

Гофрированные конические рупорно-линзовые антенны для самолётного СВЧ-влажмера

Ю. В. Рыбаков, Д. В. Дроздов, О. А. Герасимов

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

В работе представлены экспериментальные результаты по измерению характеристик гофрированных конических рупорно-линзовых антенн, использованных в составе СВЧ-влажмера на борту самолёта-лаборатории Росгидромета ЯК-42. Исходя из требований ширины диаграммы направленности в 7 градусов и коэффициента рассеяния 1%, была выбрана конструкция антенны в виде гофрированного рупора и просветленной диэлектрической линзы с гиперболическим профилем. Изготовленные антенны были обмерены в безэховой камере в диапазонах 18–26 ГГц и 26–40 ГГц. Помимо традиционных характеристик антенн, таких как диаграмма в Е- и Н-плоскостях, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления, КСВн, были получены оценки таких важных для СВЧ-радиометрии характеристик антенного датчика, как коэффициент рассеяния вне главного лепестка и коэффициент полезного действия, определяемый потерями в материале линзы.

Ключевые слова: СВЧ, самолётный, антенны, гофрированные, рупорно-линзовые

Corrugated horn antennae with lens designed for airborne microwave radiometer

Yu. V. Rybakov, D. V. Drozdov, O. A. Gerasimov

*Voeikov Main Geophysical Observatory
194021 St. Petersburg, st. Karbysheva, 7
E-mail: olgrs@mail.ru*

The paper presents some experimental measurements of corrugated horns with lens results. Those are the antenna of microwave radiometer of Roshydromet Yak-42 flying laboratory. Considering 7 degree directional diagram and a 1% dissipation coefficient a hyperbolic profile corrugated horn antennae was suggested. Those antennae were measured through 18-26 GHz and 26-40 GHz, in an anechoic chamber. Along with the typical antennae characteristics as E- H- plane directional diagrams, directional coefficient, gain factor, VSWR, a very defining microwave characteristics, such as dissipation coefficient aside the main lobe and efficiency factor, defined by lens material composure, were measured.

Keywords: microwave, airborne, antenna, corrugated, horn, lens

В дистанционных СВЧ-влажмерах для определения интегрального влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков используются зенитные измерения в диапазоне резонанса водяного пара – около 22,235 ГГц – и в полосе прозрачности 30–37 ГГц [1]. В известной конструкции СВЧ-влажмера для малого самолёта [2] была реализована схема вынесенного за фюзеляж сканирующего зеркала. Для скоростного и высотного самолёта-лаборатории ЯК-42, однако, подобная схема непригодна, поэтому был выбран вариант установки СВЧ-влажмера внутри фюзеляжа, перед радиопрозрачным иллюминатором, под углом 60 градусов относительно зенита (рис. 1). Такое расположение увеличивает толщину зондируемого слоя атмосферы в 2 раза. Размеры апертур антенн, пригодные для самолётного (а в дальнейшем и наземного) варианта СВЧ-влажмера выбирались из габаритов иллюминатора и ограничений, связанных с

необходимостью зондирования в относительно небольшом телесном угле, при диаграмме направленности порядка 7 градусов [3]. Для минимизации влияния фона была выбрана конструкция антенного датчика в виде гофрированного металлического рупора и просветленной линзы из фторопласта. Гофрированные конические рупорно-линзовые антенны (ГКРЛА) подобных размеров используются в качестве самостоятельных антенн относительно редко, поэтому оказалось необходимым подробное экспериментальное исследование их характеристик, которое позволило бы оценить возможности и перспективы применения подобного типа антенн как в качестве датчиков СВЧ-влажномеров, так и в качестве измерительных антенн с улучшенными параметрами.



Рис. 1. Самолётный вариант СВЧ-влажмера на борту ЯК-42

Устройство ГКРЛА

Гофрированный рупор представляет собой излучатель, внутренняя поверхность которого является импедансной структурой, выполняемой чаще всего в виде гофра, глубина которого выбирается близкой к четверти длины волны. При этом в рупоре больших размеров возбуждается HE_{11} мода [4, 5], обладающая следующими характеристиками: поле существенно ослаблено на границах апертуры для вектора E и поляризовано в одном направлении. Гофрированные рупоры с большим углом раскрытия, но с малой апертурой, являются в настоящее время основным типом облучателя зеркальных антенн. Наиболее полно их свойства рассмотрены в [6]. Вход рупора обычно соединяется с круглым волноводом, работающем на H_{11} моде, поэтому для согласования с импедансной (гофрированной) поверхностью, работающей на HE_{11} моде, между рупором и волноводом включается конвертор мод. Наиболее часто его выполняют в виде участка волновода или рупора с набором первых гофр переменной глубины [7]. Для расширяющейся части рупора рекомендуется выбирать глубину гофра несколько большую четверти длины волны [8]. Для получения синфазной апертуры относительно больших размеров (в нашем случае $D/\lambda = 11$) необходимо иметь очень длинный рупор, что конструктивно неудобно, либо использовать комбинацию рупора с вырезкой из параболического зеркала, что конструктивно сложно и дорого в изготовлении. Можно также установить в раскрытие рупора линзу. В нашем случае предпочтение отдано третьему варианту. Вывод основных формул для одноповерхностных линз с освещенной преломляющей поверхностью можно найти в многочисленных источниках (например, [9]). Для устранения отражений от поверхности диэлектрика на поверхностях линзы нарезаются концентрические прорези

определенной глубины [10].

Методы исследования ГКРЛА

Разработанные и изготовленные образцы антенн (рис. 2) устанавливались на измерительном стенде в специальной безэховой камере «ООО НПП «ТРИМ»» [11], позволяющей производить измерение диаграммы направленности (ДН) до уровня – 70 дБ почти в полном телесном угле. Измерения ДН возможны как с помощью восстановления ДН по измерению амплитудно-фазового распределения в ближней зоне, так и традиционным способом измерения ДН в дальней зоне на прием по излучению эталонного широкоугольного излучателя.



Рис. 2. Самолётные антенны СВЧ-влажмера для ЯК-42

ГКРЛА представляет собой синфазную апертуру, причём внутри рупора распространяется HE_{11} мода. Известно [4], что подобная синфазная апертура больших (в D/λ) размеров для данной моды создает ДН вида $F_1 = J_0(u)/(1-(u/2.405)^2)$. При этом предполагается нулевое облучение края апертуры. Установка линзы слегка изменяет амплитудное распределение, которым, как правило, пренебрегают. Из имеющихся стандартных аппроксимаций ДН полезными оказались ДН вида Λ -функций, для которых коэффициент рассеяния (КР) вычисляется достаточно просто. В таблице 1 приведены величины теоретических значений для 4 видов ДН по уровням –3..–40 дБ, которые можно использовать для сравнения с экспериментально измеренными ДН в полосе.

Таблица 1. Теоретические значения обобщенной координаты U для 4 видов ДН

F, дБ	$F_1 = \Lambda_1(u)$	$F_2 = \Lambda_2(u)$	$F_3 = \Lambda_3(u)$	$F_4 = \Lambda_4(u)$
-3	2.07	1.99	2.31	2.59
-5	2.64	2.53	2.95	3.31
-10	3.60	3.36	4.03	4.57
-15	4.23	4.02	4.76	5.42
-20	4.67	4.42	5.29	6.06
-25	5.00	4.69	5.66	6.53
-30	5.19	4.87	5.92	6.89
-35	5.32	4.97	6.10	7.14
-40	5.40	5.04	6.36	7.31

Далее, зная значения ДН в полном телесном угле и в области главного лепестка, можно как теоретически, так и экспериментально определить величину коэффициента направленного действия (Д) и КР. Теоретические значения КР для трёх типов ДН составляют 0.87%, 0.79% и 0.34%. С помощью эталонных облучателей можно измерить величину коэффициента усиления (КУ), отношение которого к Д позволяет определить

КПД, связанный с потерями в материале линзы. Измеренный в полосе частот КСВн позволяет судить как о правильности выбора размеров трансформатора мод из TE_{11} в HE_{11} , так и о степени согласования гиперболической диэлектрической линзы.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны примеры совмещенных (Е и Н) ДН на частотах 19, 22 и 36 ГГц. В общей сложности через 0,5 ГГц было снято 34 диаграммы в диапазоне 18–26 ГГц и 26 диаграмм в диапазоне 26–40 ГГц. В таблице 2 приведены результаты обработки ДН для диапазона 18–26 ГГц, при которой определялись значения обобщенной координаты $U = 3,14 \times D/\lambda \times \sin \Theta$ по уровням -3 , -5 , -10 , -15 , -20 , -25 , -30 , -35 дБ. Верхнее значение в соответствии с величиной $U_{\text{Епл}}$, нижнее – величине $U_{\text{Нпл}}$. Сравнение значений U в таблицах 1 и 2 показывает, что для данной антенны в диапазоне 19,5 – 22 ГГц экспериментальные диаграммы хорошо совпадают с формой ДН в виде Λ -функции 3^{го} порядка. На рис. 4 показаны вариации U реальных ДН в Е и Н плоскостях относительно Λ -функции 3^{го} порядка по уровням -3 , -5 , -10 , -15 дБ.

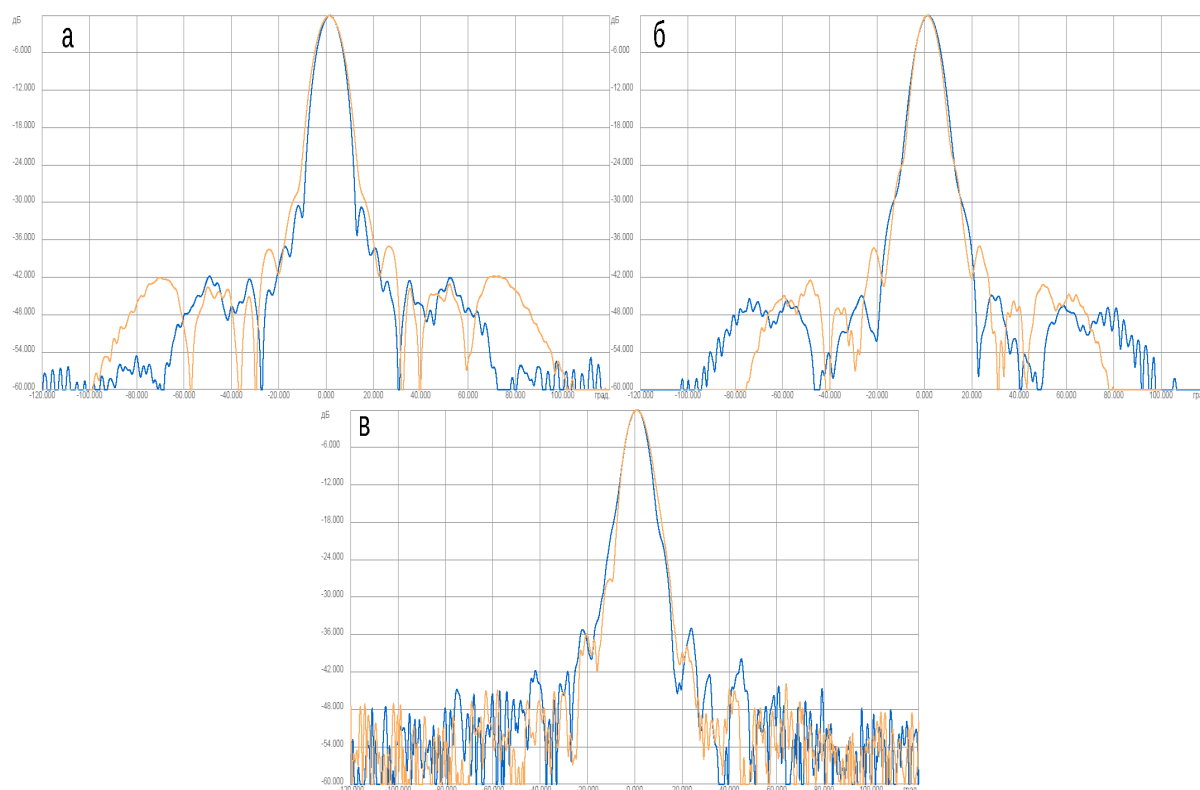


Рис. 3. Примеры совмещённых (Е и Н) ДН на частотах: а) 19, б) 22 и в) 36 ГГц

Таблица 2. Экспериментальные значения обобщенной координаты U в диапазоне

f, ГГц		18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5	22	22,5	23	23,5	24	24,5
$E_{пл}$	-3 дБ	2.25	2.14	2.15	2.29	2.19	2.20	2.35	2.38	2.39	2.55	2.51	2.41	2.36	2.31
$H_{пл}$		2.34	2.37	2.35	2.30	2.32	2.28	2.26	2.26	2.25	2.35	2.39	2.35	2.40	2.42
$E_{пл}$	-5 дБ	2.90	2.78	2.73	2.93	2.76	2.80	2.98	3.08	3.06	3.29	3.20	3.15	3.08	2.94
$H_{пл}$		2.95	3.08	3.04	2.93	2.95	2.88	2.93	2.94	2.89	3.02	3.05	3.05	3.15	3.11
$E_{пл}$	-10 дБ	3.88	3.79	3.76	3.97	3.77	3.86	4.16	4.25	4.24	4.61	4.49	4.43	4.42	4.21
$H_{пл}$		4.13	4.20	4.15	3.99	4.07	4.00	3.96	3.99	3.96	4.15	4.24	4.17	4.26	4.31
$E_{пл}$	-15 дБ	4.66	4.51	4.41	4.65	4.53	4.56	5.07	5.28	5.22	5.58	5.61	5.51	5.56	5.52
$H_{пл}$		5.02	5.09	4.99	4.76	4.85	4.70	4.76	4.75	4.8	5.03	5.18	5.16	5.24	5.35
$E_{пл}$	-20 дБ	5.22	5.04	4.99	5.18	5.12	5.17	5.80	6.14	6.05	6.58	6.60	6.71	6.86	7.03
$H_{пл}$		5.89	5.66	5.69	5.36	5.42	5.31	5.38	5.57	5.54	5.86	6.36	6.02	6.21	6.34
$E_{пл}$	-25 дБ	5.75	5.39	5.30	5.60	5.71	5.81	6.62	7.01	7.03	7.49	7.84	7.89	8.09	8.32
$H_{пл}$			6.21	6.42	5.94	5.96	5.94	6.06			7.61	7.87	7.19	7.34	7.66

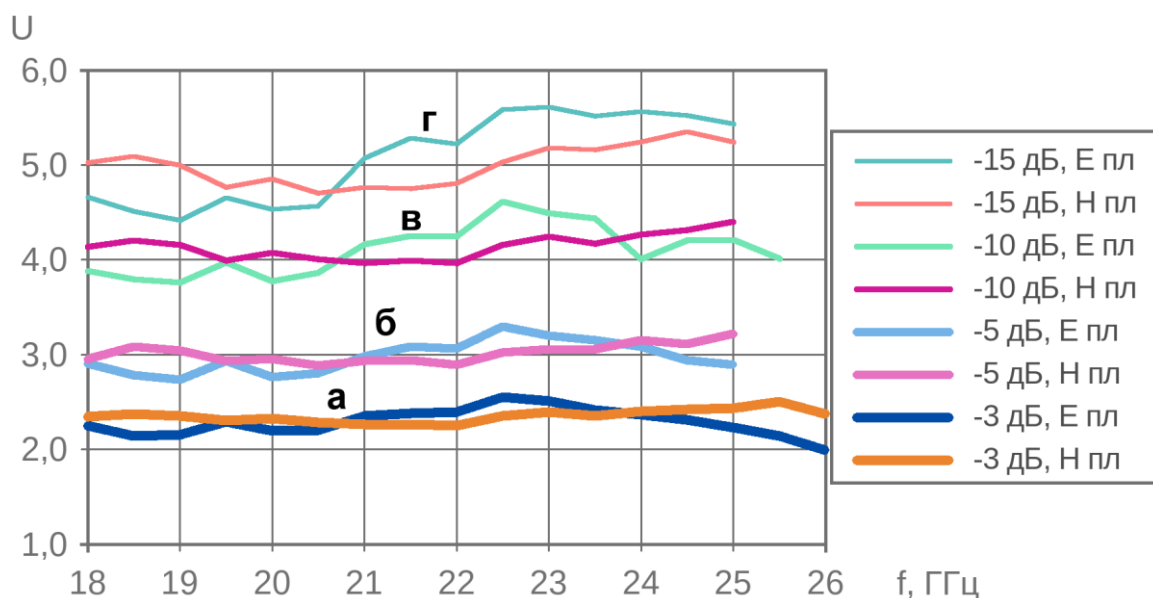


Рис. 4. Вариации U по диапазону частот: а) -3дБ, б) -5дБ, в) -10дБ, г) -15дБ

Измерение D , $D_{гл}$ и КР проводится по объёмным диаграммам. В таблице 3 представлены результаты определения D и $D_{гл}$, вычисленные по измеренным объёмным ДН ближнего поля (рис. 5). В последнем случае за главный лепесток полагался участок ДН с уровнем поля выше -30 дБ. Отношение D и $D_{гл}$ дает долю мощности, содержащуюся в главном лепестке ДН, а разница с нормированной к единице мощностью – величину мощности, содержащуюся в боковых лепестках, т. е. КР. Малая величина КР в таблице 4 показана в процентах. В диапазоне частот 20–23,5 ГГц КР оказывается меньше 1%. На рис. 6 также показаны величины КР для E и H поляризаций, определенные по ДН, снятым в дальней зоне. Эти результаты также показывают наличие оптимального по КР диапазона 20–23,5 ГГц, но при этом можно отметить, что снизу ограничение определяется пиком КР в E плоскости на 19,5 ГГц, сверху – пиком КР в H плоскости на 24 ГГц.

Таблица 3. Результаты экспериментального определения D , $D_{гл}$ и KP

f , ГГц	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5
$D_{гл}$, дБ	26.88	27.24	27.48	27.71	27.97	27.83	27.89	28.08	27.84	28.10	28.52	28.52	28.85
D , дБ	26.86	27.20	27.42	27.68	27.95	27.80	27.87	28.05	27.81	28.07	28.49	28.47	28.82
1- KP , дБ	0.025	0.036	0.063	0.027	0.027	0.028	0.023	0.027	0.023	0.029	0.032	0.047	0.029
1- KP	0.994	0.992	0.986	0.994	0.994	0.994	0.995	0.994	0.995	0.993	0.993	0.989	0.993
KP , %	0.58	0.82	1.43	0.62	0.63	0.64	0.53	0.62	0.52	0.66	0.74	1.08	0.67

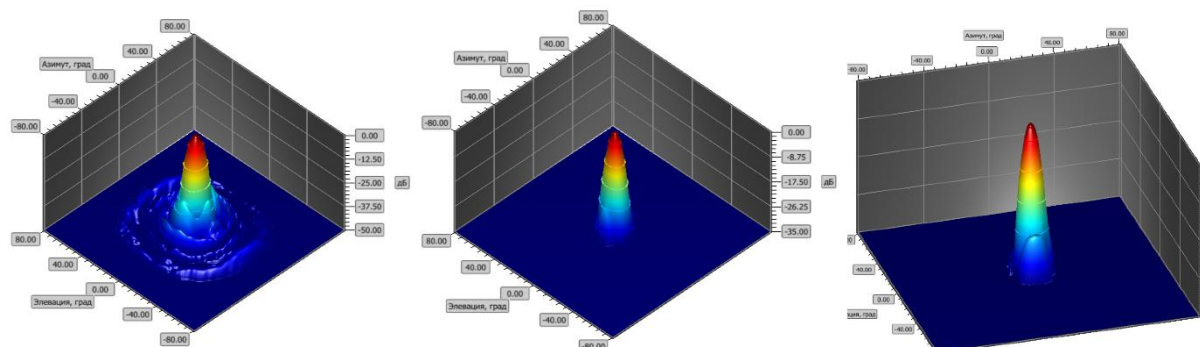


Рис. 5. Измеренные экспериментально объёмные диаграммы

Полученные результаты показывают возможность получения аксиально симметричной диаграммы направленности в требуемом диапазоне с коэффициентом рассеяния меньше 1% и высоким КПД.

Таблица 4. KP по измеренным диаграммам в E и H плоскостях

f , ГГц	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.5	23.0	23.5	24.0	24.5
KP $E_{пл.}$ %	1.03	0.91	2.63	0.36	0.56	0.37	0.51	0.57	0.35	0.49	0.67	0.59	1.01
KP $H_{пл.}$ %	0.51	0.99	0.81	0.67	0.54	0.95	0.91	0.84	0.90	1.08	1.04	3.30	0.82
$KP_{ср}$	0.72	0.95	1.46	0.49	0.55	0.59	0.68	0.69	0.56	0.73	0.83	1.40	0.91
KP , %	0,58	0,82	1,43	0,62	0,63	0,64	0,53	0,62	0,52	0,66	0,74	1,08	0,67

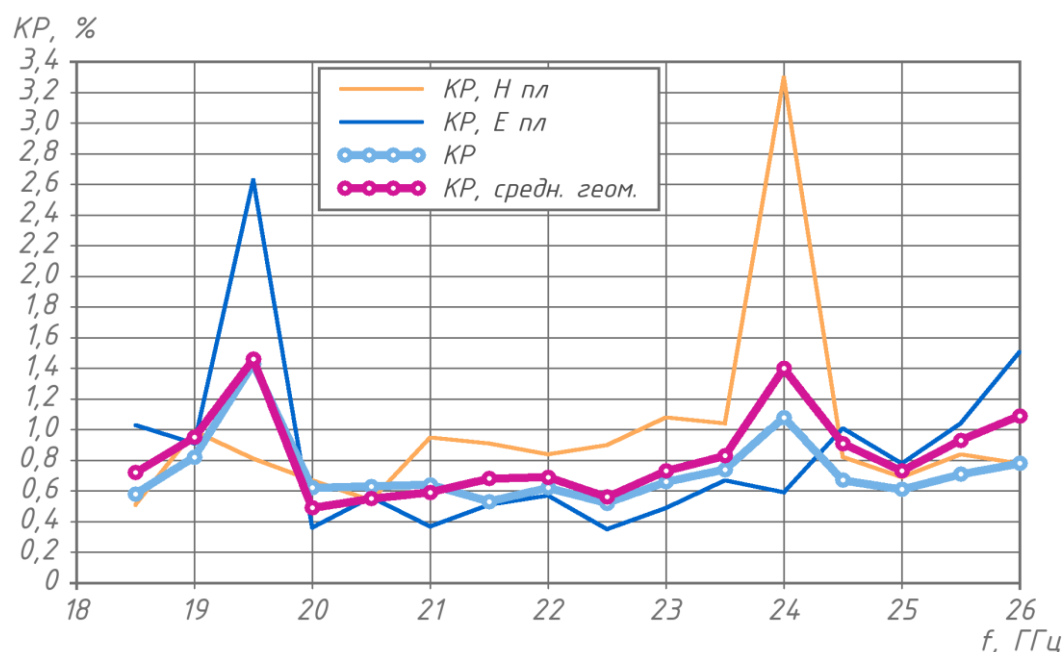


Рис. 6. Величины KP для E и H и среднегеометрическая величина.

Измерение КПД линзы по результатам определения характеристик. В таблице 5 представлены результаты определения КУ в том же диапазоне частот. Отношение КУ и Д из табл. 4 позволяет вычислить величину КПД, которая, в основном, определяется потерями в материале линзы. Видно, что в диапазоне частот 21–26 ГГц эта величина составляет 0,99. То есть потери в линзе не превышают 1%.

Таблица 5. определение КПД линзы

s	26.80	27.16	27.32	27.61	27.89	27.78	27.83	28.01	27.77	28.06	28.48	28.44	28.80
КПД ,дБ	0.053	0.036	0.093	0.072	0.060	0.023	0.034	0.040	0.047	0.012	0.007	0.026	0.014
КПД	0.988	0.992	0.979	0.984	0.986	0.995	0.992	0.991	0.989	0.997	0.999	0.994	0.997
1-КПД, %	1.22	0.82	2.12	1.65	1.36	0.53	0.78	0.91	1.09	0.28	0.15	0.60	0.31

Измерение согласования (КСВн) и определение влияния линзы. На рис. 7 показана величина КСВн в полосе частот при вставленной и вынутой линзе. Видно, что используя первые 5 гофр с плавным изменением глубины, можно добиться согласования по КСВн лучше 1,12 в полосе частот 19,7–23,5 ГГц. Установка линзы несколько поднимает всю кривую до уровня меньшего 1,17.

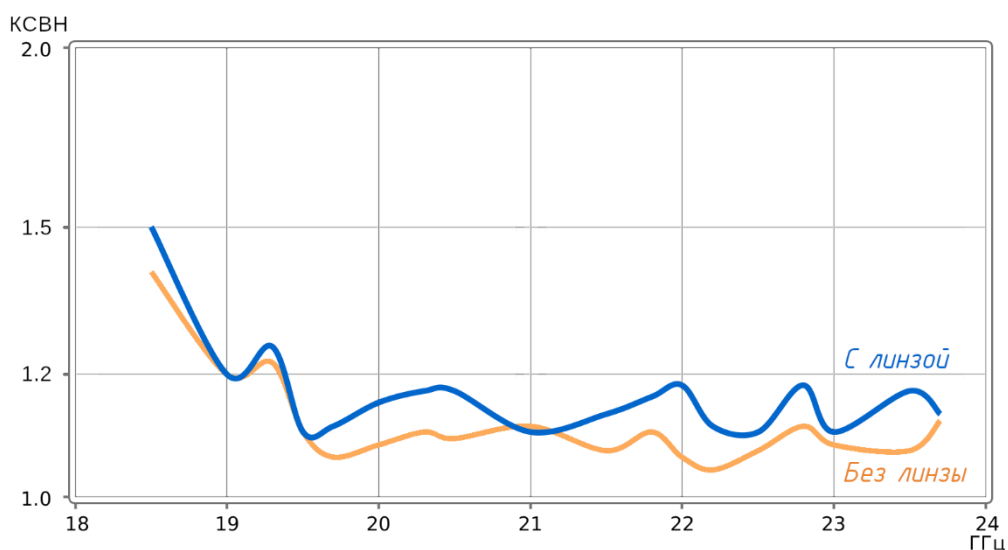


Рис. 7. Измерение КСВн с вынутой и вставленной линзой

Похожие характеристики были получены и для синфазных апертур на основе гофрированной рупорно-параболической антенны, а также длинного гофрированного рупора с малой фазовой ошибкой. Такие антенны использовались в эксперименте Реликт-1 [12] для измерения очень малых температур галактического фона.

Заключение

В работе приведены экспериментальные результаты исследования антенны с расчетной величиной ширины ДН в 7 градусов и КР 1%. Показано, что выбор конструкции в виде гофрированного рупора и просветленной линзы позволяет решить поставленную задачу. Рассмотренная конструкция может быть полезна как в качестве датчика для СВЧ-радиометрии, так и в качестве эталонной антенны для метрологических измерений.

Для гофриованно-конической рупорно-линзовой антенны уточнена форма диаграммы направленности, которая ближе к Λ -функции 3 порядка и отлична от характерной формы диаграммы синфазной апертуры, возбуждаемой HE_{11} модой.

Работа выполнялась по целевым программам Росгидромета и частично в процессе подготовки и защиты студенческих диссертаций.

Литература

1. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Vol.3. – 1986.
2. Fedor L.S., Jacobson M.D., Bedard, Jr. A.J., Westwater E.R., Hogg D.C., Nishiyama R.T. Dual-Channel Microwave Radiometer for Airborne Meteorological Applications. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-157. Wave Propagation Laboratory, Boulder, Colorado, Dec., 1988
3. Guiraud F.O., Howard J., Hogg D.C. A Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Precipitable Water Vapor and Liquid, 1979, IEEE Trans. Geosci. Electron., GE-17, p129-136
4. Dragone C. Attenuation and Radiation Characteristics of the HE₁₁- Mode. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, V. MTT-28, 7, July, 1980, pp 704-710
5. Minnett H.C., MacA Thomas B., A method of synthesizing radiation patterns with axial symmetry. IEEE Trans. Ant. and Prop., V AP-14, pp 654-656, Sept., 1966
6. Clarricoats P.J.B., Olver A.D. Corrugated horn for microwave antennas. London, Peter Peregrines Ltd., 1984
7. James G.L. Analysis and design of TE₁₁ to HE₁₁ corrugated cylindrical waveguide mode converters. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1981, V. MMT-30, 3, pp.278-285
8. Granet C., James G. L. Design of corrugated horns : A Primer. IEEE Ant. and Prop. Magazine, V. 47, 2 April, 2005, pp.76-84
9. Clarricoats P.J.B., Saha P.K. Radiation pattern of a lens-corrected conical scalar horn. Electron. Lett., 1969, 23, pp 592-593
10. Morita T., Cohn S.B. Microwave lens matching by simulated quarter-wave transformers. IRE Trans., 1956, V.AP-4, p.33
11. <https://trimcom.ru/main-page/about/>
12. Струков И.А., Скулачев Д.П., Ткачев А.Н. Проектирование бортовых антенн с низким уровнем бокового излучения. Научная аппаратура для космических исследований. М., Наука, 1987, с. 94-104.