

Широкополосная двухполяризационная 1×3 подрешетка для активных антенн MIMO БС 5G

М. Р. Кириллова, С. С. Чуркин, И. А. Илларионов, Е. Л. Варенцов, А. А. Дудникова

ООО «Радио Гигабит»

margarita.kirillova@yadro.com, sergey.churkin@yadro.com, ivan.illarionov@yadro.com

Аннотация. В настоящей работе представлена широкополосная антенная подрешетка 1×3, которая может быть использована в приеме-передающем радиомодуле с интегрированной антенной (Active Antenna System, AAS) для современных систем М-ММО мобильной связи 5G NR (New Radio). В качестве антенного элемента используется двухполяризационный ($\pm 45^\circ$ линейная поляризация) дипольный излучатель на вертикальных скрещенных печатных платах. Разработана специальная система деления/суммирования 1:3, которая объединяет мощность с антенных элементов. Размер антенной подрешетки составляет $0,5\lambda \times 2,1\lambda \times 0,4\lambda$. Устройство согласовано по уровню -20 дБ, имеет коэффициент усиления около 11 дБ и кроссовую компоненту излучения менее -25 дБ в диапазоне рабочих частот 3.3-3.8 ГГц. Относительная полоса рабочих частот по уровню 10 дБ обратных потерь составляет 50%. Ширина главного лепестка диаграммы направленности составляет 32.5° в вертикальной и 98° в горизонтальной плоскостях. Уровень боковых лепестков не превышает 13 дБ. Для снижения взаимного влияния между антенными элементами подрешетки были применены дополнительные металлические стенки, выполненные в виде печатных плат. Их использование позволяет получить уровень межпортовой изоляции 25 дБ, а также уровни развязки между соседними подрешетками не хуже 20 дБ при объединении нескольких подрешеток в антенную решетку. Прототипы антенной подрешетки были изготовлены и измерены в лабораторных условиях. Результаты испытаний изготовленных прототипов подтвердили результаты моделирования.

Ключевые слова: М-ММО, п78, печатный диполь, скрещенный диполь, антенная подрешетка, активные фазированные антенные решетки, активная антенная система

I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития сотовой связи и развертывания систем пятого поколения (5G) увеличиваются требования к показателям мобильной сети, таким как пропускная способность и надежность канала связи, спектральная и энергетическая эффективность, задержка сигнала и т. д. В результате этого, широкое развитие получили активные антенные системы (Active Antenna Systems – AAS) и технология пространственного мультиплексирования Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Massive MIMO системы используют цифровые активные фазированные антенные решетки (АФАР) с узконаправленным лучом, что позволяет улучшить качество связи между абонентом и передатчиком за счет улучшения соотношения сигнал-шум. В географических районах с высоким уровнем помех, таких как города или местность с большим количеством беспроводных устройств, это особенно актуально. Кроме того, Massive MIMO технология отличается от традиционных систем связи возможностью цифрового адаптивного диаграммообразования или формирования множества

лучей/нулей (beamforming / nullforming). Для увеличения коэффициента усиления (КУ) антенной решетки при ограниченном количестве независимых каналов в AAS используются антенные подрешетки из двух или трех антенных элементов. Количество подрешеток в АФАР определяется сценарием применения: распределением абонентов в пространстве и углами сканирования.

АФАР такого типа может быть собрана из различных двухполяризационных (ортогональные линейные поляризации) антенных элементов (АЭ): патч-антенны или скрещенные диполи в разном технологическом исполнении. Так, в [1] представлена подрешетка 1×3 с использованием патч-антенн. Металлический патч, выполненный лазерной резкой, крепится на пластиковые винты, тем самым образуя «воздушную» подложку для расширения рабочей полосы АЭ. Элемент запитывается через две H-образные щели, расположенных перпендикулярно друг другу на печатной плате (ПП). Дифференциальная система возбуждения подрешетки выполнена в виде делителей мощности на ПП. Эта плата крепится в металлический корпус. Относительная полоса рабочих частот данной антенны по уровню 10 дБ обратных потерь является широкой для патч-антенны и составляет 19%. Измеренные характеристики антенной подрешетки демонстрируют хорошие уровни, однако конструкция АЭ является достаточно сложной и дорогостоящей.

В системах MIMO также распространены фильтр-антенны, которые работают одновременно и как антенна, и как фильтрующее устройство, обеспечивая усиление сигнала и подавление нежелательных частотных составляющих. Антенная подрешетка 1×2 в [2] состоит из таких фильтр-антенн. В качестве АЭ используется двухполяризационная ($\pm 45^\circ$ линейная поляризация) сложенная патч-антенна, полностью выполненная на ПП. Дифференциальная система подведения подрешетки позволяет использовать комбинированную технологию последовательно-корпоративного питания. Данная технология дает возможность управлять уровнем боковых лепестков (УБЛ), например, добиться УБЛ 18 дБ. Кроме того, в работе уделяется внимание увеличению частотной селективности вне рабочей полосы. Относительная полоса такой антенны составляет 4%, таким образом решение является узкополосным.

Еще несколько вариантов реализации антенных подрешеток для систем MIMO с использованием патч-антенн представлены в [3] и [4] (1×3 и 1×2 подрешетки соответственно). В [3] АЭ выполнен на однослойной ПП, что существенно упрощает конструкцию и стоимость производства. Также, в работе уделяется внимание расширению рабочей полосы частот за счет добавления квадратно-кольцевой структуры питания и миниатюризации АЭ путем травления T-образных пазов на излучателе. Относительная полоса рабочих частот такой антенны составляет 19% по уровню 10 дБ обратных потерь. В исследовании антенной подрешетки

[4] больше внимания уделяется снижению взаимного влияния между АЭ и подрешетками для получения более низких уровней развязки. Это важная задача в системах ММО, так как развязка между подрешетками определяет коэффициент корреляции информационных каналов в цифровой АФАР. В работе анализируется распределение плотности тока на металлических брусках между АЭ. Относительная полоса пропускания антенны по уровню обратных потерь 15 дБ равна 9%.

Существенно более широкая полоса пропускания 40-45% (и 65% при дифференциальном питании) характерна для различных вариантов скрещенных (турникетных) горизонтальных диполей. При этом уровни основных характеристик антенн не уступают патч-антеннам. Скрещенные диполи могут быть выполнены литьем, резкой по металлу или же полностью на ПП. Стоит отметить, что известны варианты реализации плеч диполя на вертикальных или горизонтальных ПП, расположенные в плоскости перпендикулярно или параллельно фронту излучаемой волны соответственно. В известных литературных источниках редко встречаются примеры применения скрещенных диполей для подрешеток активных систем ММО. При этом, скрещенные диполи разных видов также применяются в антенных решетках с секторными диаграммами направленности (ДН). Например, двухдиапазонная фильтрующая антенная решетка 1×4 с использованием скрещенных диполей на горизонтальных ПП представлена в [5]. В диапазоне Sub-6 (3.3–3.6 ГГц) данная антенная решетка имеет относительную полосу рабочих частот 17% по уровню 10 дБ.

Для преодоления всех вышеперечисленных ограничений в настоящей работе представлена двухполяризационная 1×3 антенная подрешетка на основе скрещенных диполей на вертикальных ПП для новых ААС систем с интегрированными многоэлементными АФАР. В данной работе описывается конструкция АЭ, приведен расчет комбинированной системы подведения антенны, а также конструкция трехэлементной подрешетки. Антенная подрешетка демонстрирует хорошие уровни характеристик в диапазоне 3.3–3.8 ГГц (n_{78}), а также и в более широкой полосе частот (50% относительная полоса). Представленная антенна может быть полностью изготовлена с применением технологии ПП на основе простых конструкций плат (не более 3 слоев), что позволяет существенно снизить стоимость производства.

II. 1×3 АНТЕННАЯ ПОДРЕШЕТКА

A. Конструкция антенного элемента

В предлагаемом варианте АЭ используется модернизированная конструкция двухполяризационного горизонтального диполя на вертикальных платах (рис. 1а), расположенных в плоскости перпендикулярно фронту излучаемой волны [6]. В [6] АЭ возбуждается микрополосковой (МПЛ) линией 50 Ом, для которой земляным слоем являются полигоны-бабочки в нижней части диполя. В разрабатываемой конструкции земляные полигоны-бабочки не используются, а возбуждение осуществляется несимметричной дифференциальной линией 70 Ом, в которой один из проводников линии – J-балун, а другой – «ножка» (плечо) диполя. J-балун

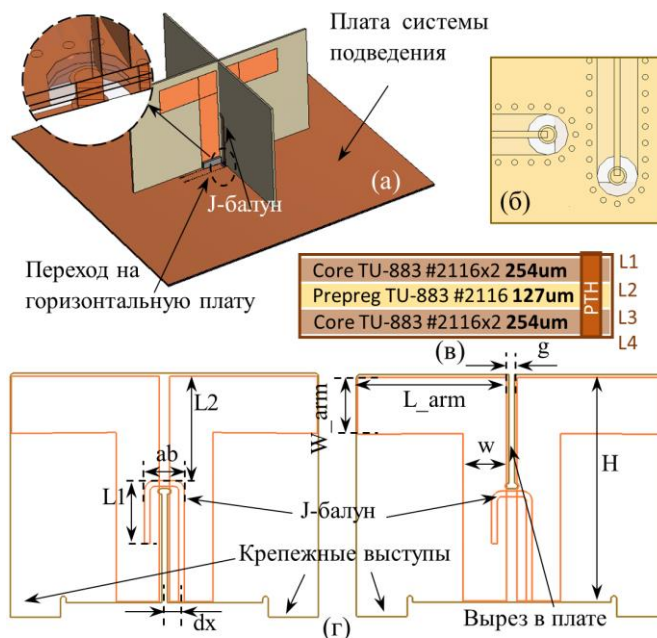


Рис. 1. Конструкция АЭ: 3Д модель (а), переход на плату питания (б), спецификация ПП (в), платы диполей с основными размерами (г)

(трансформатор) запитывает плечи диполя в противофазе, а часть линии после изгиба является четвертьволновым открытым концом. Импеданс дифференциальной линии подобран для возможности реализации системы подведения антенной подрешетки согласно расчетам, приведенным в пункте В. К конструкции АЭ был добавлен переход на горизонтальную плату при помощи металлизированного переходного отверстия [7] (рис. 1а, б). Положение линии относительно переходного отверстия, а также вырезы вокруг него подобраны для достижения наилучшего согласования перехода.

С технологической точки зрения исследуемый АЭ может быть выполнен на двух вертикальных однослойных платах с вырезами в зазоре между плечами диполя. Платы монтируются перпендикулярно друг в друга, а затем в отверстия платы питания при помощи крепежных выступов (рис. 1г). Верхний слой платы питания также должен являться металлическим отражателем для корректной работы АЭ.

Основные размеры АЭ показаны на рис. 1г и принимают следующие значения в мм: $W_{arm}=8$, $L_{arm}=19.7$, $g=1.48$, $w=6.58$, $H=32.8$, $ab=6.1$, $L_1=10$, $L_2=15.9$, $dx=2.6$, $h_{line}=0.6$. На рис. 1в приведена спецификация платы питания на базе материала TU-883 ($\epsilon=3.85$ и $tg\delta=0.0035$). В качестве переходных отверстий используются только сквозные металлизированные переходные отверстия PTH. Вертикальные платы могут быть выполнены на однослойных простых подложках TU-883 другого номинала толщины ($h=0.635$ мм).

На рис. 2 приведены результаты моделирования диполя на скрещенных вертикальных платах (на экране с размерами $4\lambda \times 4\lambda$). Уровни коэффициента отражения (КО) и изоляции между ортогональными портами обеспечивают широкополосную работу устройства в указанном диапазоне частот 3.3–3.8 ГГц (рис. 2а): обратные потери >21 дБ, межпортовая изоляция >39 дБ. Коэффициент усиления АЭ для обеих поляризаций принимает значения 6.4–7.3 дБи в рабочей полосе

частот, тогда как зарегистрированные относительные значения кроссовой составляющей (XPD)

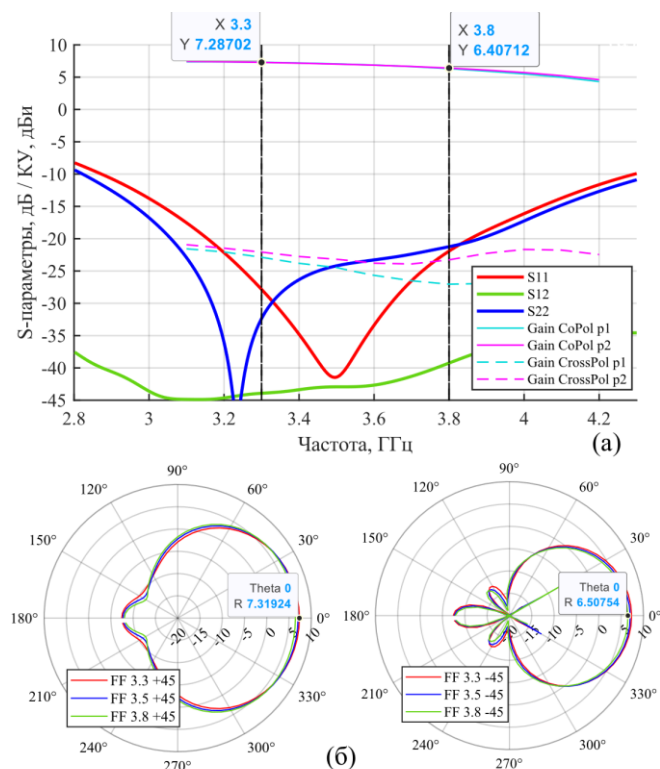


Рис. 2. Результаты моделирования АЭ: S-параметры и КУ (а), ДН на частотах 3.3, 3.5, 3.8 ГГц в двух плоскостях (б)

в дальней зоне > 29 дБ (рис. 2а). ДН антенного элемента симметричные, стабильные в рабочей полосе и не имеют наклона или осцилляций в диапазоне $n\lambda/8$ для обеих поляризаций (рис. 2б). Ширина луча по уровню половинной мощности (3дБ) составляет 87–94°, а КПД антенны с учётом потерь в проводниках и диэлектрике составляет не менее 95%. Таким образом, все полученные характеристики удовлетворяют требованиям к АЭ для современных систем ААС.

В. Конструкция системы подведения

Для одновременной работы АЭ в составе антенной подрешетки и формирования более узкой ДН цифровой АФАР в вертикальной плоскости мощность с трех АЭ объединяется на общий выход (отдельно для каждой поляризации). В описываемом решении общий вход – это МПЛ 50 Ом, которая переходит на коаксиальный разъем. Для подрешетки 1×3 может быть несколько вариантов конструкций системы подведения: с использованием Т-делителей или делителей Уилкинсона. Кроме того, АЭ могут запитываться последовательно или параллельно. Исследования нескольких конфигураций возбуждения не позволили выявить однозначно наилучший вариант. В предлагаемой антенной подрешетке два элемента возбуждаются параллельно, а третий элемент параллельно первым двум. Система возбуждения элементов была выбрана из соображений стабильности характеристик в широкой рабочей полосе частот, не прибегая к сложным развязанным направленным ответвителям.

Схема разрабатываемой системы подведения показана на рис. 3в. Она состоит из двух Т-образных делителей, к выходам которых подключаются элементы антенной подрешетки. Линии подведения к АЭ были

выбраны 70 Ом, как наиболее удобные для используемой подложки TU-883 толщиной 0.254 мм с точки зрения

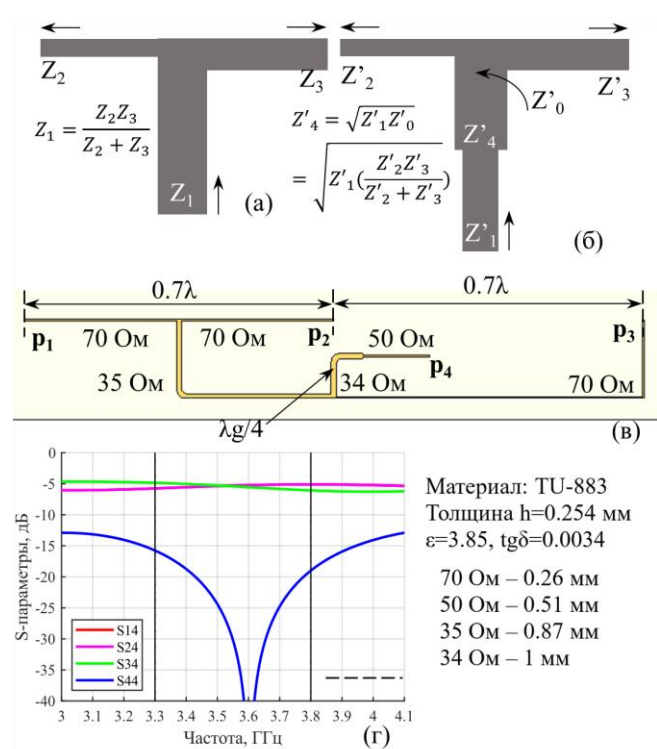


Рис. 3. Система подведения: схема Т-делителя без трансформатора (а), с трансформатором (б) топология системы подведения (в), S-параметры (г)

возможностей изготовления (не менее 100 мкм) и потерь в линии. Общий порт имеет импеданс 50 Ом. Импедансы промежуточных линий были рассчитаны по формулам на рис. 3а,б для классического Т-делителя и Т-делителя с четвертьволновым трансформатором [8]. Для классического Т-делителя, имея два одинаковых выхода 70 Ом, расчетный импеданс $Z_1=35$ Ом, а для делителя с четвертьволновым трансформатором $Z'_4=34$ Ом.

Длина четвертьволнового трансформатора равна 13 мм, ширины всех дорожек указаны на рис. 3. Результаты моделирования системы подведения приведены на рис. 3б. Резонанс системы Т-делителей настроен на центральную частоту, в результате полученный КО не превышает -15дБ. По уровню коэффициентов передачи можно оценить, что в каждый порт проходит 1/3 сигнала по мощности.

С. Конструкция антенной подрешетки

Конструкция 1×3 антенной подрешетки представлена на рис. 4 и включает в себя три АЭ, расположенных на расстоянии 0.7λ друг от друга, систему подведения, металлические стенки вокруг АЭ и переход с МПЛ на коаксиальный коннектор. Расстояние между АЭ выбрано, как типичное в антенных подрешетках ААС, для требуемого сканирования в вертикальной плоскости с ограничением на сектор сканирования ($\pm 10^\circ$), борьбы с лепестками квантования и снижения уровня УБЛ (0.7λ в вертикальной плоскости (X) и 0.5λ в горизонтальной (Y)). Длины линий подведения к каждому АЭ рассчитаны таким образом, чтобы создать набег фазы на центральной частоте, соответствующий небольшому преднаклону (*pretilt*) луча в вертикальной плоскости ($3^\circ \pm 0.5$ к краям диапазона).

Вокруг каждого АЭ располагаются металлические стенки, которые позволяют снизить эффект взаимного влияния между АЭ и улучшить уровни развязки.

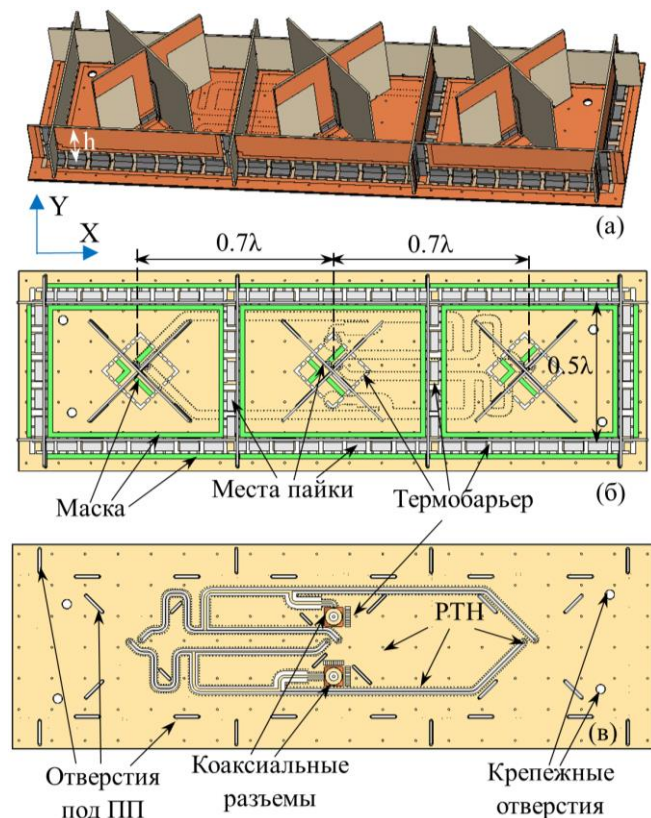


Рис. 4. Конструкция 1×3 антенной подрешетки: 3Д модель (а), вид сверху (б), вид снизу (в)

Расстояние между стенками – 0.7λ по оси X и 0.5λ по оси Y. Значение высоты металлических стенок $h=20$ мм выбрано оптимальным с точки зрения улучшения развязки между АЭ. В ходе разработки исследовались другие способы снижения взаимного влияния, а также модернизации текущего решения. Работа над повышением развязки между АЭ/подрешетками представляет предмет дальнейших исследований.

Для целей лабораторного тестирования, а также интеграции подрешетки в радиомодуль М-ММО использованы переходы с МПЛ на коаксиальные разъемы. Для улучшения уровня согласования перехода под разъемом на ПП были добавлены специальные вырезы на слоях L_1 и L_2 диаметром $d=3$ мм (спецификация рис. 1б). Диполи и боковые металлические стенки выполняются на однослойных платах, которые вставляются в специальные отверстия на плате системы питания (рис. 4б,в). Для удобства и технологичности пайки на ПП добавлены термобарьеры и маска. Металлизированные переходные отверстия экранируют все МПЛ ветвления сигнала, а также снижают эффект от распространения поверхностных волн.

III. ПРОТОТИПЫ АНТЕННЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для верификации характеристик предложенной конструкции были разработаны и изготовлены образцы антенных подрешеток, один из которых представлен на рис. 5а,б. В качестве коаксиальных выходов использовались разъемы Xinsheng. Измерения основных характеристик подрешетки проводились с помощью векторного анализатора цепей Planar C1420. Для измерения ДН в качестве измерительной антенны

использовалась рупорная антенна «СКАРД-Электроникс» П6-125 с рабочим диапазоном 2–18 ГГц (рис. 5в).

На рисунке 6 представлено сравнение указанных измеренных и рассчитанных в САПР характеристик подрешетки. Результаты испытаний подтверждают моделируемые характеристики антенны. Из результатов измерений видно, что уровень обратных потерь образца в рабочем диапазоне антенны 3.3–3.8 ГГц составляет более 15 дБ, тогда как изоляция между ортогональными поляризациями не превышает -25 дБ (рис. 6а). Предложенная антенна имеет измеренные коэффициент усиления около 11 дБи и уровень кроссовой компоненты в дальнем поле более 20 дБ в диапазоне рабочих частот $n78$ диапазона (рис. 6б). Ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности составляет $23.5^\circ \pm 3$ в вертикальной и $99^\circ \pm 5$ в горизонтальной плоскостях. УБЛ не превышает 12 дБ по результатам измерений (рис. 6в,г). Относительная полоса по уровню 10 дБ обратных потерь составляет 50%. Металлические стенки вокруг антенных элементов позволяют получить уровень развязки между соседними подрешетками не хуже 20 дБ, что следует из результатов моделирования полной решетки 64T64R. КПД антенны из результатов моделирования составляет 80%.

Стоит отметить, что погрешность измерений в дальней зоне используемой измерительной установки составляет ± 1 дБ для измерений по нормали и возрастает до 2.5 дБ для УБЛ. Погрешность вызвана неидеальной безховостью менее -20 дБ. Ухудшение измеренного КО относительно результатов моделирования может быть вызвано допусками производства ПП и отклонениями параметров использованного ламината. Из результатов анализа производственных допусков наиболее критичное влияние оказывают толщины подложек. Измерения подтверждают широкополосность разработанной конструкции двухполяризованной антенной подрешетки на вертикальных скрещенных платах, которая весьма перспективна по сравнению с известными аналогами (табл. 1).

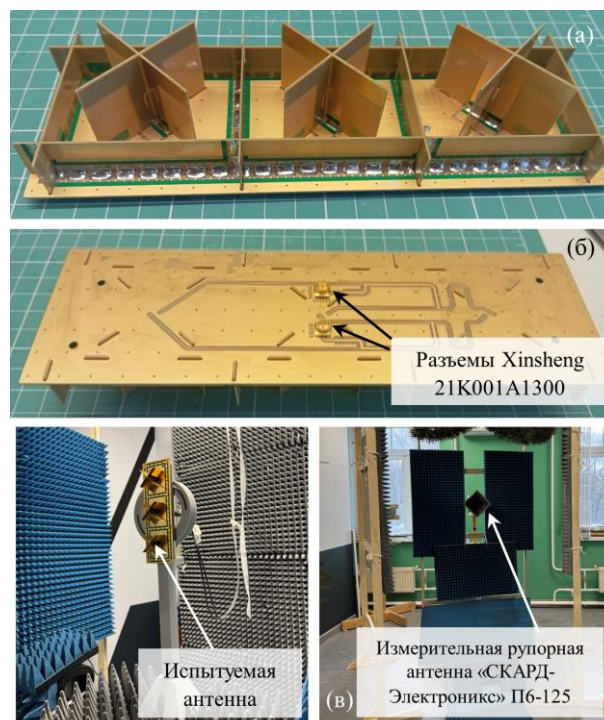


Рис. 5. Изготовленные образцы 1×3 антенной подрешетки: вид сверху (а), вид снизу (б), измерительная установка (в)

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛОГОВ

Параметры	Аналоги				
	[1]	[2]	[3]	[4]	Эта работа
Технология изготовления	ПП+резка металла	ПП	ПП	ПП+резка металл	ПП
Конфигурация	1×3	1×2	1×3	1×2	1×3
Полоса частот, ГГц	2.4-2.9	3.4-3.55	3.3-4	1.71-1.88	3.3-3.8
Отн. полоса по -10 дБ, %	19	4	19	9	47
Межпортовая изоляция, дБ	25	23	30	24	25
КУ, дБ	10-11	11.5	10-11	9-9.7	10.5-11
ХРД, дБ	22	20	-	-	25
Ширина ДН, °	84/26	-	93	80	98/32
УБЛ, дБ	-	18	-	-	12
Размеры, мм	0,5λ×2,1λ	0,7λ×1,5λ	0,3λ×0,26λ×0,1λ	-	0,5λ×2,1λ×0,4λ

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена разработанная конструкция двухполяризационной ($\pm 45^\circ$ линейные поляризации) 1×3 антенной подрешетки, которая может быть использована в современных системах AAS 5G NR. Разработанная подрешетка использует широкополосную нестандартную систему подведения $1:3$, которая позволяет сократить количество цифровых каналов в системе, сохраняя значение «пассивного» КУ АФАР, и обеспечить сектор сканирования $\pm 10^\circ$ в вертикальной и $\pm 60^\circ$ в горизонтальной плоскостях, требуемые сценариями использования AAS M-MIMO [9]. Предлагаемая антенная подрешетка имеет улучшенные характеристики по сравнению с известными аналогами и обладает широкой рабочей полосой в $n78$ диапазоне, а также может быть использована и в диапазоне $4.4\text{--}5.0$ ГГц ($n79$) (50% относительной полосы пропускания). Антенна отличается простотой конструкции и может быть изготовлена полностью технологией печатных плат. Результаты лабораторных измерений изготовленных прототипов демонстрируют хорошее соответствие с результатами моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] J. Liu, Y. Yue and C. Liu, "Design of a Miniaturized Dual-Polarized Slot-Coupled Patch Antenna Element and Its Sub-array," IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF/THz Applications (IMWS-AMP), pp. 1-3, 2020.
- [2] H. Memarzadeh and G. Xu, "A Massive MIMO Array Antenna Incorporating Filtering Sub-Arrays," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, pp. 1347-1348, 2019.
- [3] X. Gao et al., "A Dual-Polarized Compact Patch Antenna for Sub-6 GHz 5G Base Stations," 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp. 752-754, 2020.
- [4] X. Tang, B. Yu, Y. Li, and H. Chen, "A low-profile dual-polarized stacked patch antenna array with mutual coupling reduction for massive MIMO," Int J RF Microw Comput Aided Eng, 2021.
- [5] Y. Liu, S. Wang, N. Li, J.B. Wang and J. Zhao, "A Compact Dual-Band Dual-Polarized Antenna With Filtering Structures for Sub-6 GHz Base Station Applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 10, pp. 1764-1768, 2018.
- [6] T.T. Pham, M.T. Le, P.T. Truong, L.P. Xuan and H.A. Ngo, "Novel Dual-Polarized 5G Base Station Antenna," 26th International Conference on Telecommunications (ICT), pp. 474-478, 2019.
- [7] K. Anim, H.D. Lee and Y.B. Jung, "A Simple Printed Cross-Dipole Antenna with Modified Feeding Structure and Dual-Layer Printed Reflector for Direction Finding Systems," MDPI Sensors, 2021.
- [8] Fang, D.G. *Antenna theory and microstrip antennas* [Taylor and Francis Group]. Boca Raton, FL, 2010, p. 211.
- [9] Asplund H. et al., "Advanced antenna systems for 5G network deployments: bridging the gap between theory and practice," Academic Press, pp. 740, 2020.

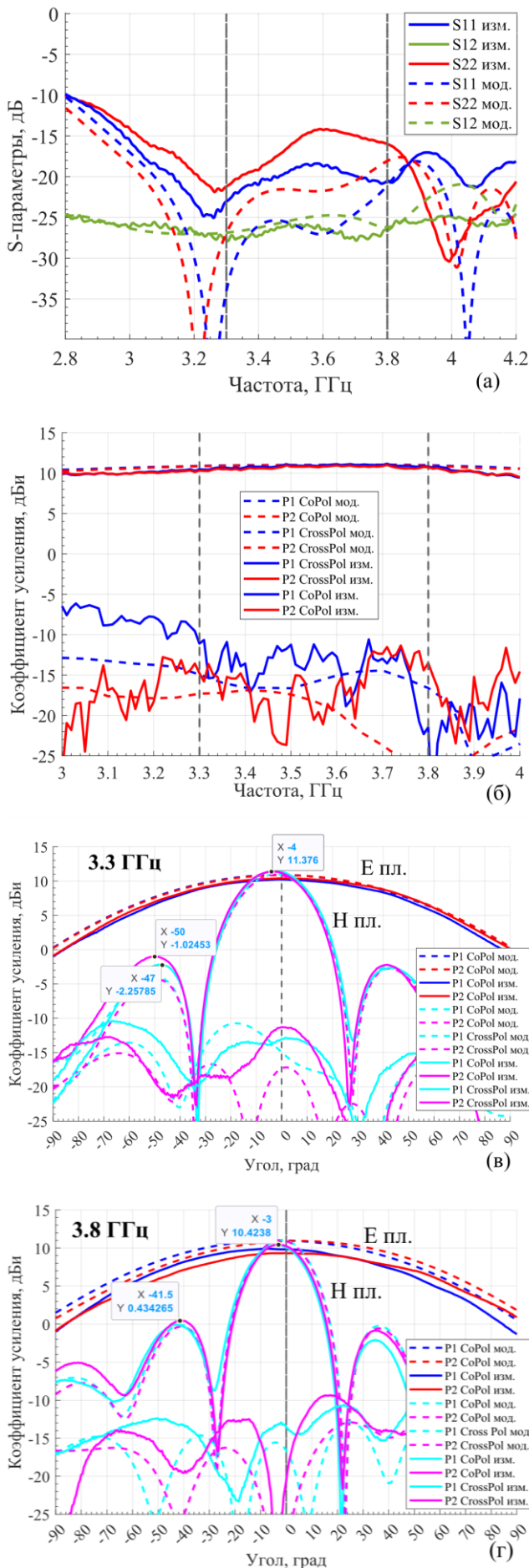


Рис. 6. Результаты измерений образцов: S-параметры (а), измерения КУ по нормали (б), срезы ДН (в), (г)