



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.6>

УДК: 621.383.933

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННО-ФИДЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА КОРПУСЕ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ

Коган Б.Л., Курушин А.А

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2025 г.

Аннотация. Антенная решетка, состоящая из двух передающих, и двух приемных антенн, рассчитывается и оптимизируется методом конечных элементов в системе электродинамического моделирования HFSS ANSYS. Моделирование патч-антенн было выполнено, используя способы уменьшения размеров антенн и уменьшения их резонансных частот. Это было сделано, создавая сложные щелевые вырезы на поверхности патч-антенн. С помощью асимптотических методов расчета был выполнен расчет характеристик антенной системы с учетом корпуса космического корабля.

Ключевые слова: антенная решетка, спутниковая антенна, диаграмма направленности, осевое отношение, микрополосковая антенна, щелевая антенна, асимптотические методы расчета, HFSS ANSYS, Savant.

Автор для переписки: Курушин Александр Александрович, kurushin@mail.ru

Введение

На корпусах самолетов и космических кораблей устанавливают многочисленные антенно-фидерные системы, выполняющие роль приема и передачи радиосигналов в каналах связи. Влияние корпусов, металлических и диэлектрических поверхностей значительно влияют на диаграммы направленности антенных систем. Антенны частот находятся на разворачиваемых опорах, проводимость которого близка к проводимости металла. Опора крепится к корпусу спутника, который влияет на согласование, диаграмму направленности и другие характеристики антенны. Бортовые антенны, предназначенные для связи с приемо-передающими станциями на земле, должны иметь круговую поляризацию, обратную поляризации антенн на противоположной стороне.

Анализируемая антенно-фидерная система (АФС) должна работать в двух диапазонах 387-390 МГц и 312-315 МГц. АФС состоит из 4-х пач-антенн (рис. 1). Для упрощения систем развязки и питания элементов антенной решетки был выбран метод возбуждения пач-антенн с помощью одной точки питания (т.е. с одним портом).

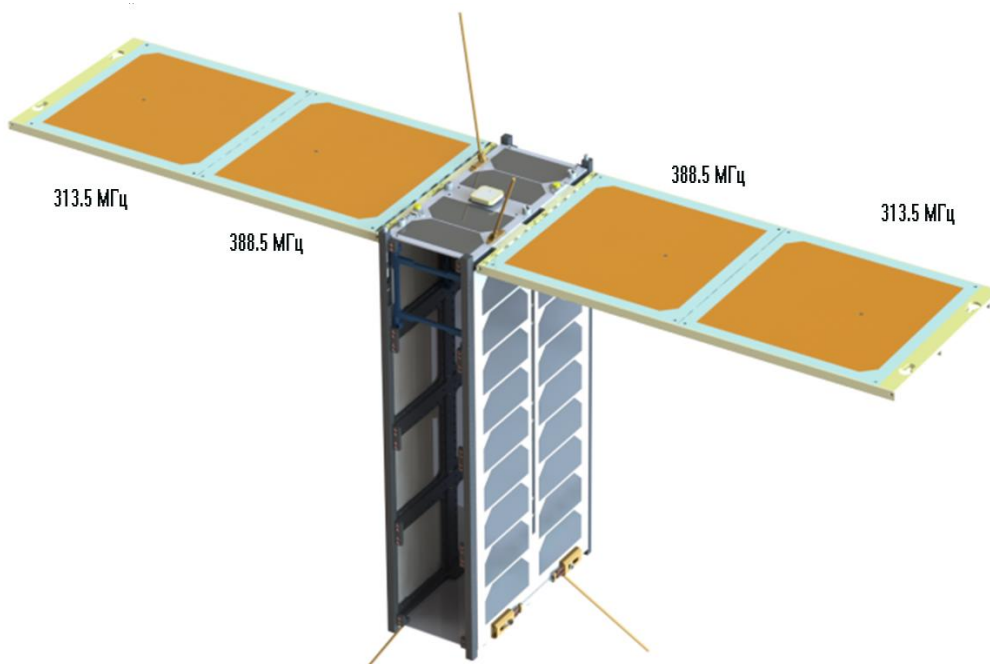


Рис. 1. Антенно-фидерная система, расположенная на стойке солнечных батарей вблизи с телом космического корабля.

Расчет диаграммы направленности антенны, установленной на корпусе самолета или спутника, можно выполнить, используя асимптотические методы расчета физической и геометрической оптики [1-4]. С помощью ассистента Savant программы HFSS ANSYS [1] возможно рассчитать характеристики (диаграмму сканирования, слепые углы, ложные цели) антенной решетки, стоящей на самолете. Метод *SBR* (Shooting and Bouncing Rays), используемый в программе Savant, позволяет решать задачи рассеяния для антенн, расположенных на объектах, составляющих тысячи длин волн, т.е. тех задач, решение которых проблематично, используя метод конечных элементов [2]. Чтобы рассчитать диаграмму направленности АФС, в этом методе рассчитываются все лучи, идущие от антенн к рассеивающей геометрии [3], таким образом, определяя, какие поверхности непосредственно освещены (рис. 2).

Запущенные геометрические лучи, возбужденные антенной, представляют собой расходящиеся объемно-лучевые трубки, которые «окрашивают» токи на поверхности платформы в соответствии с граничными условиями. Эти токи в свою очередь излучают поля в дальнюю зону, а также формируют ближнее поле в точках наблюдения, или воздействуют на антенну R_X для создания вклада поля рассеяния. Далее из точек, в которых лучи падают на поверхности, формируется набор отраженных лучей (рис. 2).

Алгоритм *SBR*, реализованный в HFSS ANSYS интегрирует возбуждение токов от всех прочерченных лучей на основании выражения [1]:

$$\bar{E}_s(\bar{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S'} dS' \left[(\hat{n}' \cdot \bar{E}) \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} + (\hat{n}' \times \bar{E}) \times \nabla' \frac{e^{-jkR}}{R} - j\omega\mu(\hat{n}' \times \bar{H}) \frac{e^{-jkR}}{R} \right], \quad (1)$$

где $\bar{E}_s$ – рассеянное электрическое поле в точке наблюдения, S' – область действия лучей в точках падения на поверхность, $\bar{E}$ и $\bar{H}$ – суммарные электрические и магнитные поля на поверхности при воздействии падающего и отраженного лучей, $\hat{n}'$ – нормаль к поверхности, $\bar{r}$ – положение вектора направления луча к точке наблюдения, R – расстояние от источника до точки наблюдения, а μ_0 – магнитная проницаемость в свободном пространстве.

Выражение (1) используется в программе Savant для вычисления вклада рассеянного поля в любой точке наблюдения. Для углов наблюдения в дальнем поле, функция Грина $\frac{e^{-jkR}}{R}$ в ур. (1) заменяется фазовым коэффициентом, зависящим от выбранной точки отсчета фазы.

Если в анализируемой структуре имеется приемная антенна R_x , то комплексная амплитуда приемного сигнала равна

$$b = \frac{-j\lambda}{\sqrt{4\pi\eta_0}} \bar{E} \cdot \bar{d}_{R_x}, \quad (2)$$

где d_{R_x} – вектор направленности дальнего поля антенны R_x , E – падающее или рассеянное электрическое поле в точке антенны R_x , η_0 – импеданс свободного пространства. Расчет комплексной амплитуды приемного сигнала позволяет решить задачу электромагнитной совместимости.

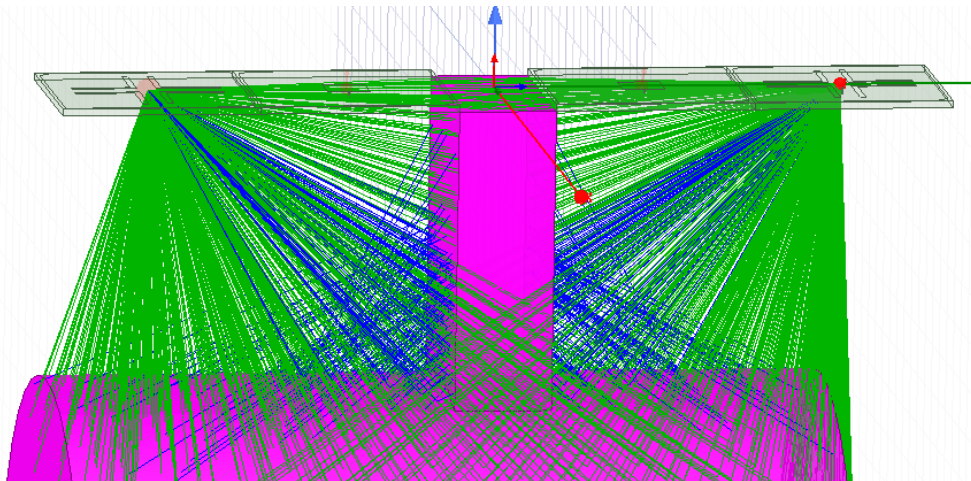


Рис. 2. Распределение падающих от антенн лучей, и также отраженных и преломленных лучей, прочерчиваемых в пространстве АФС.

Рассеянное поле R_x вычисляется отдельно на каждом сегменте АФС, а векторные продукты тока затем когерентно суммируются. Источники тока представляют антенну как излучатель, а также они служат для характеристики антенны R_x в качестве приемника в соответствии с теоремой взаимности, и этот факт используется для определения комплексной амплитуды сигнала для приемной антенны R_x . Таким образом, Savant решает задачу оценки взаимного влияния отдельных антенн, а также корпуса на характеристики антенно-фидерной системы.

1. Расчет и моделирование элементов антенно-фидерной системы

Выполним анализ патч-антенны на подложке размером 215×215 мм, толщиной 7 мм и диэлектрической проницаемостью 3.88. В процессе анализа оказалось, что резонансная частота антенны на такой подложке может быть равна 388.5 МГц только в том случае, если размер патч-антенны равен половине длины волны 215 мм (рис. 3). Ниже показано, как можно уменьшить габариты патч-антенны, доведя ее до требуемых в конструкции спутниковой АФС 205 мм х 205 мм.

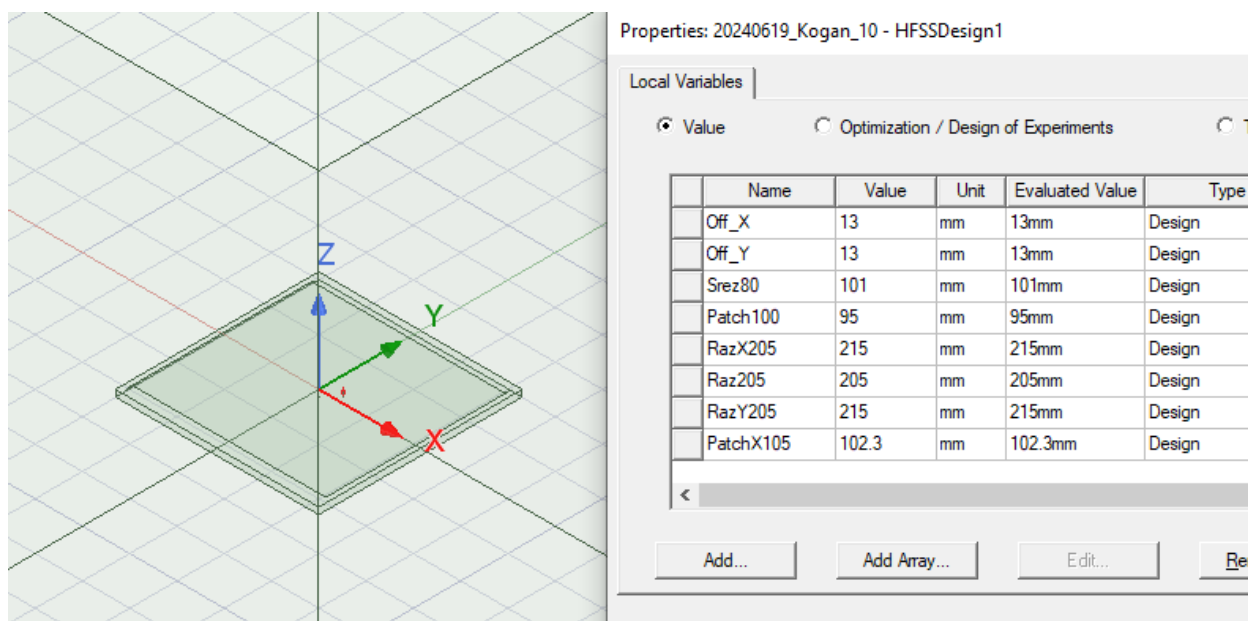


Рис. 3. Конструкция и размеры патч- антенны со средней частотой 388.5 МГц.

Анализ антенны рис. 3 показал, что при создании разницы размеров сторон до 3 мм (что аналогично добавлению среза угла), в частотной характеристике коэффициента отражения появляются два горба, а осевое отношение, характеризующее степень круговой поляризации, AR, находится в районе 2-х.

Параметры патч-антенны, включающие геометрию, положение портов и угол среза, показаны в таблице на рис. 3. АФС из двух антенн (рис. 1), обладает характеристиками, сходными с характеристиками ее эквивалентной схемы (рис. 4).

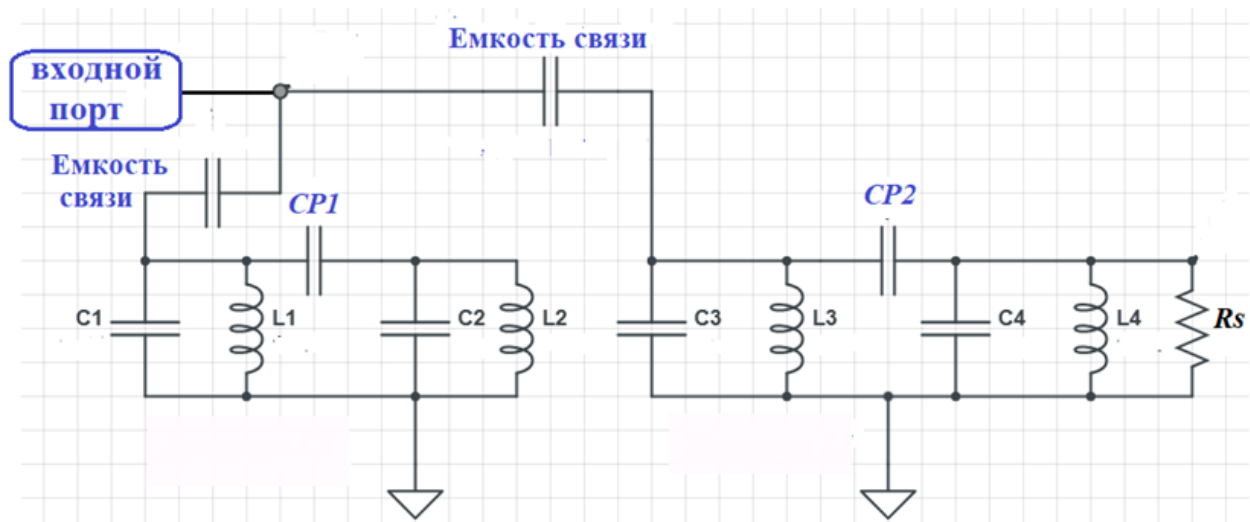


Рис. 4. Эквивалентная схема двух связанных антенн с круговой поляризацией.

Оптимизация антенны с одним портом возбуждения показывает, что размеры патча должны быть такими, чтобы виртуальные резонансные частоты, формирующиеся парами противоположных ребер патч-антенны, были смещены относительно друг друга для получения двухгорбой частотной характеристики. Эквивалентная схема такой антенны (рис. 4) показывает, что резонансные контуры L_1 - C_1 и L_2 - C_2 формируют резонансные частоты патч-антенны диапазона 388.5 МГц, а резонансные контуры L_3 - C_3 и L_4 - C_4 формируют резонансные частоты в диапазоне 313.5 МГц. Подбором этих элементов можно получить частотные характеристики антенн, степень поляризации которой регулируется элементами $CP1$ и $CP2$. На рис. 5 показаны частотные характеристики коэффициента отражения первоначальной антенны размером 215×215 мм для нескольких срезов угла патч-антенны.

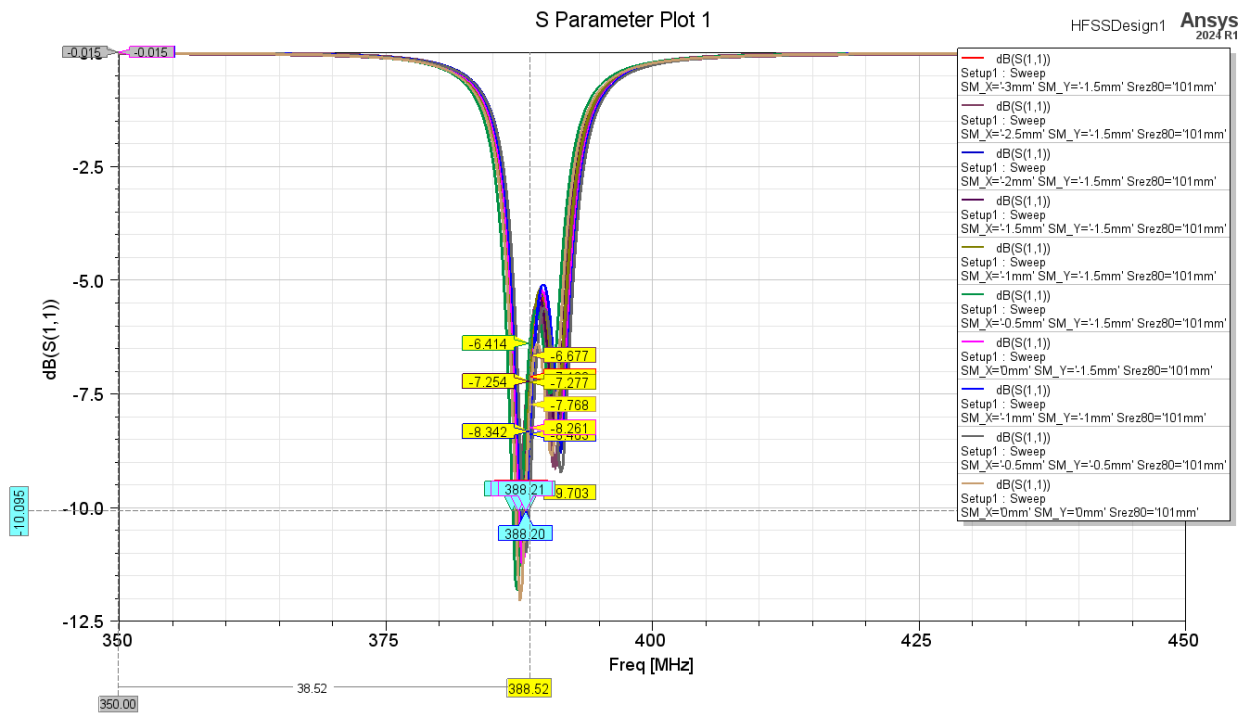


Рис. 5. Частотные характеристики коэффициента отражения патч-антенны в процессе настройки (изменении среза угла).

Степень круговой поляризации будем оценивать по ширине осевого отношения AR в диапазоне углов θ . Отметим также, что рабочий диапазон частот пач-антенны с круговой поляризацией ограничивается как раз зависимостью AR (рис. 6) в диапазоне частот.

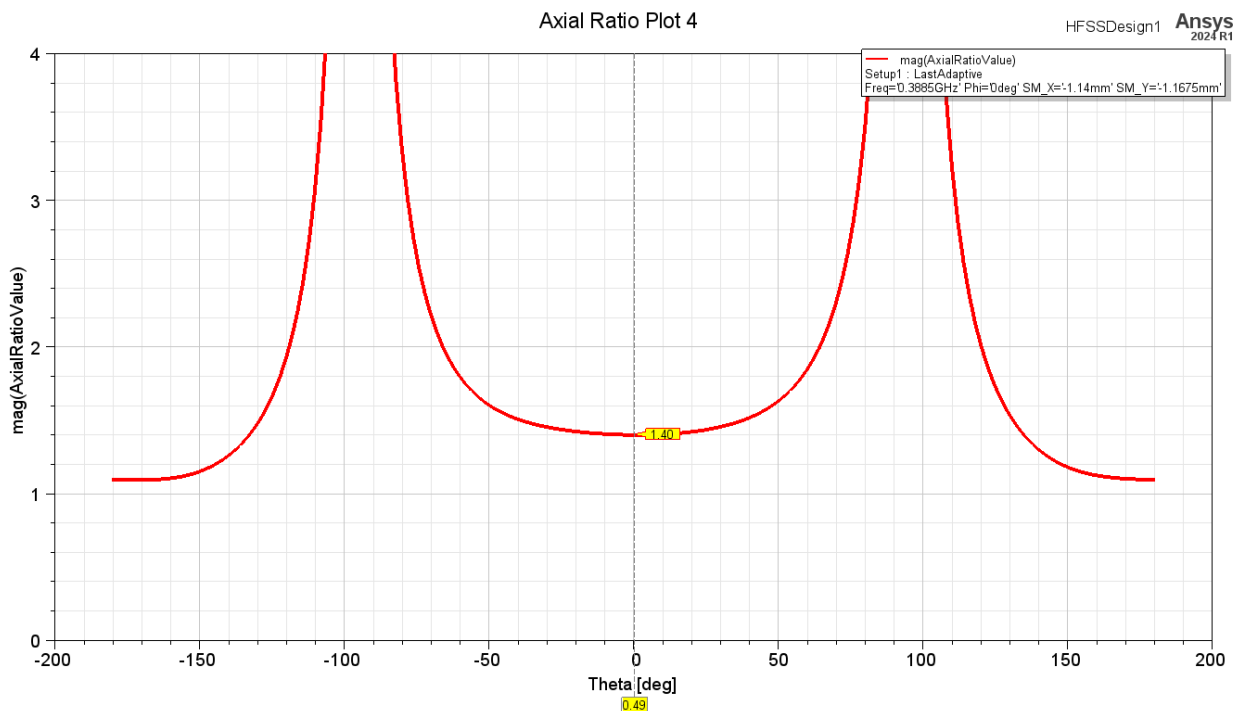


Рис. 6. Осевое отношение пач-антенны на частоте 388.5 МГц.

Характеристики патч-антенны размером 215×215 мм удовлетворяют требуемым данным для пропускания сигналов с заданной скоростью передачи данных на частоте 388.5 МГц. Для создания антенны на частоту 313.5 МГц размер будет еще больше. Следовательно, нужно предложить способы уменьшения размера антенны. Один из методов заключается в переводе патч-антенны в вид, схожий с F-антенной, т.е. смещения ее референсной точки (в которой напряженность поля равна нулю) и таким образом увеличении размера рабочего вибратора. Однако расчеты показали, что в этом случае рабочая полоса антенны значительно уменьшается, появляются побочные типы волн и полосы частот, в которых антенна излучает.

2. Уменьшение габаритов и резонансной частоты с помощью диагональных щелей в патч-антенне

Рассмотрим варианты с уменьшением рабочей частоты за счет увеличения ребер патч-антенны [5], внося в форму диагональные щели и усеченные углы (рис. 7).

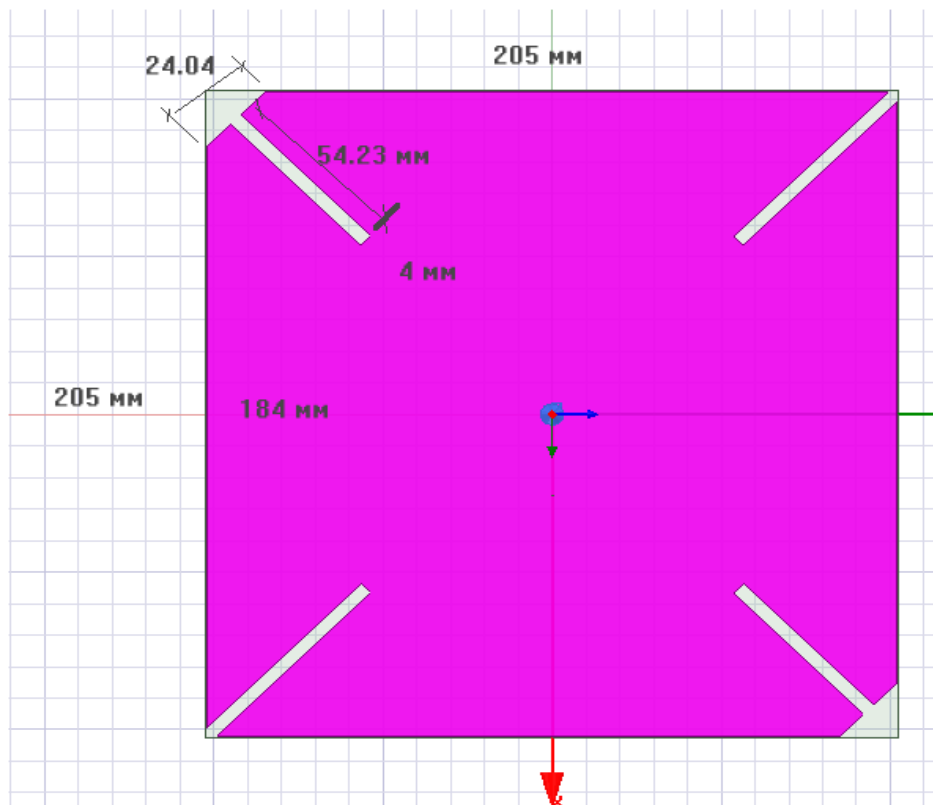


Рис. 7. Антенна со щелями на частоту 388.5 МГц. Толщина подложки 7 мм, диэлектрическая проницаемость 3.88.

Частотная характеристика коэффициента отражения антенны, показанной на рис. 7, приведена на рис. 8.

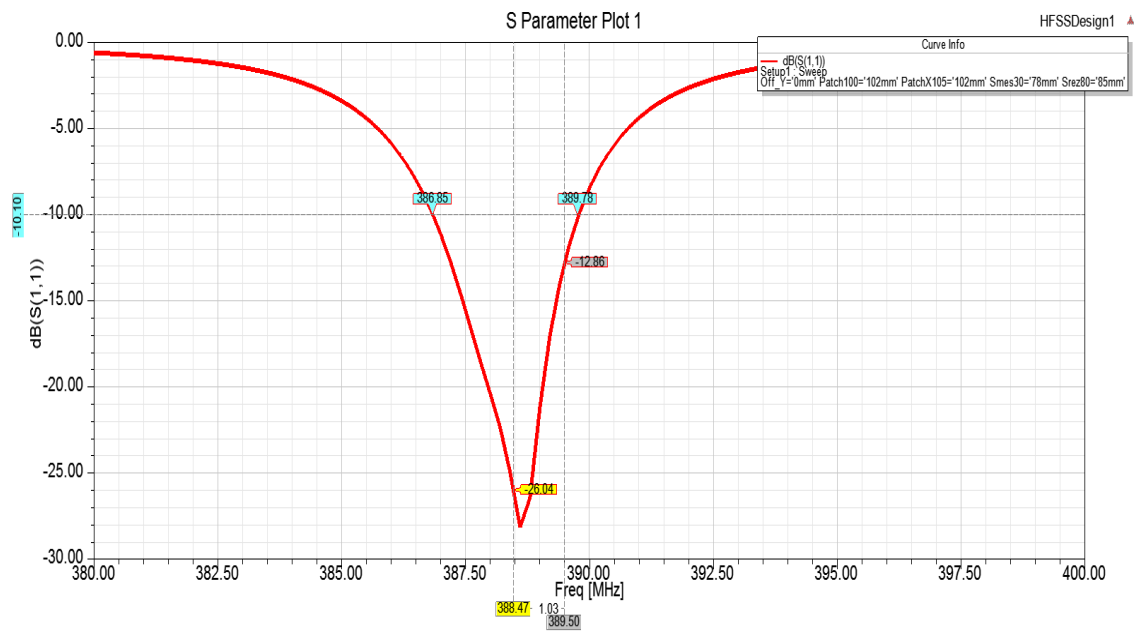


Рис. 8. Частотная характеристика коэффициента отражения антенны с диагональными щелями.

Смещение порта от центра антенны равно 26 мм, последовательно с портом стоит емкость около 30 пФ. Центральная перемычка радиус 0.5 мм. Частотная характеристика имеет центральную частоту 388.5 МГц и полосу 30 МГц (рис. 8).

Рассмотрим частотную зависимость реальной и мнимой части входного импеданса пач-антенны с одним входом (рис. 9).

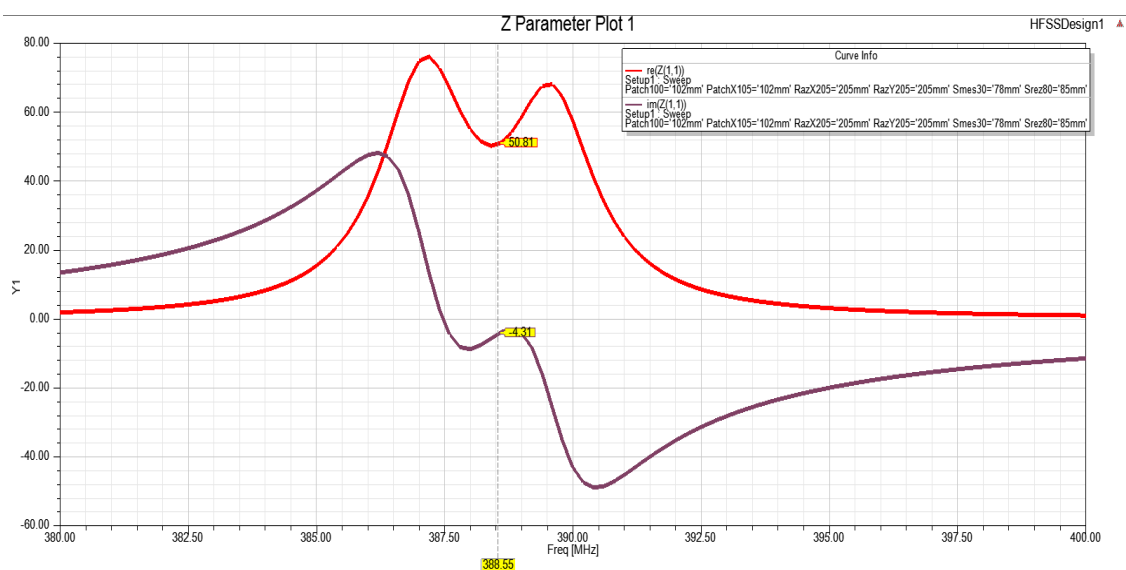


Рис. 9. Реальная и мнимая части входного импеданса пач-антенны с уменьшенными размерами.

Эти характеристики (рис. 9) носят двугорбый характер, что объясняется тем, что пары ребер в одной и другой оси имеют разные резонансные частоты. Именно такой характер коэффициента отражения способствует созданию круговой поляризации патч-антенны. Зависимость осевого отношения AR от угла θ показана на рис. 10.

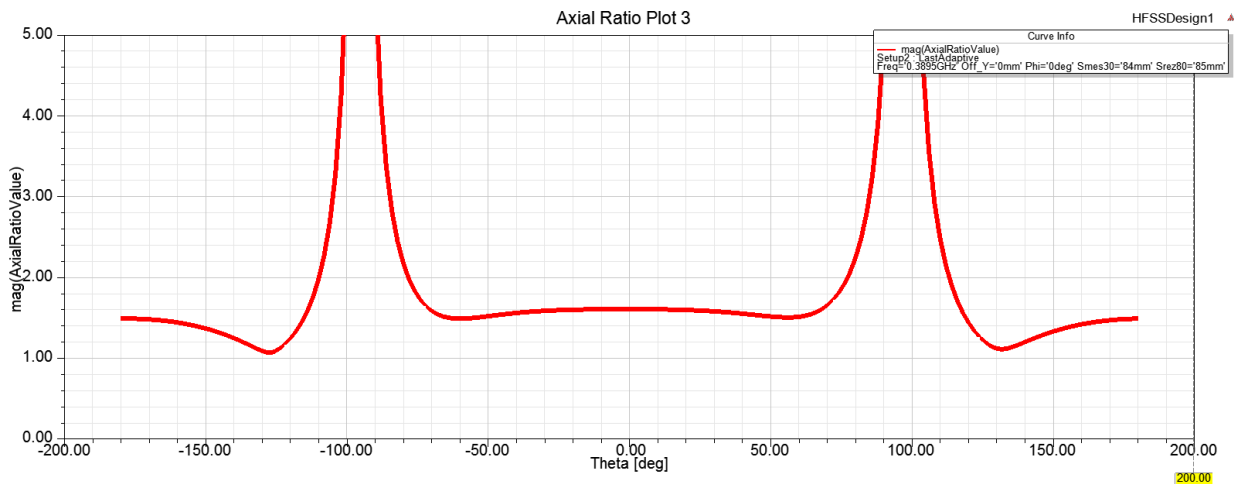


Рис. 10. Осевое отношение антенны на частоте 388.5 МГц.

Трехмерная диаграмма направленности отдельной патч-антенны на частоте 388.5 МГц показана на рис. 11.

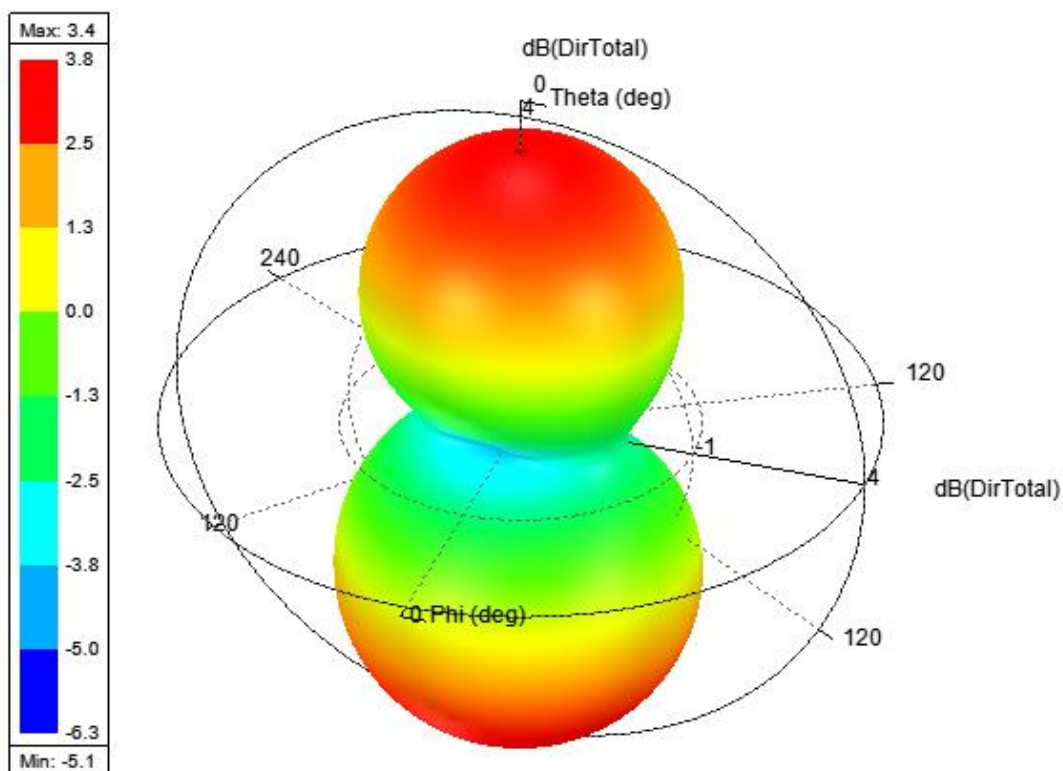


Рис. 11. 3D диаграмма направленности патч-антенны.

Из рис. 11 видим, что антенна излучает и вверх, и вниз – земляная подложка почти такая же, как размер патч-антенны. Известно, что вырезы в форме патч-антенны, которые уменьшают резонансные частоты, и приводят к уменьшению габаритов антенны, можно предложить много вариантов. Предельными значениями уменьшения резонансных частот можно считать применение фокальное деление формы патч-антенны. Предельным значением в этом случае считается уменьшение размера патч-антенны в два раза и уменьшение резонансной частоты в два раза.

3. Антенна с квадратным вырезом

Другим способом уменьшения размеров антенны при сохранении и даже уменьшения резонансной частоты является создания выреза, в виде щели, или даже в виде квадрата (рис. 12)

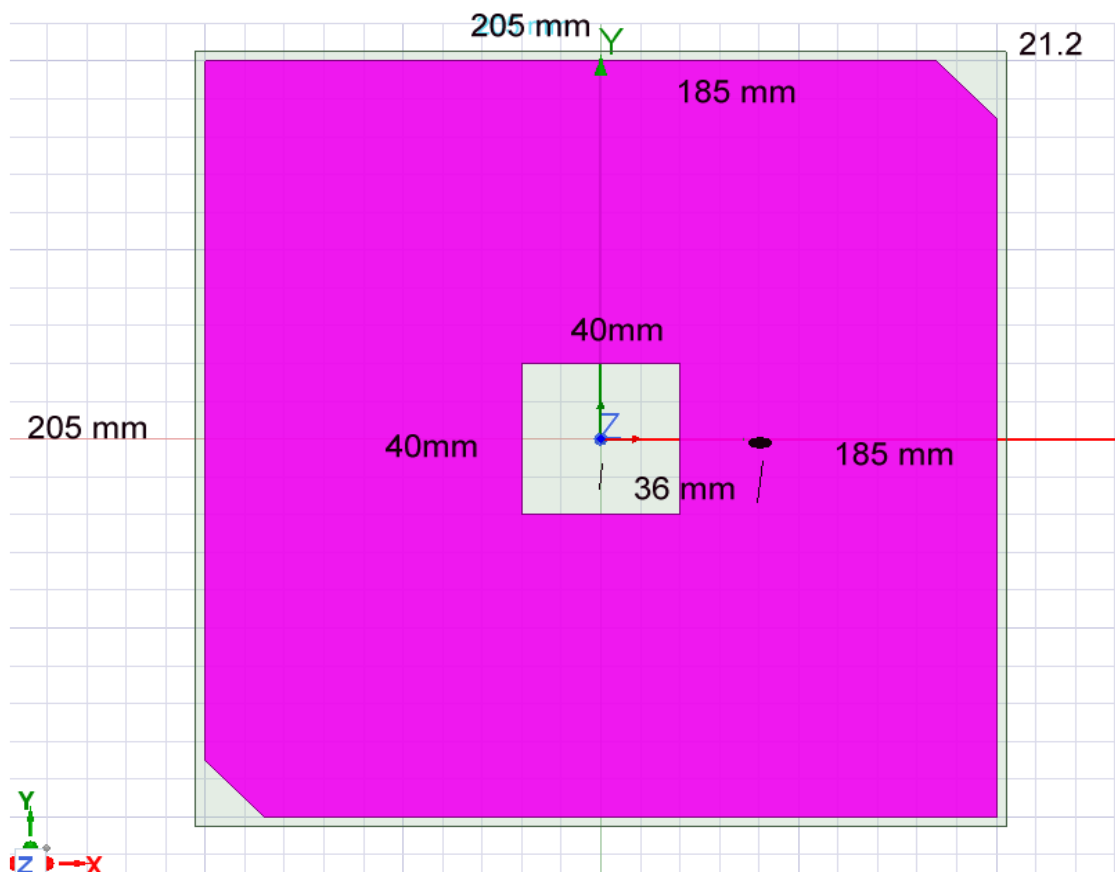


Рис. 12. Вид патч-антенны с квадратным вырезом.

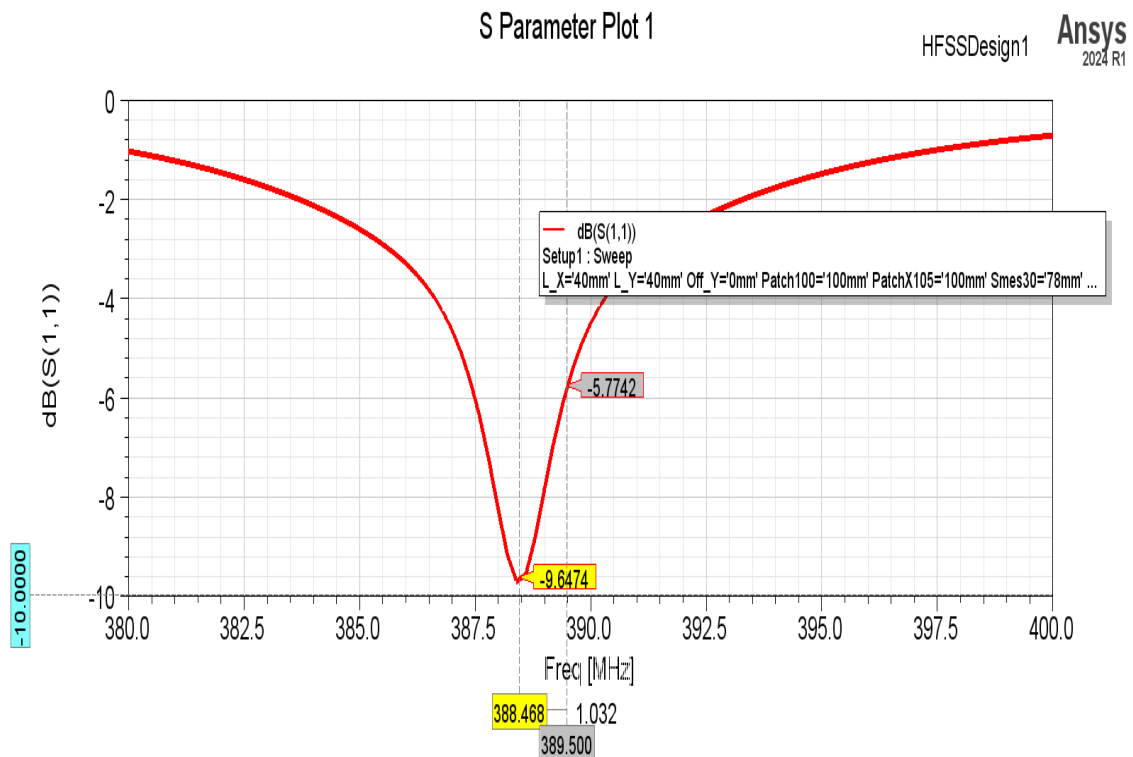


Рис. 13. Частотная характеристика коэффициент отражения.

АЧХ коэффициента отражения антенны при смещении порта от центра 36 мм и последовательной с портом емкостью 20 пФ, показана на рис. 13, а АЧХ реальной и мнимой части входного импеданса антенны – на рис. 14. Для получения наиболее широкой полосы по осевому отношению, среднюю частоту провала необходимо получить равной 388.5 МГц.

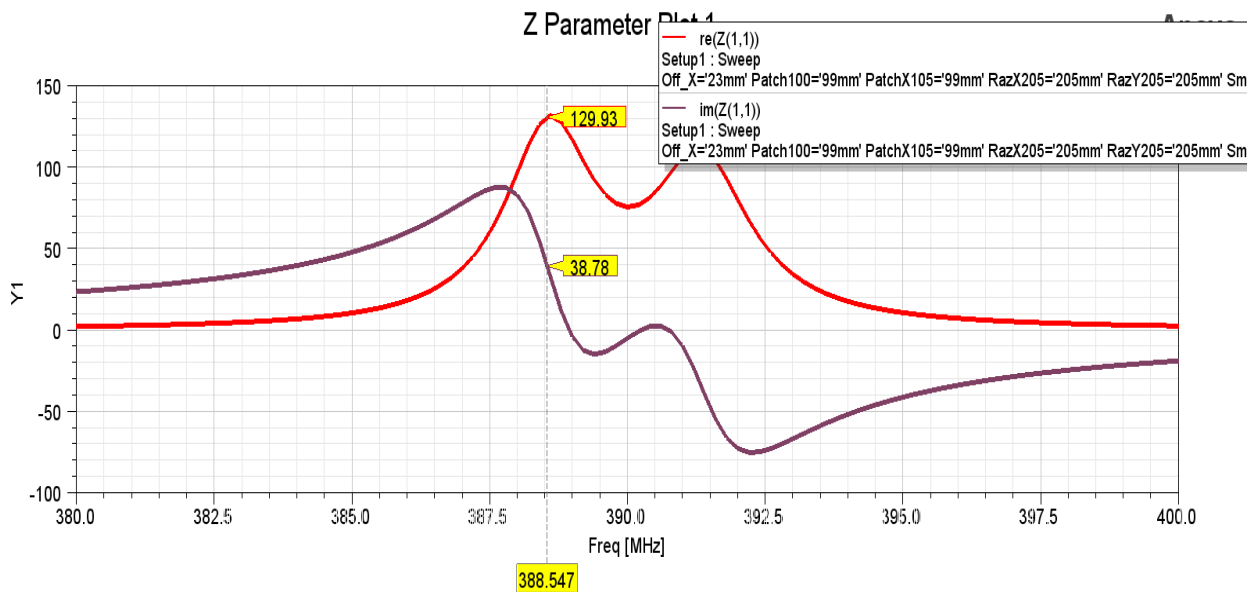


Рис. 14. Реальная и мнимая части входного импеданса патч-антенны.

В этом случае достигнуто, в результате оптимизации, осевое отношение AR меньше 2 (рис. 15).

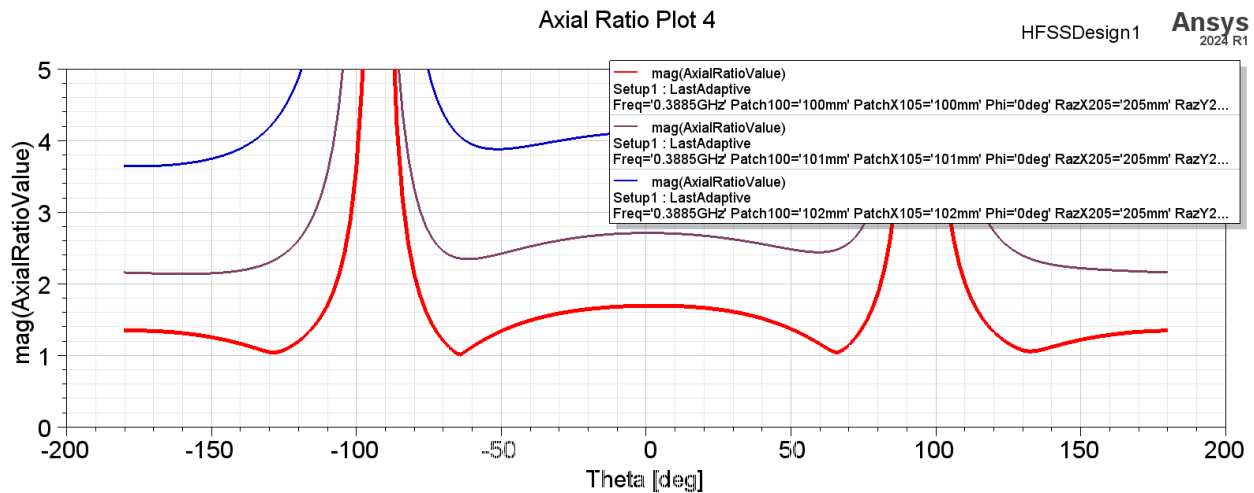


Рис. 15. Осевое отношение пач-антенны со щелевым вырезом в виде квадрата для разных размеров внутреннего вырезанного квадрата.

Максимальная направленность данной антенны равна 3.13 дБ. Для увеличения направленности, и усиления антенны создается антенная решетка из двух антенн, разнесенных на расстояние 100 мм (рис. 16), что соответствует ширине металлической опоры АФС (рис. 1)

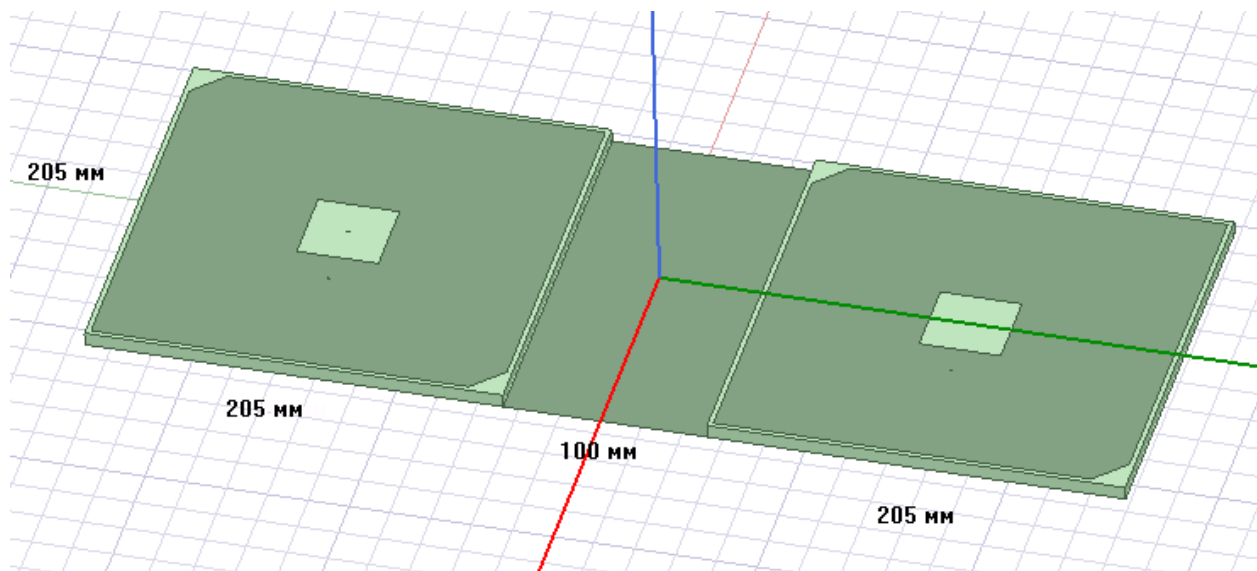


Рис. 16. Две антенны с квадратным вырезом разнесенные на расстояние 100 мм, между которым металлическая плоскость.

Эта антенная решетка из двух антенн имеет два порта. Коэффициенты отражения антенн несколько отличаются (рис. 17, из-за отсутствия полной симметрии).

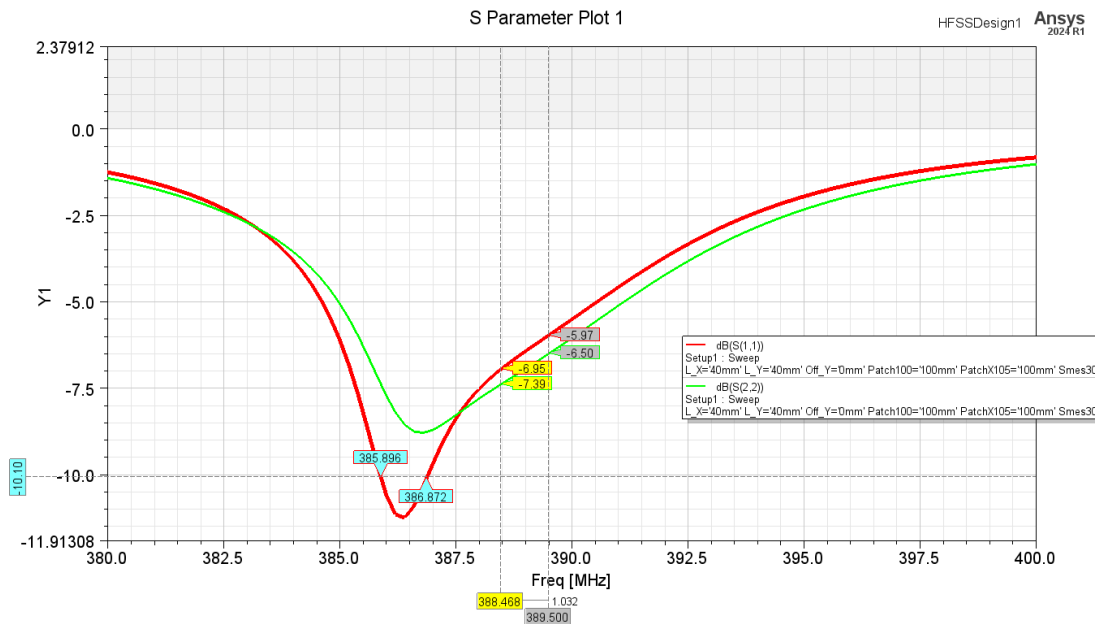


Рис. 17. Частотная характеристика коэффициента отражения со стороны портов двух связанных антенн.

Сравнивая коэффициенты отражения от портов антенн в присутствии и отсутствии связи со второй антенной, можно показать, что для получения настройки антенны с учетом связи, необходимо антенну настраивать на скорректированное значения $S_{11_корр} = S_{11} + S_{21}$ [7]. Известно, что патч-антенны имеют индуктивный характер входного импеданса, поэтому последовательно с антенной включается емкость 10 пФ.

При синфазном возбуждении обеих антенн осевое отношение AR показано на рис. 21.

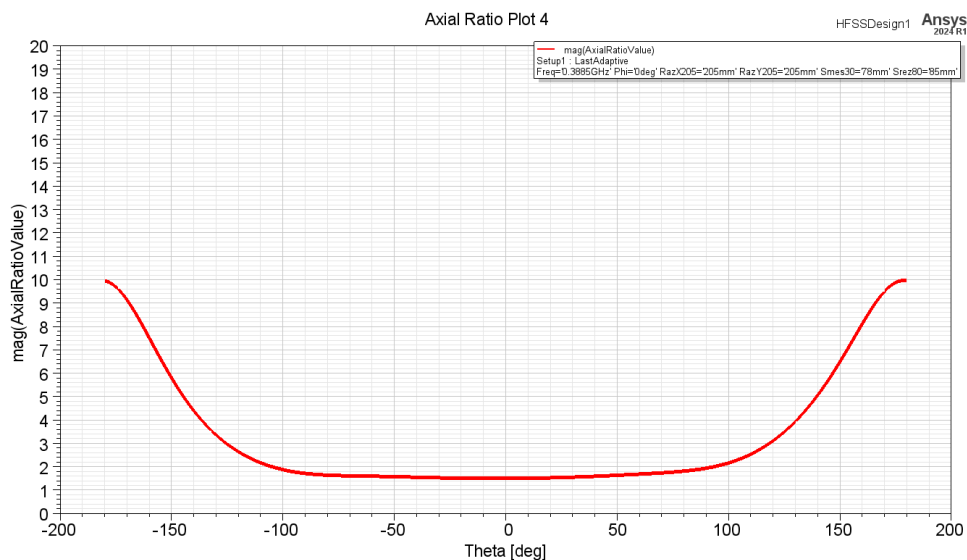


Рис. 18. Осевое отношение антенной системы из двух антенн, на частоте 388.5 МГц.

Трехмерная ДН этой антенной решетки показана на рис. 19.

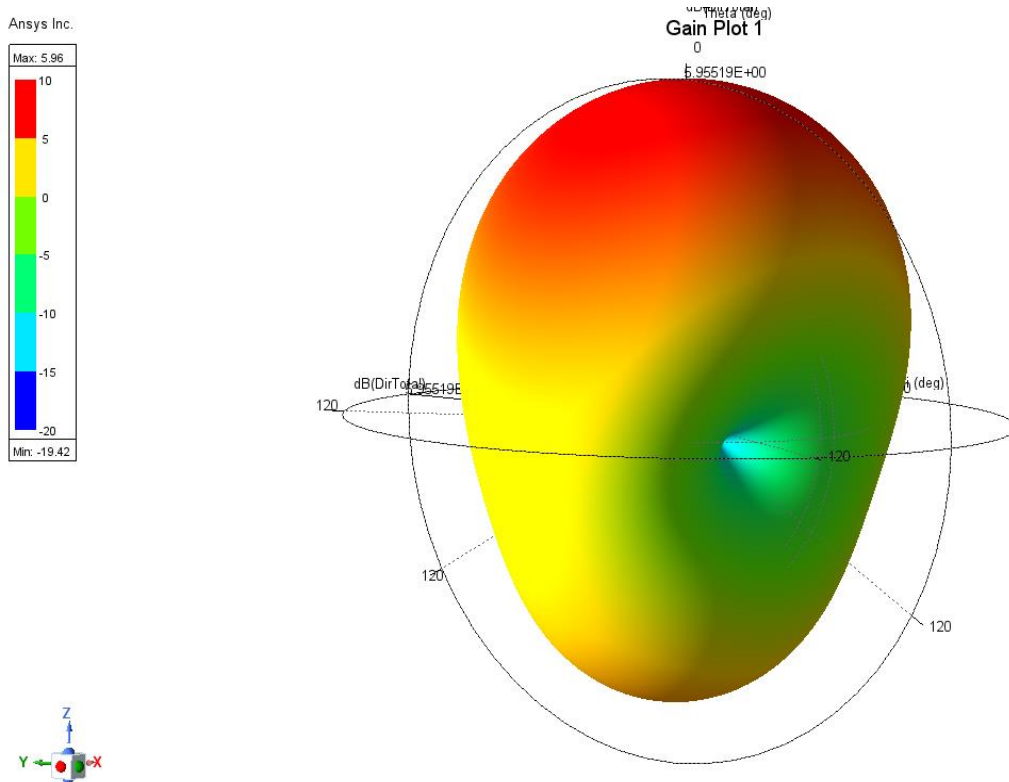


Рис. 19. 3D диаграмма направленности антенной системы из двух патч-антенн на частоте 388.5 МГц.

Максимальное значение КНД равно 6 дБ. Очевидно, что 3D диаграмма направленности в системе АФС изменится, что и является предметом дальнейшего исследования.

4. Настройка патч-антенны с квадратным вырезом на частоту 313.5 МГц

Создадим антенну с квадратным вырезом (рис. 20), увеличивая этот вырез, для того чтобы уменьшить резонансную частоту до 313.5 МГц. Это требует смещения точек питания антенны к центру антенны, поскольку реальная часть входного импеданса данной антенны более 400 Ом.

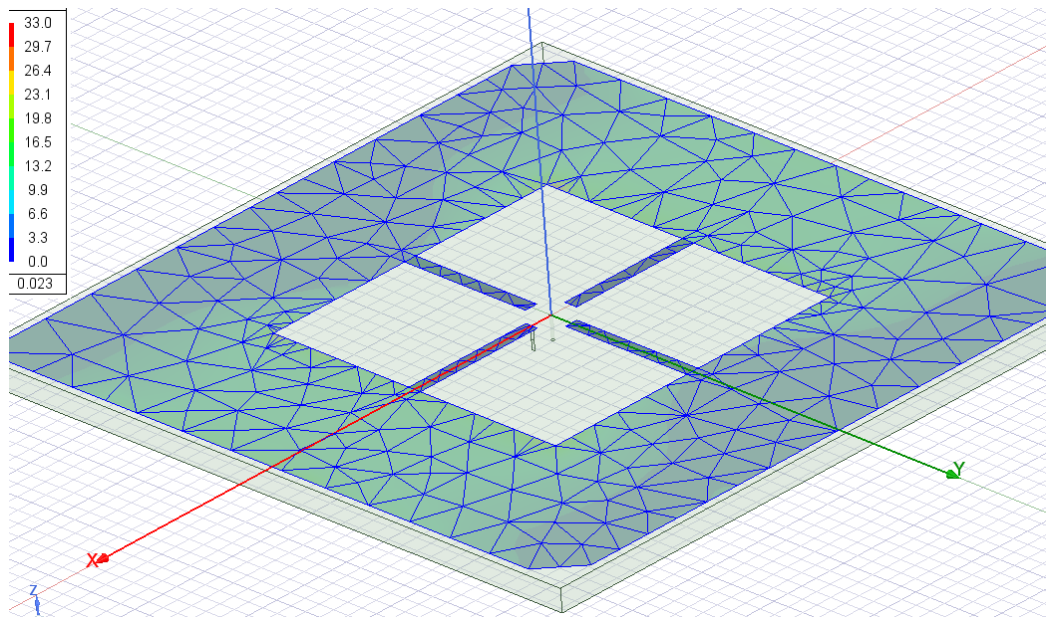


Рис. 20. Патч-антенна с квадратным вырезом и линиями подвода возбуждения.

Частотная характеристика коэффициента отражения (рис. 21), а также частотные зависимости реальной и мнимой части входного импеданса (рис. 22) показывают, что для согласования антенны, необходимо очень близко сблизить порты антенны.

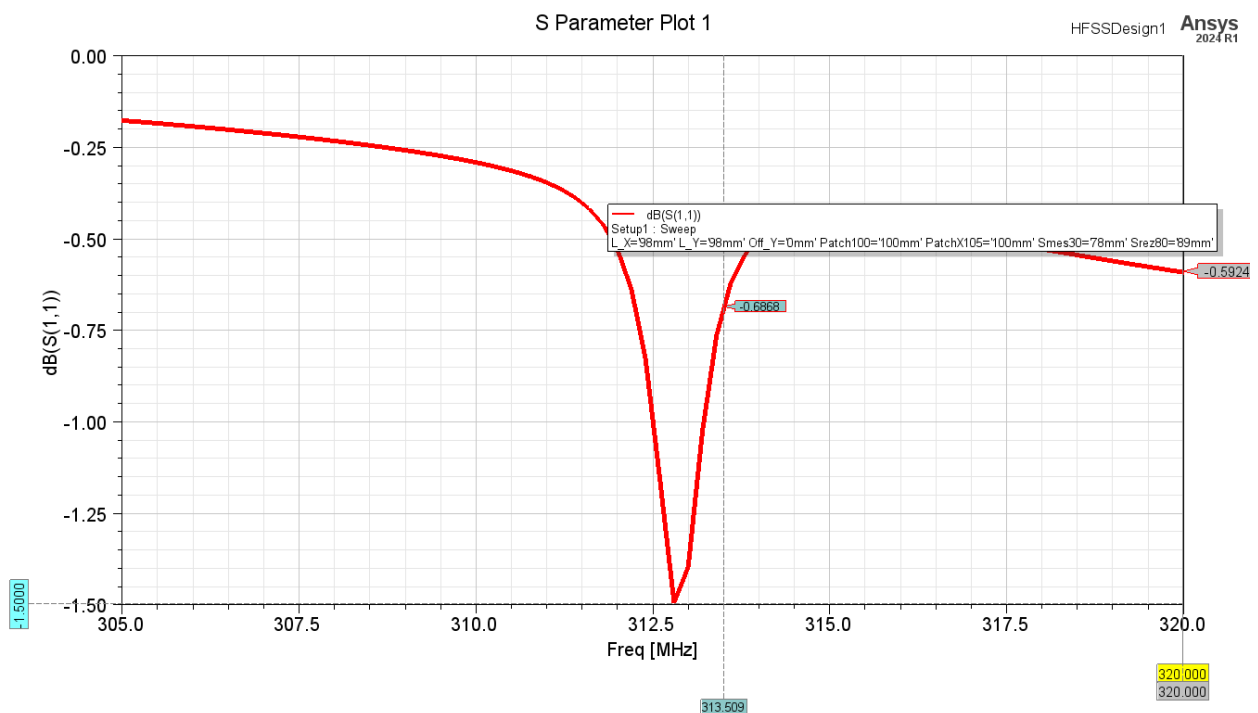


Рис. 21. Частотная характеристика патч-антенны с вырезом на частоту 313.5 МГц.

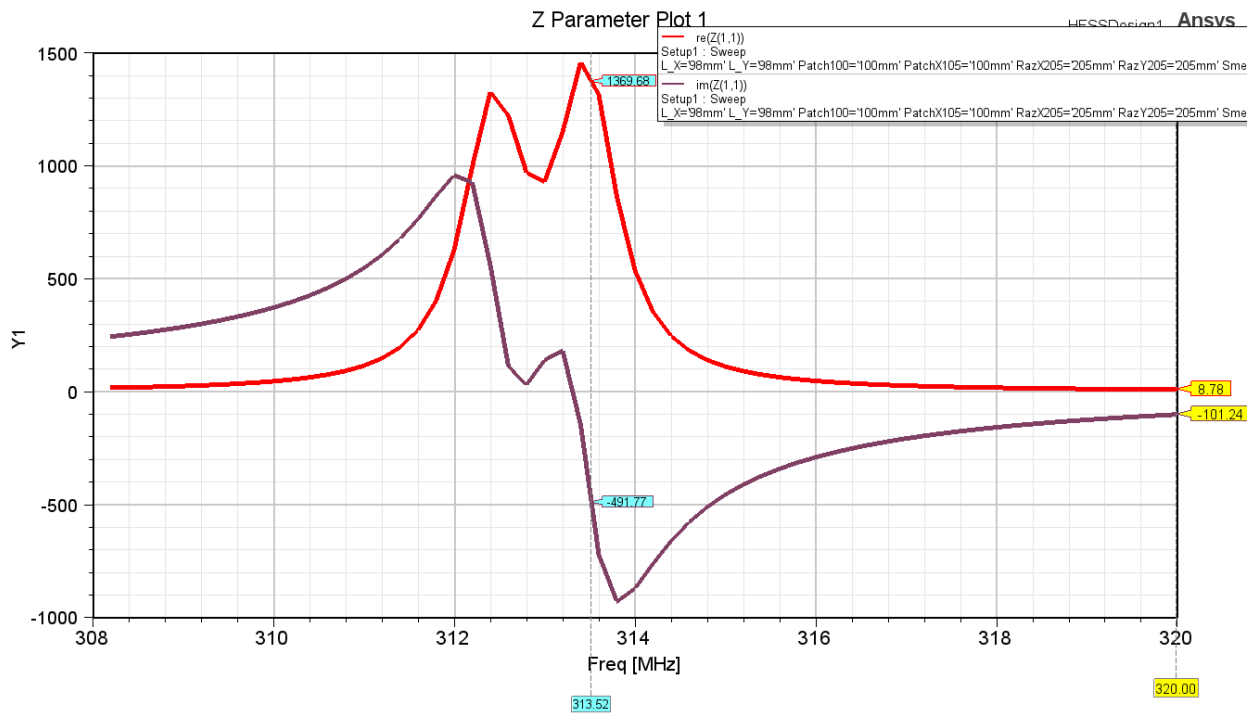


Рис. 22. Реальная и мнимая части входного импеданса патч-антенны с квадратным вырезом.

Хотя эта антенна имеет хорошее значение AR, она с трудом согласуется с 50-омной линией. Поэтому для согласования антенны с 50-омной линией на частоте 313.5 МГц была создана антенна со структурой, показанной на рис. 23.

5. Антенна с двумя вырезами на частоту 313.5 МГц

Щелевая патч-антенна (рис. 23) включает щели, которые возбуждают токи, резонирующие на более низких частотах, и таким образом позволяющие создать более низкочастотную антенну в заданных габаритах. Такая антенна имеет более сложную эквивалентную схему, по сравнению с показанной на рис. 4, и, таким образом, такая антенна включает излучающие и фильтрующие свойства в одной конструкции.

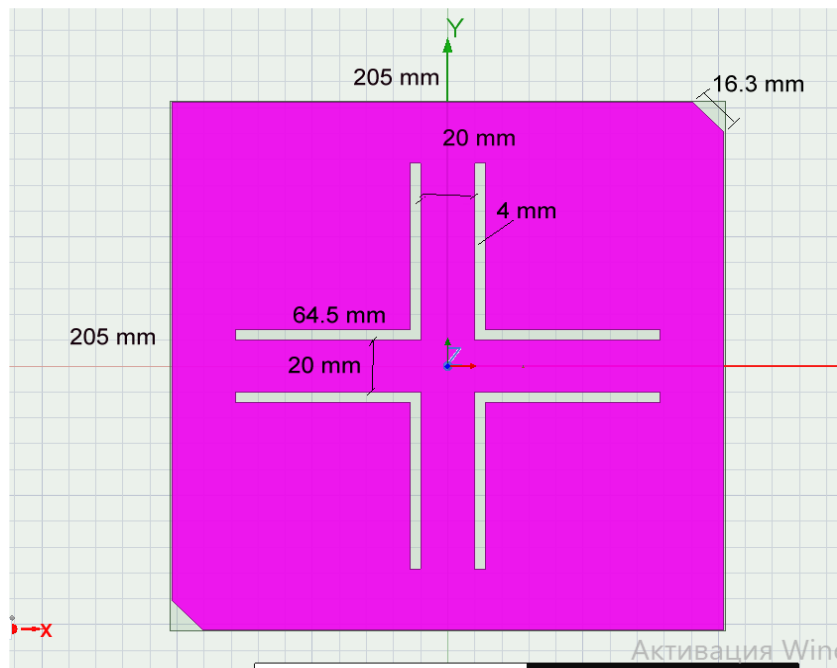


Рис. 23. Вид антенны на частоту 313.5 МГц на подложке 7 мм с проницаемостью 3.38.

Степень согласования антенны с размерами рис. 23 оценивается частотной характеристикой коэффициента отражения, показанной на рис. 24.

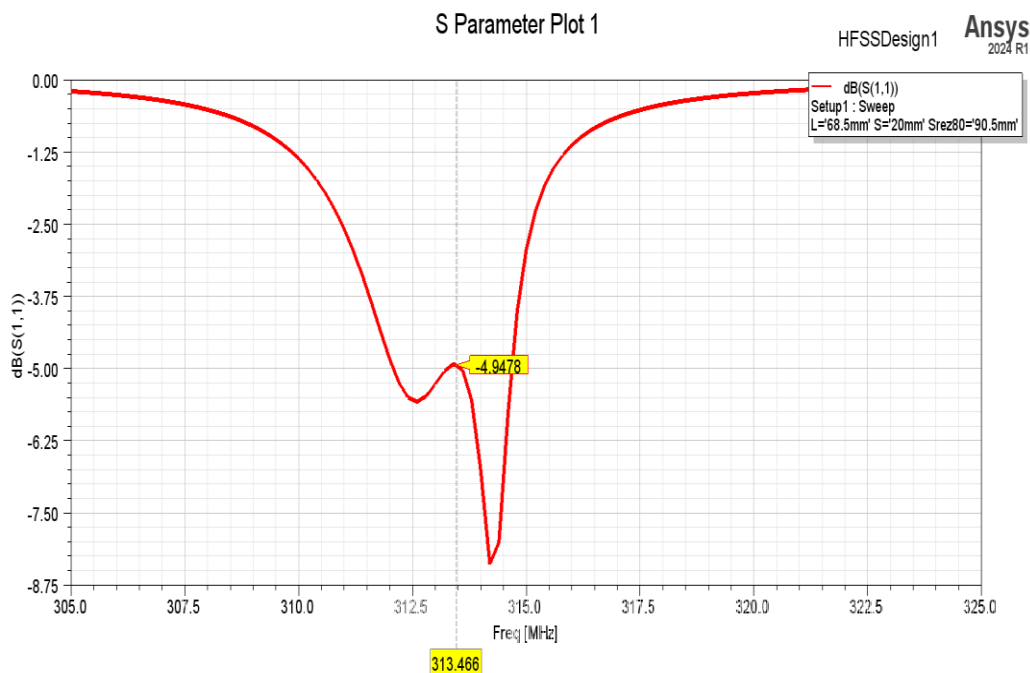


Рис. 24. Частотная характеристика патч-антенны с двойным вырезом.

Смещение порта выполняется по оси X. Для того, чтобы получить круговую поляризацию антенны, в форме патч-антенны подбирается оптимальный срез одного из углов. Осевое отношение антенны показано на рис. 25.

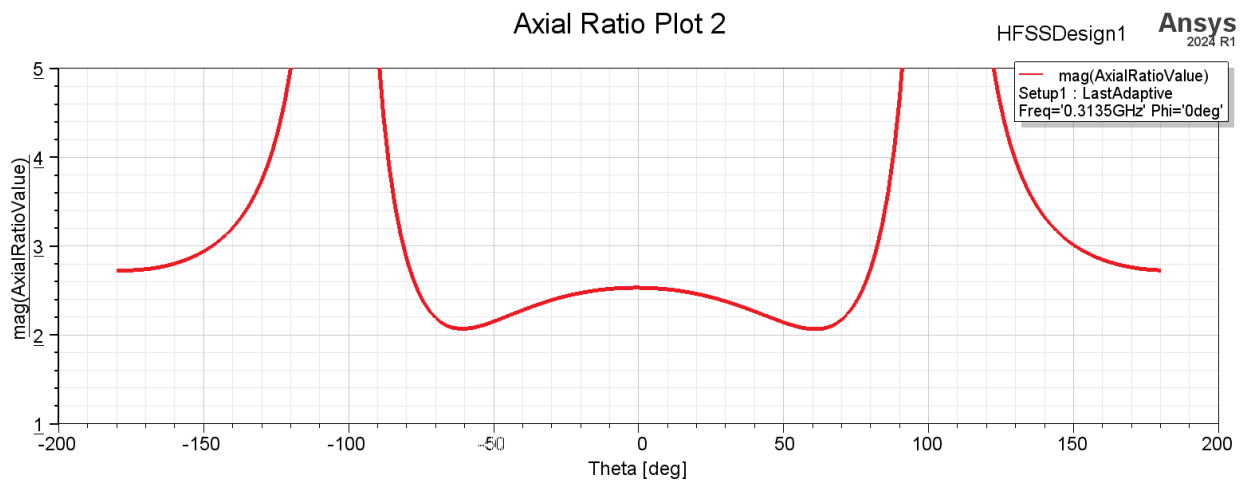


Рис. 25. Осевое отношение антенны с двумя вырезами на частоту 313.5 МГц.

Создание и оптимизация антенн с круговой поляризацией, работающих в определенной полосе частот, требует оценки и оптимизации в этой полосе частот как минимум трех параметров: коэффициента отражения, коэффициента усиления антенны, а также осевого отношения, характеризующего качество круговой поляризации. Расчеты, а также экспериментальные данные показывают, что последний критерий является наиболее критичным при моделировании и оптимизации АФС.

7. Объединение всех антенн на спутниковой подставке

Как уже было отмечено, антенны в АФС (рис. 26) взаимно влияют друг на друга. Выполним анализ характеристик АФС в районе частоты 313.5 МГц и в районе частоты 388.5 МГц.

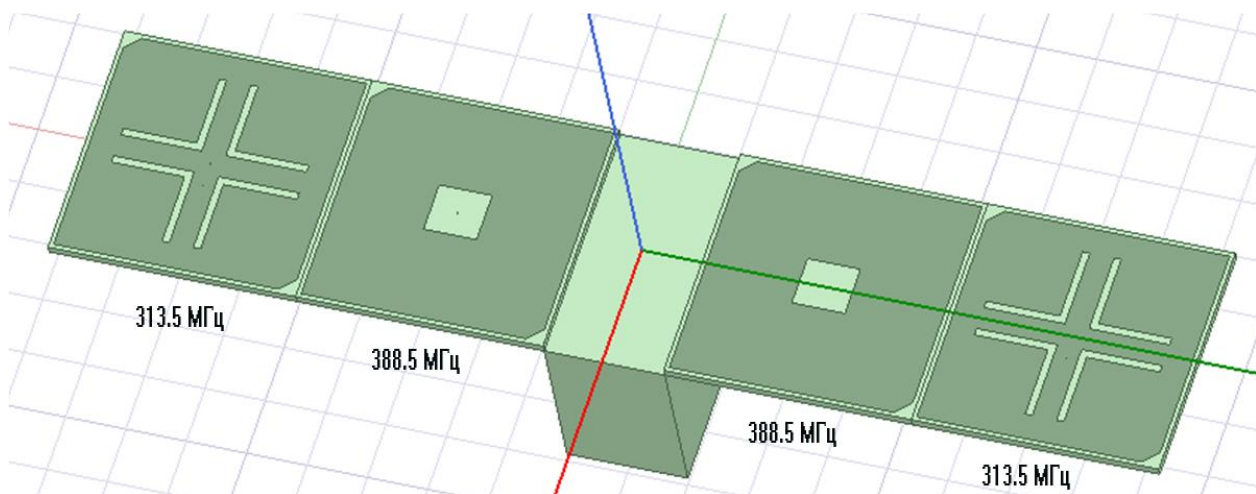


Рис. 26. Объединение всех антенн и установка металлического столбика между антеннами.

При одновременном возбуждении антенн, вид ДН, а также осевое отношение значительно меняются при изменении разности фаз возбуждения антенн. Частотные характеристики коэффициентов отражения отдельных антенн также отличаются (рис. 27-28), из-за влияния антенн.

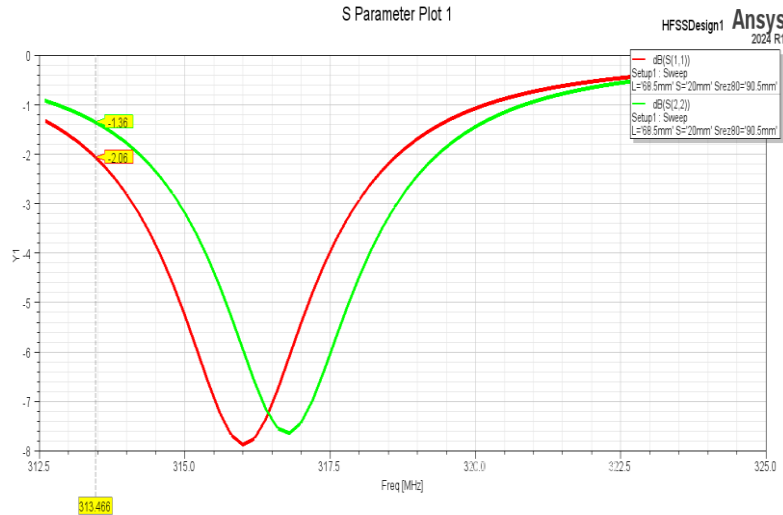


Рис. 27. Вид частотных характеристик коэффициентов отражения $|S_{11}|$ и $|S_{22}|$ антенн в комплексе в районе частоты 313.5 МГц.

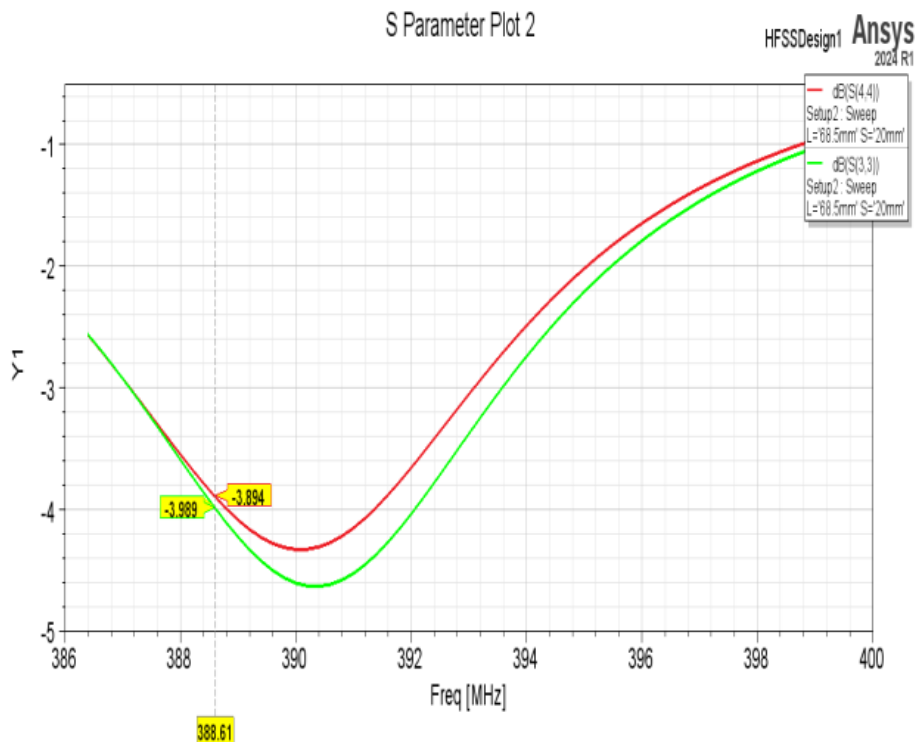


Рис. 28. Частотные характеристики коэффициента отражения $|S_{33}|$ и $|S_{44}|$ антенн в районе частоты 388.5 МГц.

Отметим, что взаимное влияние антенн, и искажение, в силу этого, диаграммы направленности, приводит к тому, что при различных размерах

опоры необходимо изменять фазовые смещения возбуждения отдельных антенн. Так, ДН на частоте 388.5 МГц при синфазном возбуждении антенн, приобретает несимметричный вид (рис. 29).

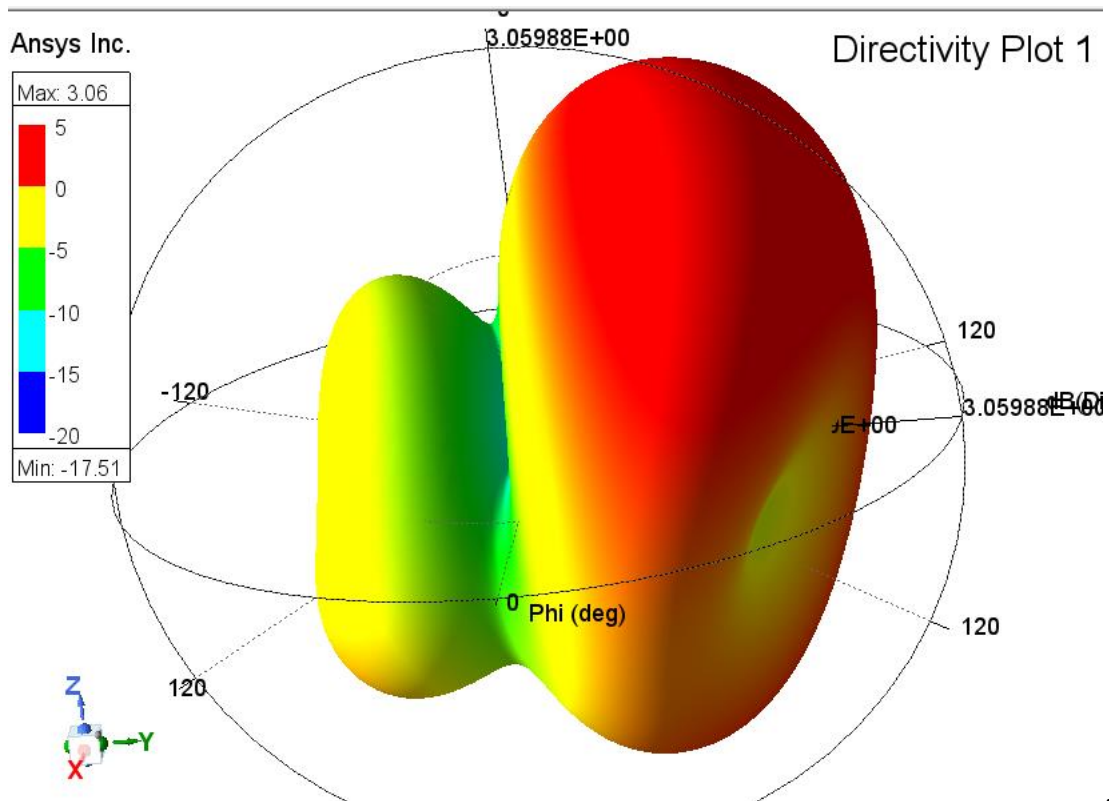


Рис. 29. Диаграмма направленности на частоте 388.5 МГц при синфазном возбуждении антенн.

Из рис. 29 можно видеть, что для при синфазном возбуждении антенны ее ДН приобретает несимметричный вид. То же можно сказать об осевом отношении AR. Расчеты показывают, что осевое отношение системы антенн значительно зависит от разности фаз возбуждения отдельных антенн. Таким образом подтверждается [5,8], что полоса пропускания в антеннах с одноточечным питанием ограничивается требованиям на осевое отношение AR. Оптимальные фазовые сдвиги для питания отдельных антенн АФУ можно найти, решая гибридную систему, в которую входят ЭД компоненты и схематические модели длинных линий и разветвителей, входящих в систему питания.

7. Применение асимптотических методов для расчета характеристик антенн вблизи корпуса космического корабля

Для расчета сложной антенной решетки, состоящей из разных антенн, используя методы геометрической оптики [6], реализованной в программе Savant [1], сохраним ДН отдельных антенн в виде файлов, и поместим фазовые центры антенн в центр каждой из патч-антенн (рис. 30). Для удобства создадим 4 системы координат. При использовании асимптотических методов расчета порты не задаются.

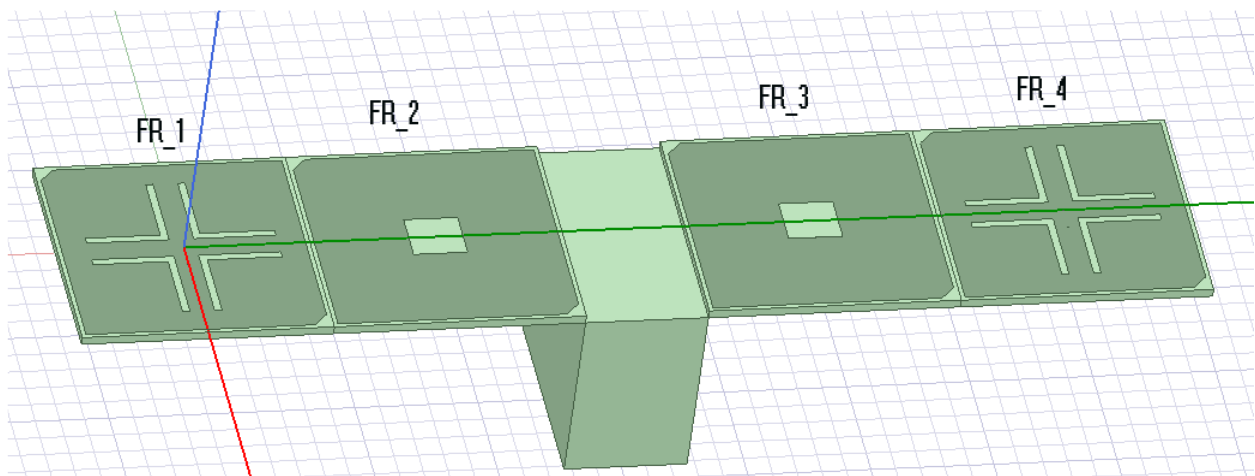


Рис. 30. Создание систем координат для размещения фазовых центров антенн в антенной решетке.

Разбиение пространства на область расчета методом конечных элементов, и область, в котором поле будет рассчитываться асимптотическими методами: методом геометрической оптики, физической оптики и однородной теории дифракции, позволяет увидеть распространяющиеся лучи, отраженные от металлических и частично поглощающих поверхностей (рис. 31).

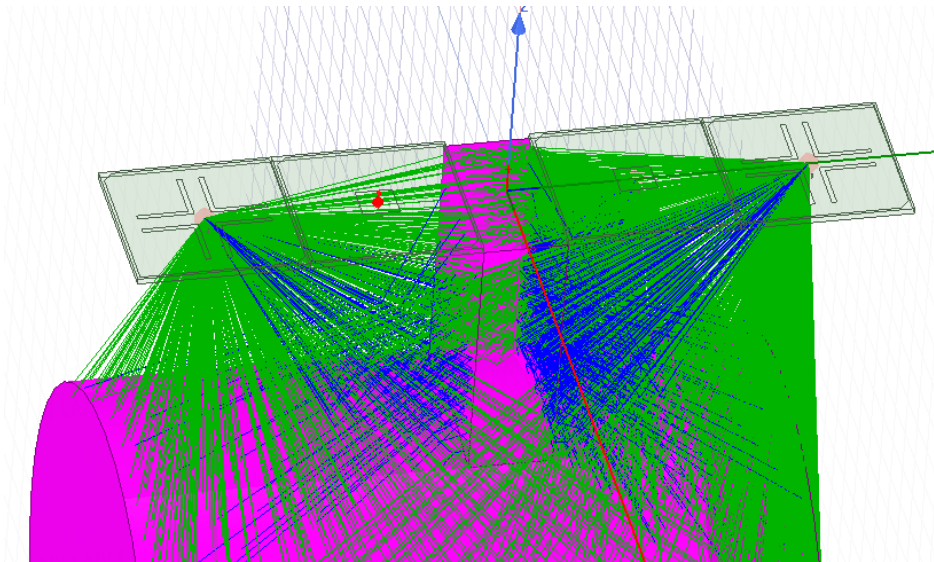


Рис. 31. Распространение падающих и отраженных от корпуса спутника лучей, дающих вклад в излучение в дальнее поле.

Искривление корпуса космического корабля потребовало дополнительного учета скользящих лучей, которые появляются вблизи наибольших искривлений корпуса. Диаграмма направленности АФУ на частоте 313.5 МГц имеет вид, показанный на рис. 32, а на частоте 388.5 МГц – на рис. 33. Эти ДН получены с учетом вторичного отражения от корпуса корабля и отличаются от ДН отдельных антенн (рис. 11, 19, 31) для отдельных углов Theta на величину от 2-х до 4 дБ.

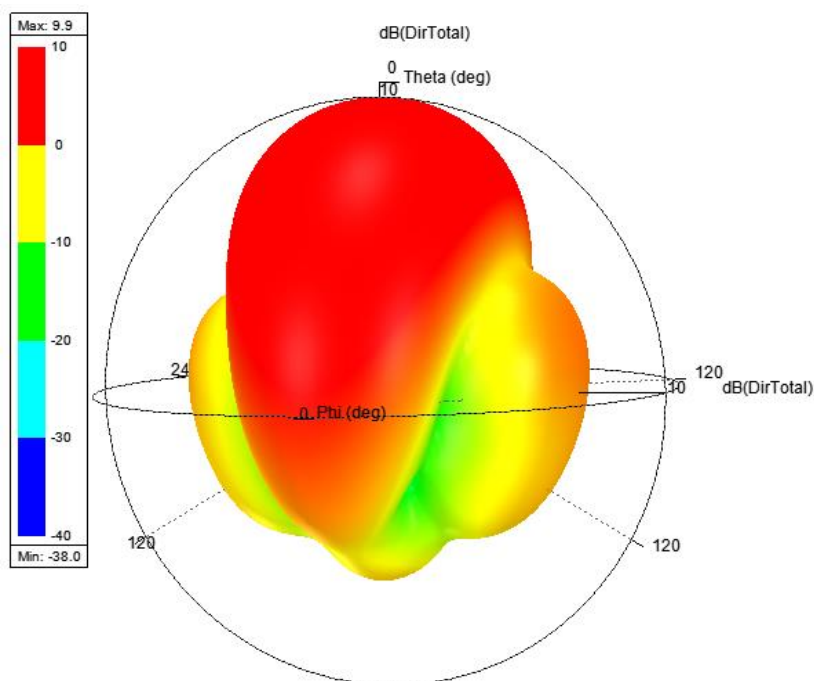


Рис. 32. ДН антенно-фидерной системы на частоте 313.5 МГц с учетом влияния корпуса космического корабля.

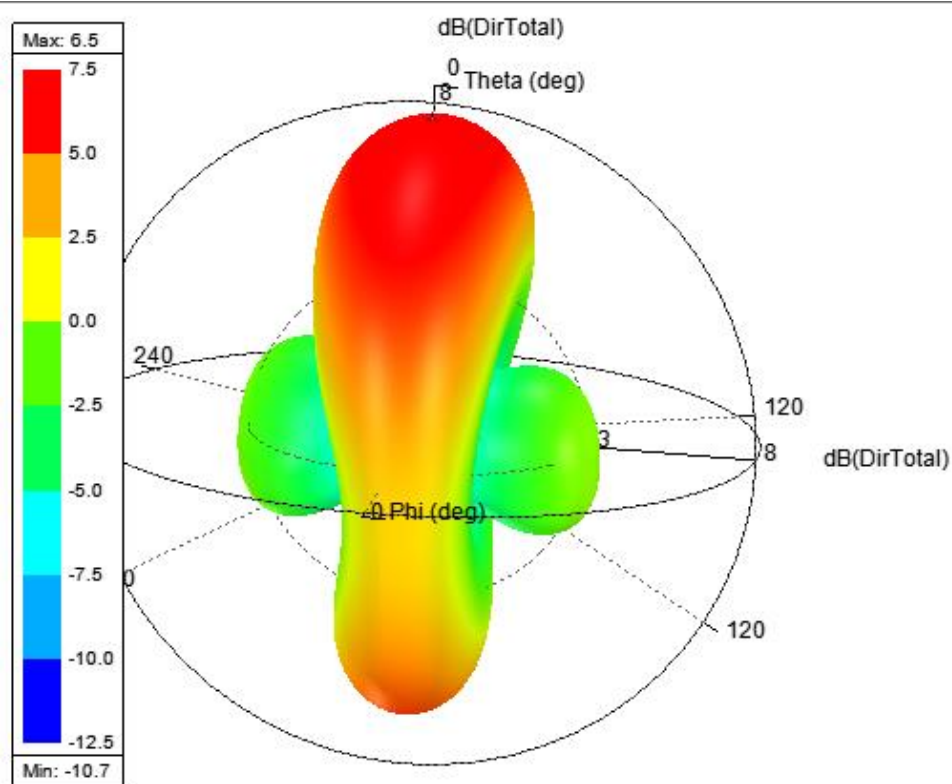


Рис. 33. ДН антенно-фидерной системы на частоте 388.5 МГц с учетом влияния корпуса космического корабля.

Моделирование АФС, включающее корпус космического корабля, можно выполнить и методом конечных элементов, а также методом интегральных уравнений, используя суперкомпьютер, а также композиционным методом, когда отдельные части рассчитываются разными методами и одно решение становится полем возбуждения для решения поля в другом пространстве.

Использование асимптотических методом расчета позволяет выявить конкретные объекты и плоскости в корпусе, которые влияют на характеристики АФС.

Заключение

Внедрение численных методов проектирования в инженерное исследование и проектирование открывает широкие возможности как в плане физической наглядности результатов расчета, так и учета явлений, которые не поддаются простому объяснению. Например, в случае расчета АФС имеется

возможности учесть взаимную связь между всеми излучателями и рассчитать слепые углы, при которых резко падает усиление антенны из-за связи антенн.

Для уменьшения размеров патч-антенны, применяемой в спутниковой антенно-фидерной системе, рассмотрены четыре варианта внедрения щелей в патч-антенну и выбраны наилучшие с точки зрения ширины полосы по трем критериям: коэффициенту отражения, усилению антенны и поляризации.

Для учета влияния больших металлических массивов в системе спутника, предложено использовать асимптотические методы расчета. Применение программы HFSS ANSYS, обладающей мощной подпрограммой Savant с реализованными асимптотическими методами расчета, позволяет решить эти важные научные и технические задачи. Программа Savant обладает широкими возможностями для учета поглощения покрытий ДПЛА, для задания самых разнообразных материалов и многослойных покрытий. В статье показано, как изменяются характеристики антенно-фидерной системы, с учетом металлических форм, находящихся рядом с антеннами.

В настоящее время большинство сложных научных СВЧ и антенных задач можно решить только численными методами. К ним относятся задачи электромагнитной совместимости, проектирование сверхмалых антенн, проектирование систем радиоидентификации, антенн на дистанционно пилотируемых летательных аппаратах, задачи распространения радиоволн в сложной искривленной среде.

Литература

1. ANSYS Savant. Электронный ресурс: <https://cae-club.ru/publications/ansys-savant>
2. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975 г., 528 с.
3. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. – М.: Связь, 1978, 248 с.

4. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. – М.: Советское радио, 1962, 124 с.
5. Ken-Lu Wong. Compact and Broadband Microstrip Antennas // NY. John Wiley & Sons, 2002. 340 p.
6. Грибанов А.Н., Кузнецов И.А., Курушин А.А. Асимптотические методы электродинамики в ANSYS HFSS. – М.: Солон-Пресс, 2019, 340 с.
7. Банков С.Е., Давыдов А.Г., Курушин А.А. Проектирование квадрифилярной антенны // Современная электроника. 2007, № 7, с. 54-57.
8. Бойко С.Н., Исаев А.В., Марьянов В.Б., Трухачев И.М. Микрополосковая антенна ГНСС этажерочного типа с встречным питанием антенных элементов// Антенны. 2020. № 2. с. 29-40.

Для цитирования:

Коган Б.Л., Курушин А.А. Моделирование антенно-фидерной системы на корпусе космического корабля // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 5.
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.6>