



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ



В.Н. Малышев

**Перспективы
технологий 6G**

19.05.2022 | www.etu.ru



Forget 5G. Let's Talk About 6G! (WSJ

03/22)

Special Report 5G and Connectivity

Technology sector

Beyond 5G: what would 6G look like – and do we need it?

The 'Internet of the Senses' and a 'cyber-physical continuum' are on engineers' horizon

Financial Times



'Interacting with the network in a more immersive way — that is what 6G is likely to enable' © Getty/iStockphoto

Anna Gross FEBRUARY 7 2022



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Коммерсантъ

\$ 75,19 € 85,40 IMOEX 3600,29

[Олимпиада в Пекине](#)

[Обострение вокруг Украины](#)

[Деятельность Навального](#)

[Телекоммуникации](#)

29.01.2022, 12:46

Мишустин поручил внести в правительство предложения по разработкам 6G



415



1 мин.

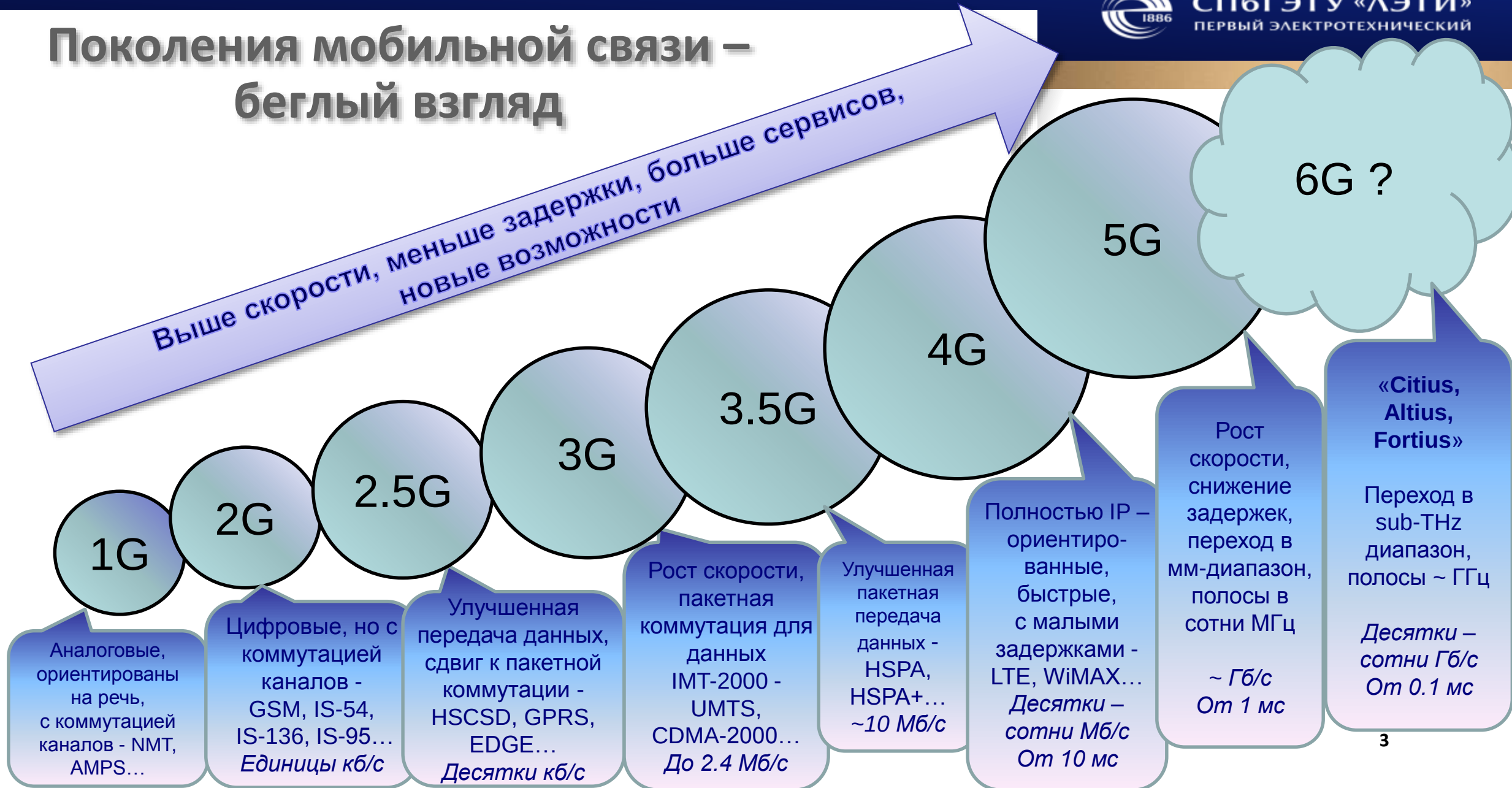


Премьер-министр России Михаил Мишустин дал поручения Минцифры и Минпромторгу внести в правительство предложения по развитию мобильных сетей шестого поколения (6G). Поручения даны по итогам поездки главы правительства в Воронежскую область 20 января.

«Минцифры и Минпромторгу до 14 февраля необходимо подготовить и внести в правительство предложения по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам в сфере развития мобильных сетей шестого поколения», — говорится в [документе](#), опубликованном на сайте правительства.

Помимо этого Минцифры, Минпромторгу и Минэнерго необходимо до 30 июня представить инициативы по стимулированию спроса на российские системы и средства профессиональной радиосвязи стандарта DRM.

Поколения мобильной связи – беглый взгляд



Мобильный IP трафик – с 2017 до 2022

1 эксабайт (Exabyte)
= 1024 петабайт
≈ 250 млн. DVD

46% CAGR
2017-2022

CAGR (Compound Annual Growth Rate) -
среднегодовой темп роста с учетом
сложного процента.



Source: Cisco VNI Mobile, 2019



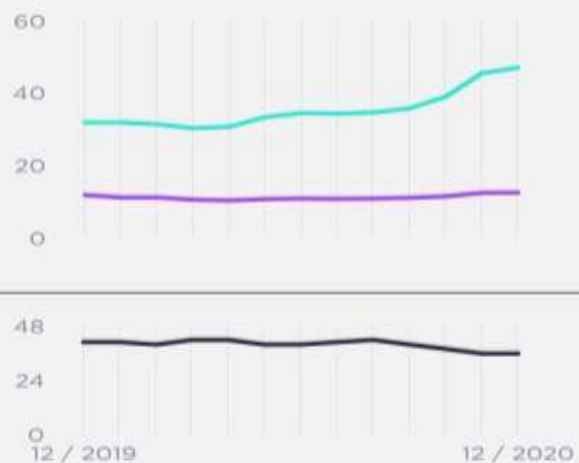
2019 - 2020

2020 – 2021

Mobile

Global Average

Download 47.20 Mbps
Upload 12.67 Mbps
Latency 36 ms

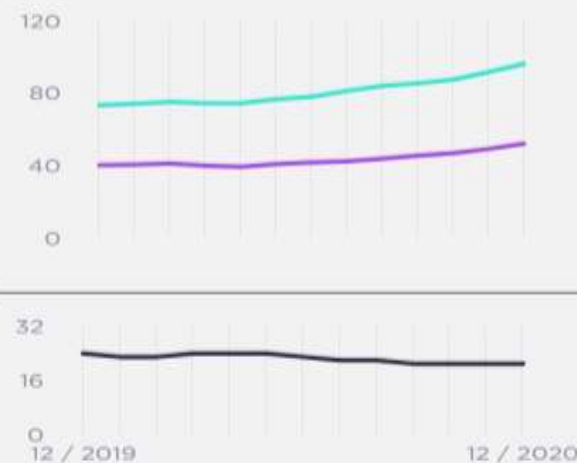


#	Country	Mbps
1	+2 Qatar	178.01
2	-1 United Arab Emirates	177.52
3	-1 South Korea	169.03
4	- China	155.89
5	- Australia	112.68

Fixed Broadband

Global Average

Download 96.43 Mbps
Upload 52.31 Mbps
Latency 21 ms

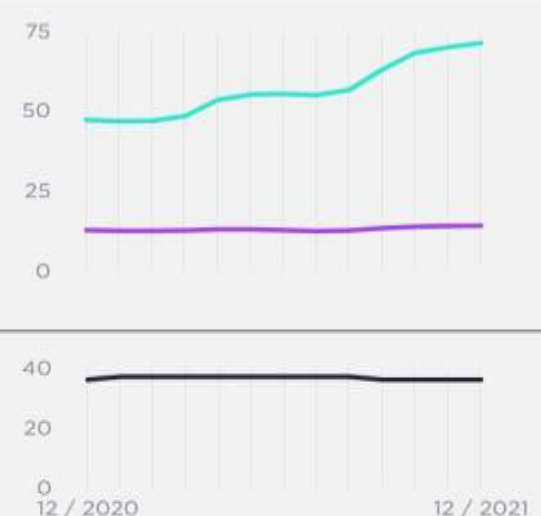


#	Country	Mbps
1	+2 Thailand	308.35
2	-1 Singapore	245.31
3	-1 Hong Kong (SAR)	226.80
4	+3 Romania	190.60
5	- Switzerland	188.88

Mobile

Global Performance

Download 71.26 Mbps
Upload 14.08 Mbps
Latency 36 ms

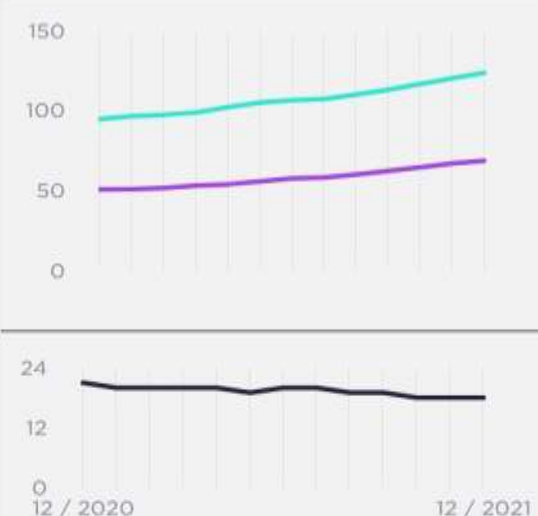


#	Country	Mbps
1	- United Arab Emirates	302.43
2	- South Korea	227.99
3	- Qatar	213.09
4	+2 Kuwait	188.74

Fixed Broadband

Global Performance

Download 123.87 Mbps
Upload 68.87 Mbps
Latency 18 ms



#	Country	Mbps
1	- Monaco	288.47
2	- Singapore	261.16
3	- Hong Kong (SAR)	259.90
4	+1 Chile	253.61

Скорость мобильного доступа в РФ

Russia Q1—Q2 2021



MegaFon is Russia's Speedtest Awards™ Winner for mobile network speed during Q1—Q2 2021

30.04

Speed Score™

32.92

Mean Speed Mbps

11.90

Mean Speed Mbps

Speed Score™

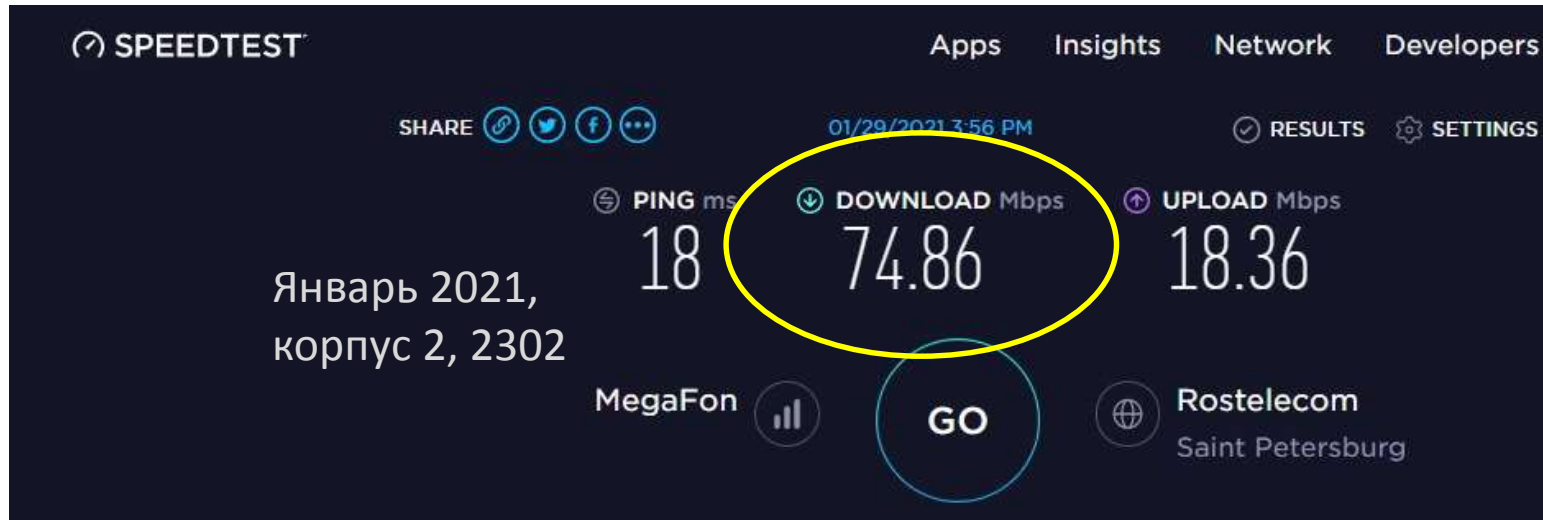
MegaFon	30.04
MTS	19.20
Beeline	18.07
Tele2	17.38

Test Counts

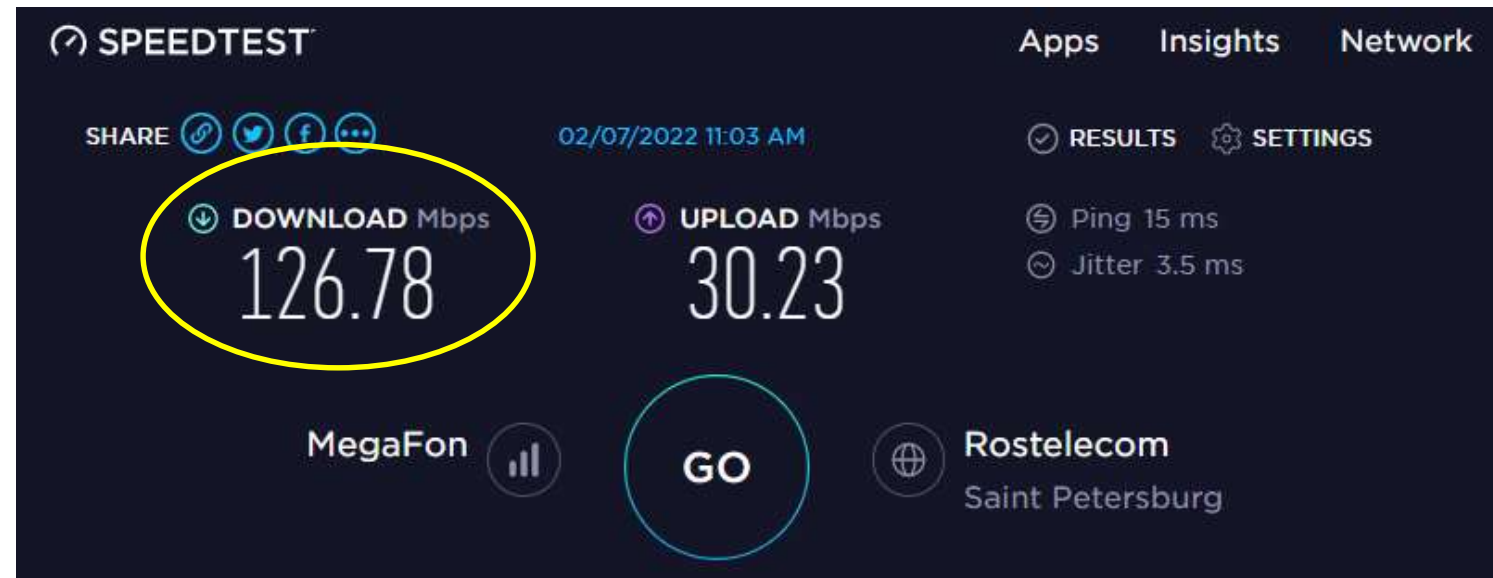
MegaFon	2,702,584
MTS	1,601,506
Beeline	1,552,323
Tele2	1,335,823



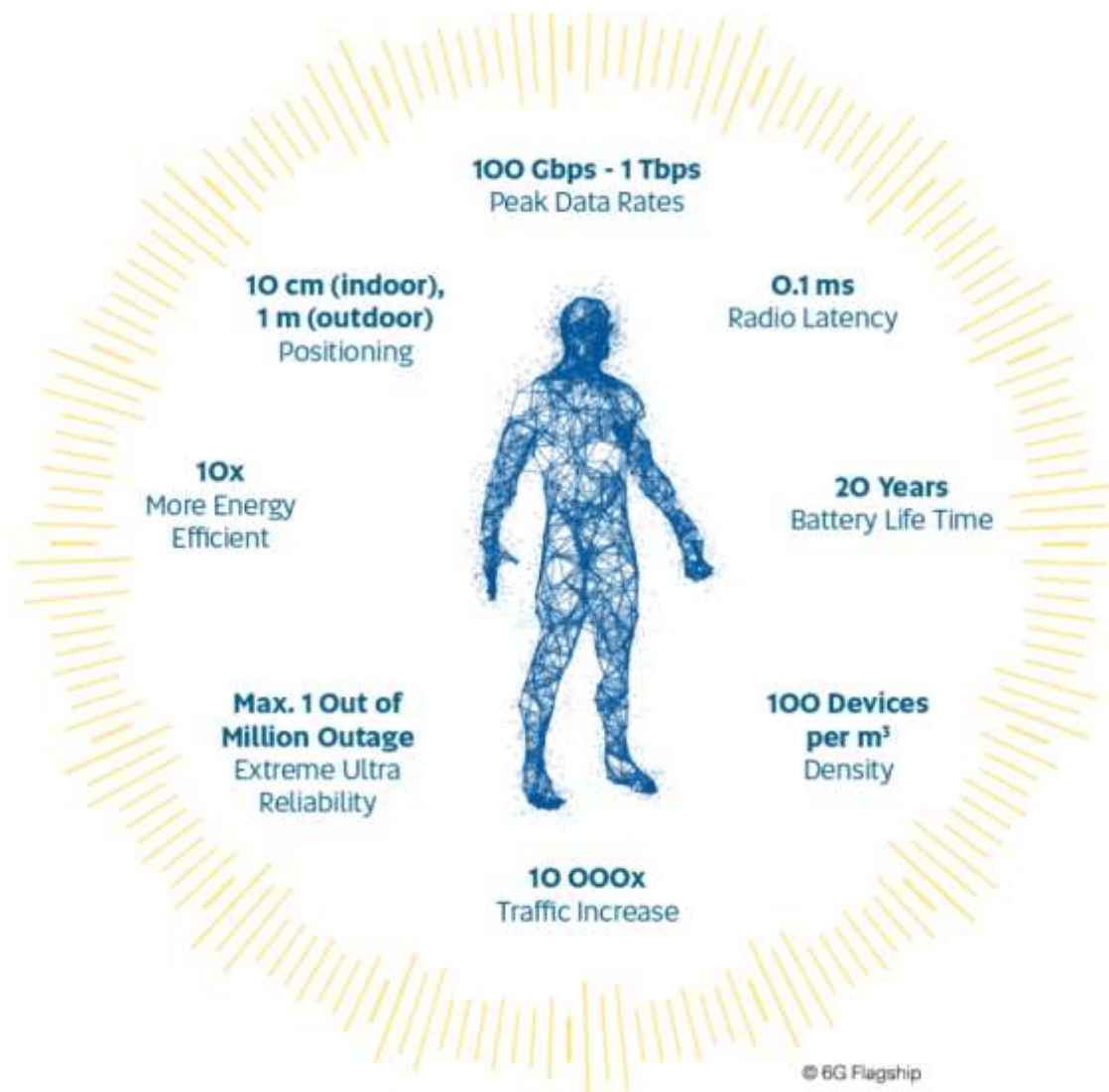
Скорость мобильного доступа в ЛЭТИ :)



Февраль 2022,
корпус 2, 2302



Глобальный вызов - новые потребности



Существующие технологии **не** обеспечивают потребностей цифрового развития человечества

От 5G к 6G – потребности и возможности

Приложения и сервисы

Сенсорика, HD+ видео, XR, робототехника, автономные системы, транспорт, индустрия, человеко-машинное взаимодействие, chip2chip, поддержка носимых устройств, медицина, смарт-контракты, блокчейн...

Тенденции развития беспроводных информационных систем

- Рост скоростей, снижение задержек, повышение надежности,
- рост спектральной эффективности, борьба за энергоэффективность,
- рост количества и концентрации узлов,
- большие данные / много «малых» данных,
- конвергенция технологий и сервисов сенсорики, позиционирования, управления, коммуникаций

Технологии

- мм и суб-ТГц, интеграция всех доступных диапазонов
- пространственно-временное кодирование
- от антенных решеток – к оркестрам приемопередатчиков и умным поверхностям
- интеграция наземных и аэрокосмических систем
- периферийные вычисления – периферийный ИИ

От 5G к 6G – потребности и возможности

- Smartphones and accessory-type devices



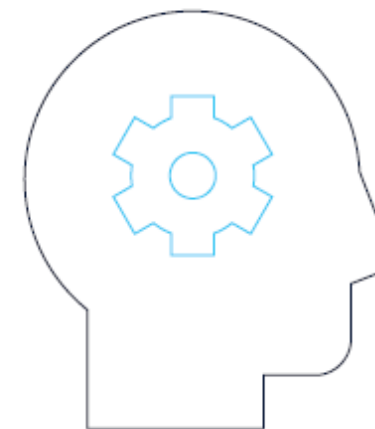
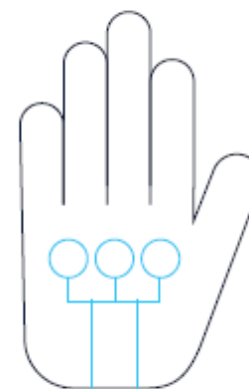
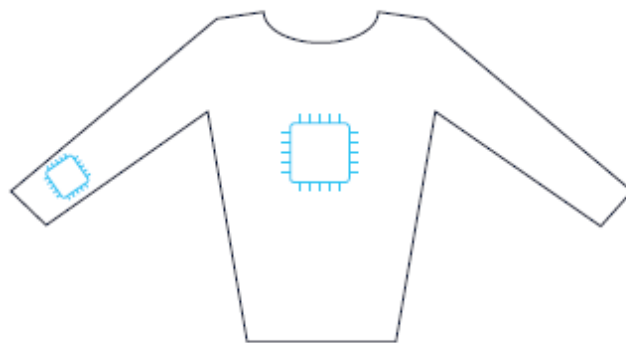
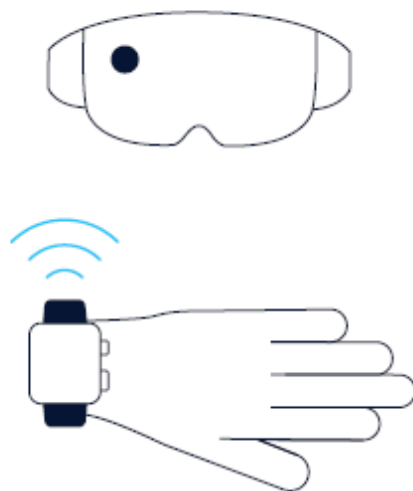
- Textile integrated
- Flexible/stretchable fabrics



- Skin-patchable devices



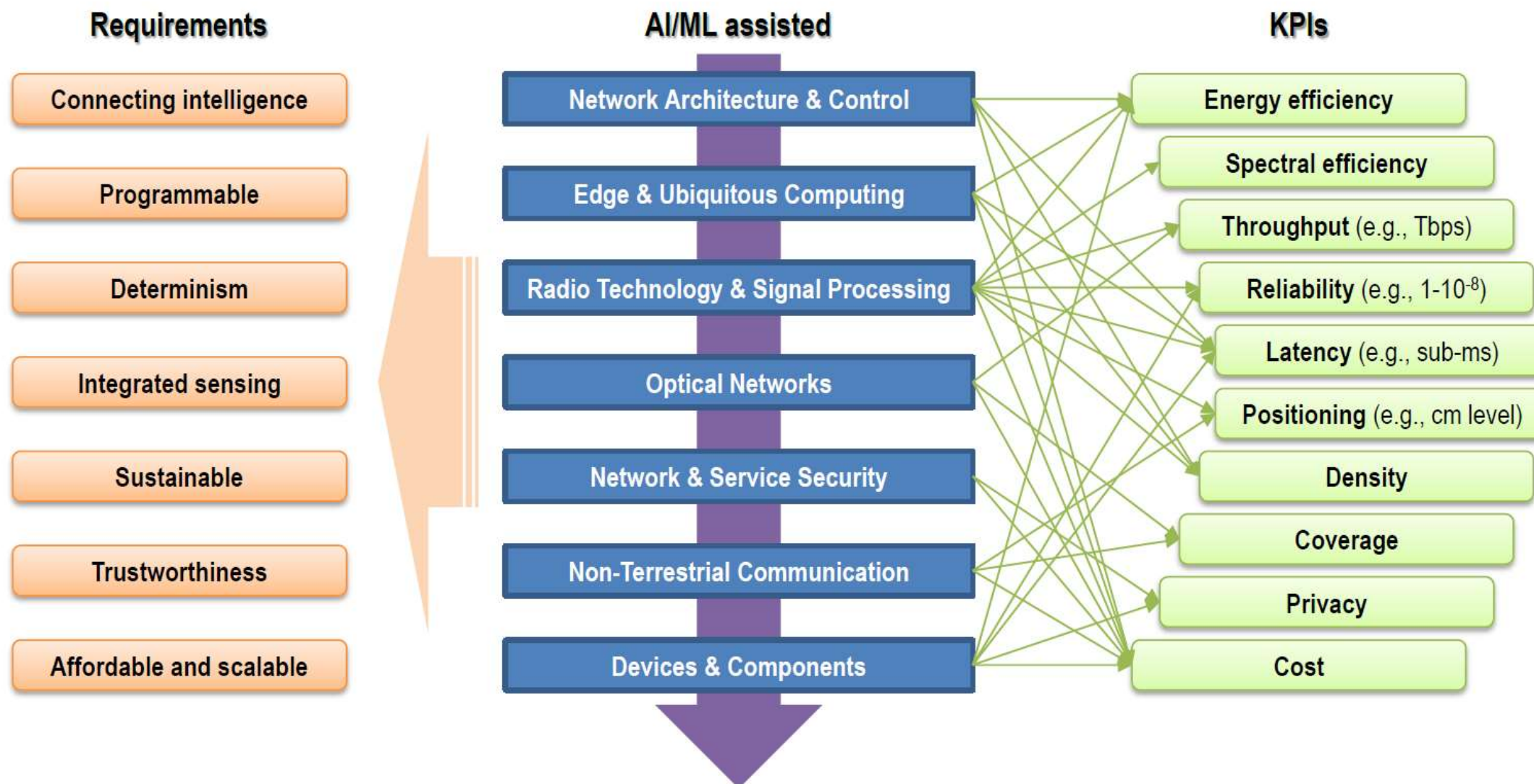
- Body-implantable
- Cyborg



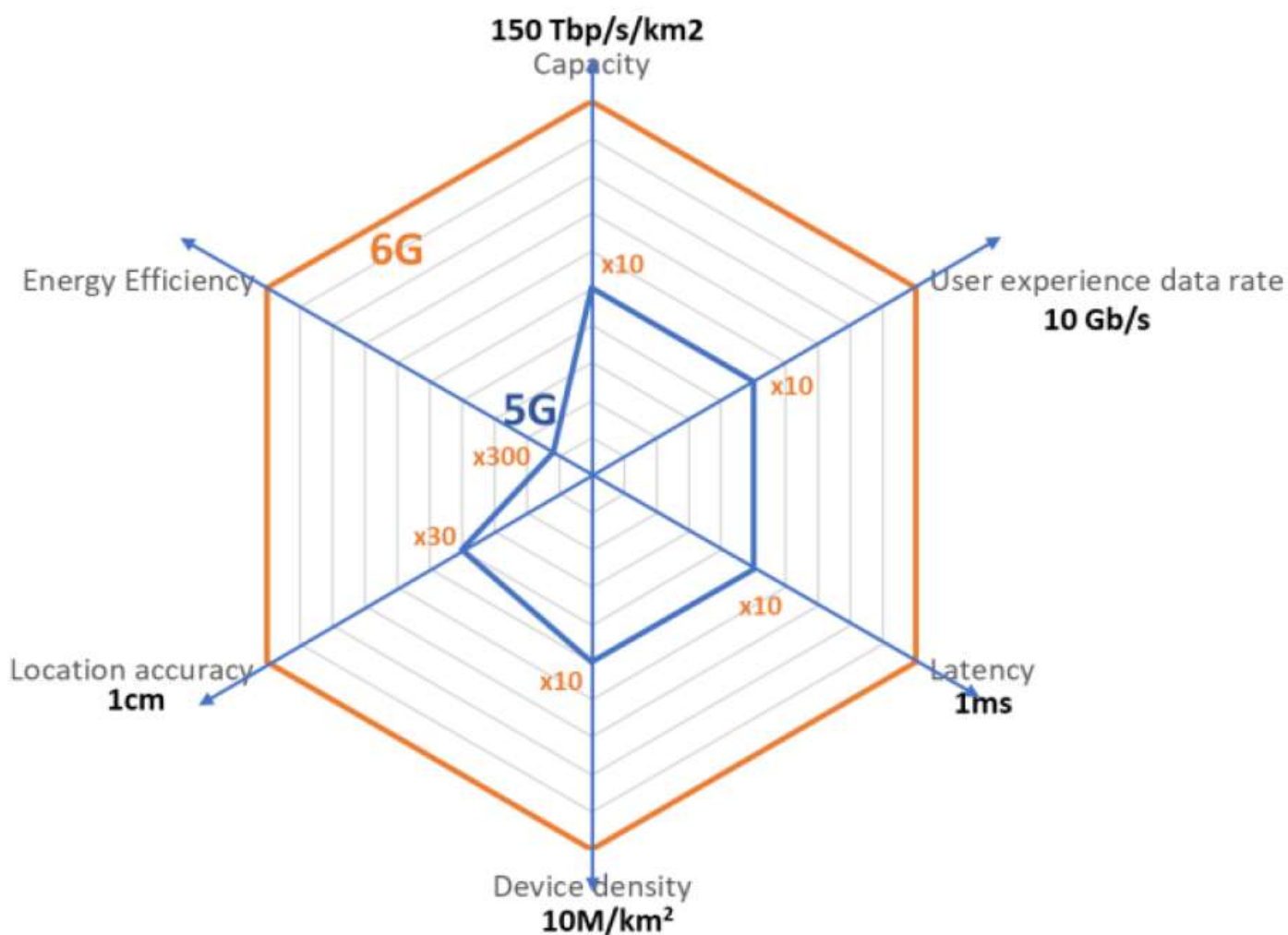
Effortless to use/control, invisible but everywhere

Источник – «Communications in the 6G era», **NOKIA** Bell Labs

От 5G к 6G – потребности и возможности



От 5G к 6G – ключевые показатели



Challenges	Potential 6G solutions	Open research topics
Stable service quality in coverage area	User-centric cell-free massive MIMO	Scalable synchronization, control, and resource allocation
Coverage improvements	Integration of a spaceborne layer, ultra-massive MIMO from tall towers, intelligent reflecting surfaces	Joint control of space and ground-based APs, real-time control of IRS
Extremely wide bandwidths	Sub-THz, VLC	Hardware development and mitigation of impairments
Reduced latency	Faster forward error correcting schemes, wider bandwidths	Efficient encoding and decoding algorithms
Efficient spectrum utilization	Ultra-massive MIMO, waveform adaptation, interference cancellation	Holographic radio, use-case-based waveforms, full-duplex, rate-splitting
Efficient backhaul infrastructure	Integrated access and backhauling	Dynamic resource allocation framework using space and frequency domains
Smart radio environment	Intelligent reflecting surfaces	Channel estimation, hardware development, remote control
Energy efficiency	Cell-free massive MIMO, suitable modulation techniques	Novel modulation methods with limited hardware complexity
Modeling or algorithmic deficiencies in complex and dynamic scenarios	ML-/AI-based model-free, data-driven learning and optimization techniques	End-to-end learning/joint optimization, unsupervised learning for radio resource management

От 5G к 6G – ключевые показатели

KPI	5G	6G
Peak data rate	20 Gb/s	1 Tb/s
Experienced data rate	0.1 Gb/s	1 Gb/s
Peak spectral efficiency	30 b/s/Hz	60 b/s/Hz
Experienced spectral efficiency	0.3 b/s/Hz	3 b/s/Hz
Maximum bandwidth	1 GHz	100 GHz
Area traffic capacity	10 Mb/s/m ²	1 Gb/s/m ²
Connection density	10 ⁶ devices/km ²	10 ⁷ devices/km ²
Energy efficiency	not specified	1 Tb/J
Latency	1 ms	100 μs
Reliability	1-10 ⁻⁵	1-10 ⁻⁹
Jitter	not specified	1 μs
Mobility	500 km/h	1000 km/h

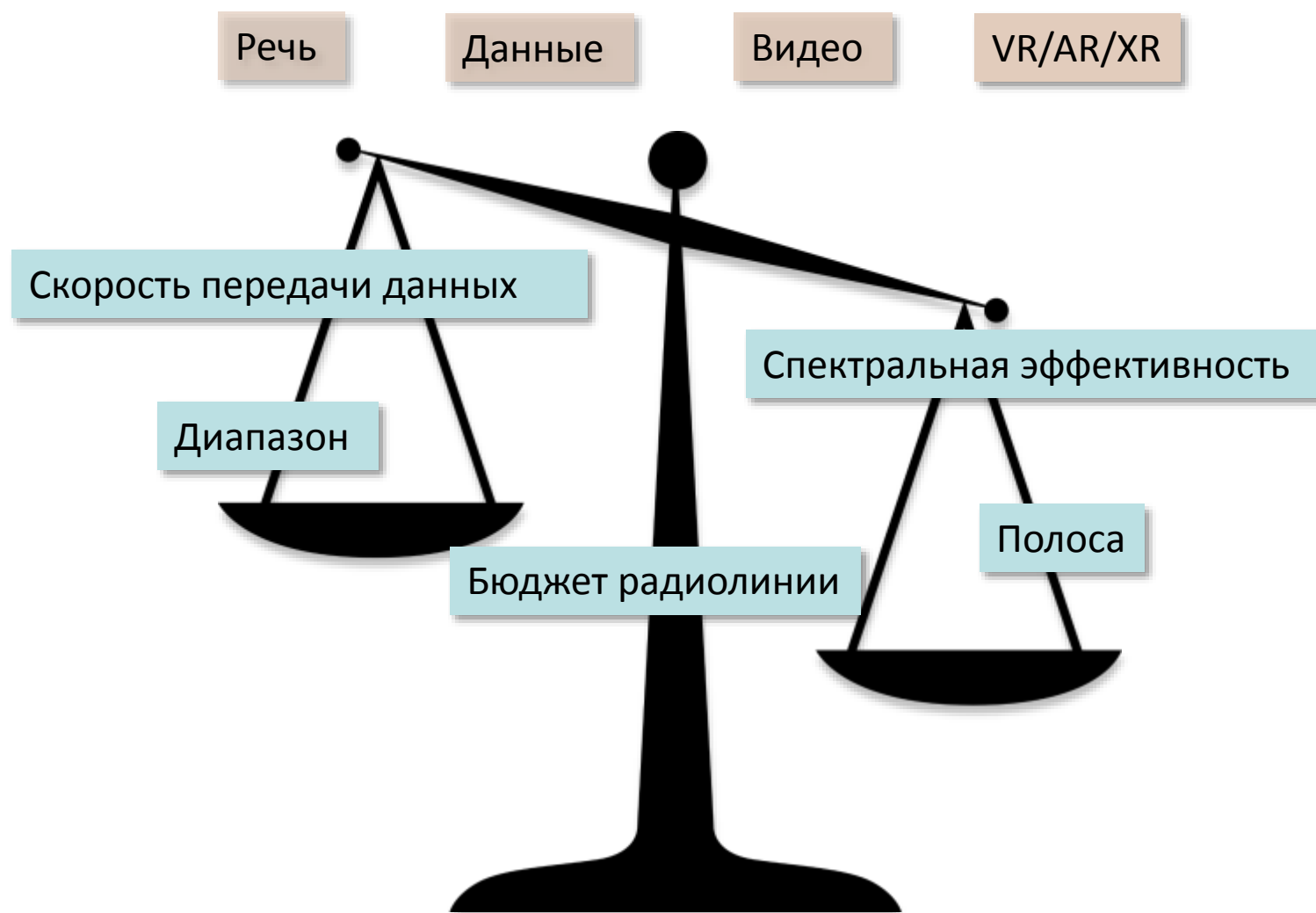
© 6G Flagship

От 5G к 6G – ключевые показатели

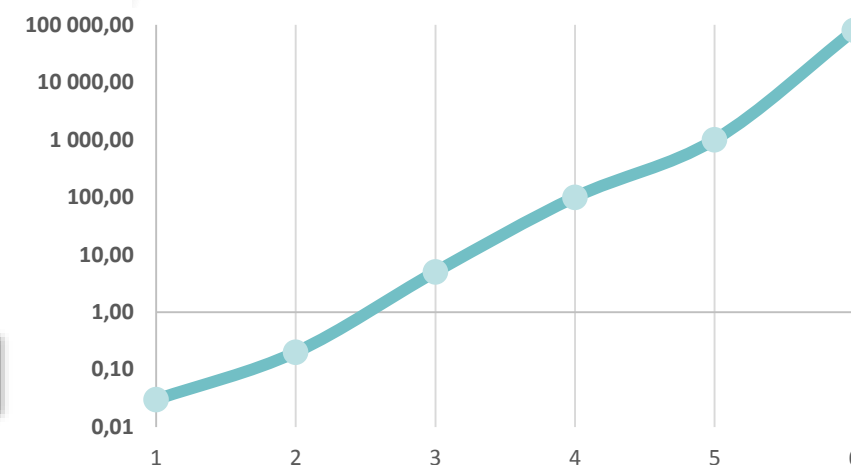
Table 1 Technical Performance Requirements of 6G Systems and a Comparison of the 6G KPIs Relative to Those for 5G and 4G Systems

KPI	4G	5G	6G
Operating Bandwidth	Up to 400 MHz (band dependent)	Up to 400 MHz for sub-6 GHz bands (band dependent) Up to 3.25 GHz for mmWave bands	Up to 400 MHz for sub-6 GHz bands Up to 3.25 GHz for mmWave bands Indicative value: 10-100 GHz for THz bands
Carrier Bandwidth	20 MHz	400 MHz	To be defined
Peak Data Rate	300 Mbps with 4×4 arrays 150 Mbps with 2×2 antenna arrays	20 Gbps	≥1 Tbps (Holographic, VR/AR, and tactile applications)
User Experience Rate	10 Mbps (shared over UEs)	100 Mbps	1 Gbps
Average Spectral Efficiency	25 Mbps with 2×2 antenna arrays 40-45 Mbps with 4×4 antenna arrays	7.8 bps/Hz (DL) and 5.4 bps/Hz (UL)	1× that of 5G
Connection Density	N/A	10 ⁶ devices/km ²	10 ⁷ devices/km ²
User Plane Latency	50 ms	4 ms (eMBB) and 1 ms (uRLLC)	25 μs to 1 ms (Holographic, VR/AR and tactile applications)
Control Plane Latency	50 ms	20 ms	20 ms
Mobility	350 km/h	500 km/h	1000 km/h Handling multiple moving platforms
Mobility Interruption Time	N/A	0 ms (uRLLC)	0 ms (Holographic, VR/AR and tactile applications)

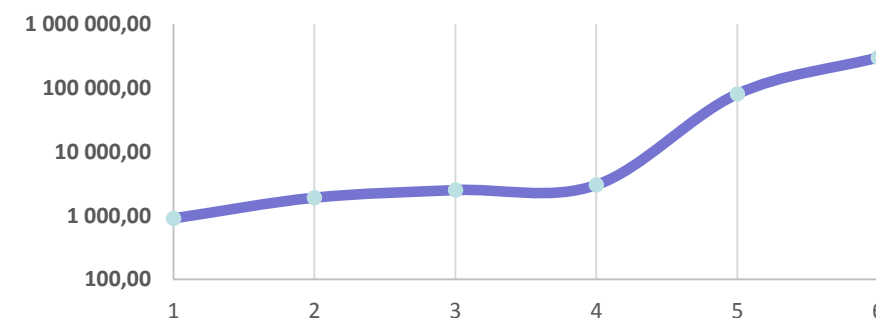
Проблемы радиоканала 6G



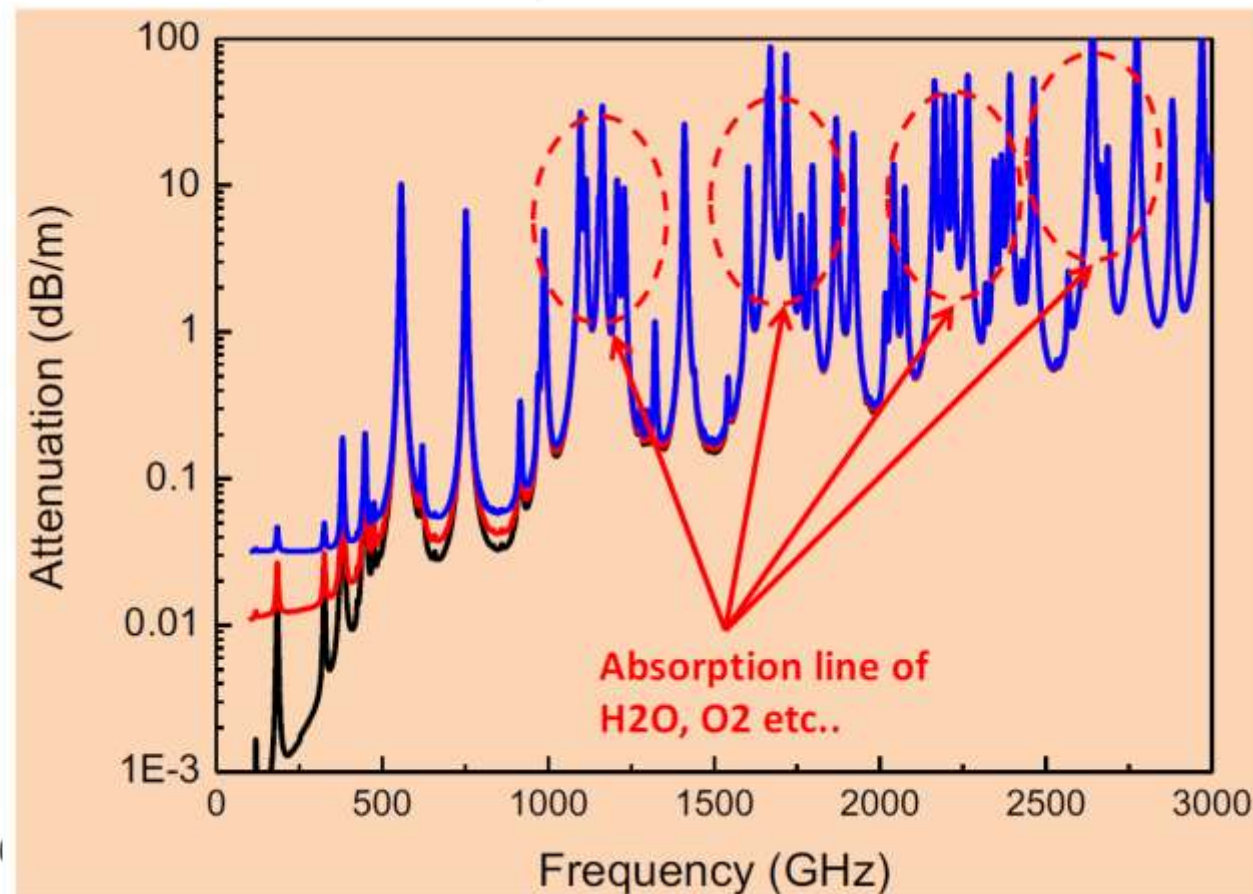
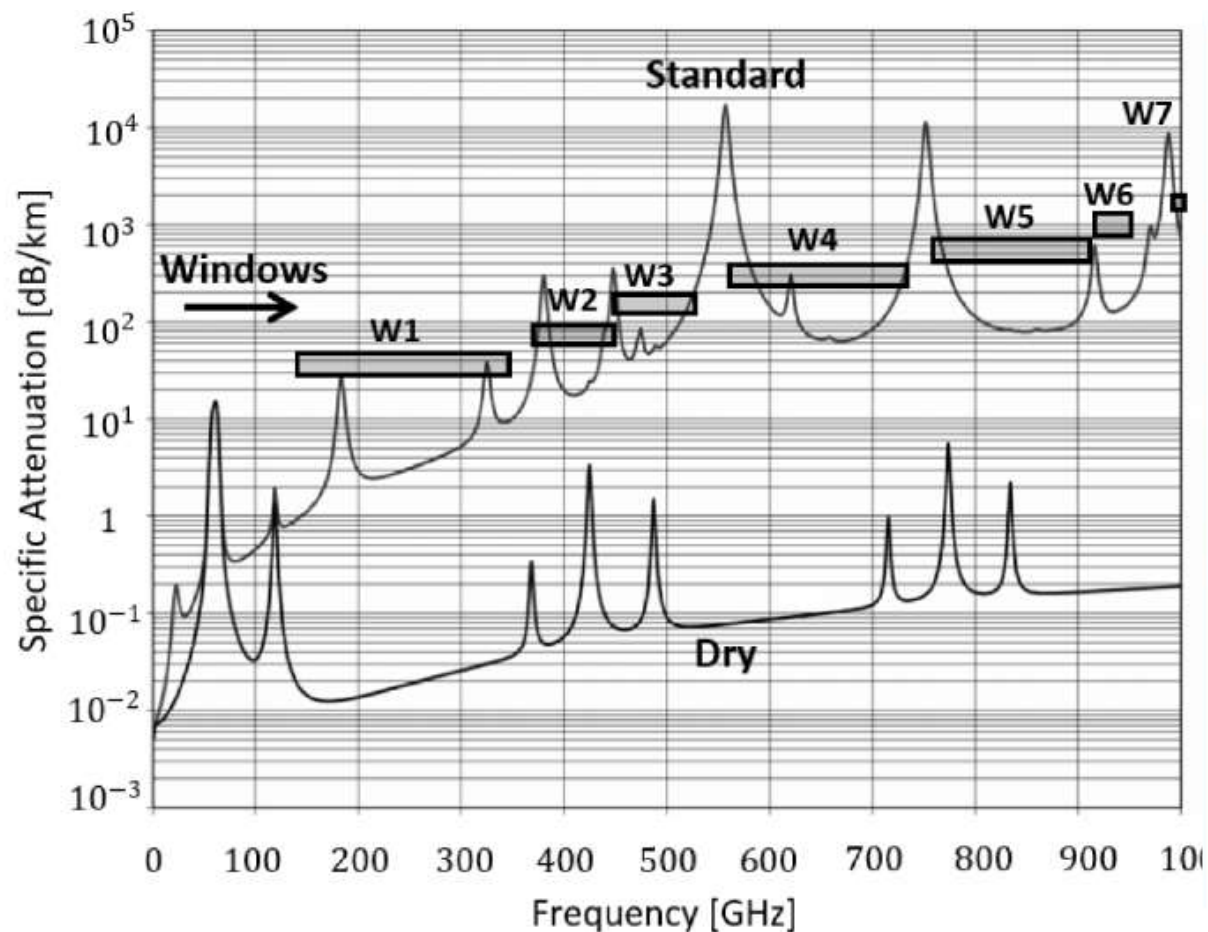
Полоса по поколениям, МГц



Рабочие частоты по поколениям, МГц



Затухание в атмосфере в sub-THz диапазоне

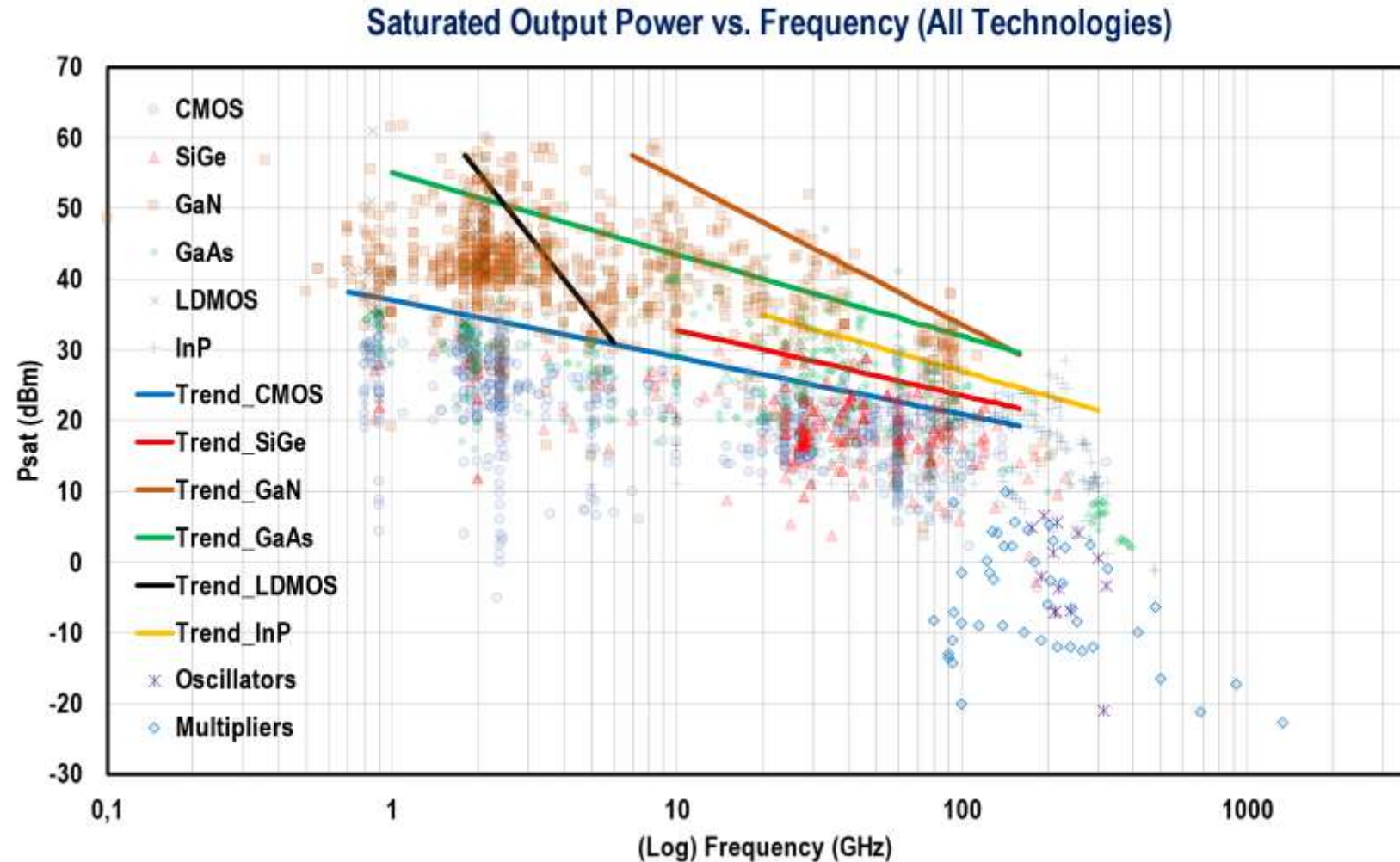


Окна прозрачности в sub-THz диапазоне

Table 2 Operating Windows in THz Bands. Free Space Loss Is Calculated at the Center Frequency of Each Window. Absorption Loss Is Obtained From Fig. 4 for “Standard” Atmospheric Conditions

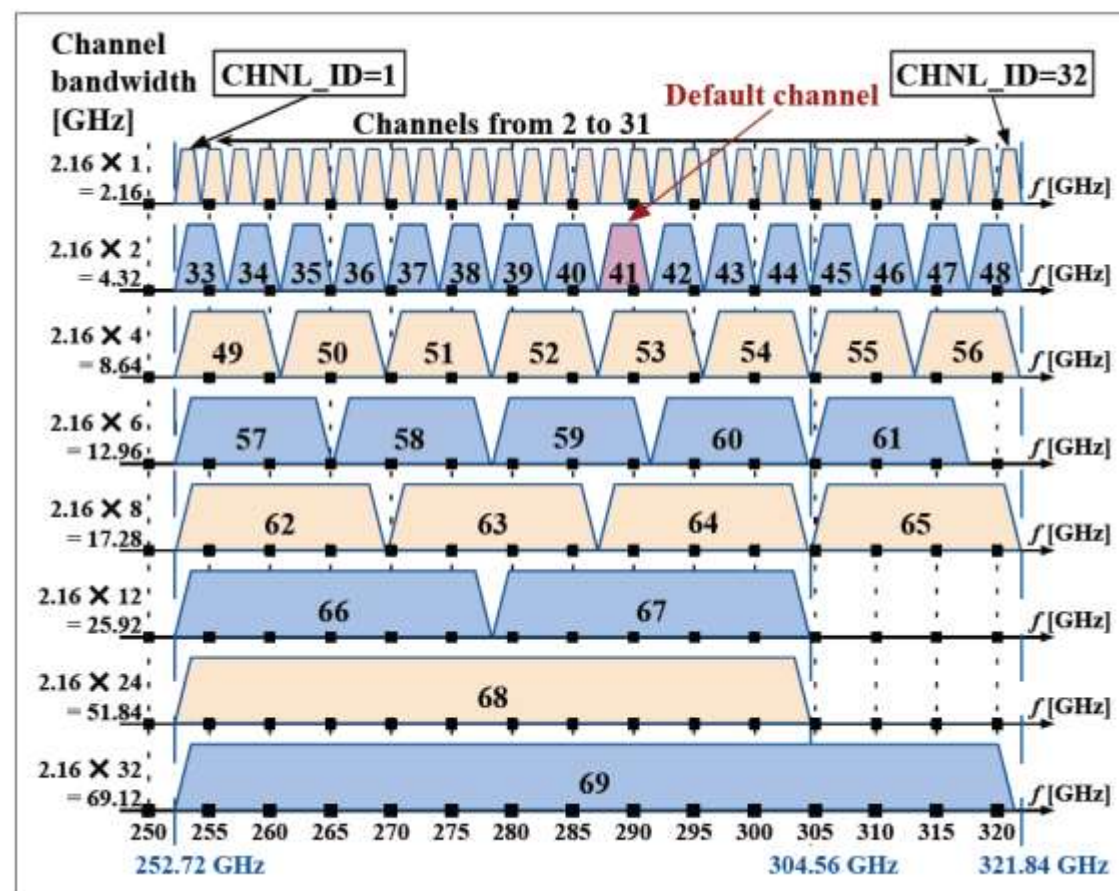
Window #	f_c [THz]	B_{3dB} [GHz]	Loss at 10 mm [dB]	Loss at 1 m [dB]	Loss at 100 m [dB]	Absorption Loss [dB/Km]
W1	0.245	210	60.18	80.18	120.18	3
W2	0.41	65.61	64.65	84.65	124.65	20
W3	0.49	86.21	66.2	86.2	126.2	40
W4	0.66	152.59	68.79	88.79	128.79	60
W5	0.84	141.91	70.88	90.88	130.88	80
W6	0.94	47.3	71.86	91.86	131.86	150
W7	1.03	57.98	72.65	92.65	132.65	–

Усилители мощности sub-THz диапазона

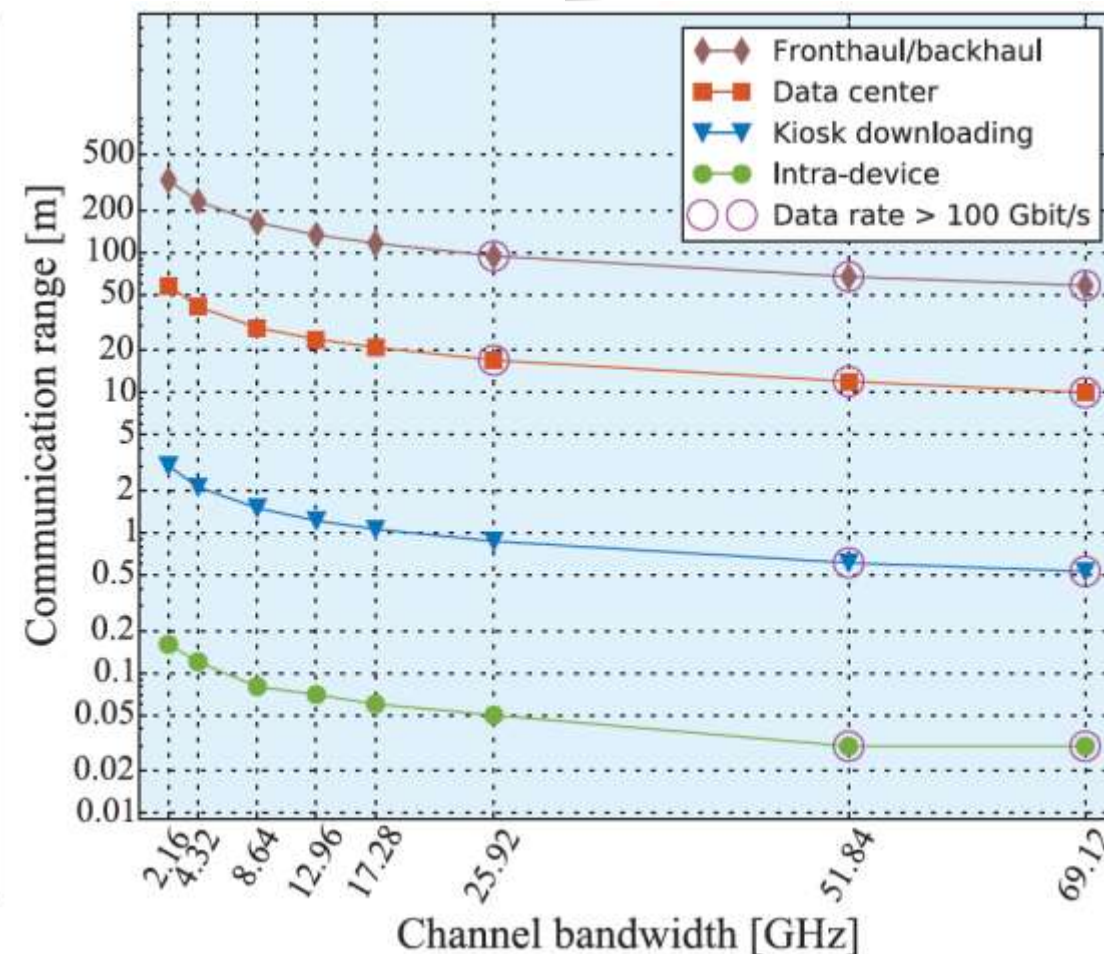


CMOS PAs	978
SiGe PAs	336
GaN PAs	1159
GaAs PAs	579
InP PAs	250
LDMOS PAs	90
Others	77
Multipliers	66
Oscillators	45
Products	233
Total	3813

IEEE 802.15.3d в диапазоне 300 ГГц



IEEE 802.15.3d channel plan

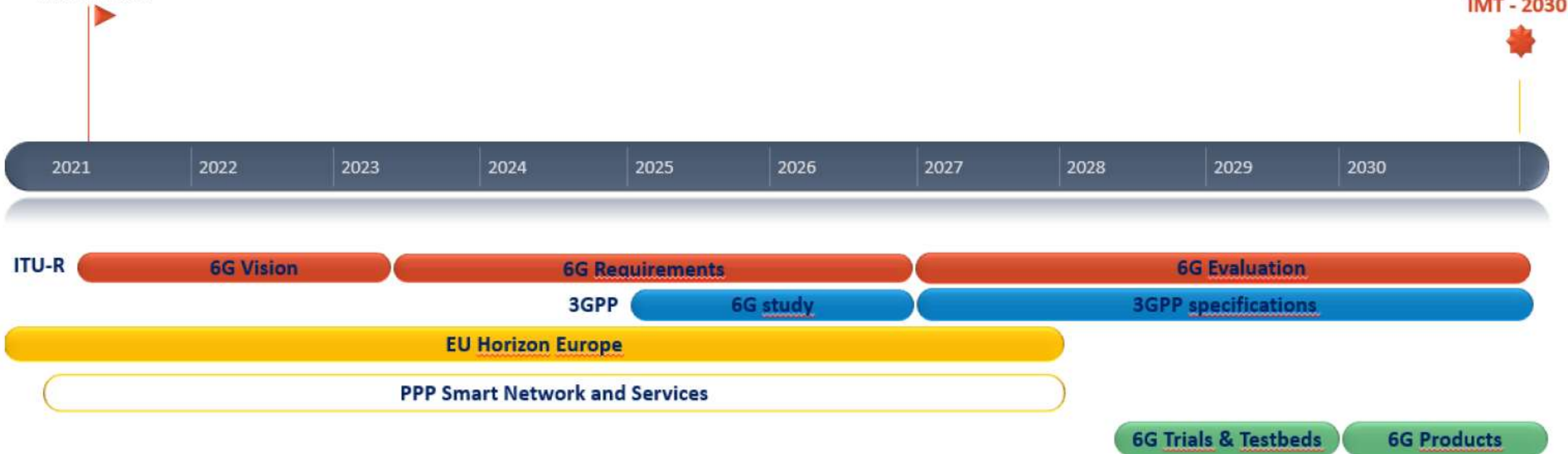


Дорожная карта 6G от 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP)

ITU-R 6G Vision Group

March 2021

IMT - 2030



European Vision for the 6G Ecosystem. 5GIA.
DOI: 10.5281/zenodo.5007671

Постановка всех вопросов должна учитывать –

Временные рамки – на горизонте 10 лет

Экономическую целесообразность, характерную для массового применения

- На какие мощности передатчиков можно рассчитывать на частотах >100 ГГц?
- На какой уровень шума приемных трактов можно рассчитывать на частотах >100 ГГц?
- Какие перспективные аппаратно-программные технологии надо рассматривать?
- Какова разумная масштабируемость и обратная совместимость решений?
- Какую роль могут играть радиофотонные технологии?
- Каковы могут быть перспективные технологии и материалы?

Задачи исследований

- Выбор полос частот >100 ГГц, распределение спектра 6G
- Мониторинг радиоспектра для адаптивного управления радиочастотным ресурсом
- Технологии управления радиочастотным ресурсом
- Модели каналов 6G от ГГц до ТГц
- Выбор пределов и сетки спектральной эффективности для разных сценариев
- Применимые спектрально-эффективные СКК
- Цифровые антенные решетки (конформные, разреженные) → «оркестры» трансиверов
- Умные/реконфигурируемые поверхности-рассеиватели
- От формирования диаграмм направленности – к управлению распределением поля в целевой области
- Ultra massive MIMO, extreme MIMO, cell-free massive MIMO
- Адаптивно настраиваемые ВЧ узлы, фильтры усилители, антенны (+ ИИ)
- Сосуществование средств связи, зондирования, локализации, визуализации обстановки в субТГц-диапазоне

Актуальные проблемы

Модуляция / кодирование / мультиплексирование

Пространственно-временное кодирование, MIMO, massive MIMO

Смарт-антенны, адаптивное формирование лучей

Спектральная эффективность

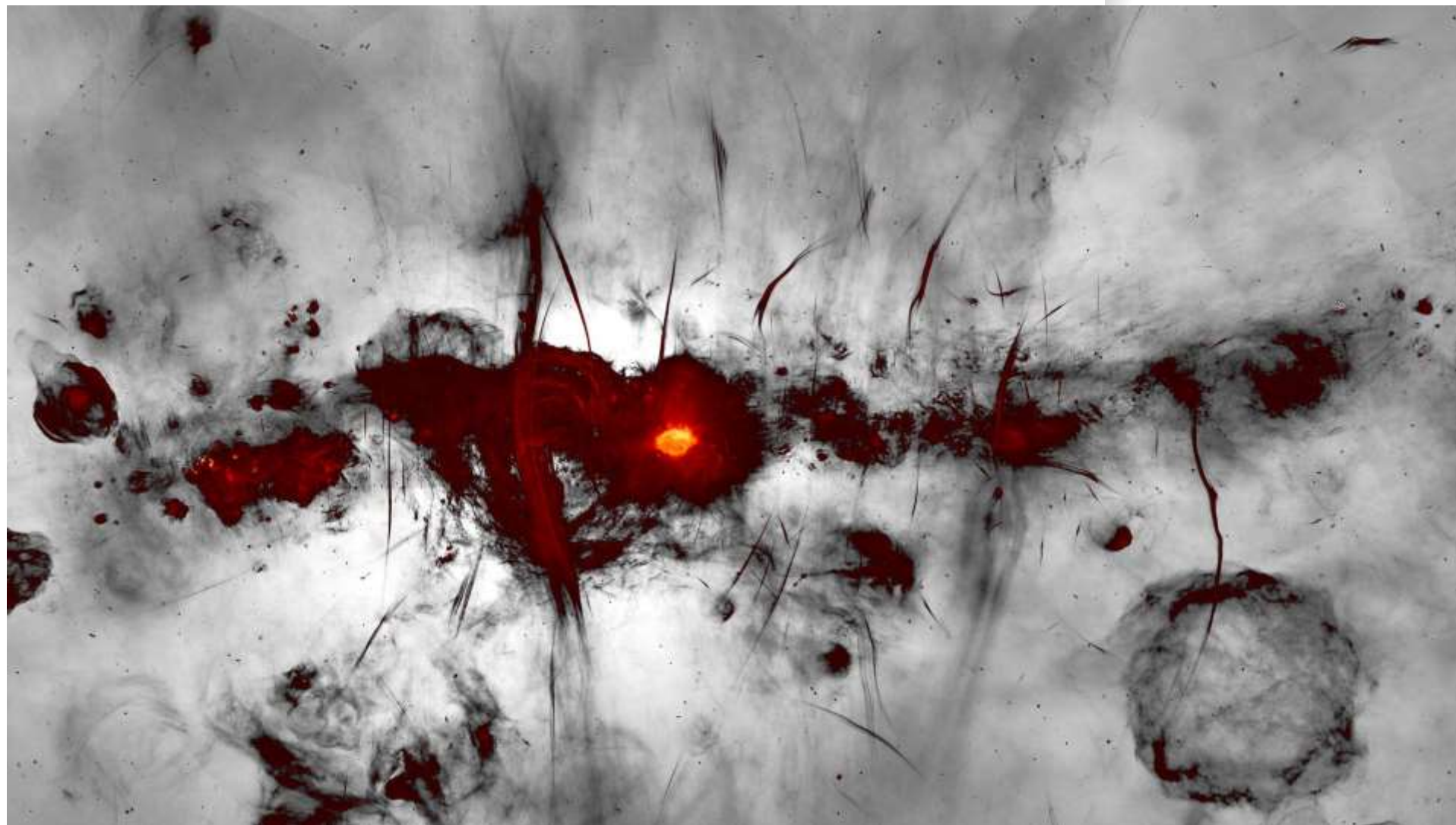
Коммутация пакетов vs. Коммутация каналов

Малые задержки, uRLLC

Эффективность стеков протоколов

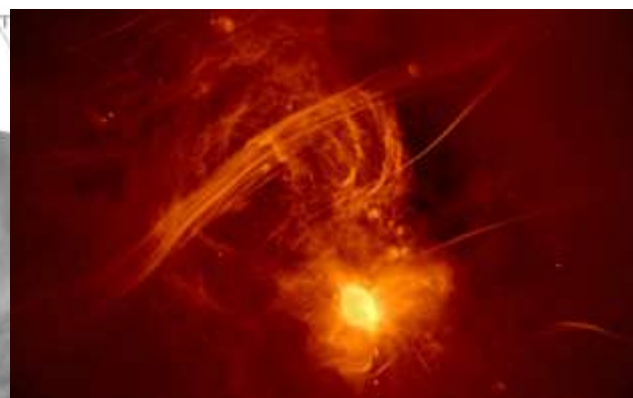
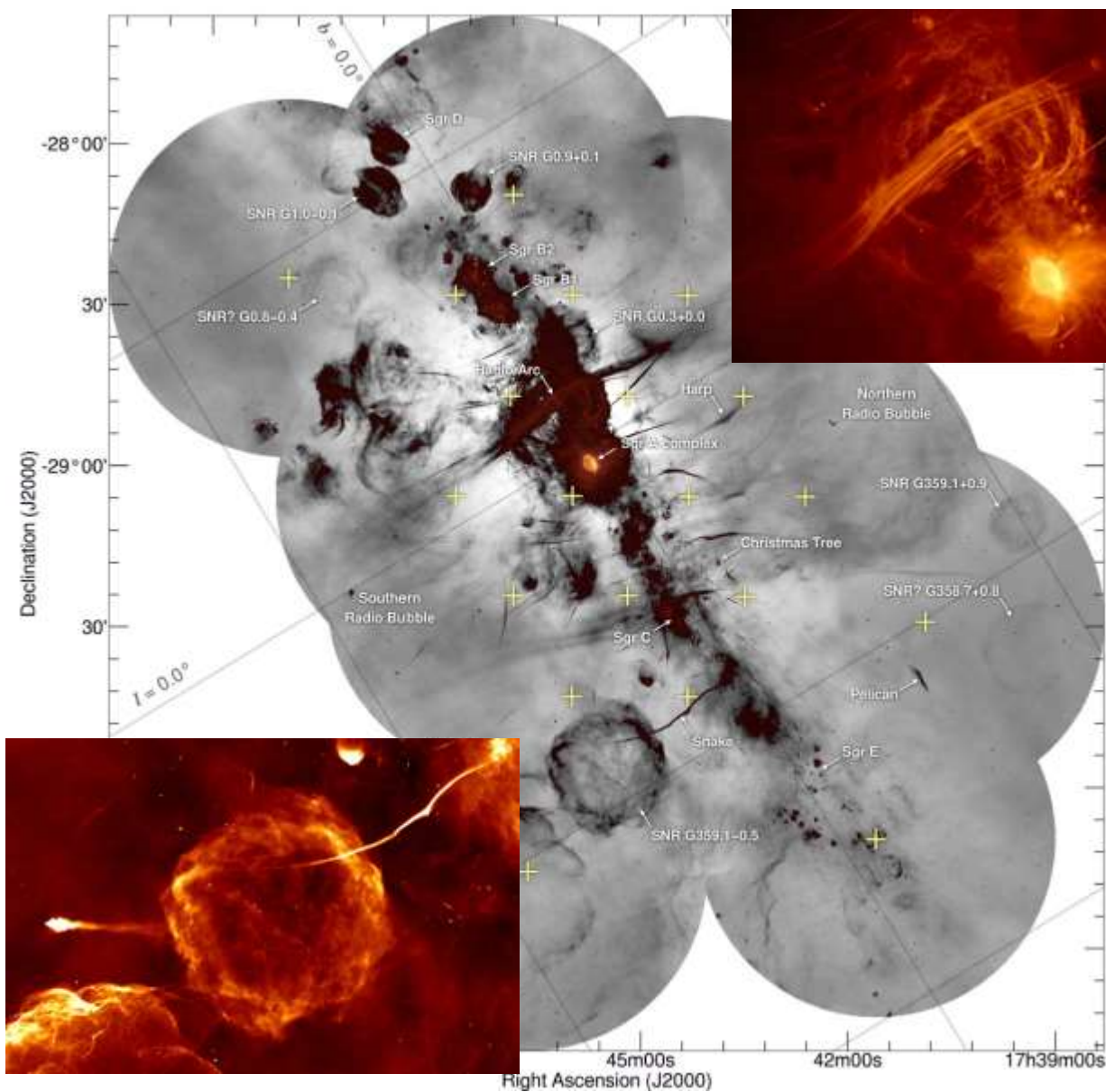
Информационная безопасность

Энергоэффективность - Green Wireless Networks

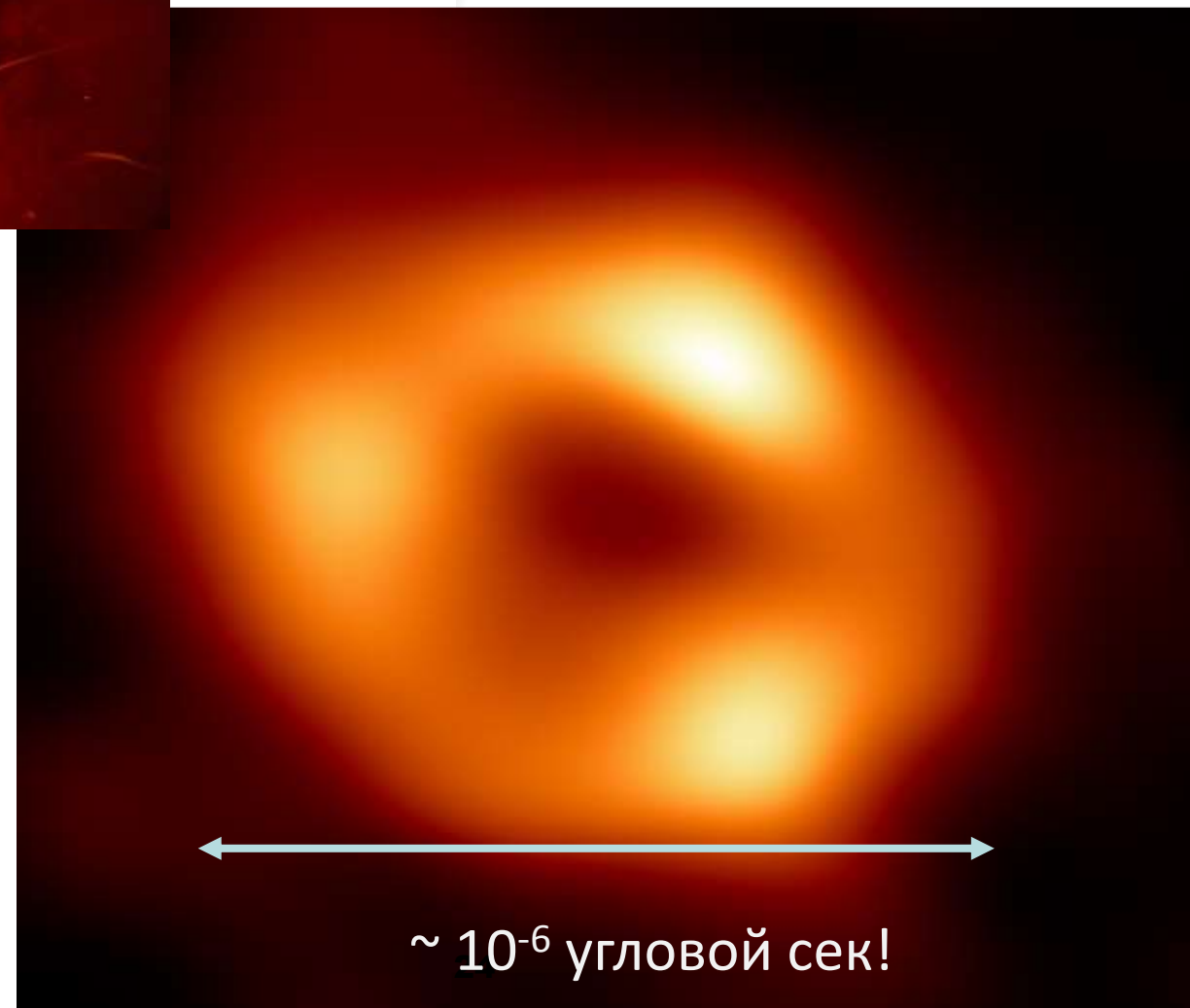


THE 1.28 GHz MEERKAT GALACTIC CENTER MOSAIC

7



Стрелец А* (лат. Sagittarius A*, Sgr A*)





Спасибо!

В.Н. Малышев vm@ieee.org