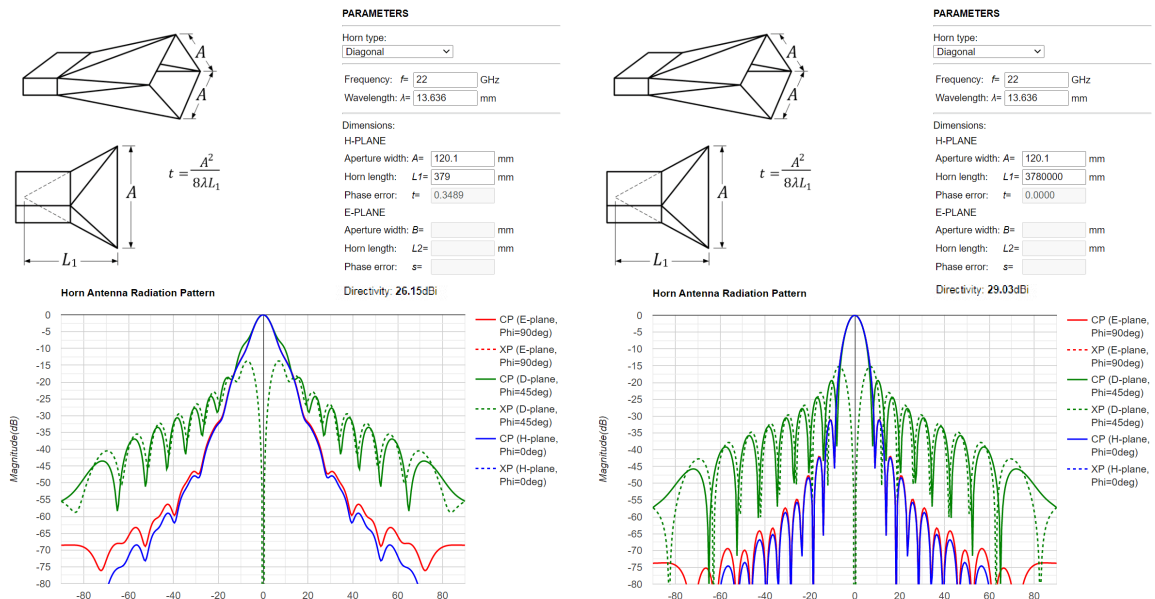


Рис. 2. Теоретический расчёт ДН антенны типоразмера Пб-239/5 на частоте 22 ГГц

Методы исследования

Основным методом исследования являлось измерение ДН на антенном стенде АО «СКАРД-Электроникс» и измерение КСВ на анализаторе AnritsuMS4647B. Измеренные значения характеристик сравнивались с теоретическими оценками [1, 2, 3].

Самой проблемной характеристикой ДПР является ДН в D-плоскости, которая характеризуется слабым уровнем спада боковых лепестков и соответственно большим КР в этой плоскости, если рассматривать ДПР как перспективный антенный датчик для СВЧ-радиометрических систем дистанционного зондирования.

Измерение КСВн и влияние согласующих слоёв.

На рисунке 3 показаны измерения КСВн рупора без линзы и с установленной в апертуре линзы с несогласованными поверхностями. Для $\eta = 1,45$ теоретическая величина потерь на отражение F_{cp} составляет 0,293 дБ.

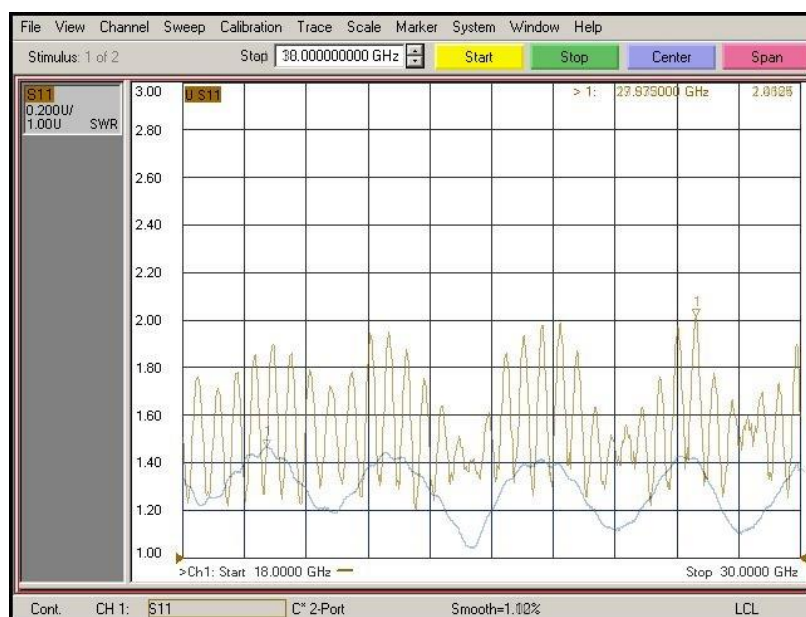


Рис. 3. КСВн рупора без линзы и с линзой 1

На рисунке 4 показаны измерения КСВн рупора без линзы и с установленной в апертуре линзы² с согласованными поверхностями.

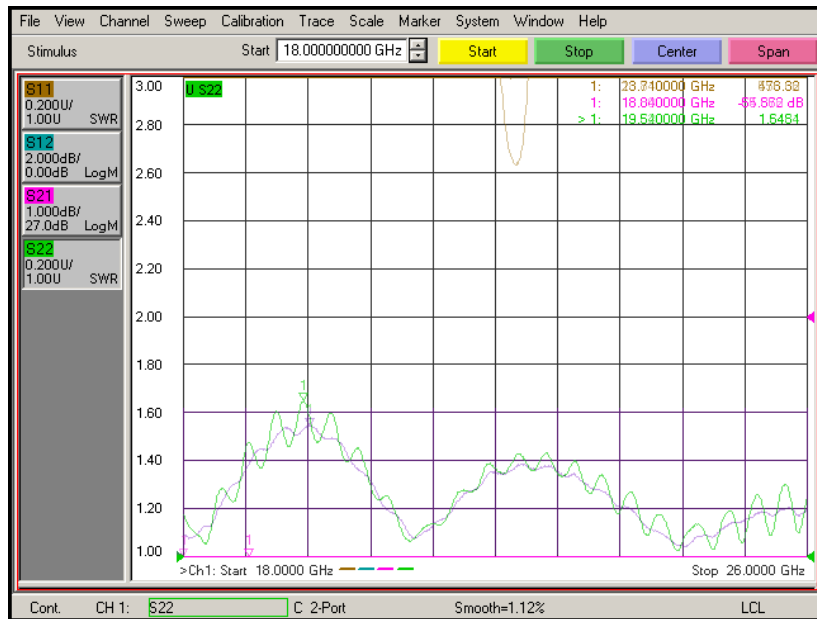


Рис. 4. КСВн рупора без потерь и с линзой²

Видно, что вариации КСВн для согласованной линзы практически не отличаются от вариации КСВн рупора без потерь.

Измерение усиления

Экспериментальная зависимость усиления рупорной антенны без линзы и с несогласованной линзой, получена с помощью дополнительной эталонной приёмной антенны.

В таблице 1 показана экспериментальная зависимость усиления G антенны. Там же приведены теоретические оценки коэффициента направленного действия D рупора с фазовой ошибкой $t = 0,2854 \div 0,4123$ в диапазоне 18 - 26 ГГц и аналогичные значения D для синфазной поверхности $t = 0$ в том же диапазоне.

Таблица 1. Сравнительные характеристики по усилению и КНД

F , ГГц	18	19	20	21	22	23	24	25	26
D , dB теор. синф.	27,29	27,76	28,20	28,62	29,03	29,41	29,78	30,13	30,47
D , dB теор. t	25,36	25,61	25,82	26,00	26,15	26,26	26,35	26,41	26,45
ΔD , dB теор.	1,93	2,15	2,38	2,62	2,88	3,15	3,43	3,72	4,02
G , dB экс. с Л1	24,31	24,61	25,14	25,54	26,24	26,94	26,73	25,80	26,07
G , dB экс. без Л1	23,10	23,46	23,44	23,84	24,04	24,28	24,00	23,46	23,25
ΔG , dB экс.	1,21	1,15	1,70	1,70	2,21	2,66	2,73	2,34	2,82
η , dB экс.	0,72	1,00	0,68	0,92	0,67	0,49	0,70	1,38	1,20

Разница $\Delta D_{теор}$ показывает увеличение направленности рупора при установке в его раскрые линзы. Разница $\Delta G_{экс}$ включает в себя как разницу в $\Delta D_{теор}$, так и коэффициент полезного действия η , связанный с потерями от входного коаксиально-волноводного перехода до квадратного сечения собственно рупора.

Диаграмма ДПР без линзы (апертура с фазовой ошибкой)

На рисунке 5 представлены диаграммы ДПР в Е и Н плоскостях для частоты $f = 22$ ГГц, из которых видно, что они совпадают с теоретическими ДН (рис. 2).

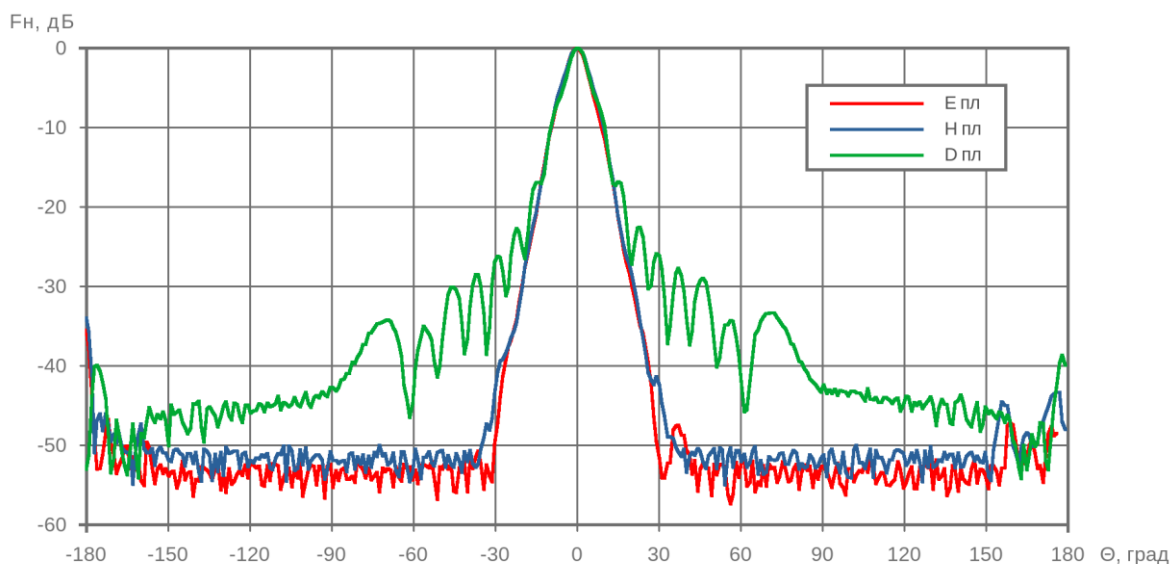


Рис. 5. Экспериментальные ДН рупора без линзы

В таблице 2 представлены теоретические и экспериментальные величины $2\Delta\theta_{-3дВ}$ для рупора без линзы в диапазоне 18 - 26 ГГц.

Таблица 2. Разница ширины ДН по частотам

F, ГГц																	

2Δθ _{-3дВ} , град																	
18	19	20	21	22	23	24	25	26									
Теор.																	
8,51	8,18	7,85	7,54	7,28	7,13	6,93	6,77	6,64									
Поляр.																	
Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е	Н	Е
Рупор СКАРД с Л2																	
8,73	8,32	8,47	8,22	8,44	8,14	8,4	7,8	8,37	7,95	8,87	7,56	9,14	7,65	9,23	7,88	9,81	8,77
Рупор СКАРД с Л1																	
8,49		8,21		7,92		7,9		7,76		7,9		8		8,09		8,3	
Рупор А-Info																	
8,59	8,67	8,07	8,04	7,86	7,79	7,65	7,67	7,44	7,28	7,11	7,13	7,04	7,21	6,93	7,38	6,8	6,91

В таблицу 2 добавлены для сравнения ширины ДН в Е и Н плоскостях антенны LB-DG-42-45 фирмы AINFO [5], аналогичные по габаритам П6-239/5. Видно, что для всего диапазона ДН по уровню -3дБ хорошо совпадают как друг с другом, так и с теоретическими оценками.

Диаграмма ДПР с линзой (синфазная апертура)

Теоретический расчет ДН и основных характеристик выполнен в работах [1, 3] и приведён в [12].

ДН в Е и Н плоскостях имеет вид:

$$E_{E,H} = \sqrt{2} \left[\frac{2a^2 \sin\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) \cos\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right)}{\pi \frac{u}{\sqrt{2}} \left(1 - \frac{2u^2}{\pi^2}\right)} \right] \quad (1)$$

ДН в D- плоскости (45°) имеет вид:

$$E_{D-} = \frac{\sqrt{2}a^2}{\pi} \left[\frac{\sin u}{u} + \frac{\cos u}{1 - \frac{4u^2}{\pi^2}} \right] \quad (2)$$

ДН в D+ плоскости (135°) имеет вид:

$$E_{D+} = \frac{\sqrt{2}a^2}{\pi} \left[\frac{\sin u}{u} - \frac{\cos u}{1 - \frac{4u^2}{\pi^2}} \right] \quad (3)$$

где $u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$, a – размер стороны апертуры.

В таблице 3 представлены исправленные из [2] и дополненные основные характеристики ДПР с линзой (синфазная поверхность).

Таблица 3. Ширина ДН и уровни боковых лепестков

Параметр	Значения параметров для плоскостей			
	Е, Н _{пл}		D _±	
	град	рад	град	рад
Ширина ДН по -3 дБ/ λ/a	55,5	0,96	58,0 λ/d	1,01 λ/d
Ширина ДН по -10 дБ/ λ/a	101,0	1,76	98,0 λ/d	1,71 λ/d
Ширина ДН по нулям/ λ/a	162,0	2,82	140,0 λ/d	2,44 λ/d
Угл.пол.мах 1 бок.леп./ λ/a	96,0	1,68	92,0 λ/d	1,6 λ/d
Уровень 1 бок.леп.σ ₁ , дБ	-30,5		-19	
Уровень 2 бок.леп.σ ₂ , дБ	-41,5		-24	
Уровень 3 бок.леп.σ ₃ , дБ	-49,4		-26	

На рисунке 6 показаны экспериментальные ДН рупора П6-239/5 с линзой.

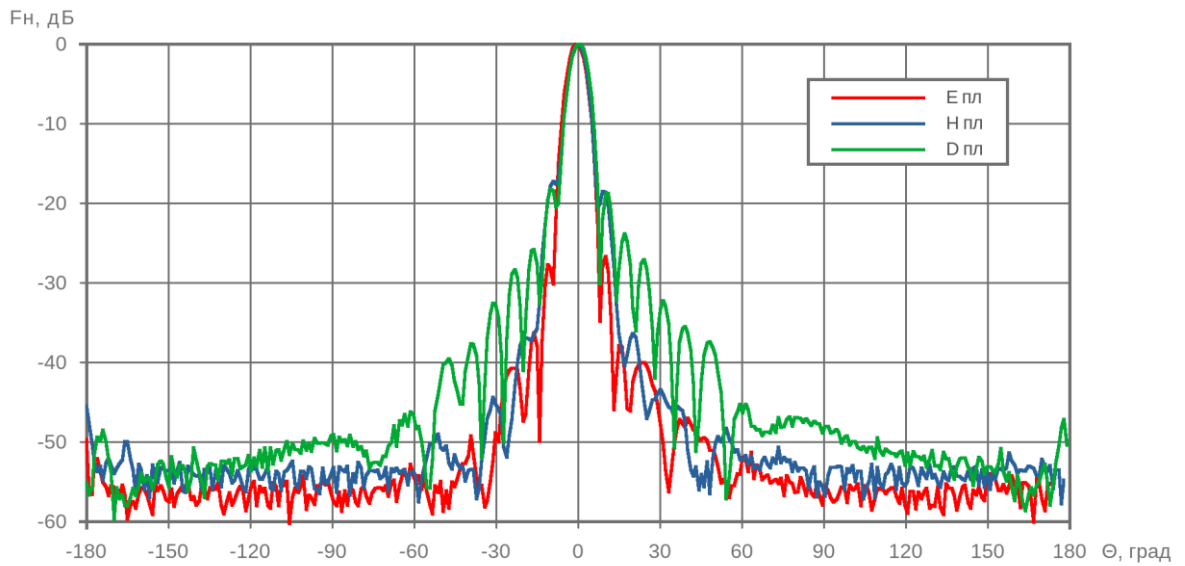


Рис. 6. Экспериментальные ДН рупора с линзой на частоте 22 ГГц

На рисунке 7 показаны основные экспериментальные характеристики (ДН) для ДПР с линзой (аналог синфазной поверхности) по -3 дБ, -10 дБ, по нулям и сравнение их с теоретическими характеристиками из таблицы 3, а в таблице 4 проведено аналогичное сравнение по боковым лепесткам.

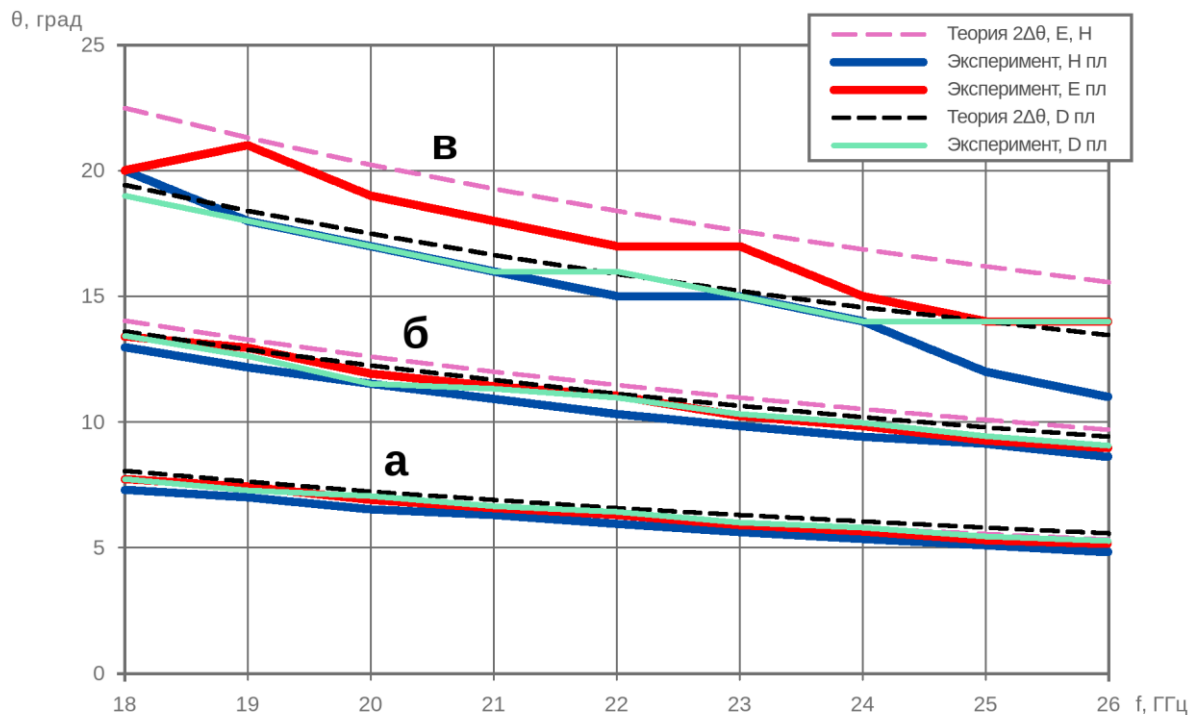


Рис. 7. Сравнение теоретических и экспериментальных характеристик ДН ДПР с линзой: а — по -3дБ, б — по -10дБ, в — по нулям.

Видно, что экспериментальные характеристики лежат несколько ниже теоретических, что может быть следствием как *сглаживающего* действия линзы, так и суммарным действием других факторов (неточностью установки линзы, приближением расчета, разном фазовых центров и т. д.). В общем эти отклонения невелики и могут быть оптимизированы при дальнейших экспериментах.

Таблица 4. Сравнение теоретических и экспериментальных характеристик ДН ДПР с линзой по боковым лепесткам

F , ГГц	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Теория $\sigma_1 E, H$, dB	-31,5								
Экс. $\sigma_1 H_{пл}$, dB	-20,8	-20,7	-18,8	-18,3	-17,9	-15,9	-15,6	-14,7	-13,7
Экс. $\sigma_1 E_{пл}$, dB	-25,4	-30,0	-26,0	-27,4	-27,2	-26,2	-26,7	-23,0	-24,1
Теория $\sigma_1 D$, dB	-19,0								
Экс. $\sigma_1 D$, dB	-19,1	-19,7	-18,5	-18,7	-18,5	-18,0	-17,8	-17,4	-17,3
Теория $\sigma_2 E, H$, dB	-41,5								
Экс. $\sigma_2 H_{пл}$, dB	-41,8	-41,9	-37,5	-39,7	-36,6	-34,7	-36,7	-34,7	-37,0
Экс. $\sigma_2 E_{пл}$, dB	-34,5	-37,9	-39,4	-37,8	-37,1	-44,6	-38,7	-47,8	-38,9
Теория $\sigma_2 D_{пл}$, dB	-23,9								
Экс. $\sigma_2 D_{пл}$, dB	-25,4	-24,3	-24,4	-24,7	-24,8	-23,9	-24,2	-23,8	-23,1
Теория $\sigma_3 E, H$, dB	-48,5								
Экс. $\sigma_3 H_{пл}$, dB	-40,5	-43,3	-44,3	-45,6	-43,9	-42,0	-40,6	-39,8	-38,4
Экс. $\sigma_3 E_{пл}$, dB	-40,1	-47,6	-49,5	-45,6	-40,3	-48,6	-44,0	-49,5	-43,0
Теория $\sigma_3 D_{пл}$, dB	-26,4								
Экс. $\sigma_3 D_{пл}$, dB	-28,8	-26,8	-26,4	-25,7	-27,7	-25,8	-27,0	-25,8	-27,1

Оценка коэффициента рассеяния (КР)

Для СВЧ-радиометрии большое значение имеет КР антенного датчика, т.е. интегральная доля мощности, содержащаяся вне телесного угла главного лепестка ДН. Эта величина, умноженная на среднее значение радиояркостной температуры фона вне этого угла, определяет аддитивную ошибку измерений.

В таблице 5 приведены характерные величины теоретических ДН ДПР и двух аппроксимаций ДН в виде цилиндрических функций [10] (Лямбда функций), имеющих схожие характеристики и для которых можно определить КР аналитически [11].

Теоретический анализ ДН ДПР показывает полное их равенство в Е и Н плоскостях с малым уровнем боковых лепестков и равенством в Дплоскостях, но с более высоким уровнем лепестков и слабым их спаданием.

Характерными величинами в табл. 5 являются отношение ширины ДН по нулевому уровню к уровню ДН по -3 дБ и максимумов первого, второго и третьего боковых лепестков. КР для Лямбда функций приведен для угла вне главного лепестка (KP_0) и вне угла главного и первого бокового лепестков (KP_1).

Таблица 5. Сравнение характерных параметров ДН ДПР с Лямбда функцией

	шир.ДН _{0дБ} / 3дБ	σ_1 , дБ	σ_2 ,дБ	σ_3 , дБ	КР ₀ , %	КР ₁ , %
F= $\Lambda_1(u)$	2,39	-17,6	-23,8	-28,0	16,2	9,0
F= ДН в D пл.	2,42	-19,0	-23,9	-26,4		
F= $\Lambda_3(u)$	2,76	-30,6	-41,7	-49,6	0,34	0,04
F= ДН в E и H пл.	2,92	-31,5	-41,5	-48		

Видно, что ДН в D плоскостях близка к $\Lambda_1(u)$, а ДН в E и H плоскостях к $\Lambda_3(u)$. Так как КР в E и H плоскостях очень мал, то общий КР будет примерно равен $\frac{1}{2}$ КР в D плоскости, т.е. 8.1% КР₀ и 4.5% КР₁. Для экспериментальных ДН, где присутствует сглаживающее влияние гиперболической линзы, КР может быть меньше, но его необходимо определять, интегрируя реальные ДН.

Заключение

В работе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик ДПР с установленными в раскрыте корректирующими линзами. Для серийного рупора П6-239/5 получено очень хорошее соответствие между теоретическими и экспериментальными ДН. Рассмотренная конструкция может быть полезна как в качестве эталонной антенны для метрологических целей при проведении антенных измерений, так и в качестве антенного датчика для СВЧ радиометрии.

Видно, что по всему диапазону наблюдается очень хорошее согласие для разных уровней E, H и D плоскостей, как между собой, так и с теоретическими оценками. Это характеризует правильность расчета линзы и её изотропное действие.

Литература

1. Love A.W. The diagonal horn antenna. Microwave J., 1962, v.5, pp.117-122.
2. Фролов О.В., Вальд В.П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи.-М. Горячая линия.-Телеком, 2008, 496с.
3. S. Withington and J. A. Murphy, "Analysis of diagonal horns through Gaussian-Hermite modes," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 40, no. 2, pp. 198-206, Feb. 1992, doi: 10.1109/8.127404.
4. Horn antenna Calculator: <https://hornantennacalculator.blogspot.com/p/calculator.html>
5. Chengdu AINFO Inc. http://ainfoinc.com.cn/en/p_ant_h_dg.asp
6. CERNEX, INC. https://cernex.com/cernex_products.html
7. АО «СКАРД-Электроникс» <http://skard.ru/product-category/ant-sistem/rupornye/>
8. Ю. В. Рыбаков, Д. В. Дроздов, О. А. Герасимов. Гофрированные конические рупорно-линзовые антенны для самолётного СВЧ-влажмера. Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской открытой научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2021. –465 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM)
9. Morita T., Cohn S.B. Microwave lens matching by simulated quarter-wave transformers. IEEE Trans., 1956, v.AP-4, p.33.
10. Ramsay J.F. Lambda functions describe antenna/ diffraction patterns. MICROWAVES, June, 1967
11. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС.-М.: Радио и связь, 1983
12. <https://www.slideserve.com/lavina/diagonal-multimode-horn-antennas>