



Московский институт электроники и
математики им. А.Н. Тихонова

Научно-учебная группа
«Исследование методов
преодоления ограничений
взаимодействия киберфизических
систем в гетерогенных сетях
удаленного интернета вещей»



Исследование и разработка метода передачи данных в гетерогенной сети интернета вещей по спутниковым канала связи

Козлов А.С. askozlov_13@edu.hse.ru
Шаповалов М.В. mvshapovalov@edu.hse.ru

Москва 2023

Предметная область

Internet of Remote Things , IoRT -

организация сетей интернета
вещей в удаленных районах с
неразвитой сетевой
инфраструктурой.



Проблематика

1. Высокая стоимость отправки сообщений по спутниковому каналу связи;
2. Наличие значительных задержек при организации информационного обмена;
3. Низкая пропускная способность спутниковых каналов связи.



Цель

Разработка и исследование метода повышения энергоэффективности гетерогенных сетей интернета удаленных вещей с использованием спутникового канала связи.

Задачи

1. Провести обзор и анализ методов взаимодействия физических объектов в гетерогенной сети Интернета вещей с использованием спутниковых каналов связи;
2. Уточнить архитектуру информационного взаимодействия;
3. Разработать метод повышения энергоэффективности;
4. Провести экспериментальное исследование предложенного решения.

Концепция использования роя наноспутников

Главная цель - удешевление
использования спутниковой связи в
районах высоких широт.

Особенности:

- 1) Низкая стоимость системы;
- 2) Малая пропускная способность.

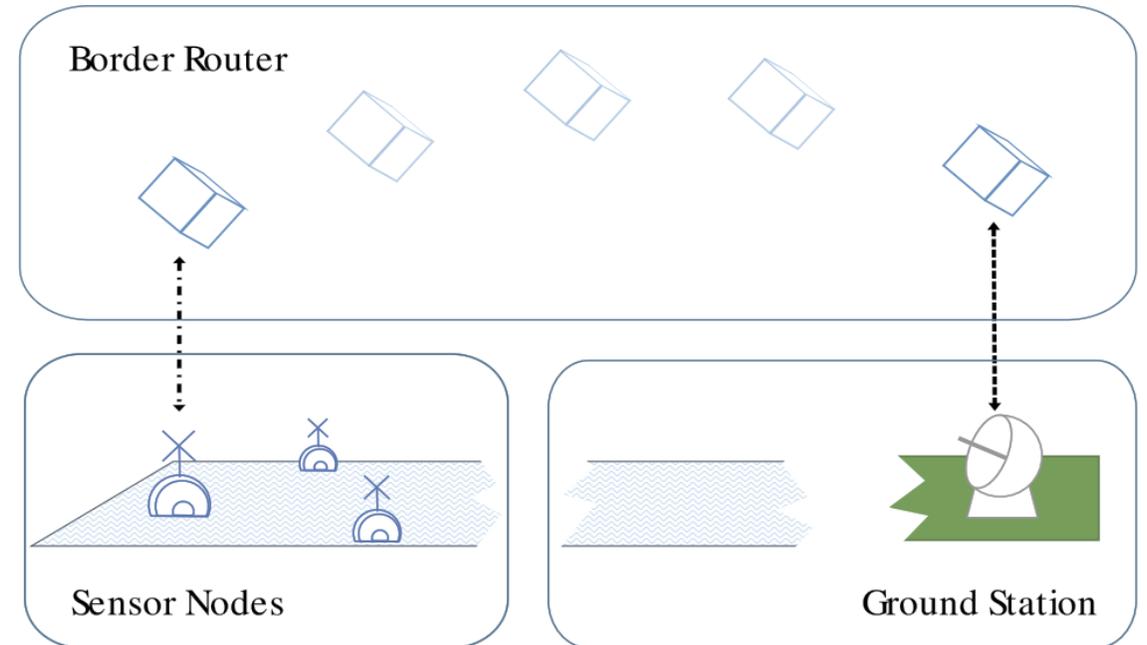


Рис. 1 – Архитектура сети с использованием роя
наноспутников [1]

Концепция использования связки спутник-аэростат

Главная цель – гарантировать полное покрытие для каждого объекта IoT независимо от его местоположения.

Особенности:

- 1) Снижение энергопотребления;
- 2) Сложность в обслуживании.

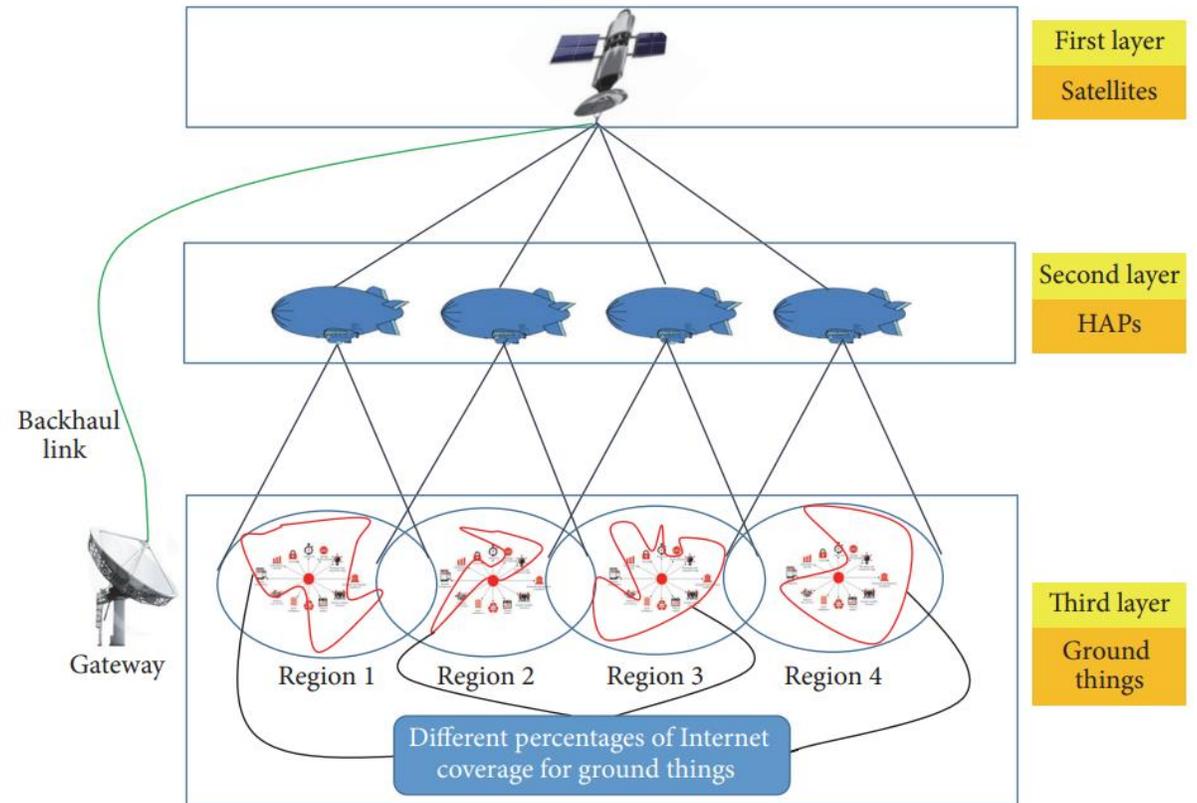


Рис. 2 – Архитектура сети Satellite/HAP/Things [2]

Концепция использования низкоорбитальных спутников

Главная цель – осуществление сбора и передачи данных в удаленных районах (например, в горах Тибета).

Особенности:

- 1) Использование существующих решений;
- 2) Высокая стоимость.

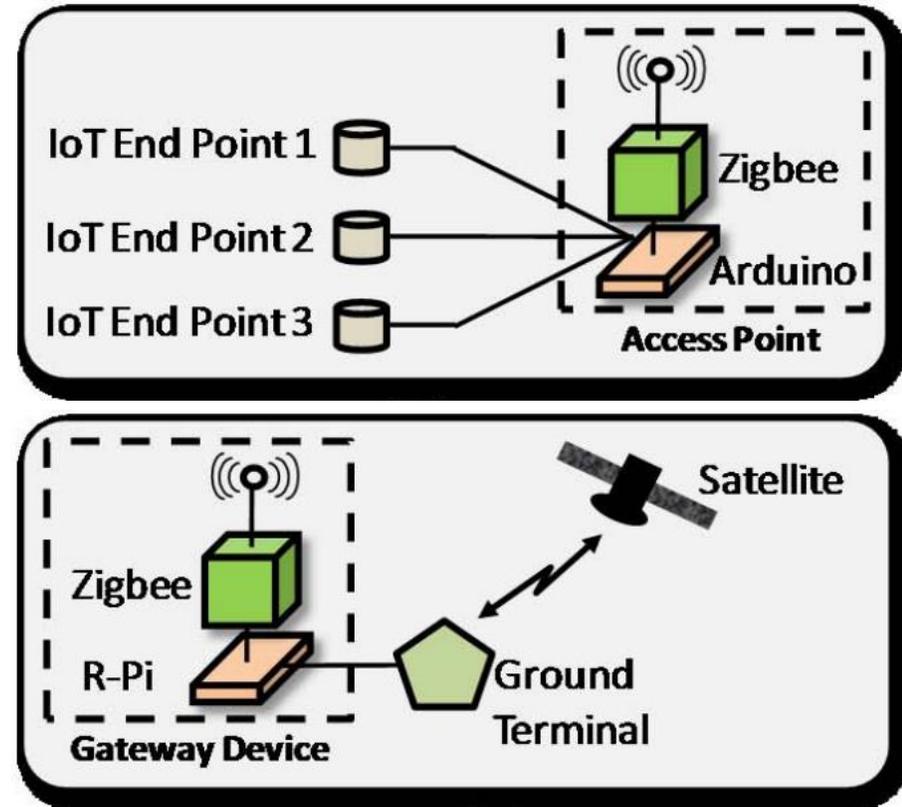


Рис. 3 – Архитектура сети endpoints/controller/satellite [3]

Архитектура информационного взаимодействия IoRT

Наземная составляющая:

- Беспроводная сенсорная сеть, граничный шлюз;
- Наземная станция приема сообщений, веб-сервер.

Спутниковая составляющая:

Система низкоорбитальных спутников.

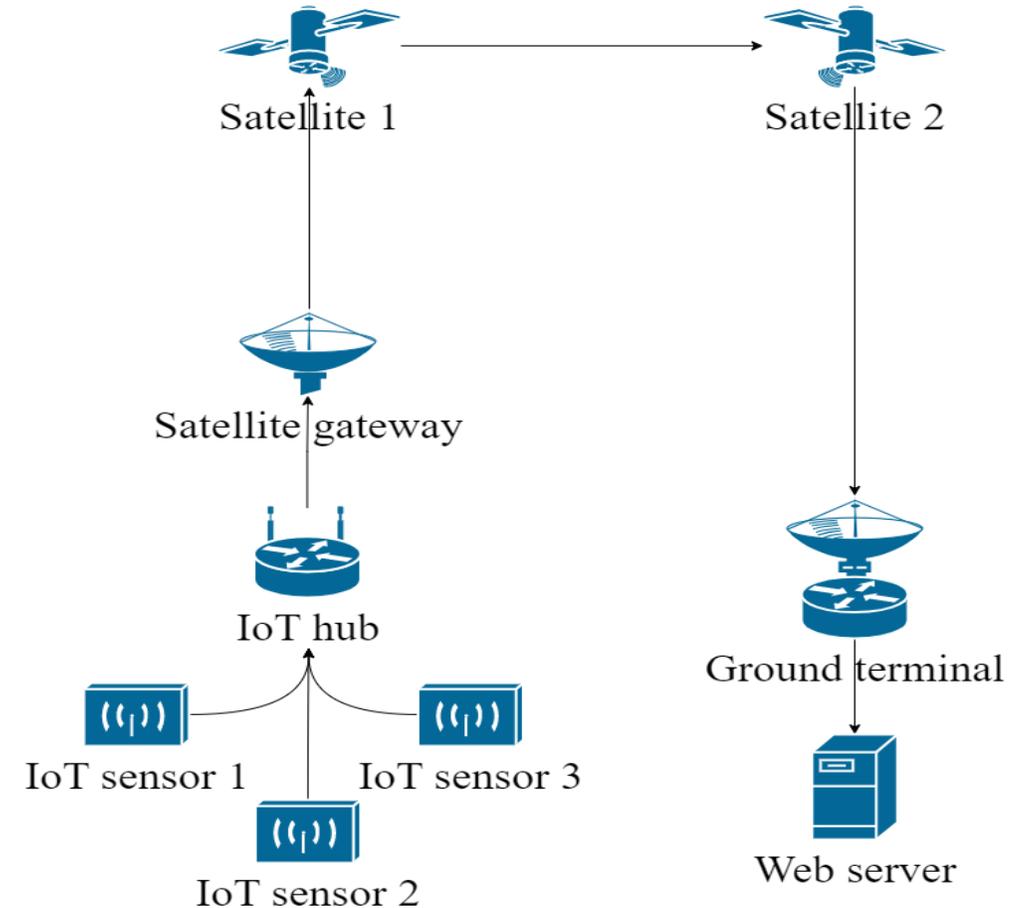


Рис. 4 – Архитектура гетерогенной сети IoRT

Архитектура информационного взаимодействия IoRT

Беспроводная сенсорная сеть:

- LPWAN сеть;
- Использование стандарта LoRaWAN;

Спутниковая составляющая:

Низкоорбитальная спутниковая система Iridium.

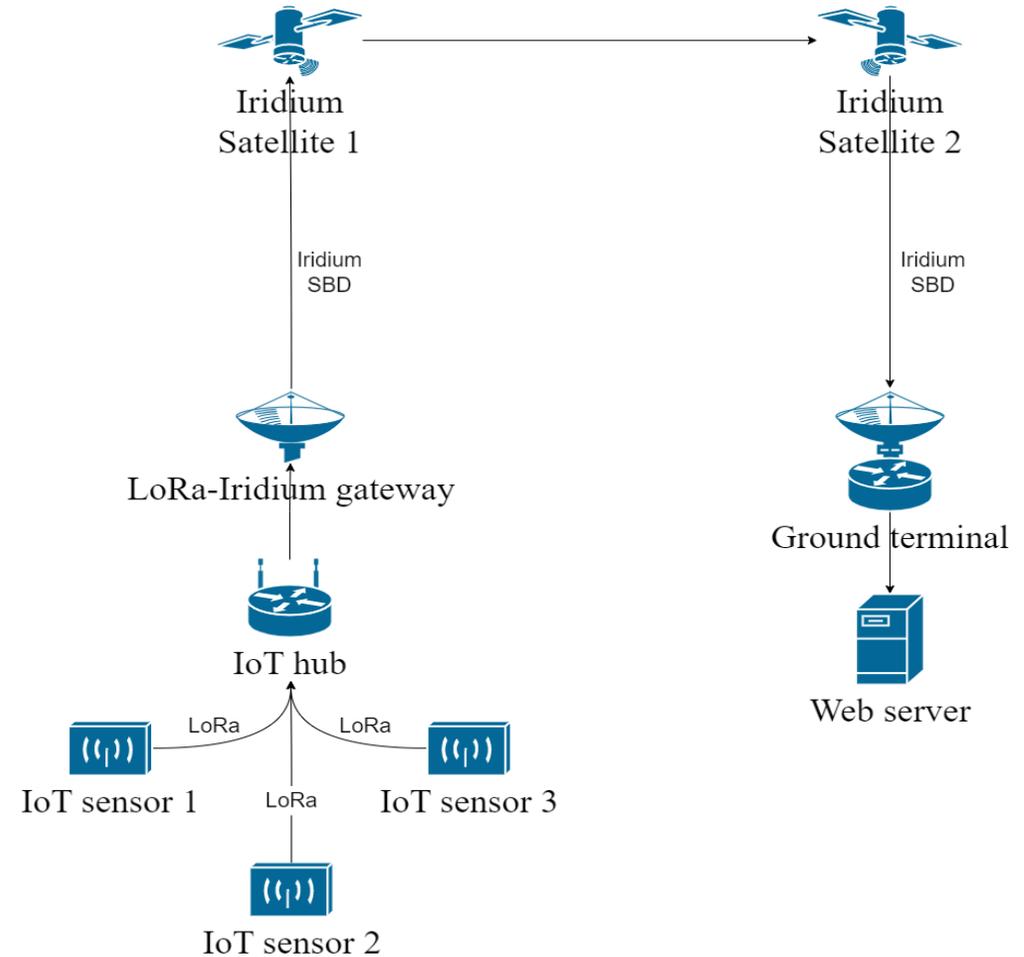


Рис. 5 – Архитектура сети LoRa-Iridium

Модель энергопотребления при отправке SBD пакетов

Особенности:

I_{KO} – средний ток потребления при неудачной попытке отправки SBD сообщения;

I_{OK} – средний ток потребления при удачной попытке отправки SBD сообщения;

T_{retry} – время одной попытки отправления SBD сообщения;

T – общее время отправления SBD сообщения.

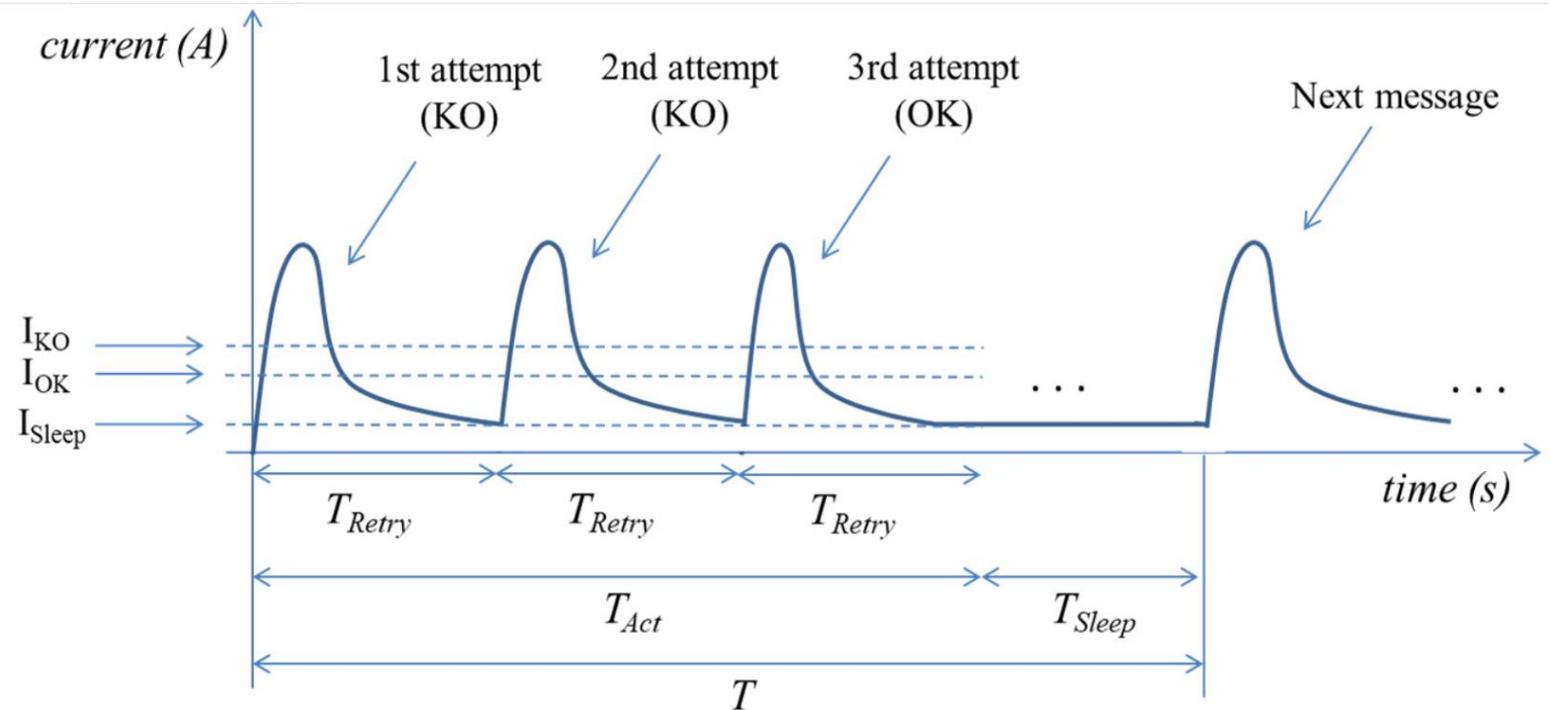


Рис. 6 – Параметры модели энергопотребления Iridium Satellite IoT [4]

Модель энергопотребления при отправке SBD пакетов

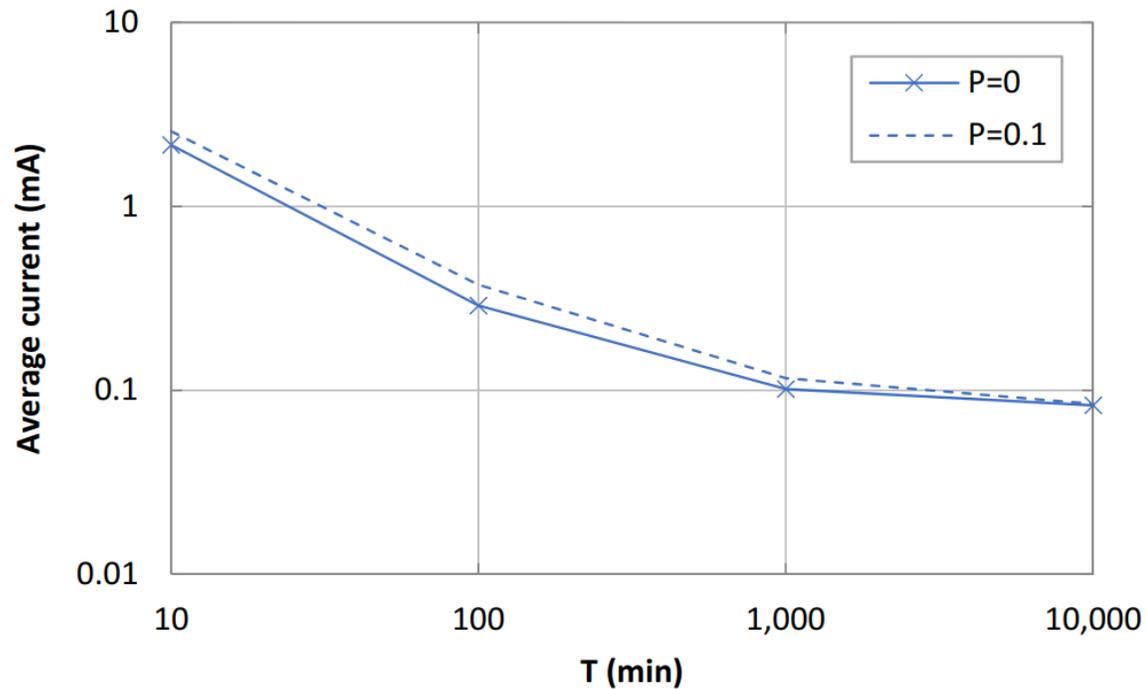


Рис. 7 – Зависимость энергопотребления от T [4]

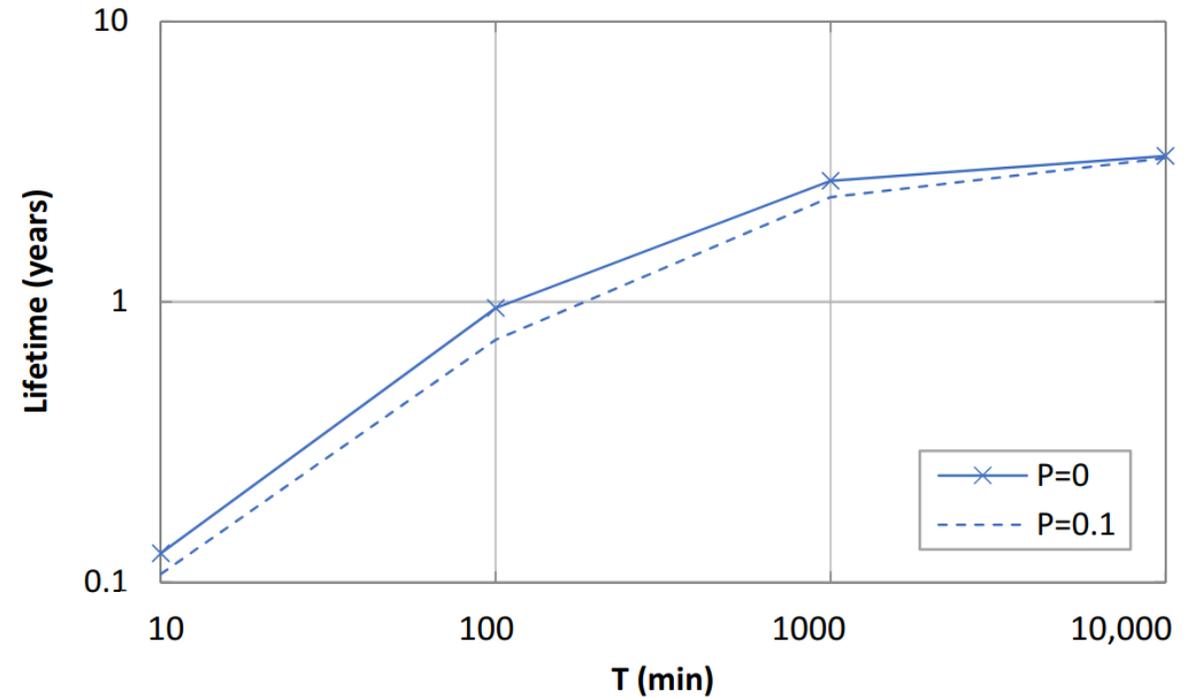


Рис. 8 – Зависимость времени автономной работы от T [4]

Метод повышения энергоэффективности

Сериализация и сжатие:

- 1 Этап. Преобразование JSON сообщений в Protobuf формат;
- 2 Этап. Упаковка Protobuf сообщений в SDB контейнеры;
- 3 Этап. Применение алгоритма сжатия Хаффмана.

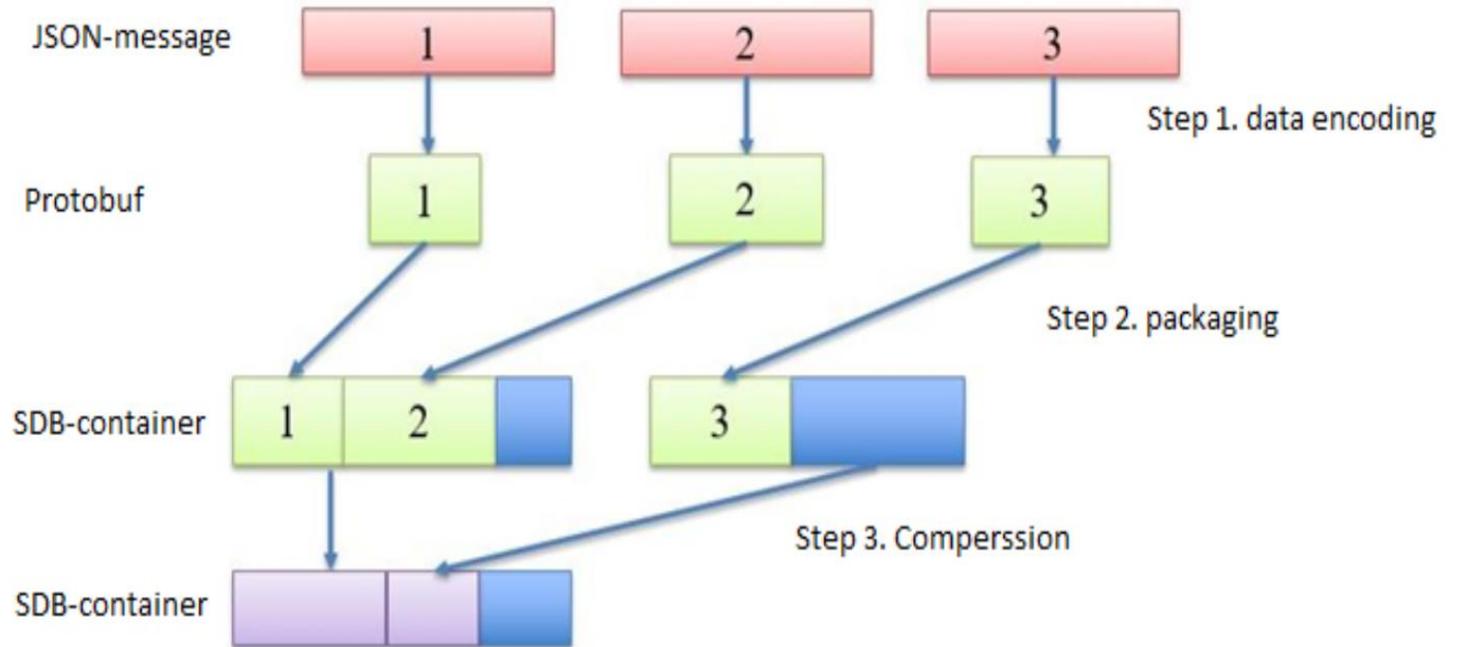


Рис. 9 – Этапы формирования SDB пакетов с помощью алгоритма сериализации и сжатия[5]

Метод повышения энергоэффективности

Проактивное отслеживание спутников:

- Использование известных параметров орбиты спутников в TLE формате;
- Расчет времени прохода спутников над наземной станцией;
- Отправка сообщений в моменты нахождения спутников вблизи передающей антенны.

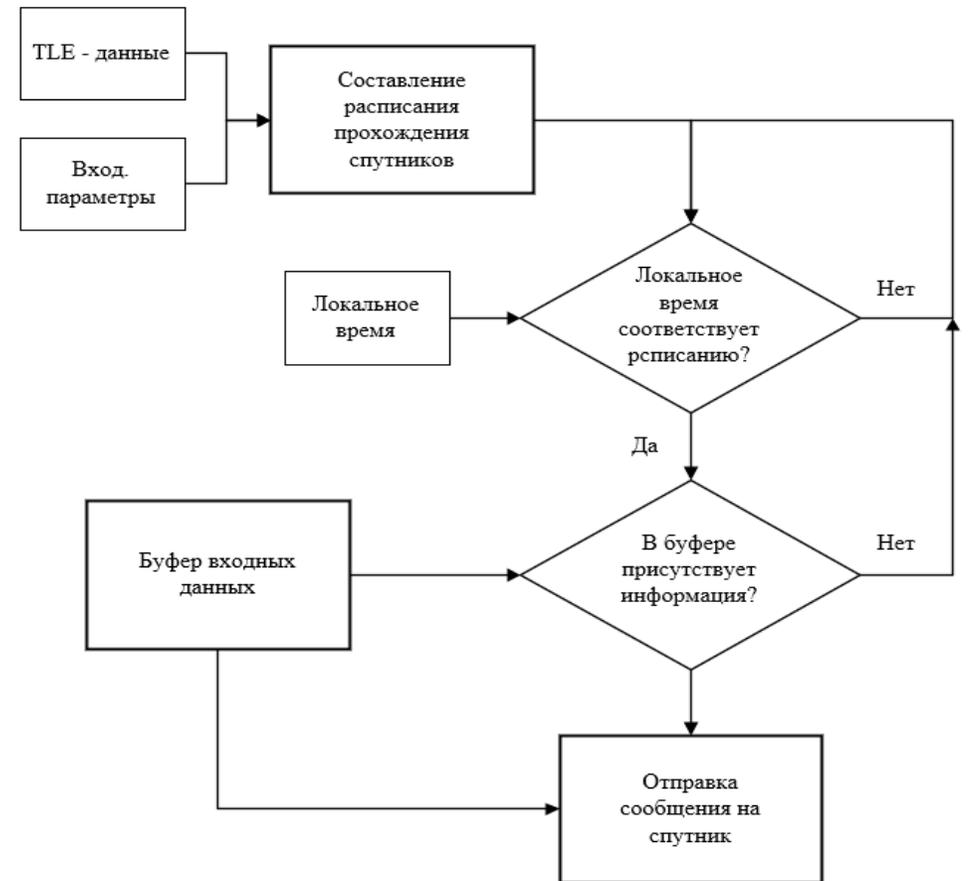


Рис. 10 - Алгоритм проактивного отслеживания спутников

Экспериментальный стенд

Наземная часть:

- Шлюз LoRa-Iridium на основе Raspberry Pi 2;
- Модем + Антенна Hirschmann.

Принимающая сторона:

- Наземные станции Iridium;
- Виртуальный сервер службы RUWEB.

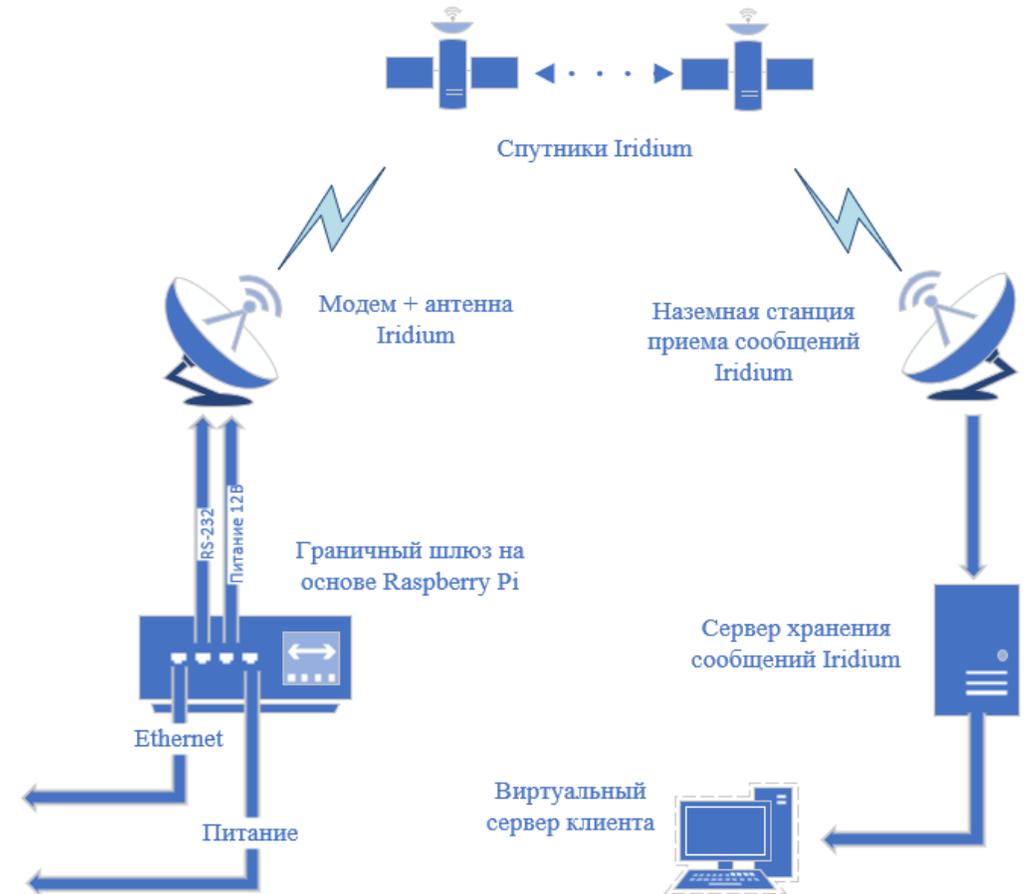


Рис. 11 – Состав экспериментального макета

Экспериментальный стенд

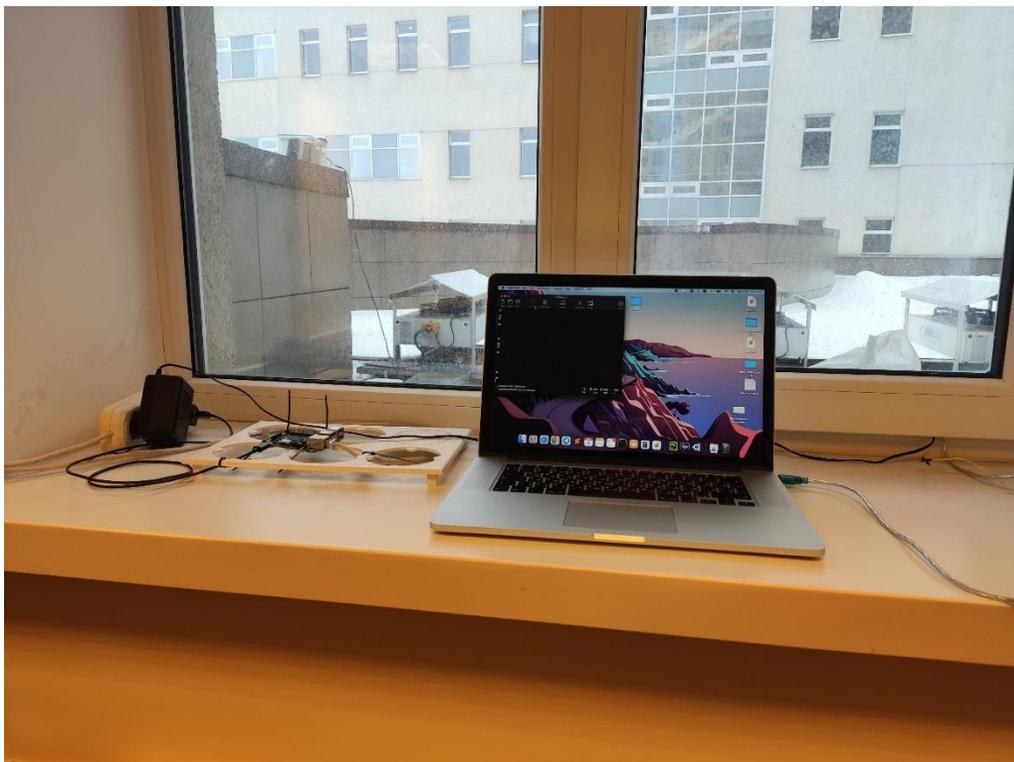


Рис. 12 – Внешний вид экспериментального макета

Полученные результаты (отправка без расписания)

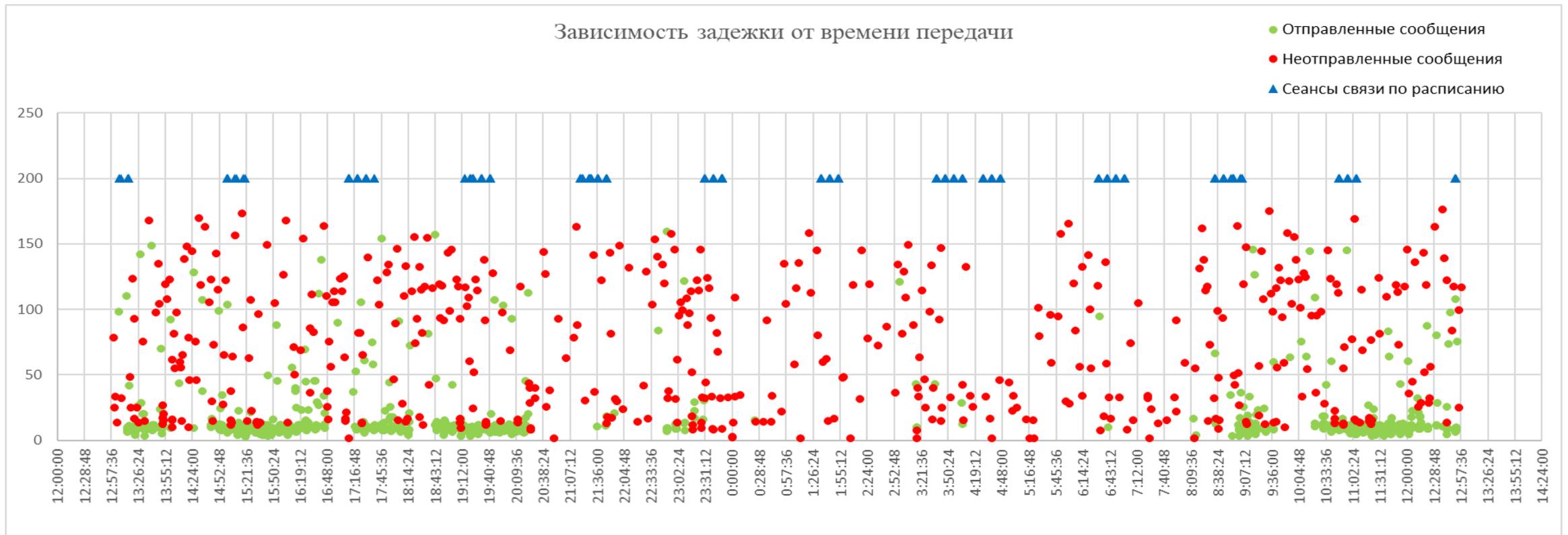


Рис. 13 – Диаграмма зависимости задержки от времени отправления

Полученные результаты (отправка без расписания)



Рис. 14 – Диаграмма зависимости количества попыток отправления сообщений от времени

Полученные результаты (отправка без расписания)

Название параметра	Значение
Общее количество успешно отправленных сообщений	1440
Размер отправленных данных, Кбайт	168
Количество попыток успешно отправленных сообщений	2215
Соотношение успешно отправленных сообщений к количеству попыток, %	65
Общее количество совершенных попыток отправления данных	6985
Среднее время задержки при отправке сообщений, сек	12,98

Полученные результаты (отправка по расписанию)

Название спутника	Время восхождения	Время максимальной элевации	Время схода
IRIDIUM 105	26-Mar-2023 09:10:40	26-Mar-2023 09:11:12	26-Mar-2023 09:11:45
IRIDIUM 164	26-Mar-2023 09:11:16	26-Mar-2023 09:11:52	26-Mar-2023 09:12:28
IRIDIUM 108	26-Mar-2023 09:20:11	26-Mar-2023 09:21:04	26-Mar-2023 09:21:58
IRIDIUM 155	26-Mar-2023 09:29:15	26-Mar-2023 09:30:15	26-Mar-2023 09:31:15
IRIDIUM 156	26-Mar-2023 09:38:26	26-Mar-2023 09:39:23	26-Mar-2023 09:40:21
IRIDIUM 158	26-Mar-2023 09:47:45	26-Mar-2023 09:48:31	26-Mar-2023 09:49:17
IRIDIUM 160	26-Mar-2023 09:57:35	26-Mar-2023 09:57:39	26-Mar-2023 09:57:45
IRIDIUM 110	26-Mar-2023 11:15:04	26-Mar-2023 11:15:31	26-Mar-2023 11:15:59

Рис. 15 – Фрагмент полученного расписания отправления сообщений

Полученные результаты (отправка по расписанию)

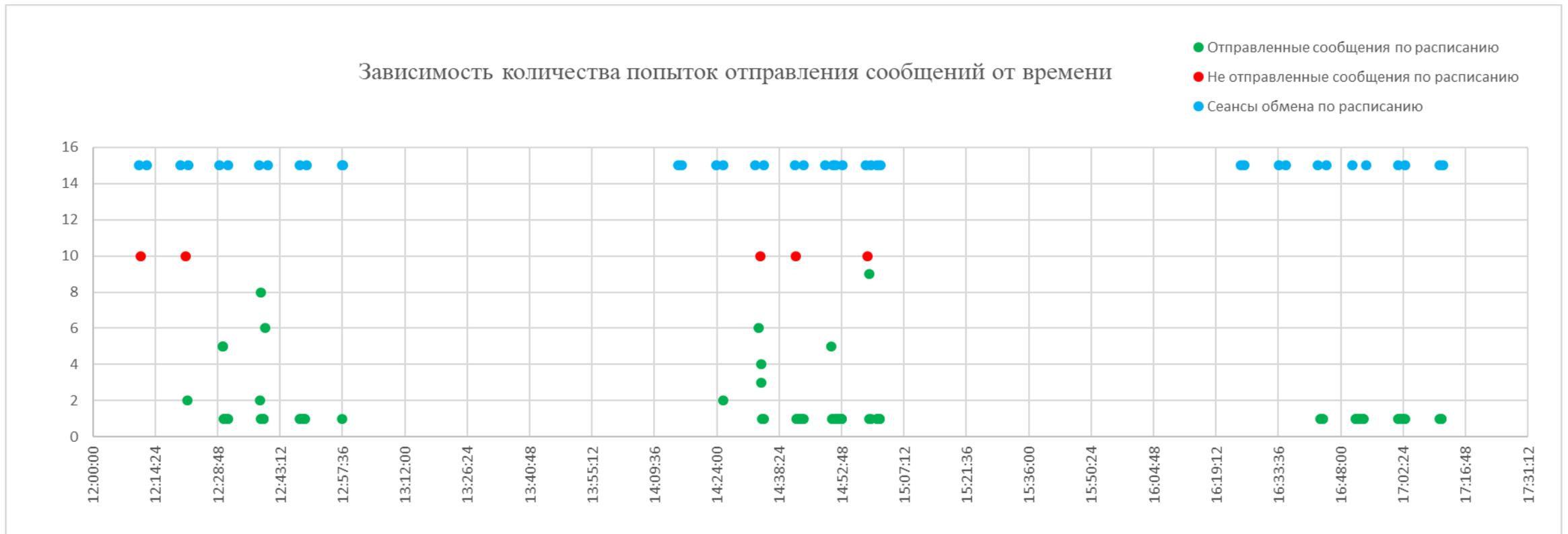


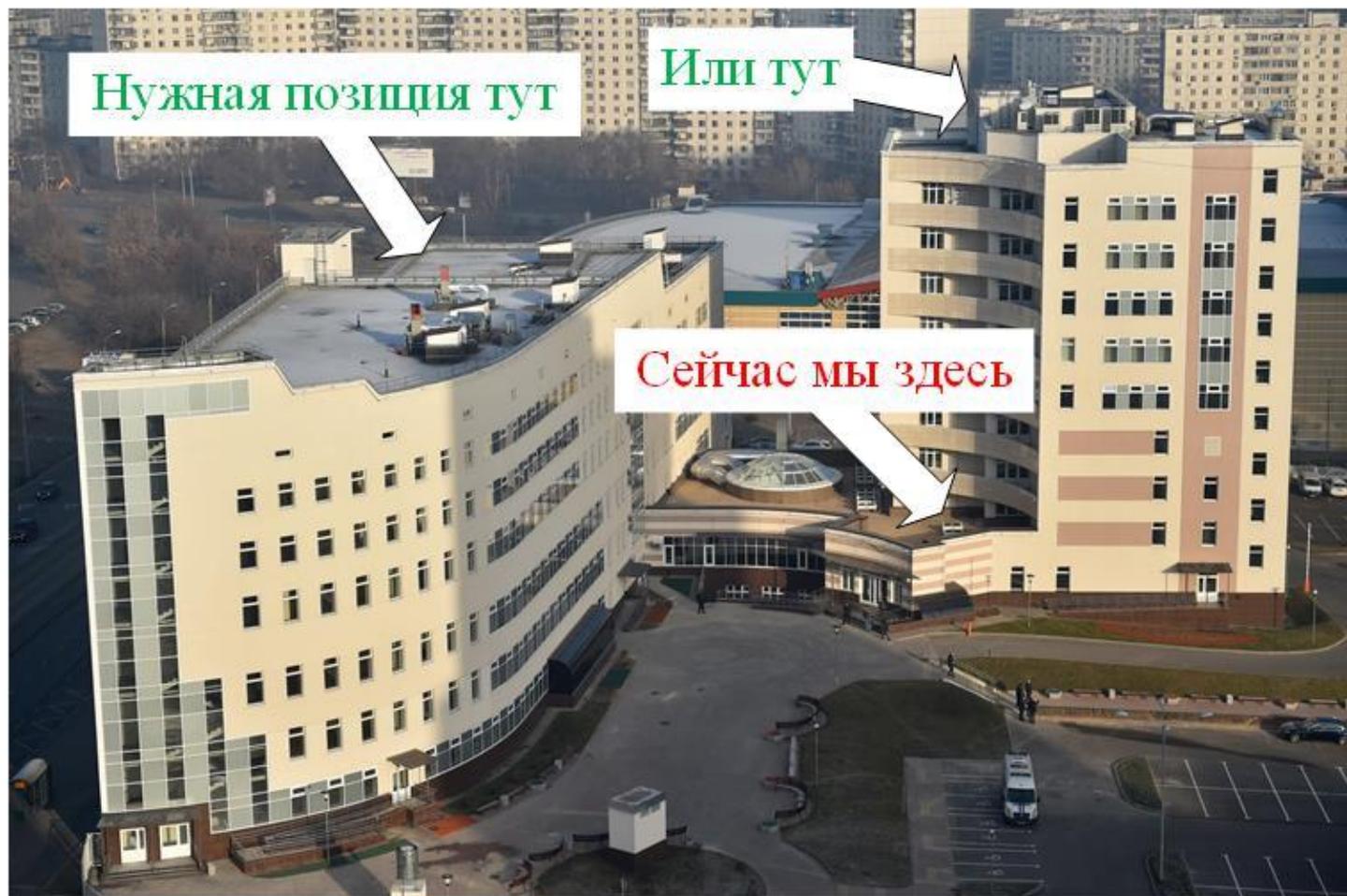
Рис. 17 – Диаграмма зависимости количества попыток отправления сообщений от времени

Полученные результаты (отправка по расписанию)

Название параметра	Значение
Общее количество успешно отправленных сообщений	105
Размер отправленных данных, Кбайт	12
Количество попыток успешно отправленных сообщений	150
Соотношение успешно отправленных сообщений к количеству попыток, %	70
Общее количество совершенных попыток отправления данных	200
Среднее время задержки при отправке сообщений, сек	11,21

Направления будущей работы

Размещение антенны на крышу здания университета для улучшения условий взаимодействия со спутниками



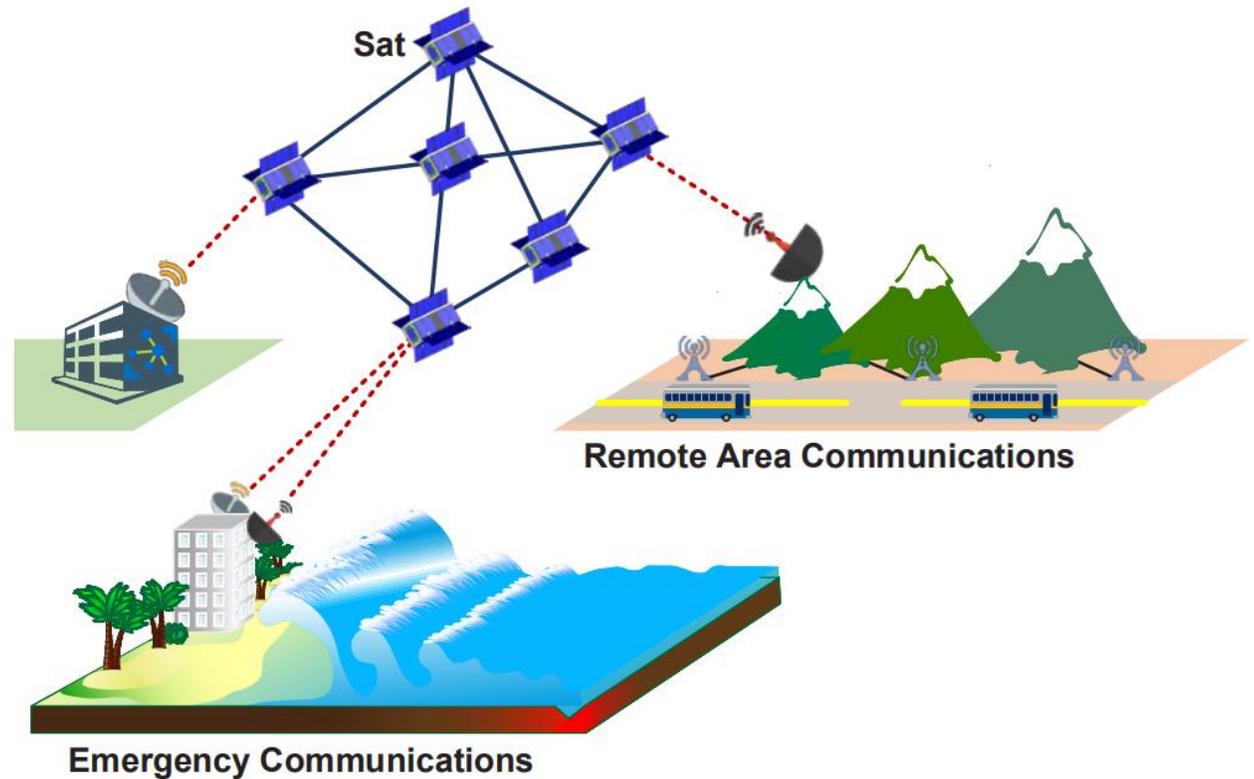
Направления будущей работы

Подключение портативного
осциллографа для сбора
информации об
энергопотреблении



Области применения

1. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций природного характера;
2. Экологический мониторинг;
3. Internet of Underground Things (IoUT);
4. Internet of Arctic Things (IoAT).



Список литературы

1. Palma, D.; Birkeland, R. Enabling the Internet of Arctic Things with Freely-Drifting Small-Satellite Swarms. *IEEE Access* 2018, 6, 71435–71443.
2. Said, O.; Tolba, A. Performance Evaluation of a Dual Coverage System for Internet of Things Environments. *Mob. Inf. Syst.* 2016, 2016, 1–20.
3. Sturdivant, R.L.; Yeh, J.; Stambaugh, M.; Zahnd, A.; Villareal, N.; Vetter, C.K.; Rohweller, J.D.; Martinez, J.F.; Ishii, J.M.; Brown, R.A.; et al. IoT enabled pico-hydro electric power with satellite back haul for remote himalayan villages. In *Proceedings of the IEEE Topical Workshop on Internet of Space (TWIOS)*, Anaheim, CA, USA, 14–17 January 2018; pp. 5–8.
4. Gomez, C.; Darroudi, S.M.; Naranjo, H.; Paradells, J. On the Energy Performance of Iridium Satellite IoT Technology. *Sensors* 2021, 21, 7235;

Список литературы

5. Voskov L., Rolich A., Bakanov Gleb, Podkopaeva Polina. Gateway Data Encoding, Packaging and Compression method for heterogeneous IoT-satellite network, in: 2021 XVII International Symposium "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY). IEEE, 2021. doi P. 34-38.

