

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Стригин Иван Алексеевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Расчет, изготовление и испытание компактной направленной антенны
2,4 ГГц**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20306

Научный руководитель:

к.ф-м.н. В.Н. Горев
Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

д.ф-м.н. О.Е. Терещенко
Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Целью моей работы являлся проектирование компактной направленной антенны с круговой поляризацией на основе стека из 4 патч-антенн, а также её изготовление и испытание. Стек антенн был рассчитан и изготовлен. Испытания проводились с помощью спектроанализатора и измерительного стенда National Instruments. В ходе испытаний были получены график зависимости КСВ от частоты сигнала и диаграмма направленности антенны.

Ключевые слова: антенна, круговая поляризация, КСВ, диаграмма направленности.

Оглавление

Введение.....	4
Теоретическая часть.....	6
Конструкция.....	15
Методика измерений.....	17
Вывод.....	21
Список литературы	22

1. Введение

Развитие и миниатюризация электронных компонентов и технических решений позволяет существенно уменьшить размеры космических аппаратов при сохранении значительной части их функциональности. Благодаря этому большое распространение получают малые и сверхмалые космические аппараты (МКА и СмКА). Существует большое количество задач, для реализации которых достаточно возможностей и бортовой энергетики МКА или даже СмКА. Запуск таких аппаратов сейчас осуществляется попутным способом, вместе с большим аппаратом, что сильно упрощает и удешевляет вывод на орбиту.

28 сентября 2020 г с космодрома Плесецк был запущен разработанный ОАИ НГУ сверхмалый космический аппарат (СмКА) «Норби». На данный момент спутник находится в рабочем состоянии. Платформа СмКА «Норби» включает в себя следующие модули: систему энергоснабжения, систему ориентации и бортовой радиокomплекс.

Радиомодуль СмКА «Норби» работает на частоте 436.7 МГц. Чтобы была возможность связаться, со спутником при любой его ориентации, в том числе если он вращается, на аппарате установлена всенаправленная антенна, представляющая собой угловой диполь.

В настоящее время разрабатывается СмКА «Норби-2», который является развитием аппарата «Норби».

В качестве основной радиолинии для передачи команд и телеметрии на новом аппарате планируется применить радиоканал 436,7 МГц, аналогичный установленному на СмКА «Норби». Однако для передачи данных полезных нагрузок аппарата требуется радиоканал с большой пропускной способностью, то есть требуется повысить несущую частоту. Среди радиодиапазонов, разрешенных для использования радиолюбителями в России, есть диапазон 2,4 – 2,45 ГГц разрешенный для работы с космическими аппаратами. Для СмКА «Норби-2» планируется разработать радио-модуль, работающий в этом диапазоне частот.

Если длина волны уменьшается, то, равной мощности передатчика и при пропорциональном уменьшении размера антенн, собираемая приемной антенной уменьшается как λ^2 . Повысить собираемую антенной мощность можно увеличив ее размер, однако в этом случае антенна приобретет направленность. Малая по сравнению с размером спутника длина волны также означает, что антенна становится направленной, что требует ориентации аппарата на наземную антенну во время сеанса связи.

Задача данной работы: сделать направленную бортовую антенну для диапазона частот 2,4 – 2,45 ГГц. Размер спутника, компоновка, условия работы СмКА в космосе и условия полета на ракетоносителе накладывают на разрабатываемую антенну ряд условий:

1. Необходимо расположить антенну на грани корпуса аппарата формата CubeSat 6U. Максимальный размер: 200 × 300 × 10 мм, плоская панель.
2. Простая и прочная конструкция без тонких элементов, желательно без механизации – не раскладная.
3. Ширина луча антенны 30° – 60°. Не требуется чрезмерная точность наведения, не пересекается с раскладными панелями солнечных батарей.
4. Круговая поляризация излучения антенны.

2. Теоретическая часть

Антенна – это электрическое устройство, преобразующее электрические колебания проводной линии в радиоволны в пространстве и наоборот. Антенна, которая использует два одинаковых элемента, называется диполем (рис. 1). Длина простой дипольной антенны равна половине длины волны преобразуемых колебаний, таким образом, на длине диполя создается стоячая волна (рис. 2).

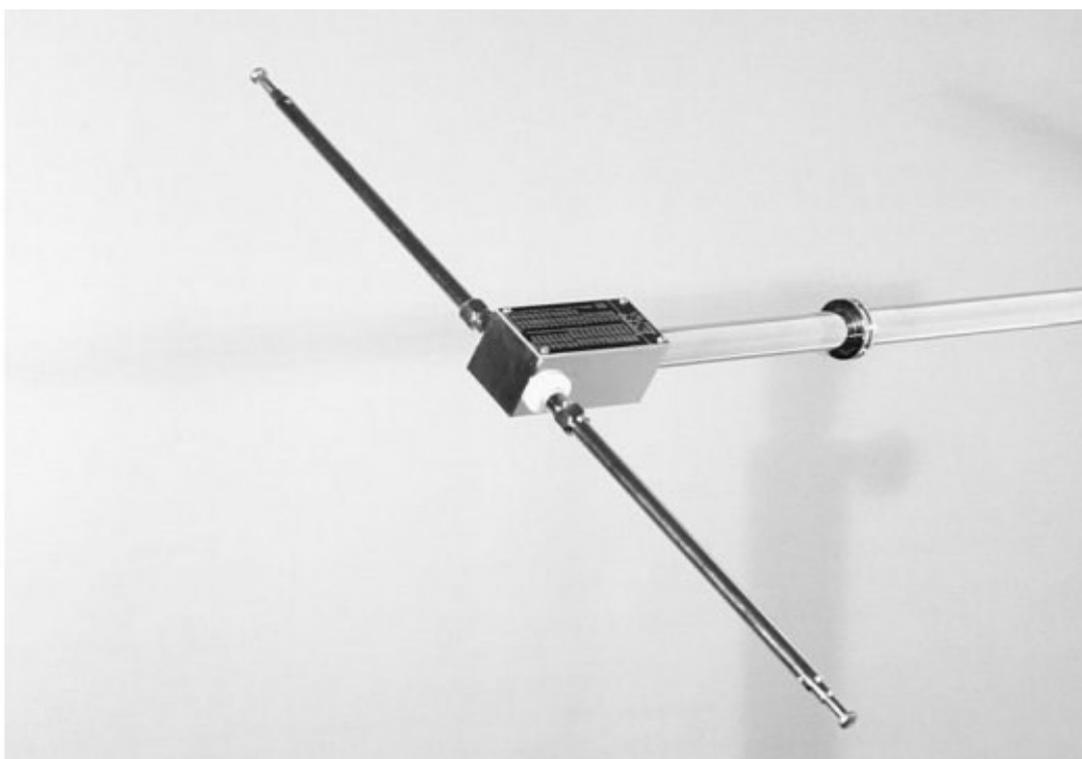


Рис. 1. Дипольная антенна

Дипольная антенна состоит из двух одинаковых проводников, обычно с двусторонней симметрией. Каждый проводник фидера у передатчика или приёмника соединены с одним из проводников. Диполи – резонирующие антенны, то есть их элементы служат резонаторами, в которых стоячие волны переходят от одного конца к другому. У передающих устройств к ней подаётся переменный сигнал на собственной частоте диполя, а у принимающих – принимается сигнал, возбуждаемый радиоволной между двумя половинами антенны. Каждая антенна имеет диаграмму направленности. Термином «диаграмма направленности антенны» (или «диаграмма излучения») обычно называют графическое изображение угловой зависимости излучения антенны.

На нем, как правило, наносится значение относительной (в основном, нормированной) интенсивности поля, излучаемого антенной. Диаграмма направленности антенны обычно представляется в виде трехмерного графика. Плоские диаграммы направленности чаще всего строят либо в плоскости оси антенны, либо в плоскости, ей перпендикулярной. Диаграммы направленности антенн, построенные в полярной системе координат, обладают лучшей наглядностью и более приспособлены для отображения их на картах. С их помощью обеспечивается быстрая оценка свойств антенны в заданном направлении.

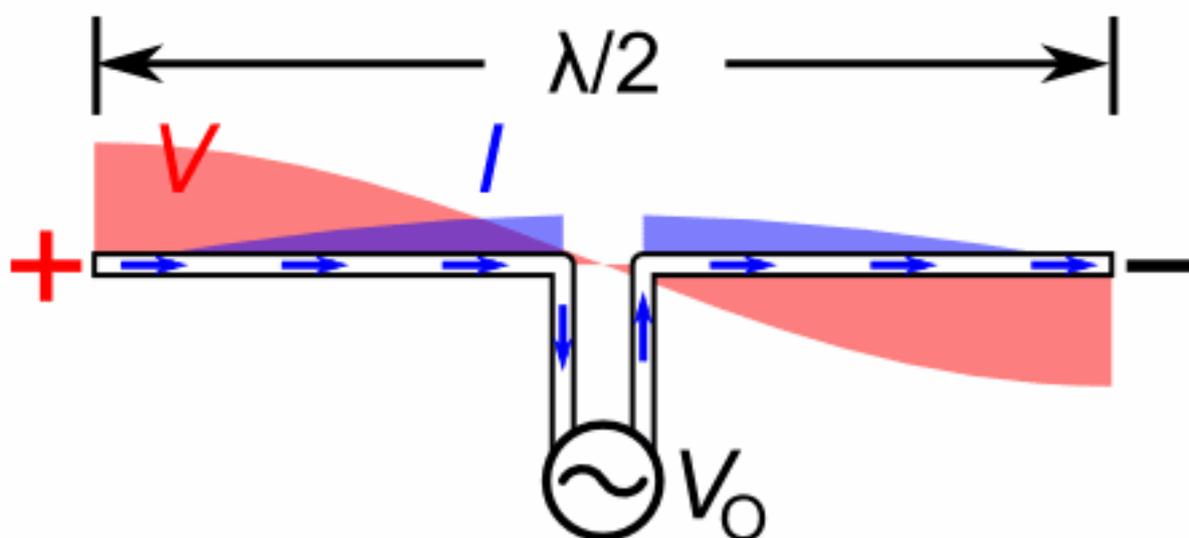


Рис. 2. Стоячие волны в дипольной антенне

Дипольная антенна иллюстрирует базовый принцип излучения и приема радиоволн. На этом принципе работают практически все существующие антенны. Так, если установить параллельно с диполем пассивные вибраторы близкого размера получится резонансная система, которую можно рассчитать таким образом, чтобы она приобрела требуемую диаграмму направленности и полосу частот чувствительности. Примеры таких антенн, это логопериодические антенны (рис 3, а) и антенны Удо-Яги (рис 3, б).

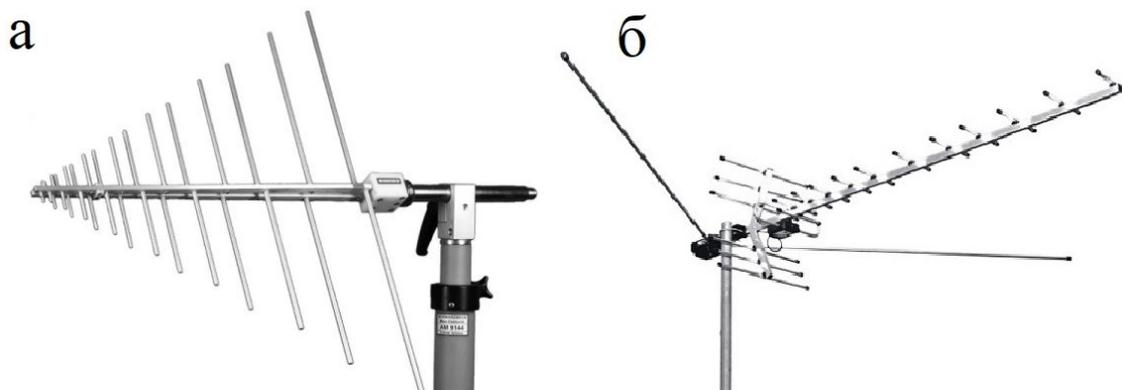


Рис. 3. а) Логопериодическая антенна, б) Антенна Удо-Яги

В состав антенн входит вибратор – рефлектор отсекающий излучение задней полусферы и вибраторы – директоры, формирующие луч диаграммы направленности (рис. 4, б).

Антенны подобного типа, состоящие из одинаково ориентированных стержней, могут принимать и излучать только радиоволны с линейной поляризацией. Для работы с космическими аппаратами это не очень удобно, т.к. поляризации приемной и передающей антенн могут не совпасть и уровень принимаемого сигнала будет ослаблен.

Для приема волны с круговой поляризацией существуют различные решения. Например, суммируется сигнал с двух антенн принимающих линейно поляризованную волну, расположенных в перпендикулярных плоскостях. Эти антенны обычно собирают на одной направляющей (рис. 4, а). Либо вибраторы антенны делают в виде пластин. Колебания в таких дисковых диполях могут возникать в любом направлении, съём сигнала происходит с двух направлений, затем суммируется со сдвигом фазы.

а



б

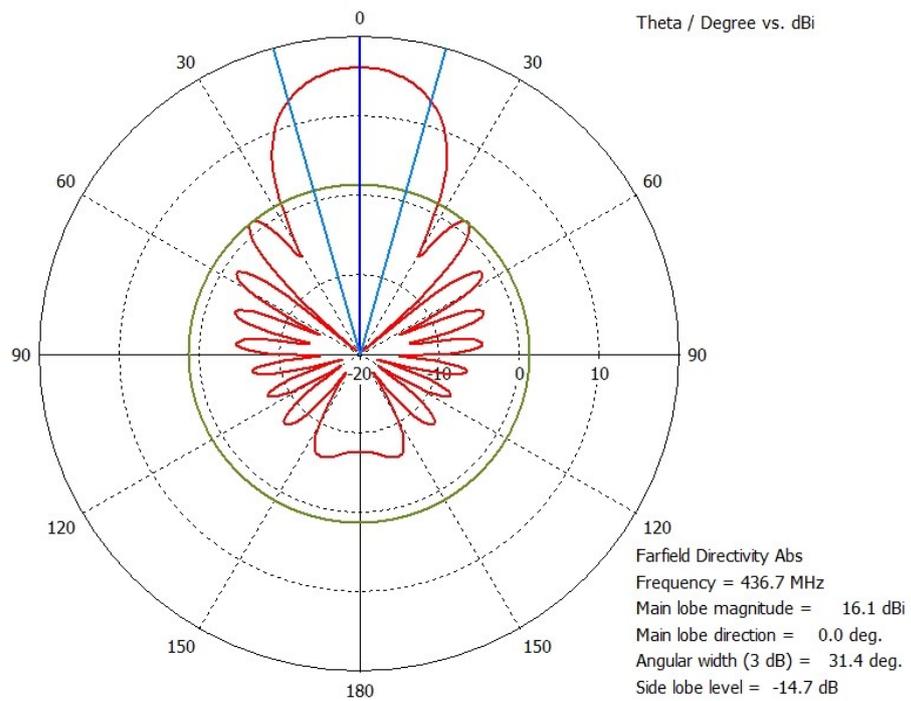


Рис. 4. Стек из двух антенн типа Уда-Яги, установленная на здании НГУ, Пирогова, д. 2 (а), ее диаграмма направленности антенны (б).

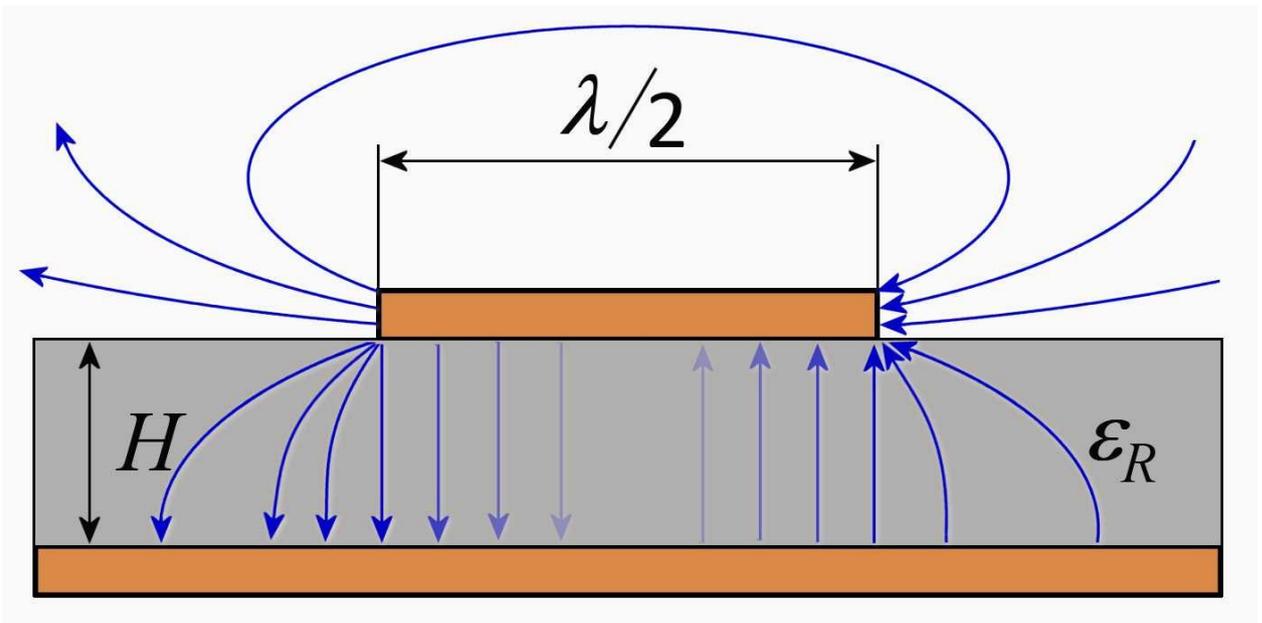


Рис. 5. Вид простой патч-антенны в разрезе

Одна из разновидностей антенн, состоящих из пластин-вибраторов, называется патч-антенна. Физически такая антенна имеет двумерную геометрию. Основным элементом патч-антенны является плоская металлическая пластина-вибратор, расположенная на некотором расстоянии от второй пластины-рефлектора (рис. 5).

В простейшей патч-антенне используются пластины полуволновой длины, так что металлическая поверхность этих пластин действует с одной стороны, подобно плоскому резонатору, открытому со всех сторон, с другой стороны за счет смещения точки подключения, подобно полуволновому диполю.

Возможно изготовить патч-антенну излучающую круговую поляризацию. Один из способов, питать обычный квадратный лепесток из двух точек, отстающих по фазе на 90° . Однако, получили распространение патч-антенны, в которых перпендикулярная мода колебаний со сдвижкой в $\frac{1}{4}$ периода, дополнительная к основной, возбуждается за счет формы пластины-вибратора патч-антенны. Это достигается обрезанием двух противоположных углов пластины-вибратора (рис. 6).



Рис.6. Патч-антенны с обрезанными противоположными углами пластины вибратора, частота 2,4-2,5 ГГц, правая круговая поляризация, размер 25x25x4 мм, коэффициент усиления 6.5 дБи

Патч-антенны получили свое распространение потому что их можно изготавливать в составе печатной платы, что часто очень удобно при проектировании мобильных устройств. Диэлектриком между пластинами таких антенн является текстолит платы. Геометрия и свойства таких антенн оказались удобны в мобильных применениях. Однако, не всегда требуемые параметры можно обеспечить печатной патч-антенной. Поэтому, существуют патч-антенны с воздушным зазором или на основе радиочастотных диэлектриков (рис. 6).

По своим геометрическим параметрам, простоте, возможности получить волну с круговой поляризацией, патч-антенна потенциально подходит под требования СмКА «Норби-2».

Коэффициент усиления патч-антенн за счет направленности составляет примерно 5-7 дБи, при ширине луча $60^\circ - 80^\circ$. Для бортовой антенны требуется сузить луч и, по возможности, увеличить коэффициент усиления.

Сузить луч направленности антенны можно двумя путями: добавить директоры, как у антенн типа волновой канал, что увеличит размер антенны в направлении основного луча – в длину (рис. 7), либо сделать антенную решетку, стек антенн, увеличив размер антенной системы в ширину.

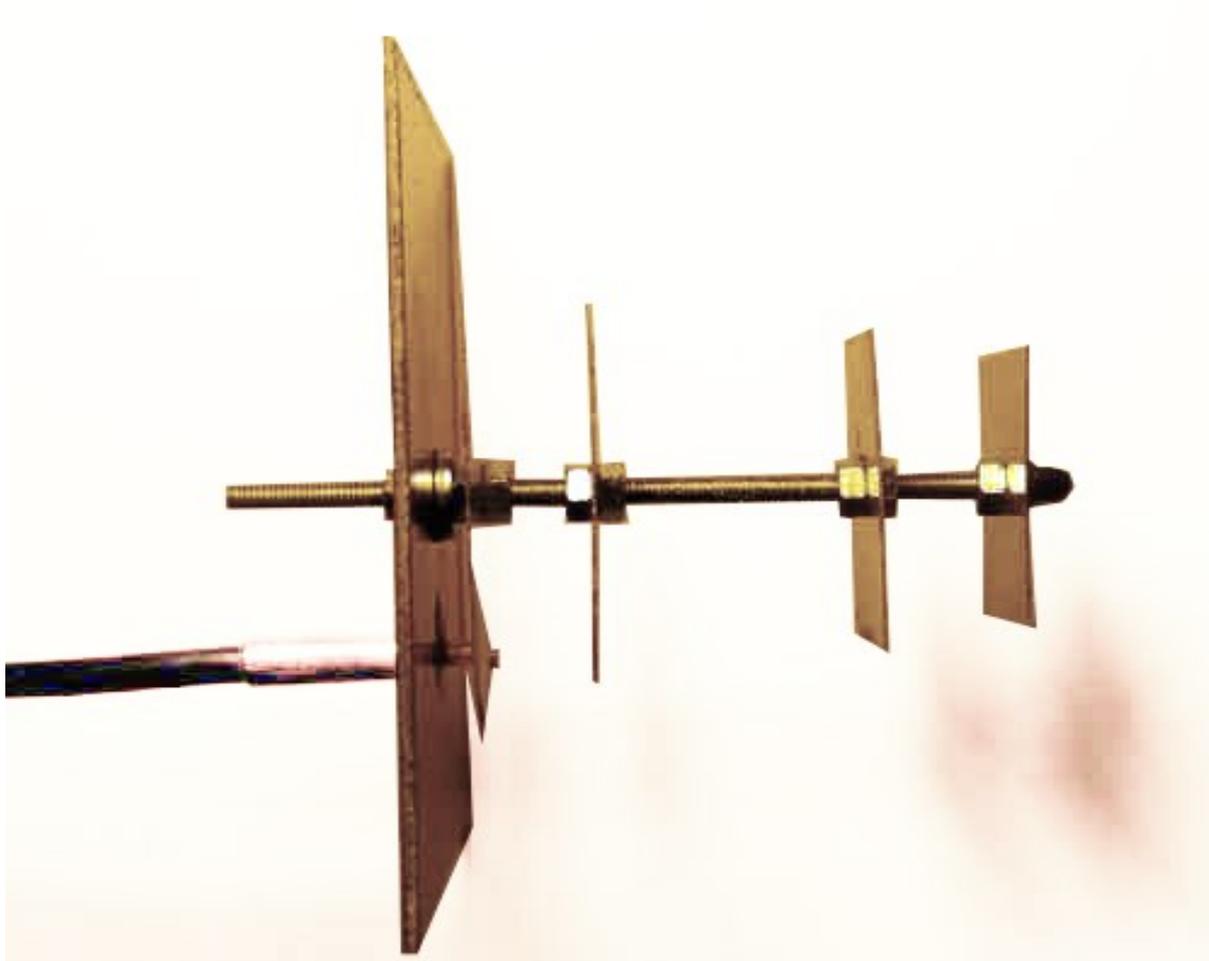


Рис. 7. Патч-антенна с директорами

Размер грани корпуса спутника «Норби-2» позволяет разместить антенную решетку размером 200x200 мм. На такой поверхности можно разместить антенную решетку 2x2 из четырех патч-антенн.

Используются готовые патч-антенны с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 6). Их нужно подключить к стандартному фидеру радио-модуля, волновое сопротивление которого также 50 Ом. Простым ветвлением линии 50 Ом на четыре линии по 50 Ом это сделать нельзя, потому что сигнал идущий по кабелю будет отражаться от точки ветвления, как от границы раздела двух сред с разным коэффициентом преломления.

Для согласования использован четвертьволновой трансформатор. В основе лежит принцип, что для согласования сопротивлений Z_1 и Z_2 можно применить отрезок кабеля длиной в четверть волны сигнала (внутри кабеля) с волновым сопротивлением, рассчитанным по формуле $Z_0 = \sqrt{Z_1 \times Z_2}$ (1).

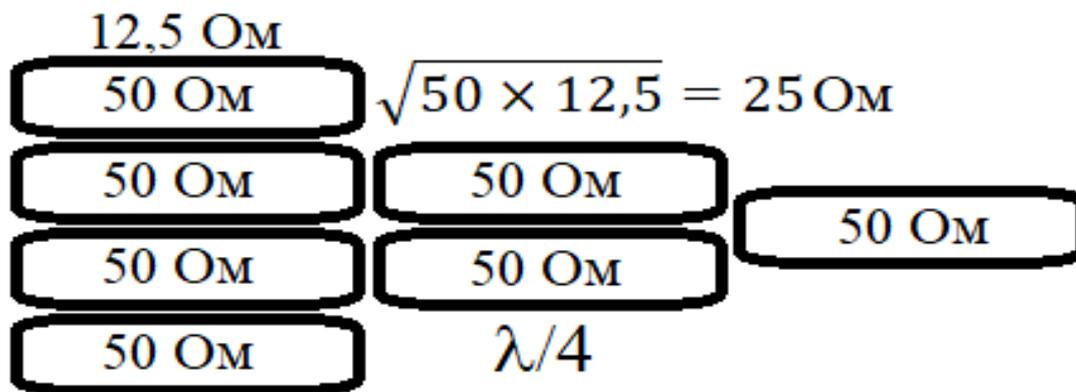


Рис. 8. Наглядная схема соединения 4 антенн

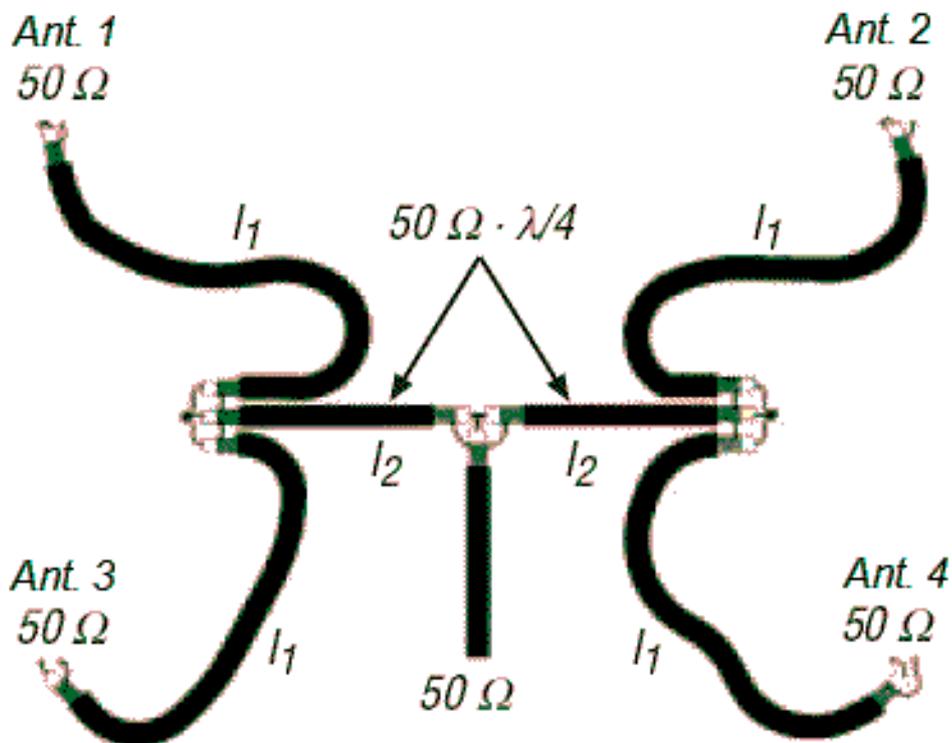


Рис. 9. Пример соединения 4 антенн

Схематично ветвление линии на четыре ветви показано на рис. 8. Если посчитать суммарное волновое сопротивление четырех параллельных кабелей, то получается 12,5 Ом. Подставив эти значения в формулу (1), получаем 25 Ом, что представимо в виде двух параллельных кабелей по 50 Ом. Таким образом, для ветвления линии на четыре можно использовать один и тот же кабель с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 9).

3. Конструкция

Аналогичным образом реализовано согласование четырех патч-антенн для СМКА «Норби -2» путем ветвления полосковых линий в печатной плате (рис. 11).

Параметры полосковой линии рассчитывались на основе данных формул.

$$\frac{W}{b} = \frac{W_0}{b} - \frac{\Delta W}{b},$$

где

$$\frac{W_0}{b} = \frac{8(1-x)\sqrt{e^A + 0,568}}{\pi(e^A - 1)}, \quad A = \frac{Z_0\sqrt{\epsilon_r}}{30\pi},$$
$$\frac{W_0}{b} = \frac{x}{\pi} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \ln \left[\left(\frac{x}{2-x} \right)^2 + \left(\frac{0,0796x}{W_0/b - 0,26x} \right)^m \right] \right\}.$$

Величины x и m определены следующими уравнениями

$$x = \frac{t}{b}, \quad m = 2 \left[1 + \frac{2}{3} \frac{x}{1-x} \right]^{-1}$$

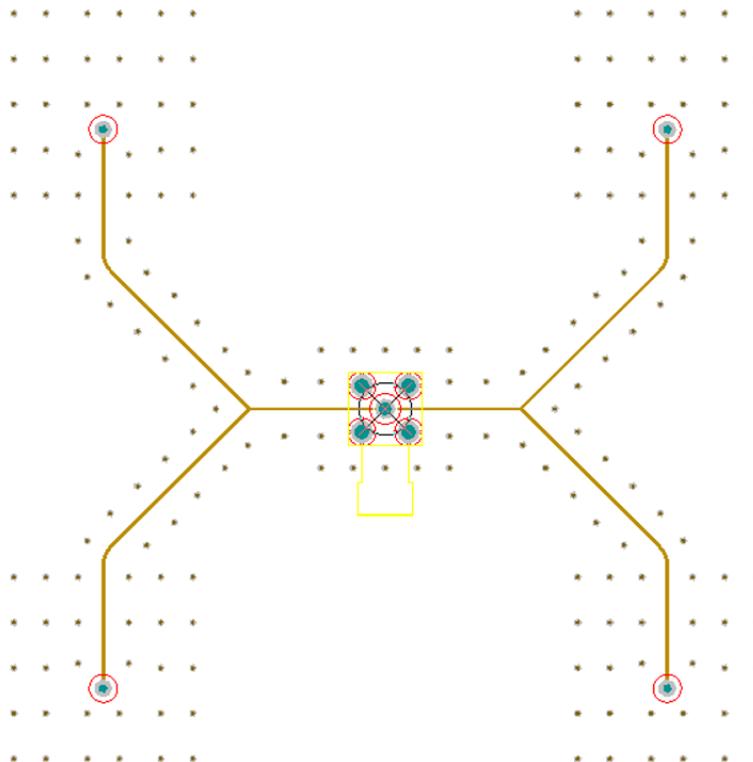


Рис. 11. Схема ветвления полосковых линий

Печатная плата была изготовлена из материала FR-4 компанией «Электроконнект». Плата содержит 4 слоя, толщины которых приведены в табл.

1. Первый и третий слой – цельные слои меди. Во втором слое выполнено травление полосковых линий. Собранный на печатной плате стек патч-антен показан на рис. 12.



Рис. 12. Прототип стека антенн для СмКА «Норби-2»

Таблица 1 Параметры слоев в печатной плате

№ слоя	Материал	Толщина слоя, мм	Назначение
1	Медь	0,035	сплошной слой
	Текстолит	0,454	
2	Медь	0,035	полосковые линии
	Текстолит	0,510	
3	Медь	0,035	сплошной слой
	Текстолит	0,454	
4	Медь	0,035	полностью удален

5. Методика измерений и результаты

С помощью измерительного стенда National Instruments был измерен коэффициент стоячей волны (КСВ) в системе кабель-антенна. КСВ хорошо отражает рабочий диапазон частот антенны (рис. 13).

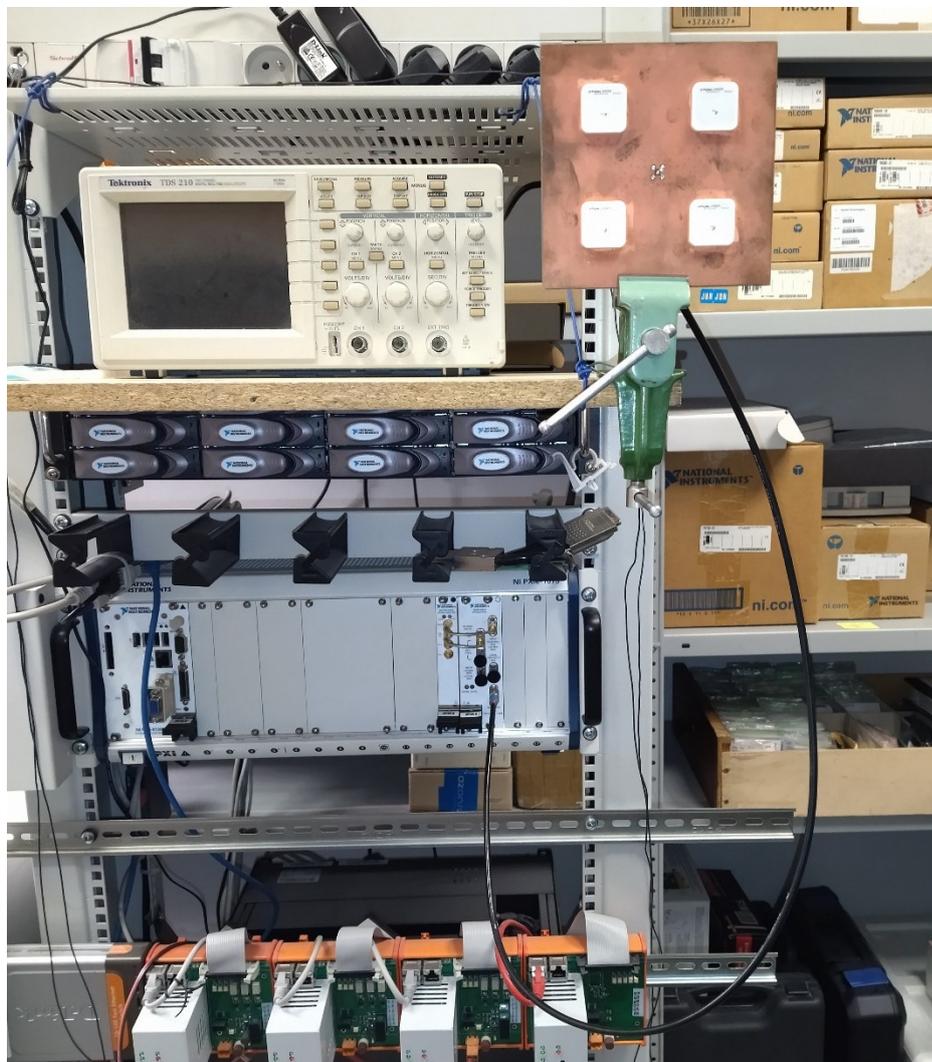


Рис. 13. Стенд для измерения диапазона рабочих частот

Антенна была закреплена в тисках в подложенной ткани, чтобы ничего не поцарапать. От стенда на вход антенны был отведен коаксиальный кабель, через который подавался сигнал от 2 ГГц до 3 ГГц. Прибор регистрировал сигнал, отраженный от антенны обратно в кабель. Таким образом высчитывалось отношение отраженного сигнала к выходящему по следующей формуле:

$$10 \log_{10} P_1/P_0,$$

где P_1 и P_0 сигнал отраженный от антенны и сигнал генератора направленный в антенну соответственно.

Получилось, что антенна излучает сигнал частотой 2,37 – 2,49 ГГц, что является рабочей частотой каждой антенны из стека.

На рис. 14 можем увидеть график зависимости КСВ от частоты сигнала. В точках 1 и 3 значения децибел достигают -10. Это значит, что при данных частотах антенна излучает примерно 90% мощности подаваемого сигнала, а 10% отражает назад в кабель. Видно, что в окрестностях частоты 2.45 ГГц доля мощности, отраженной обратно в кабель не превышает 1%.

Данный результат свидетельствует о том, что изготовленный четвертьволновой трансформатор также не отражает сигнал обратно в кабель в рабочем диапазоне частот антенны, то есть выполняет свою функцию согласования линий.

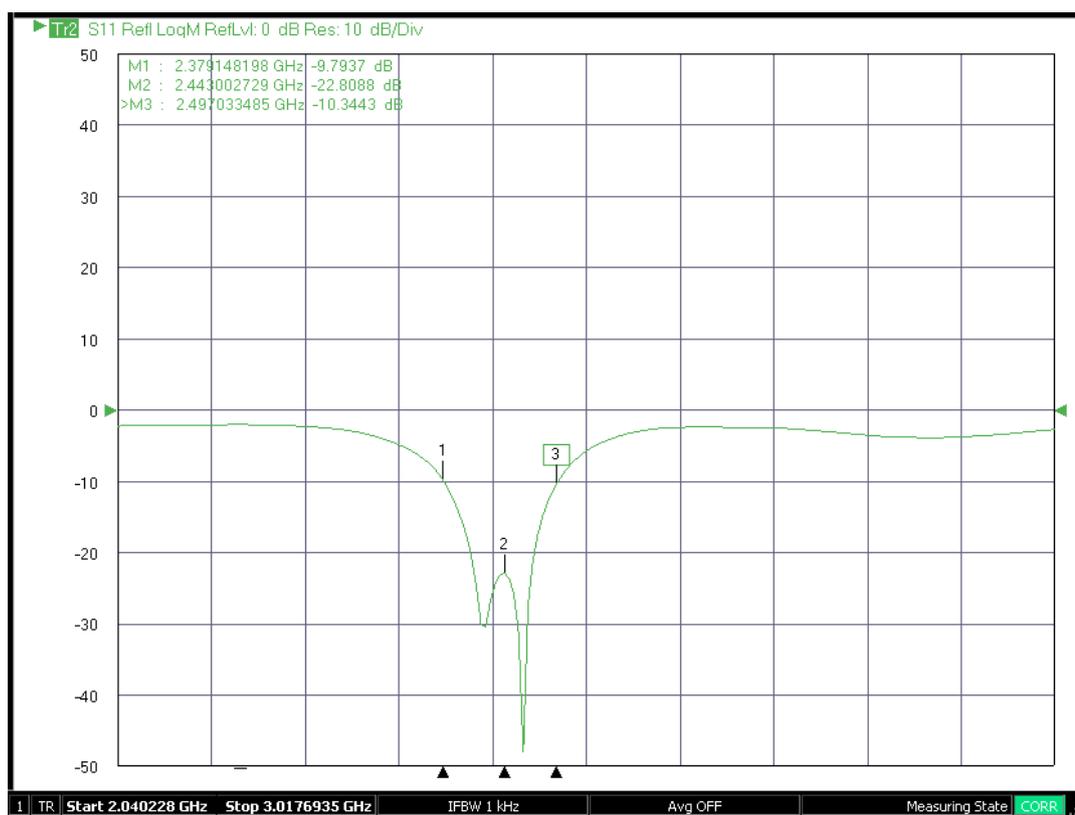


Рис. 14. График зависимости $dB(v)$ для определения частоты антенны

Также была определена диаграмма направленности антенны. Из-за расположения патч-антенн на полотне ожидалось, вместо величины

коэффициента усиления одной патч-антенны 6,5 dBi, получить 12,5 dBi в максимуме диаграммы направленности, т.к. в этом направлении должны сложиться мощности излучения четырех патч-антенн, то есть +6дБ.

Чтобы определить диаграмму направленности, антенна была установлена на штативе и подключена к генератору, который подавал 2,45 ГГц. Вокруг антенны пустили нить, связанную петлей, чтобы обеспечить практически одинаковое расстояние до антенны спектроанализатора. Антенна спектроанализатора также помещалась внутрь петли после чего петля натягивалась. Проведение измерения показано на рис. 15. Меняя угол приемника по отношению к антенне, были получены результаты мощности, что позволяет рассчитать диаграмму направленности. Углы вычислялись по фотографиям.



Рис. 15. Измерения диаграммы направленности стека патч-антенн

С помощью программного пакета Matlab была визуализирована диаграмма направленности в полярной системе координат (рис. 16).

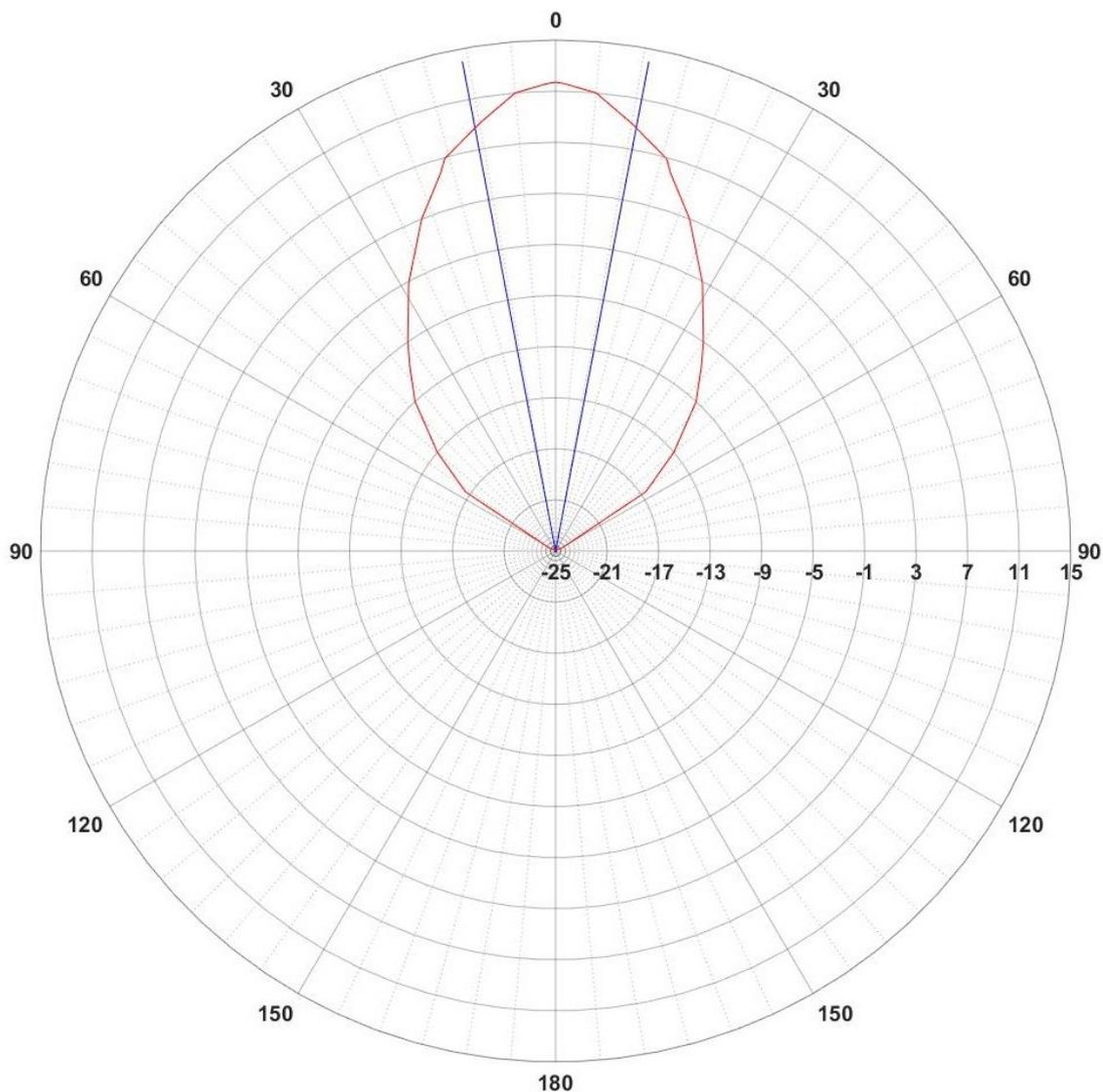


Рис. 16. Диаграмма направленности стека патч-антенн в полярной системе координат

Результаты измерения являются относительными, т.к. не известна полная мощность, излучаемая антенной. Поэтому смещение выбрано произвольно исходя из ожидаемой величины коэффициента усиления. Однако данная диаграмма позволяет измерить ширину луча, разработанного нами стека патч-антенн. Ширина луча определяется по уровню – дБ от максимума диаграммы направленности, то есть по уровню половины мощности. На основе гладкой интерполяции диаграммы направленности найдена величина угла ширины луча стека патч-антенн, составляющая $21,5^\circ$.

5. Вывод

Рассчитан, спроектирован и изготовлен стек из четырех патч антенн. Делитель мощности выполнен в виде полоскового четвертьволнового трансформатора в составе печатной платы на которой установлены патч-антенны.

Измерена зависимость коэффициента стоячей волны в диапазоне частот от 2 ГГц до 3 ГГц. Показано, что стек патч-антенн в своем рабочем диапазоне излучает подаваемую в него от генератора мощность. Доля отраженной мощности составляет менее 1%. Измерен рабочий диапазон частот стека патч-антенн, равный 2,39 – 2,49 ГГц.

Качественно измерена диаграмма направленности. стека патч-антенн, измерен угол ширины луча, составляющая 21,5°.

6. Список литературы

1. Ульяновский государственный технический университет. Проектирование полосковых устройств СВЧ.
2. Основы радиолокации: <https://www.radartutorial.eu>
3. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B0%D1%82%D1%87-%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0>. – Дата доступа: 15.12.2021.
4. Основы радиолокации, Микрополосковая антенна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an39.ru.html>. – Дата доступа: 15.12.2021.
5. Основы радиолокации, Полуволновая антенна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/an18.ru.html>. – Дата доступа: 15.12.2021.
6. 3G-Aerial, Патч антенна 3G, 4G, Wi-Fi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3g-aerial.biz/konstruktsii-antenn/odnonapravlennye-antenny/patch-antenna>. – Дата доступа: 15.12.2021.
7. 3G-Aerial, Как соединить две антенны? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3g-aerial.biz/splitter>. – Дата доступа: 18.12.2021.