

Применение замедляющей EBG структуры в линейной волноводно-щелевой антенной решетке на основе интегрированного волновода (SIW) для 5G приложений

Е. А. Серафимова, С. С. Чуркин, С. А. Шабалин,
А. В. Можаровский, А. А. Дудникова, Е. Л. Варенцов

ООО «Радио Гигабит»

e.serafimova@yadro.com

Аннотация. Работа посвящена разработке способа снижения уровня бокового излучения линейной волноводно-щелевой антенной решетки, выполненной на основе интегрированного в печатную плату волновода (Substrate Integrated Waveguide, SIW). Антенна имеет наклонную поляризацию излучения (45°) и секторную ДН с шириной луча в азимутальной плоскости около 90° . Данная антенна предназначена для систем фиксированного доступа и 5G базовых станций в FR2 диапазоне. С целью подавления поверхностных волн, которые искажают форму главного лепестка ДН, предложена модификация антенны в виде замедляющей (заградительной) структуры (Electromagnetic Band Gap, EBG). Рассматривается соответствие ДН антенны маскам ETSI. Прототипы разработанной антенны и ее модификации EBG-структурой были изготовлены и протестированы экспериментально.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенна; интегрированный волновод; замедляющая структура

I. ВВЕДЕНИЕ

Волноводно-щелевые антенные решетки (ВЩР) широко применяются в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн из-за множества достоинств, среди которых высокие направленные свойства, компактные размеры, плоская форма, удобство подведения питания и высокая эффективность [1]. Вместе с этим наблюдается стремление к уменьшению размеров СВЧ-устройств, их миниатюризации и повышению степени интеграции. Одним из вариантов решения этой задачи является переход к устройствам на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide – SIW). SIW-технология позволяет интегрировать все компоненты на одной подложке, включая антенны, пассивные компоненты и активные элементы, что позволяет добиться высокой степени интеграции и миниатюризации. Так, например, становится возможным выполнять антенные решетки и преамплицы Ка-диапазона в одном модуле, на одной общей печатной плате [2].

Достаточно большое количество статей посвящено вопросам разработки антенн линейной поляризации на базе SIW, в которых рассматриваются как резонансные структуры [3–4], так и антенны бегущей волны [5–6].

В данной статье рассмотрена одномерная ВЩР с линейной поляризацией на основе интегрированного в подложку волновода в Ка-диапазоне с замедляющей структурой (EBG), которая позволяет добиться более сглаженной ДН и удовлетворяющей маске ETSI [10].

Разработанная ВЩР обеспечивает широкий сектор обзора ($\pm 45^\circ$) с КУ 13 дБ, низким уровнем кросс поляризационного излучения -16...-18 дБ на краю сектора и уровнем боковых лепестков -13.1 дБ.

Построение модели исследуемой структуры, электромагнитное моделирование и анализ ее направленных свойств проведены в САПР CST Microwave Studio.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

Антенная решетка представляет собой антенну бегущей волны, структурными элементами которой является набор последовательно соединенных щелевых секций, обеспечивающих заданные амплитудным распределением значения излучаемой мощности и низкий уровень отражений по входу. Секция SIW-волновода длиной λ_g содержит излучающую щель, расположенную под углом 45° к оси SIW-волновода. Также была разработана модифицированная ВЩР с замедляющей структурой. Представлены результаты разработки обеих ВЩР, выполненных на основе SIW-волновода и приведено соответствие ДН двух антенн маске ETSI. В качестве материала подложки использован RO3003 (Rogers) толщиной $h=0,254$ мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon=3,0$ и тангенсом угла потерь $\tan\delta=0,001$.

A. Структура антенной решетки

Линейная ВЩР состоит из девяти последовательных секций. Последовательное возбуждение излучающих секций в общем канале волновода, с одной стороны упрощает систему подведения антенны, существенно снижает вносимые потери (например, по сравнению с параллельной системой подведения), а с другой стороны, приводит к качанию луча в меридиональной плоскости при отстройке частоты к краям рабочей полосы антенны [8].

Равномерное амплитудное распределение (АР) было выбрано для построения одномерной щелевой решетки, представленной на рис. 1а. Равномерное АР является более устойчивым к межэлементным фазовым ошибкам на краях рабочего диапазона. Так, КУ антенной решетки практически не деградирует на краях частотной полосы антенны при формировании равномерного АР. При этом качание луча в меридиональной плоскости составляет $\pm 3^\circ \dots \pm 3,5^\circ$ или половину ширины луча по уровню половинной мощности при смещении частоты к краям диапазона, что видно по рис. 3. Благодаря широкой

полосе согласования щелевой секции уровень отражения решетки из девяти элементов, представленный на рис. 2, составляет около -20 дБ в рабочей полосе частот L1 (включая переход с МП-линии на SIW-волновод). Низкий уровень отражения от антенны может быть важен для эффективной работы микросхемы преемопрередатчика.

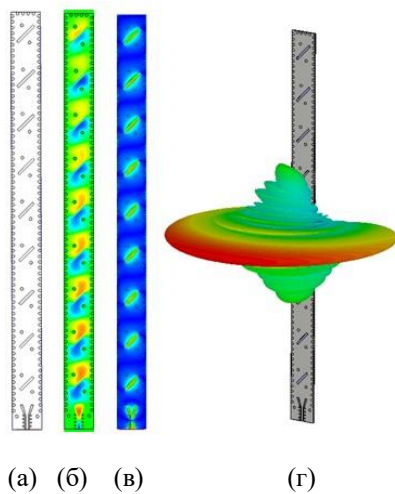


Рис. 1. Эскиз одномерной ВЦР (а), распределение напряженности электрического поля: внутри интегрированного волновода (б) и на верхнем слое (в), а также трехмерное представление ДН антенны с равномерным амплитудным распределением (г)

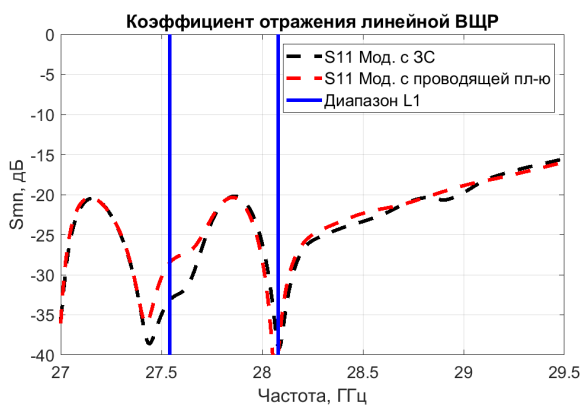


Рис. 2. Коэффициент отражения по входу одномерной ВЦР с заградительной структурой и с проводящей плоскостью

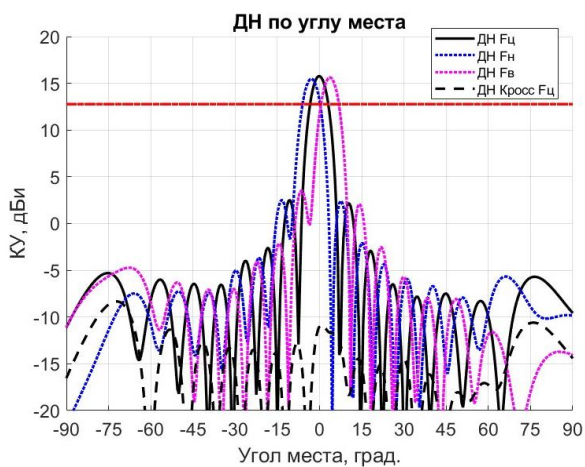


Рис. 3. ДН по углу места для трех частот: Fн, Fц, Fв

В. Линейная ВЦР с заградительной структурой

В стандарте ETSI EN 302 326-3, описывающем маски ДН направленных линейно-поляризованных антенн

диапазона 24,25–30 ГГц для систем фиксированного доступа (представлены на рис. 4), содержится указание (§4.4.1.2 в [10]) о применимости классов ДН стандартов ETSI EN 302 217-4-1 и ETSI EN 302 217-4-2, из которых следует, что к системам применим любой из 4-х классов ДН.

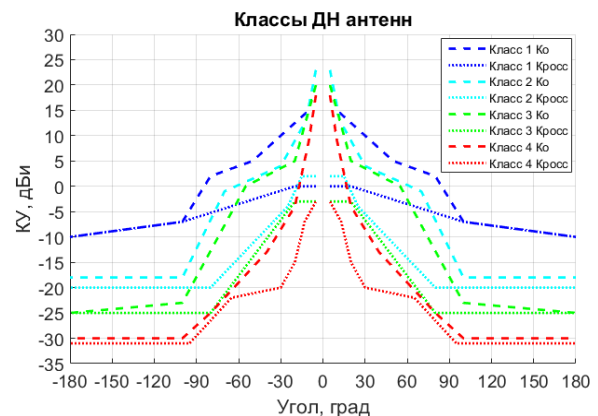


Рис. 4. Маски ДН классов 1–4 для направленных линейно-поляризованных антенн диапазона 24–30 ГГц систем «точка-точка» согласно стандартам ETSI EN 302 217-4-1 и ETSI EN 302 217-4-2

Маски стандарта ETSI EN 302 326-3 несколько строже описываемых в ETSI EN 302 217-4-1 и ETSI EN 302 217-4-2 (рис. 5). В стандарте это объясняется необходимостью снижения интерференции между АС в системах «точка-многоточка».

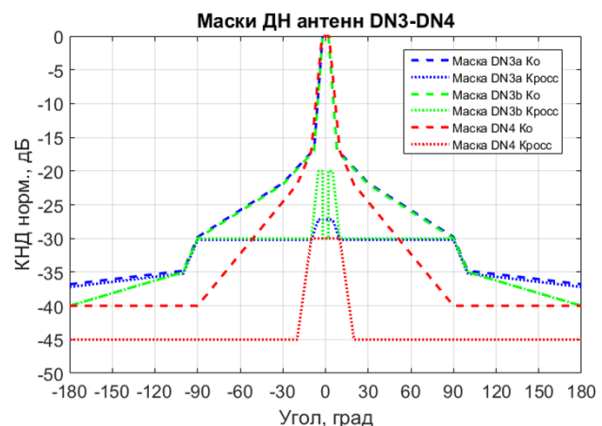


Рис. 5. Нормированные маски ДН DN3a,b и DN4 для линейно-поляризованных направленных антенн диапазона 24,25–30 ГГц систем «точка-многоточка» согласно стандарту ETSI EN 302 326-3

Одним из способов улучшить ДН, снизить уровень боковых лепестков и добиться соответствия маске является применение заградительной структуры. Структура EBG (Electromagnetic Band Gap – EBG структуры в зарубежной литературе) – это периодическая структура с особыми электромагнитными свойствами, которая может быть использована в качестве высокоимпедансной поверхности или идеального магнитопровода. Когда на конструкцию EBG падает плоская волна, коэффициент отражения равен $+1$ в заданном диапазоне рабочих частот. Это означает, что отраженная и падающая волны совпадают по фазе. Отражение с нулевой фазой обеспечивает конструктивное наложение падающих и отраженных волн для улучшения характеристик излучения. Диапазон частот, при котором фаза отражения находится в пределах от -90° до $+90^\circ$, определяется как синфазная полоса структуры EBG [11].

Данная замедляющая структура легче, технологичнее, меньше по размеру и имеет более низкий профиль по сравнению с другими ЗС. С точки зрения производства ПП, размещение заградительных структур на общей с антенной системой плате приводит только к увеличению габаритных размеров платы антенны, и не усложняет ее конструкцию, поскольку дополнительных переходных отверстий/прорезей/сверлений или фрезеровки не требуется. Также целесообразно добавление подобных заградительных структур в системы антенных решеток для увеличения изоляции между отдельными антеннами, выполненными на общей плате (например, в доступном свободном месте на верхнем слое).

Квадратная элементарная ячейка EBG показана на рис. 6. Она состоит из верхней квадратной металлической пластины, диэлектрической подложки и заземляющей плоскости. На рис. 7 показана фазовая характеристика отражения ячейки EBG. Ширина пластины W равна 2,3 мм, а зазор G между соседними пластинами равен 0,4 мм. В ходе оптимизации линейной ВЦР с ЗС окончательная ширина металлической пластины W взята 2,9 мм. В качестве подложки используется материал RO3003 (Rogers) толщиной $h=0.254$ мм ($\epsilon=3.0$, $\tan \delta=0.001$).

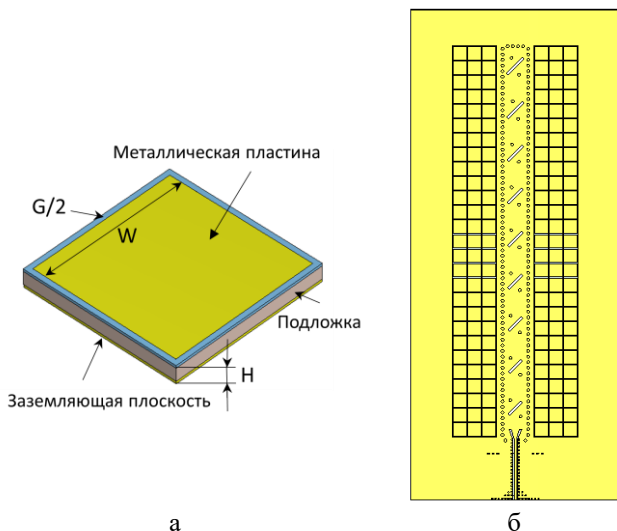


Рис. 6. Структура ячейки EBG (а) и вид одномерной антенной решетки с заградительной структурой на плате (б)

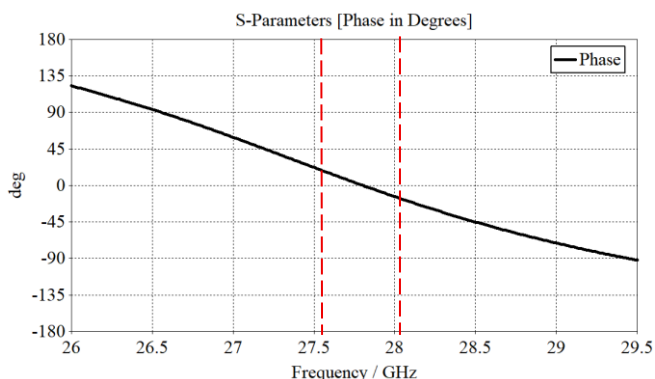


Рис. 7. Фазовая характеристика отражения ячейки EBG

Размещение антенны на плате либо металлическом корпусе приводит к распространению поверхностных волн, бегущих поперек SIW-волновода антенны, вдоль смежных проводящих поверхностей. Эти волны

искажают форму главного лепестка ДН антенны в азимутальной плоскости, приводят к осцилляциям и некоторой деградации КУ секторной антенны, как показано на рис. 8 розовой кривой. Эффект влияния поверхностных волн можно объяснить эквивалентным увеличением апертуры антенны в азимутальной плоскости с «осциллирующим» фазовым и амплитудным распределением. Для устранения эффекта деградации ДН секторной антенны из-за поверхностных волн необходимо либо подавить, либо как можно быстрее переизлучить эти волны.

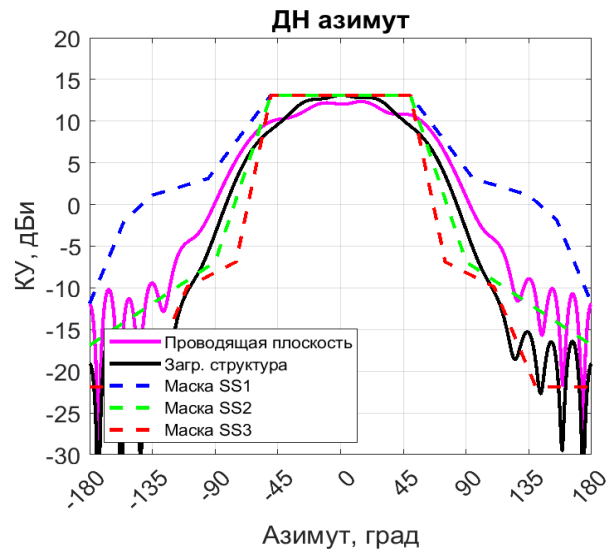


Рис. 8. Эффект заградительной структуры на ДН в азимутальной плоскости в сравнении с ДН антенны без заградительной структуры (проводящая плоскость)

Такая структура в интересующем диапазоне частот (в данном случае L1) эффективно взаимодействует с поверхностными волнами и сглаживает главный лепесток ДН секторной антенны в азимутальной плоскости, или проявляет свойство «заградительной» структуры.

Азимутальная ДН одномерной антенной решетки с тремя рядами заградительной структуры по бокам представлена на рис. 8 черной кривой. Видно, что помимо сглаживания главного лепестка ДН достигается некоторое снижение уровня бокового излучения, и, в целом, ДН антенны в большей степени соответствует маскам SS1-SS3 стандарта ETSI EN 302 326-3 для секторных антенн с шириной луча около 90° нежели антенна без заградительной структуры.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АНТЕННЫ

Для верификации полученных характеристик разработанной ВЦР проведено экспериментальное исследование тестовых образцов, показанных на рис. 9.

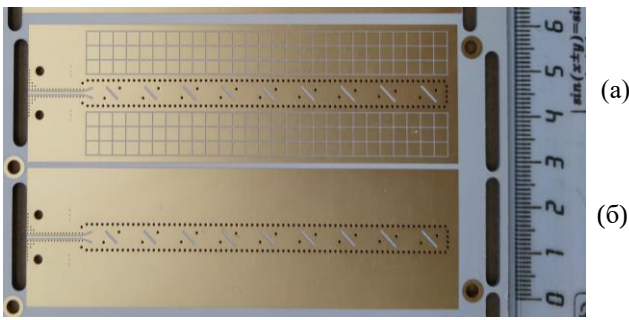


Рис. 9. Фото двух ВЦР Ка-диапазона на основе SIW с заградительной структурой (а) и проводящей плоскостью (б)

Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 10. Приемная эталонная антенна (РА справа) подключалась через коаксиально-волновой переход (КВП) посредством коаксиального кабеля к приемнику, которым в рассматриваемом случае являлся анализатор спектра Rohde & Schwarz FSV. Напротив данной антенны, на поворотном устройстве, в дальней зоне испытуемой антенны, то есть на расстоянии более $2D^2/\lambda_{\min}$, где D -характерная апертура антенны, а $\lambda_{\min}$ – минимальная длина волны в частотном диапазоне проводимых измерений, размещалась ВЦА. Фото экспериментальной установки представлено на рис. 13. На втором этапе было проведено сканирование ДН одномерной секторной SIW-антенны. Сектор азимутального сканирования составляет 270° , а сектор сканирования по углу места составляет 60° . Измерения ДН проводятся на трех характерных частотах диапазона $L1$: $F_{\text{ниж}}=27.54$ ГГц, $F_{\text{центр}}=27.81$ ГГц, $F_{\text{верх}}=28.08$ ГГц. Сканирование зависимости КУ от частоты производится в диапазоне $27...29.99$ ГГц, где верхний предел соответствует «потолку» приемника FSV.

Опорной плоскостью пересчета КУ испытуемой секторной антенны ($G_{\text{ИСА}}$) является окончание перехода с SIW-волновода на МП-линию, которая помечена на тестовых платах травлением пунктирной линии. На рис. 10 опорная плоскость (ОП) помечена красной штриховой линией. От коаксиального кабеля до ОП антенна подключена через КМП и 10 мм участок МП-линии. Эта связь является «Fixture A». Потери на этой подводящей структуре ($L_{\text{КМП}}$) читаем из файла измерений. Таким образом искомая зависимость КУ испытуемой секторной антенны вычисляется по (1):

$$G_{\text{ИСА}} = G_{\text{РА}} + (PL_{\text{ИА}} + L_{\text{КМП}}) - (PL_{\text{РА}} + L_{\text{КВП}}) \quad (1)$$

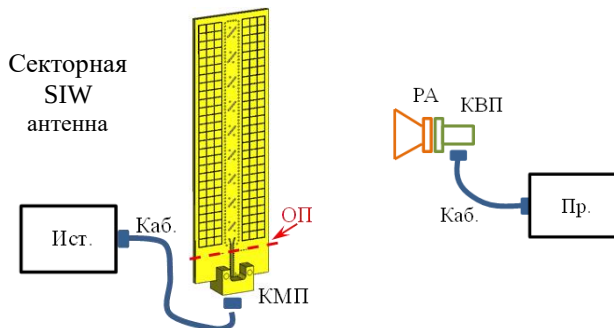


Рис. 10. Схема методики измерения и учета потерь при измерениях SIW-антенны

Фотографии измерительного стенда и процесса измерения разработанной SIW-антенны изображены на рис. 11.

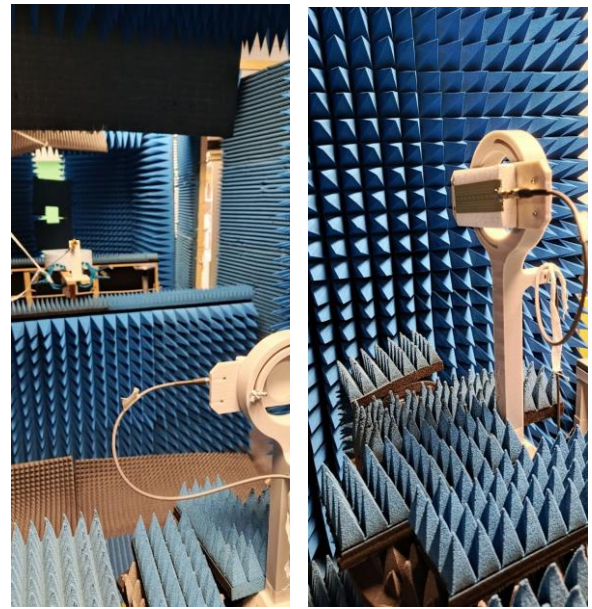


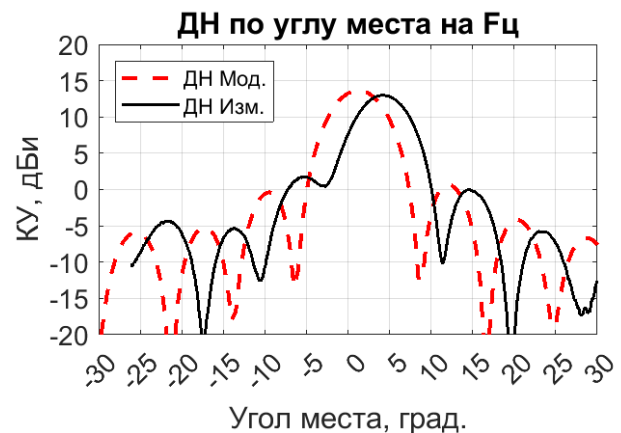
Рис. 11. Фотографии антенного измерительного стенда

Результаты измерений представлены на рис. 12. Коэффициент отражения определялся в полосе $L1 = (27.54-28.08)$ ГГц. Расхождение измеренных и расчетных результатов обуславливается техническими ограничениями и точностью изготовления конкретных образцов антенн.

КУ на центральной рабочей частоте составляет 13 дБи, УБЛ -13.1 дБ, ширина луча в меридиональной плоскости 6.6° . ДН кроссовой компоненты в азимутальной плоскости выравнивается и ее относительный уровень становится равным -16...-18 дБ для всех АС в секторе 90° . Измеренная и расчетная ДН отклоняются по углу места на $3-4^\circ$. Полученные данные эксперимента показаны в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ВЦР С ПЕЧАТНОЙ ЗАГРАДИТЕЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

КУ на $F_{\text{ц}}$	Уровень кроссовой компоненты	УБЛ $F_{\text{ц}}$	Ширина луча ДН по углу места на $F_{\text{ц}}$
13 дБи	-18 дБ	-13.1 дБ	6.6°



(а)

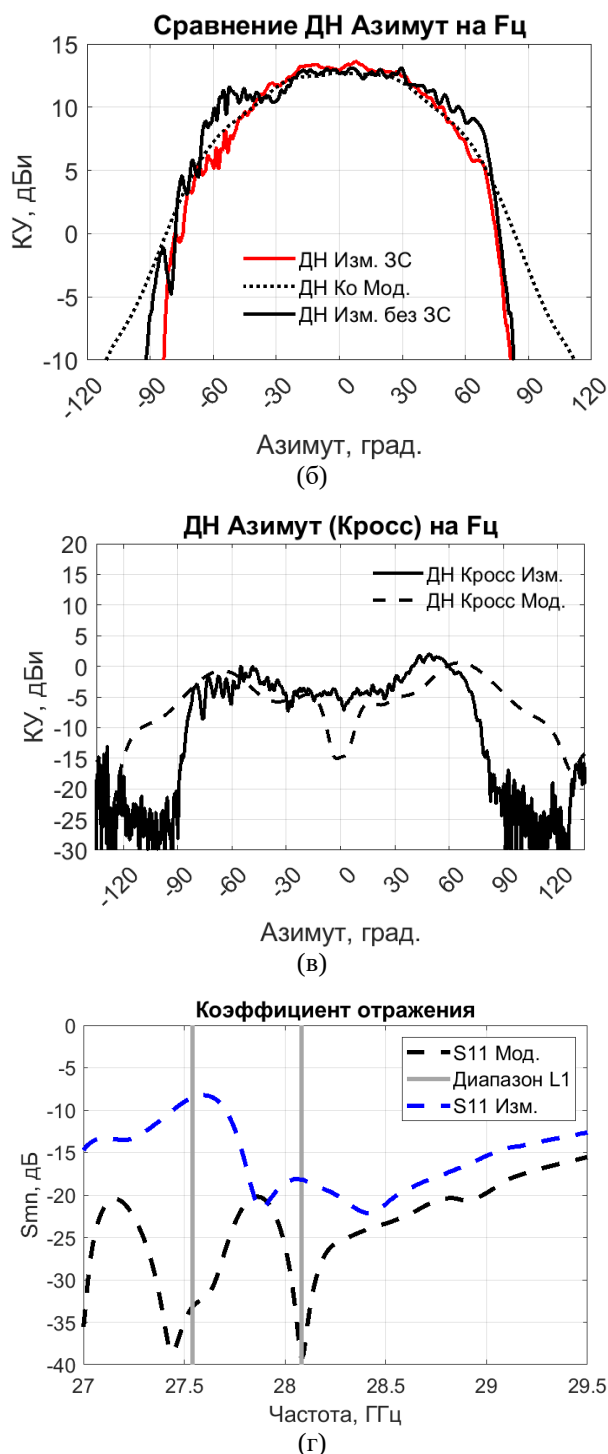


Рис. 12. Результаты измерений и моделирования ДН секторной ВЩР с загораживающей структурой на основе интегрированного волновода в азимутальной и угломестной плоскостях (а-в) и коэффициент отражения по входу антенны для антенны с ЗС (г)

По сравнению экспериментальных и расчетных ДН одномерной секторной антенны с печатной замедляющей структурой (рис. 12б) и интегрированной на одной плате со щелевой антенной, видно, что наличие такой структуры обеспечивает сглаживание формы главного лепестка ДН с одновременным снижением уровня излучения вне сектора.

Прилагая маски ETSI для секторных антенн к результатам сканирования ДН одномерных антенн видно, что ДН секторной антенны с печатной замедляющей структурой уже удовлетворяет требованиям маски второго класса (SS2) (рис. 13а).

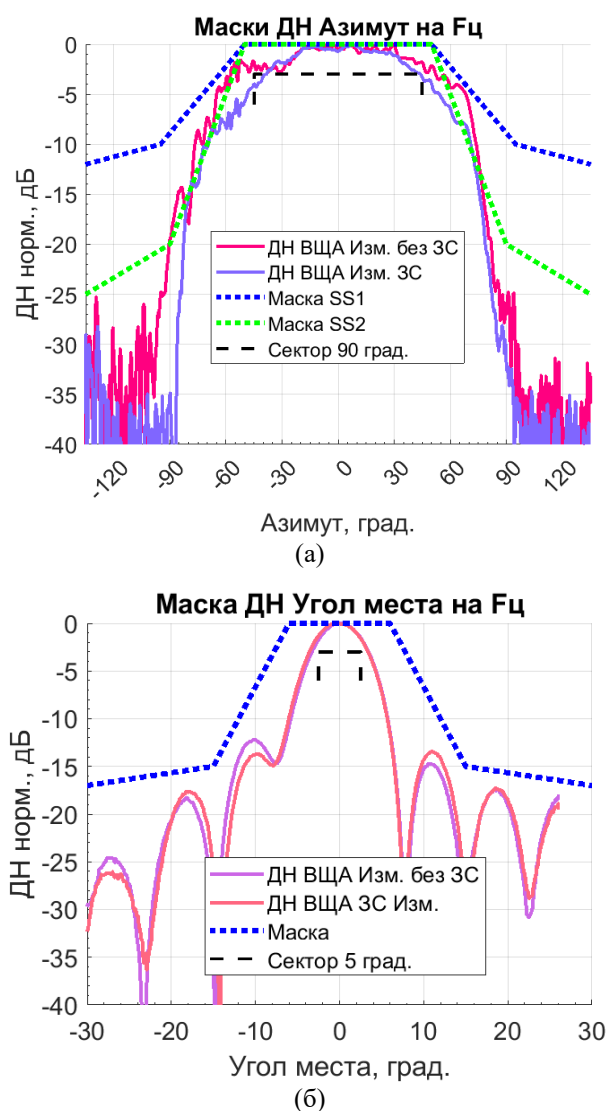


Рис. 13. Маски ETSI для секторных антенн в азимутальной (а) (первого и второго классов) и угломестной плоскостях (б)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен способ подавления бокового излучения и выравнивания главного лепестка ДН ВЩР на основе SIW-технологии, который позволяет достигать соответствия регуляторным требованиям – маскам ETSI на ДН и повышать помехозащищенность системы связи. В данной антенне была применена модификация в виде печатной загораживающей структуры для подавления поверхностных волн и удовлетворения более строгим маскам ETSI. Главным эффектом наличия печатной замедляющей структуры является сглаживание или «скругление» главного лепестка ДН по азимуту и снижение УБЛ. Проведено электродинамическое моделирование и экспериментальное исследование разработанной антенны. Приведены соответствующие результаты. Разработанная антенна Ка-диапазона имеет секторную ДН шириной 90° в азимутальной плоскости с КУ 13 дБ и может быть использована в базовых станциях систем связи пятого поколения (5G).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Антенны и устройства СВЧ: Уч. пособие для вузов / Д.И. Воскресенский, Р.А. Грановская, Н.С. Давыдова и др., под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1981. 432 с.
- [2] Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: «Энергия» 1975. 528 с.

- [3] Z. Chen, W. Hong, Z. Kuai, H. Tang, and J. Chen, "45 linearly polarized resonant slot array antenna based on substrate integrated waveguide," in Proc. Asia-Pacific Microw. Conf., Dec. 2007, pp. 1551–1555.
- [4] D. Kim, W. Chung, C. Park, S. Lee, and S. Nam, "Design of a 45 - inclined SIW resonant series slot array antenna for Ka band," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 10, pp. 318–321, 2011.
- [5] M. Bozzi, M. Pasian, L. Perregrini, and K. Wu, "On the losses in substrate integrated waveguides," in Proc. 37th Eur. Microw. Conf., Munich, Germany, Oct. 8–12, 2007, pp. 384–387.
- [6] J. Hirokawa and M. Ando, "45 linearly polarized post-wall waveguide-fed parallel-plate slot arrays," Proc. Inst. Elect. Eng., Microw. Antennas Propag., vol. 147, no. 6, pp. 515–519, Dec. 2000.
- [7] S. Park, Y. Okajima, J. Hirokawa, and M. Ando, "A slotted post-wall waveguide array with interdigital structure for 45 linear and dual polarization," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 9, pp. 2865–2871, Sep. 2005.
- [8] D.M. Pozar, Microwave Engineering, 2nd ed. New York: Wiley, 1998, ch. 4.
- [9] B. Rama Rao, W. Kunysz, R. Fante and K. McDonald, GPS/GNSS Antennas, Artech House, 2012, 420 Pages.
- [10] ETSI EN 302 326-3 Электронный ресурс: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30232603/01.03.01_60/en_30232603v010301p.pdf
- [11] W.C. Yang, H. Wang, W.Q. Che, Y. Huang, and J. Wang, High-Gain and Low-Loss Millimeter-Wave LTCC Antenna Array Using Artificial Magnetic Conductor Structure, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 63, Issue: 1, January, 2015.