

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.6>

УДК: 621.396.67

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ПЛАНАРНЫХ ДИПОЛЕЙ ДЛЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

К.В. Кобрин ¹, Z. Li ², В.А. Следков ², М.Б. Мануилов ¹

¹ Южный федеральный университет
344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

² Guangzhou Compass Technology Co., Ltd.
Guangzhou, No. 5, First street, Industrial No.1 Road

Статья поступила в редакцию 27 декабря 2023 г.

Аннотация. Предложена новая широкополосная модификация антенн базовых станций мобильной связи на основе скрещенных печатных диполей для работы в диапазоне частот 1.4-2.7 ГГц. Диапазонные свойства предложенной модификации скрещенных диполей удалось существенно улучшить в результате оптимизации формы плеч диполей, которые аппроксимировались с помощью кривых Безье третьего порядка. При оптимизации профиля плеч происходит более тонкая настройка взаимной связи скрещенных диполей, в результате чего удается расширить рабочую полосу частот, в которой антенна имеет высокое согласование и развязку. В качестве параметров оптимизации использовались параметры кривых Безье. Исследованы характеристики одиночного излучателя и линейной 8-элементной антенной решетки (АР). Достигнутые характеристики АР отвечают основным требованиям к антеннам базовых станций. Коэффициент отражения в рабочем диапазоне близком к октаве не превышает -14...-15 дБ, изоляция не хуже -25 дБ, кроссполяризация составляющая не хуже -17.5 дБ. Антенна имеет стабильную диаграмму направленности (ДН) во всем рабочем

диапазоне, ширина которой по уровню -10 дБ в горизонтальной плоскости составляет $120^{\circ}+18^{\circ}/-7^{\circ}$.

Ключевые слова: антенная решетка, антенны базовых станций, двухполяризационные антенны, скрещенные диполи, печатные диполи, кривые Безье.

Финансирование: Guangzhou Compass Technology Co., Ltd.

Автор для переписки: Мануилов Михаил Борисович, m_manuilov@sfedu.ru

Введение

Стремительное развитие систем мобильной связи последних поколений сопровождается возрастанием требований к диапазонным свойствам антенных систем базовых станций. Как правило, необходимо обеспечить все более широкий рабочий диапазон частот двухполяризационных антенн базовых станций, что дает возможность одновременной работы одной и той же антенны в диапазонах частот, соответствующих различным стандартам мобильной связи. Это позволяет сократить общее количество используемых антенн базовых станций, что критически важно. Таким образом, чрезвычайно актуальна задача создания широкополосных и многодиапазонных антенн для базовых станций мобильной связи.

Исследованию и разработке различных конструкций двухполяризационных антенн базовых станций посвящено большое количество работ, например [1-6], включая печатные излучатели [1,2,4] и цельнометаллические конструкции излучателей [3,5,6]. В частности, в [1] предложена печатная конструкция «bow-tie» антенны для работы в диапазоне 1.7-2.7 ГГц, которая обеспечивает в полосе 45% требуемые электрические характеристики на двух наклонных поляризациях $\pm 45^{\circ}$ ($S_{11} = -15$ дБ, изоляция портов около -30 дБ, стабильная ширина диаграммы направленности). Диапазонные свойства данной конструкции, определяются взаимной связью скрещенных диполей, каждый из которых в отдельности узкополосен.

В виду необходимости более широкополосных антенн в [2] была предложена новая модификация печатной антенны на скрещенных диполях для базовых станций 5G, работающих в диапазоне около 6 ГГц. Предложенная антенна работает в полосе частот шириной 57%, обеспечивает в рабочей полосе достижение необходимых электрических характеристик антенны, имеет простую технологичную конструкцию, пригодную для массового производства. Ниже рассмотрена модификация данного класса антенн, в которой рабочий диапазон частот удастся существенно расширить.

1. Печатный излучатель на скрещенных диполях

При постановке задачи будем полагать, что излучатель должен работать в диапазоне частот 1.4-2.7 ГГц на двух ортогональных поляризациях, наклоненных на $\pm 45^\circ$ к горизонту. Стандартными требованиями для антенн базовых станций являются: коэффициент отражения в полосе частот -15дБ, поляризационная развязка -25...-30 дБ, стабильная ширина диаграммы направленности (ДН), которая составляет по уровню -10 дБ $2\theta_{0.1}=120^\circ$ и по уровню половинной мощности $2\theta_{0.5}=65^\circ$ в рабочей полосе частот. Кроссполяризационная компонента должна быть меньше, чем главная компонента поля на 15 дБ в направлении главного максимума, и меньше на 10 дБ на краях сектора 120° .

Конструкция двухполяризационного излучателя, отвечающего данным требованиям, приведена на рис. 1,2. Она включает печатную плату со скрещенными диполями, которая расположена над проводящим экраном и фиксируется на экране с помощью четырех диэлектрических стоек. Каждый из скрещенных диполей возбуждается стандартной 50-омной коаксиальной линией. Одно из плеч каждого из скрещенных диполей расположено на внешней стороне диэлектрической подложки, а второе плечо – на тыльной стороне подложки (рис. 2).

Электродинамический анализ и оптимизация излучателя были выполнены на основе метода конечных элементов [7]. Оптимизированная форма плеч

диполей получена на основе аппроксимации кривыми Безье третьего порядка [8,9]. По результатам оптимизации были получены следующие электрические размеры излучателя. Длина каждого из диполей составляет $0.56\lambda_0$ (где λ_0 – длина волны на центральной частоте рабочего диапазона), ширина каждого из плеч равна $0.2\lambda_0$, размеры диэлектрической подложки $0.23\lambda_0 \times 0.23\lambda_0$, подложка расположена на расстоянии $0.28\lambda_0$ от проводящего рефлектора. Размеры рефлектора составляют $1.43\lambda_0 \times 1.43\lambda_0 \times 0.19\lambda_0$. В качестве подложки использован материал Rogers 4350B с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3.48$ и толщиной 0.762 мм. Конфигурация скрещенных диполей приведена на рис. 1б, 2, размеры всей структуры даны в таблице 1.

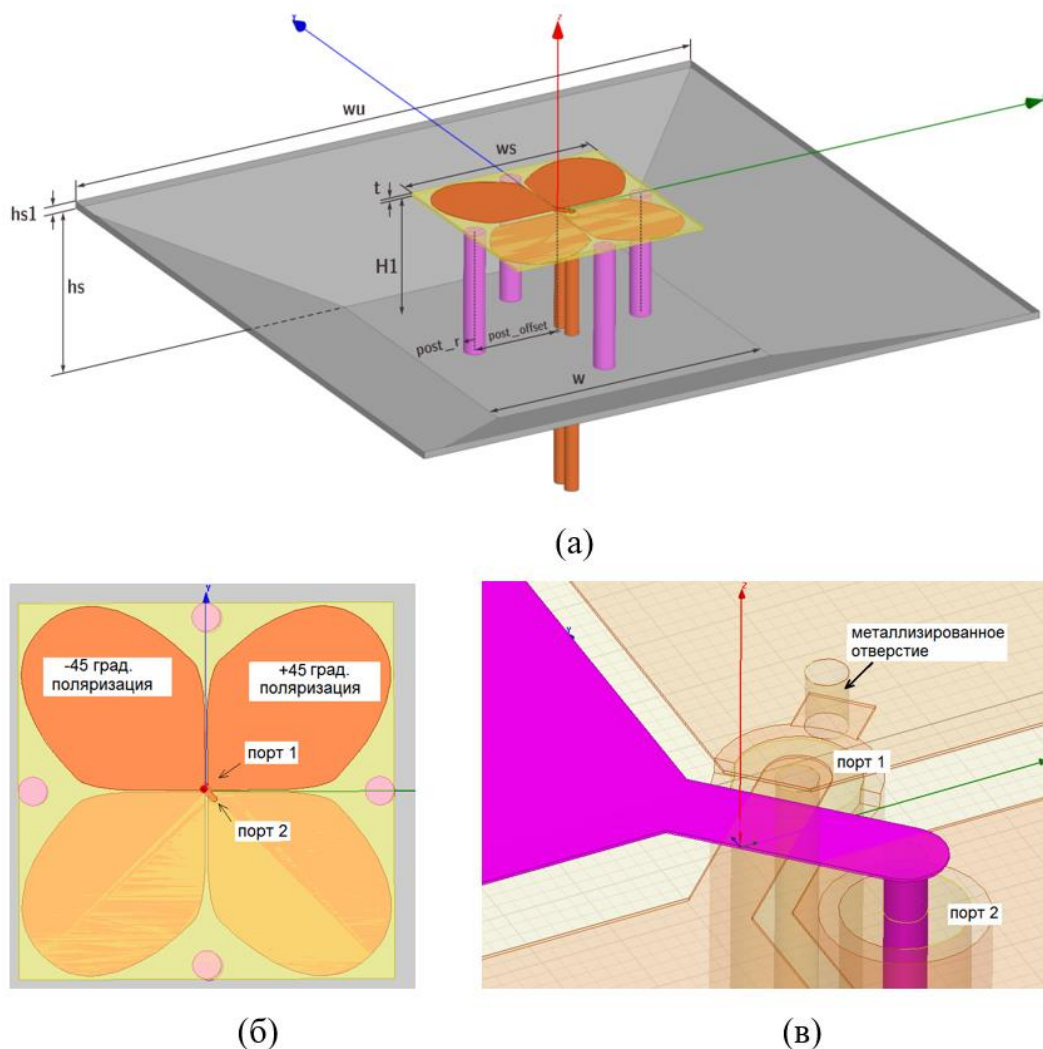


Рис. 1. Двухполяризационный печатный излучатель на скрещенных диполях. Общий вид (а), вид сверху печатной платы (б), соединение диполей с питающими коаксиальными линиями (в).

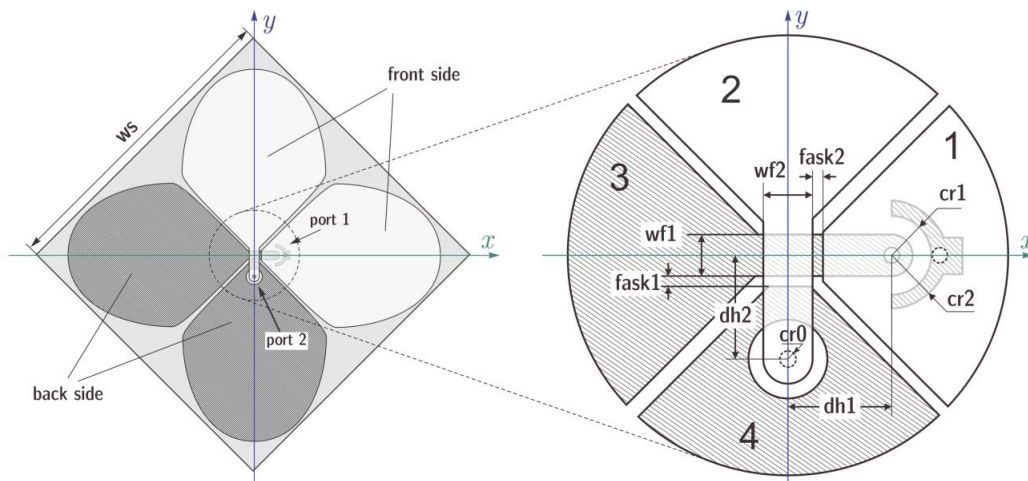


Рис. 2. Конфигурация скрещенных диполей.

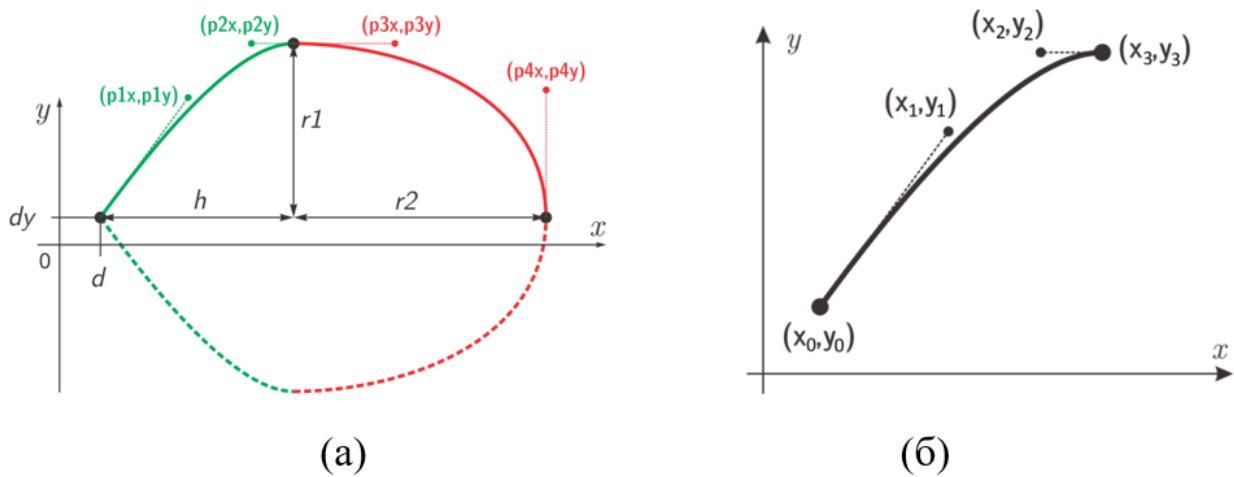


Рис.3. Конфигурация плеча диполя, образованного четырьмя кривыми Безье (а), кривая Безье третьего порядка (б).

Предложенная конструкция излучателя отличается простотой, т.к. она реализована на однослойной диэлектрической подложке и не содержит дополнительных навесных элементов. Плечи каждого из диполей расположены на двух сторонах подложки и возбуждаются отрезком микрополосковой линии (рис. 1 б,в). Коаксиальный порт 1 возбуждает диполь с поляризацией $+45^\circ$, а порт 2 возбуждает диполь с поляризацией -45° . Сигнальный проводник коаксиала 2 проходит через отверстие в подложке и соединяется с полосковой линией на верхней стороне платы, экран коаксиала имеет электрический контакт с плечом -45° диполя на тыльной стороне платы. Сигнальный проводник коаксиала 1 припаян к концу микрополосковой линии на тыльной стороне подложки, а экран коаксиала соединен с контактной площадкой на тыльной стороне платы и через

сквозное металлизированное отверстие соединен с плечом $+45^\circ$ диполя, расположенным на верхней стороне платы.

Таблица 1. Размеры излучателя на рис. 1, 2 (в мм).

- dipole - $h = 18$ $r1 = 15.1$ $r2 = 23$ $r3 = 15.1$ $d = 0.32$ $dy = -0.05$	- curves - $p1x = 12$ $p1y = 11.68$ $p2x = 15.12$ $p2y = 15.1$ $p3x = 28.32$ $p3y = 15.1$ $p4x = 41.32$ $p4y = 11$	- substrate - $t = 0.762$ $t1 = 0.035$ $ws = 33$ $post_offset = 30.5$ $post_r = 2.5$
- feeder - $wf1 = 1.2$ $wf2 = 1.6$ $fask1 = 0.3$ $fask2 = 0.3$ $dh = 3$ $dh1 = 3.5$ $dh2 = 3.5$ $rh = 0.465$	- reflector - $w = 105$ $wu = 210.5$ $hs = 25.35$ $hs1 = 2.3$ $H1 = 42$	- coaxial - $cr0 = 0.465$ $cr1 = 1.5$ $cr2 = 1.78$ $h_coax = 96.584$

Конфигурация каждого плеча диполей определяется двумя независимыми кривыми Безье третьего порядка (рис. 3а). Плоская кубическая кривая Безье [8,9] задается четырьмя опорными точками (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , две из которых являются началом и концом кривой, а две другие контрольные точки определяют направление кривой. В частности, прямая проведенная между точками (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , является касательной к кривой в точке (x_0, y_0) , а прямая проведенная между точками (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , является касательной к кривой в точке (x_3, y_3) . В параметрической форме плоская кубическая кривая Безье задается уравнениями [8,9]:

$$x(t) = (1-t)^3 x_0 + 3(1-t)^2 t x_1 + 3(1-t) t^2 x_2 + t^3 x_3, \quad (1)$$

$$y(t) = (1-t)^3 y_0 + 3(1-t)^2 t y_1 + 3(1-t) t^2 y_2 + t^3 y_3, \quad (2)$$

где $0 \leq t \leq 1$.

Таким образом, в (1)-(2) координаты опорных точек определяют форму кривой, а координаты соответствующих точек на рис. 3а являются параметрами оптимизации при электродинамическом моделировании диполя. Такой способ аппроксимации профиля плеч диполей позволяет увеличить число степеней свободы для настройки взаимной связи скрещенных диполей, что, в свою

очередь, позволяет обеспечить более широкополосную работу излучателя без усложнения его конструкции.

Рассмотрим результаты электродинамического моделирования и численной оптимизации данного типа излучателей. На рис. 4 приведены частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} , S_{22} для коаксиальных портов двухполяризационного излучателя и поляризационная развязка S_{21} . В частотном диапазоне 1.4-2.7 ГГц коэффициенты отражения не превышают -15 дБ, а изоляция портов не хуже -34 дБ. Частотные зависимости действительной ($\text{Re } Z_{11}$) и мнимой ($\text{Im } Z_{11}$) частей входного сопротивления излучателя приведены на рис. 5. Действительная часть $\text{Re } Z_{11}$ осциллирует вблизи значения 50 Ом, а мнимая $\text{Im } Z_{11}$ – вблизи значения 0, что означает высокий уровень согласования излучателя со стандартной 50-омной коаксиальной линией.

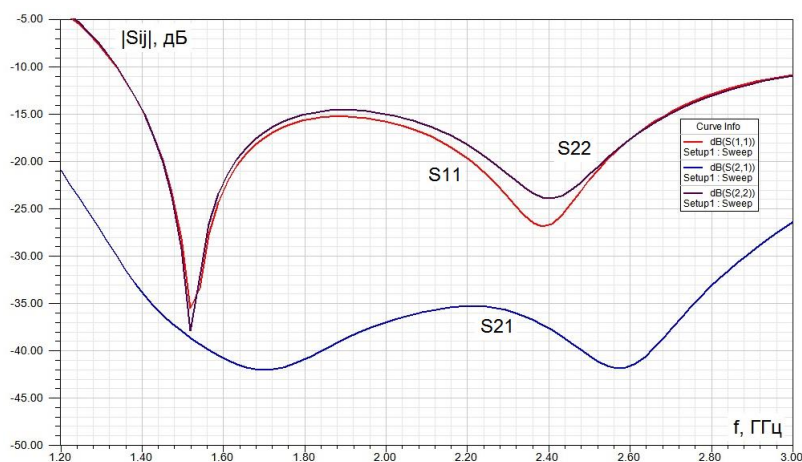


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} , S_{22} и развязки S_{21} портов для излучателя на рис. 1.

ДН излучателя в горизонтальной и вертикальной плоскостях приведены на рис. 6. Ширина ДН в горизонтальной плоскости по уровню -10 дБ составляет $2\theta_{0.1}=122^\circ, 109^\circ, 133^\circ$ на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц, а по уровню половинной мощности ширина ДН, соответственно, равна $2\theta_{0.5}=63^\circ, 52^\circ, 69^\circ$. В вертикальной плоскости ширина ДН составляет на тех же частотах $2\theta_{0.1}=123^\circ, 111^\circ, 134^\circ$ и $2\theta_{0.5}=63^\circ, 53^\circ, 72^\circ$. Таким образом, она отличается от ДН

в горизонтальной плоскости всего на 1° - 3° , оставаясь достаточно стабильной в широкой полосе частот, близкой к октаве.

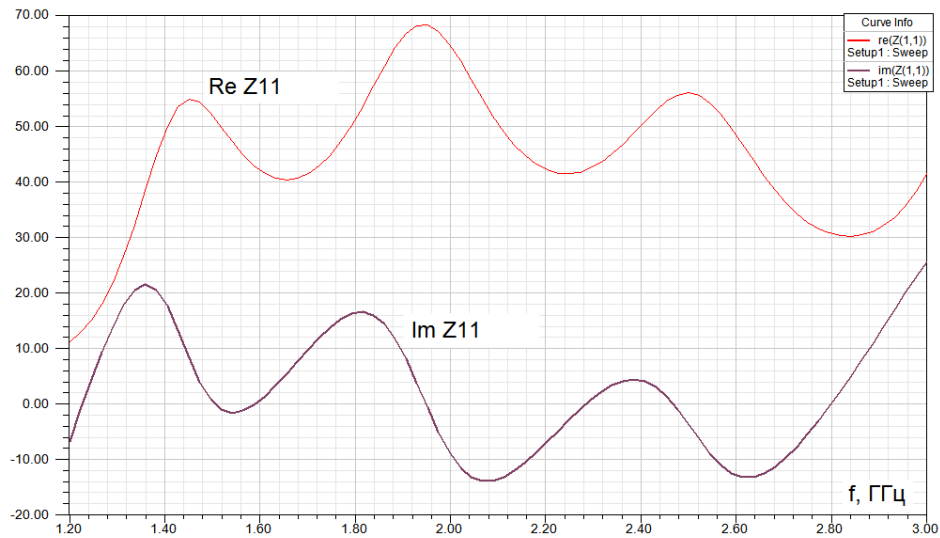


Рис. 5. Частотные зависимости действительной и мнимой частей входного сопротивления портов излучателя (рис. 1).

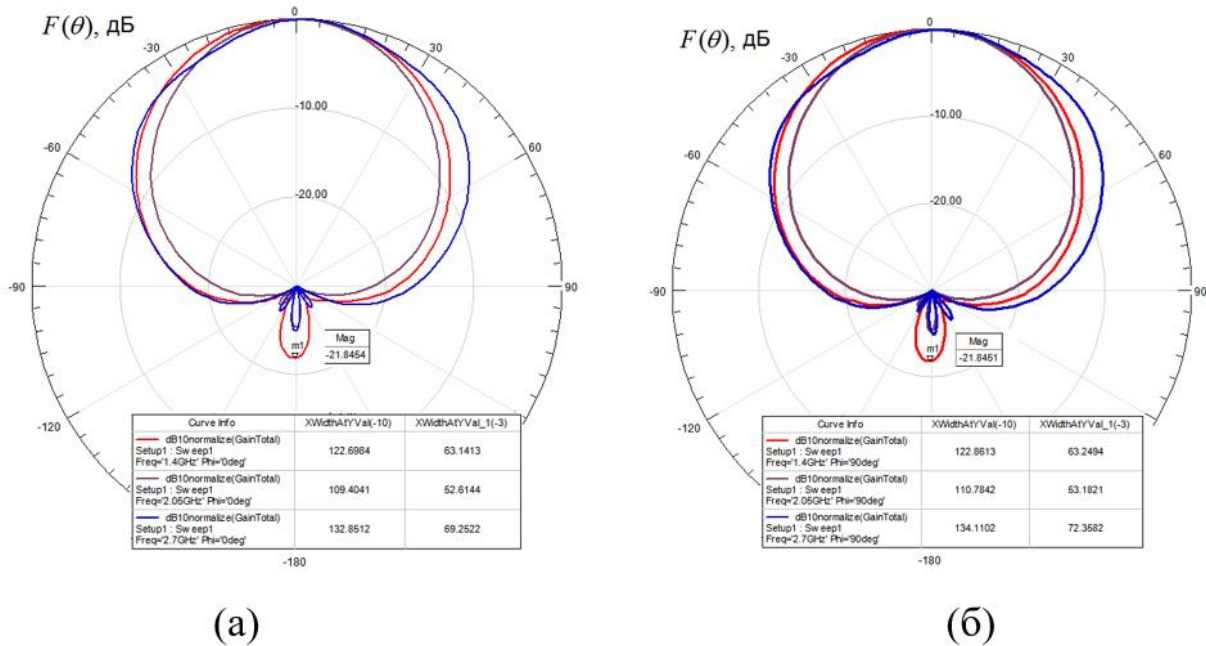


Рис. 6. Диаграммы направленности излучателя в горизонтальной плоскости (а), вертикальной плоскости (б) на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц.

Трехмерные ДН излучателя на рис.7 построены при возбуждении порта 1, т.е. при возбуждении диполя с наклоном поляризации $+45^{\circ}$. ДН на нижней частоте рабочего диапазона (рис. 7,а) симметрична относительно оси Z, а ДН на средней и верхней частотах (рис.7,б,в) несколько расширены в Н-плоскости. При этом ширина ДН в горизонтальной плоскости остается достаточно стабильной в

полосе частот. Коэффициент усиления излучателя варьируется от 9.2 дБ до 10.6 дБ в рабочем диапазоне частот.

Кроссполяризационная составляющая поля, приведенная на рис. 7, нормирована относительно максимума компонента главной поляризации. Максимальные значения кроссполяризационной составляющей равны соответственно -19.4 дБ, -24.6 дБ, -17.5 дБ на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц. Таким образом, это отвечает требованию, что в направлении главного луча кроссполяризационный компонент должен быть меньше компонента главной поляризации на 15 дБ, а в остальных направлениях – не менее, чем на 10 дБ.

Отметим, что достигнутые характеристики излучателя получены в результате многопараметрической численной оптимизации по критериям согласования, изоляции, стабильности ширины ДН в заданном частотном диапазоне.

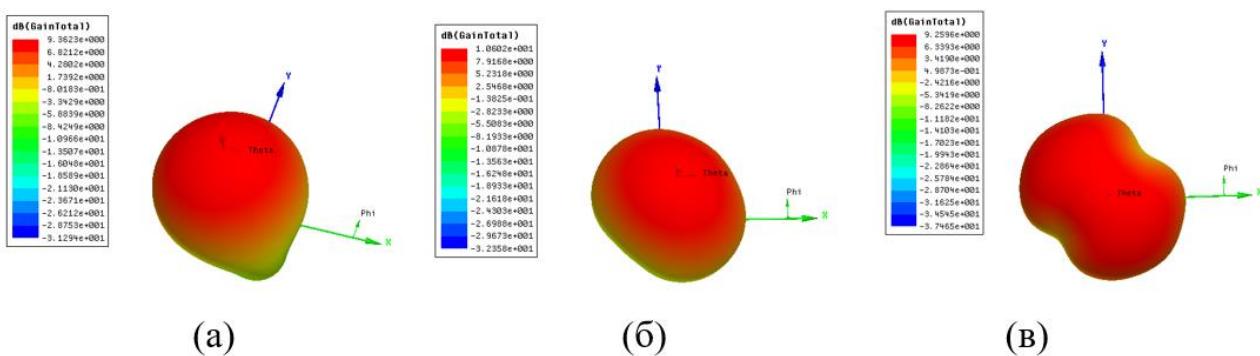


Рис. 7. Трехмерные диаграммы направленности излучателя на частотах: (а) 1.4 ГГц ($G = 9.3$ дБ), (б) 2.05 ГГц ($G = 10.6$ дБ), (в) 2.7 ГГц ($G = 9.2$ дБ).

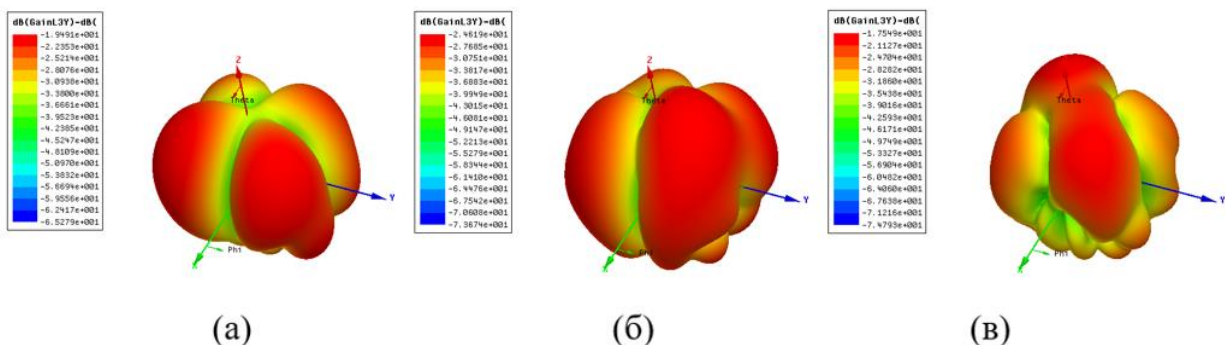


Рис. 8. Кроссполяризационный компонент на частотах (а) 1.4 ГГц (-19.4 дБ), (б) 2.05 ГГц (-24.6 дБ), (в) 2.7 ГГц (-17.5 дБ).

Поскольку реальные антенны базовых станций всегда работают при наличии диэлектрического кожуха (обтекателя), который играет роль защиты от

внешних воздействий, было исследовано влияние диэлектрического укрытия на характеристики одиночного излучателя. Для оценки влияния диэлектрического кожуха была использована упрощенная модель в виде плоского диэлектрического слоя, расположенного над излучателем (рис. 9). Исследование показало, что диэлектрический слой оказывает заметное влияние на характеристики согласования и направленности излучателя. Поэтому необходимо учитывать диэлектрическое укрытие при моделировании антенн базовых станций.

На рис. 10, 11 приведены характеристики излучателя с диэлектрическим укрытием в виде листа с размерами $421 \times 421 \times 2.5$ мм (толщина 2.5 мм) и диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2.5$. По результатам моделирования выбрано расстояние 25 мм между излучателем и диэлектрическим листом. Коэффициенты отражения портов 1, 2 и развязка при этом близки к аналогичным частотным зависимостям для излучателя без укрытия (рис.1). В то же время ширина ДН становится более стабильной в диапазоне рабочих частот и составляет по уровню -10 дБ $2\theta_{0.1} = 128^\circ, 119^\circ, 128^\circ$, т. е. $2\theta_{0.1} = 120^\circ + 8^\circ / -1^\circ$. Таким образом, диэлектрическое укрытие может использоваться для улучшения характеристик направленности антенн базовых станций.

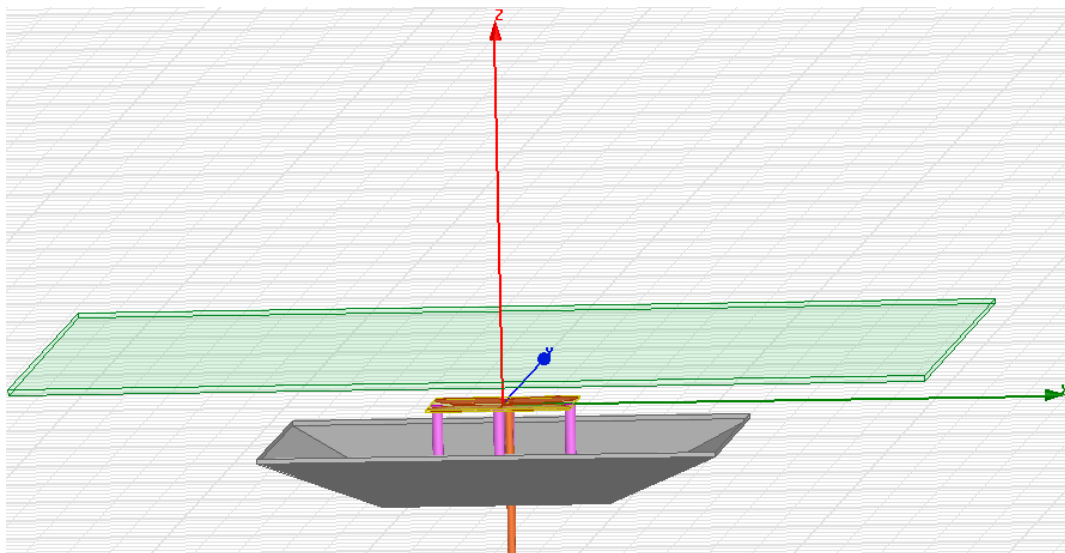


Рис. 9. Излучатель с укрытием в виде диэлектрической пластины.

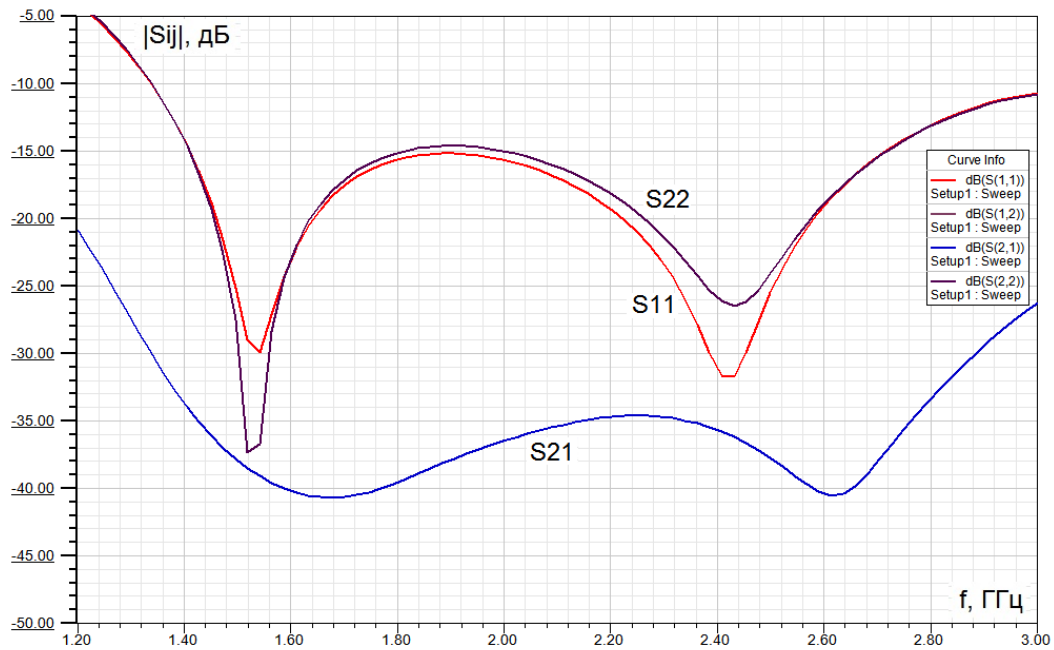


Рис. 10. Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{11} , S_{22} и развязки S_{21} портов для излучателя на рис. 9 с диэлектрическим укрытием.

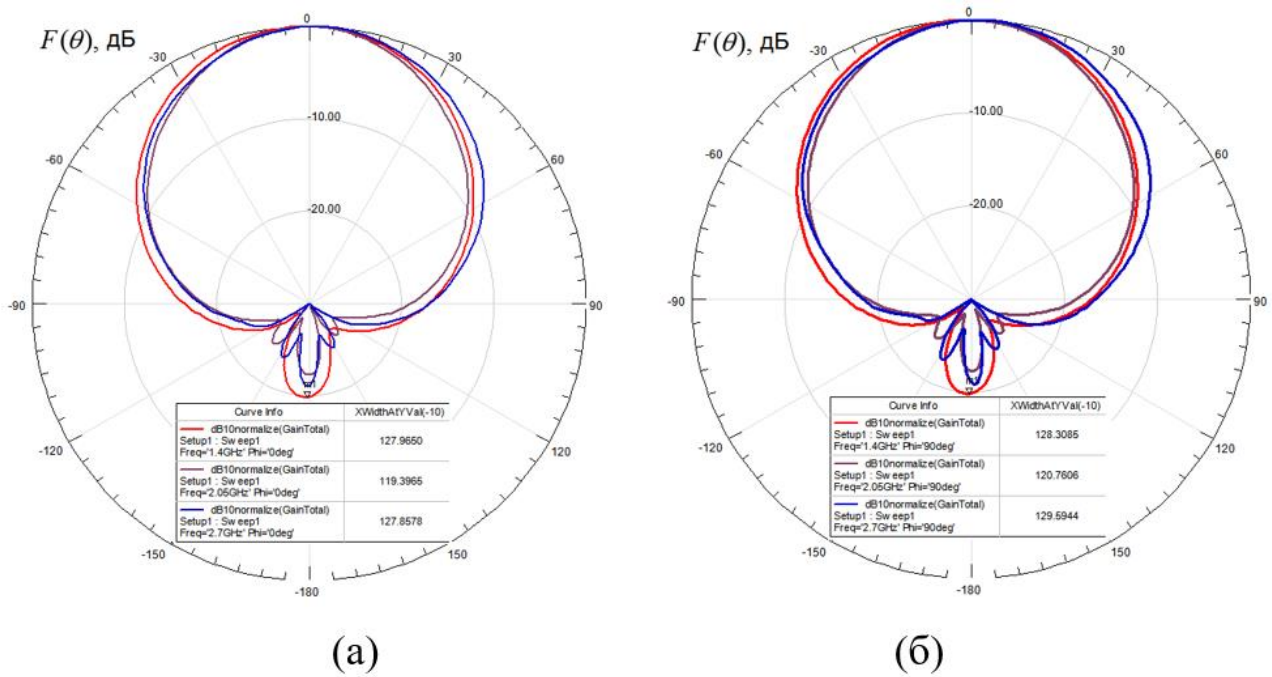


Рис. 11. ДН излучателя с диэлектрическим укрытием в горизонтальной плоскости (а), в вертикальной плоскости (б).

2. Линейная антенная решетка печатных диполей

Поскольку антенны базовых станций мобильной связи представляют собой вертикальные линейные антенные решетки, рассмотрим характеристики линейной АР, состоящей из предложенных выше двухполяризационных печатных излучателей. В качестве примера исследуем характеристики 8-элементной линейной АР (рис. 12), что позволяет оценить влияние взаимной связи элементов в составе АР.

При выборе периода размещения излучателей в составе АР необходимо избежать возникновения дифракционных лепестков и использовать минимальное количество излучателей для реализации требований к направленности АР в вертикальной плоскости. Учитывая, что ДН элемента АР в данном случае имеет большую ширину ($2\theta_{0.1}=120^\circ$), а также полагая, что угол отклонения луча от нормали к раскрыву АР равен нулю, получим максимальное допустимое значение периода $d = 111$ мм. Для дальнейших исследований положим $d = 104$ мм, что позволяет гарантированно избежать возникновения дифракционных максимумов в области видимых углов АР. Количество элементов в АР может быть выбрано, исходя из конкретных требований к ширине ДН в вертикальной плоскости. Размеры рефлектора АР на рис. 12 равны $210.5 \times 951.5 \times 27.65$ мм.

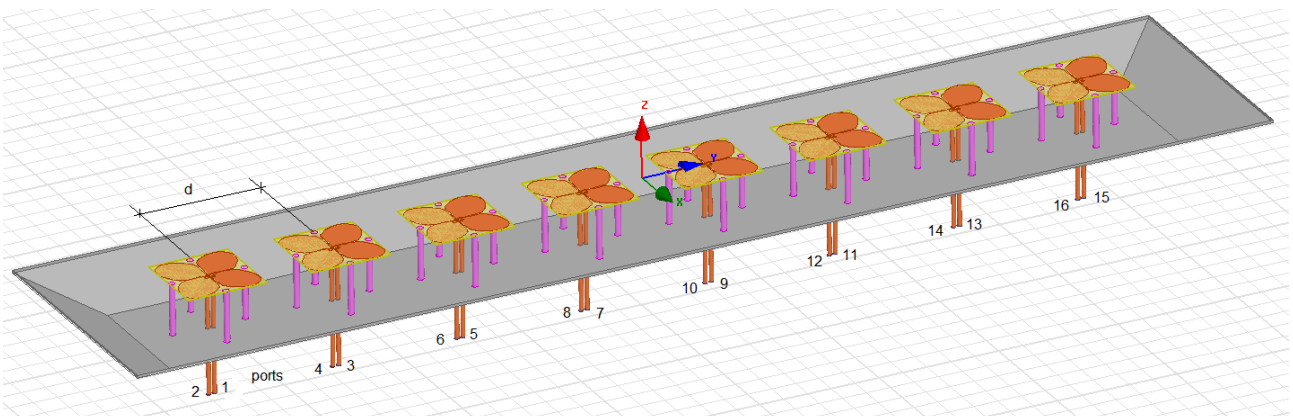


Рис. 12. Линейная 8-элементная антенная решетка двухполяризационных излучателей для диапазона 1.4-2.7 ГГц.

Рассмотрим характеристики 8-элементной линейной АР при возбуждении диполей с наклоном поляризации $+45^\circ$ к горизонту. Это соответствует

возбуждению портов 1, 3, 5, ..., 13, 15 на рис. 12. При этом полагаем, что амплитудное распределение на входах излучателей равномерное, а фазы возбуждающих токов одинаковы.

Частотные зависимости коэффициентов матрицы рассеяния приведены на рис. 12, из которого можно видеть, что коэффициенты отражения как крайнего элемента в АР, так и элементов, расположенных ближе к центру АР, сохраняют в полосе частот 1.4-2.7 ГГц величину, не превышающую -14...-15 дБ. Изоляция портов у крайнего излучателя остается лучше -31 дБ, а для излучателей, расположенных в центре АР изоляция составляет -25...-30 дБ, что обусловлено более сильной взаимной связью элементов АР, расположенных ближе к центру АР.

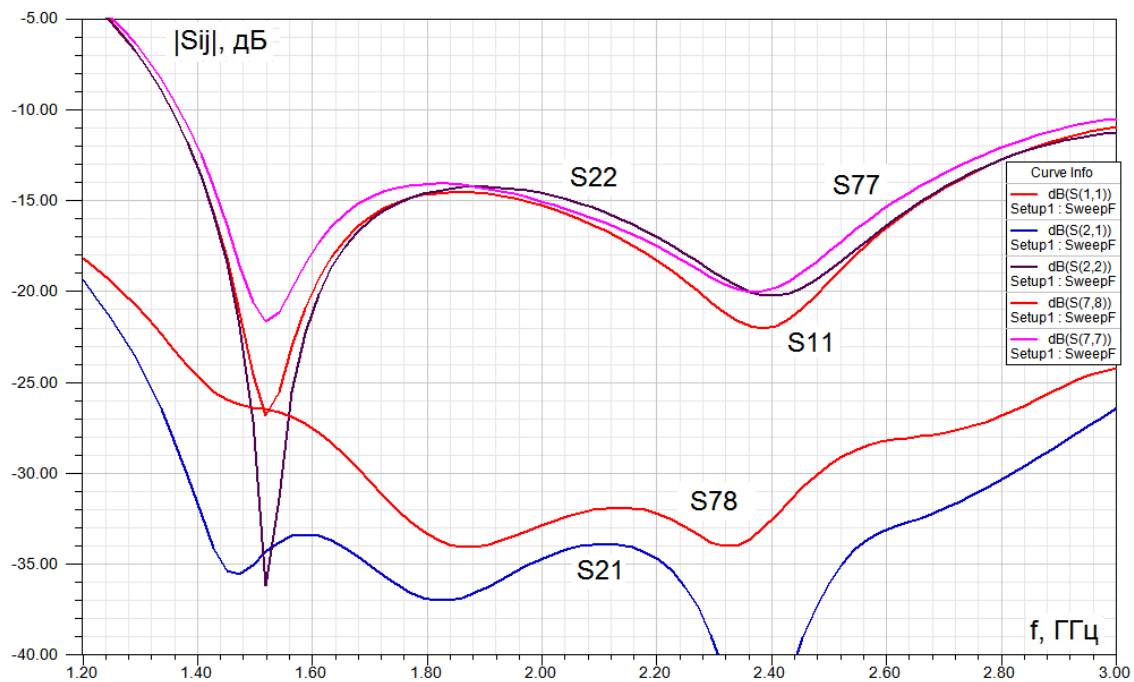


Рис. 13. Частотные зависимости коэффициентов отражения S_{ii} , и развязки $S_{i+1,i}$ портов для АР на рис. 12.

Диаграммы направленности АР на частотах рабочего диапазона 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц представлены на рис. 14. Ширина ДН по уровню -10 дБ в горизонтальной плоскости составляет $2\theta_{0,1}=124^\circ, 113^\circ, 138^\circ$, а по уровню половинной мощности $2\theta_{0,5}=63^\circ, 54^\circ, 87^\circ$. В вертикальной плоскости ширина ДН АР составляет по уровню -10 дБ $2\theta_{0,1}=21^\circ, 14.6^\circ, 11^\circ$. Уровень задних лепестков ДН АР не превышает -24 дБ, уровень боковых лепестков составляет

около -13 дБ. Трехмерные ДН 8-элементной антенной решетки приведены на рис. 15. Кроссполяризационная составляющая не хуже -20 дБ. Коэффициент усиления АР на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц равен соответственно 16.2 дБ, 18.4 дБ, 18.05 дБ. Отметим, что расширение ДН на верхних частотах рабочего диапазона может быть уменьшено и ширина ДН стабилизирована за счет использования дополнительных навесных элементов конструкции и диэлектрического обтекателя.

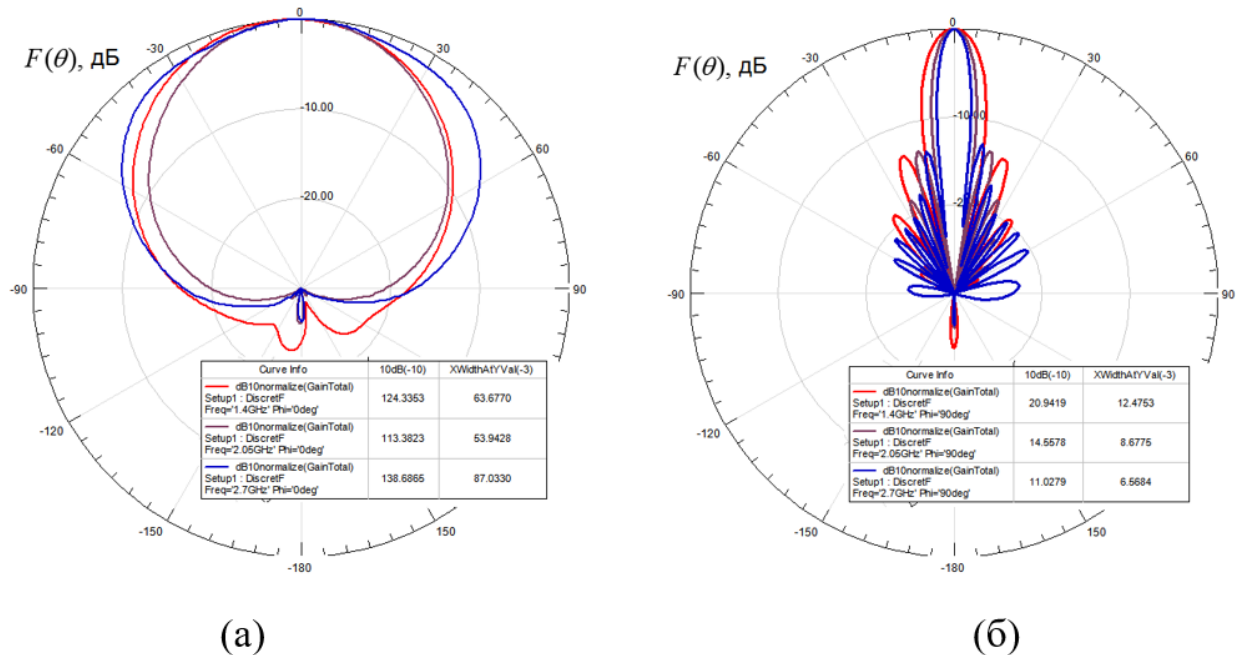


Рис. 14. ДН 8-элементной АР в горизонтальной плоскости (а), в вертикальной плоскости (б).

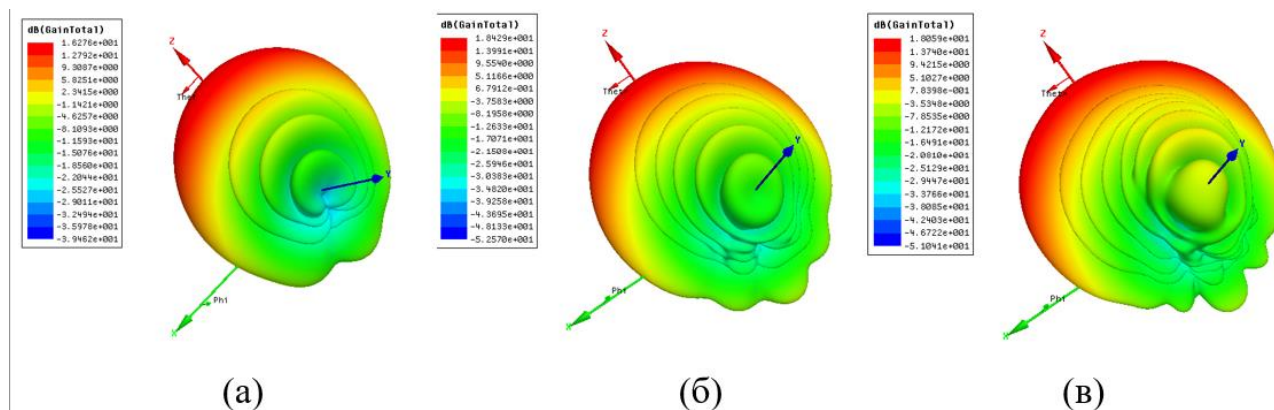


Рис. 15. Трехмерные диаграммы направленности 8-элементной АР (а) 1.4 ГГц ($G = 16.2$ дБ), (б) 2.05 ГГц ($G = 18.4$ дБ), (в) 2.7 ГГц ($G = 18.05$ дБ)

Заключение

Предложена новая широкополосная модификация двухполяризационных антенн для базовых станций мобильной связи диапазона 1.4-2.7 ГГц. Излучатель реализован на основе скрещенных печатных диполей, расположенных на однослойной диэлектрической плате и возбуждаемых стандартными коаксиальными линиями. Профиль плеч диполей аппроксимировался кривыми Безье 3-го порядка, а параметры кривых Безье выступали в качестве параметров при численной оптимизации характеристик излучателя по критериям согласования и направленности. Это позволило за счет настройки взаимной связи скрещенных диполей расширить рабочий диапазон частот почти до октавы без усложнения конструкции излучателя, что существенно превышает рабочие полосы частот у известных из литературы прототипов подобных антенн.

Для одиночного двухполяризационного излучателя достигнуты следующие электрические характеристики в полосе 1.4-2.7 ГГц. Коэффициенты отражения портов не превышают -15 дБ, поляризационная развязка -34 дБ, ширина ДН в горизонтальной плоскости по уровню -10 дБ равна $2\theta_{0,1}=122^\circ, 109^\circ, 133^\circ$ на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц соответственно, кроссполяризационная компонента поля не превышает по всем направлениям -17.5 дБ. При наличии диэлектрического слоя, моделирующего обтекатель антенны, ширина ДН становится более стабильной и составляет по уровню -10 дБ $2\theta_{0,1}=128^\circ, 119^\circ, 128^\circ$ на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц.

В целях оценки влияния взаимной связи предложенных двухполяризационных излучателей была исследована линейная 8-элементная антенная решетка. Достигнутые характеристики АР в целом соответствуют требованиям, предъявляемым к антеннам базовых станций. В полосе 1.4-2.7 ГГц коэффициенты отражения коаксиальных портов АР не превышают -14...-15 дБ, изоляция не хуже -25...-30 дБ, кроссполяризационная компонента не превышает -17.5 дБ, ширина ДН в горизонтальной плоскости по уровню -10 дБ равна $2\theta_{0,1}=124^\circ, 113^\circ, 138^\circ$ на частотах 1.4 ГГц, 2.05 ГГц, 2.7 ГГц.

Данные характеристики могут быть улучшены при использовании в конструкции излучателей дополнительных элементов и диэлектрического обтекателя.

Финансирование: Guangzhou Compass Technology Co., Ltd

Литература

1. Y.H. Cui, R.L. Li, and H.Z. Fu. A Broadband Dual-Polarized Planar Antenna for 2G/3G/LTE Base Stations// IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 62. N. 9. pp. 4836 – 4840, 2014.
2. K. Kobrin, Zimeng Li, V. Sledkov, M. Manuilov. A Broadband Dual-Polarized Planar Dipole Antenna Array for Sub-6 GHz Base Stations // IEEE 7th All-Russian Microwave Conference (RMC-2020). 2020. pp.180-183.
3. V.A. Rudakov, Z. Li , V.A. Sledkov, V.V. Taranenko, M.B. Manuilov Dual-polarized dipole array with controlled beam tilt and wide radiation pattern for multi-beam antenna of base stations // IEEE Conf. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW 2021). 2021. pp. 171–174.
4. K. Kobrin, Z. Li, V. Sledkov, M. Manuilov. Wideband Design of Dual-Polarized Planar Dipole for Base Station Antenna Application // 2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC-2022). 2022. pp. 144-147.
5. Y. Liu, H. Yi, F. W. Wang, and S. X. Gong. A novel miniaturized broadband dual-polarized dipole antenna for base station// IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. vol. 12. pp. 1335–1338. 2013.
6. Y. Luo and Q. X. Chu. Oriental crown-shaped differentially fed dual polarized multi-dipole antenna// IEEE Trans. Antennas Propag. vol. 63. N. 11. pp. 4678–4685. Nov. 2015.
7. Ansys HFSS, <https://www.ansys.com>.
8. Computer Aided Geometric Design // Edit. by R. E. Barnhill and R. F. Riesenfeld. Academic Press. 1974. 326 p.

9. R. H. Bartels, J.C. Beatty, B.A. Barsky. An Introduction to Splines for Use in Computer Graphics and Geometric Modelling. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1998. 485p.

Для цитирования:

Кобрин К.В., Li Z., Следков В.А., Мануилов М.Б. Широкополосная двухполяризационная антенная решетка планарных диполей для базовых станций мобильной связи. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.6>