

Сверхширокополосный ТЕМ рупор с перфорированными токоведущими шинами

Б.С. Ставцев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13, E-mail:bstavtsev@mail.ru

В статье приведены три варианта построения СШП ТЕМ рупоров. Проведено сравнение двух одинаковых по форме и размеру рупоров с эллиптическим профилем, в токоведущих шинах одного из двух сделаны перфорации в виде прорезей. Представлены и проанализированы попарно совмещённые на графиках результаты расчёта диаграмм направленности рупоров в широкой полосе частот, намечены дальнейшие пути улучшения их направленных свойств.

The article presents three variants of UWB TEM horns. Comparison of two identical in size and shape with an elliptical profile horns, current-carrying tire in one of the two perforations are made in the form of slits. Are presented and analyzed in pairs combined in the graphs of the calculation patterns horns in a wide frequency band, outlined further ways of improving their intended properties.

Сверхширокополосные рупора принято называть ТЕМ рупорами, несмотря на то, что вдоль их направляющих структур распространяется волна, которую только приближённо можно было бы назвать “квази-ТЕМ” волной. Принято считать, например, что вдоль полосковой линии передачи СВЧ энергии чистая ТЕМ волна распространяется в том случае, когда ширина полоска и расстояние между токоведущими полосками значительно меньше половины длины самой короткой волны из спектра передаваемого СШП сигнала. Плотность распределения потока электромагнитной волны в поперечном сечении такой линии поддерживается одинаковой во всём диапазоне рабочих частот, фазовые скорости распространения всех составляющих спектра СШП сигнала будут одинаковы. Такая линия передачи не вносит в СШП сигнал фазочастотных искажений, поскольку не обладает фазочастотной дисперсией.

В отличие от ТЕМ линии в рупоре наблюдается иное. Излучение на высших частотах может начинаться в рупоре уже сразу за его входом. Это может происходить, когда в направляющей структуре рупора - нерегулярной расходящейся ленточной линии - расстояние между токоведущими шинами, и их ширина становятся сравнимы с половиной длины волны. Поэтому вести разговор о ТЕМ волне в этом случае уже некорректно, а лучше использовать понятие о “квази-ТЕМ” волне. С продвижением вдоль направляющей структуры рупора к его выходной апертуре последовательно происходит излучение более низких частот из спектра СШП сигнала. Фазочастотная дисперсия в рупоре, как правило, присутствует обязательно, и чем она существеннее, тем более растянутым и искажённым при излучении будет первоначальный сигнал. Поэтому, для минимизации фазочастотных искажений необходимо соблюдение требований, предъявляемых к СШП антеннам. Однако, не всегда удаётся обеспечить одновременно в одном рупоре эти требования в сверх широкой полосе рабочих частот.

Признаками эффективности СШП антенн, наряду с малым КСВ и малыми отражениями от входа во всей полосе рабочих частот являются постоянство волнового сопротивления, постоянство амплитуды ДН и симметрия её главного лепестка в обеих плоскостях, малый уровень заднего и боковых лепестков, минимальные флуктуации положения фазового центра и другое. В первом приближении, очевидно, что формы такого рупора должны изменяться плавно и по правильно выбранным законам. Очень важным, при этом, является обеспечение плавного перехода от питающей СВЧ линии к

симметричному входу рупора. Поэтому питающая линия должна заканчиваться полосковым переходом, например, от несимметричной полосковой линии, к симметричной ленточной линии. В работе [2], например, авторы справедливо испробовали и исследовали плавные изменения формы рупора по линейному, экспоненциальному и квадратичному законам, а в качестве питающего фидера использовали отрезок ленточной линии. Полученные ими результаты заслуживают внимания и учёта. В настоящей статье, как и в более ранней работе [4], в геометрии направляющей структуры рупора применена эллиптическая нелинейность. Это сделано в предположении улучшения согласования рупора с излучаемой, или принимаемой электромагнитной волной, имеющей в своей основе сферическую природу. Достаточно давно были предложены варианты СШП антенн [5] на базе рупора типа «бабочка» с отворотом концов шин назад по эллиптическому закону. Вследствие того, что в конструкции такого рупора сосуществуют регулярный и нерегулярный подходы, его правильно было бы назвать “гибридным”. В качестве примера на рисунке 1 представлены общий вид “гибридного” рупора, некоторые его характеристики и ДН, построение и расчёт которых осуществлены в среде программно-вычислительного продукта UNSYS HFSS.

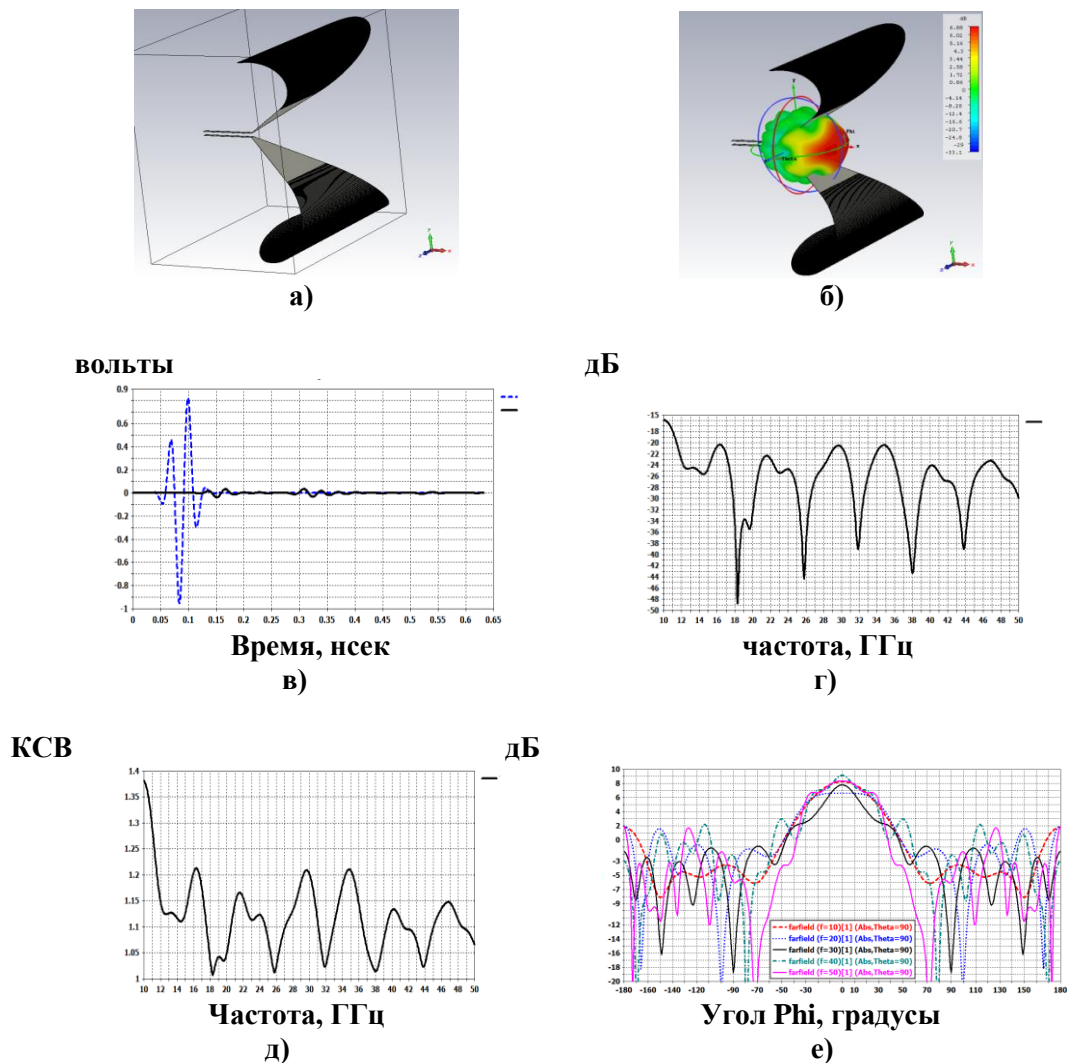


Рис.1. Гибридный TEM рупор: а) общий вид гибридного рупора; б) 3D ДНА на 40ГГц; в) сигнал порта в вольтах на входе рупора и отражения от рупора; г) S-параметр S11, дБ; д) КСВ рупора в полосе частот 10-50ГГц; е) семейство ДН гибридного рупора в Фил-плоскости в полосе частот 10-50ГГц, дБ

На рисунке 1е в полосе частот 10...50ГГц можно наблюдать некоторую модуляцию амплитуды в главном лепестке ДНА на средних частотах. Наблюдается, также, сравнительно небольшое ослабление бокового излучения (от -6,0 дБ до 0 дБ) и излучения в заднюю полусферу (от-3 дБ до3 дБ), при усилении в рабочем направлении (8...10дБ). Эти диаграммы получены при хорошем согласовании рупора, как с питающим фидером, так и со свободным пространством. Об этом свидетельствуют графики, представленные на рисунке 1: 1в – показывает, что отражения сигнала на входе рупора в реальном времени составляют величину менее 1%; 1г – уровень S_{11} сигнала, отраженного от рупора в полосе частот 10...50 ГГц не больше -20дБ; 1д – КСВ менее 1,2 на входе рупора в полосе 12...50 ГГц, а на частоте 10ГГц КСВ составляет величину 1,36. При внимательном рассмотрении результатов сверхширокополосного исследования гибридного рупора было замечено, что не все его основные характеристики соответствуют необходимым требованиям, предъявляемым к СШП антеннам (например, искажения формы главного лепестка ДН на средних и верхних частотах).

В настоящей статье поиски верного конструктивного решения связаны с выбором характера нерегулярности ТЕМ рупора, лучше учитывающего сферическую природу ЭМВ, излучаемой СШП рупором. За основу закона расхождения токоведущих шин рупора была взята часть кривой эллипса, построенного в плоскости XOY системы координат $OXYZ$, представленной на рисунке 4. Коэффициент эллиптичности выбран величиной $K_{эли}=2$. Большая ось эллипса, первоначально совпадающая с осью X , повернута на угол $\nu=pi/6$ вокруг оси Z . Начальной и конечной точками расхождения токоведущих шин взяты экстремальные точки эллипса, после его поворота на угол ν вокруг оси Z , а именно: самая нижняя точка, с координатами (Y_{mm}, X_{mm}) и самая верхняя точка с координатами (Y_{hh}, X_{hh}) . Характер изгиба поверхности верхней токоведущей шины в плоскости XOY системы координат $OXYZ$, таким образом, описан. Поверхность шины с таким изгибом, в свою очередь, является частью поверхности пустотелого токопроводящего эллиптического цилиндра с образующей, параллельной оси Z . При формировании токоведущих шин рупора применено правило: в каждом поперечном сечении рупора расстояние между токоведущими шинами должно быть, примерно, равным их ширине. Это необходимо для того, чтобы в широкой полосе частот обеспечить постоянство волнового сопротивления вдоль направляющей структуры. В данной работе необходимые геометрические построения были выполнены следующим образом.

Первый шаг. Пусть поверхность пустотелого электропроводящего эллиптического цилиндра с z -образующей построена в системе координат $OXYZ$ в соответствии с выражением:

$$Y^2 - \frac{22\sqrt{3}}{39}XY + \frac{1}{12}X^2 - \frac{12}{13}b^2 = 0, \quad (1)$$

где: b – малая полуось эллиптического цилиндра.

Переместим в положительном направлении осей системы координат $OXYZ$ этот пустотелый эллиптический цилиндр с z -образующей, точнее, ту его часть, сечение которой в плоскости XOY описано ранее: по оси OY – на величину $|Y_{mm}|$, а по оси OX – на величину $|X_{mm}|$. Здесь: X_{mm} , Y_{mm} – абсцисса и ордината самой нижней по оси OY точки поверхности повернутого эллиптического цилиндра, но до перемещения его по осям OX и OY .

Второй шаг. Строим две плоскости, параллельные оси OX и в соответствии с выражениями:

$$Y_1 = Z - \frac{w}{2}, \quad (2)$$

$$Y_2 = -Z - \frac{w}{2}, \quad (3)$$

где: w – ширина полоска на входе рупора.

Совместные решения уравнений (1), (2) и (1), (3) дают линии пересечения этими плоскостями поверхности эллиптического цилиндра, то есть выражения, фактически описывающие закон изменения полуширины шин от координаты X . Поскольку поверхность эллиптического цилиндра пересекается плоскостями (2) и (3) под углами в $\pm 45^\circ$ к оси OZ и плоскости XOZ , то в каждой i -ой точке линии, полученной от пересечения плоскостями (2) или (3) поверхности эллиптического цилиндра, ордината Y_i будет равна координате Z_i , то есть, полуширине будущей шины. А если учесть, что вторая токоведущая шина расположена зеркально, относительно первой шины и плоскости XOZ , то ордината Y_i будет, также, равна половине расстояния между i -ми точками токоведущих шин ТЕМ рупора. Следовательно, в каждой i -ой точке токоведущих шин расстояние между шинами будет равно их ширине. Далее, для формирования токоведущей шины отсечём внешние части эллиптического цилиндра по линиям пересечения на его поверхности. Кроме того, отсечём не относящиеся к формированию верхней токопроводящей шины оставшиеся части цилиндра, которые расположены в направлении уменьшения абсциссы X , начиная от самой его верхней точки (Y_{hh}, X_{hh}) и заканчивая самой нижней (Y_{mm}, X_{mm}) точкой. Конец токопроводящей шины завершим, например, эллиптическим закруглением с радиусами R_{xsell} и R_{zsell} , которое расположено параллельно плоскости XOZ . Вторую токопроводящую шину размещаем зеркально, относительно первой и плоскости XOZ и разводим шины друг от друга вдоль оси ординат на расстояние a . О выборе a и w будет сказано далее.

Данный СШП ТЕМ рупор можно рассматривать как некий сверхширокополосный переход от ленточной полосковой линии к свободному пространству. В этом случае, входное волновое сопротивление рупора должно быть близко к волновому сопротивлению питающей ленточной линии. С приемлемой для наших исследований точностью волновое сопротивление воздушной ленточной линии может быть рассчитано по формуле (4):

$$\rho = \frac{120\pi a}{a+w}, \quad (4)$$

где a – расстояние между полосками (токоведущими шинами на входе рупора) ленточной линии;

w – ширина полоска ленточной линии (w_r - ширина токоведущих шин на самом входе рупора).

Погрешность расчёта волнового сопротивления, выполненного по формуле (4), не превосходит 5%, при соблюдении соотношении $a/w < 3$.

Расстояние a между полосками ограничено верхней частотой рабочего диапазона рупора из-за возможности возникновения фазочастотной дисперсии на высоких частотах. В воздушных полосковых линиях, используемых для передачи СШП сигналов с верхними частотами спектра, достигающими до 30...50 ГГц, расстояние a не должно быть больше 0,8...0,5 мм, соответственно. С учётом этих ограничений, выберем расстояние $a=0,6$ мм, положим значение волнового сопротивления питающего фидера равным $\rho = 500$ Ом. Эти величины подставим в формулу (4) и определим w , а значит, и w_r – ширину токопроводящей шины в начале рупора. Установим значение малой полуоси эллиптического цилиндра равным b . Рупор, построенный с учётом выбранных параметров и описанного ранее подхода, представлен на рисунке 2. Здесь питающим фидером служит отрезок ленточной линии, с волновым сопротивлением около 50 Ом. В общем случае, известно, что СШП ТЕМ рупора такого типа не обладают резко выраженной линейностью поляризации излучаемого сигнала. Вероятно, это частично связано с тем, что входящие в рупор токи растекаются по шинам не в строго одном направлении. Негативные последствия этого сказываются в появлении диагонально расположенных “рогов” на ДН, построенных в 3D-формате в определённой части

рабочего диапазона частот. Этот факт может ограничивать область применения таких рупоров. С целью частичного, а в дальнейшем, возможно, и более глубокого устранения этого эффекта, был построен второй рупор, отличающийся от первого тем, что в каждой шине, параллельно плоскости XOY были сделаны прорезы, ограниченные боковыми полосами шины и её центральной частью специальной формы. Расчёт на положительный эффект заключался в том, что ток, входящий в рупор, должен был расщепляться прорезями и протекать в принудительно заданном одном направлении, а именно, вдоль узких полосок, образованных прорезями в токоведущей шине. В свою очередь, каждая расщеплённая часть тока будет протекать и по двум тонким проводникам, зеркально расположенным на токоведущих шинах, относительно плоскости симметрии рупора XOZ, как по проволочному изогнутому диполю. Известно, что проволочный диполь формирует цилиндрическую волну. Именно с этим обстоятельством были связаны предположения, что произойдёт улучшение ДН рупора. Общий вид рупора со щелями представлен на рисунке 3. Питаящим фидером здесь служит отрезок ленточной линии, с волновым сопротивлением 50 Ом. Оба рупора были исследованы в полосе частот 4...40 ГГц. Направления отсчёта углов Phi и Theta представлены на рисунке 4. На рисунке 5 представлены совмещённые диаграммы некоторых характеристик рупоров. Здесь, сплошными линиями чёрного цвета обозначены характеристики рупора с прорезями, а синими штриховыми – рупора без прорезей. Незначительность расхождений совмещённых диаграмм, наблюдаемая на рисунке 5, говорит о низком энергетическом уровне изменений, произошедших в ДН рупора с прорезями. Можно предположить, что изменения произошли, скорее всего, на уровне боковых и задних лепестков. ДН рупоров без прорезей и с прорезями в токоведущих шинах представлены на рисунках 6, 7, 8 и 9.

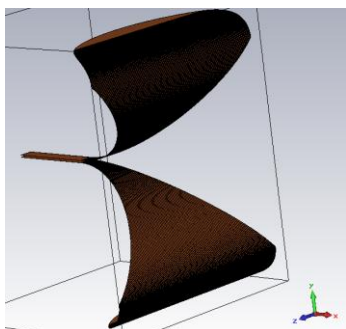


Рис.2. Рупор без прорезей

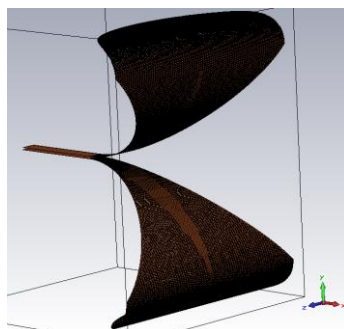


Рис.3. Рупор с прорезями

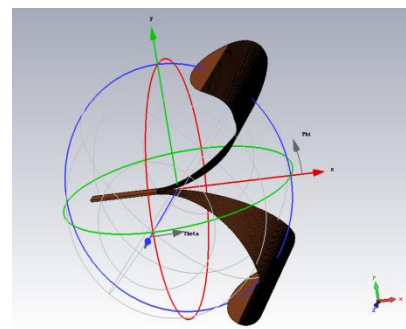


Рис.4. Система координат OXYZ

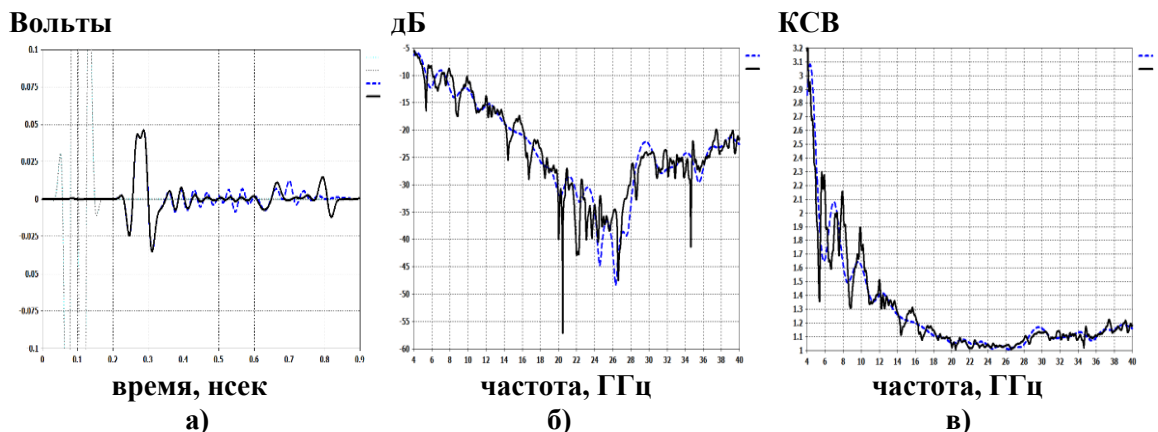


Рис.5. Совмещённые диаграммы характеристик рупоров без прорезей (синий штрих) и с прорезями (чёрный сплошной) в полосе частот 4...40ГГц: а) сигналы отражений от входа рупоров, В/нсек; б) S-параметры рупоров, дБ/ГГц; в) КСВ рупоров

На рис. 6 представлены попарно совмещённые ДН для тэта-плоскости рупоров: с прорезями - Theta “Щель” и рупора без прорезей - Theta “Сплошная”. На рисунке 7 представлены попарно совмещённые ДН для фи-плоскости рупоров: рупора с прорезями - Fi “Щель” и рупора без прорезей - Fi “Сплошная”. Представление осуществлено в 2D формате с дополнительной цветовой градацией уровней интенсивности ДН, выраженной в дБ. На ДН в тэта-плоскости, представленных на рисунке 6 можно сразу обнаружить значительно меньшую интенсивность лепестков боковых и лепестков задней полусферы у рупора с прорезями (Theta ”Щель”), по сравнению с рупором без прорезей (Theta “Сплошная”). При этом главный лепесток ДН в полосе частот 5...40ГГц у рупора с прорезями выглядит более ровным и стабильным. В фи-плоскости (рис.7) на ДН рупора с прорезями также наблюдается подавление интенсивности лепестков боковых и лепестков задней полусферы на верхних частотах, но в меньшей степени. Здесь тоже сохраняется достаточно близкое равенство и стабильность главных лепестков в диапазоне рабочих частот 5...40ГГц.

Эти же эффекты подтверждаются при рассмотрении совмещённых диаграмм направленности в Theta-плоскости при угле Phi=0 (рис.8) и в Phi-плоскости при угле Theta=0° (рис.9), построенных в 2D-формате. Сплошными чёрными линиями изображены ДН рупора с прорезями, а штриховыми синими – ДН рупора без прорезей.

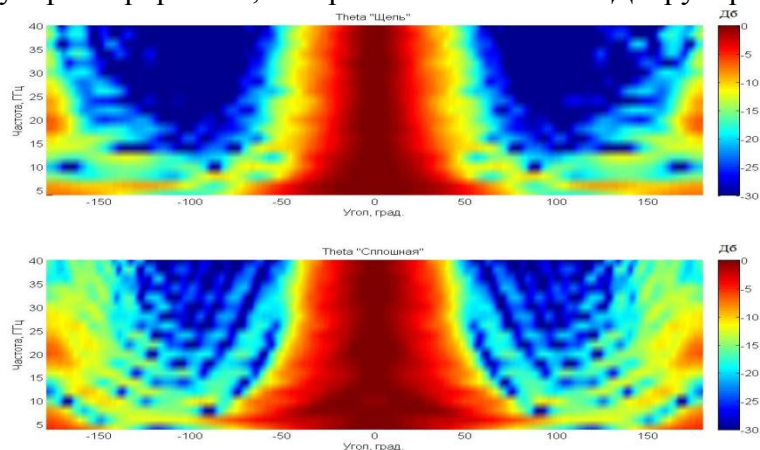


Рис. 6. Сравнение ДН в тэта-плоскости рупоров в 2D формате и в полосе частот 5...40ГГц с дополнительным показом уровней интенсивности ДН, выраженном в дБ, в цветовом представлении

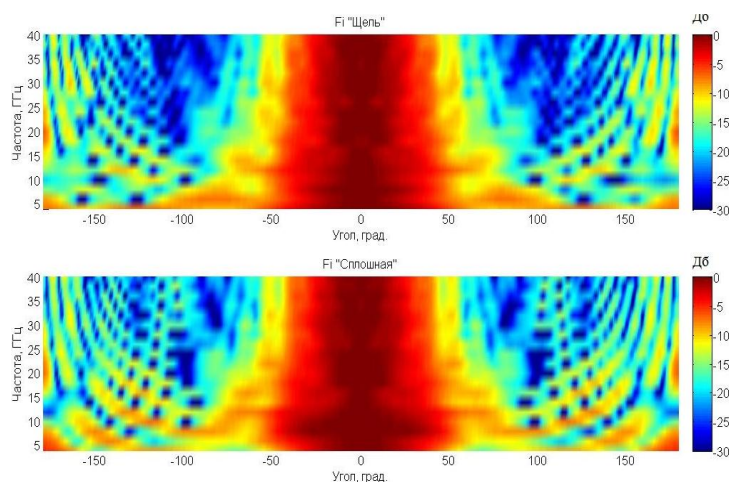


Рис. 7. Сравнение ДН в фи-плоскости рупоров в 2D формате и в полосе частот 5...40ГГц с дополнительным показом уровней интенсивности ДН, выраженном в дБ, в цветовом представлении

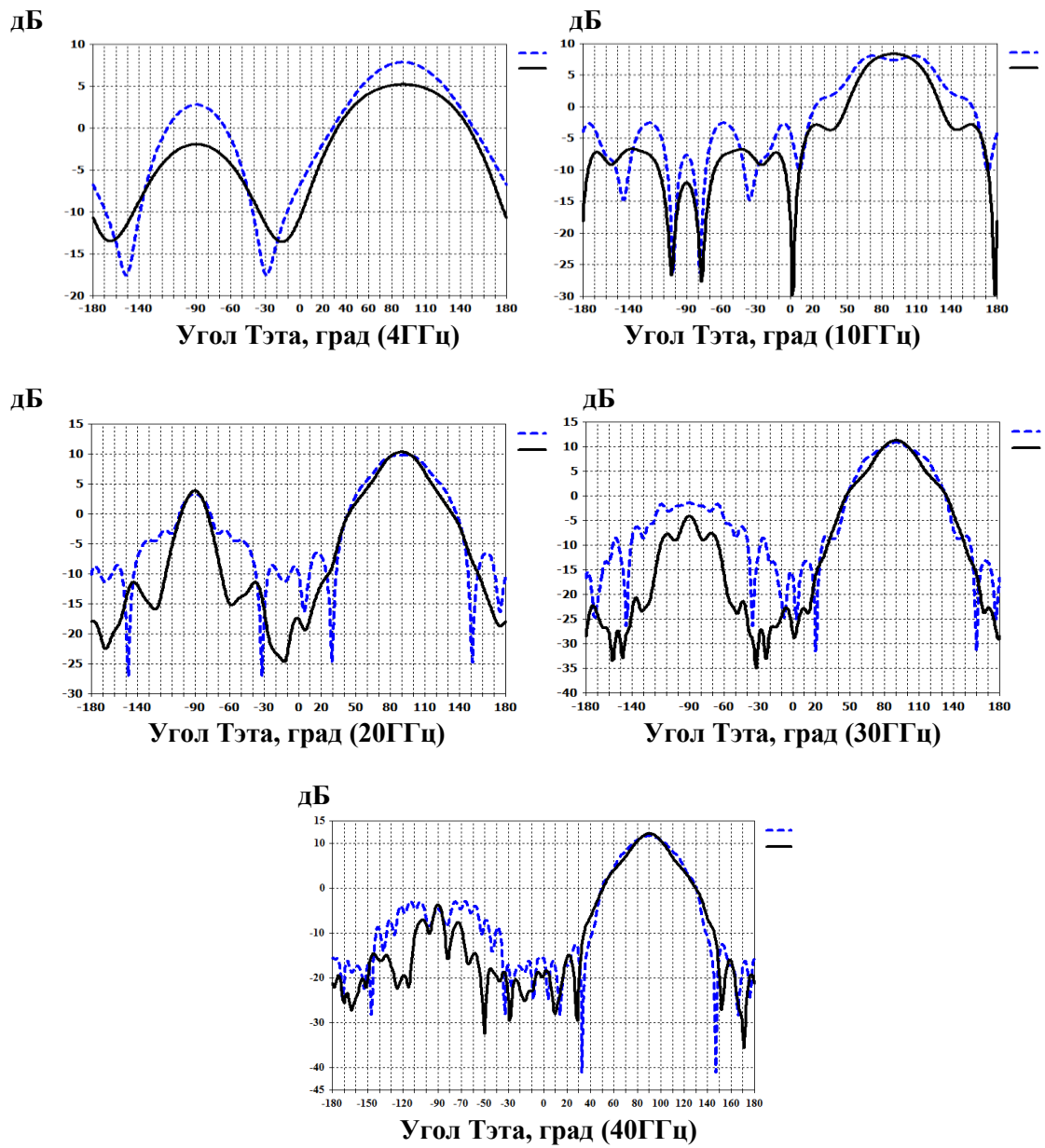


Рис.8. Сравнение ДН (дБ) в Theta-плоскости при угле $\Phi=0^\circ$ рупоров на частотах 4, 10, 20, 30 и 40 ГГц

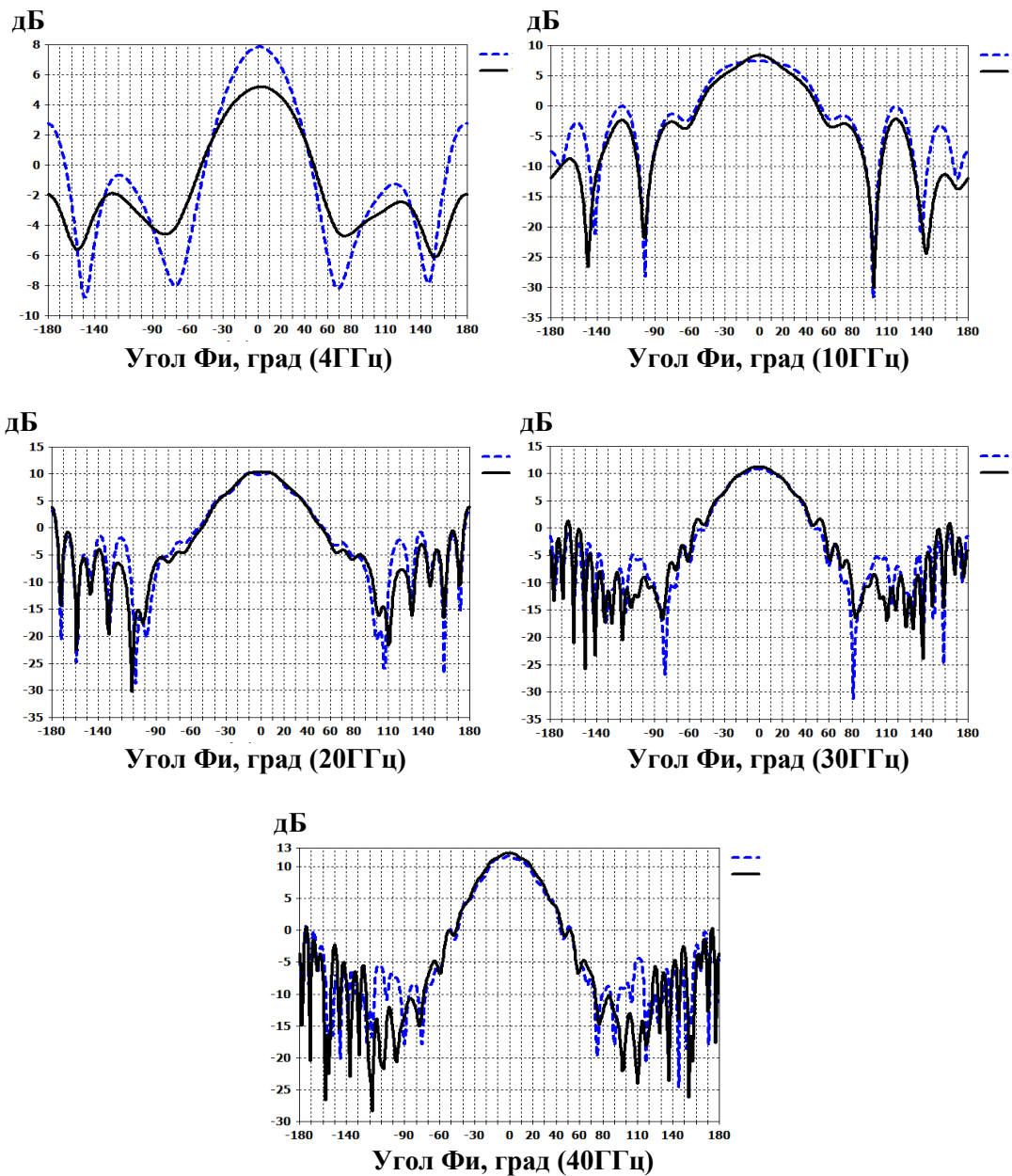


Рис.9. Сравнение ДН (дБ) в Phi-плоскости при угле Theta=90° рупоров на частотах 4, 10, 20, 30 и 40 ГГц

На совмещённых графиках ДН в Theta-плоскости при угле Phi=0° (рис.8) рупоров на частотах 4, 10, 20, 30 и 40 ГГц наблюдается сравнительно сильное подавление боковых и задних лепестков у рупора с прорезьями, достигающее до -5...-10дБ, при сохранении постоянства амплитуды и формы в главном лепестке. На совмещённых графиках ДН в Phi-плоскости при угле Phi=90° (рис.9), на частотах 4, 10, 20, 30 и 40 ГГц, у рупора с прорезьями подавление боковых лепестков и лепестков задней полусферы происходит слабее, чем в ДН для Theta-плоскости и лишь местами доходит до -3...-10дБ. При этом также сохраняется постоянство амплитуды и формы в главном лепестке ДН. Таким образом, благодаря прорезьям в токоведущих шинах, значительное подавление лепестков боковых и лепестков задней полусферы при сохранении постоянства в главном лепестке ДН СШП ТЕМ рупора – это главный положительный итог по формированию ДН, необходимой для СШП антенн такого типа.

Выводы

Применение перфорации токоведущих шин СШП ТЕМ рупора в виде прорезей уменьшает вредное боковое излучение и излучение в заднюю полусферу, при сохранении амплитуды и формы главного лепестка его ДН для большей части его рабочего диапазона частот. Такой положительный эффект открывает перспективу облегченного включения таких СШП рупоров в состав антенных решёток различной степени сложности и назначения, а также использования таких рупоров там, где, несомненно, требуются его широкополосные параметры. Дальнейшего улучшения направленности рупора можно добиться оптимальным выбором ширины, скважности и числа прорезей, выбором ширины и формы боковых полос и центральной части токоведущих шин рупора, а также выбором варианта завершения концов токоведущих шин. Кроме того, в рамках дальнейшего развития данного проекта необходимо провести исследование вариантов экранирования рупора.

Автор статьи выражает глубокую признательность Галеницкому А.В., Тютюкину А.Е. и Терентьеву А.М. за консультативную помощь в подготовке материалов статьи.

Литература

1. Ефимова Н.А. Минимизация искажений диаграммы направленности рупорных антенн в сверхширокой полосе частот // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – №1. – С. 39-44.
2. Калошин В. А., Нгуен К. З., Нгуен Х. Ш. Исследования характеристик ТЕМ рупоров // “Журнал РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ” №10, 2015г.
3. Ставцев Б.С., Терентьев А.М. Влияние формы изгиба токоведущих шин с эллиптическим профилем на направленность СШП ТЕМ рупора // III Всероссийские Армандовские чтения: Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике / Материалы IV Всероссийской научной конференции (Муром, 25-27 июня 2013 г.) – Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2013г. С. 230-234
4. Ставцев Б.С., Шалдаев С.Е. – Некоторые физико-технологические аспекты построения СШП ТЕМ рупоров РЛС //Труды XXVII Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”, СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. – Вып.9, т.2, секция 2, с.57- 69.
5. W.H. Darden and W.D. Burnside. An Ultra-Wideband Antenna for Pulsed Applications., Electro Science Laboratory, Columbus, ON and M.C. Gilreath, NASA, Langley Research Center. Hampton, VA, Microwave Journal, September 1993, P.136-143.