



Белорусский государственный
университет информатики и
радиоэлектроники



Белорусские облачные
технологии



Международный Союз
Электросвязи

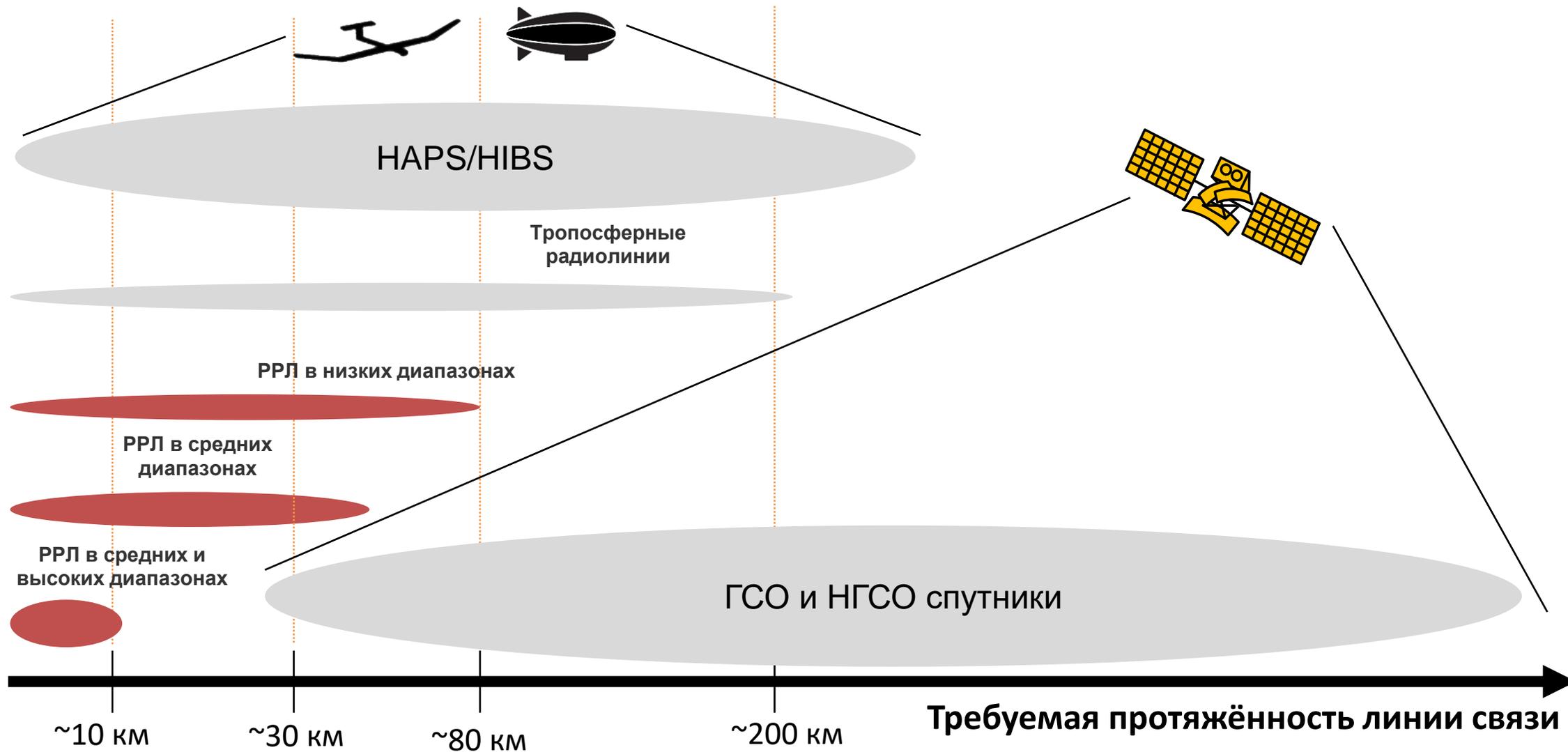
Беспроводные фиксированные линии связи

Вадим Поскакухин, Эксперт Международного союза электросвязи,
Технический директор Ubiquitous Wireless LLP

Содержание доклада

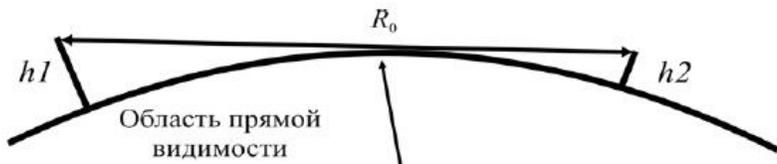
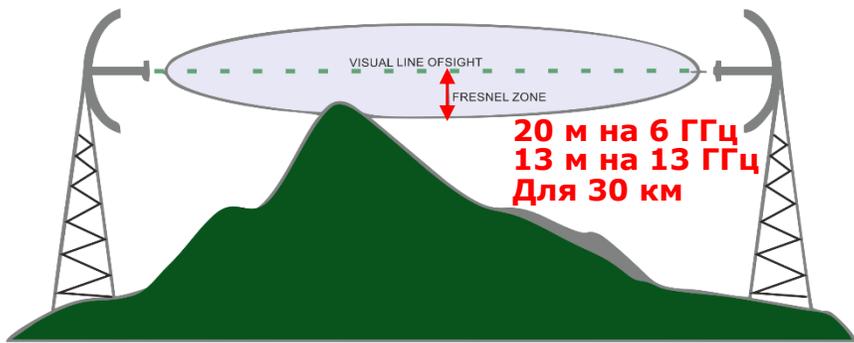
- Общие сведения о построении РРЛ
- Текущий уровень и развитие РРЛ
- Развитие лазерных линий

Альтернативы проводным линиям связи – когда ВОЛС недоступно



Общие принципы работы традиционных РРЛ и пределы дальности связи

Пределы дальности связи для обеспечения прямой видимости



Коэффициент для ГГц-диапазонов

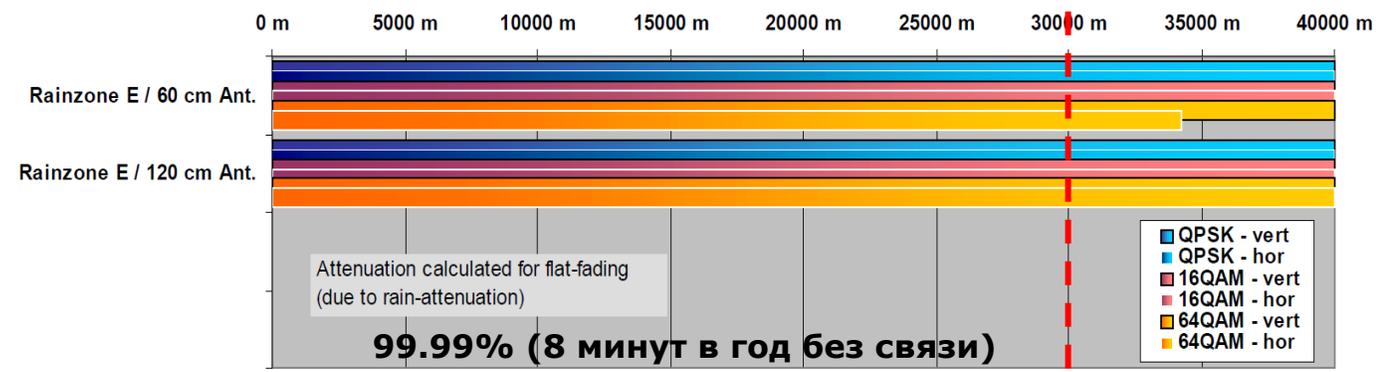
$$R_{[км]} = 3.57 \left(\sqrt{h1_{[м]}} + \sqrt{h2_{[м]}} \right)$$

- При наличии двух мачт 30 м дальность: **39 км**
- При наличии двух мачт 50 м дальность: **50 км**
- При наличии двух мачт 70 м дальность: **60 км**

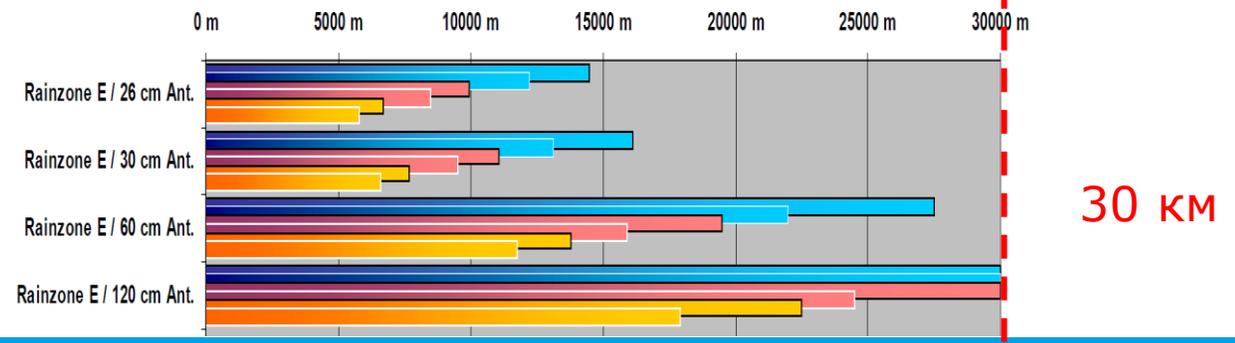
Ограничение дальности влиянием гидрометеоров



Link Range for 13 GHz Point-to-Point Application

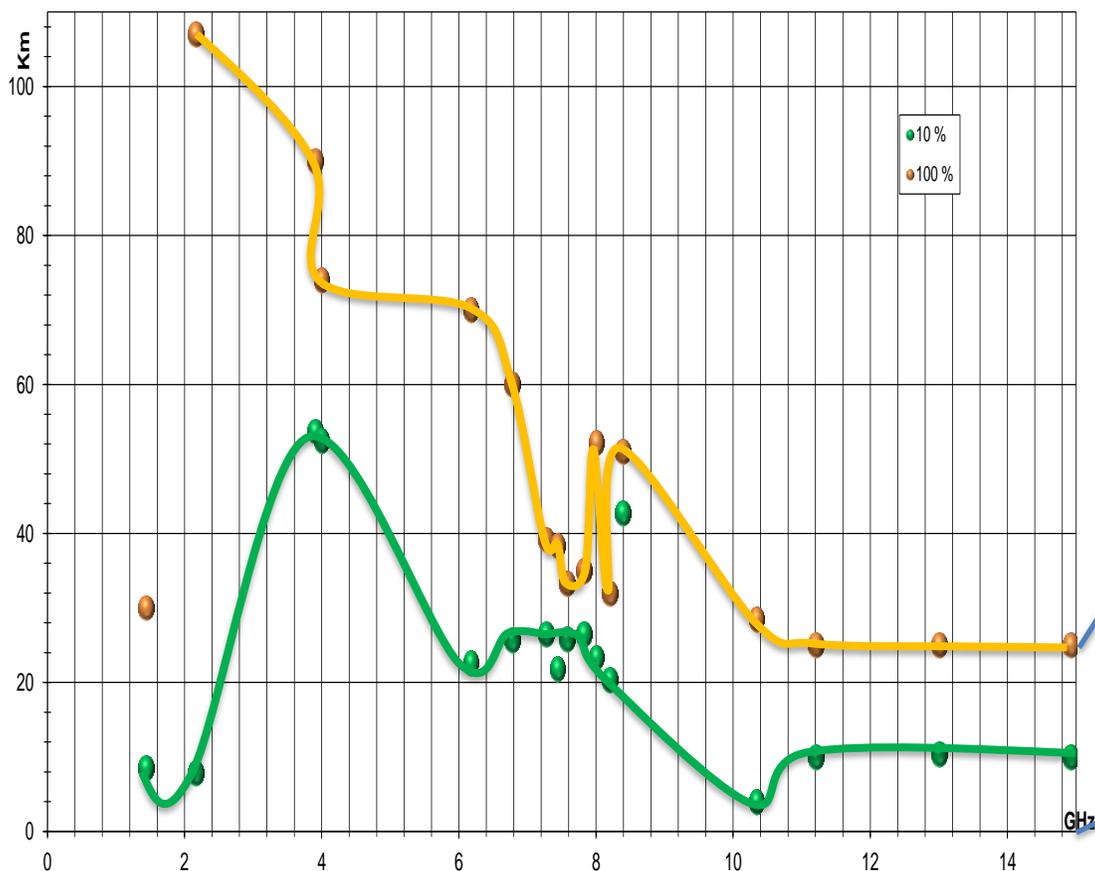


Link Range for 23 GHz Point-to-Point Application

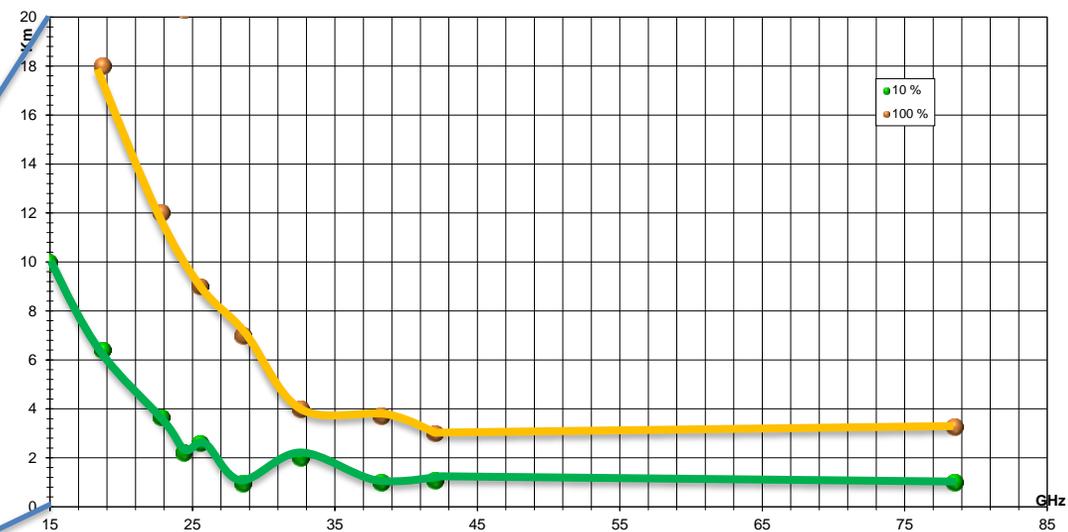


Типовая дальность от диапазона радиочастот – на основе статистики стран СЕПТ (2021)

Hop lengths percentiles - Typical length - Rep. 173 - 2022



Hop lengths percentiles - Typical length



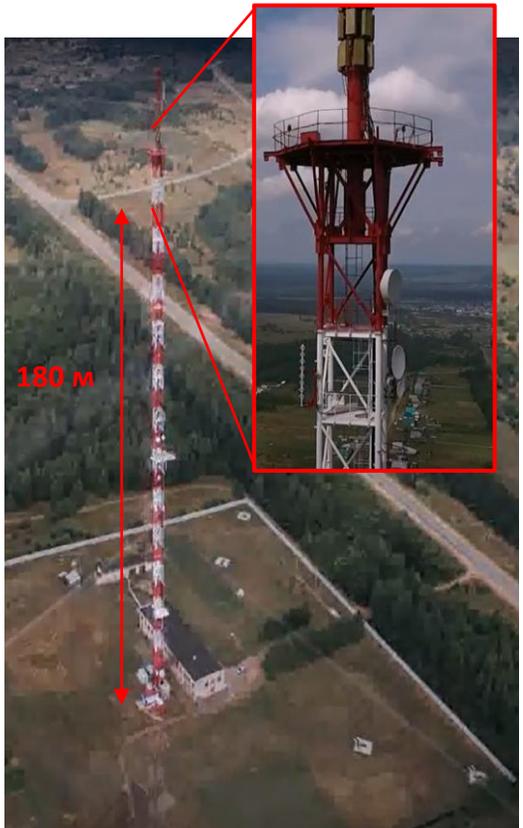
Нижние

Средние

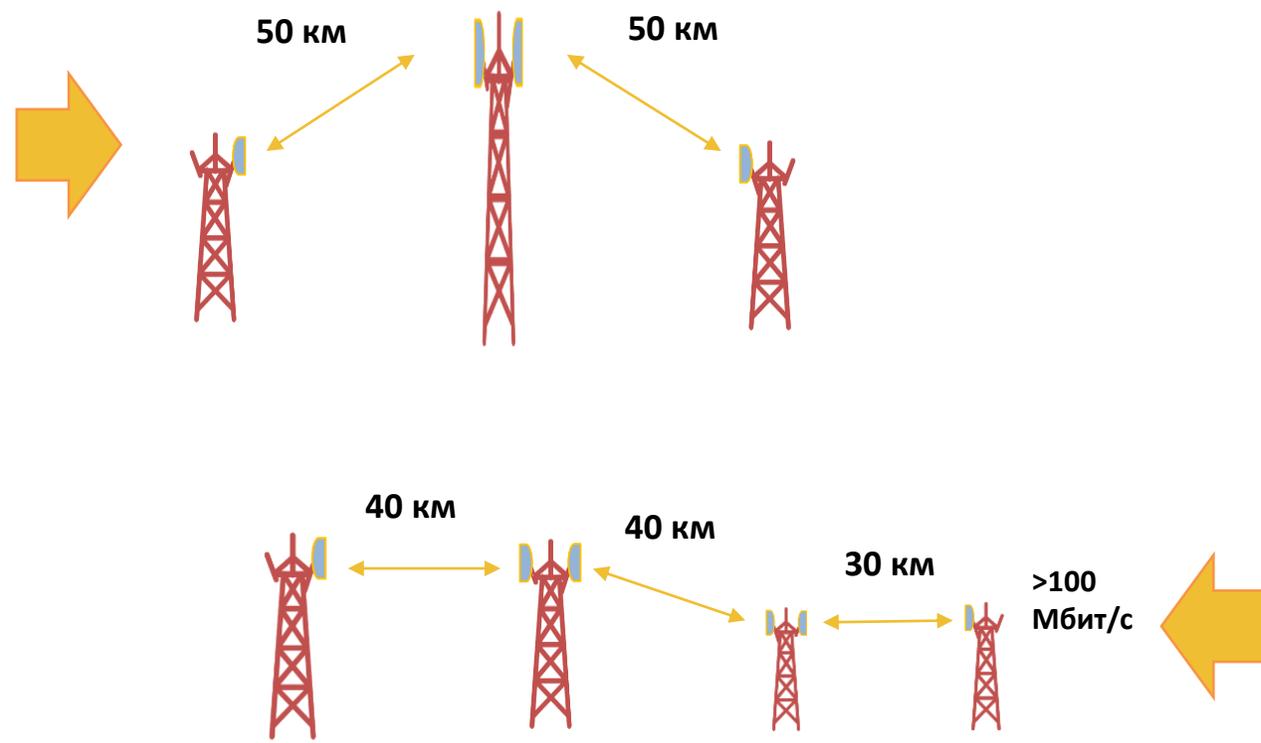
Высокие

Использование нескольких пролетов в сельской местности

Мачты ТВ

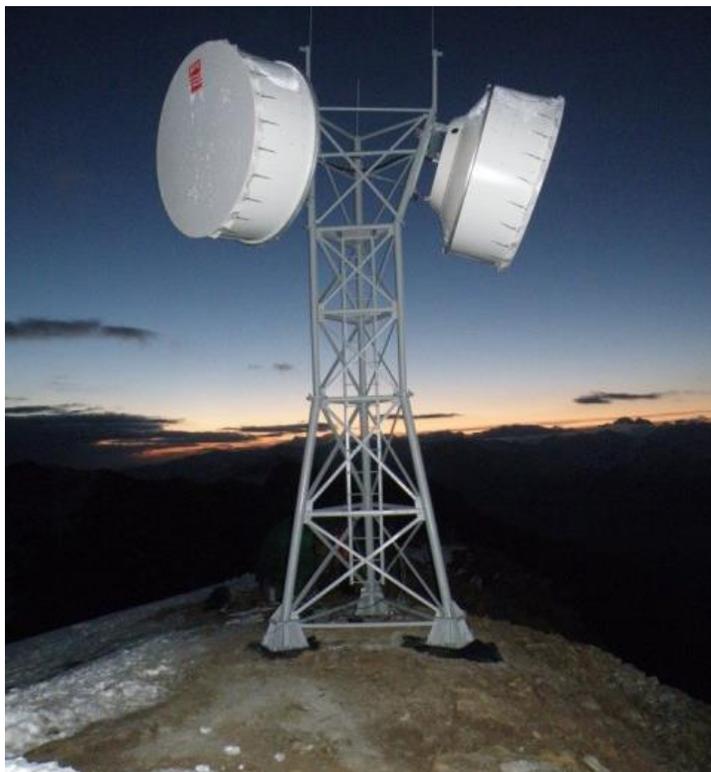


Гбит/с до 50-60 км на мачту 10-20 метров



Гбит/с до 30-40 км на мачту 10-20 метров

Пассивные ретрансляторы



Полностью пассивные. Пропускная способность не более десятков Мбит/с. Использовались для 2G и 3G.

Квази-пассивные ретрансляторы



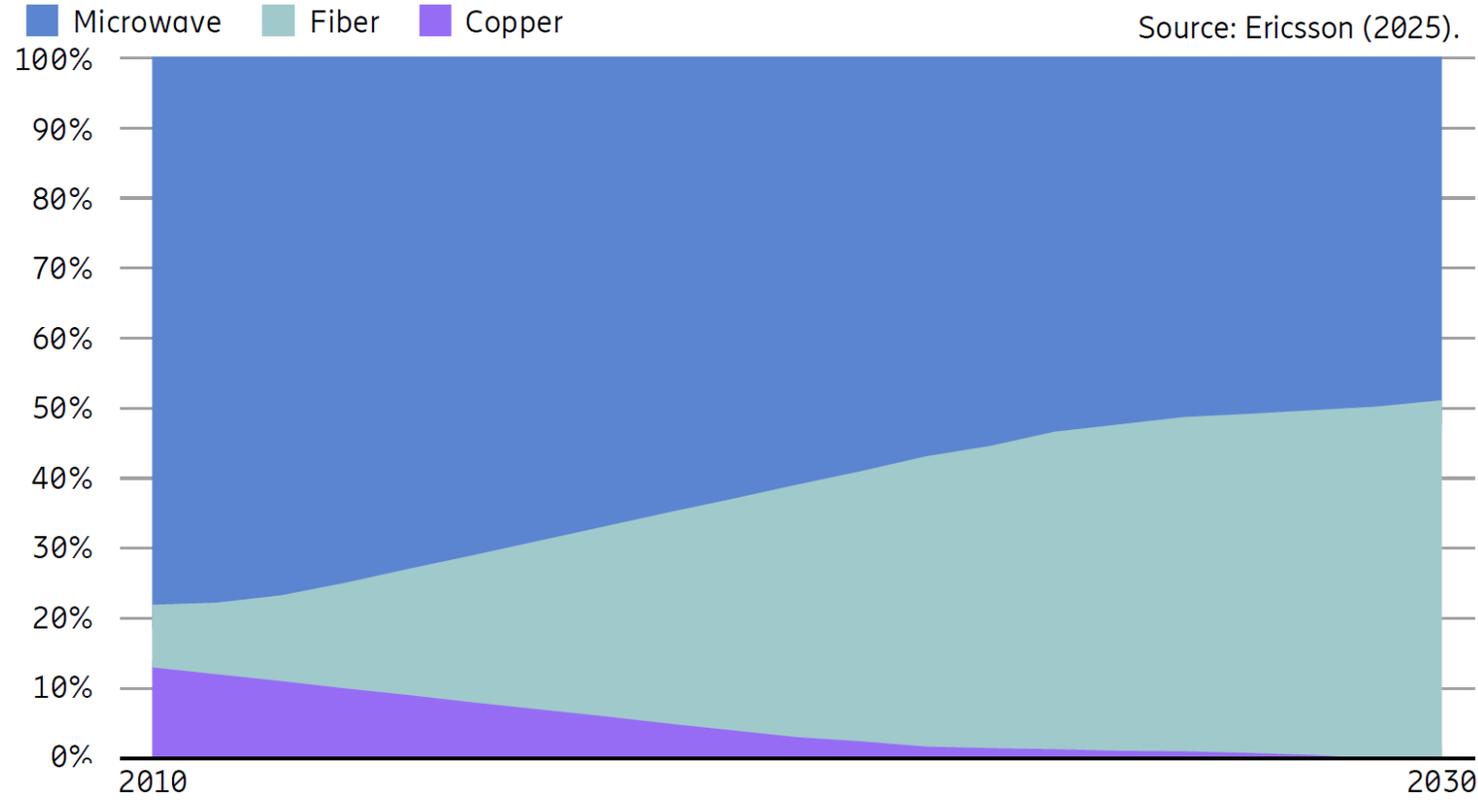
Между антеннами встроены активные широкополосные усилители на солнечных панелях и аккумуляторах. Пропускная способность в сотни Мбит/с. Используются для БС LTE.

Содержание доклада

- Общие сведения о построении РРЛ
- Текущий уровень и развитие РРЛ
- Развитие лазерных линий

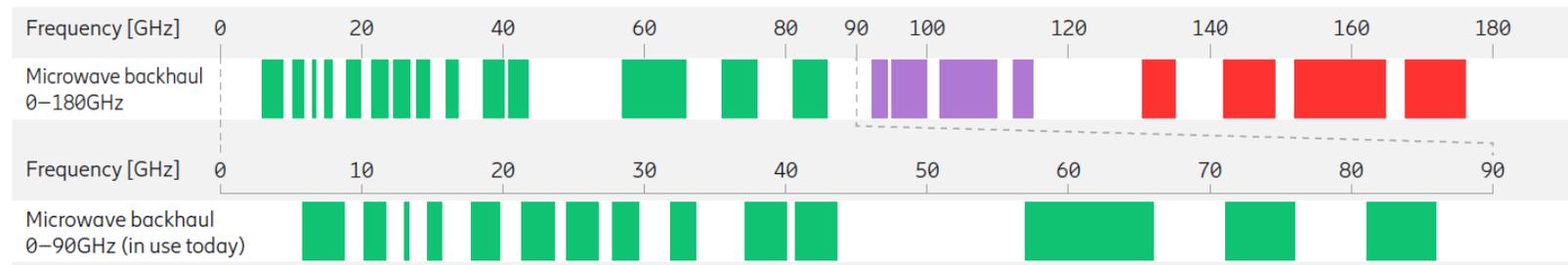
Сохранение спроса на РРЛ для подключения базовых станций

Прогнозы по использованию РРЛ в транспортных сетях

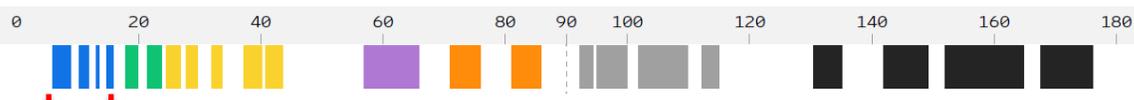
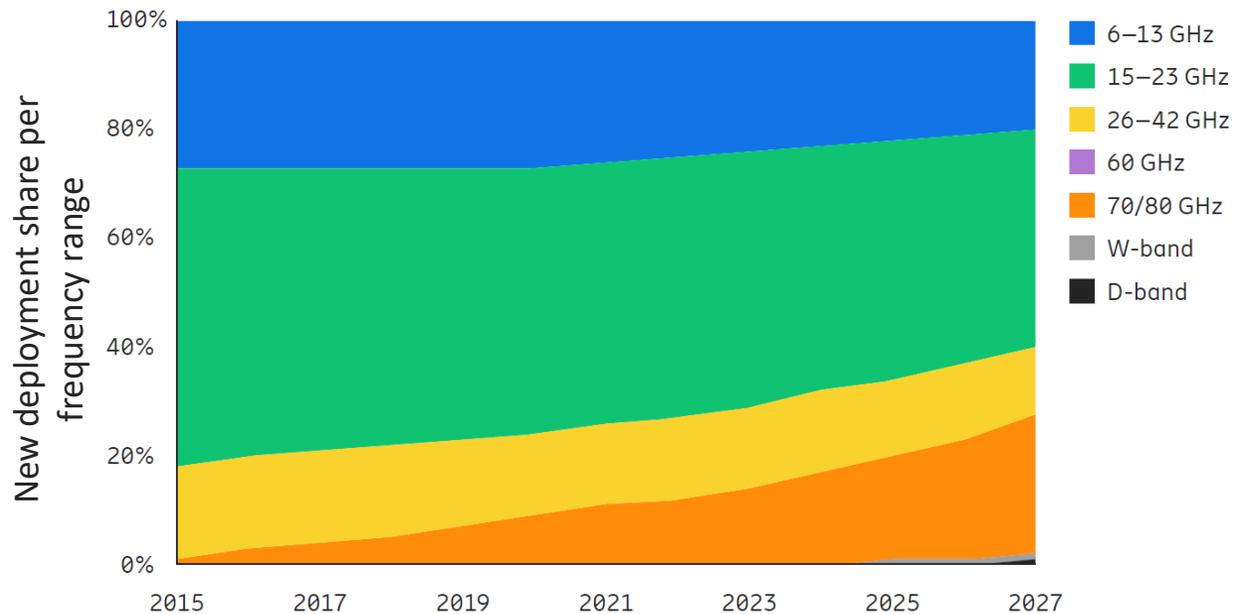


49%

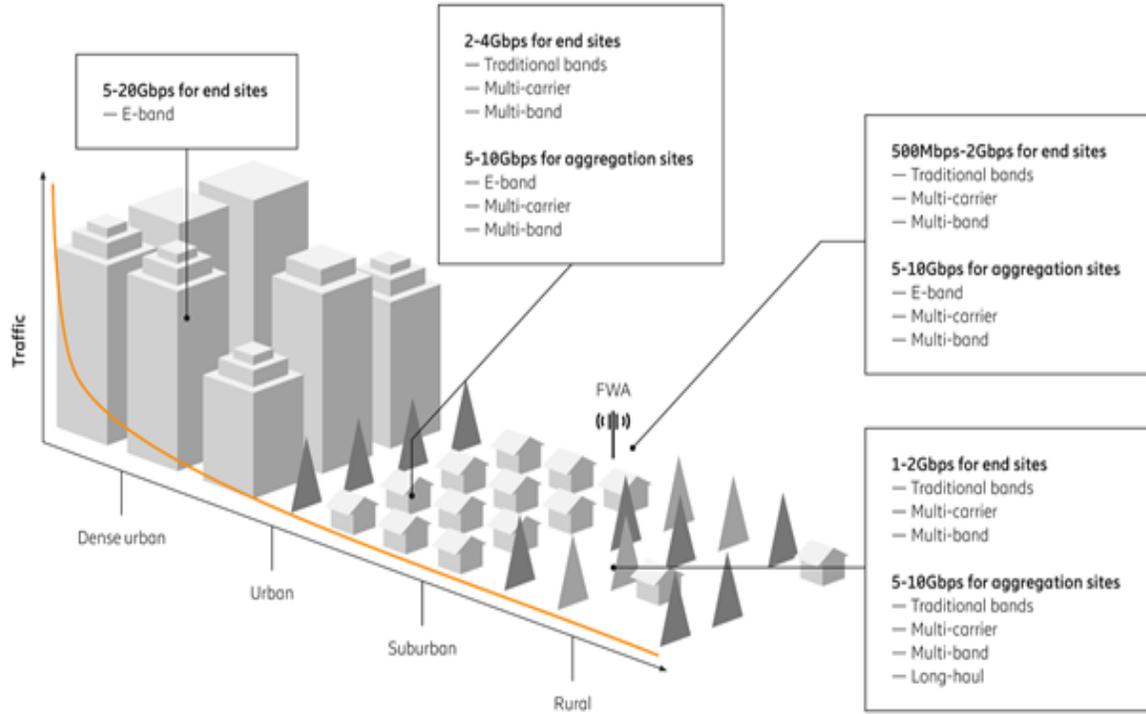
Ключевые диапазоны



Более высокий спрос на более высокие диапазоны радиочастот



РРЛ в ряде полос частот вытесняются системами ИМТ

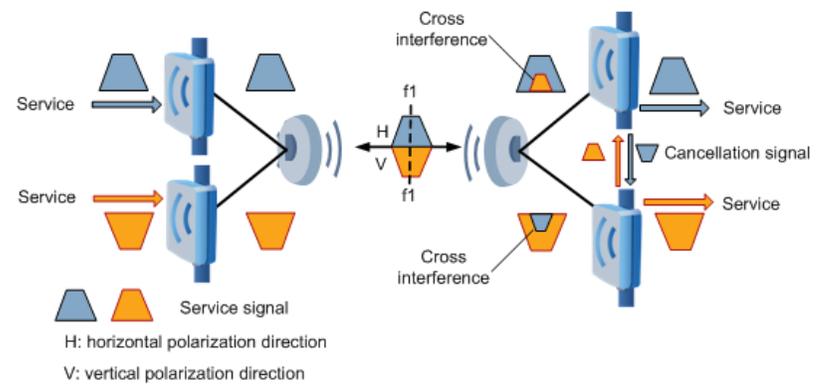


Source: Ericsson

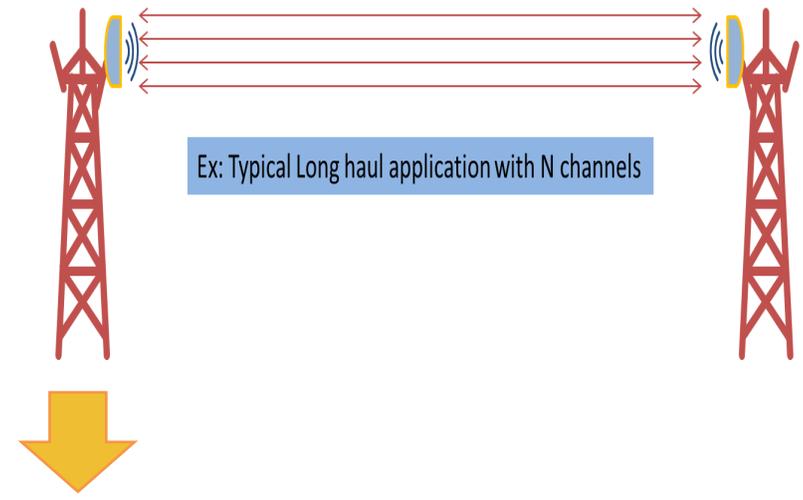


Современный уровень пропускной способности традиционных РРЛ

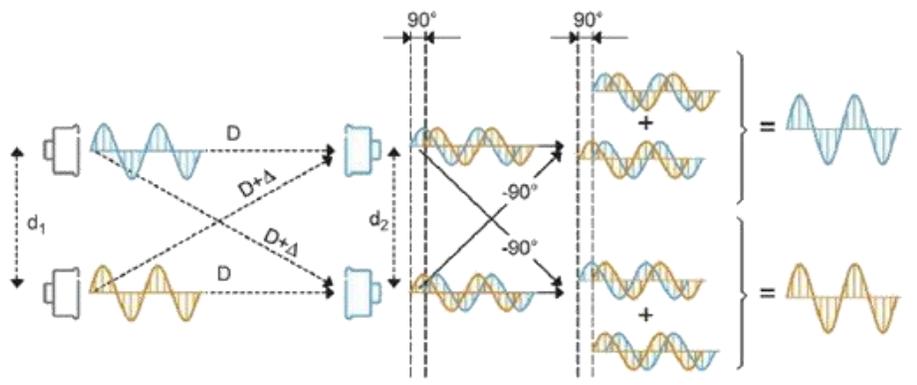
Использование кроссполаризации на одном канале



Агрегация нескольких каналов в один



Использование MIMO LoS

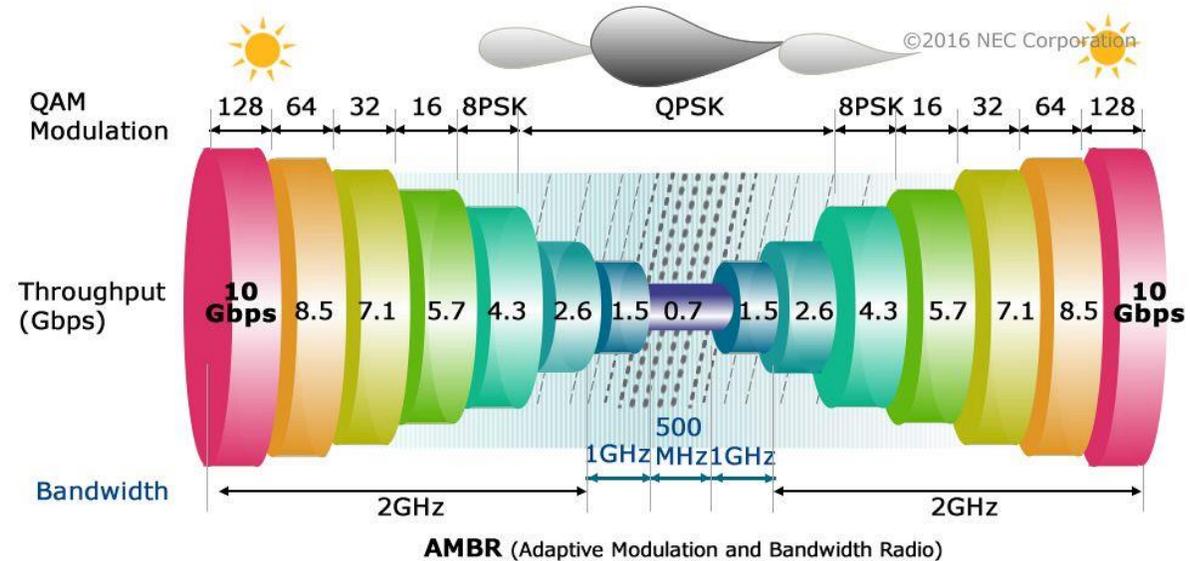


Достижимая пропускная способность в диапазонах 6-13 ГГц

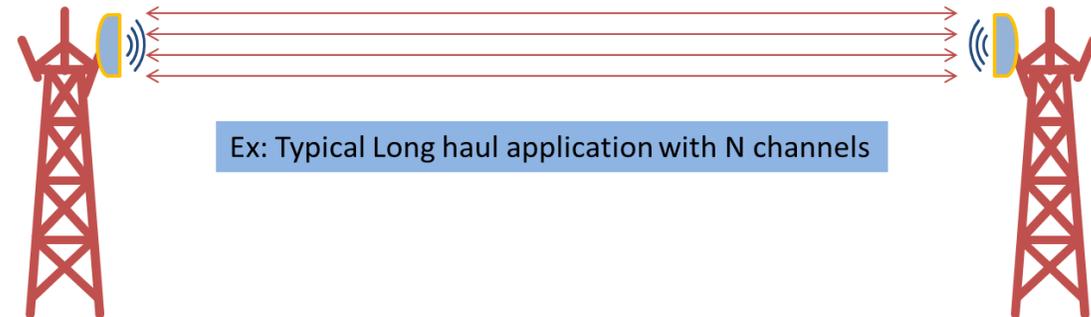
| Ширина канала, МГц | Модуляция | Спектр. эфф-сть (Бит/Гц) | Число каналов | Без XPIС (Мбит/с) | С XPIС (Мбит/с) | XPIС + MIMO (Мбит/с) |
|--------------------|-----------|--------------------------|---------------|-------------------|-----------------|----------------------|
| 28 | QAM64 | 5.5 | 2 | 308 | 616 | 1 232 |
| 28 | QAM256 | 7 | 2 | 392 | 784 | 1 568 |
| 56 | QAM64 | 5.5 | 2 | 616 | 1 232 | 2 464 |
| 56 | QAM256 | 7 | 2 | 784 | 1 568 | 3 136 |

Современный уровень пропускной способности широкополосных РРЛ

Типовое массовое решение с адаптивной модуляцией (до 3 км)



Многоканальные варианты реализации 40 Гбит/с (до 3 км)



Ожидается более массовое внедрение многоканальных вариантов или более широких каналов с освоением диапазонов W и D

Основные показатели РРЛ в высоких диапазонах

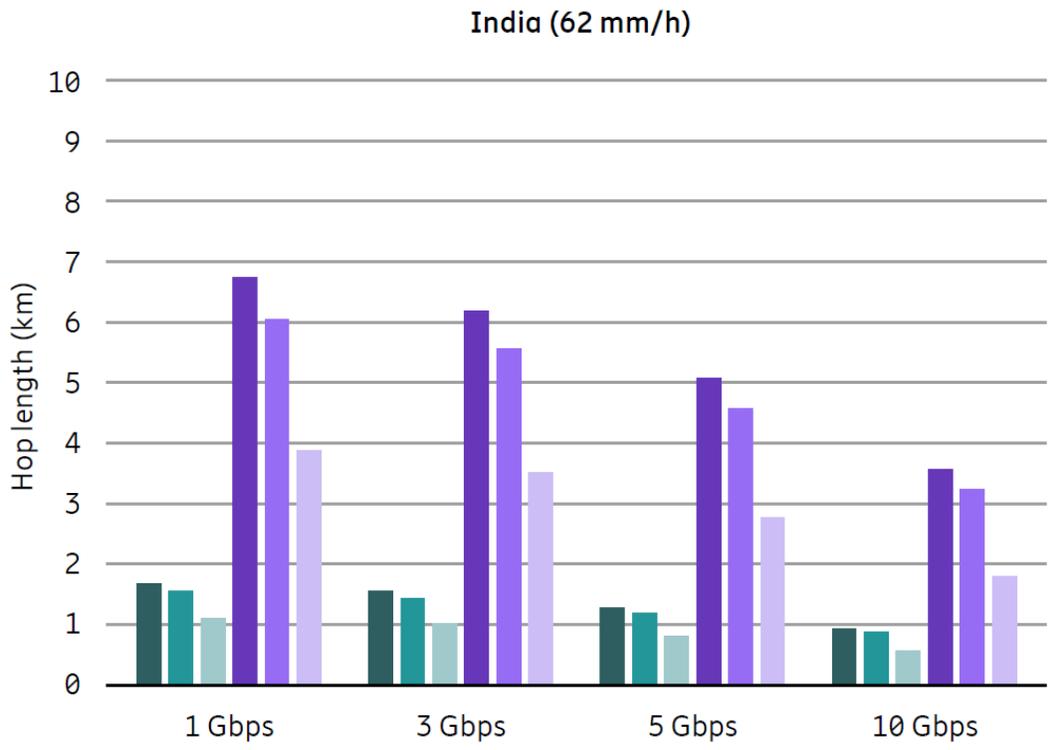
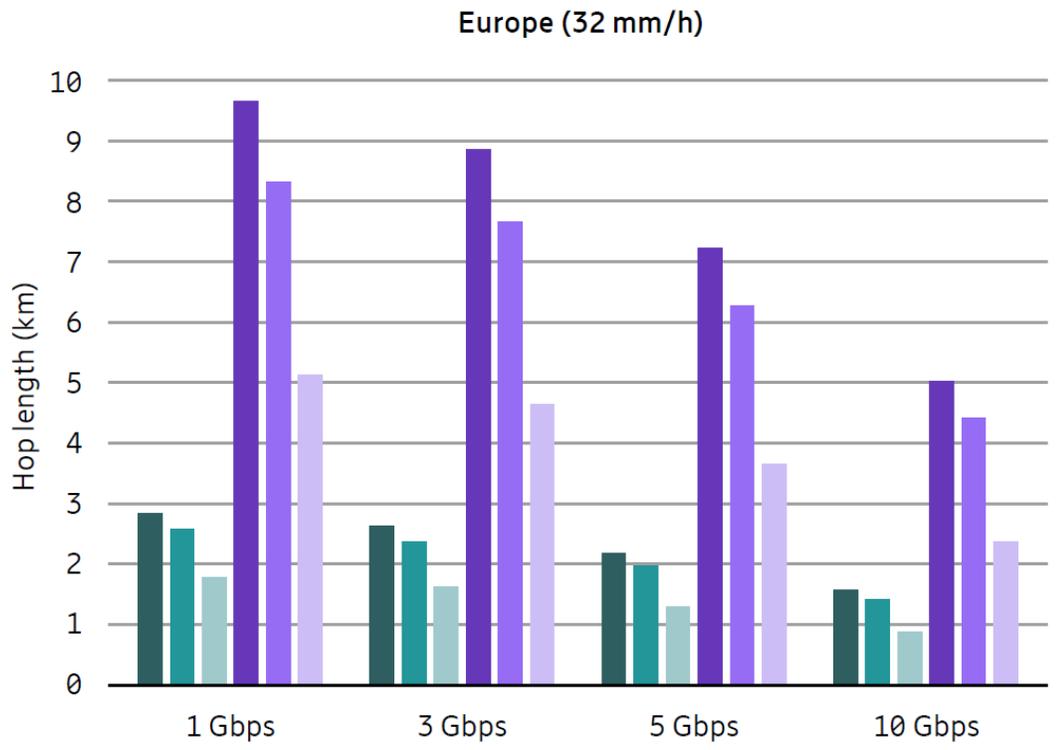
Single-band – 99.995% availability

E-band W-band D-band

Multi-band – 99.9% availability

E-band W-band D-band

В небольшом проценте времени РРЛ работает только в более низком диапазоне с меньшей пропускной способностью.



Note: Channel spacing 2,000 MHz, fixed 0.3 m antenna
Source: Ericsson (2025).

Содержание доклада

- Общие сведения о построении РРЛ
- Текущий уровень и развитие РРЛ
- Развитие лазерных линий

Современные лазерные линии



Типовые лазерные линии единицы Гбит/с и единицы км



Передовые линии до десятков Гбит/с

Лазерные линии также подвержены влиянию гидрометеоров (сопоставимы с наиболее высокими диапазонами РРЛ)

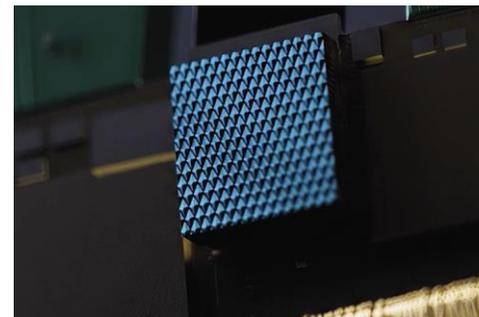
Миниатюризация и удешевление



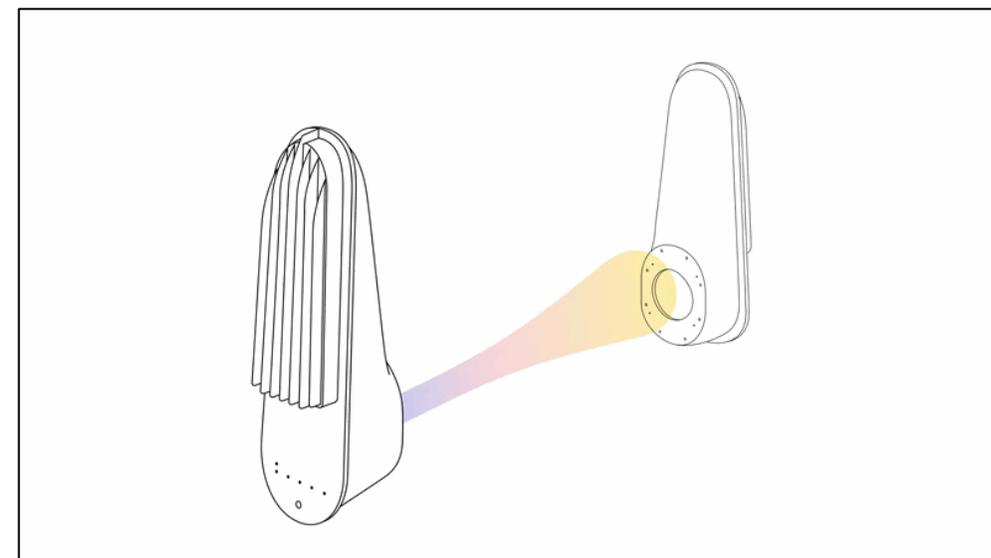
Компания Taara разработала фотонный чип для применений типа 1 Гбит/с на 1 км – с потенциалом значительного удешевления и массового использования коротких лазерных линий



Оптическая ФАР и широкие возможности стабилизации сигнала

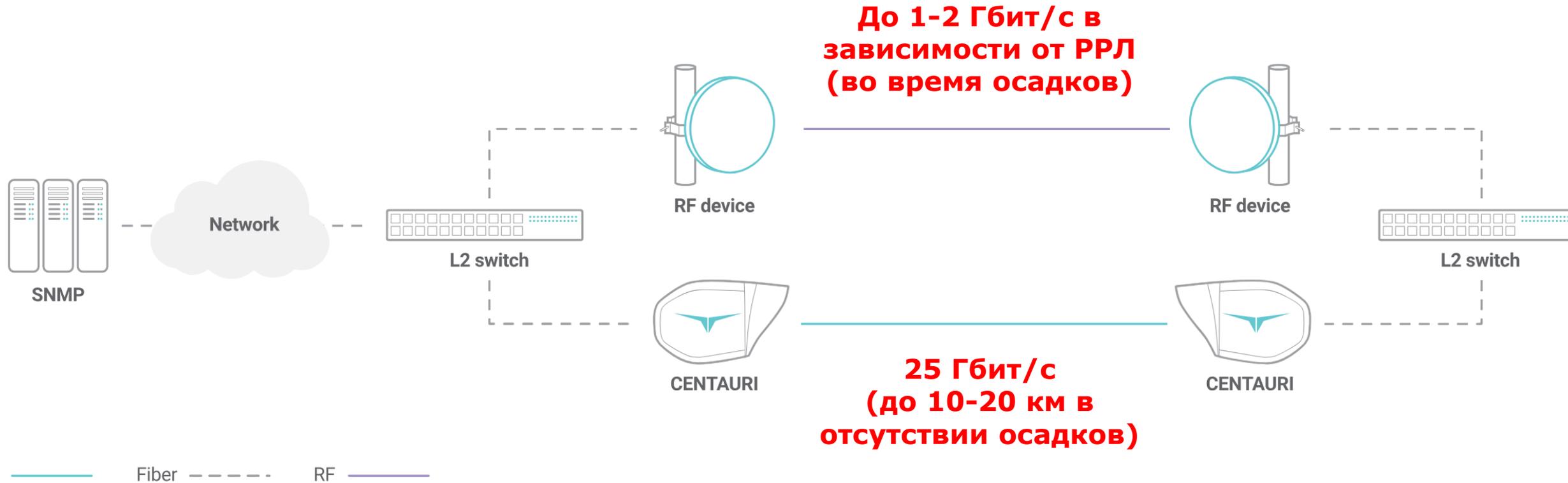


| PARAMETER | VALUE |
|-----------------------|--|
| Throughput | 20 Gbps full-duplex, with built-in support for multiband |
| Range | 0.4 km to 20 km Без учета гидрометеоров |
| Latency | Minimum latency < 160 μ s + time of flight (up to 67 μ s for 20 km) Mean latency < 5 ms Maximum latency < 100 ms |
| Dimensions | 220 mm x 240 mm x 750 mm |
| Weight | 13 kg |
| Regulatory compliance | IEC 62368-1, 60950-22, FCC 15.b, EN 300 386 |



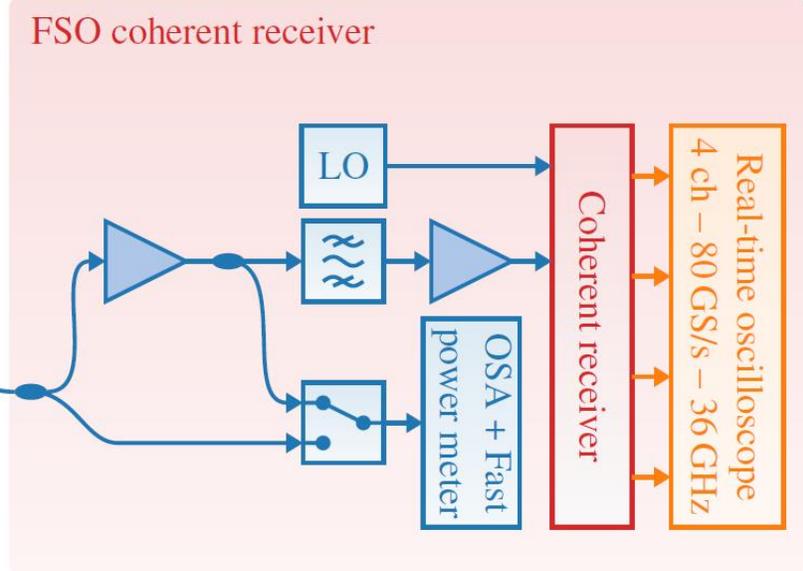
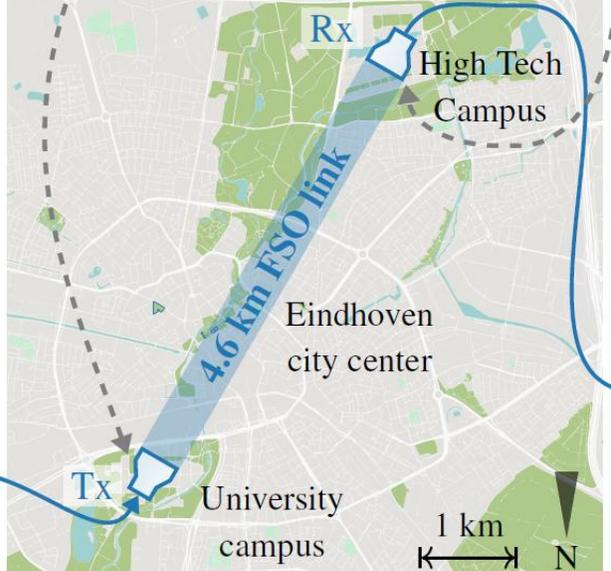
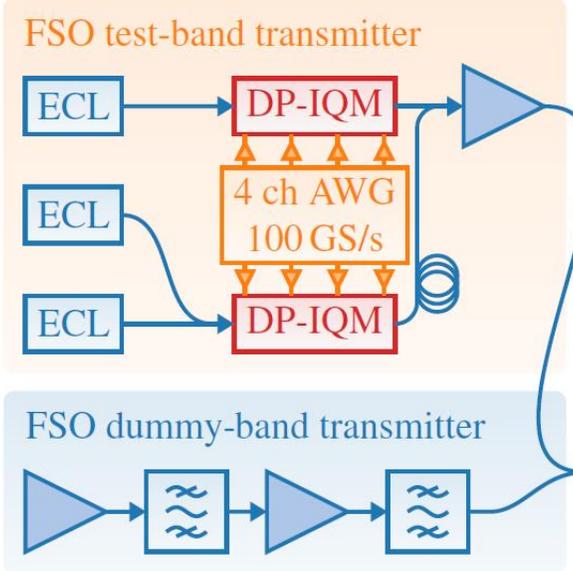
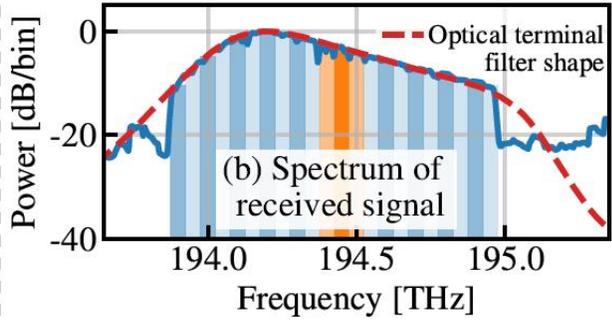
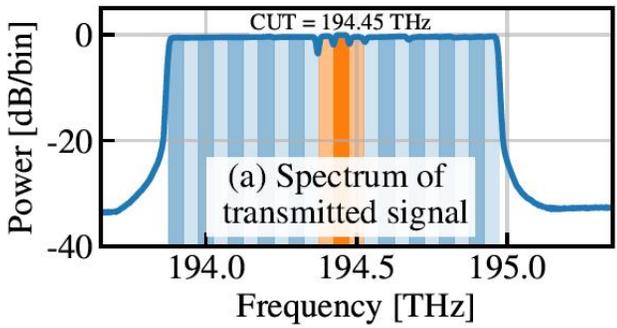
Гибридное использование РРЛ и FSO для повышения надежности при дожде или тумане

На примере решения компании Transcelestial (партнер T-Mobile)



Будущее развитие лазерных линий FSO

Экспериментальный стенд Eindhoven University of Technology (2025)



Достигнута скорость в 5.7 Тбит/с (в 22 WDM каналов) с использованием прототипов коммерческого оборудования

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ