

УДК 621.396.43

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРОПОСФЕРНОЙ  
И РАДИОРЕЛЕЙНОЙ СВЯЗИ**

*Поповский В.В., Лошаков В.А., Дриф А.*

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
Харьков, пр. Ленина, 14*

*tkc2006@ukr.net*

*Нарытник Т.Н.*

*СП «Институт электроники и связи УАННП»*

*пр. Л. Курбаса, 2-Б, Киев, Украина, 03148*

*director@mitris.com*

*Слюсар В.И.*

*Центральный научно-исследовательский институт  
вооружения и военной техники Вооружённых Сил Украины*

*Пр. Воздухофлотский, 28б, Киев, 03049*

[\*swadim@ukr.net\*](mailto:swadim@ukr.net)

**ПРОЕКТУВАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТРОПОСФЕРНОГО  
ТА РАДІОРЕЛЕЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

*Поповський В.В., Лошаков В.А., Дриф А.*

*Харківський національний університет радіоелектроніки*

*Харків, пр. Леніна, 14*

*tkc2006@ukr.net*

*Наритник Т.М.*

*СП «Інститут електроніки та зв'язку УАННП»*

*пр. Л. Курбаса, 2-Б, Київ, Україна, 03148*

*director@mitris.com*

*Слюсар В.І.*

*Центральний науково-дослідний інститут озброєння  
та військової техніки Збройних Сил України*

*Пр. Повітрофлотський, 28б, Київ, 03049*

[\*swadim@ukr.net\*](mailto:swadim@ukr.net)

**DESIGN OF UNIVERSAL TROPOSPHERIC AND RADIO RELAY  
COMMUNICATION SYSTEM**

*V.V. Popovskiy, V.A. Loshakov, A. Drif*

*Kharkov National University of Radio Electronics*

*Kharkov, Lenin pr., 14*

*tkc2006@ukr.net*

*T.M. Narytnik*

*JV "Institute of Electronics and Communication UANNP"*

*L. Kurbas pr., 2-B, Kiev, Ukraine, 03148*

*director@mitris.com*

*V. Slyusar*

*Central Research Institute of Weapons and Military Equipment  
of the Armed Forces of Ukraine*

*Povitroflotsky pr., 28,b, Kiev, 03049*

[\*swadim@ukr.net\*](mailto:swadim@ukr.net)

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований и трассовых испытаний макетного образца спроектированной телекоммуникационной системы тропосферной и радиорелейной связи шестисантиметрового диапазона волн с выходной мощностью передатчика до 100 Вт при обеспечении максимальной скорости мультимедийного потока в режиме «throughput» около 13 Мбит/с.

**Ключевые слова:** Телекоммуникационные системы, тропосферная и радиорелейная связь, проектирование, передача мультисервисной информации, макетный образец, испытания, скорость передачи.

**Анотація.** Представлено результати експериментальних досліджень і трасових випробувань макетного зразка спроектованої телекомунікаційної системи тропосферного та радіорелейного зв'язку шестисантиметрового діапазону хвиль з вихідною потужністю передавача до 100 Вт при забезпеченні максимальної швидкості мультимедійного потоку в режимі «throughput» близько 13 Мбіт/с.

**Ключові слова:** Телекомунікаційні системи, тропосферний і радіорелейний зв'язок, проектування, передача мультисервісної інформації, макетний зразок, випробування, швидкість передачі.

**Abstract.** The results of experimental studies and tests en-route model sample designed telecommunication systems and tropospheric microwave transmission six centimeter wave band with transmitter power output up to 100 W with maximum media stream rate «throughput» mode about 13 Mbit/s.

**Keywords:** Telecommunication systems and tropospheric radio relay, design, multi-service transmission of information, the model sample, the test rate.

## I ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Тропосферные и радиорелейные системы связи (ТСС и РРС) по-прежнему выполняют важную роль в управлении войсками, будучи транспортной средой для передачи мультисервисной информации (речи, видео и данных). Одновременно с этим средства ТСС и РРС приобретают особое значение для управления в тактическом звене (ТЗУ), где на их основе удаётся организовывать прямые линии связи между командными пунктами (КП) бригад, батальонов, рот на расстоянии до 50 км в радиорелейном режиме и до 150–180 км – в тропосферном. Кроме прямых связей, могут быть организованы радиорелейные линии с переприёмом и ретрансляцией. Специфика физико-географических условий Украины обуславливает особую роль тропосферной связи с учётом благоприятных условий дальнего тропосферного распространения радиоволн и пространственной избирательности антенн.

Уникальность тропосферной связи заключается в ряде факторов:

1. В Украине достаточно благоприятное состояние тропосферы, относительно высокие средняя температура и влажность воздуха. Все это способствует увеличению коэффициента преломления  $N \geq 320$ , что по сравнению со стандартными условиями даёт добавку к интервалу связи больше чем на 50 км.

2. Поверхностный рельеф в Украине относительно низкий, что также даёт дополнительный вклад в улучшение энергетики линии связи.

3. Тропосферные линии связи имеют высокую пространственную избирательность, обусловленную свойством зеркальных антенн диаметром 0,6...1,8 м. Так зеркальная антенна радиусом  $R = 0,6$  м обеспечивает избирательность по стереоуглу  $\phi = \lambda / R\sqrt{\pi} = 0.06 / 0.6 \cdot 1.846 = 0.054$  рад или около  $3^\circ$ .

4. В отличие от РРС, где удаётся передавать контент со скоростью до 35...50 Мбит/с, в ТСС, к сожалению, пока при благоприятных условиях тропосферного канала (их доля превышает 50 % среди возможных состояний тропосферы) достижимы скорости передачи до 10 Мбит/с. При этом ТСС с передатчиком мощностью  $P_{\text{пер}} \approx 60...100$  Вт способна обеспечить надёжность связи (95 ... 98) % на расстояниях до 100 км, а в благоприятных условиях интервал связи может быть увеличен до 150 км. На базе тропосферных станций возможно реализовывать и радиорелейные линии с числом интервалов до 10.

5. Антенны тропосферных станций могут располагаться весьма низко относительно поверхности земли, на высоте 1 ... 3 м, что затрудняет их визуальное обнаружение. Это способствует также дополнительному затуханию сигналов, излучённых вне сектора главного лепестка, что усложняет радиоразведку излучений по боковым лепесткам передающей антенны.

## II НЕМНОГО ИСТОРИИ

Для тропосферной связи в ТЗУ используются частоты, соответствующие середине сантиметрового диапазона волн, что позволяет применять относительно небольшие параболические антенны. Разработанные в Советском Союзе тропосферные станции Р-412, Р-423 (Бриг-1, -2, 2А) и радиорелейные станции Р-409, Р-419, Дебютант и другие имеют низкий к.п.д., не удовлетворяют современным требованиям качества предоставления услуг, мульти-сервисности и т.д.

Для тактического звена нужны лёгкие переносные или компактные перевозимые на джипах станции тропосферной связи, которые быстро разворачиваются, удовлетворяют условиям универсальности, мультисервисности и конвергентности. Есть сведения, что в России (МНИРТИ) разработана цифровая малогабаритная помехозащищённая тропосферная станция «Ладья» (Р-444), которая предназначена для замены станций комплекса «Легенда-МД». Её основные декларируемые параметры: одиночная параболическая антенна диаметром 1,25 м ( $G = 32,5$  дБ);  $f_{cp} = 4,5$  ГГц, импульсная мощность передатчика  $P_{пер} = 100$  Вт; режим связи – временной дуплекс. Используется рекуррентное кодирование с чередованием. Скорость передачи достигает 2048 кбит/с, интерфейс G.703, коэффициент шума приёмника  $k_{ш} \leq 3$  дБ, рабочая полоса частот 30 МГц, потребляемая мощность около 500 Вт, масса аппаратуры одного полукомплекта без антенны – 70 кг, время развёртывания не менее 15 минут.

Широко используется ТСС в США и странах НАТО. Примерами таких систем являются британская ТСС «АйсХай» и американская TRS-170.

В данной статье представлены результаты создания экспериментального образца лёгкой переносной универсальной тропосферно-радиорелейной системы связи для ТЗУ, которая на открытых интервалах может работать в радиорелейном режиме, а на полузакрытых и закрытых участках – весьма просто переходить в тропосферный режим путём простой переконфигурации оборудования (подключение дополнительного усилителя мощности) и смены протокола связи для учёта специфики тропосферного канала.

## III СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ

В современных условиях наиболее востребованы ТСС 6-сантиметрового диапазона с максимальной дальностью до 100 ... 150 км. При этом практическое значение имеет разработка системы, осуществляющей функции не только физического и канального уровня (приём-передачу и модуляцию-демодуляцию), но и сетевого и транспортного уровней, то есть формирование пакетной структуры, маршрутизацию и обработку мультимедийной информации (речи, изображения, данных). Таким образом, объектом разработки является не только сама система тропосферной связи, но и вся сетевая инфраструктура, обеспечивающая непосредственную интеграцию в существующие цифровые сети основных стандартов.

Оперативная, малозатратная практическая реализация такой системы целесообразна на основе модульного принципа построения с использованием SDR технологии и современных беспроводных решений. Важно то, что большинство цифровых SDR модулей ТСС, СВЧ транзисторы усилителей мощности и офсетные параболические антенны можно приобрести в странах-производителях, включая Украину. При этом наиболее дорогостоящий элемент ТСС – выходной твердотельный усилитель мощностью до 70 Вт оригинальной конструкции вполне может быть разработан самостоятельно.

Макетный образец ТСС состоит из двух полукомплектов, каждый из которых включает в себя: одну (для конфигурации SISO) или две (для конфигурации MIMO) параболические офсетные антенны; приёмо-передающий блок; модем с одним (для конфигурации SISO) или двумя радиомодулями (для конфигурации MIMO); сетевое оборудование; программное обеспечение.

Подготовленный к испытаниям образец имеет конфигурацию SISO. Средства минимизации влияния многолучёвости: OFDM, разнос по поляризации, использование эквалайзера. Предусмотрена возможность адаптивного выбора рабочих частот, ширины полосы частотного канала, вида модуляции, типа преамбулы, защитных интервалов и др. Есть возможность работы в цифровых сетях основных стандартов, с использованием в режимах прямой связи, линии привязки, построения радиорелейных линий, mesh-систем и т.п.

#### IV ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Основной целью создания макетной ТСС явилась проверка возможности реализации прямой тропосферной связи на расстояниях до 100 ... 150 км в интересах обеспечения передачи данных между командными пунктами в оперативно-тактическом звене управления. Ключевыми техническими характеристиками, которыми должен был обладать образец ТСС, явились следующие:

1. Скорость передачи до 2 Мбит/с (потенциально до 10 Мбит/с).
2. Мощность передатчика  $P_{пер} = 60...100$  Вт.
3. Антенны параболические, офсетные  $G_A \approx 30...36$  дБ.
4. Конфигурация приёмопередатчика: SDR-технология, твердотельный усилитель мощности (Solid State Power Amplifier – SSPA).
5. Средства минимизации влияния многолучёвости: OFDM с дополнительным разнесением сигналов в пространстве и по поляризации, приём с использованием эквалайзера.
6. Модуляция сигнала: OFDM и адаптивная многопозиционная – QPSK и m-QAM.
7. Возможность адаптации параметров приёмо-передачи: выбор рабочей частоты и ширины полосы частот канала (2/5/10/20/40 МГц); выбор схем модуляции. Архитектура используемых радиомодемов с двумя радиокартами допускает также смену рабочего диапазона с 5 ГГц на 2.4 ГГц. При этом в качестве облучателя параболической антенны может быть использован двухмодовый облучатель. Имеется также возможность изменения: порогового значения шума и интервала периодической калибровки сигнала, режима защиты кадров, типа преамбулы и защитного интервала.

#### V СТРУКТУРА РАЗРАБОТАННОГО МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ

Структурная схема системы тропосферной связи приведена на рисунке 1.

Макетный образец ТСС состоит из отдельных модулей: модуля доступа (аппаратная платформа – RouterBoard); радиоблока (Outdoor), включающего твердотельный усилитель мощности передатчика (SSPA) и входной малошумящий усилитель приёмного тракта (LNA); параболическую антенну диаметром 60, 90 или 125 см, на штанге облучателя которой устанавливается радиоблок.

Важным свойством данной ТСС является то, что на малых мощностях 1 ... 5 Вт система связи может использоваться на открытых и полужакрытых интервалах до 40–50 км как радиорелейная система связи с широкими возможностями интеграции в цифровую сеть.

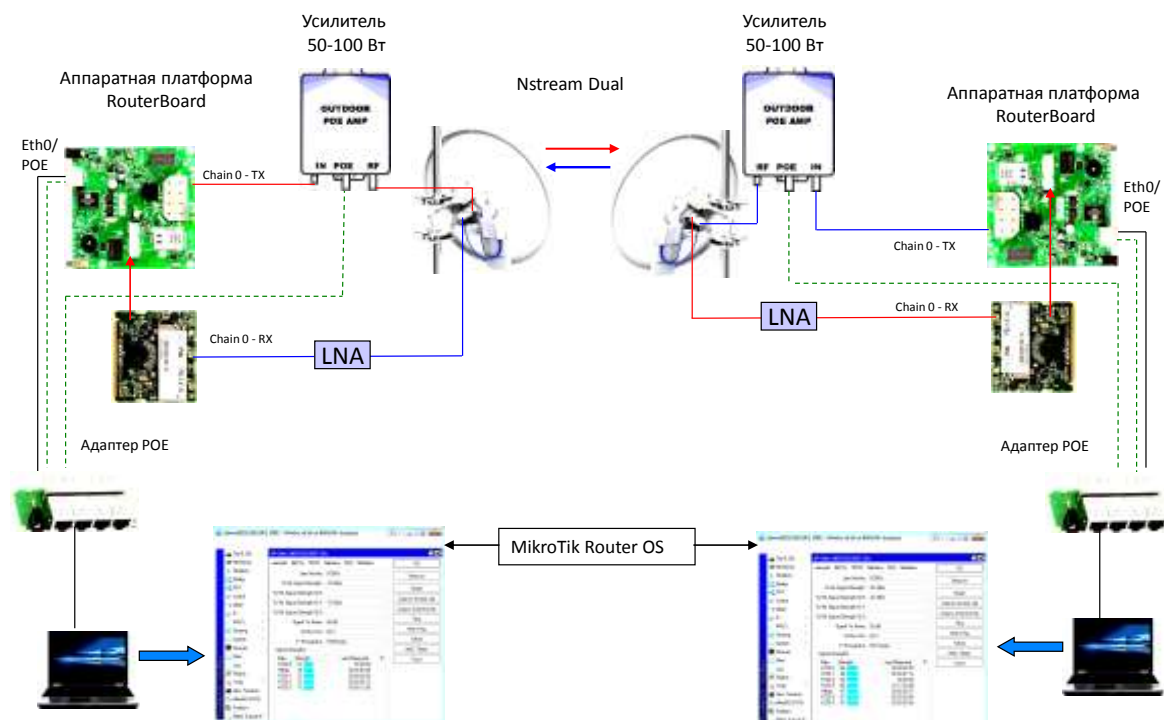


Рисунок 1 – Структурная схема системы тропосферной связи

В макете ТСС обеспечивается возможность гибкого изменения протокола передачи данных в зависимости от режима связи. В радиорелейном режиме при высоких отношениях сигнал/шум, когда не возникают проблемы с временной синхронизацией, используется протокол *NV2*, реализующий множественный доступ с временным разделением *TDMA*, а в тропосферном – *Nstreme-dual-slave*. Для оптимизации пропускной способности предусмотрена регулировка периода временного доступа в пределах 1–10 мс. При этом обеспечивается возможность передачи данных на дальность до 200 км.

Результаты расчёта линии тропосферной связи без пространственного разнесения и с разнесением приведены в таблицах на рисунке 2а, б.

## VI РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ТРАССОВЫХ ИСПЫТАНИЙ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА СИСТЕМЫ

С использованием разработанного оборудования, которое включает два приемопередатчика и модема, был проведён ряд исследований энергетики на трассах дальнего тропосферного распространения. Эксперимент проведён путём организации любительской радиосвязи на интервале 180 км в диапазоне 6 см между двумя пунктами Харькова и Павлограда (рисунок 3).

Трасса, как видно на графике рисунка 4, закрыта, и связь обеспечивалась главным образом за счёт рассеяния сигналов на неоднородностях тропосферы.

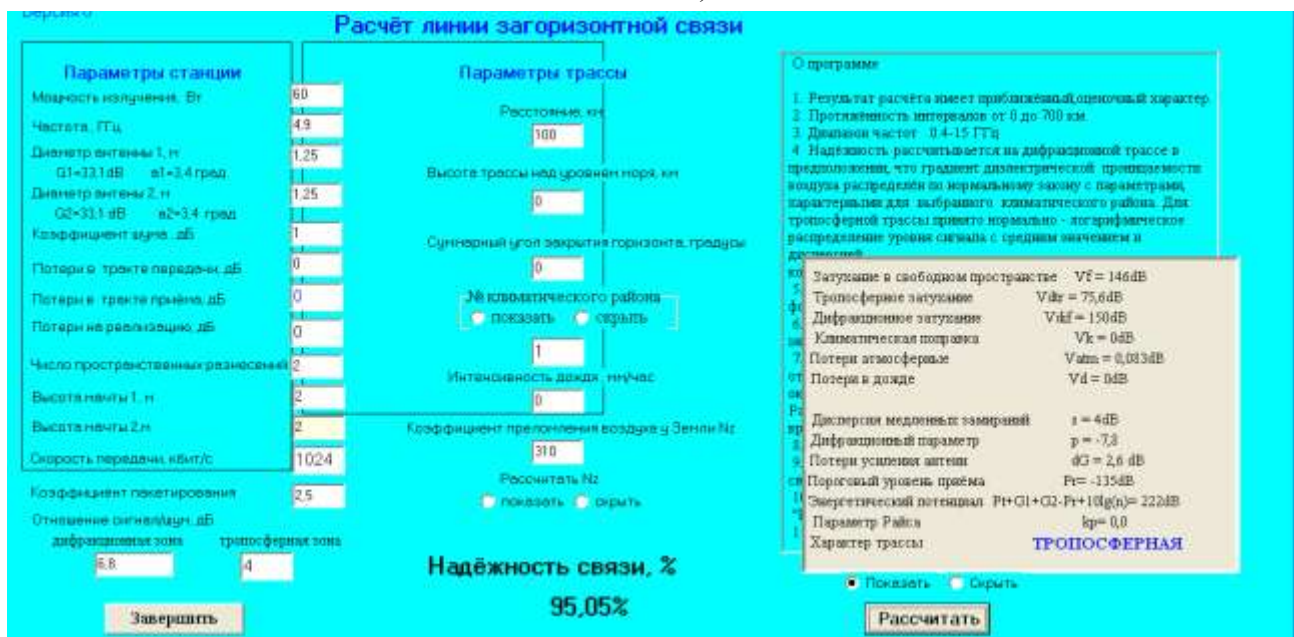
В эксперименте использовались изготовленные приемопередатчики 6-см диапазона мощностью примерно 10 Вт, параболические антенны диаметром 90 см, коэффициенты шума приёмных трактов – примерно 1 дБ. На рисунке 5 приведён скриншот ASK сигнала, принятого в Харькове.

Отношение сигнал/шум в указанном эксперименте составило около 10 дБ. Специальные методы борьбы с замираниями и помехоустойчивое кодирование не использовались.

Высокие устойчивость и надёжность связи позволили сделать выводы о правильности выбранных решений и возможности дальнейшей практической реализации предложенного варианта линии тропосферной связи.



а)



б)

Рисунок 2 – Результаты расчёта ТСС без пространственного разнесения – а) и с разнесением – б)

Фотографии радиоблока одного из полукомплектов ТСС и разработанного твердотельного усилителя мощности приведены на рисунках 6 и 7.

Для подтверждения возможности использования изготовленного макета ТСС в цифровых мультисервисных сетях передачи аудио- и видеoinформации в июле-сентябре 2015 года проведён ряд экспериментальных сеансов связи между двумя пунктами:

- пунктом 1, расположенным в Харькове в районе ХНУРЭ;

– пунктом 2, расположенным на окраине села Огульцы, примерно в 10 км западнее Люботина.

Расстояние между этими пунктами составляет около 38 км. Трасса полузакрытая, ее профиль показан на рисунке 8.

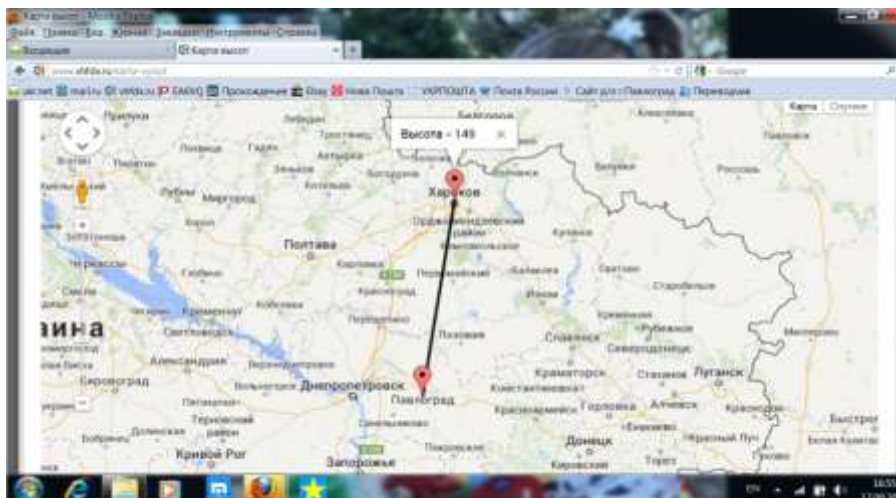


Рисунок 3 – Позиции радиостанции

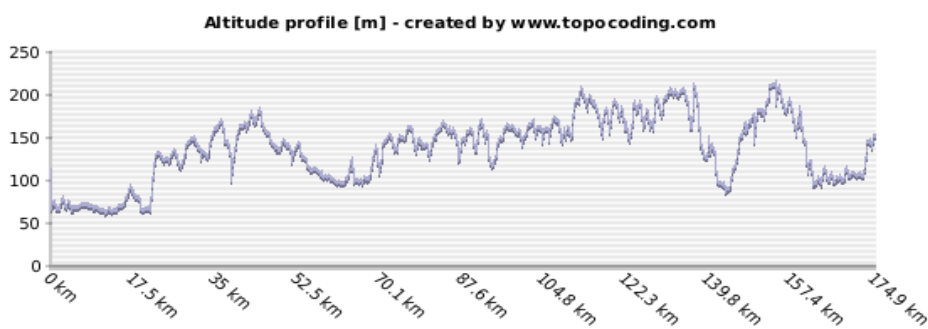


Рисунок 4 – Реальный профиль трассы связи между пунктами в Харькове и Павлограде

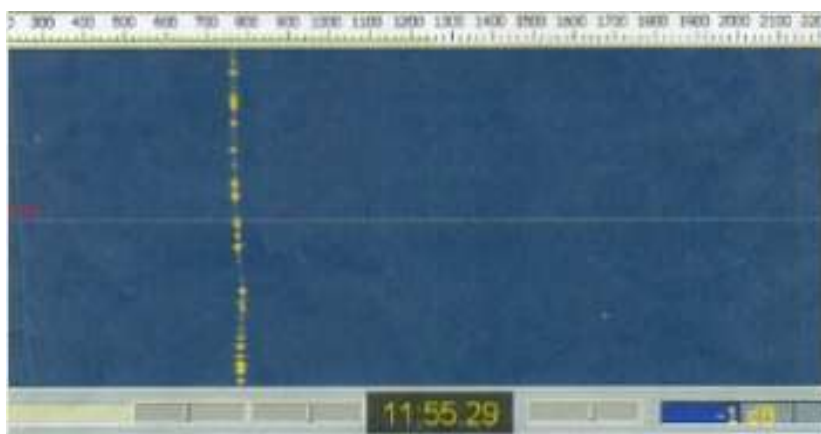


Рисунок 5 – Отпечаток изображения спектра ASK сигнала, принятого в Харькове

Оценка скорости передачи мультимедийной информации осуществлялась программой *IxChariot* путём эмуляции цифрового мультимедийного потока. Как видно из рисунка 9, максимальная скорость передачи мультимедийного потока составила в режиме “*throughput*” около 13 Мбит/с. Измерение проведено с использованием скрипта “*high performance throughput*”.

Оценка скорости передачи мультимедийной информации осуществлялась программой *IxChariot* путём эмуляции цифрового мультимедийного потока. Как видно из рисунка 9, 42

максимальная скорость передачи мультимедийного потока составила в режиме “*throughput*” около 13 Мб/с. Измерение проведено с использованием скрипта “*high performance throughput*”.



Рисунок 6 – Фото радиоблока одного из полукомплектов системы



Рисунок 7 – Фото твердотельного усилителя мощности



Рисунок 8 – Реальный профиль трассы между пунктами 1 и 2



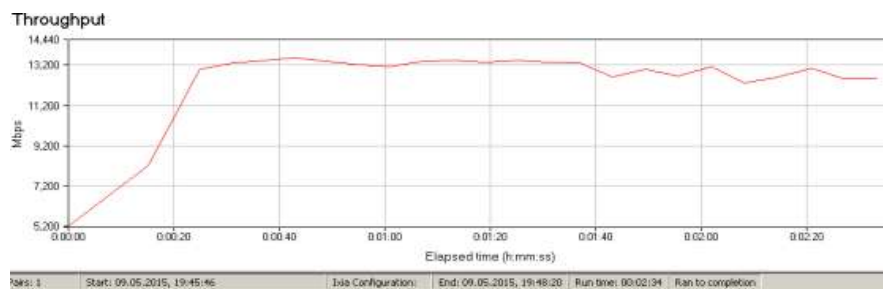


Рисунок 9 – Отпечаток изображения окна “throughput” программы IxChariot

С использованием программа *TeamTalk* подтверждена также надёжная работа спроектированной системы в режимах видеоконференции и передачи видеотрафика.

## VII ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждена возможность практической реализации мобильной универсальной системы радиорелейно-тропосферной связи, способной работать в мульти-сервисных сетях.

Результаты предварительных трассовых испытаний показали, что по характеристикам качества и надёжности связи, мобильности и скорости развёртывания разработанная система связи не уступает известным зарубежным образцам при значительно меньшей стоимости оборудования. Она способна заменить технику старого парка и успешно использоваться в сетях ТЗУ как в радиорелейном, так и тропосферном режимах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серков В.П. Распространение радиоволн и антенные устройства. – Л.: ВАС, 1981. – 468 с.
2. Чернышов В.П., Шейман Д.И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. – М.: Связь, 1973. – 407 с.
3. Немировский А.С. Радиорелейные и спутниковые системы передачи / А.С. Немировский, О.С. Данилович, Ю.И. Маримонт, В.М. Минкин. – М.: «Радио и связь», 1986. – 385 с.
4. Родимов А.П., Поповский В.В. Поляризационно-временная обработка сигналов в линиях связи. – М.: «Связь», 1984. – 387 с.
5. Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Под ред. Б.А. Введенского. – М.: «Сов. радио», 1965. – 415 с.
6. Справочник по радиорелейной связи. Под редакцией Бородича С.В. – М.: «Радио и Связь», 1981 г. – 410 с.
7. Наритник Т.М. Радіорелейні та тропосферні системи передачі. - К: Концерн «Видавничий Дім «Ін Юре»», 2003. – 336 с.
8. Наритник Т.М. Дослідження можливості передачі сигналу COFDM радіорелейною лінією. Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – № 6. – С.7–10.
9. Ильченко М.Е., Нарытник Т.Н., Слюсар В.И. Направления создания тропосферных станций нового поколения.// Цифрові технології . – 2014. – Вип. 16. – С. 8–18.
10. Поповський В.В, Лошаков В.А., Філіпенко О.І., Мартинчук О.О., Дриф А. Results of development tropospheric communications system // 2<sup>nd</sup> scientific-practical conference Problems of infocommunications. Science and technology. “IEEE PIC S&T’2015”. – 2015. – № 2.
11. Лошаков В.А., Москалец М.В. “Methods solving of Problem EMS in Tropospheric Communication” // Problems EMS of perspective Wireless Network Communication (EMS-2015). - Kharkov, 2015. – Pp. 102–105.
12. Лошаков В.А., Мартинчук О.О., Молюа О.Л. Development of transhorizon communication system based on dual polarization MIMO architecture // “Problems EMS of perspective Wireless Network Communication (EMS-2015)”. – Kharkov, 2015. – Pp. 154–156.
13. Серов В.В. Методика энергетического расчёта загоризонтной линии радиосвязи / В.В. Серов. – 37 с.

REFERENCES

1. Serkov V.P. Rasprostranenie radiovoln i antennyye ustroystva. – L.: VAS, 1981. – 468 s.
2. Chernyishov V.P., Sheyman D.I. Rasprostranenie radiovoln i antenno-fidernyye ustroystva. – M.: Svyaz, 1973. – 407 s.
3. Nemirovskiy A.C. Radioreleynyye i sputnikovyye sistemyi peredachi / A.C. Nemirovskiy, O.C. Danilovich, Yu.I. Marimont, B.M. Minkin. – M.: "Radio i svyaz", 1986. – 385 c.
4. Rodimov A.P., Popovskiy V.V. Polyarizatsionno-vremennaya obrabotka signalov v liniyah svyazi. – M.: "Svyaz", 1984. – 387 s.
5. Dalnee troposfernoe rasprostranenie ultrakortkiy radiovoln / Pod red. B.A. Vvedenskogo. – M.: "Sov. radio", 1965. – 415 s.
6. Spravochnik po radioreleynoy svyazi. Pod redaktsiyey Borodicha S.V. – M.: "Radio i Svyaz", 1981. – 410 s.
7. Naritnik T.M. Radloreleynl ta troposfernl sistemi peredachl. – K: Kontsern "Vidavnichiy DIm "In Yure" ", 2003. – 336 s.
8. Naritnik T.M. DoslIdzhennya mozhlivostl peredachl signalu COFDM radloreleynoyu lInIEyu. Naukovl vlstl NTUU «KPI». – 2011. – # 6. – S.7–10.
9. Ilchenko M.E., Naryitnik T.N., Slyusar V.I. Napravleniya sozdaniya troposferynyy stantsiy novogo pokoleniya // Tsifrovl tehnologYi . – 2014. – Vip. 16. – S. 8–18.
10. Popovskiy V.V., Loshakov V.A., Fllpenko O.I., Martinchuk O.O., Drif A. Results of develop-ment tropospheric communications system // 2nd scientific-practical conference Problems of infocommuni-cations. Science and technology. "IEEE PIC S&T'2015". – 2015. – # 2
11. Loshakov V.A., Moskalets M.V. "Methods solving of Problem EMS in Tropospheric Communication" // Problems EMS of perspective Wireless Network Communication (EMS-2015).
12. Loshakov V.A., Martinchuk O.O., Molua O.L. Development of transhorizon communication system based on dual polarization MIMO architecture // "Problems EMS of perspective Wireless Network Communication (EMS-2015)". – Kharkov, 2015. – Pp.154–156.
13. Serov B.B. Metodika energeticheskogo raschYota zagorizontnoy linii radiosvyazi / B.B. Serov. – 37 c.