

**Изготовление и испытание антенны типа волновой канал
на длину волны 436МГц для спутниковой связи**

Стецкий Илья Максимович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа №18311, 3 семестр, 2019.

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. **Горев Василий Николаевич**

Аннотация

Целью данной работы является изготовление и испытание антенны типа волновой канал на длину волны 436МГц для спутниковой связи. Сейчас большую популярность приобретают малые и сверхмалые спутники. На базе НГУ подготавливается к запуску самодельный спутник, и одним из этапов его подготовки требовалось создать антенну типа волновой канал для связи со спутником. В рамках работы выполнен и проверен расчёт геометрии антенны длиной 3м и коэффициентом усиления 16 дБи. В соответствии с расчетной геометрией изготовлено 2 экземпляра антенны для приёма круговой поляризации. Опытным путём определено оптимальное расстояние между антенной и металлической частью штанги, между двумя антеннами, при котором влияние штанги и взаимное влияние антенн отсутствует. Выполнены испытания разработанной антенны в условии прямой видимости на расстояниях до 43 км. Испытания показали удовлетворительное соответствие теоретическому расчёту. После этого выполнен монтаж антенны на антенной мачте на крыше главного корпуса НГУ, Пирогова 2. Стек из двух антенн установлен на поворотном устройстве на электрической штанге.

Ключевые слова: малые спутники, антенны, волновой канал, коэффициент усиления

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Стецкий Илья Максимович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изготовление и испытание антенны типа волновой канал
на длину волны 436МГц для спутниковой связи**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18311

Научный руководитель:

к. ф.-м. н., Горев В. Н.

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 2019г.

Преподаватель практикума

к. ф.-м. н., Чопорова Ю. Ю.

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 2019г.

Куратор практикума:

к. т. н., Астрелин В.

Т.

Итоговая оценка

« _____ » _____ 2019г.

Аннотация

Целью данной работы является изготовление и испытание антенны типа волновой канал на длину волны 436МГц для спутниковой связи. Сейчас большую популярность приобретают малые и сверхмалые спутники. На базе НГУ подготавливается к запуску самодельный спутник, и одним из этапов его подготовки требовалось создать антенну типа волновой канал для связи со спутником. В рамках работы выполнен и проверен расчёт геометрии антенны длиной 3м и коэффициентом усиления 16 дБи. В соответствии с расчетной геометрией изготовлено 2 экземпляра антенны для приёма круговой поляризации. Опытным путём определено оптимальное расстояние между антенной и металлической частью штанги, между двумя антеннами, при котором влияние штанги и взаимное влияние антенн отсутствует. Выполнены испытания разработанной антенны в условии прямой видимости на расстояниях до 43 км. Испытания показали удовлетворительное соответствие теоретическому расчёту. После этого выполнен монтаж антенны на антенной мачте на крыше главного корпуса НГУ, Пирогова 2. Стек из двух антенн установлен на поворотном устройстве на диэлектрической штанге.

Ключевые слова: малые спутники, антенны, волновой канал, коэффициент усиления

Оглавление

1.	Введение.....	4
2.	Методика и оборудование.....	5
2.1.	Тестовый излучатель и приёмник.....	5
2.2.	Методика расчета антенны.....	6
2.2.1.	Основная принимающая часть антенны. Полуволновой вибратор.....	6
2.2.2.	Направленность и усиление антенны.....	7
2.2.3.	Усиление антенны “Волновой канал”.....	7
2.3.	Изготовление антенны.....	9
3.	Измерения и результаты.....	11
3.1.	Измерение в помещении.....	11
3.1.1.	Влияние металлической штанги.....	11
3.1.2.	Взаимное влияние 2х антенн.....	12
3.2.	Испытание между крышами.....	14
3.3.	Теоретический расчет, сравнение с экспериментом.....	14
4.	Выводы.....	16
5.	Список литературы.....	16

Введение

С развитием элементной базы, а именно с уменьшением размеров устройств и их потребностей для решения поставленных задач исчезла необходимость в громадных размерах спутников, сейчас большинство задач может выполнить и спутник малого размера, с более дешевым способом запуска на орбиту. Именно поэтому своё развитие и распространение получил тип наноспутников, называемый CubeSat[5]: блочная структура, состоящая из одного или нескольких кубов 10x10x10 см, вес не превышает 10 килограмм (в среднем 1,33 кг весит один блок). Особенность CubeSat в крайней, для космических исследований, дешевизне (NASA в 2014г. оговаривало цифры за 20 тысяч долларов за изготовление и запуск), в наличии рынка деталей и элементов, где можно найти готовые решения для поставленной задачи, и в простоте запуска спутника на орбиту (CubeSat устанавливается на ракетоноситель как дополнительная нагрузка совместно с крупными аппаратами, либо запускается прямо с МКС). В сумме все эти плюсы позволяют использовать CubeSat как предприятиям и институтам с университетами, так и большим школам.

Одна из самых важных задач при работе со спутником является поддержание связи с ним, вне зависимости от его ориентации и поляризации приходящего сигнала. Решение именно этой проблемы и будет отображено в курсовой.

Самой простой в реализации была выбрана антенна типа волновой канал. Этот тип антенн один из самых распространённых в обычной жизни. Антенны «волновой канал» широко применяются в качестве приёмных телевизионных, в качестве приёмных и передающих в системах беспроводной передачи данных, в радиолюбительской связи, в прочих

системах связи, в радиолокации. Основная причина выбора именно этого типа антенны заключается в высоком усилении при компактных размерах, небольшая масса, и простота, которая и позволила разработать в короткие сроки обыкновенную антенну под требуемый функционал. Антенна должна была принимать сигнал любой поляризации, по этому было реализовано две антенны, расположенные «крест накрест» друг к другу, для полного охвата всех поляризаций сигналов. Также, важными критериями были и физические ограничения на размер антенны. Антенна не должна была превышать размер установленной мачты. Помимо этого были требования на определённое усиление, антенна должна была работать на строго заданном диапазоне частот. Финально поставленная задача выглядела так: “Изготовление и испытание антенны типа волновой канал на длину волны 430МГц-440МГц для спутниковой связи, не превышающей размеры в 3м и с усилением ~16дБ

2 Методика и оборудование

2.1 Тестовый излучатель и приёмник

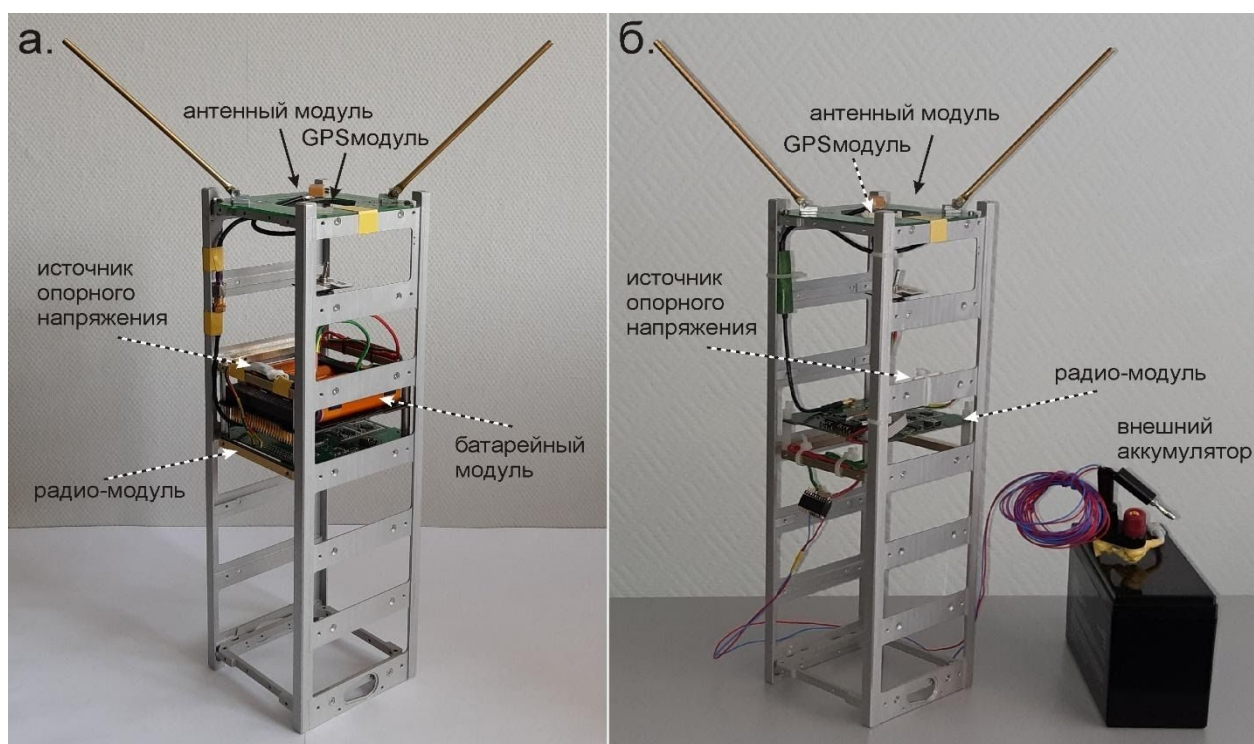


Рис. 1 Внешний вид макета спутника с установленным батарейным модулем (а), с внешним аккумулятором (б).

Макет МКА изготовлен на каркасе CubeSat 3U (один из первых изготовленных каркасов). в него установлен блок размера 0.5U содержащий радио-модуль и батарейный модуль (рис. 1, а). На торце каркаса расположен антенный модуль. Полный вес макета в этой комплектации составляет 746 г. Батарейный модуль не всегда был доступен, т.к. проходил испытания, поэтому, в части экспериментов для питания радио-модуля используется свинцовый аккумулятор от офисного источника бесперебойного питания (рис. 1, б). Для обеспечения стабильного питания радио-модуля в линию питания установлен источник опорного напряжения, выдающий 5В. Дополнительно на макет МКА установлен GPS модуль для того, чтобы упростить получение привязки макета МКА к координатам и ко времени измерения.

На антенном модуле расположена антенна из двух прямых элементов $\frac{1}{4}$ длины волны каждый, перпендикулярных друг другу. Элементы расположены в плоскости пересекающей торец нормально по диагонали симметрично продольной оси каркаса. Антенна + каркас аппарата имеют всенаправленную диаграмму направленности. Наибольший коэффициент усиления система антенна-каркас имеет в направлении продольной оси аппарата, в направлении противоположном антеннам и составляет 3.75 дБ. Наименьший коэффициент усиления вдоль элементов антенны, -2.7 дБ.

В данный момент радио-модуль настроен на частоту 436.7 МГц. Максимально возможная выходная мощность, которую можно достичь на данном схемотехническом решении – 1 Вт. На время испытаний, мощность радио-модуля, отдаваемая в антенну, с целью экономии ресурса, составляет 0.5 Вт.

2.2 Методика расчета антенны

Антенна типа волновой канал уже долгое время является самой распространённой антенной направленного типа, в том числе и из-за своей универсальности. У данного антенн много вариативных моментов, много опций, которые в итоге приводят к усложнению подсчётов, теоретических предсказаний и точного моделирования. Существует методика расчёта геометрии антенн, например [1], на основе которой разработан on-line калькулятор [2], позволяющий определить оптимальную геометрию при заданных критериях. Данная методика представлена ниже. Также существует программа, AntennaMagus [3], которая позволяет решить обратную задачу - расчёт коэффициента усиления по известной геометрии задачи. Для решения поставленной задачи были использованы данные, полученные программно.

2.2.1 Основная принимающая часть антенны. Полуволновой вибратор

Полуволновой диполь(вибратор) - простейшее и одновременно самое распространённое резонансное устройство среди всех антенн. Изначально антенны предназначены для извлечения энергии имеющегося электромагнитного поля или для преобразования энергии передатчика в электромагнитные волны путём излучения.

Полуволновой вибратор (длина равна $\lambda/2$ соответствующей частоты) находится в резонансе с длиной волны, и в согласованном полуволновом вибраторе максимальное напряжение $U_{\max}$ и ток $I_{\max}$ связаны законом $U_{\max}=Z_D I_{\max}$, где Z_D -волновое сопротивление вибратора, Ом, рассчитываемое по формуле $Z_D=120\ln(0.575 \frac{l}{d})$

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{2P_{\text{вх}}}{(R_r + R_l)}} \quad (2.1)$$

где $P_{\text{вх}}$ -входная мощность, Вт; R_r - сопротивление излучения;

R_l - сопротивление потерь;

$$\text{Кпд антенны } \eta = \frac{1}{1 + \frac{R_l}{R_r}}$$

2.2.2 Направленность и усиление антенны

Ни одна стандартная антенна типа “волновой канал” не способна обеспечить одинаковую поляризацию волны и плотность энергии по всем направлениям. Поэтому у любой антенны имеется определенная направленность, описываемая соответствующей диаграммой. При этом диаграмма направленности и усиления антенны взаимосвязаны. Плотность потока энергии излучения тем выше, чем острее направленность излучения. Поэтому усиление по плотности потока энергии зависит от диаграммы направленности.

Усилением G_E приёмной антенны называется отношение мощности, принятой антенной, которая оптимально ориентирована по направленности и поляризации в плоском волновом поле P_E к принятой мощности полуволновым вибратором P_K . И из равенства $P=U^2/R$, при одинаковом сопротивлении нагрузки

$$G_E = P_E/P_K = (U_E/U_K)^2 = 10\lg(P_E/P_K) = 20\lg(U_E/U_K) \text{ [дБд]}$$

Коэффициентом направленности приёмной антенны, или коэффициентом её направленного действия, называется отношение максимальной мощности P_E принимаемой антенны, к мощности P_K принимаемой изотропным излучателем $D=P_E/P_K$

2.2.3 Усиление антенны “Волновой канал”

Основополагающие экспериментальные работы для данного типа антенн были выполнены в 1959 г. с однородной структурой: все директоры идентичны, на равных расстояниях друг от друга. Выяснилось, что волну, пробегающую по директорной антенне, можно рассматривать как поверхностную, которая замедляется структурой антенны, поэтому фазовая скорость v оказывается ниже скорости света c . Директорная антенна, как и любой продольный излучатель, характеризуется максимально возможным усилением, когда фазовая скорость устанавливается в соответствии с

длинной антенны- независимо от количества, длины, диаметра директоров, и расстояния между ними. Практика показала, что неоднородные структуры достигают более высокого максимального усиления. Неоднородность выражена в непостоянстве длины и расстояния между директорами, причём обычно длина директоров постепенно убывает от активного элемента.

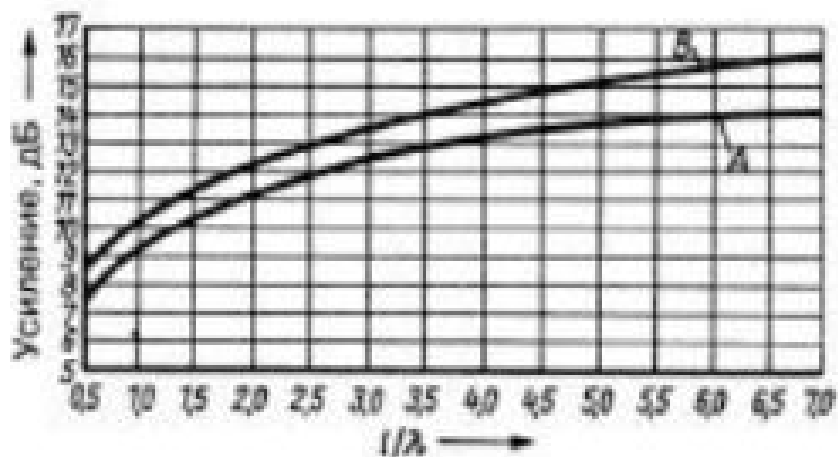


Рис. 2. Зависимость усиления директорной антенны от ее длины, приведенной к длине волны λ : А-однородная антенна; В- теоретический максимум усиление неоднородной

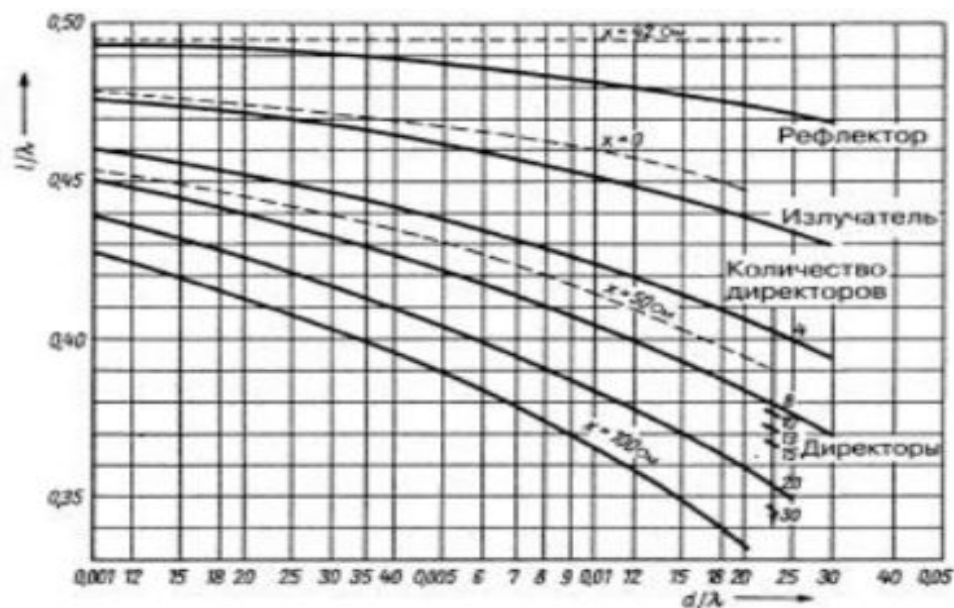


Рис. 3. Зависимость оптимальной длины l элементов директорной антенны от их диаметра d приведенного к длине волны λ : пунктиром - кривые постоянного реактивного сопротивления

Подобие выявленных оптимальных значений (рис 2, 3) прослеживается и по межэлементным расстояниям в пределах полседовательности директоров. В результате измерений на экспериментальных образцах директорных антенн

была предложена последовательность расстояний между элементами длинной антенны, от которой и отталкиваются при изготовлении антенн.

2.3 Изготовление антенны



Рис. 4 Внешний вид антенн, имеющихся в наличии, а) антенна производства Ну-Gain (США), б) самодельная антенна, в) антенна производства Diamond (Япония), г) итоговый вариант самодельной антенны для круговой поляризации.

По методике, представленной выше, реализованной в виде on-line калькулятора [2], была рассчитана антенна длиной в пределах 2,7 м (длина алюминиевой профильной трубы $-\lambda/4 -0,1$), с помощью программного пакета AntennaMagus [3] была рассчитана ее диаграмма направленности (рис. 5, а), которая соответствует величине коэффициента усиления предсказанного методикой расчета антенны (16 дБи). Так как избежать всех внешних признаков невозможно, было принято решение использовать готовую японскую антенну плоской поляризации как эталон. В качестве пробы была сделана антенна на деревянной направляющей (буме) для приема плоско поляризованной волны. Экспериментально было выполнено сравнение самодельной антенны (рис. 4, б) с японской (рис. 4, в), которое показало, что

разность измеренных уровней сигнала (в дБм) равна разности расчетного (для самодельной) и паспортного (для Японской) коэффициентов усиления.

Отношение коэффициентов усиления изотропного излучателя и дипольного:

$$G[\text{дБи}] = G[\text{дБд}] + 2,15 \text{ дБ}$$

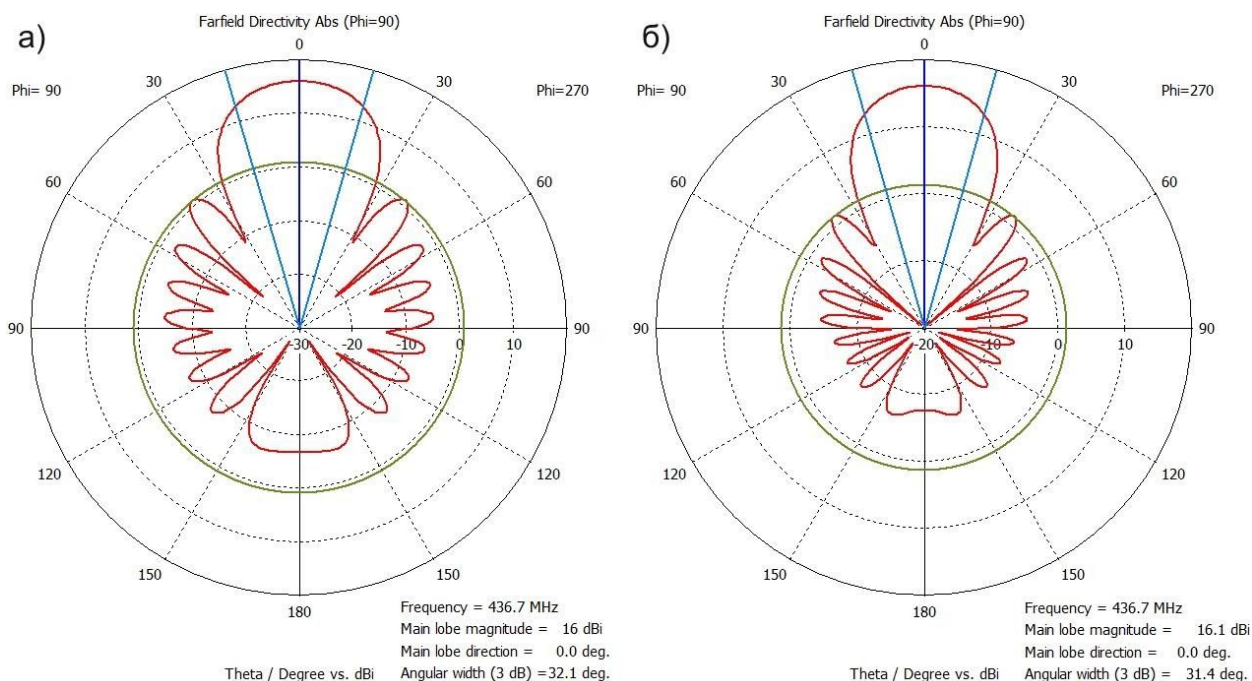


Рис. 5 Диаграммы направленности самодельных антенн, а) на диэлектрическом буме и б) - на алюминиевом буме.

Затем, по той же методике была рассчитана и изготовлена антенна на алюминиевой направляющей для приема волны с круговой поляризацией. Расчётная диаграмма направленности этой антенны в случае подключения одной плоскости для приема плоско-поляризованной волны приведена на рис. 5, б. Видно, что коэффициент усиления в максимуме диаграммы направленности практически не изменился. Для приёма круговой (а значит и любой плоской) поляризации нужно суммировать сигналы двух перпендикулярных антенн со сдвигом $\lambda/4$.

В результате испытания этой антенны в условиях помещения было обнаружено, что схема согласования двух перпендикулярных плоскостей антенны работает некорректно. По результатам испытаний была разработана и изготовлена работоспособная схема согласования. Таким образом, появилась антенна №1 (рис. 3, г) для приема круговой поляризации.

3 Измерения и результат

3.1 Измерение в помещении

Таблица 1. Сравнение коэффициентов усиления антенн, имеющих в наличии.

Условное наименование	Коэфф. усиления по паспорту			Измеренная величина (плоская поляризация)	
	Плоская поляризация		Круговая поляризация	Коэфф. усиления ¹	Коэфф. усиления относительно японской
	Номинал	Отн. японской			
Японская (эталон)	14.8 dBi	0 dBi	-	11.2 dBi	0 dBi
Самодельная	16.0 dBi	+1.2 dBi	13,8 dBdc	12.1 dBi	+0.9 dBi

3.1.1 Влияние металлической штанги

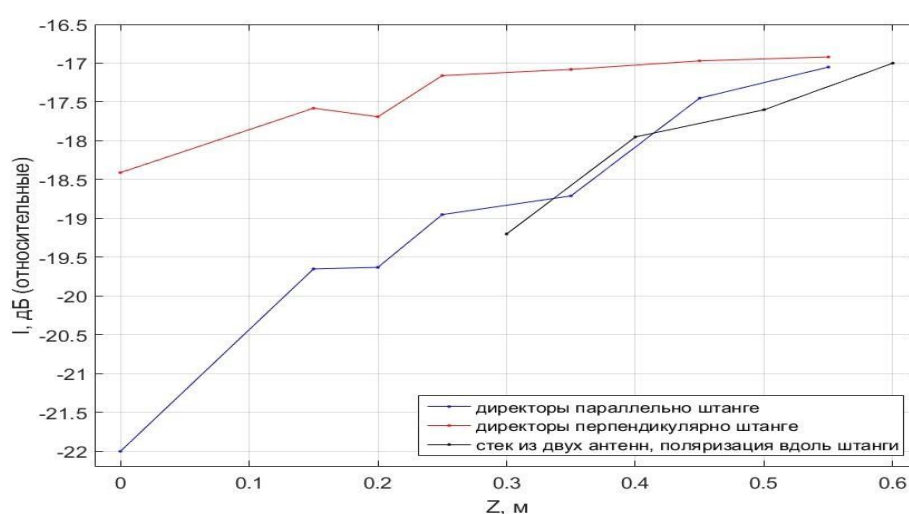


Рис. 6 Зависимость уровня принимаемого сигнала от расстояния до металлической части штанги (а), от расстояния между антеннами (б)

В методике[1] все формулы были прописаны и рассчитаны для антенн, на которых не влияли окружающие факторы, но на самом деле пренебречь металлической штангой нельзя. Штанга будет работать как директор, чтобы это избежать, лёгкие антенны прикрепляют за хвостовую часть. Там штанга располагается перпендикулярно плоскости поляризации антенны. В случае круговой поляризации крепление производится за центр тяжести. Была исследована зависимость от расстояния между бумом и концом штанги и уровня принимаемого сигнала (рис 5). Для этого антенну устанавливали на пластиковую балку на разную высоту относительно металлической основы.

3.1.2 Взаимное влияние 2х антенн

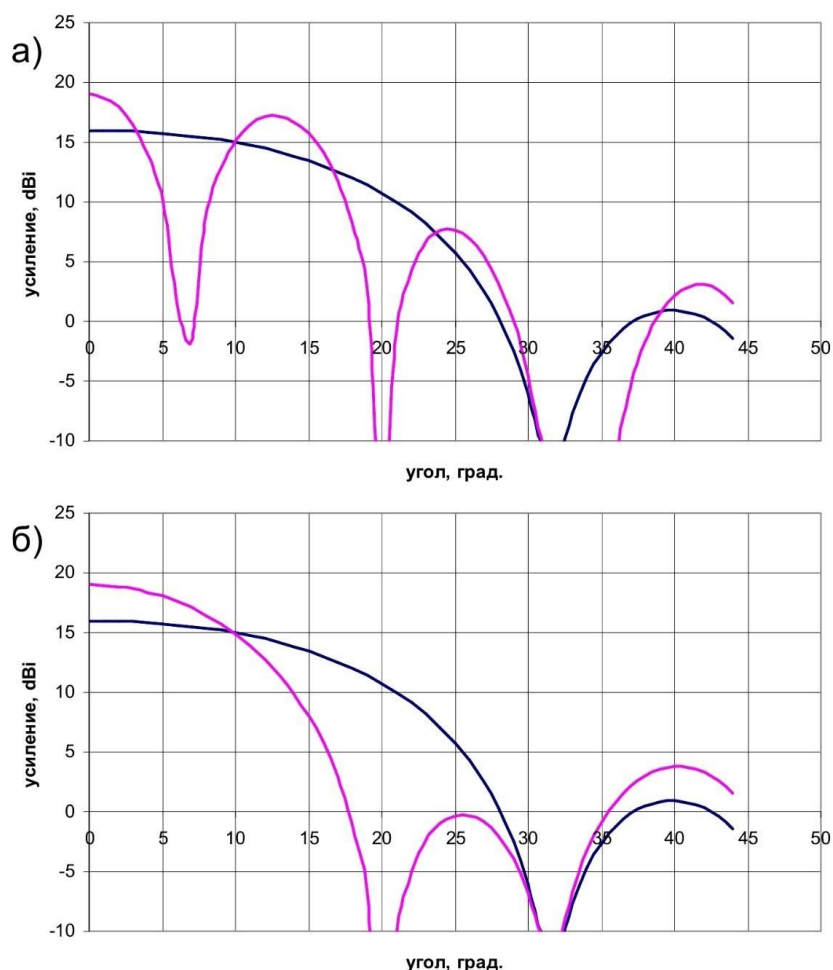


Рис. 7 Диаграммы направленности стека из двух антенн (розовые линии) по сравнению с диаграммой направленности единичной антенны (синяя линия) при расстоянии между антеннами – 3 м (а), - 1 м (б).

Диаграмма направленности стека антенн отличается от диаграммы единичной антенны потому что из-за угла падения в плоскости стека сигналы антенн сдвигаются по фазе (рис. 7). Этот эффект усиливается при увеличении расстояния между антеннами стека, поэтому антенны нужно устанавливать на минимальном расстоянии друг от друга. Такое расстояние было определено опытным путем и составляет 0.5 – 0.6 м, то есть около длины волны (рис. 6).

В итоге был собран стек из двух антенн, с минимизированным, насколько это возможно, внешним и взаимным искажением. Для суммирования сигналов используется готовый сумматор для японской антенны.

3.2 Испытание между крышами

Антенна устанавливалась на крыше Ляпунова 4 (рис. 4. г) на поребрике, максимально удаленно от крыши, на пластиковой балке, находясь на жестком металлическом основании. Источники помещались на разном расстоянии на различные возвышения и крыши.

Таблица 2. Результаты измерений

№	Адрес	Описание	Расст. до Ляпунова, 4	Средний уровень сигнала, дБм	Лучший уровень сигнала, дБм
1	Ляпунова, 2	Новое общежитие НГУ	50 м	-22,9	-22,5
2	Пирогова, 2	Старый главный корпус НГУ	250 м	-35,8	-34,9
3	Лаврентьева, 6/1	Свечка ВЦ	700 м	-45,3	-43,9
4	Приморская, 5	Жилой дом, 26 эт.	7,5 км	-61,2	-58,5
5	с.н.т. «Морское» / с.н.т. «Шуманка»		25 км	-85	-84,4
6	село Боровое		30 км	-87	-85,6
7	аэродром Мочище	самолет, 2,5 км над уровнем моря	42,7 км	-85,5	-78,6

3.3 Теоретический расчет, сравнение с экспериментом

$$P = 10 \log \left[\frac{P}{P_0} \left(\frac{\lambda}{4\pi L} \right)^2 \right] + G_{\text{dBI}} + G_{\text{SAT}} \quad (3.3.1)$$

$G_{\text{dBI}} = 16.1$ дБи - расчетный коэффициент усиления

$G_{\text{SAT}} \approx 3$ дБи- расчетный коэффициент усиления макету, при ориентации усом антенны макета от наземной антенны.

$\lambda = 0,68$ м длина волны

L = расстояние

$P = 500$ мВт- мощность радиомодуля макеты спутника во время испытания

$P_0 = 1$ мВт- эталонная мощность

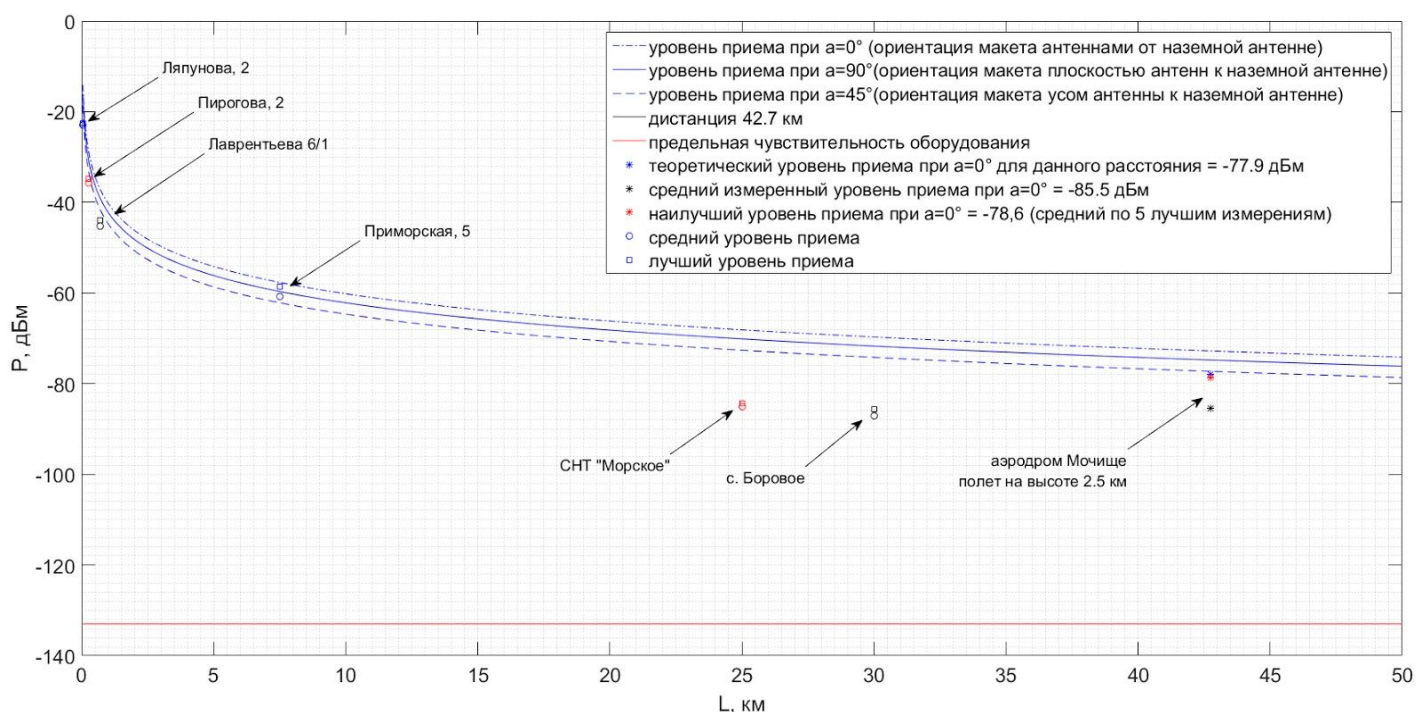


рис. 8 Основной результат- сравнение с теорией

Два измерения: СНТ "Морское" и с. Боровое находятся низко над уровнем моря, почти по касательной. Результаты этих точек хоть и не совпадают с теорией, но это было предсказуемо.

Напротив, условия измерений на Приморской и на аэродроме Мочище были приближены к идеальным: минимизирован вклад от здания, из-за ориентации, был хорошо просматриваемый визуальный контакт, без помех. Это и можно заметить по рис.8, результаты очень близки к теоретическим значениям.

После получения удовлетворительных результатов, было принято решение собрать стек из двух антенн, установить на антенной мачте на крыше Пирогова 2. Антенна установлена на диэлектрической штанге с поворотным механизмом, что позволяет ей принимать сигнал со спутников на низкой околоземной орбите, отслеживая траекторию их движение



рис. 9. финальная установленная антенна

Вывод

- Выполнен расчёт геометрии антенны длиной 3м и коэффициентом усиления 16 дБи.
- Проведена численная проверка коэффициента усиления расчетной геометрии антенны, которая показала соответствие с расчетным коэффициентом усиления 16.1 дБи.
- В соответствии с расчетной геометрии изготовлено 2 экземпляра антенны для приёма круговой поляризации.
- Опытным путём определено оптимальное расстояние между антенной и металлической частью штанги, между двумя антеннами, при котором влияние штанги и взаимное влияние антенн отсутствует.
- Выполнены испытания антенн на соответствие расчетному коэффициенту усиления в условии прямой видимости. Испытания показали удовлетворительное соответствие.
- Выполнен монтаж антенны на антенной мачте на крыше главного корпуса НГУ, Пирогова 2. Стек из двух антенн установлен на поворотном устройстве на диэлектрической штанге.

Список литературы

1. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны. Том 1.2.: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс. – 416 с.: ил.
2. Расчет антенны Uda-yagi конструкции DL6WU
<https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-antenny-uda-yagi-dl6wu>
3. ANTENNA MAGUS - ANTENNA DESIGN SOFTWARE
https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/antenna-magus/?utm_source=promotional&utm_medium=web&utm_content=cst&utm_campaign=cst-migration
4. ООО "Р-Квад" <http://www.quad.ru/production/tube.php>
5. ISO 17770:2017: Space systems — Cube satellites (CubeSats)
6. European Space Agency
https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Technology_CubeSats
7. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. Учеб. для радиотехнических специальностей вузов. — М.: Высш. шк., 1988. — 432 с.
8. Official site of CubeSat <http://www.cubesat.org/>