

Региональная открытая конференции
по научно-техническому творчеству школьников «Лабиринты науки»

Тема работы:

**ПРОТОТИП АНТЕННОГО КОМПЛЕКСА ШКОЛЬНОГО ЦЕНТРА
КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПРИЁМА И ОБРАБОТКИ
СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ПЛАТФОРМЕ CUBESAT**

Секция: Физика и компьютерные технологии

Макаричев Глеб Алексеевич

СОШ №12 им. П.Ф. Дерунова, г. Рыбинск

11а класс

Научный руководитель

Печаткин Андрей Валентинович

доцент кафедры «Электротехника и программируемая радиоэлектроника»

ФБГОУ ВО «РГАТУ имени П.А. Соловьева»

Оглавление

Введение	3
Основная часть	4
1. Поиск информации и готовых решений	4
2. Моделирование и оптимизация конструкции	5
3. Изготовление прототипа антенны	6
4. Установка ПО, полевые испытания, анализ недочётов в конструкции прототипа	6
5. Разработка технологии трансляции сигналов с единой цифровой платформы	9
6. Перспективы развития проекта	10
Заключение	11
Список использованных источников и литературы	12

Введение

Активное развитие спутниковых технологий приводит к появлению и быстрому развитию ряда национальных образовательных проектов, одним из которых является программа «Дежурный по планете», объединяющая технологические конкурсы и проекты для школьников и студентов в области космоса [1]. Одной из значащих составляющих этой национальной программы является платформа «Space-π» – научно-образовательный проект, позволяющим школьникам узнать, как конструируются малые космические аппараты, как создаётся полезная нагрузка и как с её помощью реализуется космический эксперимент [2].

Актуальность проекта: подтвержденное желание учащихся активно участвовать в инновационных программах и проектах, посвящённых освоению космоса, в то же время отсутствие недорогого оборудования для обучения космической связи. Для активного включения в программы «Дежурный по планете» и «Space-π» в рамках деятельности детского технопарка «Кванториум» базе МОУ «СОШ №12 им. П.Ф. Дерунова», реализуется пилотный проект по разработке управляемого антенного комплекса для школьного Центра космических исследований. Разрабатываемый комплекс предназначен для приёма и обработки спутниковой информации на платформе CubeSat и изучению основной технологии программно-определяемого радио (SDR – Software-defined radio), объединяющую целую серию различных принципов и устройств.

Для разработки новых спутников требуется много квалифицированных специалистов с опытом работы в данной сфере. Однако современное российское образование даёт очень много теории и очень мало практики по спутниковой связи. Это отчасти вызвано отсутствием недорогого оборудования для такой деятельности. У школ, колледжей и университетов может просто не хватать денег на покупку антенны, поворотной платформы, фидерной линии и приёмного оборудования. Реализуемый в рамках

школьного технопарка проект призван решить эту задачу благодаря изготовлению недорогого комплекта для получения информации с отечественных малых космических аппаратов (МКА). Этот комплект познакомит учащихся с основами космической связи, цифровой обработки сигналов и орбитальной механики.

Цель проекта: создание полнофункционального прототипа недорогого тиражируемого SDR комплекта (антенна, фидер, приёмник) для приёма, обработки и трансляции сигналов с отечественных МКА в дециметровом диапазоне длин волн для школьного Центра космических исследований.

Задачи проекта: разработка концепции проекта; выбор и обоснование существующих аналогов; выбор элементной базы, аппаратная разработка прототипа; проверка реализуемости заданных характеристик антенны на основе поэтапного моделирования антенны «Волновой канал»; разработка технологии изготовления и сборки прототипа; сборка и отладка прототипа; проведение испытаний прототипа; разработка технологии трансляции принимаемых сигналов с единой цифровой платформы на терминалы (рабочие станции) учащихся; анализ полученной информации и разработка корректирующих мероприятий для создания опытных образцов и испытаний.

Основная часть

1. Поиск информации и готовых решений

Одним существующей решений из них является направленная антенна Яги-Уда, которую предлагают изготовить специалисты Space-Pi для приёма сигналов со спутников типа CubeSat. Данная антенна состоит из 15 элементов, которые смонтированы на металлической трубе прямоугольного сечения. В собранном виде она показана в приложении 1. Такая антенна достаточно сложна в изготовлении, имеет большие габариты и массу, поэтому требует поворотную платформу: руками удерживать и поворачивать такую антенну будет достаточно трудно. Антенна имеет неплохой коэффициент усиления $K_u = 14 \text{ dBi}$ и направленности $D_o = 17 \text{ dBi}$ [3]. Однако

под критерий низкой стоимости, портативности и простоты изготовления такая антенна не подходит.

Другой конструкцией является волновой канал от радиолюбителя DL6WU. Данная антенна проверена временем, для неё есть онлайн-калькуляторы [4]. Антенна может быть изготовлена как на металлической, так и на диэлектрической траверсе с количеством элементов более четырёх. Конструкция является масштабируемой – при неизменном типе траверсы и способа крепления элементов к ней можно добавлять новые элементы без изменения уже существующих. Эту конструкцию и принята взять за основу проектируемого комплекта.

2. Моделирование и оптимизация конструкции

Были пересчитаны начальные размеры в онлайн-калькуляторе [5] на центральную частоту $f_0 = 435$ МГц (эта частота является центральной в радиолубовительском диапазоне 70 см, в котором вещают многие спутники формата CubeSat). Затем выполнено моделирование в специальной программе-моделировщике «MMANA-GAL», проведён анализ диаграммы направленности, КСВ и коэффициента усиления (приложения 2 и 3). Затем выполнена небольшая оптимизация, и по результатам которой изготовлен прототип – рис. 1.

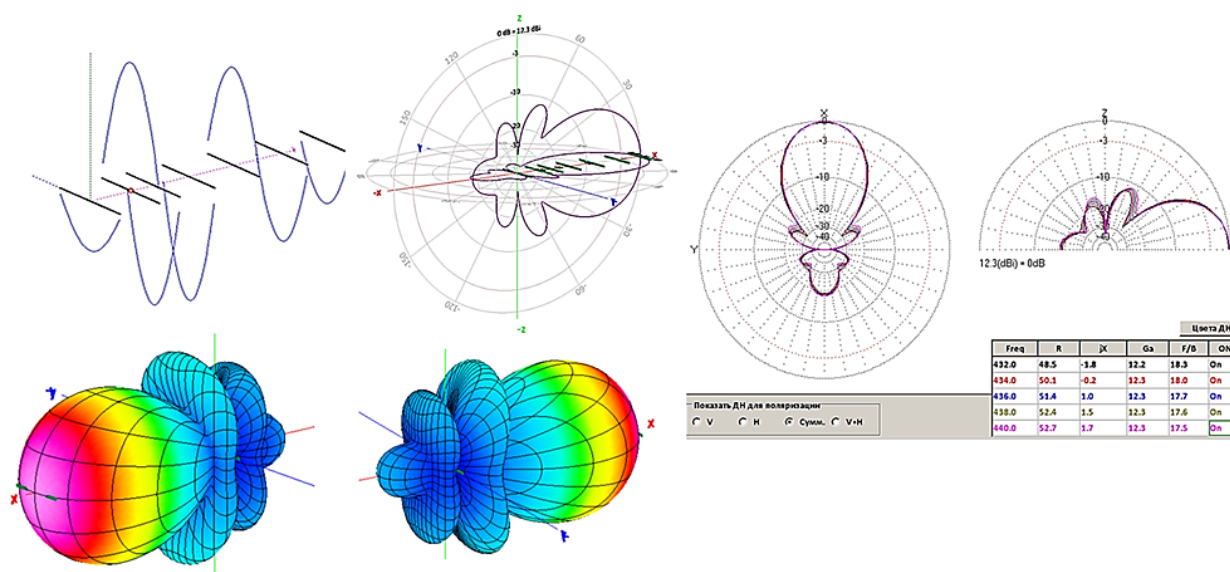


Рис. 1. Результаты компьютерного моделирования и оптимизации спутниковой 7-ми элементной антенны «Волновой канал для приёма спутниковых сигналов»

3. Изготовление прототипа антенны

Прототип сделаны на траверсе из доступной полипропиленовой трубы диаметром 20 мм. Пассивные элементы выполнены из алюминиевого провода АВВГ-2×10, предварительно разделённые на 2 отдельные алюминиевые проволоки в изоляции. Активные элементы выполнены из медного одножильного провода ПуВ-1×6. Всё детали закреплены на держателях для полипропиленовых труб диаметром 20 мм. После сборки крепления вибратора дополнено 2-мя дополнительными держателями, соединёнными в одну линию, так как на одном держателе активный вибратор держался очень плохо. Коаксиальный кабель RG-58C/U – 50 Ом, Cu/Al/Cu к предварительно освобождённому от изоляции при помощи канцелярского ножа вибратору припаивал электропаяльником припоем ПОС-61 и флюсом СКФ при температуре 350 °С. Термопластичный клей очень быстро размягчался, поэтому паять пришлось быстро и в несколько этапов. Сначала залудил кабель, потом вибратор, затем спаял их вместе. Кабель провёл под рефлектором, зафиксировал при помощи пластиковых стяжек. На свободный конец кабеля установил SMA разъём, обжимал его при помощи плоскогубцев. В итоге получился 7-ми элементный волновой канал с коэффициентом усиления не менее 10 dBd (по отношению к полуволновому диполу) – приложение 4.

4. Установка ПО, полевые испытания, анализ недочётов в конструкции прототипа

Для достижения максимальной портативности и дешевизны в качестве приёмной станции использовался доступный и популярный среди радиолюбителей SDR приёмник RTL SDR V3 совместно со смартфоном на ОС Android 12. Для работы с SDR комплектом использовалось следующее программное обеспечение:

- 1) для приёма сигналов со спутника – кроссплатформенную программу SDR++ [6];

2) для прогнозирования пролёта спутников и отслеживания их положения в небе над территорией нахождения абонента – радиолобительский спутниковый трекер Look4Sat;

3) для декодирования информации со спутников – программа SatDump [8].

Все эти программы бесплатны, доступны в Интернете и имеют открытый исходный код. Отказ от стандартного, поставляемого в месте с SDR приёмником ПО, в пользу кроссплатформенной программы SDR++ (иначе SDRPP), прежде всего, был вызван его нестабильной работой. В отличие от стандартного ПО, программа SDR++ может работать в Windows, Linux, OSX и BSD с графическим интерфейсом на основе C++ для различных SDR приемников. А это является для школьного аппаратного и программного обеспечения и ресурсов крайне важным и весовым фактором.

Основные функции программы SDR++ [6]:

- полностью модульная архитектура, состоит из набора плагинов;
- Мульти-vfo, несколько приемников в одном;
- поддержка большинства SDR через расширения или SOAPYSDR;
- запись как всей полосы, так и звука с измерителем уровня и регулировкой громкости;
- доступно несколько планов частот;
- переключаемая палитра водопада;
- низкая загрузка вычислительных ресурсов (ниже, чем у ПО GQRX, CubicSDR, SDRConsole и даже ниже чем у SDRSharp);
- полное обновление водопада при масштабировании или изменении минимального / максимального уровня.

Программа очень проста и доступна для начинающих пользователей. Графический интерфейс напоминает популярную программу SDR Sharp, но с более лучшим обработчиком графики. Сам водопад в SDR++ также более информативен. Алгоритм действий для проверки работоспособности и функциональной целостности созданного прототипа следующий – рис. 2:

- а) посмотрел в программе «Look4Sat» ближайший спутник и вышел на улицу для приема сигнала;
- б) навёл антенну на МКС, включил SDR приёмник и начал запись.
- в) после пролёта спутника декодировал запись: картинка (приложение 5), принялась весьма неплохо, что доказало работоспособность комплекта.



Рис. 2. Реализованный прототип спутниковой антенны и результаты приема и обработки сигнала в мобильной SDR комплексе

Аналогично я действовал в случае с МКА «УМКА-1 (приложение 5). С этим спутником было несколько труднее: он часто заходил за препятствия, поэтому картинка принялась не полностью (приложение 6).

Прототип также неплохо показал себя и в наземной связи: в условиях городской застройки сигнал с передатчика мощностью 4 Вт был прекрасно слышен на расстоянии свыше 10 км. В качестве «контрольного спутника» использовалась МКС (во время новогодней трансляции изображений), так как она находится на орбите, близкой к орбитам большинства МКА, а также имеет достаточно большую мощность передатчика (около 25 Вт), чего хватило для проверки работоспособности моего комплекта.

Для дальнейших испытаний я решил принять картинку с МКА «UMKA-1» (RS40S), отправляемую 1-2 февраля 2025 г.

5. Разработка технологии трансляции сигналов с единой цифровой платформы

При необходимости использования комплекта несколькими учащимися одновременно возникает проблема, что к устройству каждого учащегося надо подключать свою фидерную линию и приёмник. Это будет очень дорого, особенно при большом количестве учеников, поэтому было принято решение разработать программу, запускаемую на сервере, выполненном в формате Неттоп¹. Программа будет получать данные с SDR приёмника и отправлять их в сеть. К этой сети будут подключены ученические устройства, на которых будет запущено ПО для работы с SDR приёмниками².

С целью проверки этого решения была создана небольшая программа на кроссплатформенном ПО GNU Radio Companion, рассчитанная на трансляцию сигнала с RTL SDR на 10 устройств по сети – по количеству рабочих станций в школьном компьютерном классе (приложении 7).

Программа подтвердила свою работоспособность (приложение 8).

Необходимую пропускную способность сети можно уменьшить, если транслировать не весь IQ поток с приёмника, а только необходимую его часть. Например, известно, что сигнал со спутника имеет полосу в 100 кГц, значит передавать на терминалы учащихся можно не весь поток шириной 2400 кГц, а только часть шириной 120 кГц, в которой и содержится непосредственно сигнал. К слову, так делают на очень больших частотах дискретизации (около 2 ГГц) с целью согласования пропускной способности интерфейса и вычислительной мощности компьютера.

¹ Неттоп – небольшой по размеру настольный персональный компьютер. Слово «неттоп» образовано от «InterNET» и «deskTOP». Неттопы становятся всё более популярными в качестве домашних серверов.

² Существенное повышение производительности неттопов на базе современных процессоров Intel/AMD в совокупности с возможностью их масштабирования позволяет использовать их как полноценную замену настольному персональному компьютеру большого формата, что и происходит в последнее время.

Также возможно и использование уже готовых решений, например, программную платформу с открытым исходным кодом OpenWebRX, которая позволяет пользователям настраивать RTL-SDR и другие приёмники SDR на многопользовательский сетевой доступ³. Это проще и надёжнее. Но в таком случае труднее транслировать IQ поток, что может вызвать трудности при обработке сигналов с модуляцией класса QPSK или GMSK⁴.

QPSK сигнал эффективно использует полосу пропускания. Однако для его реализации требуется более сложная цифровая обработка сигнала на уровне базы данных, чем для GMSK. GMSK более устойчив к колебаниям сигнала. Для него можно использовать недорогие FM-усилители, при этом достигается такой же уровень выходной мощности, как и при FM-модуляции. Кроме того, у сигнала GMSK постоянная огибающая (амплитуда не меняется), поэтому можно работать с усилителями в точке насыщения, что также эффективно с точки зрения энергопотребления.

6. Перспективы развития проекта

Безусловно, у этого проекта есть достаточно большие перспективы, так как предложенные конструкции могут быть использованы в составе более сложного изделия – поворотной платформы с антенной. Уже на основе этого устройства можно построить самый настоящий полнофункциональный школьный ЦУП. Такой установкой уже можно будет управлять дистанционно – прямо из школьного кабинета информатики. Для этого рядом с поворотной платформой ставится герметичный кейс с микрокомпьютером-сервером (Raspberry Pi, Orange Pi и т.п.), SDR приёмником и силовым драйвером для управления двигателями платформы. К кейсу подводится сетевой кабель и линия питания. Сервер на крыше по сети передаёт

³ OpenWebRX это программное приложение, предназначенное специально для прослушивания On-Line SDR с помощью веб-браузера. Это веб-сервер и интерфейс для удалённого доступа к RTL-SDR и SDRPlayOpenWebRX.

⁴ QPSK-сигнал – это сигнал с квадратурной фазовой манипуляцией, который кодирует двумя битами передаваемой информации одним символом.

GMSK (гауссовская частотная модуляция с минимальным сдвигом) – вид частотной модуляции (манипуляции) с индексом модуляции равным 0.5, при которой последовательность из прямоугольных информационных импульсов проходит через гауссовский фильтр нижних частот

информацию с приёмника, а компьютеры из кабинета информатики принимают данные по сети. Информация выводится на экран в удобном для анализа формате, например в виде водопада. Также с компьютеров можно будет подавать команды управления, и антенна будет поворачиваться на нужный угол и возвышение.

А если в одном корпусе с сервером разместить передатчик с программным управлением, то можно будет даже проводить радиосвязи с использованием ретрансляторов, установленных на спутниках (естественно, при наличии разрешения на выход в эфир).

Заключение

В ходе моей работы я познакомился с новым оборудованием, материалами и технологиями. Мне удалось создать недорогой рабочий комплект для приёма информации с МКА в 70 см диапазоне. Был создан прототип антенны, а также с учётом недостатков, проявившихся в его эксплуатации, была разработана новая, более надёжная конструкция приёмной антенны.

В ходе проекта я научился основам орбитальной механики: узнал, на каких орбитах находятся спутники, как их траектории выглядят на небе, а также куда и с какой скоростью двигать антенну для получения хорошего качества сигнала.

Кроме того я познакомился с программами для SDR приёмников и научился их настраивать.

Практическая реализация прототипа оборудования для данного проекта обеспечивает приём изображения и телеметрии с МКА в диапазоне 70 см, что в свою очередь позволит создать на базе моей школы полноценную наземную станцию для приёма данных с МКА, а это очень пригодится при участии в таких проектах, как «Space-Pi». Также данный проект может быть расширен до наземной станции спутниковой связи, и даже до WebSDR-а, ориентированного на космическую радиосвязь.

При использовании моторизованной поворотной платформы можно будет проводить увлекательные эксперименты с радиолокацией.

Считаю, что цель моего проекта достигнута.

Список использованных источников и литературы

1. Дежурный по планете. Официальный сайт национальной образовательной программы. [Электронный ресурс]. URL: <https://spacecontest.ru/>. Дата обращения 02.03.2025

2. Научно-образовательный проект Space-π. Официальный сайт национальной образовательной программы. [Электронный ресурс]. URL: <https://spacepi.space/about/>. Дата обращения 02.03.2025

3. Дмитрий Пашков (R4UAB), Направленная антенна на частоту 430-440 МГц: сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://spacepi.space/wiki/article/napravlennaya-antenna-na-chastotu-430-440-m-gcz/>. Дата обращения 02.03.2025

4. Расчёт антенны Uda-Yagi DL6WU: сайт. [Электронный ресурс]. URL: <https://3g-aerial.biz/onlajn-raschety/raschety-antenn/raschet-antenny-uda-yagi-dl6wu>.

5. Гончаренко И.В. Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. – М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио». 2002 – 80 с.: ил.

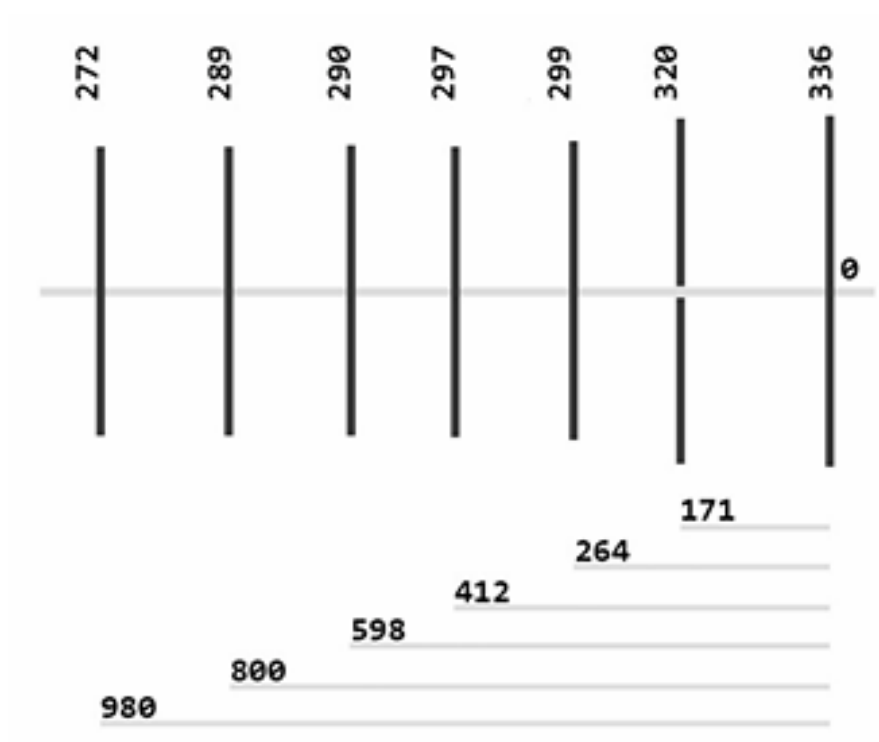
6. Удобная кроссплатформенная программа SDR++. [Электронный ресурс]. URL: <https://ruqrz.com/udobnaya-krossplatformennaya-programma-sdr/>. Дата обращения 02.03.2025

7. Look4Sat | Радиолюбительский спутниковый трекер и предсказатель полётов [Электронный ресурс]. URL: <https://4pda.to/forum/index.php?showtopic=1028911&ysclid=m8075mekjk818210356>. Дата обращения 02.03.2025

8. SatDump: Программа для обработки спутниковых данных. [Электронный ресурс]. URL: <https://planetasofta.ru/windows/maps-gps/satdump>. Дата обращения 02.03.2025

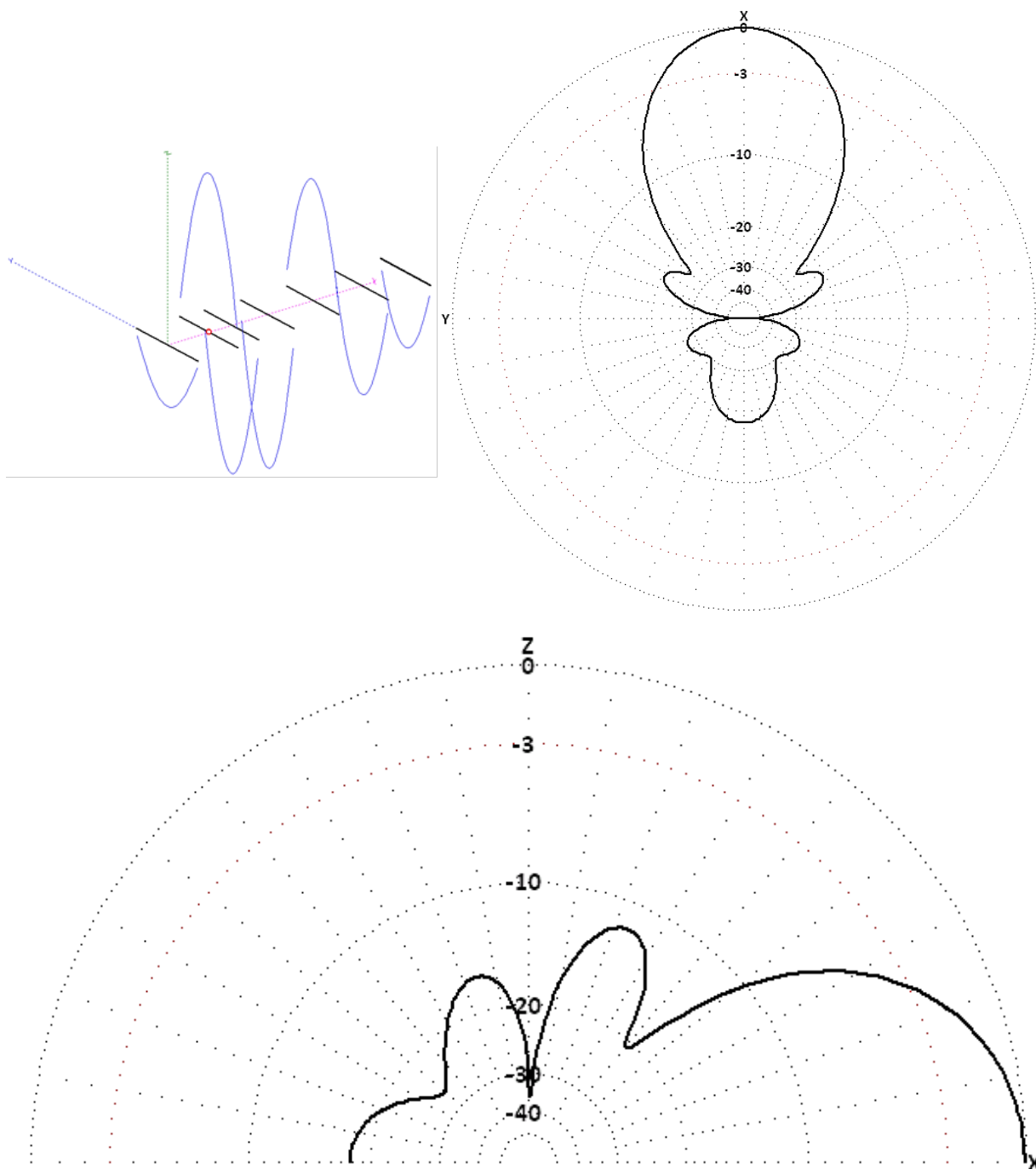
Приложение 1

Типовые антенны «Волновой канал» компании Геоскан



Приложение 2

Результаты моделирования 7-ми элементной антенны



Ga : 12.31 dBi = 0 dB (H поляризация)

Gh : 10.16 dBd

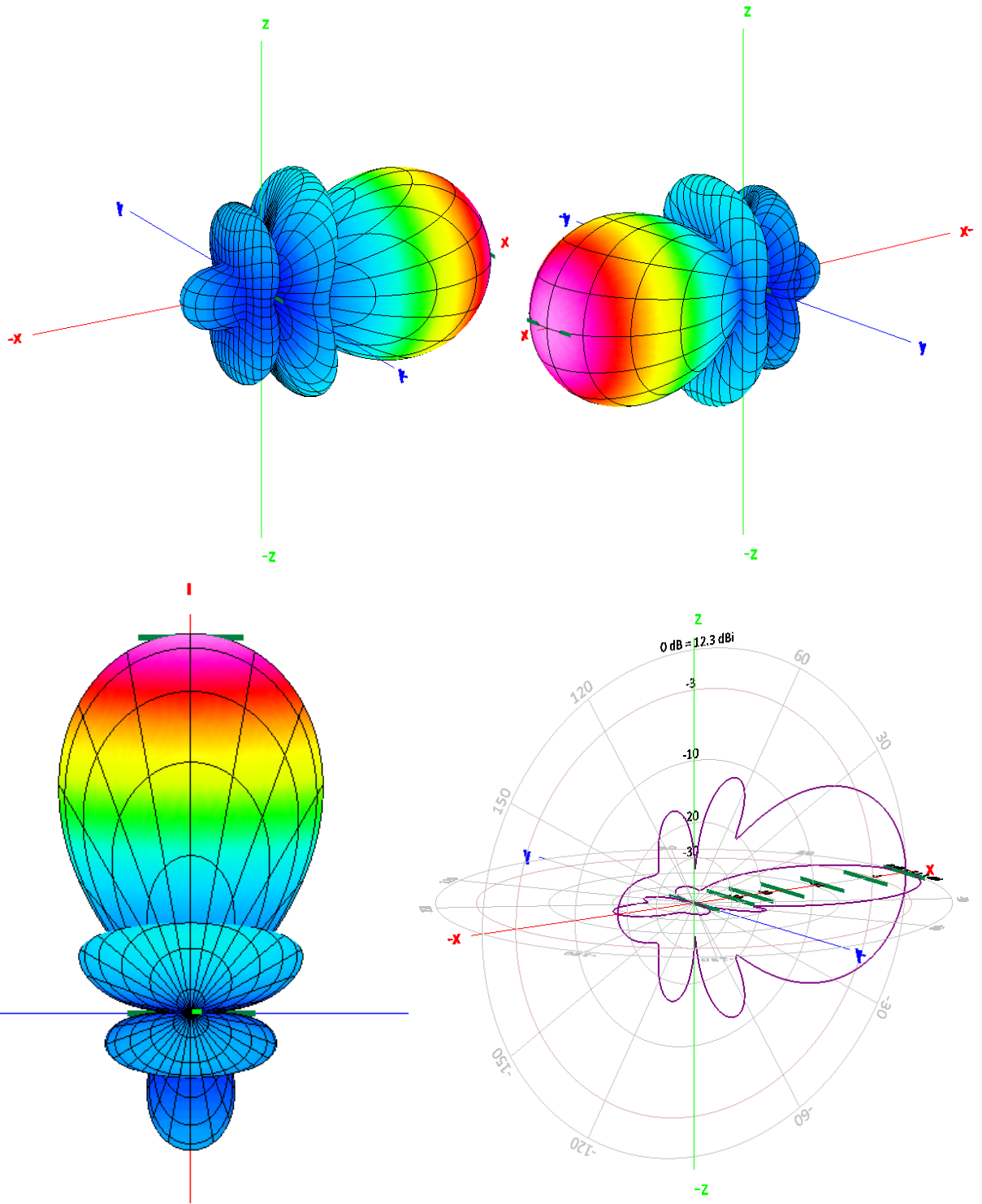
F/B: 17.74 dB; Тыл: Азим. 120 гр, Элевация 60 гр

F: 436.000 МГц

Z: 51.438 + j0.973 Ом

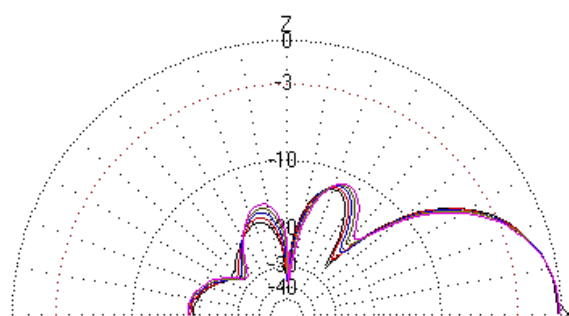
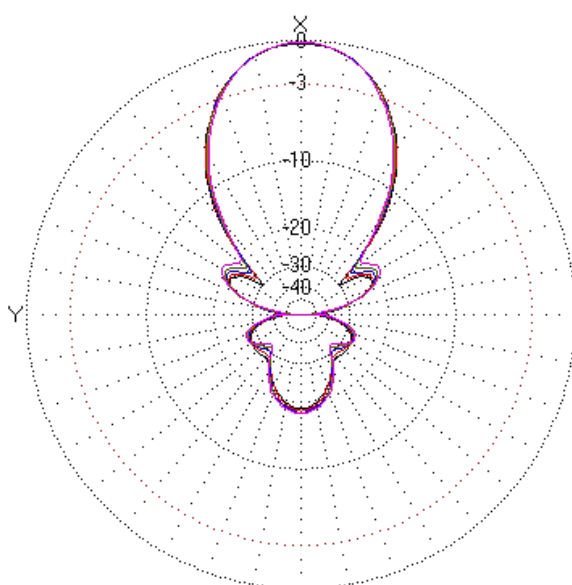
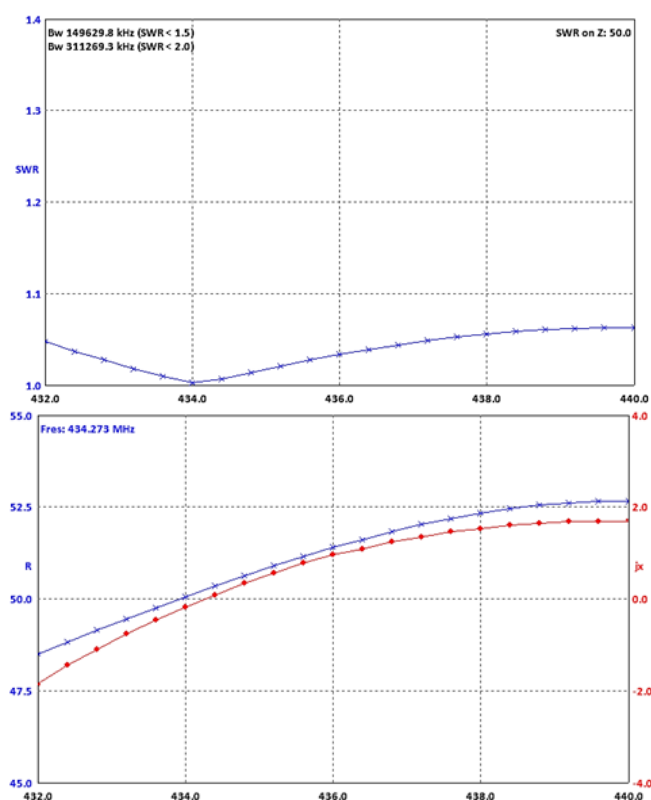
KCB: 1.0 (50.0 Ом),

Elev. гр.: 0.0 гр. (Свободное пространство)



Приложение 3

Детализация основных параметров и диаграмм направленности 7-ми элементной антенны «Волновой канал» в рабочем диапазоне частот. Свободное пространство



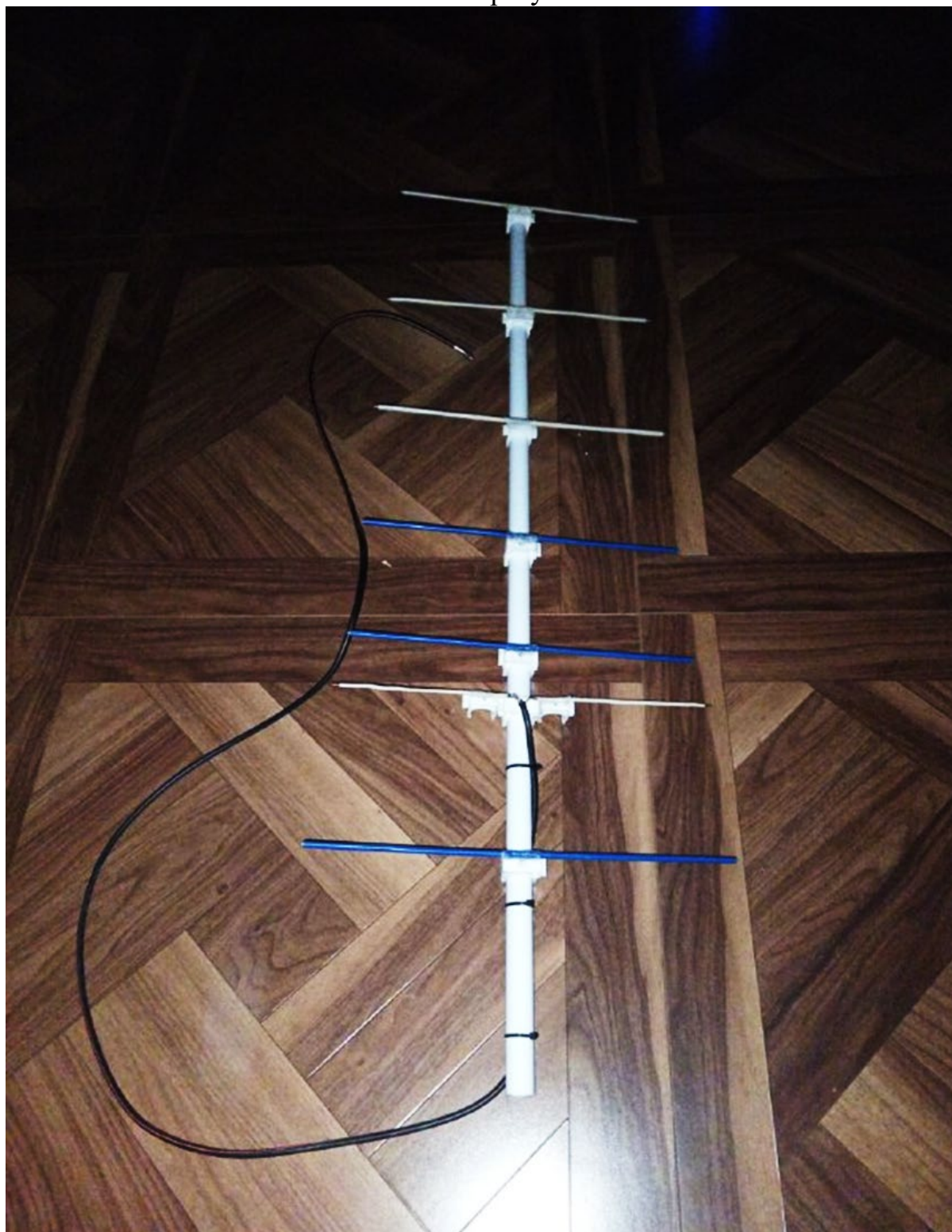
12.3(dBi) = 0dB

Показать ДН для поляризации
☐ V ☐ H ☒ Сумм. ☐ V+H

Цвета ДН					
Freq	R	jX	Ga	F/B	ON
432.0	48.5	-1.8	12.2	18.3	On
434.0	50.1	-0.2	12.3	18.0	On
436.0	51.4	1.0	12.3	17.7	On
438.0	52.4	1.5	12.3	17.6	On
440.0	52.7	1.7	12.3	17.5	On

Приложение 4

Конечный результат



Приложение 5

Результат приёма и декодирования спутниковых сигналов при отсутствии и наличии препятствий и помех приёму
(программ «Robot36»)



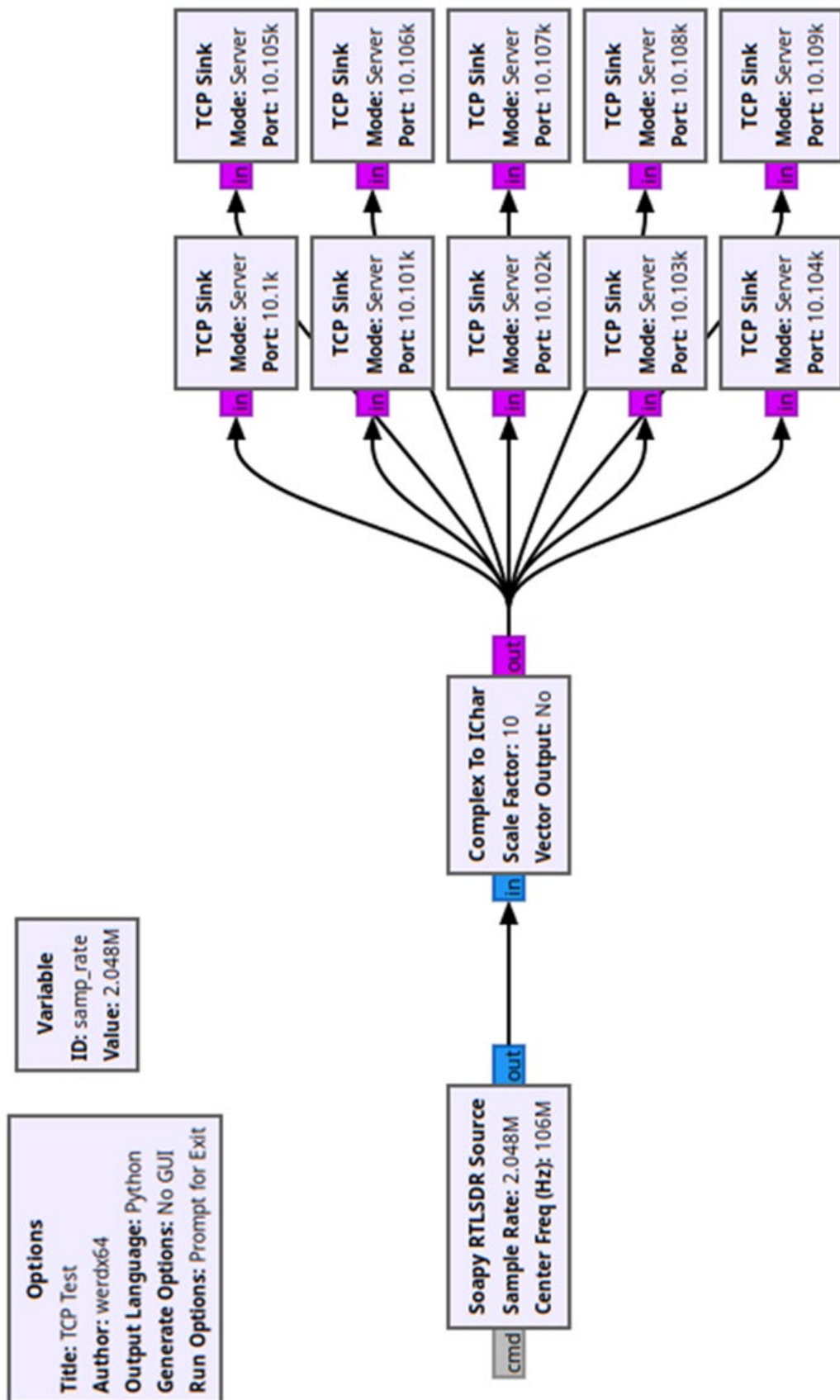
Приложение 6

Приём спутникового сигнала МКА «УМКА-1



Приложение 7

Блоки программы GNU Radio Companion, рассчитанную на трансляцию сигнала с RTL SDR приёмника на 10 устройств по сети



Приложение 8

Результат работы программы

