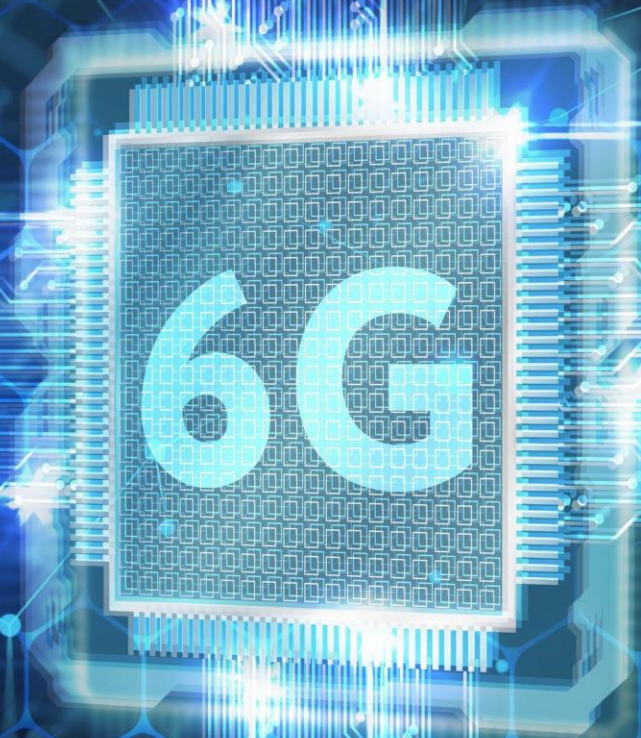


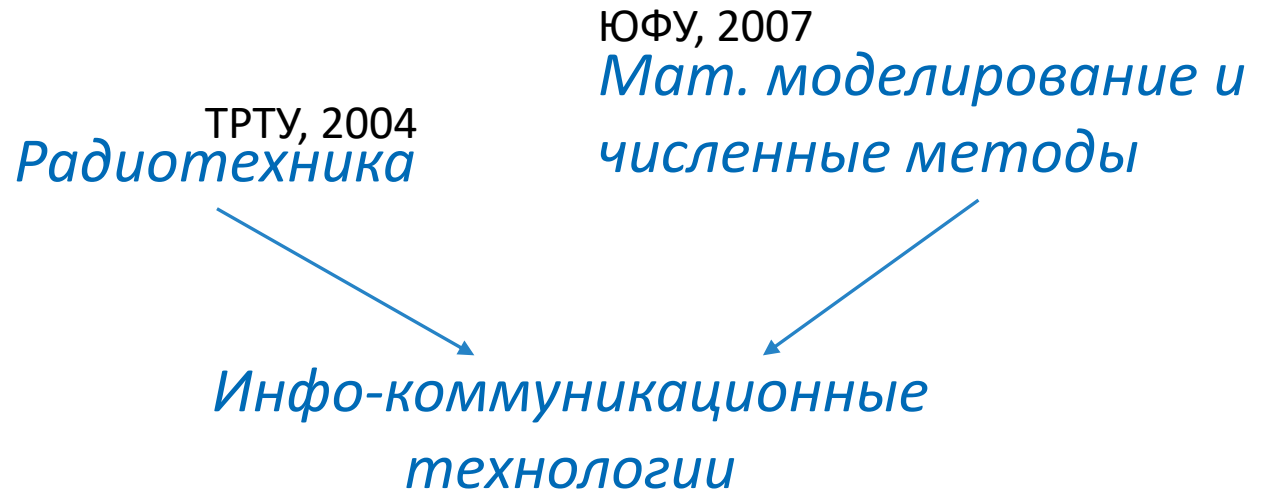
Московский Физико-Технический Институт (НИУ МФТИ)  
Московская лаборатория алгоритмов радиосвязи

# Перспективные технологии в



К.Т.Н. ЛЯШЕВ В.А.

## Владимир Александрович Ляшев



❖ *к.т.н., руководитель лаборатории алгоритмов радиосвязи, МФТИ*

<http://rtt-lab.ru>



# Аннотация

---

## Перспективные технологии беспроводной связи

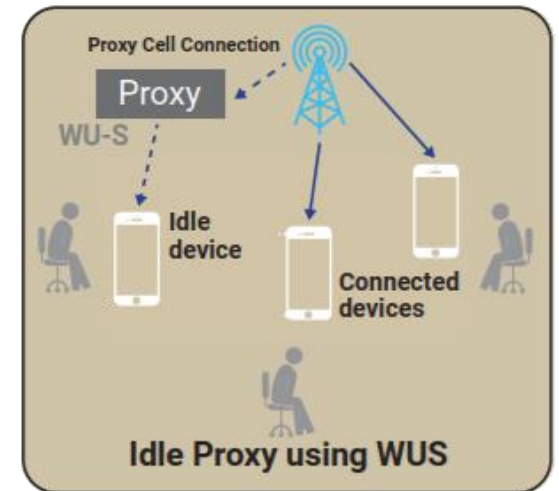
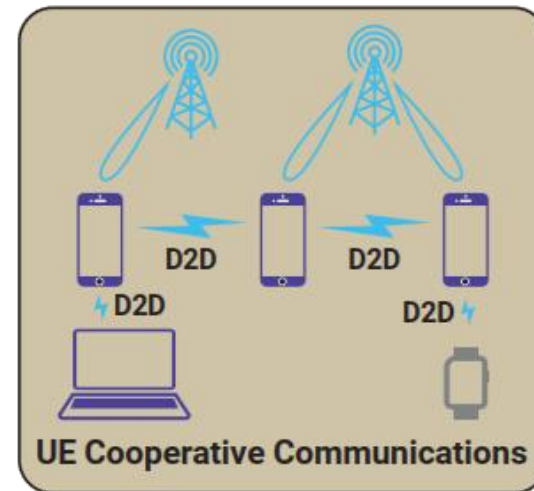
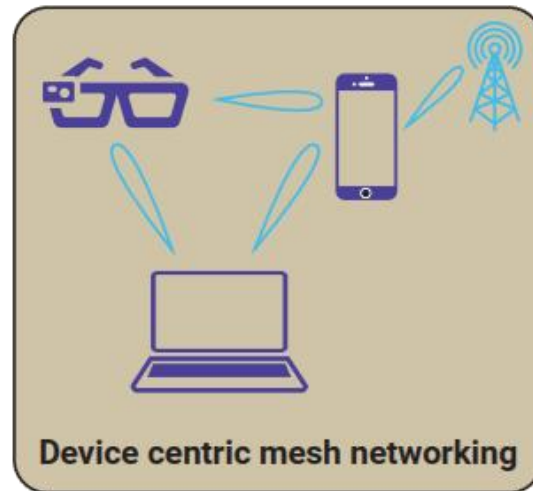
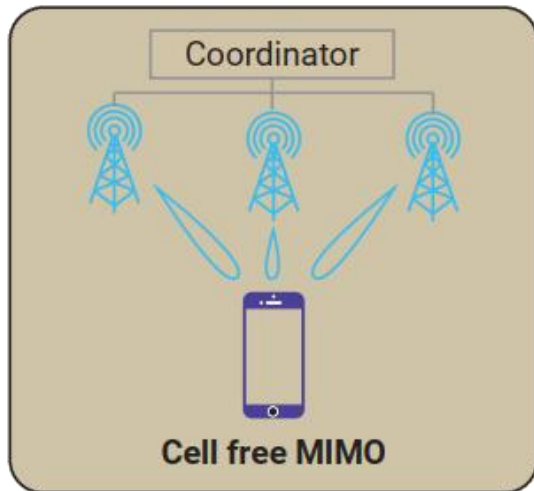
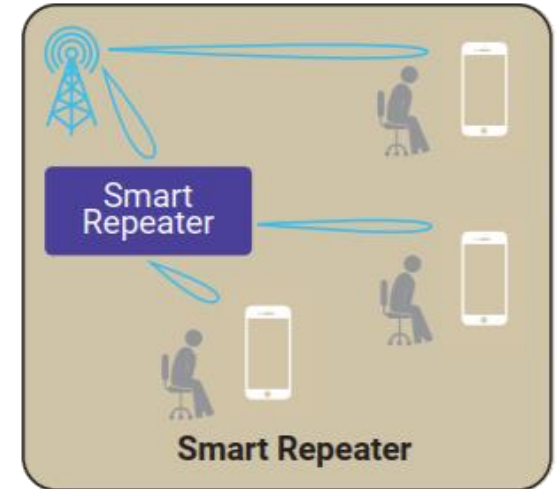
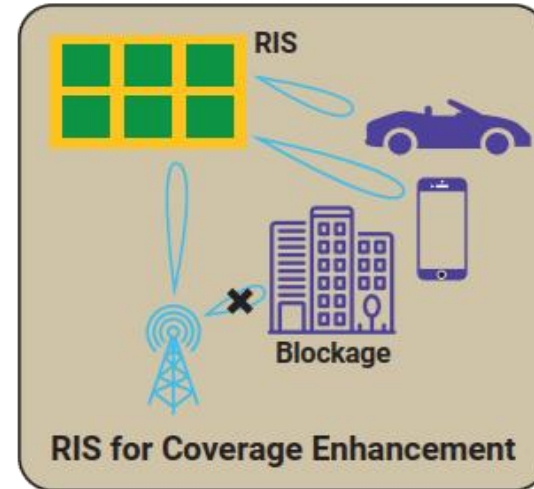
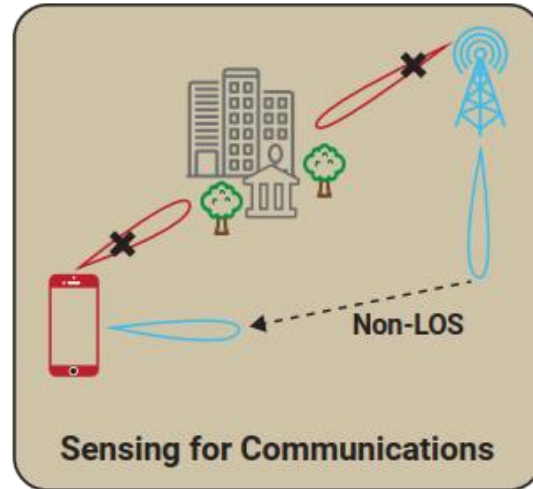
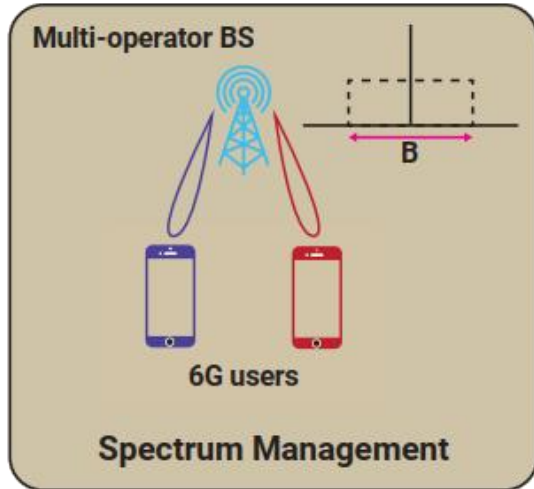
Современные технологии беспроводной связи представляют собой совокупность методов вычислительной математики, дискретной оптимизации, теории вероятностей и системного анализа! Конечно, основные принципы распространения радиоволн (радиофизика) и методы обработки сигналов (радиотехника) остаются неотъемлемой частью систем связи, но потребность обрабатывать многомерные сигналы заставляет постигать матричную алгебру и тензорные вычисления.

В лекции будут рассмотрены основные перспективные направления исследований, которые общепризнаны «горячими» темами для систем связи следующего поколения (6G), а также показан пример дальнейшего развития MIMO систем и проблем, которые необходимо решить в задачах пространственно-временной обработки сигналов.

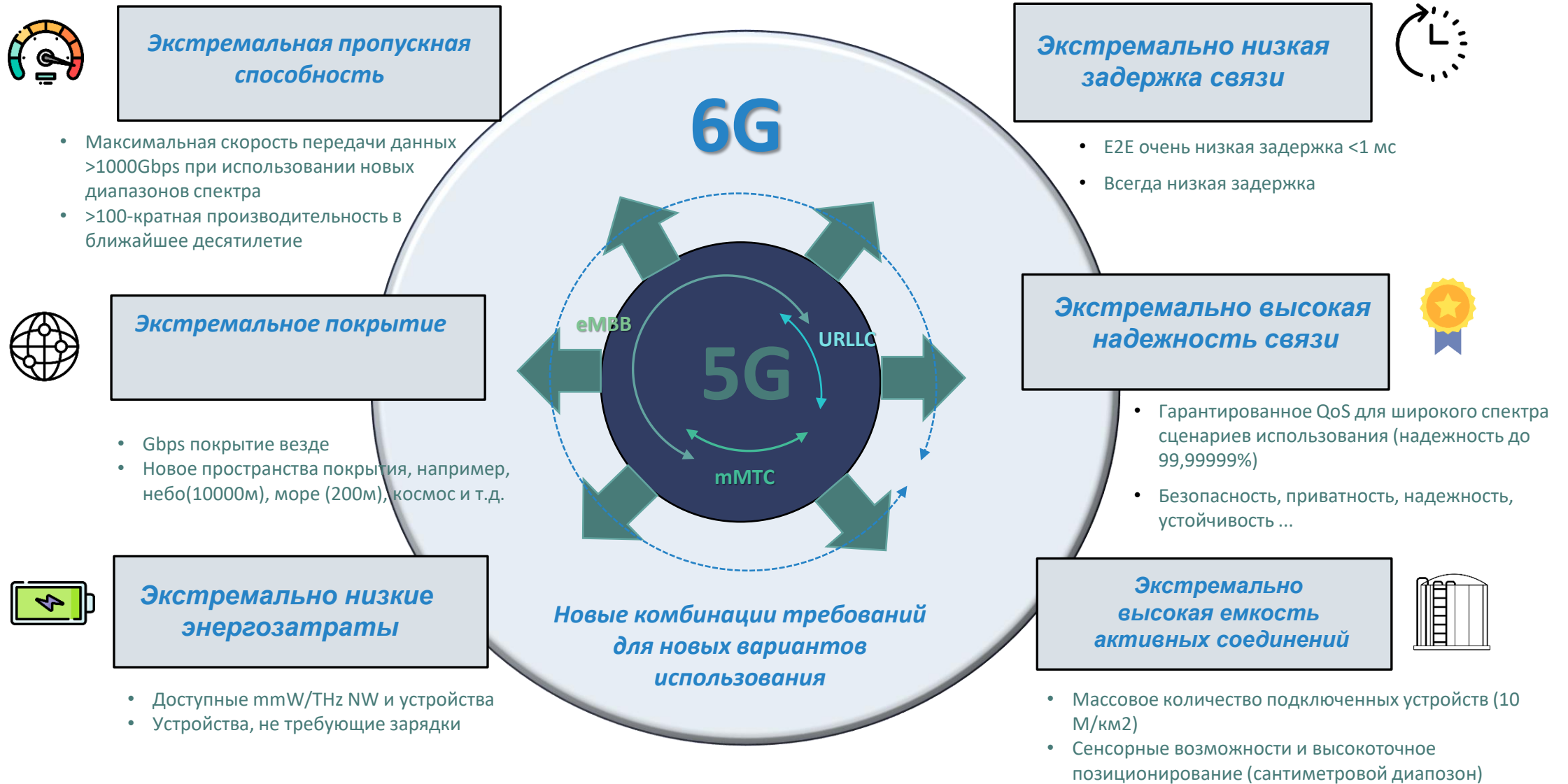


2G:	Сеть для голосовой связи	H2H
3G:	Сеть для видеотелефонии/email	B2B
4G:	Сеть для интернета	H2H
5G:	Сеть для вещей	B2B
6G:	Сеть для интеллектуальных систем	I2I

# Функционал, стимулирующий развитие 6G



# Основные требования к 6G

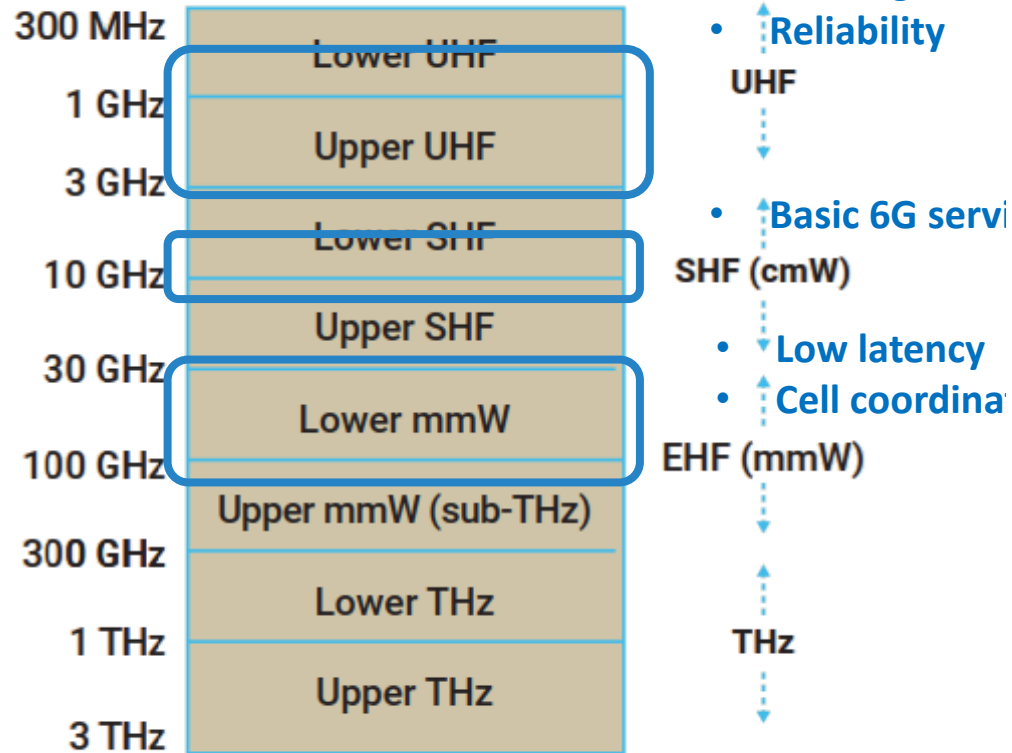


# Растущие потребности в передаче данных

Wide Area Coverage



High Data Rate

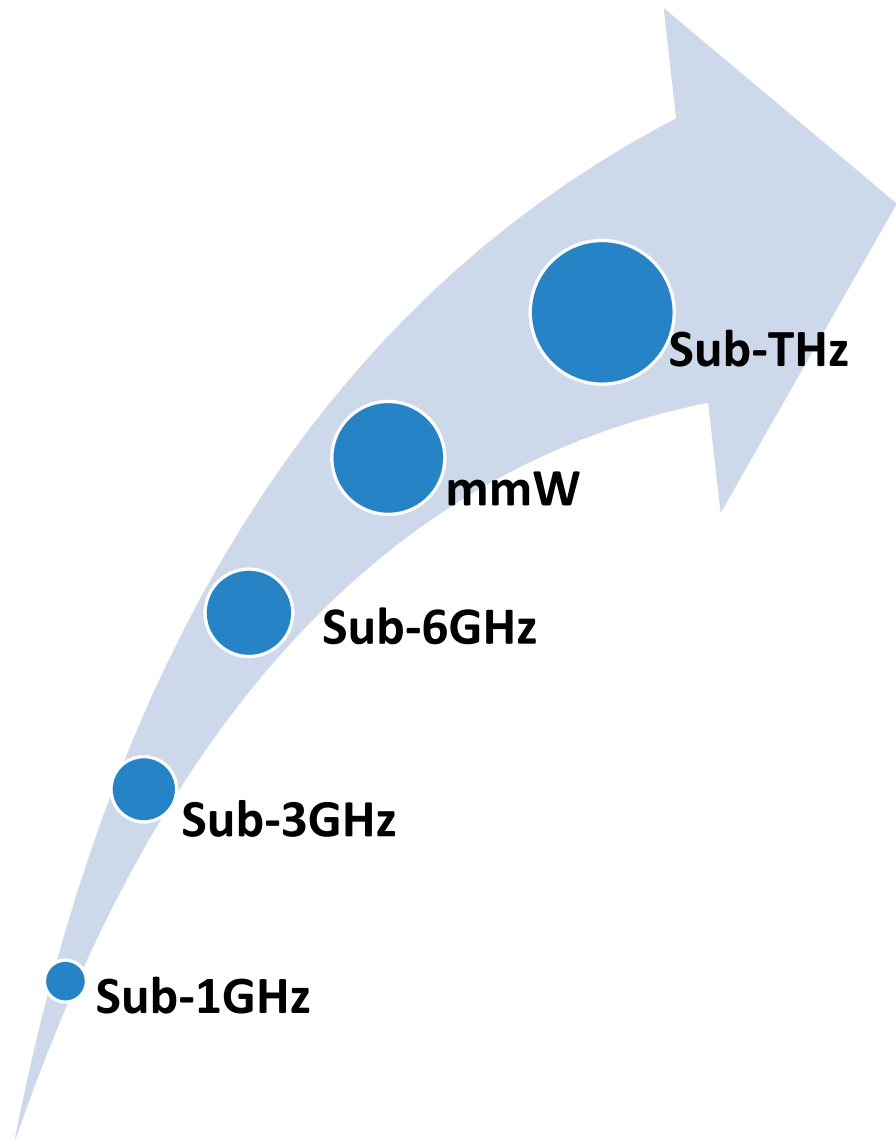


## Example

Video Communication Type	Bandwidth Requirement
HD	1-5Mbps
4K 360°	15-25Mbps
16K 360°	100-500Mbps
Point Cloud Holograms	0.5-2Gbps
Light Field Holograms	~ 1Tbps



# Эволюция беспроводных технологий

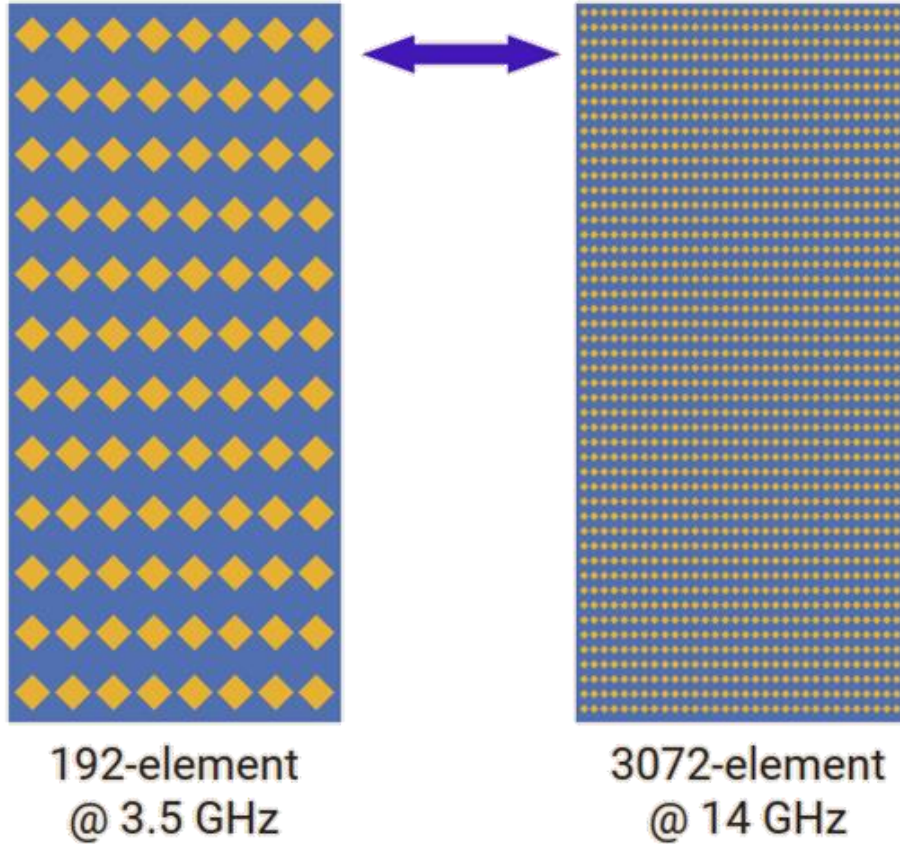


- Быстрый и низкочатратный способ управления пространственными лучами (Beam Management)
- Бесшовная подвижная связь (Seamless mobility = no handover costs)
- Улучшение топологии плотных сетей беспроводной связи
- Энергетическая эффективность
- Один дизайн для mmW and sub-THz диапазонов
- Обеспечение покрытия восходящего канала
- Развитие протоколов взаимодействия устройств без координатора
- Управление интерференцией в сетях связи
- Робастные (устойчивые к ошибкам) протоколы связи
- Позиционирование и радиометрия в сетях связи



# Технология MIMO

Same Aperture!



В 3-4 раза более короткая длина волны в сравнении с 3.5-4.9 ГГц диапазоном (C-band)

- Возможность разместить больше антенн при той же апертуре

Полоса в 1 ГГц  
Меньший фазовый шум и более высокая эффективность усилителя мощности в сравнении с 28ГГц

- Покрытие: расширение зоны покрытия и проникновение волн O2I
- Емкость: в 10 раз больше C-band
- Радиометрия и позиционирование: высокая разрешающая способность по времени и по углам

Цифровая ДН

Гибридная ДН

4TRx

8TRx

32TRx

64TRx

256TRx

...

Тысячи антенн

# Открытые вопросы построения MIMO систем

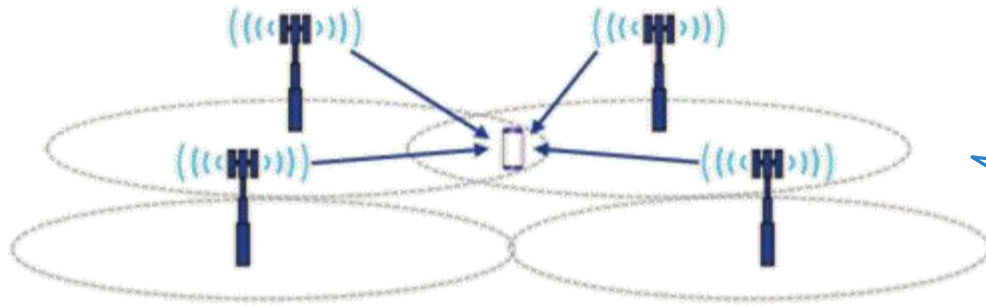
Основные проблемы включают в себя функционал управления лучом для обеспечения мобильности при гораздо более узком луче, гораздо более короткое время переключения луча, отслеживание луча, определение состояния канала, аппаратные недостатки при экономически эффективной реализации и энергоэффективность / энергопотребление для очень большого количества антенн.

Чтобы решить эти проблемы и раскрыть потенциал такого M-MIMO, необходимо изучить несколько тем для дальнейшего применения:

- ❑ **Методы ДН-образования** как в ближнем, так и в дальнем поле;
- ❑ Масштабируемая архитектура формирования луча и **сбора информации о состоянии канала (CSI)**;
- ❑ **Моделирование канала** методами линейной алгебры;
- ❑ Антенные решетки с неравномерным расстоянием между элементами;
- ❑ Методы ДН-образования, которые являются устойчивыми в сценариях с умеренной и/или высокой скоростью;
- ❑ Улучшение соотношения производительности, сложности и потребляемой мощности;
- ❑ Энергоэффективная конструкция для увеличения количества антенн (СВЧ дизайн)

# Бесшовные система связи на основе распределенных MIMO

## Massively Distributed MIMO

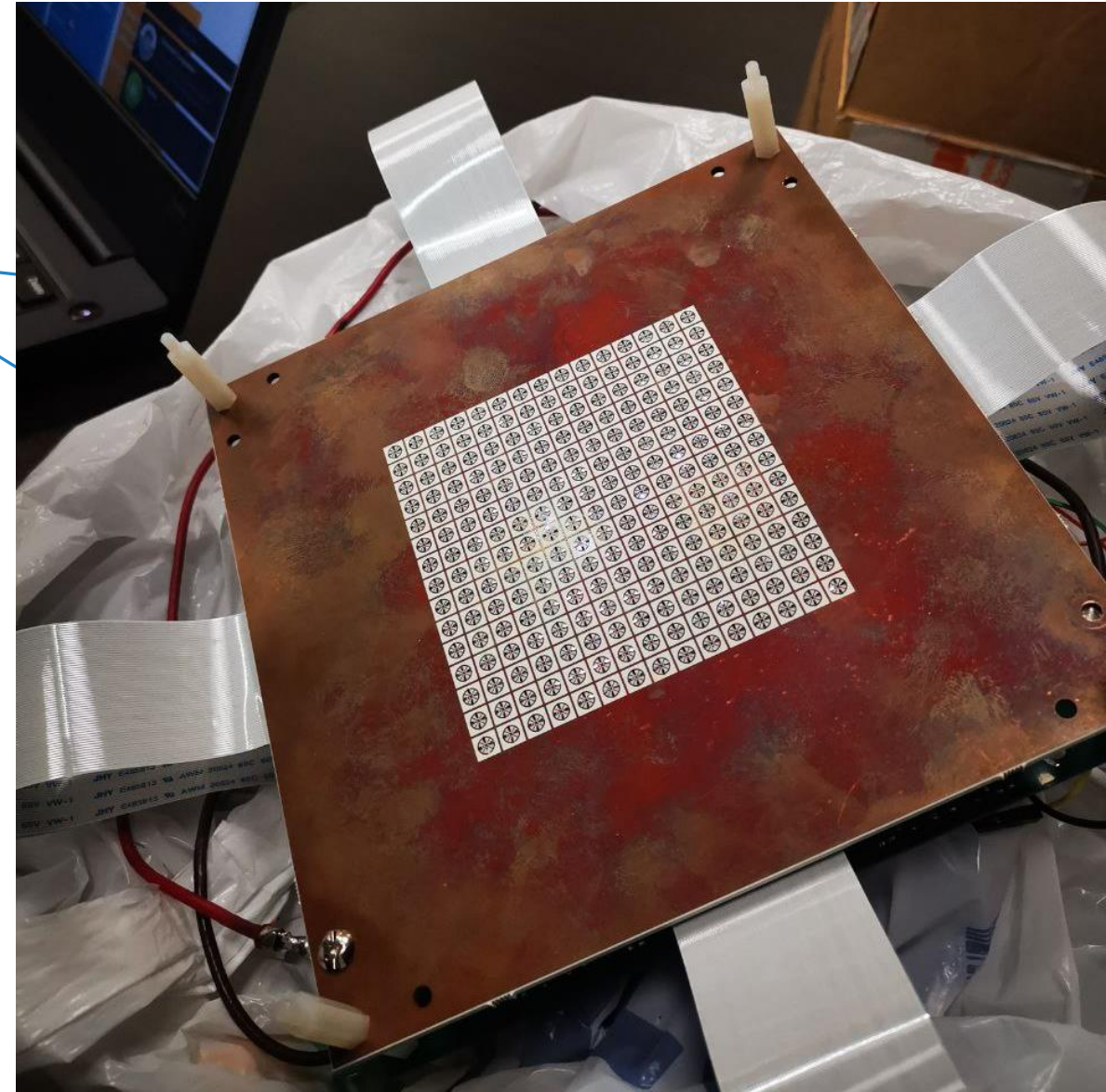


### Преимущества

- ❖ Возможность координации потоков данных и интерференции
- ❖ Исключение блокировки сигнала и улучшение надежности покрытия
- ❖ Единственная возможность более широкого применения mmW и sub-THz частот

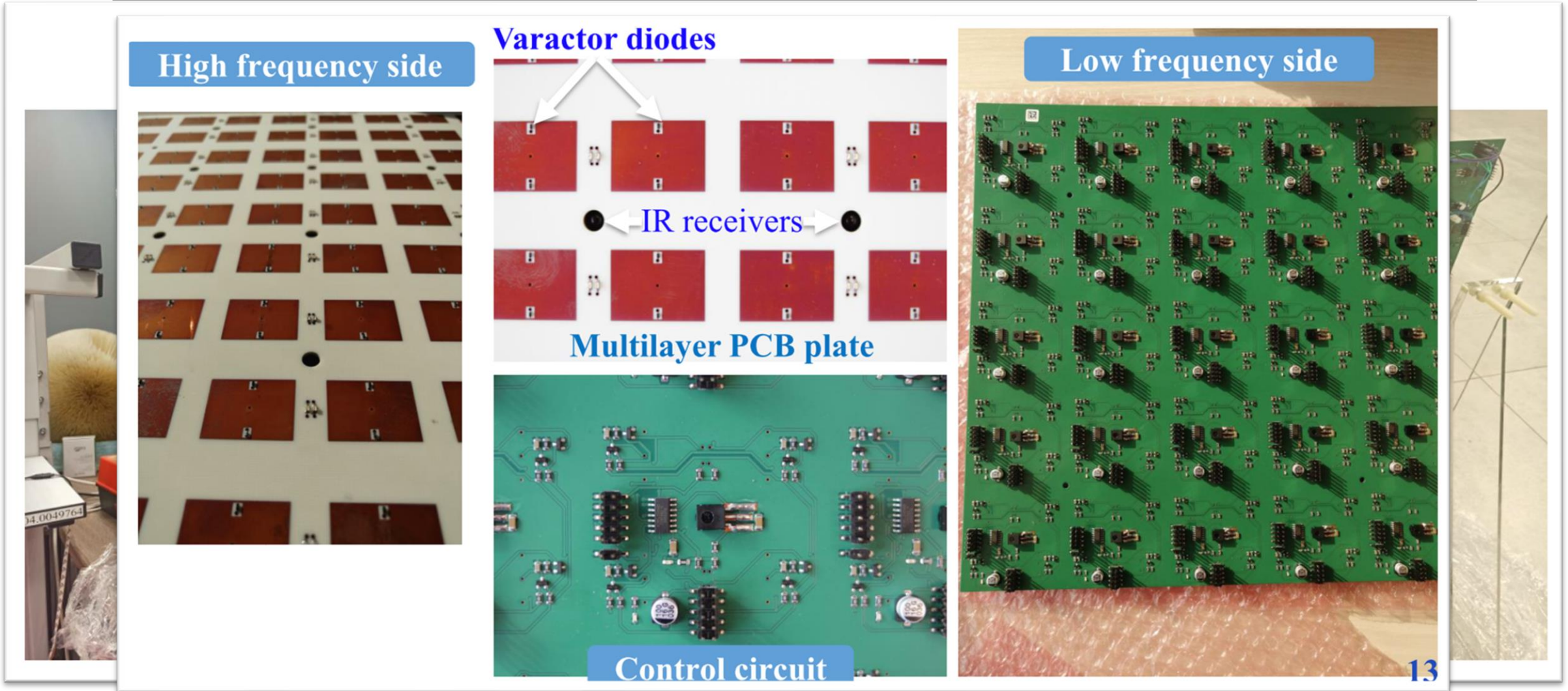
### Сложности

- ❖ Оценка канала (эффект «загрязненных» пилотов)
- ❖ Методы координации (перегрузка сетей поддержки и задержки)
- ❖ Синхронизация и фазовые шумы



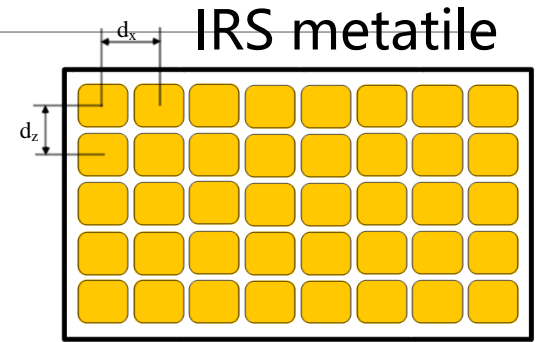
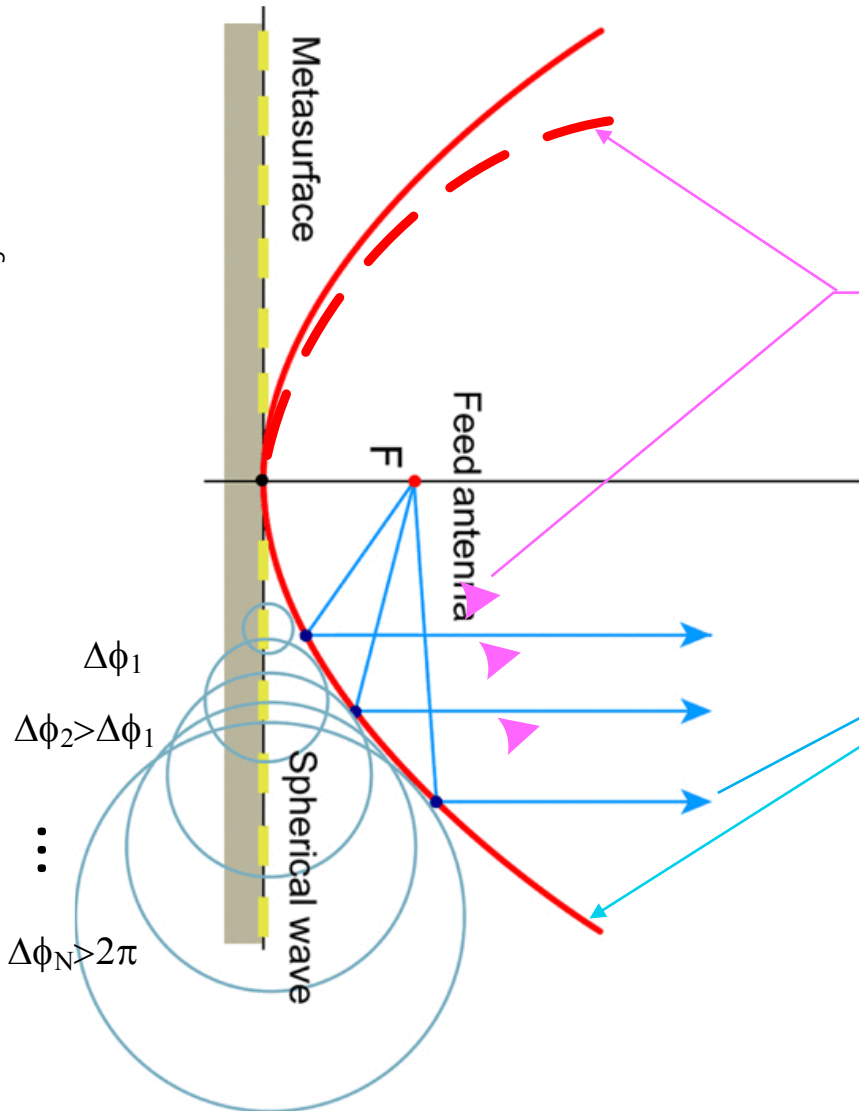
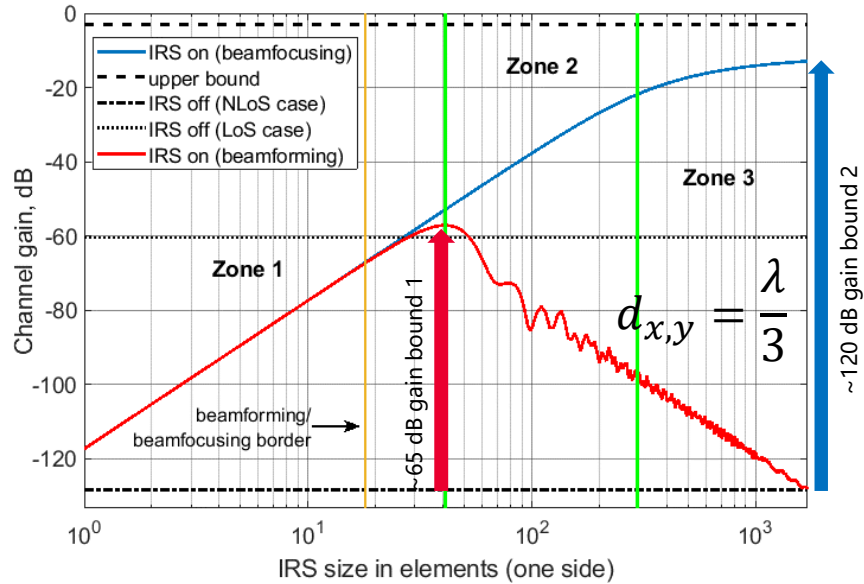


# @MetaDemo – прототип (совместно с ИТМО)



A. Sayanskiy, A. Belov, R. Yafasov, A. Lyulyakin, A. Sherstobitov, S. Glybovski, V. Lyashev, 2D-Programmable and Scalable Reconfigurable Intelligent Surface Remotely Controlled via Digital Infrared Code // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 71, no. 1, pp. 570-580, Jan. 2023, doi: 10.1109/TAP.2022.3217327. [Q1]

# Requirements and limitation on the IRS application



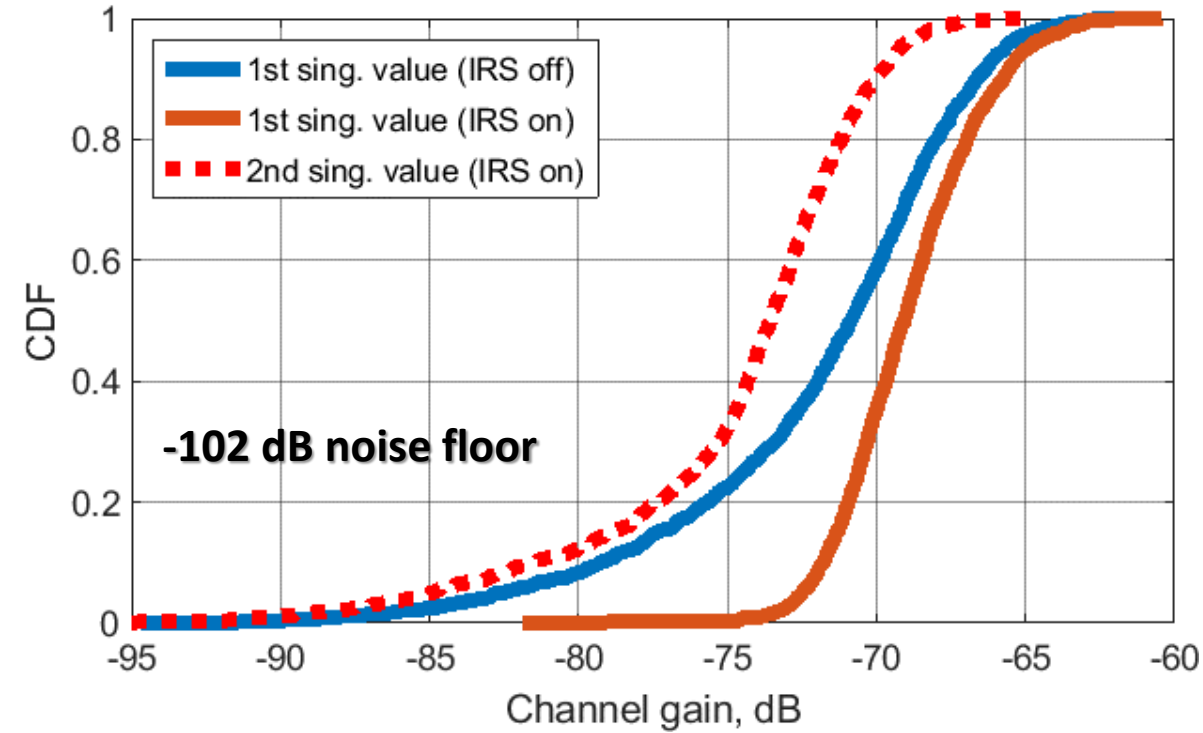
**Beamfocusing**  
 Quasi-spherical front – non-uniform phase distribution  
 $\Delta\phi_1 < \Delta\phi_2 < \Delta\phi_N < 2\pi$

**Beamforming**  
 Planar front – uniform phase distribution  
 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2 = \Delta\phi_N < 2\pi$

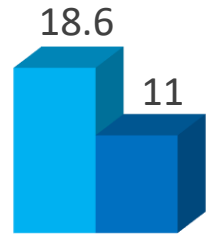
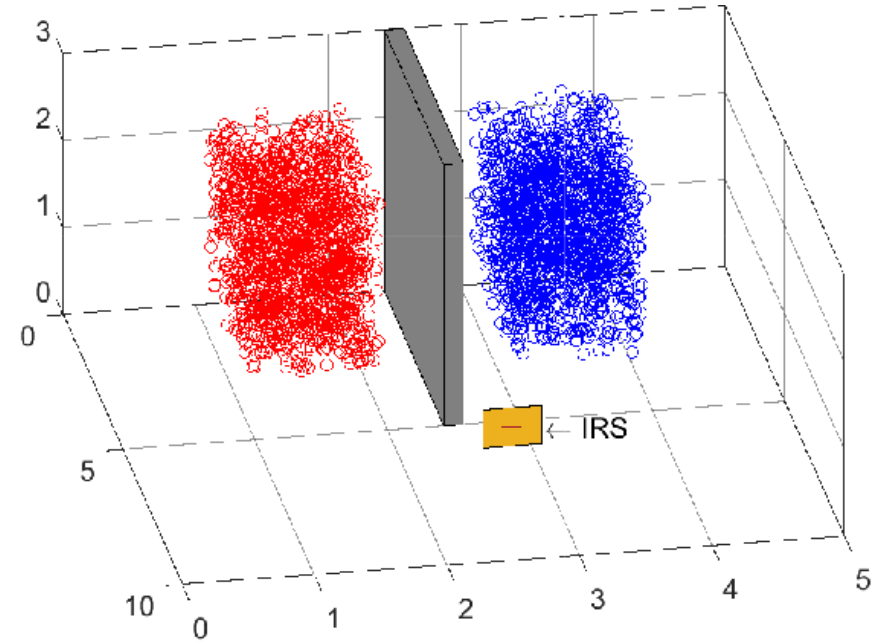
*If IRS becomes so big that  $\Delta\phi_N \rightarrow 2\pi$  then each next meta-atom looks like the same Tx point for receiver's antenna and we can obtain saturation. Further growth of IRS brings to losses as we cannot guarantee coherency of each meta-atom transmission in receiver point.*

S. Dorokhin, P. Lysov, A. Aderkina, V. Lyashev, Reconfigurable Intelligent Surface MIMO Simulation using Quasi Deterministic Radio Channel Model, IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems, 18-21 December 2022 // Gandhinagar, Gujarat, India.

# Spatial layer transmission. CDF results.



Scenario: 4T2R, SU-MIMO, 1500 seeds, NLoS.



■ IRS on ■ IRS off

Total capacity, Mbits/s  
@ 20 MHz  
 $P_{TX}=0$  dBm

$$C = B_f \sum_{i=1}^R \log_2 \left( 1 + \frac{P_{TX} \lambda_i}{\sigma_n} \right)$$

$\lambda_i$  - transmitting coefficient by layer  $i$

$R$  - number of layers

$\sigma_n$  - noise level in reference to band 20MHz



# Информационная емкость

$$C_{SISO} = B_f \log_2 \left( 1 + \frac{P_{TX} \|\mathbf{H}\|^2}{\sigma_n^2} \right) = B_f \log_2 \left( 1 + \frac{P_{TX} \lambda_1^2}{\sigma_n^2} \right)$$

$$C_{MIMO} = B_f \log_2 \det(\mathbf{I} + \mathbf{H}\mathbf{Q}\mathbf{H}^H)$$

$P_{TX}$  – power of single transmitter;  
 $N_{TX}$  – number of transmission antennas;  
 $\mathbf{Q}$  – covariance matrix of transmitted signal.

$$\mathbf{Q} \geq 0, \text{trace } \mathbf{Q} \leq \frac{P_{TX}}{N_{TX} \sigma_n^2}$$

$$\text{RIS: } \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_B \mathbf{Q} \mathbf{H}_A$$

Вычислительно затратно решать системы уравнений с плотными матрицами 64x64ж 128x128 ... каждую миллисекунду или даже быстрее, и это все от 100 до 500 раз (ортогональные ресурсы)

Поэтому, современная цифровая обработка многомерных сигналов сводится к численно-эффективным методам линейной алгебры:

- Малоранговые приближения
- Ранг-структурированные матричные вычисления
- Матричные разложения и приближенные вычисления (с учетом шумов в системе)
- Тензорные разложения и вычисления

✓ A. Osinsky, R Bychkov, M Trefilov, V Lyashev, A Ivanov, Round-off Error Analysis in mMIMO Detector Based on Cholesky Decomposition, IEEE Wireless Communications Letters Print ISSN: 2162-2337 Online ISSN: 2162-2345 Digital Object Identifier: 10.1109/LWC.2023.3327177. [Q1]

✓ A. Osinsky, R Bychkov, M Trefilov, V Lyashev, A Ivanov, Regularization for Cholesky Decomposition in Massive MIMO Detection, // IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 12, Issue: 9, September 2023, pp. 1603-1607. [Q1].

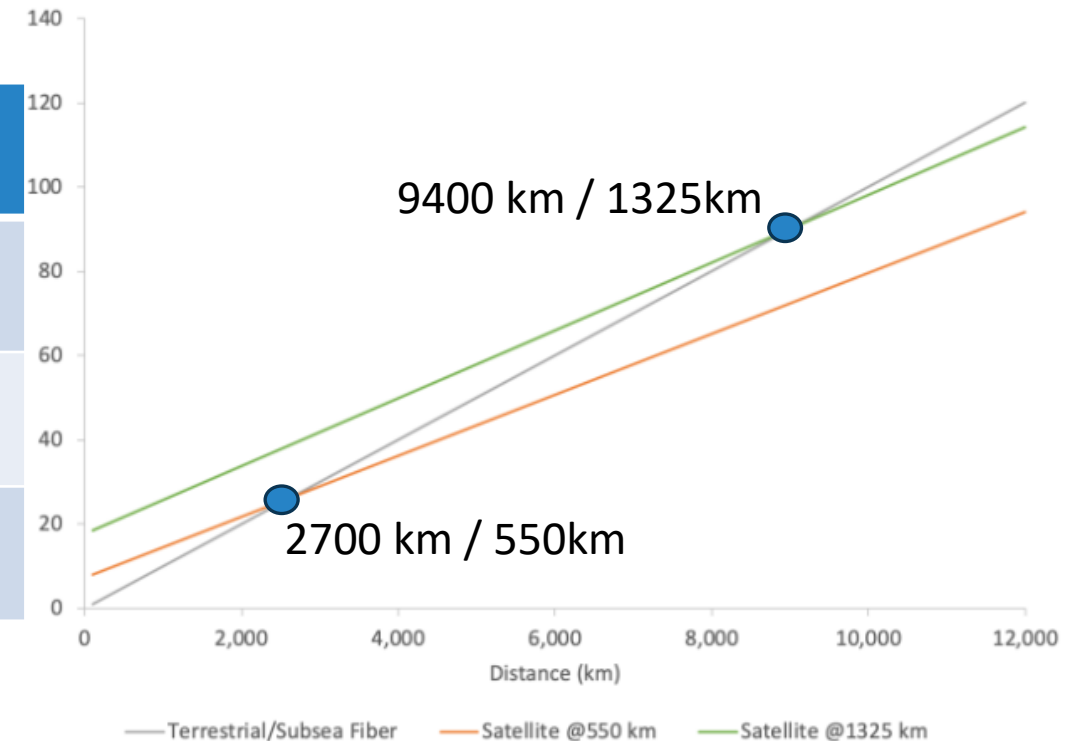
# Non-Terrestrial Network (NTN) and Communications

Дальнейшее развитие сетей ведет к гетерогенным структурам

- ❖ Сети быстрого развертывания
- ❖ Сети покрытия (low traffic demand)
- ❖ Emergency networks



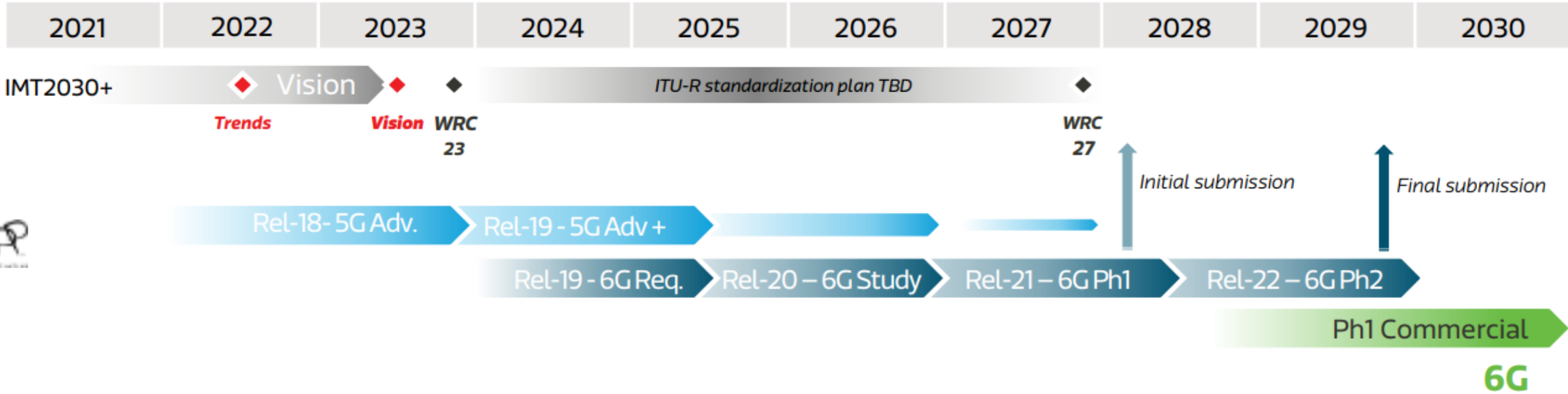
Link	Опт.канал	Спутн.канал	Улучш. RTT, мс	Улучш. емкости, %
Нью-Йорк – Дублин	25.07	20.07	5	~20 %
Сан-Пауло – Лондон	46.57	36.64	9.93	~21 %
Торонто - Сидней	76.29	58.34	17.95	~ 24%



Roman Semernya, Shi Xueliang, Vladimir Lyashev, Vadim Revutsky, Zhou Yue, Dong Lei, {Application of HBF with Adaptive Port Mapping for LEO Satellite Communication Systems}, 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference: VTC2021-Fall, 27-30 September 2021, Online. [A]

# Timeline

Мы здесь – время исследований для 6G





# Пространственно-временная обработка сигналов в системах беспроводной связи

## Цели курса

- Физические основы пространственно-временной обработки сигналов
- Изучение особенностей 5G стандарта для поддержки пространственно-временной обработки сигналов и знакомство с тенденциями в 6G исследованиях



AAU5613 64T64R



12 лекций  
3 семинара  
3 мини-проекта

# Открытая научно-исследовательская деятельность



@RTT\_SEMINARS

**Московский научный семинар «Алгоритмы и технологии радиосвязи»**

Новости семинара: [http://t.me/rtt\\_seminars/](http://t.me/rtt_seminars/)



@INM\_HUAWEI\_SEMINAR

**Совместный научно-образовательный семинар ИВМ РАН, ВМК МГУ и Huawei Tech., Rus**

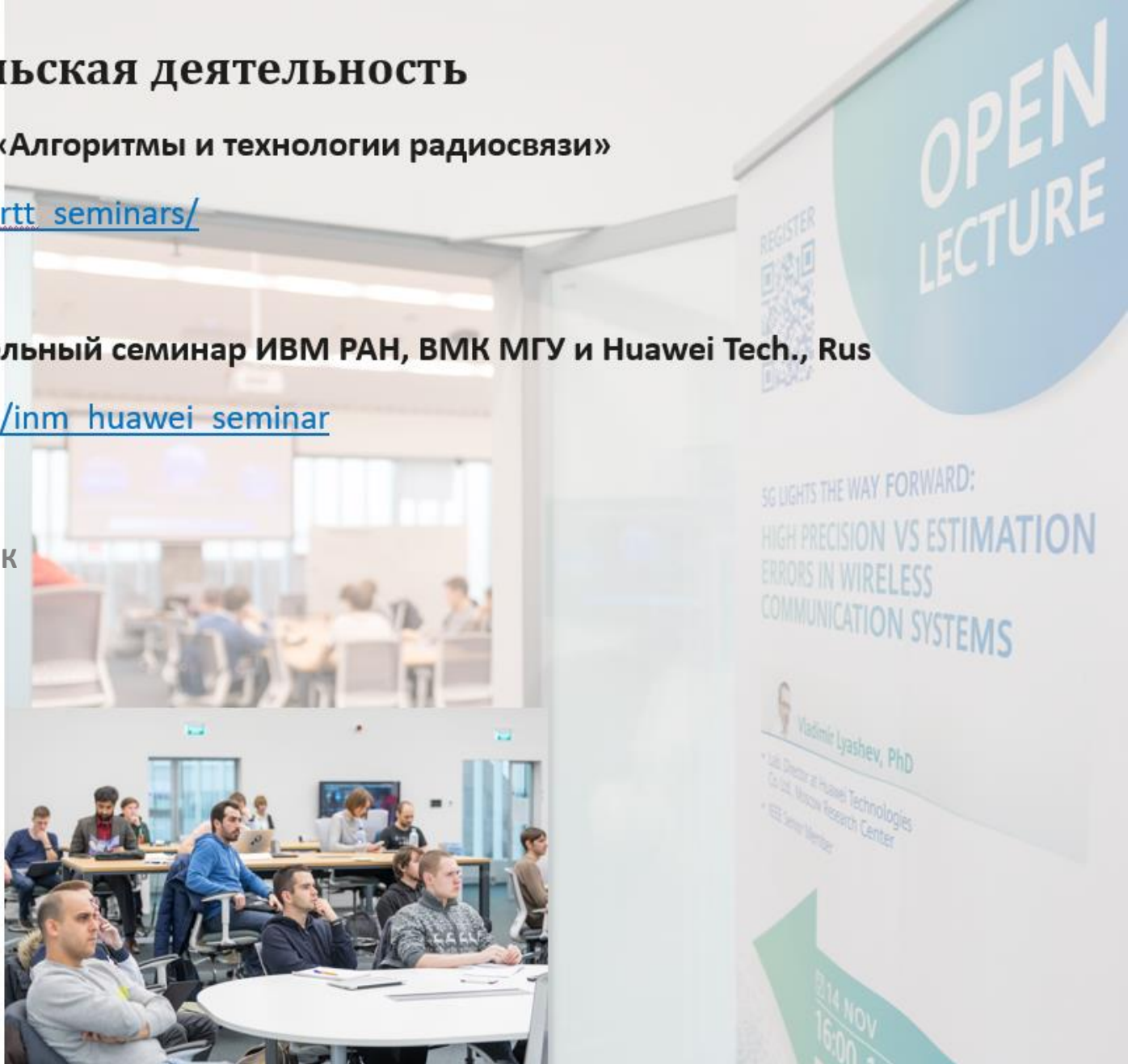
Новости семинара: [https://t.me/inm\\_huawei\\_seminar](https://t.me/inm_huawei_seminar)

**Дипломирование** на базе лаборатории для бакалавров и магистров МФТИ, Сколтех, МГУ ВМК

**Аспирантура** по специальностям

- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Стипендии для бакалавров, частичная занятость для магистров, частичная/полная занятость для аспирантов









Спасибо!

Ваши вопросы...

Ляшев В.А.  
lyashev.va@mipt.ru



# Summary : key differences from UE

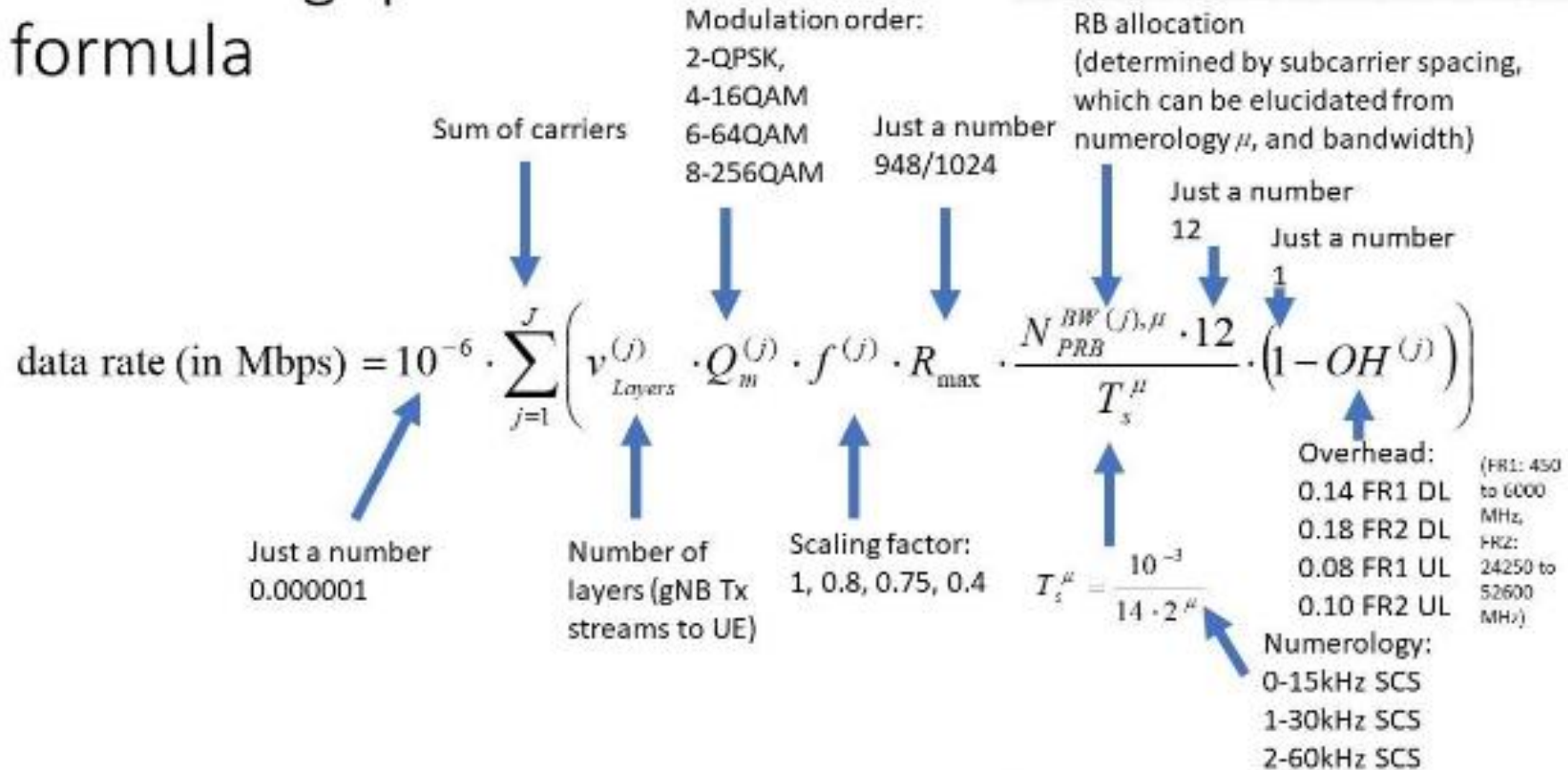
	3G	4G	5G	6G
				
<b>Broadband Data Rate</b> <b>Device MIMO</b>	1 – 10Mbps 1Tx / 1Rx	10Mbps – 1Gbps 1Tx / 2+Rx	100Mbps – 10Gbps 2Tx / 4+Rx	1Gbps – 1Tbps 4Tx / 8+Rx
<b>Spectrum</b>	FDD + new TDD (e.g. 2.3GHz) ~100MHz more	+more TDD (2.5GHz) +unlicensed (5GHz) ~600+ MHz more	+3.5-7GHz +mmW ~3+ GHz more	+7-24GHz +Sub-THz ~50+GHz more
<b>Network densification<sup>1</sup></b>	Nominal	+	+ device	++ device
<b>Killer App</b>	Mobile web (e-mail, browsing)	Mobile video Social media (+LPWA IoT)	UHD video Cloud Gaming, XR Other Verticals	N-D holographic comm. AI-efficient system

Note 1: As spectrum goes higher, the boundary between “infrastructure” and “device” challenges blurs



# 5G throughput formula from 3GPP

## 5G Throughput formula



TS 3GPP TS 38.101-1, V15.2.0, Table 5.3.2-1: Maximum transmission bandwidth configuration N<sub>PRB</sub>

SCS (kHz)	15 MHz		30 MHz		60 MHz		120 MHz		240 MHz	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
15	25	32	52	100	150	150	252	252	464	464
30	11	24	26	61	66	78	158	158	312	312
60	5	12	13	31	37	39	81	90	156	156

Formula: 3GPP TS 38.306 version 15.2.0 Release 15