

УДК 621.37

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-47-61

**Разработка микрополосковых антенн дециметрового диапазона с круговой поляризацией\*****Р. А. Бузанов**, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия**С. А. Широких**, инженер-конструктор, ООО «Ижевский радиозавод», Ижевск, Россия**К. В. Шишаков**, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Рассмотрены современные варианты конструкций микрополосковых антенн с круговой поляризацией, в которых круговая поляризация создается с помощью одноточечного и двухточечного питания.*

*Для изготовления исследуемого макета антенны с круговой поляризацией выбрана наиболее простая форма антенны – с излучателем в виде сплошного круга, питание которого осуществляется по двухточечной схеме. Применительно к использованию во внутриобъектовых телеметрических системах выбрана частота работы в диапазоне 640...650 МГц.*

*Исследованы два варианта двухточечного питания такой антенны – с помощью симметричного и несимметричного квадратного полоскового моста. Выполнен расчет, согласование и настроечное моделирование вариантов делителя мощности. В результате изготовленный макет первой конструкции антенны получился трехслойным, второй – двухслойным.*

*Методика создания антенн включает оценочный расчет геометрических размеров, который далее уточнялся с помощью компьютерного моделирования в программе CST Microwave Studio. Частотная настройка выполненных макетов антенн выполняется с помощью регулировочных зубцов по контуру круглого излучателя. Проведенное исследование созданных макетов антенн показало лучшую технологичность и стабильность характеристик двухслойной конструкции по сравнению с трехслойной. Поэтому для производственного изготовления была выбрана двухслойная круглая антенна с двухточечным питанием. Она предназначена для телеметрических радиоканалов внутри замкнутых пространств. Проведенные измерения показали, что изготовленная антенна работает в правой круговой поляризации с коэффициентом эллиптичности 1,2 дБ. Коэффициент стоячей волны в рабочей полосе частот 640...650 МГц не превышал 1,32, коэффициент усиления был не менее 5 дБ, ширина диаграмм направленности в двух плоскостях – соответственно, 95 и 93 угловых градуса. В антенне предусмотрен режим работы в качестве приемно-передающей, поскольку развязка приемного и передающего трактов осуществляется за счет разной поляризации, для чего необходимо второй вход делителя мощности вместо балансного резистора подключить к приемному устройству.*

**Ключевые слова:** микрополосковая антенна, круговая поляризация, двухточечная схема питания, диаграмма направленности, коэффициент стоячей волны, коэффициент усиления, коэффициент эллиптичности, дециметровый диапазон.

**Введение**

**А**нтенны с круговой поляризацией широко применяются на практике вследствие следующих своих свойств: отсутствие поляризационных потерь из-за несоосности приемной и передающей антенн (что критично для антенн линейной поляризации); нечувствительность к повороту плоскости поляризации, основанному на эффекте Фарадея (вращение пропорционально компоненте магнитного поля в направлении распространения), который может проявиться в более вы-

соких слоях атмосферы Земли, где ионизированная плазма генерирует магнитные поля, что важно для систем спутниковой связи с Земли; отсутствие интерференции между прямым и отраженным сигналом (волна с круговой поляризацией после отражения от проводящей, плоской поверхности становится встречно поляризованной), что является преимуществом для навигационных систем спутникового базирования, а также для связи с высокой скоростью передачи данных в закрытых помещениях.

В результате отмеченных преимуществ интерес к разработке антенн с круговой поляризацией не ослабевает в технической литературе [1–3]. Среди более ранних работ можно отметить следующие: Narbudowicz A.Z. Advanced Circularly Polarised Microstrip Patch Antennas. Dublin Institute of Technology, 2013; Al-Lawati H.M. Design and analysis of low profile circularly polarized antennas, 2014; Lin W. and Wong H. Circularly polarized conical-beam antenna with wide bandwidth and low profile. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014; He M., Ye X., Zhou P., Zhao G., Zhang C. and Sun H. A small-size dual-feed broadband circularly polarized U-slot patch antenna. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 2015 и др.

Такие антенны применяются в космической телеметрии и космических зондах, баллистических ракетах, спутниковых системах навигации, в мобильной связи, беспроводных датчиках, радиочастотной идентификации, а также в беспроводных системах передачи и приема данных. При этом антенны наземных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, COMPASS, QZSS) настраивают на прием сигналов с правой круговой поляризацией. При проектировании антенн с круговой поляризацией обычно стремятся обеспечить высокий коэффициент эллиптичности (КЭ) во всем рабочем диапазоне работы антенны [4–9]. В последнее время все большее внимание разработчиков привлекают такие антенны с нестандартной сложной топологией (см., например, статьи 2022 г. [10–14]).

**Цель статьи** – разработка и исследование двух вариантов конструкций печатных микрополосковых антенн дециметрового диапазона с круговой поляризацией, предназначенных для телеметрических радиоканалов внутри замкнутых пространств.

Для пояснения выбора их конструкций, удовлетворяющих требованиям технологичности и компактности, предварительно кратко рассмотрены особенности некоторых заинтересовавших нас вариантов микрополосковых антенн с круговой поляризацией. С многочисленными вариантами таких антенн для разных практических применений можно познакомиться в журналах IEEE Trans. Antennas Propag., IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., International Journal of Antennas and Propagation и др.

#### **Особенности вариантов конструкций печатных микрополосковых антенн с круговой поляризацией**

Кратко рассмотрим известные варианты конструкций антенн, учитывая следующие работы:

Steven G., Luo Q., Zhu F. Circularly polarized antennas. University of Kent, 2014; Банков С. Е. Антенны спутниковых навигаторов. М.: Перо, 2014.

В патч-антеннах (ПА) круговую поляризацию создают с помощью одноточечного и многоточечного питания. В первом случае обычно получается упрощенная схема питания и меньшие габариты антенн. Однако интервал коэффициента эллиптичности антенны получается узким – его ширина обычно не более 1 % от центральной рабочей частоты. К особенностям конструкций излучателей можно отнести специальные вырезы и скосы (рис. 1). В технической литературе известно множество других вариантов конструкций такого типа антенн.

При этом введение щелей различной формы (рис. 1, *g*, *h*, *i*) удлиняет пути токов от одного края излучателя к другому и может привести к понижению резонансной частоты антенны (например, на рис. 1, *g*), что позволяет уменьшить ее размер для рабочей частоты. Использование перекрестной щели для уменьшения габаритов было успешно применено и к треугольным микрополосковым антеннам (рис. 1, *j*, *k*). Причем для излучателя с двумя перекрестными щелями разной длины (рис. 1, *k*) излучение с круговой поляризацией тоже происходит при более низкой рабочей частоте.

Более подробно поясним важную роль щелей на примере конструкции антенны на рисунке 1, *j*. Центр узкой щели шириной 1 мм расположен в точке нулевого напряжения основной моды  $TM_{10}$  для простой треугольной микрополосковой антенны без щели. Щель удлиняет эквивалентный путь поверхностного тока моды  $TM_{10}$  излучателя вдоль направления, перпендикулярного щели. В то же время для направления, параллельного щели, путь тока изменяется незначительно. В результате происходит разделение моды  $TM_{10}$  на две почти вырожденные ортогональные резонансные моды. Путем выбора длины щели и места запитывания излучателя можно добиться, чтобы эти моды имели равные амплитуды и разность фаз в  $90^\circ$  (обычно, когда длина щели равна примерно  $1/4$  длины стороны треугольного излучателя; например, 11,9 мм для антенны с длиной стороны треугольника равной 48 мм). Тем самым получают работу в режиме круговой поляризации.

Точка питания для согласования линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом расположена на дугах  $L_1$  и  $L_2$ , которые определяются экспериментально. Запитывание в точках *A* и *B* (точка *B* – это зеркальное отображение точки *A*

относительно оси симметрии треугольника) обеспечивает работу антенны, соответственно, с правой (RHCP) и с левой (LHCP) круговой поляризацией и хорошим согласованием. За-

тем, что механизм создания круговой поляризации в антенне на рисунке 1, *k* с неравными длинами  $l_x$  и  $l_y$  щелей может быть пояснен аналогично.

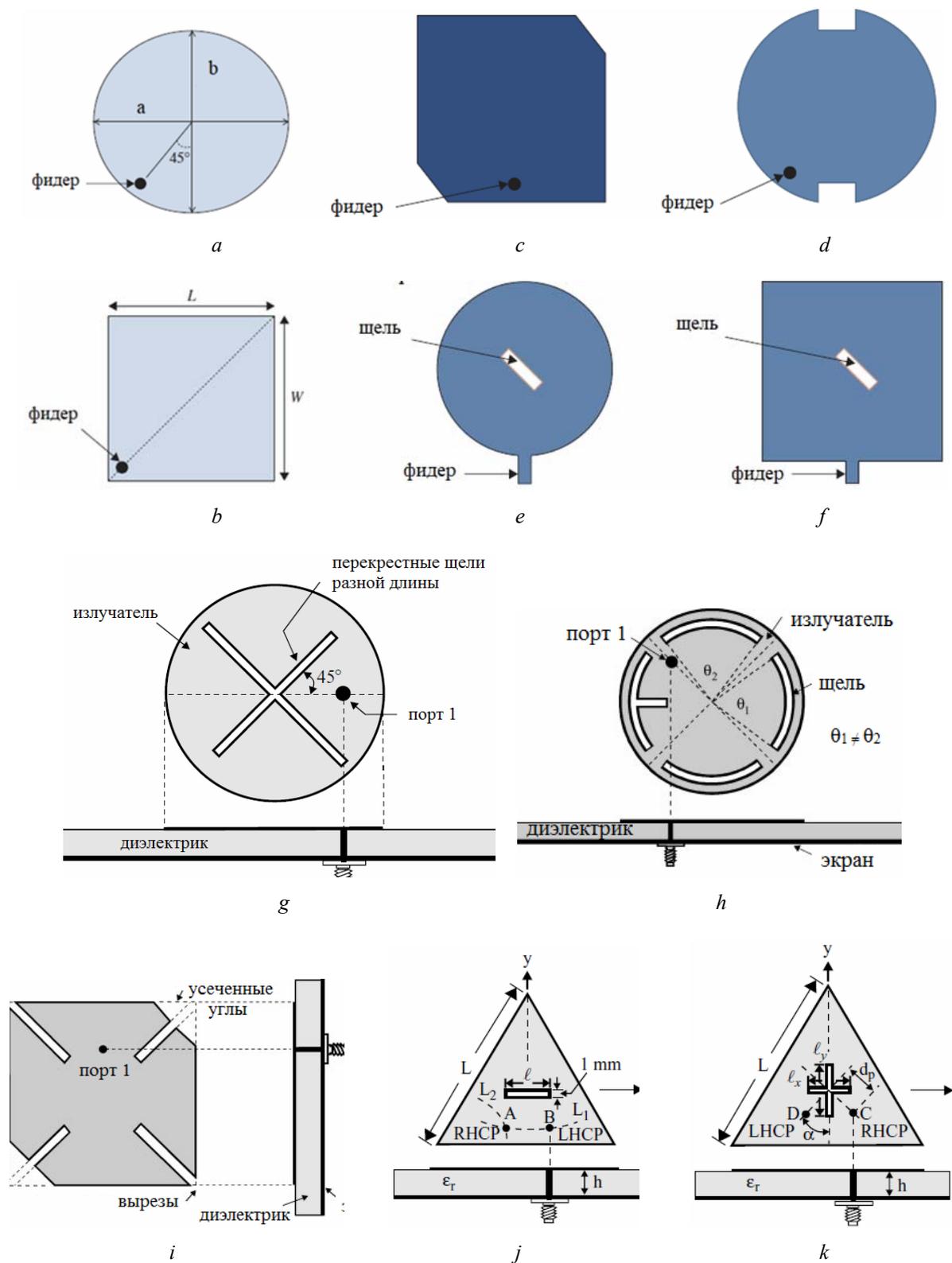


Рис. 1. Антенны круговой поляризации с одноточечным питанием

Fig. 1. Circular polarization antennas with single-point power supply

Для работы антенны в двух частотных диапазонах и с одним элементом питания можно, например, использовать две пары дугообразных щелей с  $\theta_2 \neq \theta_1$  (рис. 1, *h*), имеющих узкую ширину 1 мм, которые расположены близко к границе излучателя на расстоянии 1 мм.

При этом для настройки антенны левая щель дополнена прямоугольным пазом длиной 10 мм. Здесь работа на двух частотах создается модами  $TM_{11}$  и  $TM_{12}$  простой круглой микрополосковой антенны без щели. При наличии двух пар дугообразных щелей разной длины предполагается, что первые две рабочие моды могут состоять из двух почти вырожденных ортогональных резонансных мод, если точка питания размещается под углом в  $45^\circ$  к оси симметрии излучателя и на расстоянии от центра, определяющем согласование с линией связи. Для достижения двухдиапазонной работы в режиме круговой поляризации прямоугольный паз отрегулирован на длину 10 мм ( $0,20D$ ), а углы  $\theta_2$  и  $\theta_1$  равны  $88^\circ$  и  $89^\circ$  соответственно. Подача (точка *A*) находится примерно в  $0,32D$  от центра излучателя.

Варианты антенн с питанием в двух точках с фазовым сдвигом показаны на рисунке 2. В них достигается более широкий диапазон рабочих частот антенны. На рисунке схематично изображены схемы возбуждения у кромок (рис. 2, *a*), с коротко замыкающими штырями (рис. 2, *b*) и емкостной связью в точках питания (рис. 2, *c*). В последнем варианте введение емкостной связи в излучателе ( $r$  обычно выбирается менее  $0,2R$ ) и применение широкополосного моста позволяют дополнительно расширить частотный диапазон. Для достижения широкополосного излучения с круговой поляризацией толщина воздушной подложки  $S_1$  (рис. 2, *c*) выбрана равной приблизительно  $0,1$  длины волны в свободном пространстве на центральной рабочей частоте. Для такой антенны эксперимент показал, что при коэффициенте эллиптичности менее 3 дБ и неравномерности коэффициента усиления в пределах 1 дБ полученная полоса частот, при которой антенна работает в круговой поляризации, превышала 40 % от несущей частоты.

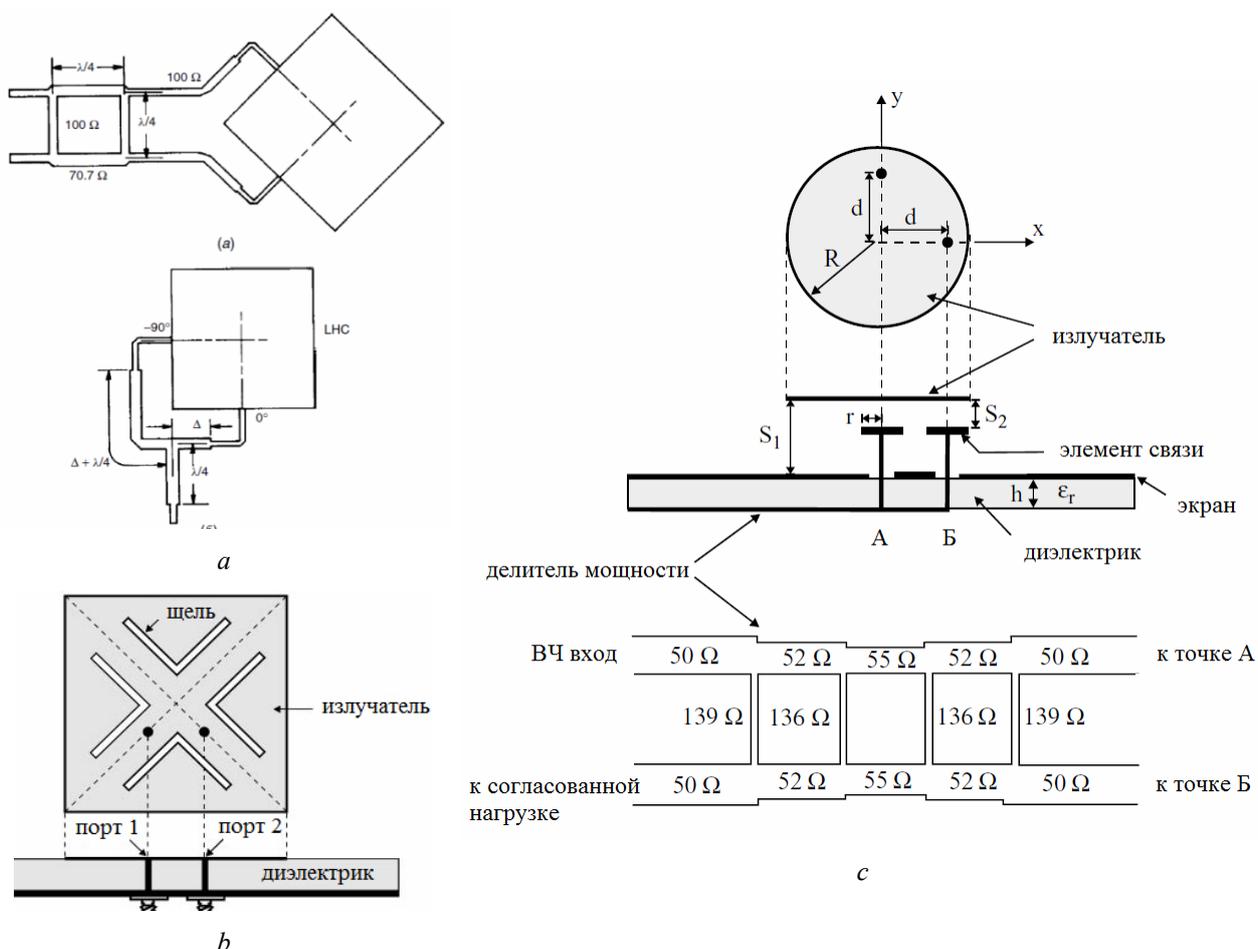


Рис. 2. Антенны круговой поляризации с двухточечным питанием

Fig. 2. Circular polarization antennas with point-to-point power supply

Антенна на рисунке 2, *c* излучает волны с левой круговой поляризацией. Если поменять местами точки питания *A* и *B*, антенна будет излучать волны с правой круговой поляризацией. Для достижения хорошего согласования импеданса положения точек запитывания обычно выбираются при  $d$  не менее  $0,7R$  и  $S_2$  не более  $0,3S_1$ .

Заметим, что для дальнейшего увеличения полосы частот или многодиапазонности их работы можно применять конструкции антенн и с большим числом точек питания. В частности, схемы с четырехточечным возбуждением ПА обеспечивают лучшие поляризационные параметры. При этом в ряде их конструкций применяются и противофазные мосты ( $0^\circ$ ,  $180^\circ$ ). В свою очередь, в схемах с двухточечным питанием традиционными являются квадратурные делители мощности ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ).

#### Разработка конструкции трехслойной микрополосковой антенны с круговой поляризацией для частот 640...650 МГц

Учитывая особенности рассмотренных антенн, для практической разработки была выбрана наиболее простая конструкция, удовлетворяющая требованиям технологичности и компактности. Она похожа на упрощенную версию антенны на рис. 2, *c*. При этом двухточечное питание с делителем мощности обеспечивает работу в правой круговой поляризации с коэффициентом эллиптичности (КЭ) менее 3 дБ

и с коэффициентом стоячей волны (КСВ) менее 1,4 во всем рабочем диапазоне частот.

Конструкция антенны в сборке (рис. 3, *a*) состоит из радиопрозрачного колпака 1, излучателя 2, делителя мощности со сдвигом фаз на  $90^\circ$  10, выполненного в компланарном волноводе 3, 4, штифтов из радиопрозрачного материала для фиксации от сдвига при внешних воздействиях факторах 5, дюралюминиевого основания 6, балластного резистора 7, коаксиального кабеля и радиочастотного соединителя 8, уплотнительного кольца, служащего для создания герметичности конструкции 9; штырей питания излучателя 11, а также других конструктивных элементов.

Для разработки антенны сначала в программе Компас-3D была построена ее 3D-модель с симметричным полосковым делителем мощности, расположенным для компактности конструкции непосредственно под полосковым излучателем (см. вид антенны по слоям на рис. 3, *a*). Для создания макета такого делителя потребовалось склеить два слоя. В результате конструкция антенны получилась из трех печатных плат с микрополосковым излучателем и делителем мощности в симметричном полосковом волноводе.

В качестве материала для микрополосковых плат выбран диэлектрик фольгированный ФЛАН-10-4 толщиной 4 мм и диэлектрической проницаемостью 10. Это позволило несколько уменьшить габарит антенны до  $170 \times 160 \times 20$  мм. Расчетный вес составил 800 г.

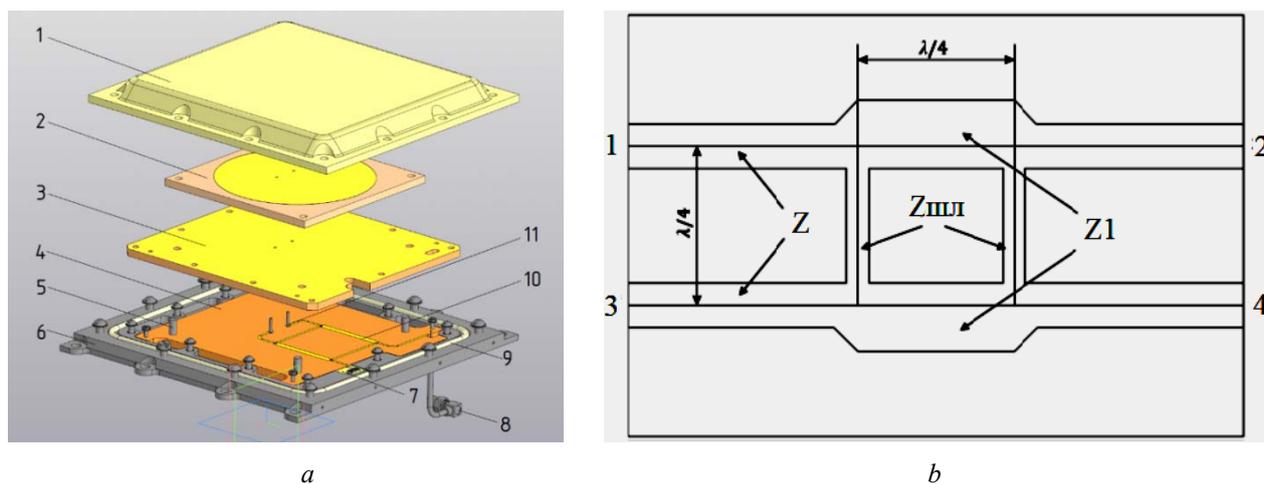
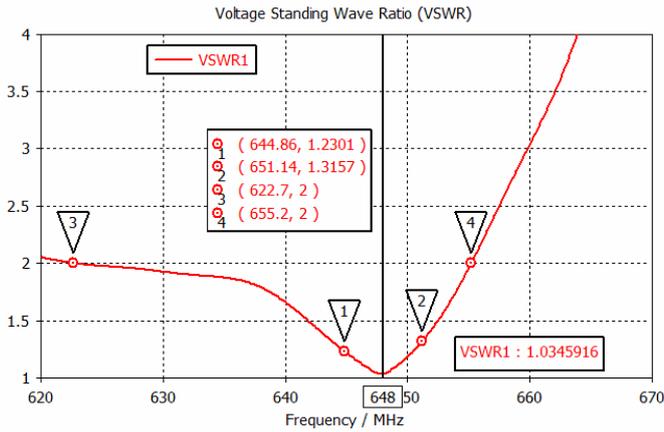
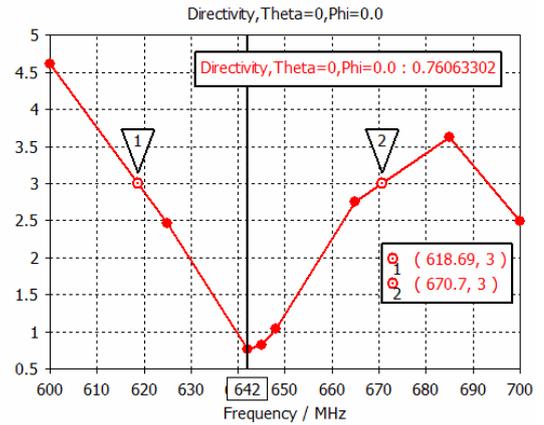


Рис. 3. Трехслойная антенна: *a* – модель в программе «Компас-3D»; *b* – топология делителя мощности

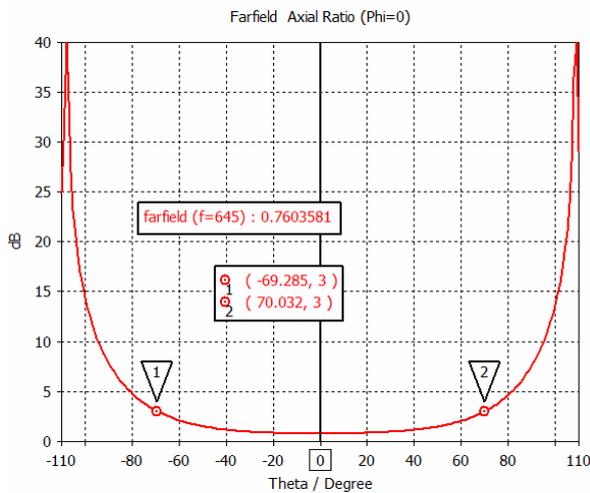
Fig. 3. Three-layer antenna: *a* - model in the program "Compass-3D"; *b* - power divider topology



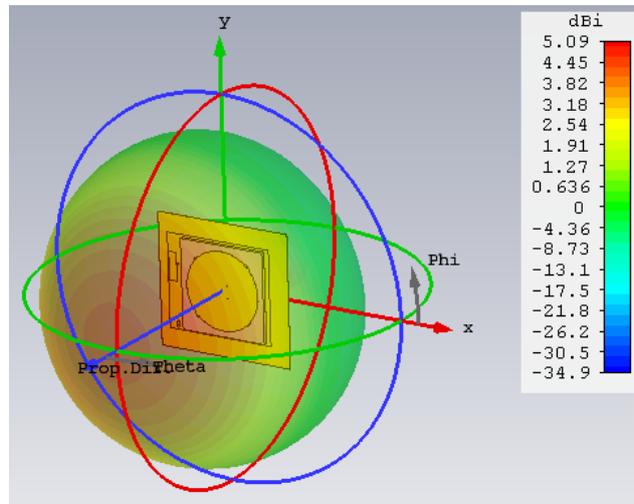
c



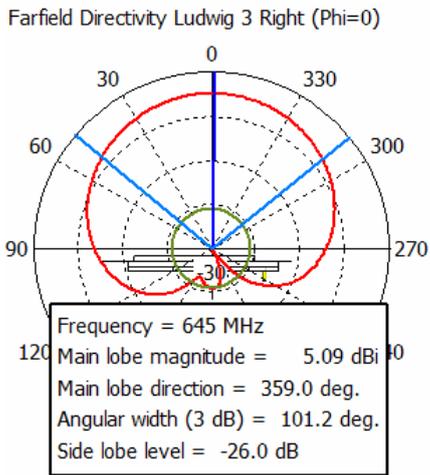
d



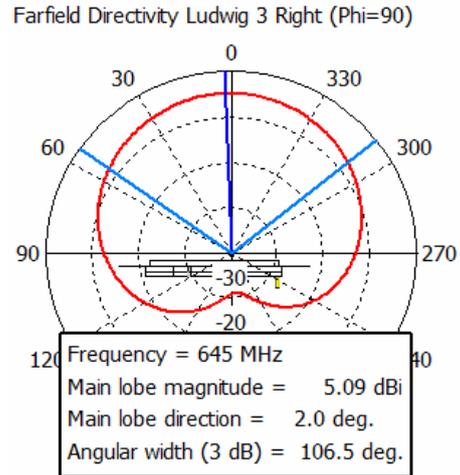
e



f



g



h

Рис. 3 (окончание): c – зависимость КСВ от частоты; d – зависимость КЭ от частоты; e – зависимость КЭ от угла; f – угловая функция КУ; g, h – ДН, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскостях

Fig. 3 (continued): c - is the dependence of SWR on frequency; d - is the dependence of FE on frequency; e - is the dependence of FE on the angle; f - is the angular function of the CU; g, h - DN, respectively, in the vertical and horizontal planes

Перед заданием параметров модели излучателя сначала были сделаны их грубые оценки (которые были уточнены в процессе моделирования):

$$\lambda = \frac{c_0}{f_0} = \frac{300 \cdot 10^6}{645 \cdot 10^6} = 0,4651 \text{ м} = 465,1 \text{ мм};$$

$$W = L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{300 \cdot 10^6}{2 \cdot 645 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{10}} = 0,0735 \text{ м} = 73,5 \text{ мм};$$

$$D_u = 2\sqrt{\frac{S_u}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{WL}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{0,0735^2}{\pi}} = 82,9 \text{ мм};$$

$$G = \frac{\pi W \sqrt{\epsilon_r}}{377\lambda} = \frac{0,23 \cdot 3,16}{377 \cdot 0,465} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$d = \frac{W \arccos(2R_{\text{вх}}G)}{\pi} = \frac{73,5 \cdot 1,05}{3,14} = 24,6 \text{ мм},$$

где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве, м;  $c_0$  – скорость света в вакууме, м/с;  $f_0$  – резонансная частота, Гц;  $W = L$  – ширина и длина квадратного излучателя, м;  $\epsilon_r$  – диэлектрическая проницаемость подложки;  $S_u$  – площадь излучателя, м<sup>2</sup>;  $D_u$  – диаметр круглого излучателя, м;  $G$  – проводимость излучения, См;  $d$  – положение точки питания от центра излучателя для согласования с волновым сопротивлением линии связи;  $R_{\text{вх}}$  – волновое сопротивление линии связи, Ом.

При расчете параметров делителя мощности (рис. 3, б) учитывалось, что микрополосковые линии являются трансформаторами волновых сопротивлений между входом антенны и входными портами делителя. Их длина  $L_1 = \lambda_g/4$ , где  $\lambda_g$  – длина волны в диэлектрике, м. При подаче сигнала на первый входной порт, на втором и четвертом выходных портах имеем два сигнала, отличающихся по фазе на  $\pi/2$ . Для волнового сопротивления микрополосковой линии  $Z_0 = 50$  Ом были рассчитаны волновые сопротивления  $Z_{\text{шл}}$  и  $Z_1$ :

$$Z_1 = Z_0 \sqrt{1 - K^2} = 50 \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{2}}^2} = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35,35 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{шл}} = Z_0 \frac{\sqrt{1 - K^2}}{K^2} = 50 \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{2}}^2}}{\frac{1}{\sqrt{2}}} = 50 \text{ Ом},$$

где  $K = 1/\sqrt{2}$  – коэффициент связи по напряжению.

Для определения на их основе геометрических размеров (ширины и длины) четвертьволновых микрополосковых линий был использован макрос Impedance Calculation в программе CST Microwave Studio. Ширина линий получилась:  $W_1 = 3,1$  мм,  $W_{\text{шл}} = W = 1,31$  мм, а длина составила  $L = 37,5$  мм. В результате делитель мощности (рис. 3, б) был изготовлен из двух линий длиной 37,5 мм и шириной 1,31 мм с сопротивлением  $Z = Z_0$ , двух линий длиной 37,7 мм и шириной 3,1 мм с сопротивлением  $Z_1$ , двух шлейфов с сопротивлением  $Z_{\text{шл}}$  и двух выходных линий с сопротивлением  $Z$ . Его выходные плечи соединялись с излучателем при помощи штырей питания диаметром 1,3 мм.

Моделирование электромагнитных процессов в антенне было выполнено в программе CST на основе конструктивной модели из программы Компас-3D. Были рассчитаны: коэффициент стоячей волны (КСВ, рис. 3, с), коэффициент эллиптичности (КЭ, рис. 3, d, e), коэффициент усиления (КУ, рис. 3, f), а также диаграммы направленности (ДН) в вертикальной и горизонтальной плоскостях (рис. 3, g, h). При этом наименьший КСВ составил 1,035 (на частоте 648 МГц), а в требуемой полосе частот  $645 \pm \pm 3,14$  МГц он не превышал 1,32. КУ = 5,09 дБи. Ширина полосы частот по уровню КСВ = 2 получилась 33 МГц (5 % от рабочей частоты антенны). Ширина горизонтальной ДН была равна  $101,2^\circ$ , а ширина вертикальной ДН –  $106,5^\circ$ . КЭ антенны в направлении максимума ДН был равен 0,76 дБ, а по уровню 3 дБ ширина КЭ равна  $139,2^\circ$ . Полоса частот работы антенны в режиме круговой поляризации составила 52 МГц (8 % от центральной частоты).

#### Изготовление макета трехслойной микрополосковой антенны и его настройка на рабочий диапазон 640...650 МГц

Основываясь на результатах проведенного моделирования, был изготовлен макет антенны, состоящий из трех печатных плат (рис. 4, а, б). Материалом для этих плат был выбран диэлектрик фольгированный ФЛАН-10-4 производства «Молдавизолит». На рисунке 4, а показаны: 1 – основание; 2, 4 – платы делителя мощности со сдвигом фаз на  $90^\circ$ ; 3 – балластный резистор, 5 – излучатель. При этом основание макета изготовлено методом 3D-печати. Излучатель закреплен на верхнюю прижимную плату делителя мощности с помощью штифтов, также изготовленных методом 3D-печати. Для крепления плат делителя мощности использованы винты М3. Заметим, что в собранном макете (рис. 4, с)

не был использован радиопрозрачный защитный колпак, поскольку макет не рассчитан на воздействие внешних факторов.

На излучателе для частотной подстройки предусмотрены регулировочные зубцы (рис. 4, *d*),

а процесс регулирования заключался в срезании либо замыкании зубцов. Так, при срезании зубцов происходит смещение резонансной частоты излучателя вверх по диапазону, а при замыкании зубцов полосками индия Ин0 частота смещается вниз.

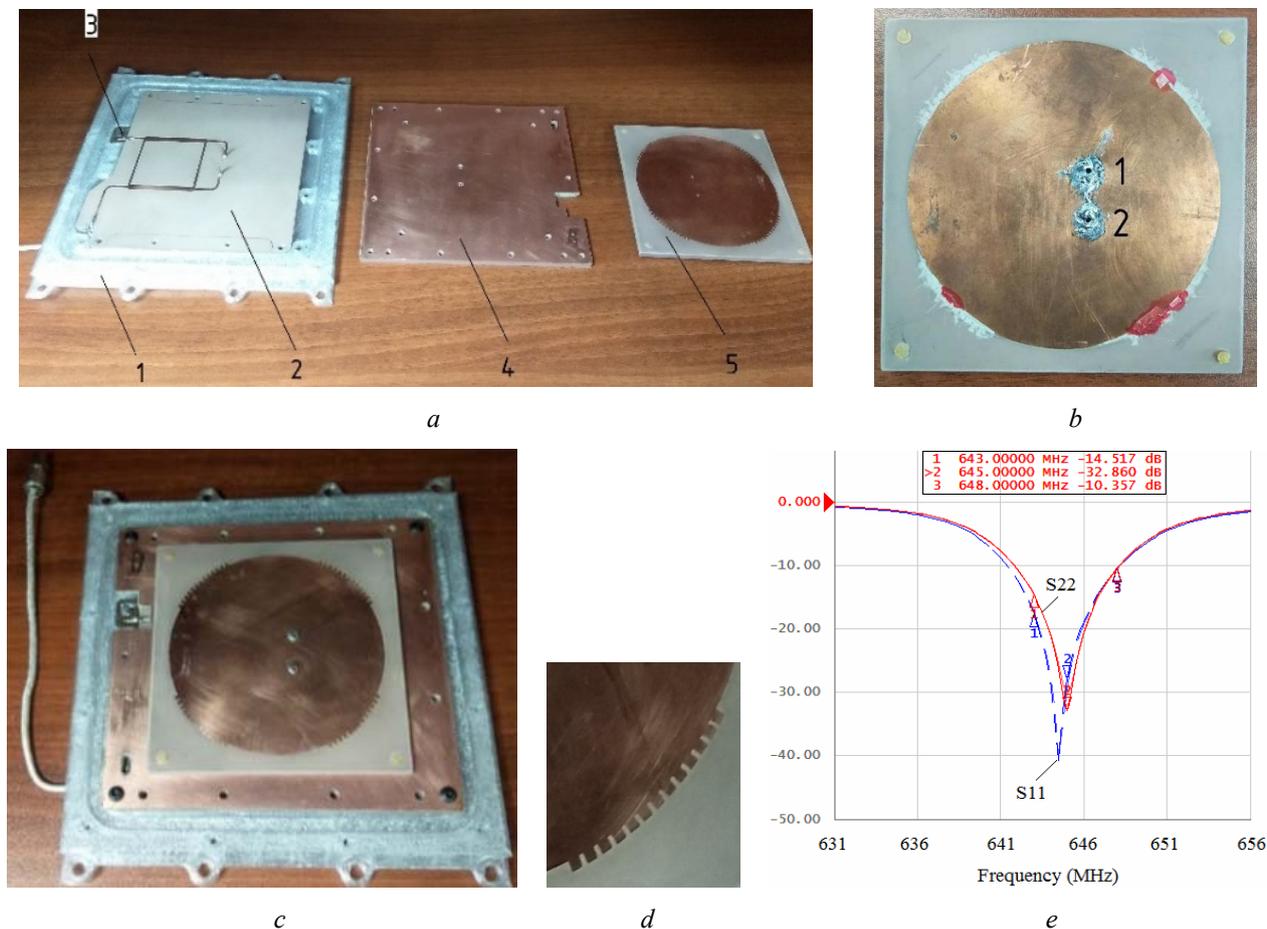


Рис. 4. Макет трехслойной антенны: *a* – элементы макета; *b* – излучатель с указанием портов 1, 2; *c* – конструкция в сборке; *d* – регулировочные зубцы; *e* – коэффициенты отражения от портов S11(дБ) и S22(дБ)

Fig. 4. Model of a three-layer antenna: *a* - its elements; *b* - emitter indicating ports 1, 2; *c* - construction in assembly; *d* - adjustment teeth; *e* - Reflectivity from S11(dB) and S22(dB) ports

Настройка макета антенны была проведена с помощью анализатора цепей Agilent E5061B. При подключении излучателя к анализатору цепей исследовалась частотная зависимость коэффициентов отражения S11 и S22 (рис. 4, *e*). После срезания всех регулировочных зубцов удалось попасть в нужный частотный диапазон, однако небольшое разнесение двух портов по частотам осталось. Это объясняется невысокой технологичностью изготовления печатных плат («в домашних условиях»), а именно эллиптичностью излучателя и погрешностью сверления отверстий связи. Для усреднения частотной характеристики использовались полоски индия на противоположных второму порту сторонам круга. Внешний вид излучателя после подстройки

показан на рисунке 4, *b* (также на нем показаны порты 1-2).

В результате удалось настроить излучатель на нужную полосу частот с коэффициентом отражения портов не более минус 10 дБ (что эквивалентно КСВ = 2) при коэффициенте отражения на центральной частоте менее минус 30 дБ (что эквивалентно КСВ = 1,06). Результирующие частотные зависимости S11(дБ) и S22(дБ) показаны на рисунке 4, *d*.

Отдельно были проведены измерения для делителя мощности, в котором элементы регулирования не были предусмотрены. При этом для изготовления симметричного полоскового делителя мощности (рис. 4, *a*) были склеены две платы между собой. В этом случае не разреша-

ется образования остаточных микрощелей между ними. Однако сначала в «домашних условиях» высокого качества его изготовления не удалось обеспечить. Поэтому результаты измерения получились не очень хорошими. Коэффициенты отражения S11 и S22 при подключении двух входных портов делителя мощности получились близкими, причем для первого порта:

- 643 МГц ↔ S11 = -6,64 дБ;
- 645 МГц ↔ S11 = -6,79 дБ;
- 648 МГц ↔ S11 = -7,26 дБ.

Их удалось привести в норму (менее -10 дБ) только после заводского изготовления такого симметричного полоскового тройника.

**Изготовление макета двухслойной микрополосковой антенны и его настройка на рабочий диапазон 640...650 МГц**

В целях упрощения конструкции антенного модуля и снижения требований к технологичности изготовления (особенно для «домашних условий») в предыдущем варианте антенны симметричный полосковый делитель мощности был заменен на несимметричный полосковый делитель мощности (рис. 5, а). При этом антенна в сборке получилась двухслойной (рис. 6, а; здесь излучатель с делителем соприкасаются металлизированными слоями).

Кроме этого в макете двухслойной антенны добавлена возможность выбирать правую и левую круговую поляризацию. Здесь есть два входных разъема 1, 2, которые позволяют использовать антенну в режиме приема-передающей. В этом случае развязка приемного и передающего трактов осуществляется за счет разной поляризации. Для этого необходимо второй вход делителя мощности вместо балансного резистора подключить к приемному устройству.

Однако заметим, что если трехслойную антенну (рис. 4) сразу можно монтировать на любую поверхность, то для двухслойной антенны появляется требование к ее установке с воздушным (либо заполненным пеной) зазором.

Для создания двухслойной антенны сначала был изготовлен и настроен несимметричный микрополосковый делитель мощности на подложке из стеклотекстолита FR-4 (рис. 5, а; на рисунке также указаны порты 1-4). После согласования в полосе частот 640...650 МГц он имел следующие параметры: коэффициенты отражения не более минус 27 дБ (рис. 5, б), развязка между 1-м и 2-м портом не менее минус 18 дБ, разница в делении мощностей составляет не более 0,4 дБ, сдвиг фаз 90±1°.

Далее, после его соединения с полосковым излучателем, был изготовлен образец двухслойной антенны (рис. 6).

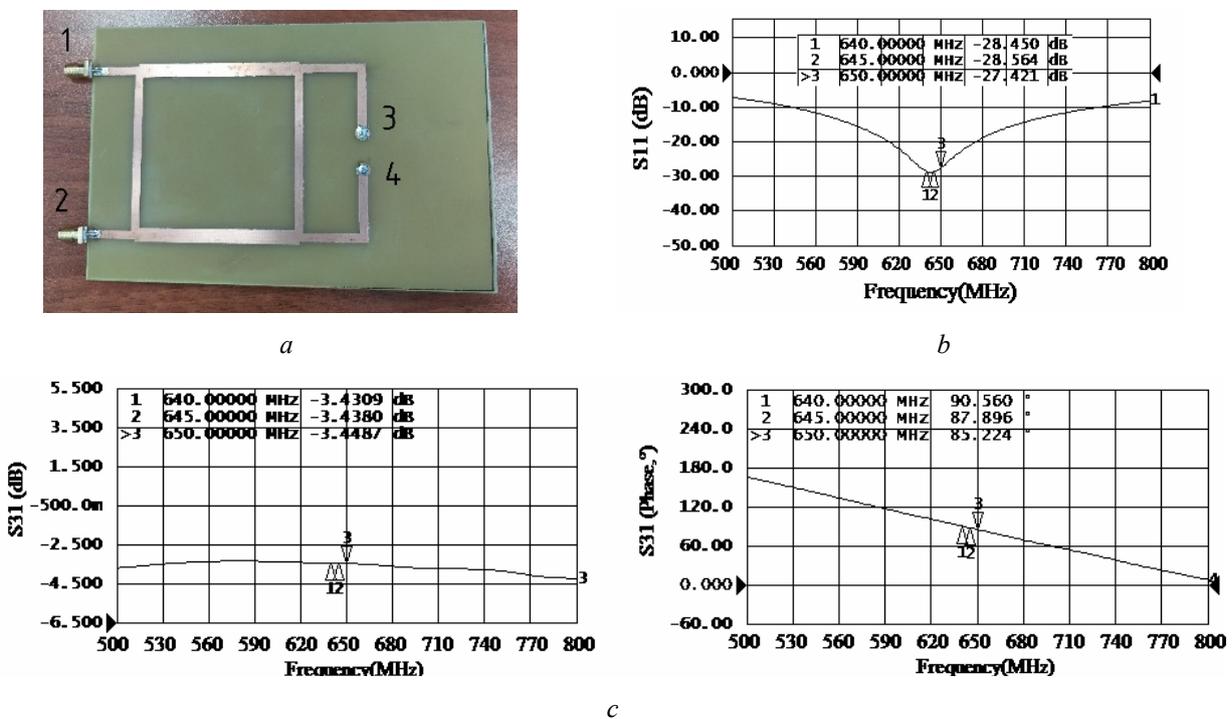
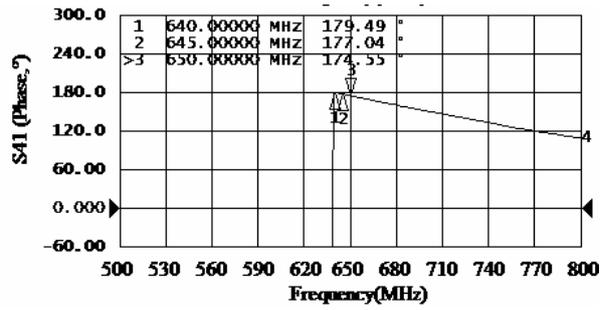
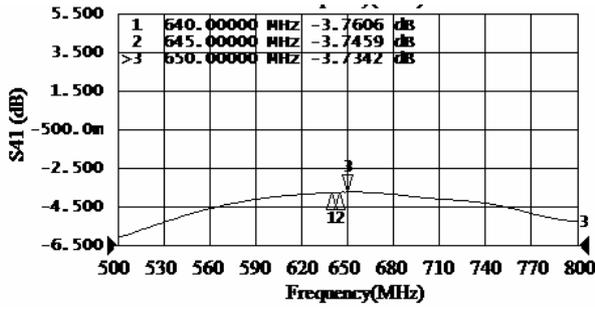


Рис. 5. Несимметричный полосковый делитель мощности: вид сверху (а) и частотные зависимости S11(дБ) (б)

Fig. 5. Single-ended strip power divider: top view (a) and frequency dependencies S11(dB)(b)



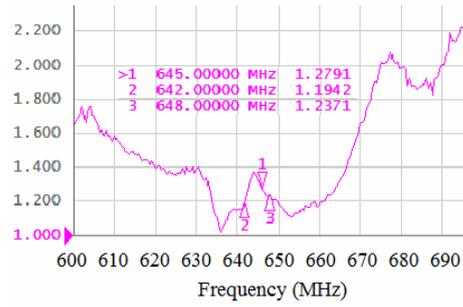
d

Рис. 5 (окончание): S31(дБ, фаза) (c), S41(дБ, фаза) (d)

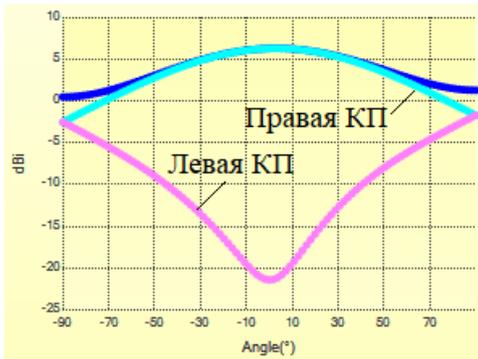
Fig. 5 (continued): S31(dB, phase) (c), S41(dB, phase) (d)



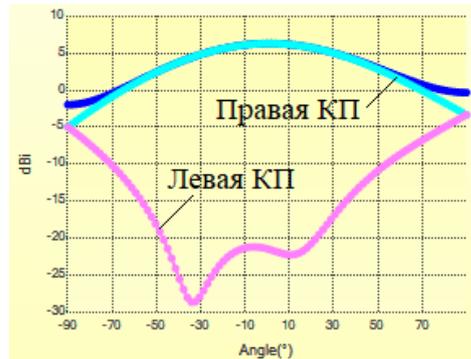
a



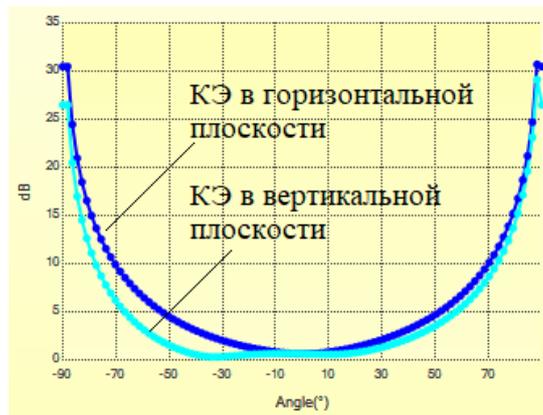
b



c



d



e

Рис. 6. Макет двухслойной антенны: а – вид сверху; б – частотная зависимость КСВ; с – угловая зависимость КУ (дБи) при правой и левой КП в горизонтальной плоскости; д – то же в вертикальной плоскости; е – КЭ(дБ) при правой КП

Fig. 6. Model of a two-layer antenna: a - top view; b - is the frequency dependence of SWR; c - is the angular dependence of the CU (dBi) at the right and left cp in the horizontal plane; d - is the same in the vertical plane; e - EC(dB) at right CP

В результате коэффициент усиления (КУ) составил 6,2 дБи (рис. 6, *c, d*), а ширина диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, соответственно,  $100^\circ$  и  $97^\circ$ . При этом кросс-поляризационная развязка была равна минус 27 дБ и коэффициент эллиптичности (КЭ) в направлении оси  $Z$  равен 0,8 дБ (рис. 6, *e*). Причем по уровню 3 дБ ширина КЭ составила  $110^\circ$  в вертикальной плоскости и  $80^\circ$  в горизонтальной плоскости рис. 6, *e*). На частоте 645 МГц получился КСВ = 1,28 (рис. 6, *b*), активная часть сопротивления составила 57,5 Ом, а реактивная индуктивная составляющая была равна 10 Ом.

#### Исследование параметров промышленно изготовленного образца трехслойной микрополосковой антенны

Для промышленного изготовления образца микрополосковой антенны с круговой поляризацией, предназначенного для работы в телеметрическом радиоканале, был выбран вариант трехслойной антенны с промышленно изготовленным симметричным полосковым делителем мощности (рис. 7). Это связано с тем, что такую антенну по сравнению с двухслойной сразу можно монтировать на любую поверхность, а также интервал коэффициента эллиптичности из сравнения изготовленных макетов у нее получился чуть шире.

Так как разработка антенны велась параллельно с разработкой всего передающего модуля, это определило габариты и способ подключения антенны к нему (рис. 7, *e*). В результате подключение радиочастотного соединителя вынесено в отсек, закрытый защитной крышкой. На модуле также предусмотрены шесть виброизоляторов для устойчивости к воздействиям.

На рисунке 7, *d* показана антенна, установленная на измерительный антенный сканер RFXpert RFX2 с рабочим полем  $40 \times 40$  см. Принцип работы последнего основан на математическом пересчете напряженности магнитного поля из ближней зоны излучения в дальнюю зону. В результате данный настольный сканер позволяет измерять характеристики антенн без использования безэховой камеры. Он дает возможность оценить диаграммы направленности дальнего поля излучения, измерить эффективную изотропно-излучаемую и полную излученную мощности. Результаты в ближней зоне дают представление о реактивных характеристиках антенны и помогают устранять неполадки в диаграммах направленности в дальней зоне. Также сканер можно интегрировать с анализатором цепей для измерения усиления, эффективности антенны, коэффициента отражения.

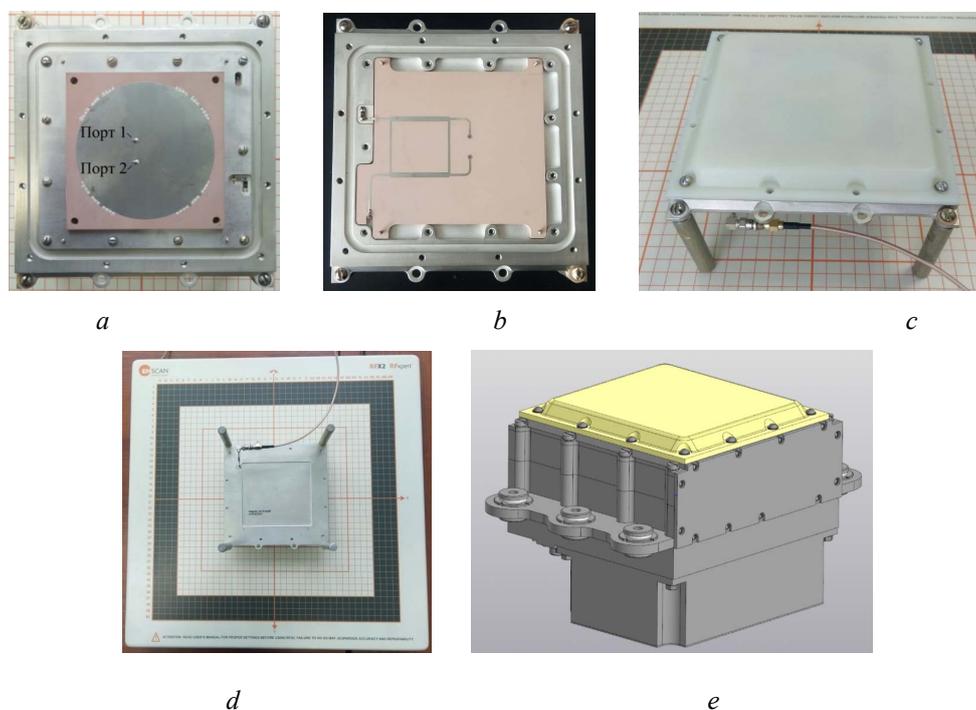


Рис. 7. Антенна: *a* – в сборе; *b* – ее делитель мощности; *c* – с крышкой (вид сверху); *d* – на измерительном сканере; *e* – 3D-модель передающего модуля с антенной

Fig. 7. Antenna: *a* - assembly; *b* - is its power divider; *c* - with lid (top view); *d* - on the measuring scanner; *e* - 3D model of the transmitting module with antenna

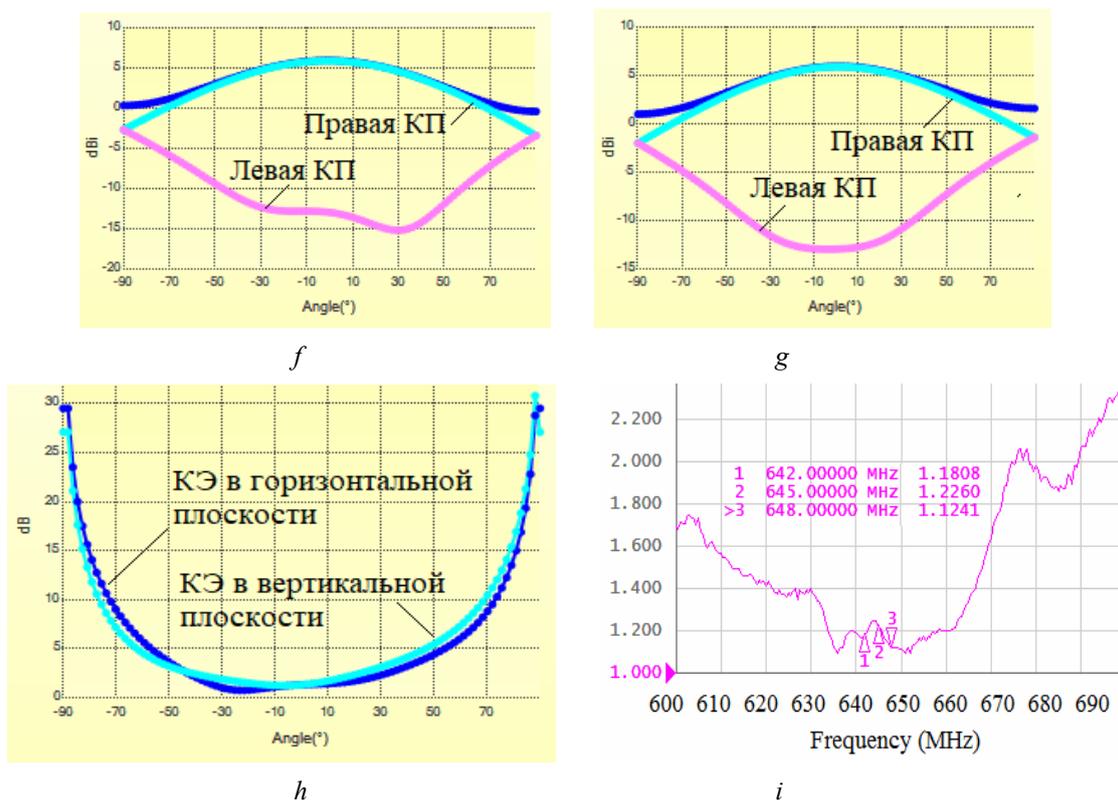


Рис. 7 (окончание): *f, g* – КУ антенны при правой и левой КП в горизонтальной и вертикальной плоскостях; *h* – КЭ при правой КП; *i* – КСВ от частоты

Fig. 7 (continued): *f, g* – CU antenna at the right and left gearbox in the horizontal and vertical planes; *h* – CE at right CP; *i* – SWR from frequency

Генератором сигналов был выбран анализатор спектра с функцией генератора Rohde&Schwarz FPL1007. Измерение проходило на единичной частоте 643 МГц при уровне мощности генератора плюс 10 дБм. КУ составил 6,1 дБи (рис. 7, *f, g*), а ширина диаграммы направленности в вертикальной и горизонтальной плоскостях, соответственно, 95° и 93°. При этом кросс-поляризационная развязка была равна минус 18 дБ и КЭ в направлении оси *Z* равен

1,2 дБ. Причем по уровню 3 дБ ширина КЭ составила 80° в вертикальной плоскости и 90° – в горизонтальной (рис. 7, *h*). На частоте 645 МГц получился КСВ = 1,23 (рис. 7, *i*), активная часть сопротивления составила 58,9 Ом, а реактивная индуктивная составляющая – 6,5 Ом.

В таблице дано сравнение характеристик расчетной модели антенны и результаты измерений опытного образца микрополосковой антенны.

#### Сравнение характеристик расчетной модели антенны и результаты измерений опытного образца микрополосковой антенны

#### Comparison of the characteristics of the design model of the antenna and the measurement results of the prototype microstrip antenna

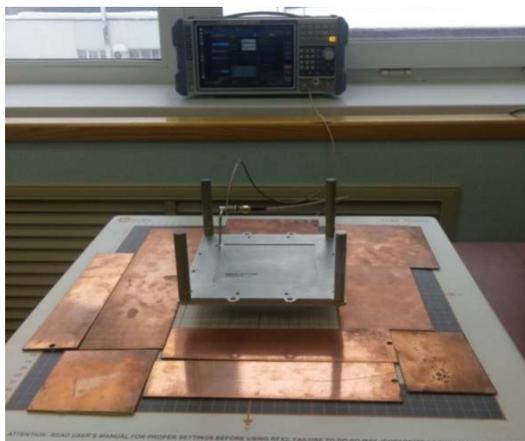
Характеристики	Технические требования	Расчетная модель	Опытный образец
КСВ в полосе частот (645 ± 3,14) МГц	не более 1,4	1,32	1,23
Коэффициент эллиптичности, дБ	не более 3	0,76	1,2
Коэффициент усиления, дБи	не менее 5	5,09	6,1
Ширина ДН в горизонтальной плоскости, град.	не менее 90	106,5	95
Ширина ДН в горизонтальной плоскости, град.	не менее 90	101,2	93
Габаритные размеры, мм	170×160×20		

Для оценки меры влияния эксплуатационных условий на характеристики антенны было исследовано влияние размещения дополнительных

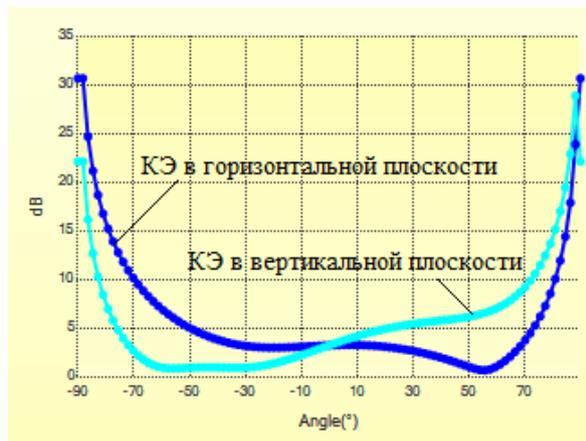
металлических экранов в ближней зоне излучения антенны (рис. 8, *a*). Результаты получились следующими (рис. 8, *b, c, d*): КУ = 6,8 дБи; ши-

рина ДН в вертикальной плоскости  $85^\circ$  и  $90^\circ$  – в горизонтальной (при этом в горизонтальной плоскости имел место поворот максимума диаграммы направленности на угол  $15^\circ$ ); кросс-поляризационная развязка составила минус 15 дБ; КЭ в направлении оси Z равен 3 дБ (что соответствует верхнему пределу, по которому считается,

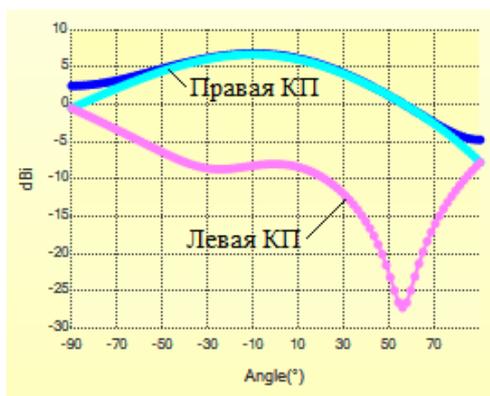
что антенна работает в круговой поляризации; при этом график имеет неравномерность в диапазоне углов от  $-80^\circ$  до  $80^\circ$ ). На частоте 645 МГц были измерены КСВ = 1,28; активная часть сопротивления сохранилась (была равна 58,9 Ом), а реактивная индуктивная составляющая возросла до 10 Ом.



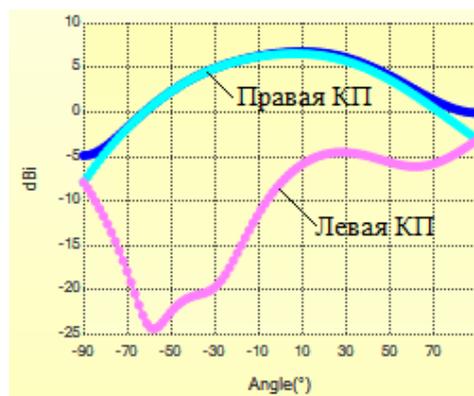
a



b



c



d

Рис. 8. Влияние металлических экранов: a – условия эксперимента; b – угловая зависимость КЭ; c, d – угловые зависимости КУ при правой и левой КП в горизонтальной (c) и вертикальной (d) плоскостях

Fig. 8. Influence of metal screens: a - experimental conditions; b - angular dependence of FE; c, d - angular dependencies of the CU in the right and left CP in the horizontal (c) and vertical (d) planes

**Заключение**

Рассмотренные два варианта конструкции микрополосковой антенны дециметрового диапазона предназначены для телеметрических радиоканалов, передающих информацию внутри замкнутых металлических объектов. Они работают в режиме правой круговой поляризации с коэффициентом эллиптичности 1,2 дБ. При этом КСВ в рабочей полосе частот не превышает 1,32; коэффициент усиления не менее 5 дБи; ширина диаграмм направленности 95 и 93 градуса.

Сравнение характеристик расчетной модели антенны и результатов измерений ее опытного образца показали достаточную точность ими-

тационного моделирования в САПР CST Microwave Studio. При этом сходство модели и реальной антенны зависит от правильности и учета всех параметров при моделировании.

**Библиографические ссылки**

1. Liu J. H., Li Y. X., Liang Z. X. A planar quasi-magnetelectric circularly polarized antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, vol. 64, no. 2, pp. 2108-2114.
2. Shi Y. and Liu J. Wideband and low-profile omnidirectional circularly polarized antenna with slits and shorting-vias. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, vol. 15, no. 2.

3. Xu R., Li J., Kun W. A broadband circularly polarized crossed-dipole antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2016, vol. 64, no. 10, pp. 4509-4513.

4. Chu Q. X., Ye M., Li X. R. A low-profile omnidirectional circularly Polarized Antenna using planar sector-shaped endfire elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1611-1694.

5. Xu R., Li J., Qi Y., Guangwei Y., Yang J. A design of triple-wideband triple-sense circularly polarized square slot antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2017, vol. 16, pp. 1763-1766.

6. Sun H., Zhu H., Ding C., YGuo. J. Wideband planarized dual-linearly-polarized dipole antenna and its integration for dual-circularly-polarized radiation. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2018, vol. 17, no. 12, pp. 2289-2293.

7. Ding X., Zhao Z., Yang Y., Nie Z., Liu Q. H. A compact unidirectional ultra-wideband circularly polarized antenna based on crossed tapered slot radiation elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 7353-7358.

8. Sun L., Li Y., Zhang Z., Feng Z. Low-profile compact circularly polarized slot-etched PIFA using even and odd modes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 4189-4194.

9. Sun L., Li Y., Zhang Z., Feng Z. Low-profile compact circularly polarized slot-etched PIFA using even and odd modes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 4189-4194.

10. Wang Lei, Yao Bin, Fang Wenxiao, Huang Chuangmian, Yun Huang, Yunfei En. New Circular-Slot Circularly Polarized Antenna with Modified Characteristic. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, Article ID 5458069, 8 p.

11. Liangyuan Liu, Xiangqun Shi. Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Monopole Antenna with a Via-Free CRLH-TL Unit Cell. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, Article ID 7168470, 7 p. <https://doi.org/10.1155/2022/7168470>

12. Jin-Ku Liu, Xi-Lai Zhao, Chen-Xin Zhang, Zan-Yang Wang. A Novel Low Axis Ratio Double-Circularly Polarized Microstrip Antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, Article ID 8947697, 7 p. <https://doi.org/10.1155/2022/8947697>

13. Wei Xu, Jingchang Nan, Mingming Gao. Compact Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Antenna with Characteristic Mode Analysis. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2022, Article ID 9002700, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2022/9002700>

14. Wei Xu, Jingchang Nan, Jing Liu. Broadband Circularly Polarized Antennas with Compact Radiator Using Characteristic Mode Analysis. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 9724535, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/9724535>

## References

1. Liu J. H., Li Y. X., Liang Z. X. A planar quasi-magnetelectric circularly polarized antenna. *IEEE*

*Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 64, no. 2, pp. 2108-2114.

2. Shi Y. and Liu J. Wideband and low-profile omnidirectional circularly polarized antenna with slits and shorting-vias. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, vol. 15, no. 2, pp. 686-68.

3. Xu R., Li J., Kun W. A broadband circularly polarized crossed-dipole antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2016, vol. 64, no. 10, pp. 4509-4513.

4. Chu Q. X., Ye M., Li X. R. A low-profile omnidirectional circularly Polarized Antenna using planar sector-shaped endfire elements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, vol. 64, no. 2, pp. 1611-1694.

5. Xu R., Li J., Qi Y., Guangwei Y., Yang J. A design of triple-wideband triple-sense circularly polarized square slot antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2017, vol. 16, pp. 1763-1766.

6. Sun H., Zhu H., Ding C., Guo. J. Wideband planarized dual-linearly-polarized dipole antenna and its integration for dual-circularly-polarized radiation. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, 2018, vol. 17, no. 12, pp. 2289-2293.

7. Ding X., Zhao Z., Yang Y., Nie Z., Liu Q. A compact unidirectional ultra-wideband circularly polarized antenna based on crossed tapered slot radiation elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 7353-7358.

8. Sun L., Li Y., Zhang Z., Feng Z. Low-profile compact circularly polarized slot-etched PIFA using even and odd modes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 4189-4194.

9. Sun L., Li Y., Zhang Z., Feng Z. Low-profile compact circularly polarized slot-etched PIFA using even and odd modes. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2019, vol. 67, no. 6, pp. 4189-4194.

10. Wang Lei, Yao Bin, Fang Wenxiao, Huang Chuangmian, Yun Huang, Yunfei En. New Circular-Slot Circularly Polarized Antenna with Modified Characteristic. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 5458069, 8 p.

11. Liangyuan Liu, Xiangqun Shi. Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Monopole Antenna with a Via-Free CRLH-TL Unit Cell. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 7168470, 7 p. <https://doi.org/10.1155/2022/7168470>

12. Jin-Ku Liu, Xi-Lai Zhao, Chen-Xin Zhang, Zan-Yang Wang. A Novel Low Axis Ratio Double-Circularly Polarized Microstrip Antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 8947697, 7 p. <https://doi.org/10.1155/2022/8947697>

13. Wei Xu, Jingchang Nan, Mingming Gao. Compact Broadband Circularly Polarized CPW-Fed Antenna with Characteristic Mode Analysis. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 9002700, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2022/9002700>

14. Wei Xu, Jingchang Nan, Jing Liu. Broadband Circularly Polarized Antennas with Compact Radiator Using Characteristic Mode Analysis. *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, Article ID 9724535, 13 p. <https://doi.org/10.1155/2022/9724535>

## Development of Microstrip Decimeter Antennas with Circular Polarization

R.A. Buzanov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S.A. Shirokikh, Design Engineer, Izhevsk Radio Plant LLC, Izhevsk, Russia

K.V. Shishakov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*Modern design variants of microstrip antennas with circular polarization are considered, in which circular polarization is created using single-point and two-point power supply. To manufacture the studied antenna model with circular polarization, the simplest form of the antenna was chosen; the one with a radiator in the form of a continuous circle, which is powered by a two-point scheme. With regard to use in intra-object telemetry systems, the frequency of operation range of 640 ... 650 MHz was chosen. Two options for a two-point power supply of such an antenna were studied - with the help of a symmetrical and asymmetric square strip bridge. Calculation, coordination and tuning simulation of power divider variants were performed. As a result, the manufactured layout of the first antenna design turned out to be three-layered, the second - two-layered. The technique for creating antennas includes an estimated calculation of geometric dimensions, which was further refined using computer simulation in the CST Microwave Studio program. Frequency tuning of the completed antenna layouts is carried out using adjusting teeth along the contour of the round radiator.*

*The study of the created antenna layouts showed better manufacturability and stability of the characteristics of a two-layer structure compared to a three-layer one. Therefore, a two-layer round antenna with a point-to-point power supply was chosen for production. It is designed for telemetric radio channels inside enclosed spaces. The measurements performed showed that the manufactured antenna operates in right-hand circular polarization with an ellipticity factor of 1.2 dB. The standing wave ratio in the operating frequency band of 640...650 MHz did not exceed 1.32, the gain was at least 5 dBi, the width of the radiation patterns in two planes was 95 and 93 angular degrees, respectively.*

*The antenna provides for an operation mode as a transceiver, since the decoupling of the receiving and transmitting paths is carried out due to different polarization, for which it is necessary to connect the second input of the power divider instead of a balanced resistor to the receiving device.*

**Keywords:** microstrip antenna, circular polarization, point-to-point power supply, radiation pattern, standing wave ratio, gain, ellipticity ratio, decimeter range.

Получено 14.07.2022

### Образец цитирования

Бузанов Р. А., Широких С. А., Шишаков К. В. Разработка микрополосковых антенн дециметрового диапазона с круговой поляризацией // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 47–61. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-47-61.

### For Citation

Buzanov R.A., Shirokikh S.A., Shishakov K.V. [Development of Microstrip Decimeter Antennas with Circular Polarization]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 47-61 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-47-61.