

5G/6G移动通信系统全维覆盖技术

汇报人：李建东



西安电子科技大学
空天地一体化综合业务网
全国重点实验室

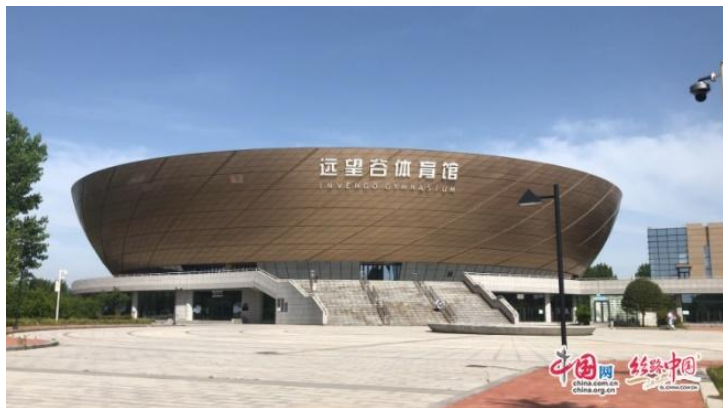
参考文献：李建东、盛敏、刘俊宇：“突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨”，
《中兴通讯技术》，第32卷，2026年4月，第2期，名家视点栏目（50-55页）

提 纲

- 密集深度覆盖瓶颈问题
- 无线广域立体覆盖体系
 - 超密覆盖技术
 - 超高覆盖技术
 - 超远覆盖技术
- 超低能耗致密覆盖技术

无线覆盖示意图

室内无线覆盖示意图



远望谷体育馆

远望谷体育馆内部



基站
(均有对地覆盖的波束)

可以看出：哪里被覆盖到、哪里没有被覆盖（空洞）、哪里有重叠覆盖（干扰）

无线通信系统的两大发展方向

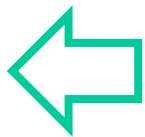
系统速率：
 bps/m^2



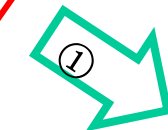
物理含义：在高密度的情况下，每个设备/每个用户能否获得更高的速率？



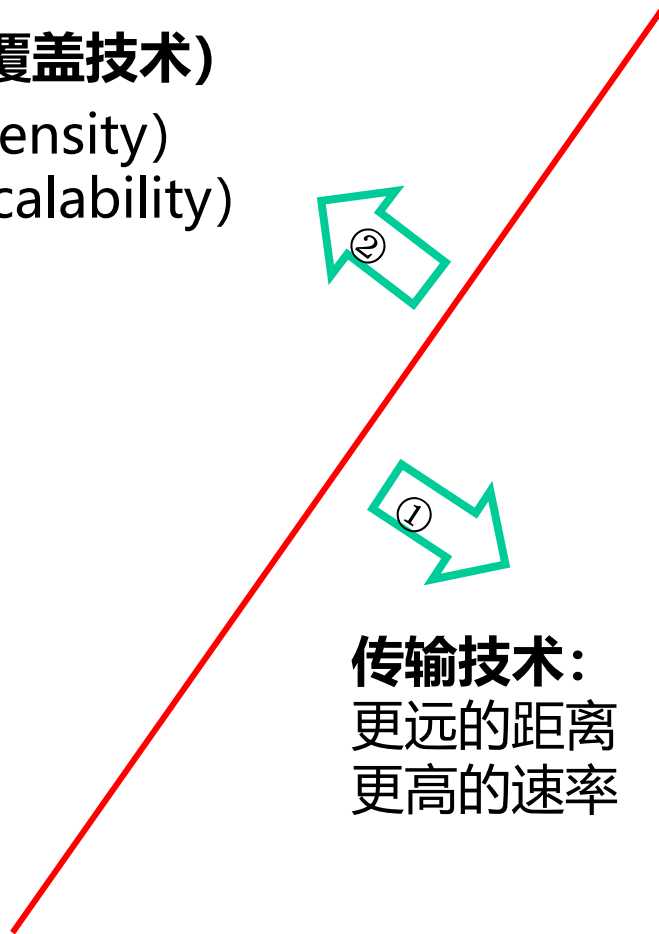
方法：增加基站/接入点的密度



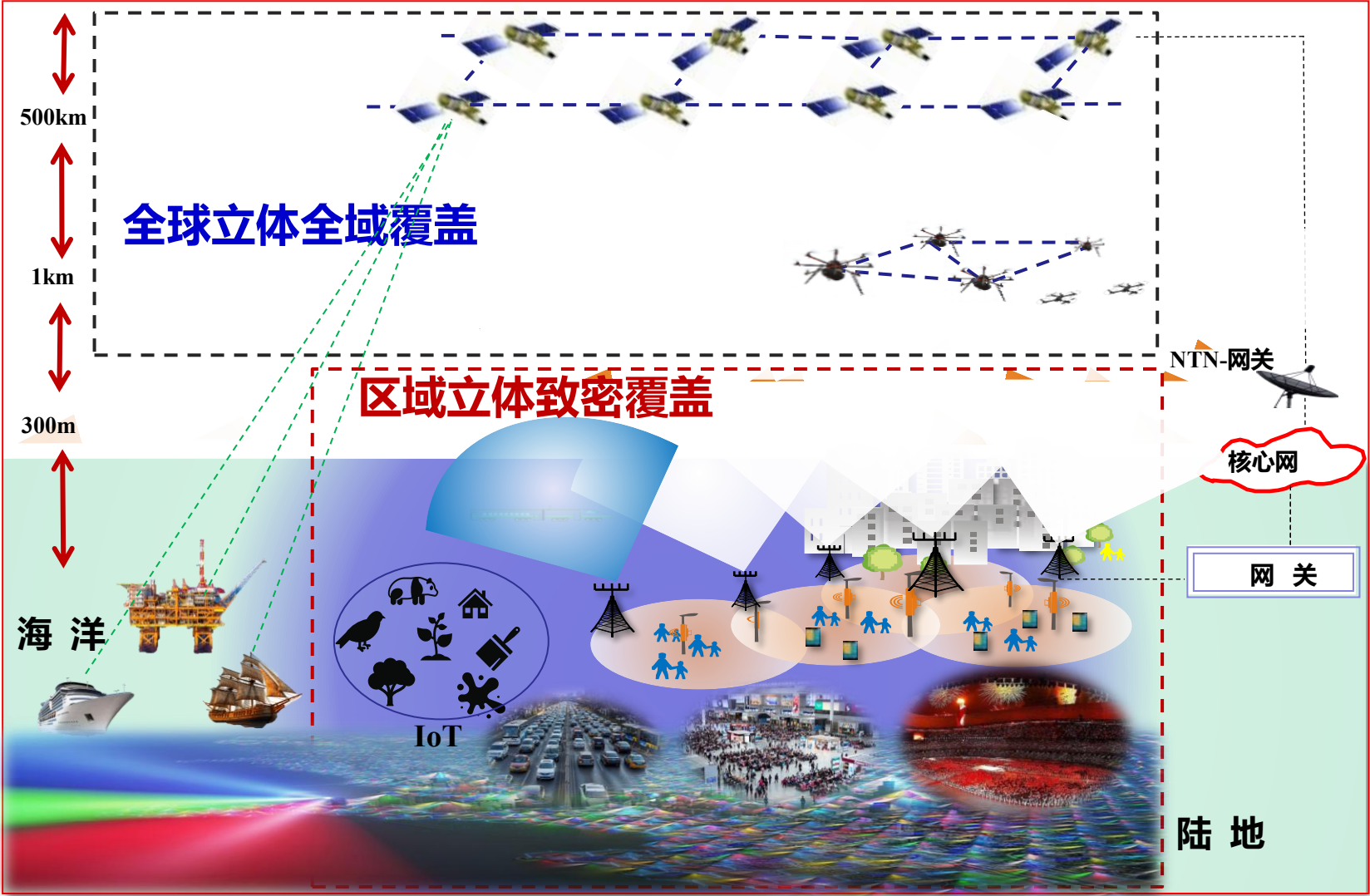
系统技术：（覆盖技术）
更大的密度 (Density)
可扩展性好 (Scalability)



传输技术： (bps)
更远的距离
更高的速率



无线覆盖扩展的趋势（天空地海一体）



通信基础设施包括：卫星、空中、地面接入点

扩展：卫星星座实现全球范围内立体全域覆盖

扩展：空中平台完成局部区域按需灵活覆盖

扩展：地面网络向低空延伸完成低空立体覆盖

基础：地面网络密集协同部署完成大容量深度覆盖

广域立体密集无线移动通信覆盖体系

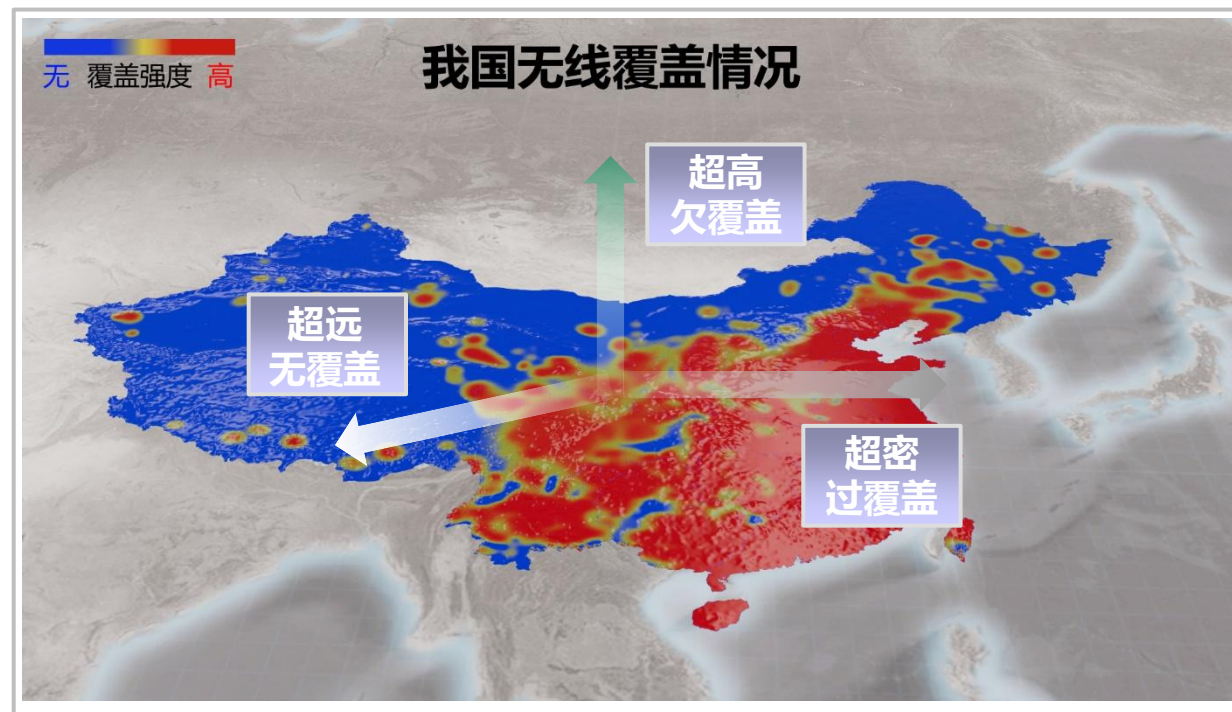
我国无线系统覆盖的建设现状

现有体系问题*

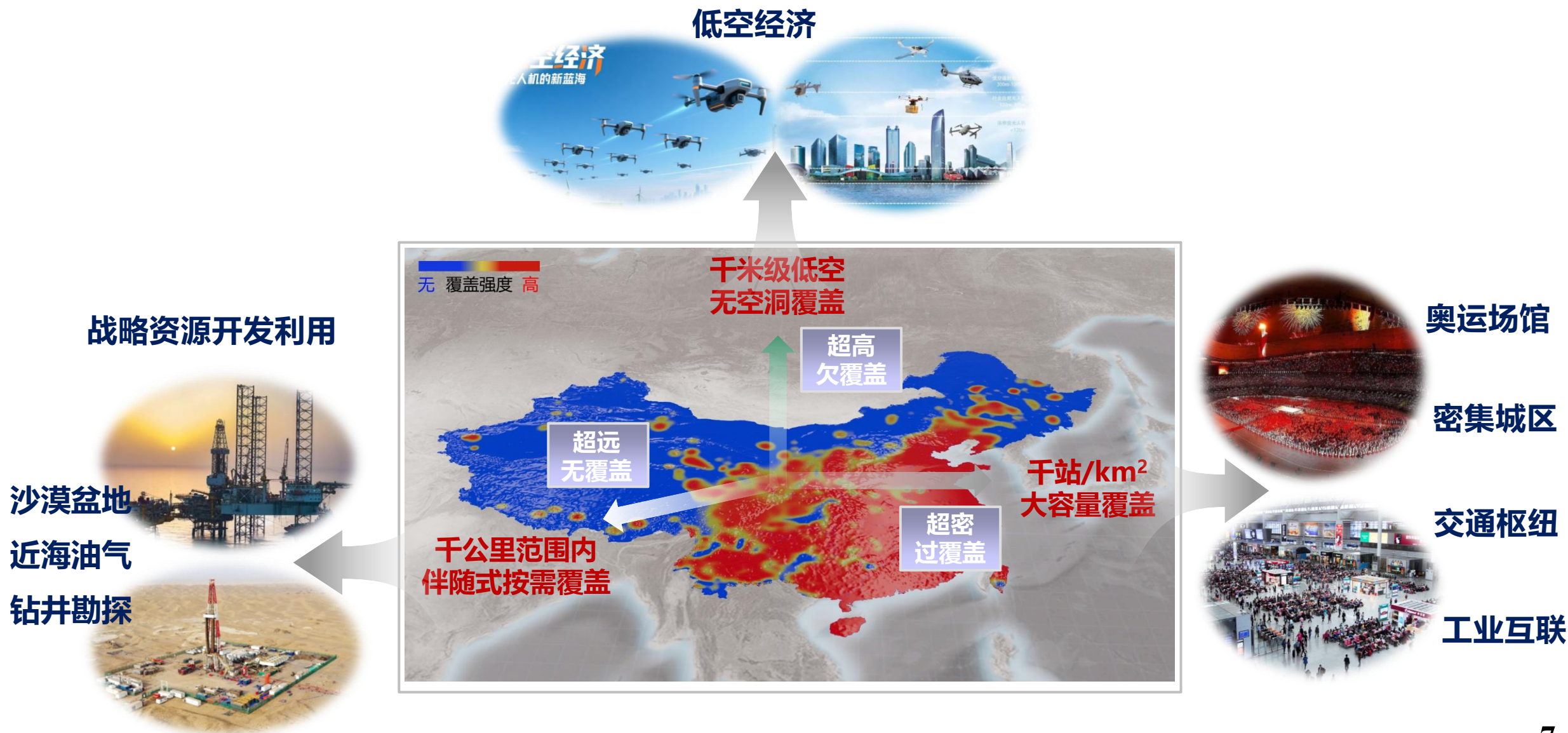
超高高度欠覆盖
信息传不好

超密部署过覆盖
信息传不快

超远距离无覆盖
信息传不了



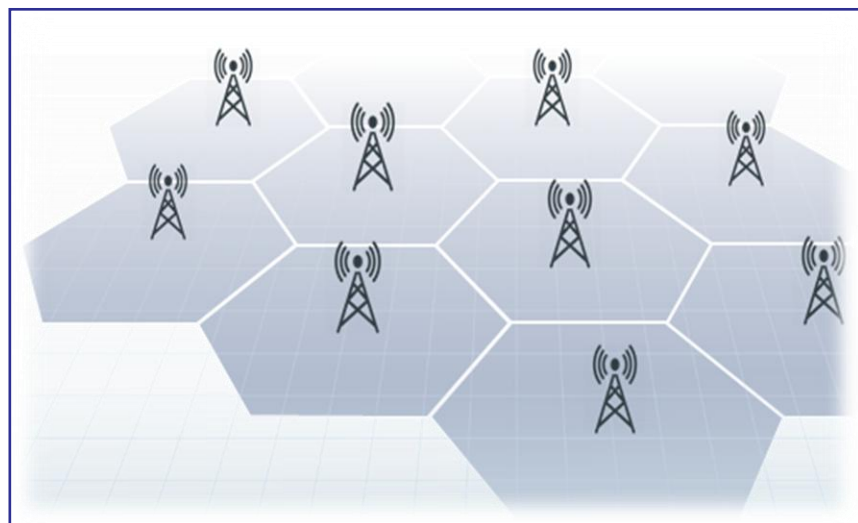
我国无线系统覆盖的发展需求



提 纲

- 密集深度覆盖瓶颈问题
- 无线广域立体覆盖体系
 - 超密覆盖技术
 - 超高覆盖技术
 - 超远覆盖技术
- 超低能耗致密覆盖技术

无线通信系统密集化发展 (1)



数十~数百个/km²

基站密度增加

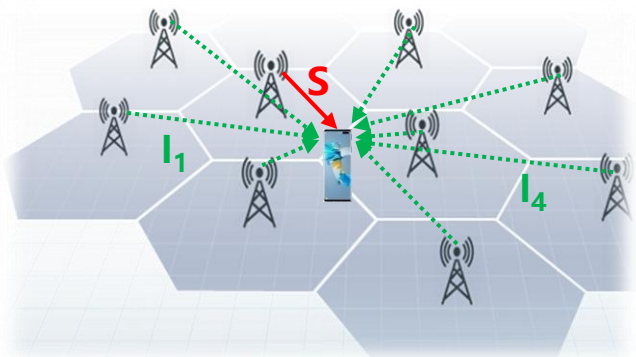


数千个/km²

是否存在制约整个无线通信系统密集化发展瓶颈问题？
在地面/空间持续增加基站/接入点密度，系统速率能否随之增加？

无线通信系统密集化发展（2）

■ 基本技术：资源复用（引入：自干扰）



频率资源复用

$$R \propto f\left(\frac{S}{N + \sum I_i}\right)$$

传输链路 系统工程

基站密度增加



密集系统的干扰特性？

	深度覆盖（阶段一）	深度覆盖（阶段二）
系统结构	无线局域网+蜂窝	密集蜂窝
接入点/基站密度	数百个/km ²	数千个/km ²
系统速率	数Mbps/m ²	数十Mbps/m ²

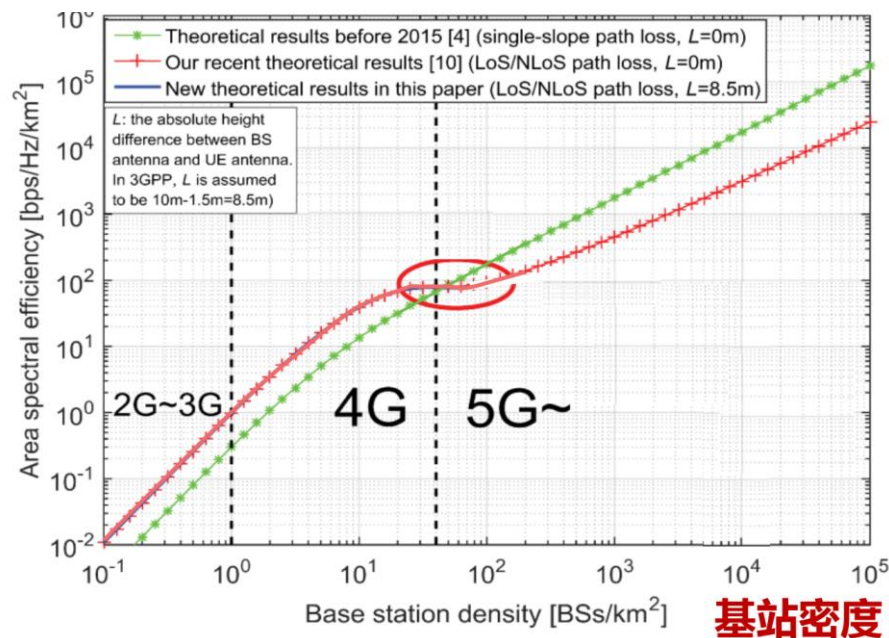
密集化

国家重大需求：实现我国人口密集城市/智慧城市/大型交通枢纽/大规模工业互联网等场所无线通信系统的深度覆盖

无线通信系统密集化发展 (3)

以往的结果：系统速度随系统密度升高线性增长

系统速率



但是实际情况
与此结果不符

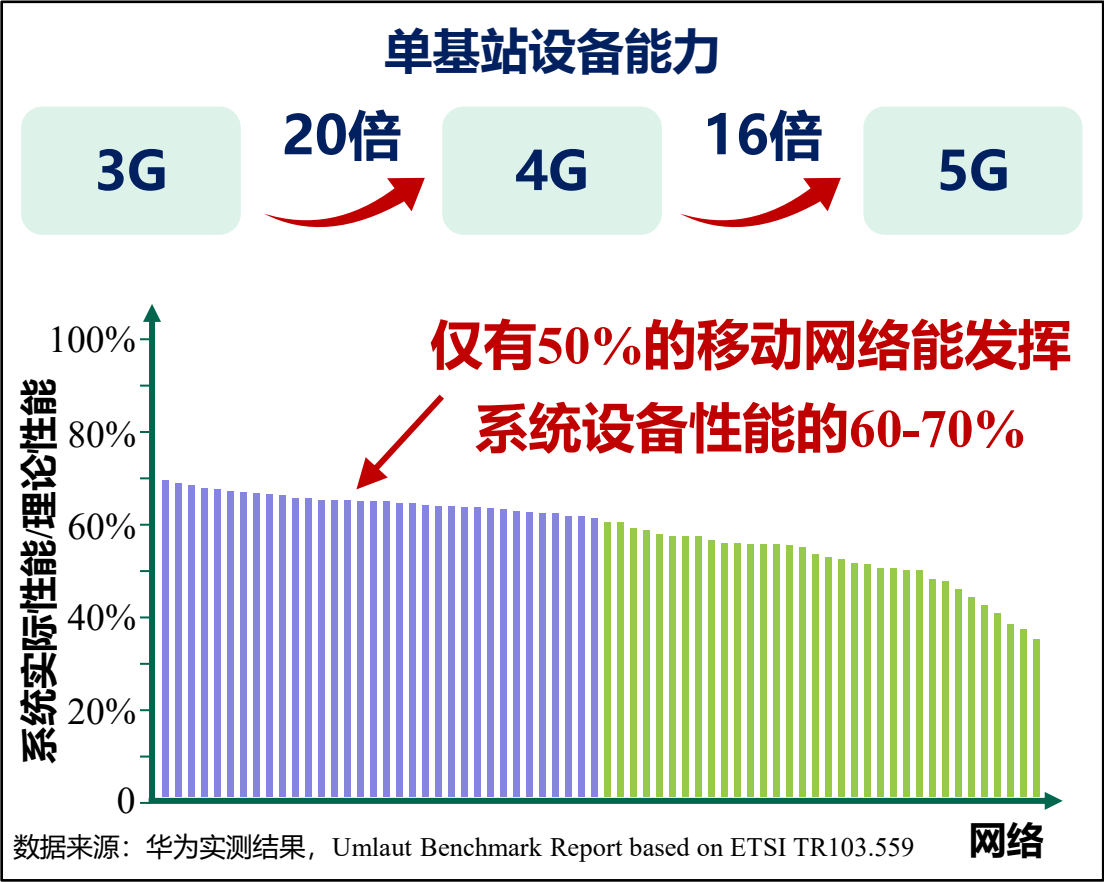


有信号
无服务

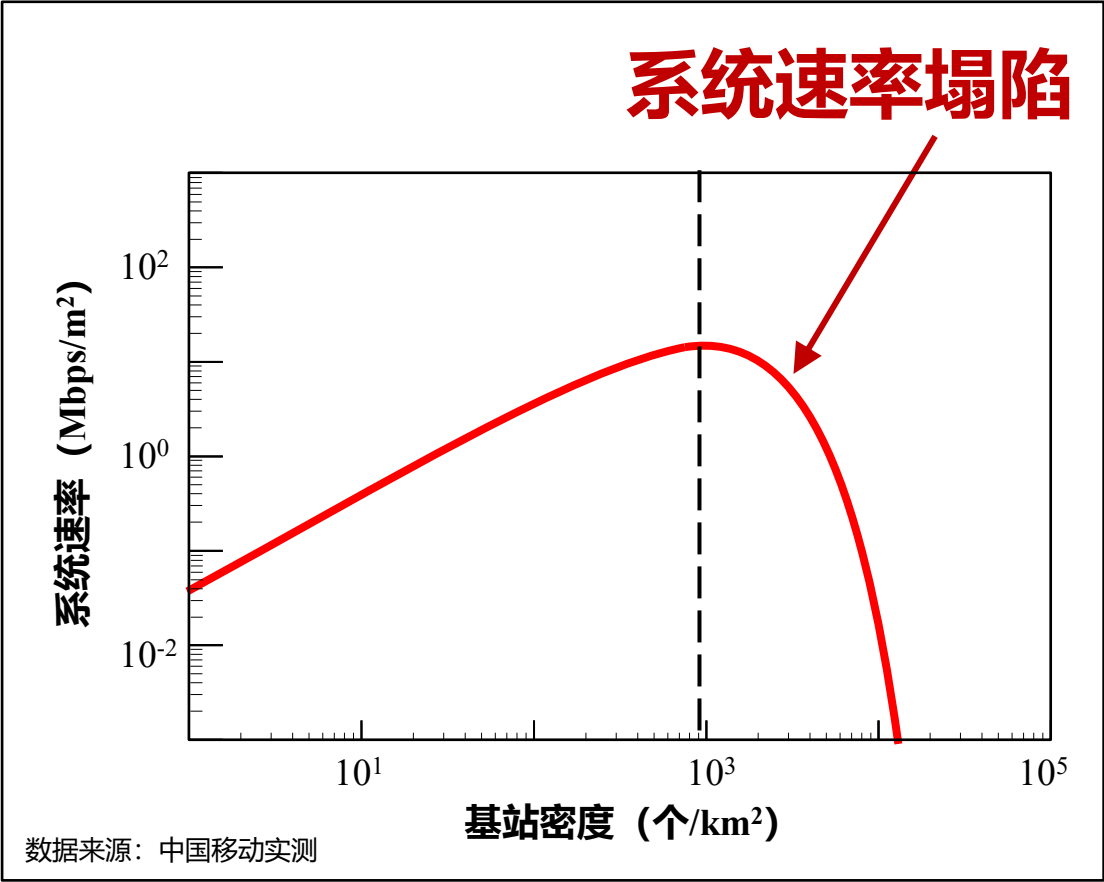
摘自：M. Ding, IEEE Trans. On Wireless Communications Vol.16 No.12, Dec. 2017, pp8147-8161
[4] J. G. Andrews, IEEE Trans. On Comm., Vol.59, no.11, Nov. 2011 pp3122-3134
[10] M. Ding, IEEE Trans. On Wireless Communications Vol.165 No.3, Mar. 2016, pp2365-2380

密集化过程中出现系统速率严重塌陷问题

设备的能力和数量不断增强
系统能力并未随之不断增强



实测表明随着基站密度的增加
系统速率出现不增反降的现象



密集干扰管控规律 (1)

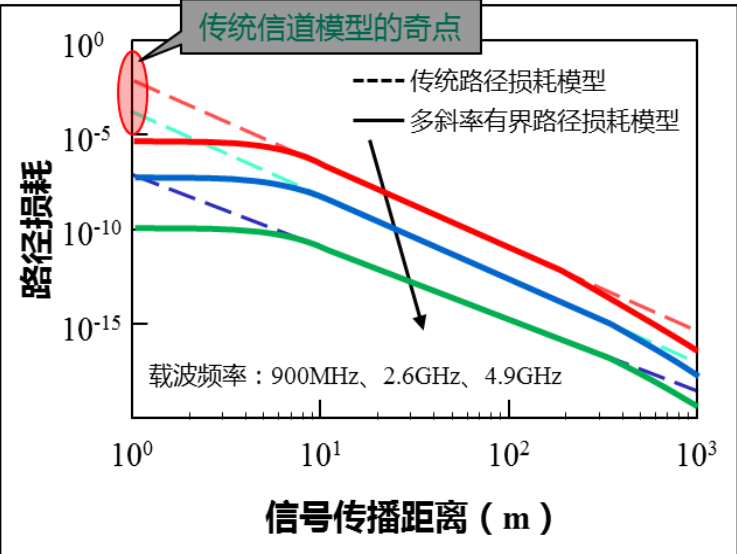
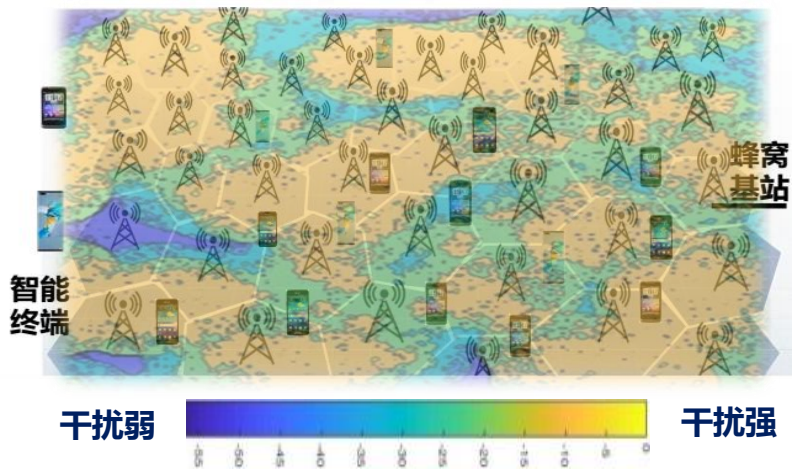
■ 构建了密集系统的有界路损电波传播模型

$$l_2^B\left(\left\{\alpha_n\right\}_{n=0}^1;d\right)=\left\{\begin{array}{ll}\left(1+d^{\alpha_0}\right)^{-1}, & 0<\|d\|\leq R_1 \\ \frac{1+R_1^{\alpha_1}}{1+R_1^{\alpha_0}}\left(1+d^{\alpha_1}\right)^{-1}, & \|d\|>R_1\end{array}\right.$$

■ 挖掘了系统相互干扰的时空特征



基站密度增加



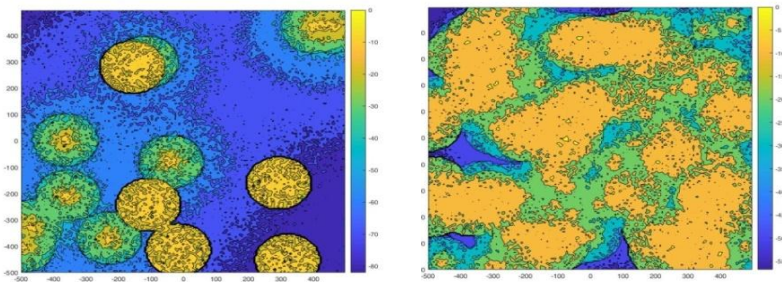
密集干扰管控规律 (3)

■ 干扰管控规律

◆ 干扰-有用信号-系统速率的作用关系

干扰呈现新特征

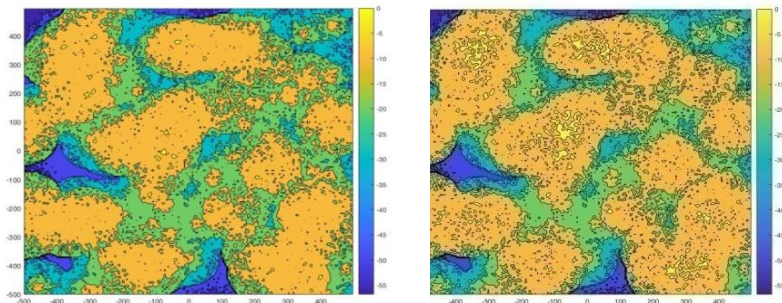
干扰弱差异性



传统网络

密集网络

干扰相关性



t_0

$t_0 + \Delta t$

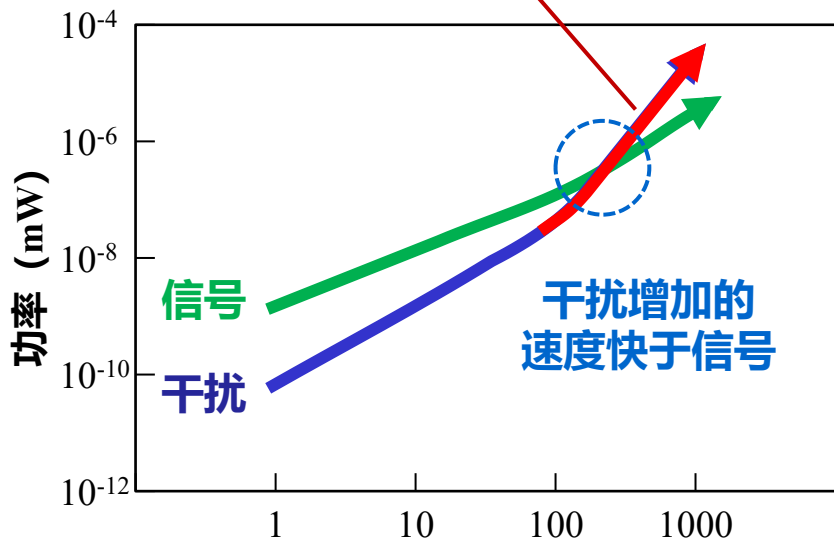
根本变化

- “远距离/非视距传播”向“**近距离/视距传播**”转变
- 干扰自身呈现**弱差异、强相关性**

具体问题

- 传统传播模型近距离传输时**存在奇点使信号失真**
- 干扰和信号强度随基站密度增加的变化产生**翘变**

干扰翘变



基站密度 (个/km²)

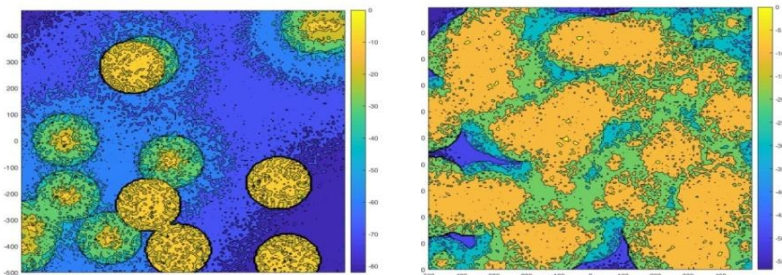
密集干扰管控规律 (4)

■ 干扰管控规律

◆ 干扰-有用信号-系统速率的作用关系

干扰呈现新特征

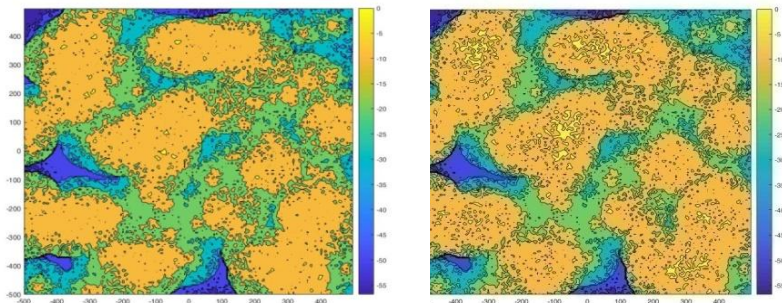
干扰弱差异性



传统网络

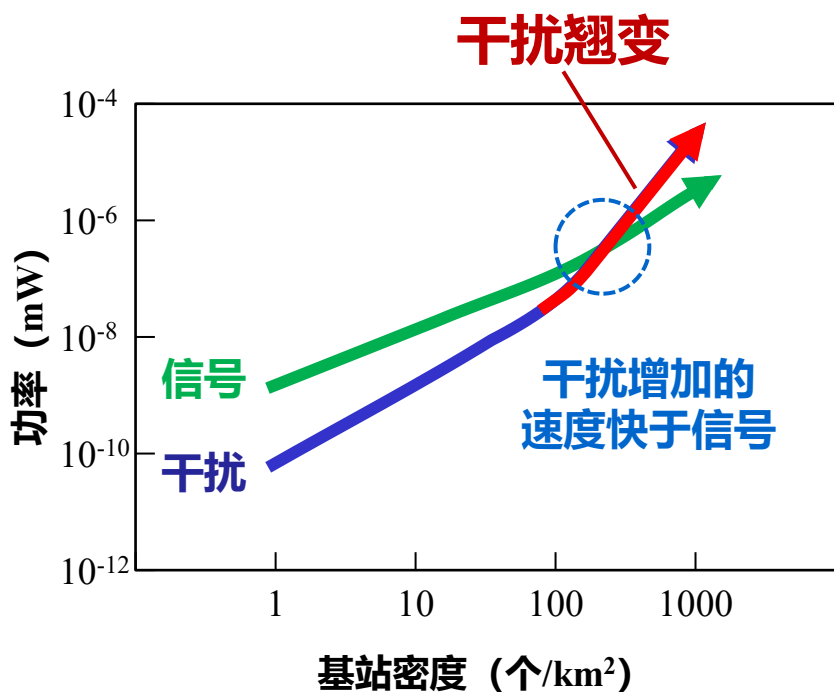
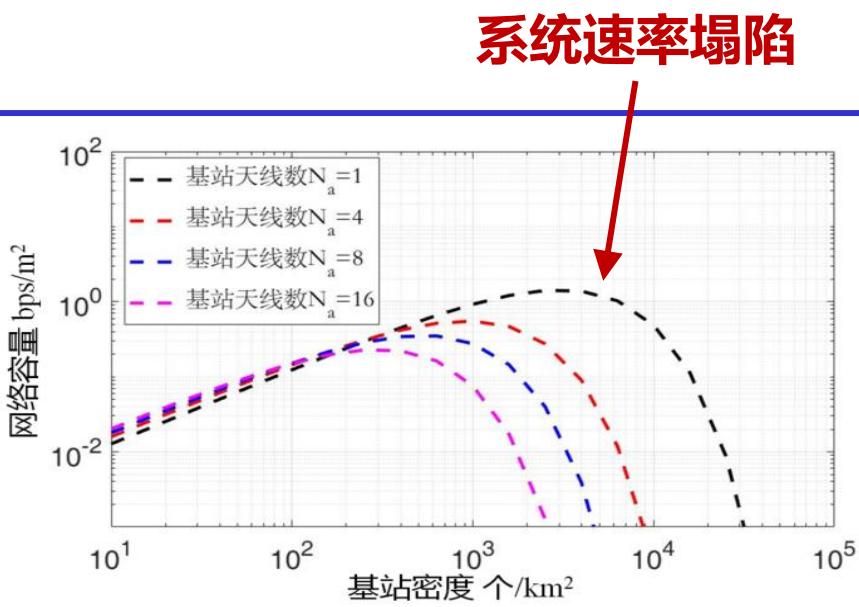
密集网络

干扰相关性



t_0

$t_0 + \Delta t$



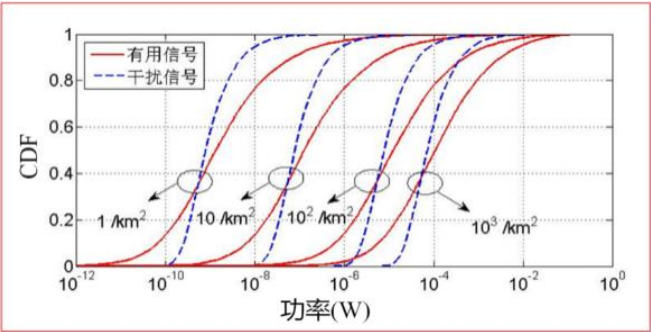
密集干扰管控规律 (5)

发现了干扰管控规律

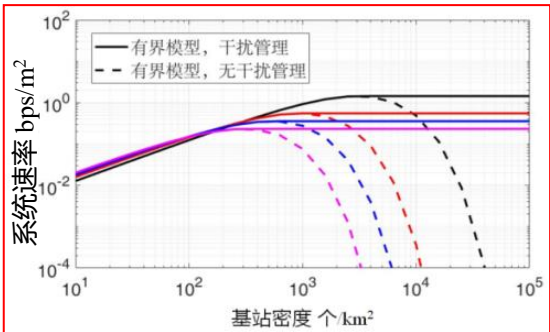
◆ 干扰-有用信号-系统速率的作用关系

$$R \propto f\left(\frac{S}{N + \sum I_i}\right)$$

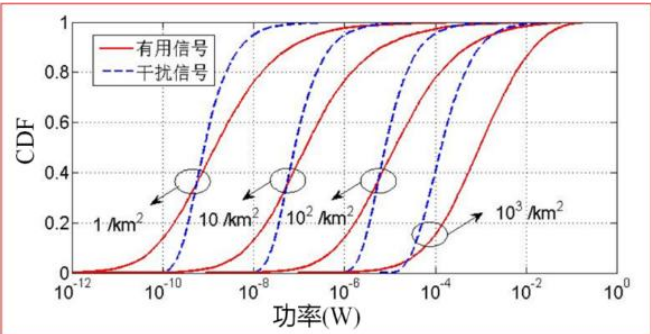
有用信号及干扰信号
“等阶”变化



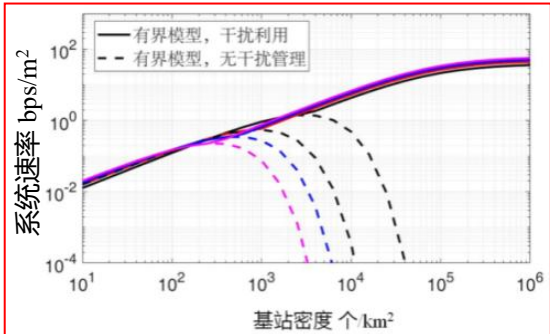
系统速率
保持稳定



有用信号及干扰信号
“增量”变化



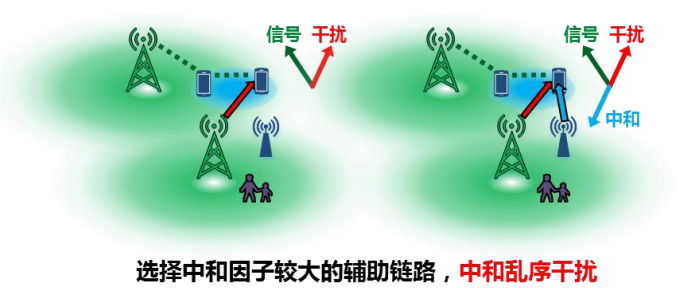
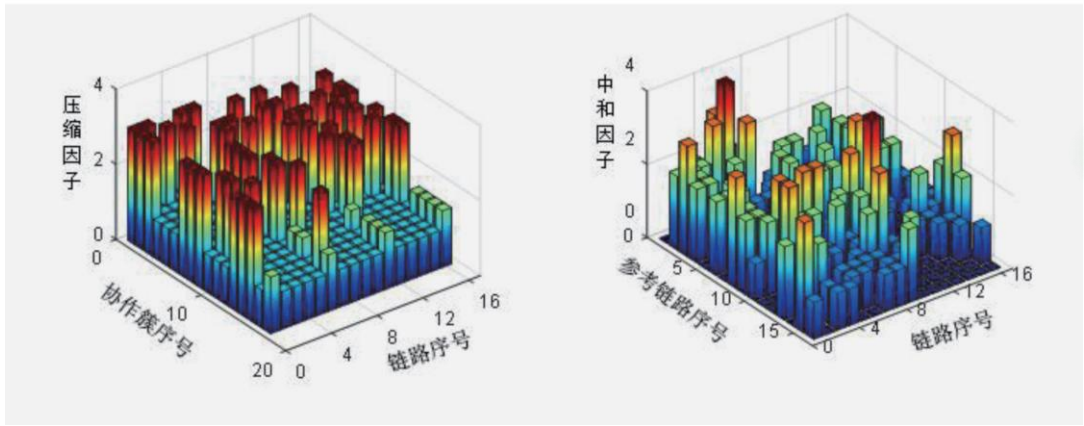
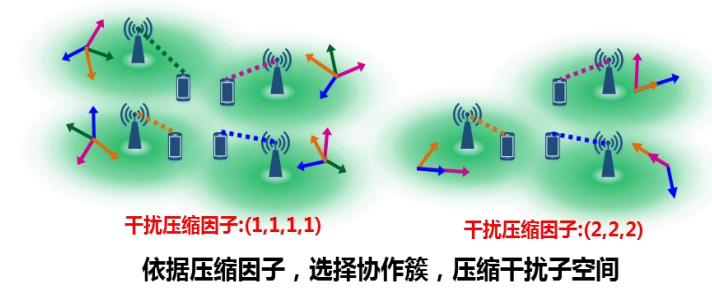
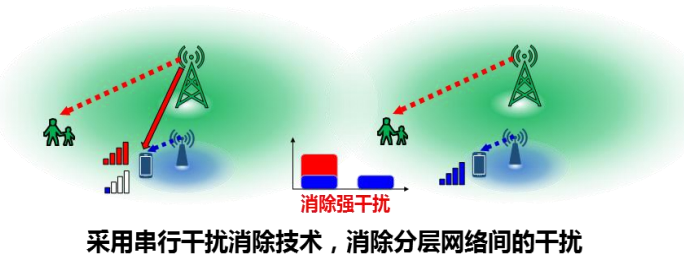
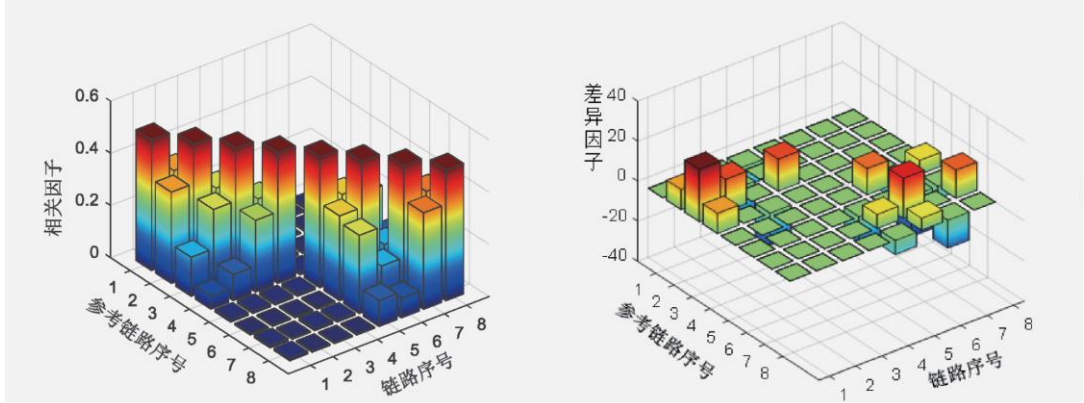
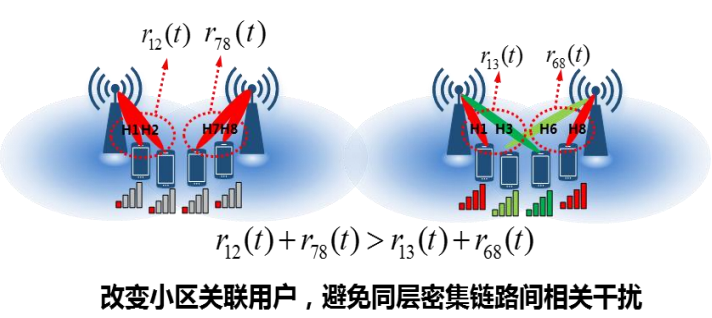
系统速率
持续增长



可消除系统速率塌陷，使系统速率持续增长

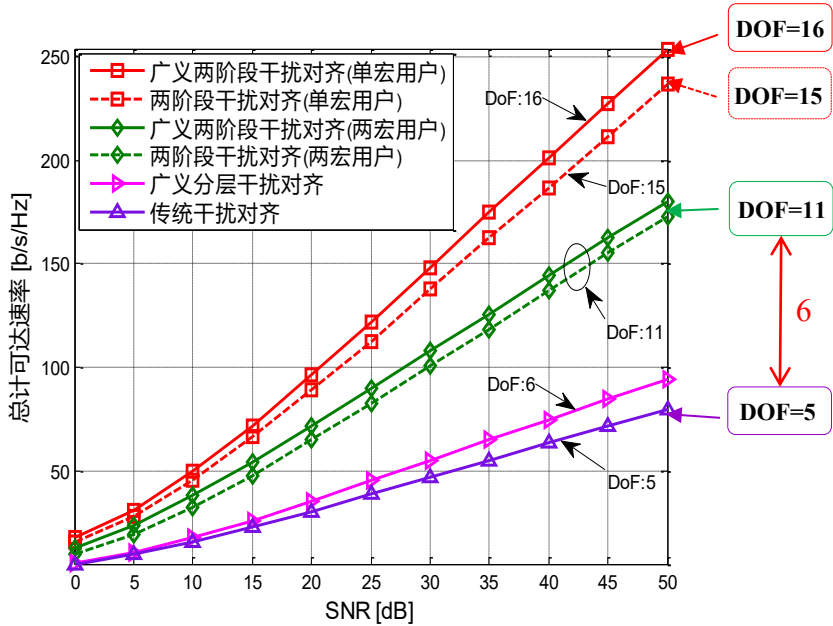
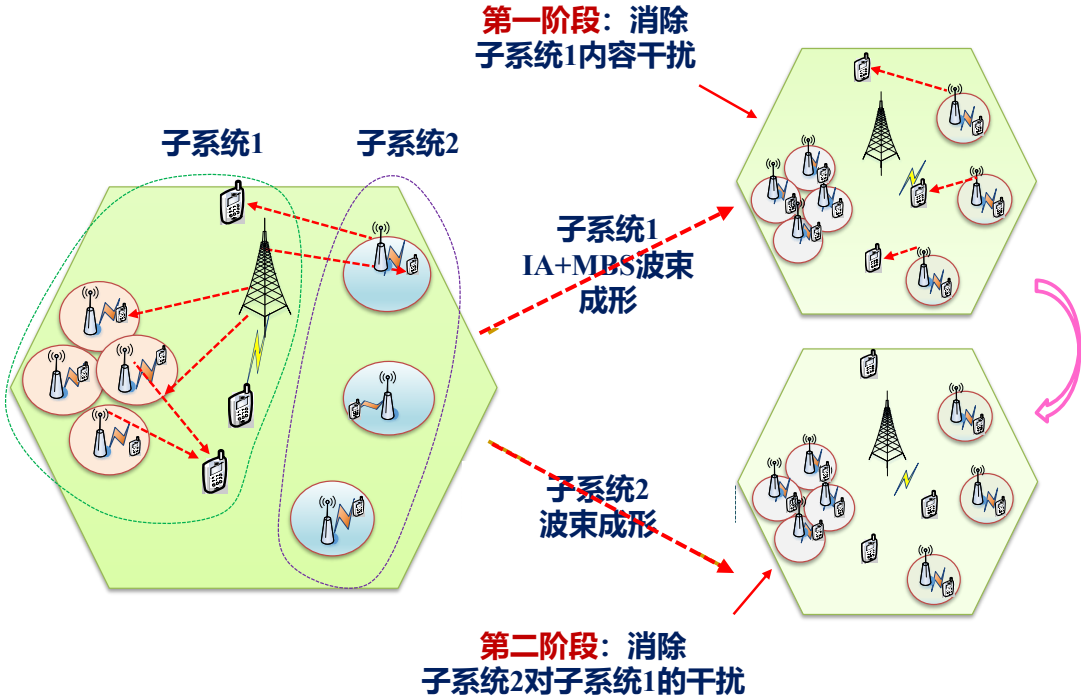
网络化干扰管控方法—网络化干扰特征

■ 揭示了四种网络化的干扰链路特征



网络化干扰管控方法—网络化干扰对齐

■ 提出了两阶段网络化干扰对齐方法

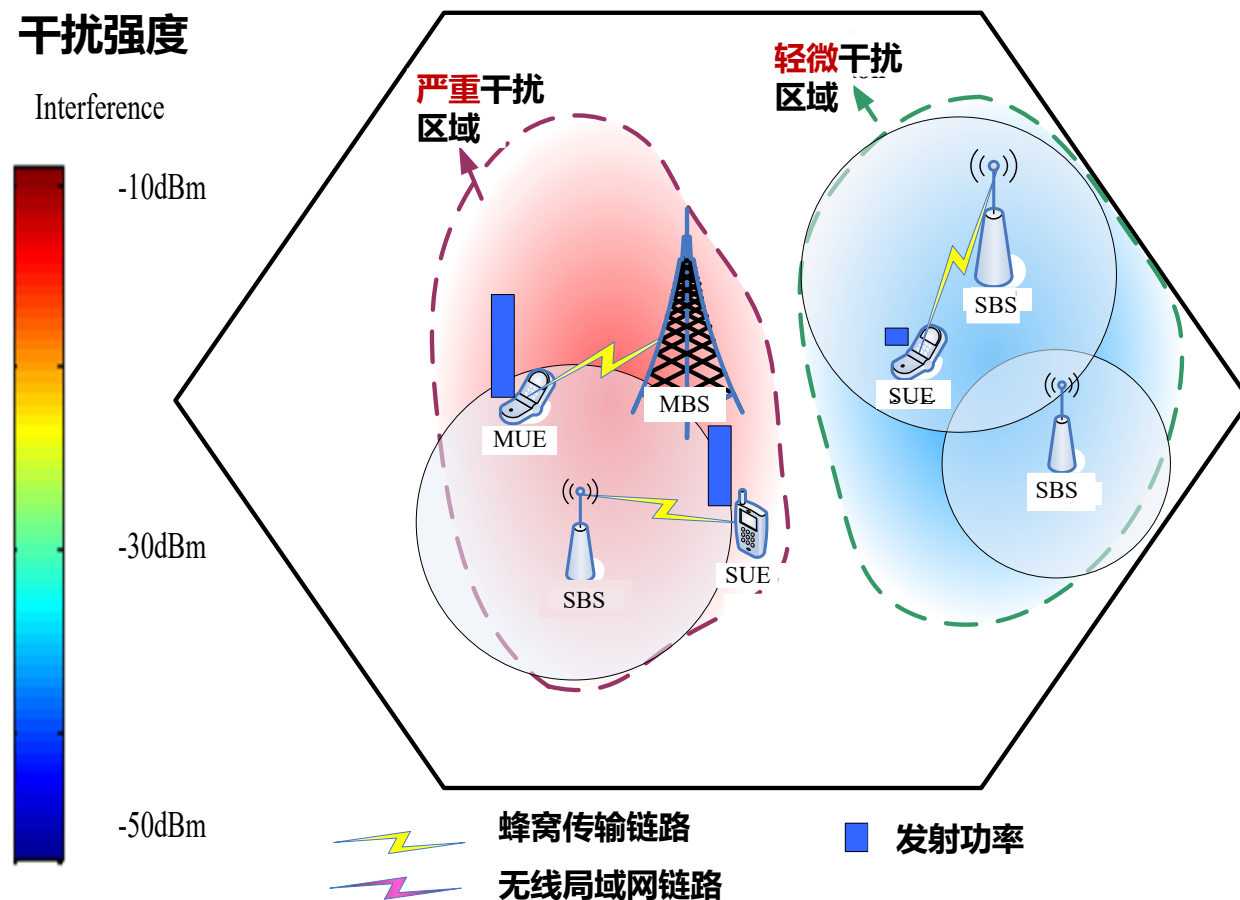


依据宏微小区在天线个数、发送功率等方面的差异，以及干扰网络的部分连通特性，设计了分阶段干扰空间定制方案，消除了异构网络的同层及跨层干扰，自由度提高到2倍以上，逼近或达到网络最大自由度。

网络化干扰管控方法—网络化干扰转移

■ 提出了联合资源与业务的干扰转移方法，并发传输承载大容量业务

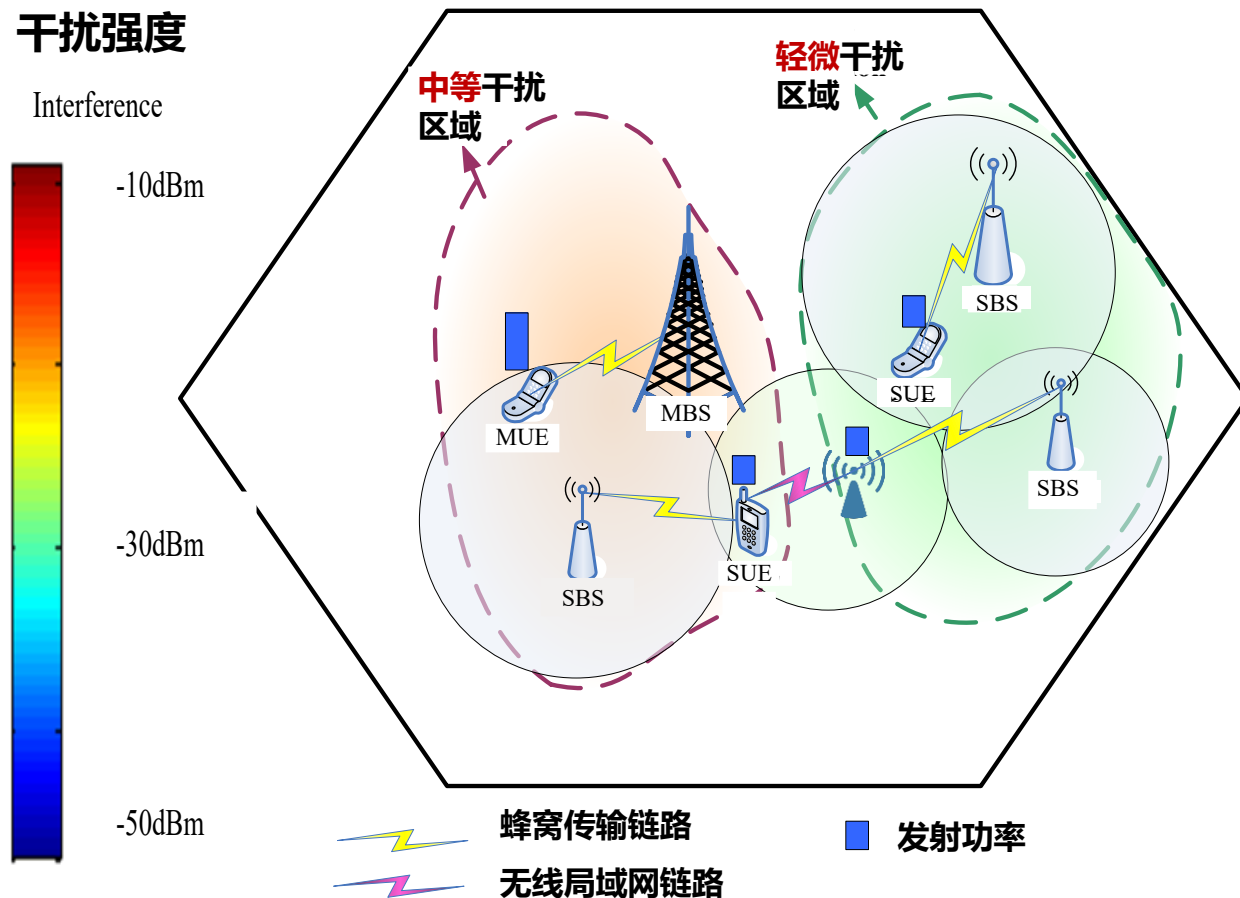
- 面向异构蜂窝网多网资源联动需求，依据网络业务状态和干扰差异性，揭示了业务速率与并发传输网络数量之间的定量关系，提出联合资源与业务的干扰转移，承载大容量业务。



网络化干扰管控方法—网络化干扰转移

■ 提出了联合资源与业务的干扰转移方法，并发传输承载大容量业务

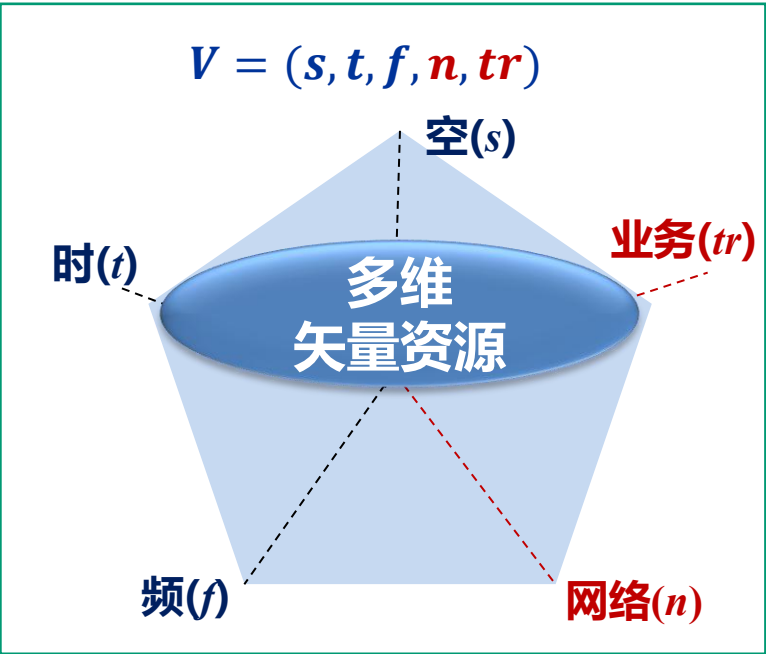
- 面向异构蜂窝网多网资源联动需求，依据网络业务状态和干扰差异性，揭示了业务速率与并发传输网络数量之间的定量关系，提出联合资源与业务的干扰转移，承载大容量业务。



网络化干扰管控方法—资源空间和运算

■ 建立了资源矢量空间模型及其运算规则，实现小区资源动态配置

五维资源矢量空间模型



为消除系统干扰，实现资源融合
联动，平滑流转提供了解决途径

以服务能力为基础的资源矢量运算规则

动态求解具有
同等服务能力的
无冲突资源矢量
 $R_x = f_v\{V_i | \tau\}$

替换运算
 $V_J \rightarrow V_I$

认证运算
 $Auth(V_E \cap V_A)$

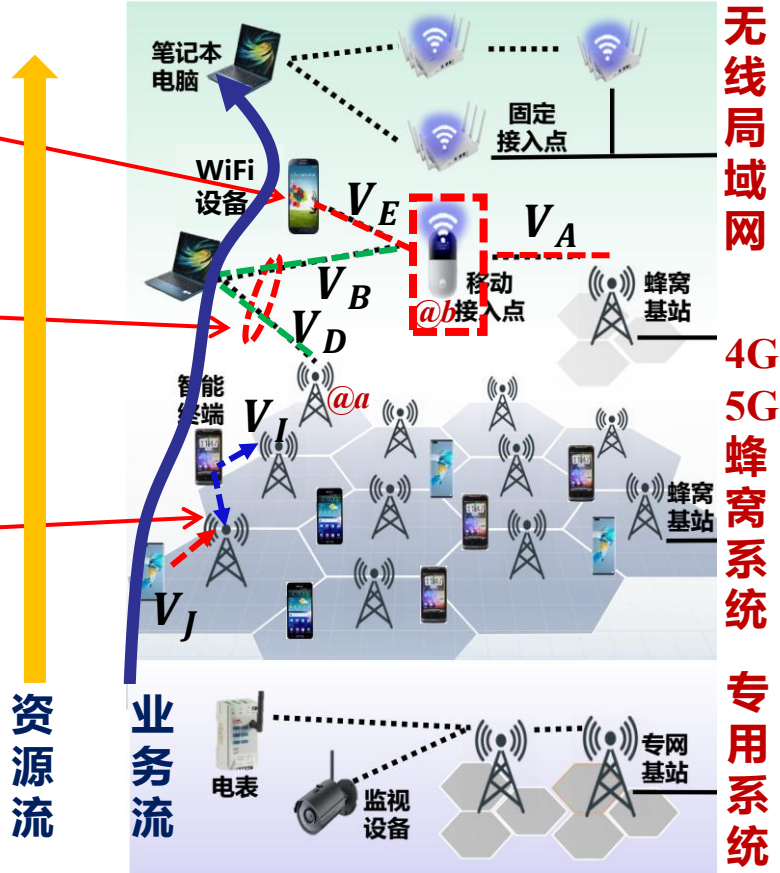
串接运算
 $V_E \cap V_A$

迁移运算
 $V_D | @a \rightarrow V_B | @b$

冲突检测
 $V_I <> V_J$

并接运算
 $V_B + V_D$

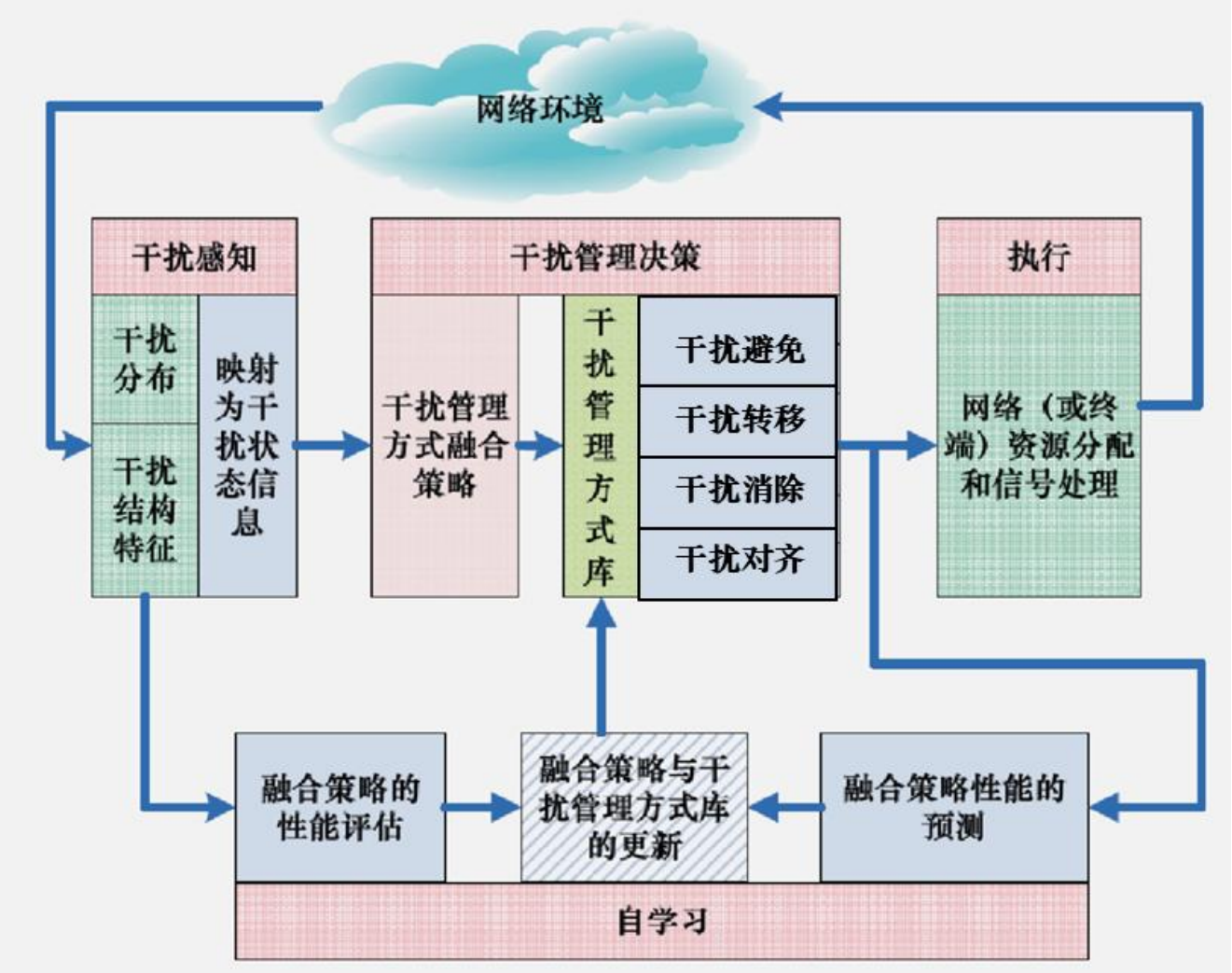
资源移动



将离散有冲突的资源变成连续无冲突的资源流

网络化干扰管控—网络化干扰管控算法

■ 提出了自学习干扰管控算法，动态适配网络的干扰环境



■ 依据时变网络环境和干扰分布特征，以**网络效用**为优化目标，自主选择**干扰避免、干扰转移、干扰消除、干扰对齐**策略。

提 纲

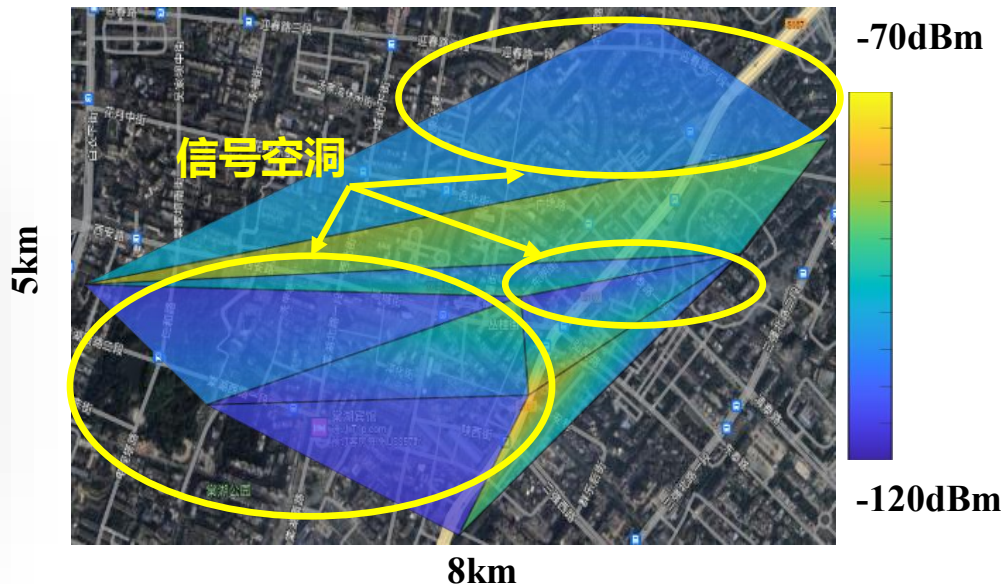
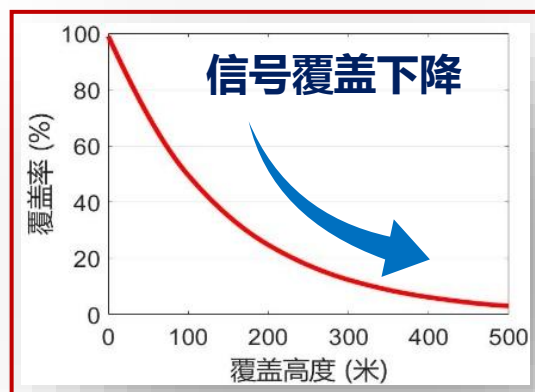
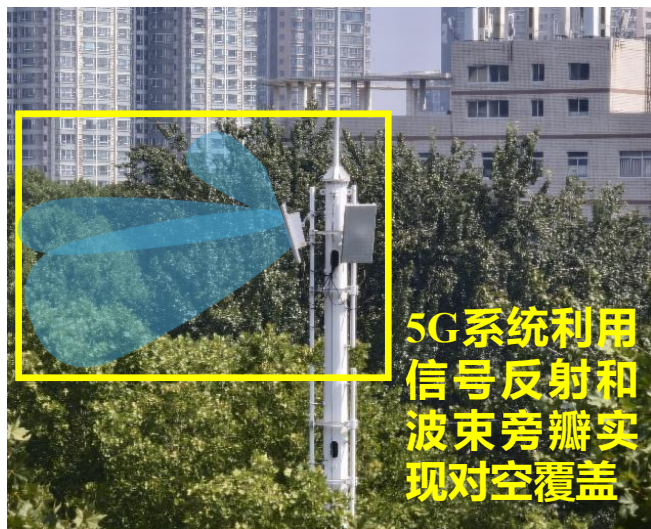
- 密集深度覆盖瓶颈问题
- 无线广域立体覆盖体系
 - 超密覆盖技术
 - 超高覆盖技术
 - 超远覆盖技术
- 超低能耗致密覆盖技术

超高覆盖技术—地对空覆盖的困境

■ 从平面密集覆盖向立体致密覆盖 (应用: 6G空天地融合和低空经济)

低空立体空间资源严重不足
(低空覆盖受旁瓣影响较大, 邻区关系复杂)

300m以下低空区域的信号覆盖率不足50%
(2023年12月长安区低空覆盖实测结果)



现有地面无线通信系统部署之初并非针对低空覆盖设计,
实测*: 覆盖高度每增加100米, 信号覆盖率下降1倍

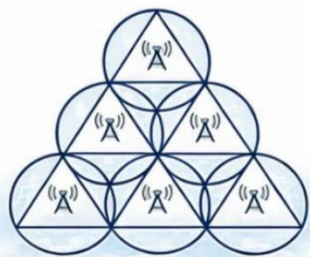
使用5G平面覆盖技术, 100m-300m低空区域管控信号覆盖空洞
遍布, 立体空间服务连续性难保障, 无法支持无人机飞控

超高覆盖技术—多棱柱覆盖结构

■ 提出了最佳立体覆盖结构

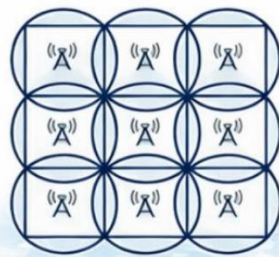
平面覆盖
结构性能

三角形平面覆盖



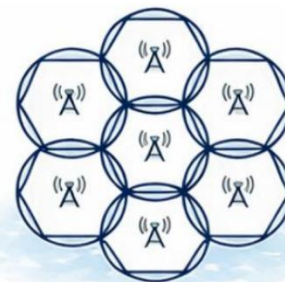
重叠覆盖率: 58.65%

四边形平面覆盖



重叠覆盖率: 36.34%

六边形平面覆盖



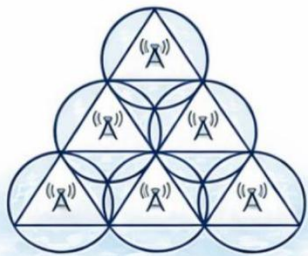
重叠覆盖率: 17.35%

超高覆盖技术—多棱柱覆盖结构

■ 提出了最佳立体覆盖结构

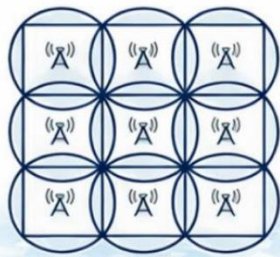
平面覆盖
结构性能

三角形平面覆盖



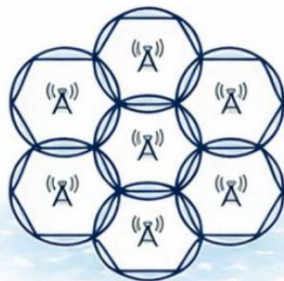
重叠覆盖率: 58.65%

四边形平面覆盖



重叠覆盖率: 36.34%

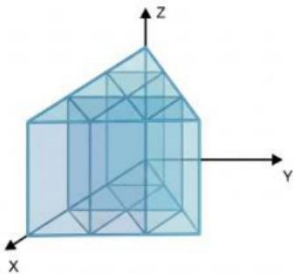
六边形平面覆盖



重叠覆盖率: 17.35%

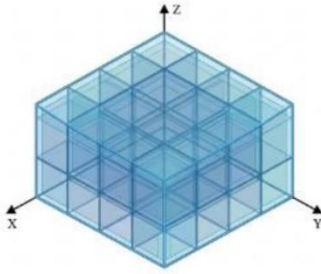
立体覆盖
结构性能

三棱柱立体覆盖



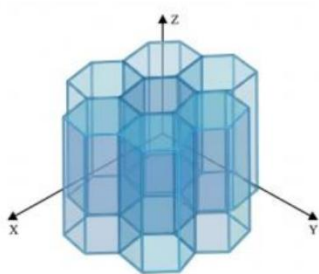
重叠覆盖率: 12.33%

四棱柱立体覆盖



重叠覆盖率: 58%

六棱柱立体覆盖

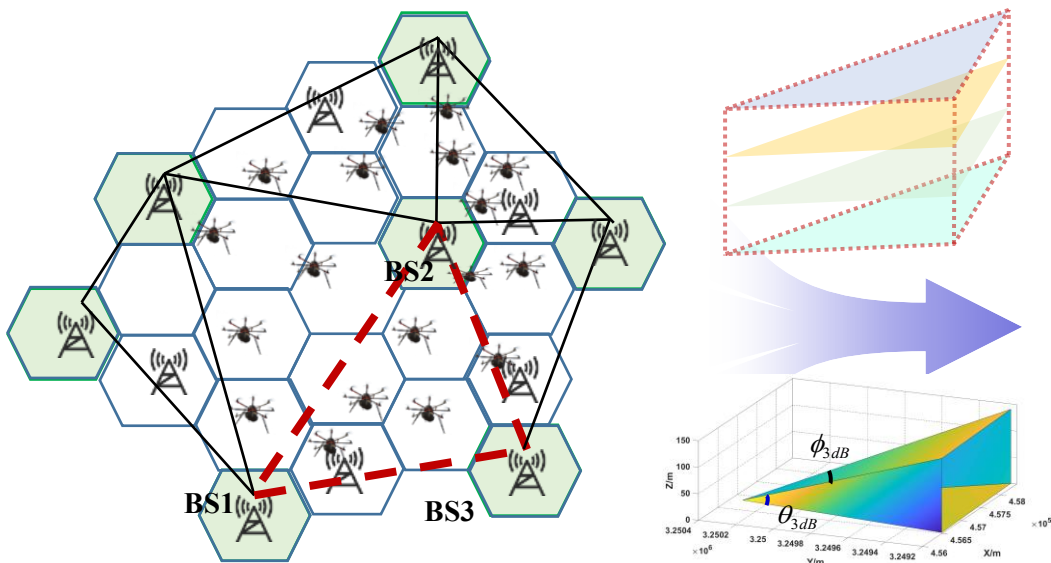


重叠覆盖率: 25.33%

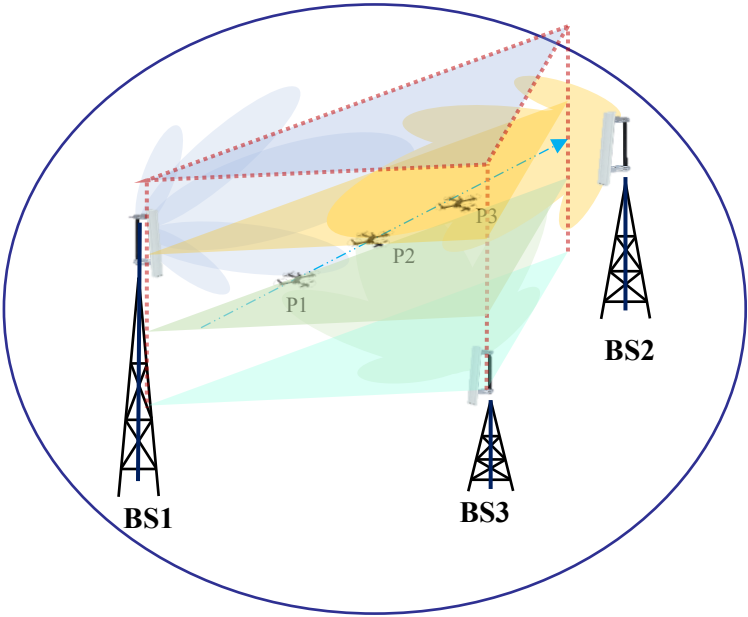
超高覆盖技术—多棱柱生成方法

■ 提出了立体覆盖结构和波束生成方法，消除了覆盖空洞和重叠干扰

◆ 资源小区生成立体覆盖结构



基站波束



单个三角柱分层覆盖结构

新增场景化波束

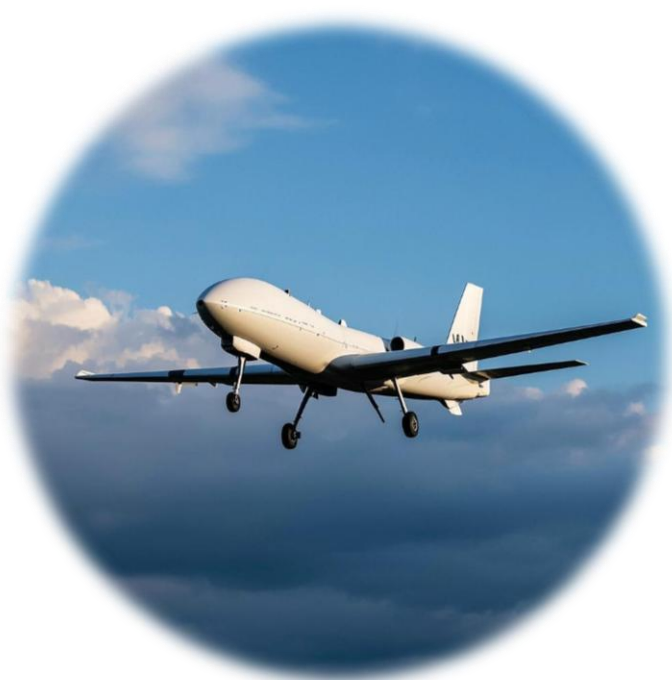
地对空场景化波束	水平3dB波宽	垂直3dB波宽	倾角可调范围
场景_17	60°	6°	-20°~10°
场景_18	120°	6°	-9°~5°
场景_19	60°	15°	-20°~10°
场景_20	120°	15°	-9°~5°

地对空延展场景化波束

基于三角柱覆盖结构和业务需求，采用凸多边形剖分，将覆盖区域划分为多个资源小区

超高覆盖技术—立体覆盖标准

- 联合中国移动，形成IEEE P1937.12
立体覆盖标准，已正式发布



IEEE SA STANDARDS ASSOCIATION



IEEE SA Standards Board Standards Review Committee (RevCom)
Recommendations

[SASB approval date: 12-Feb-2025]
[All votes unanimous unless noted otherwise.]

New

IEEE Communications Society/Unmanned Aerial Vehicles Communications Standards Committee
P1936.5/Draft 7.1
IEEE Draft Standard for Technical Requirements for Intelligent Hangar Housing Unmanned Aircraft Systems Used for Power Grid Inspection
Recommendation: APPROVE [9=yes, 0=no, 1=recuse (Lu)]

P1937.12/Draft 4.1
IEEE Draft Standard for Technical Requirements for Emergency Cellular Communication System Based on Fixed-Wing Unmanned Aircraft System
Recommendation: APPROVE [9=yes, 0=no, 1=recuse (Lu)]

IEEE Computer Society/Artificial Intelligence Standards Committee
P3110/Draft 7
IEEE Draft Standard for Computer Vision (CV) - Technical Requirements for Algorithms Application Programming Interfaces (APIs) of Deep Learning Framework
Recommendation: APPROVE

P3127/Draft 08
IEEE Draft Guide for an Architectural Framework for Blockchain-based Federated Machine Learning
Recommendation: APPROVE

P3128/Draft 2
IEEE Draft Recommended Practice for The Evaluation of Artificial Intelligence (AI) Dialogue System Capabilities
Recommendation: APPROVE

P3198/Draft 3
IEEE Draft Standard for Evaluation Method of Machine Learning Fairness
Recommendation: APPROVE

P3350/Draft 3
IEEE Draft Recommended Practice for Improving Generalizability of Artificial Intelligence for Medical Imaging
Recommendation: APPROVE

P3410/Draft 6
IEEE Draft Guide for Large Scale Financial Risk Models
Recommendation: APPROVE

IEEE Computer Society/Blockchain and Distributed Ledgers
P3230.03/Draft 4.2
IEEE Draft Standard for Blockchain Service Capability Evaluation
Recommendation: APPROVE

IEEE Computer Society/Cybersecurity and Privacy Standards Committee
P2883.1/Draft 17
IEEE Draft Recommended Practice for Use of Storage Sanitization Methods
Recommendation: APPROVE

IEEE Computer Society/Data Compression Standards Committee
P3184.1/Draft 4
IEEE Draft Standard for Joint Calibration Framework of Multiple Roadside Sensors
Recommendation: APPROVE

IEEE Computer Society/Design Automation
P1666-2023_Cor 1/Draft 1
IEEE Standard for Standard SystemC® Language Reference Manual - Corrigendum 1
Recommendation: APPROVE

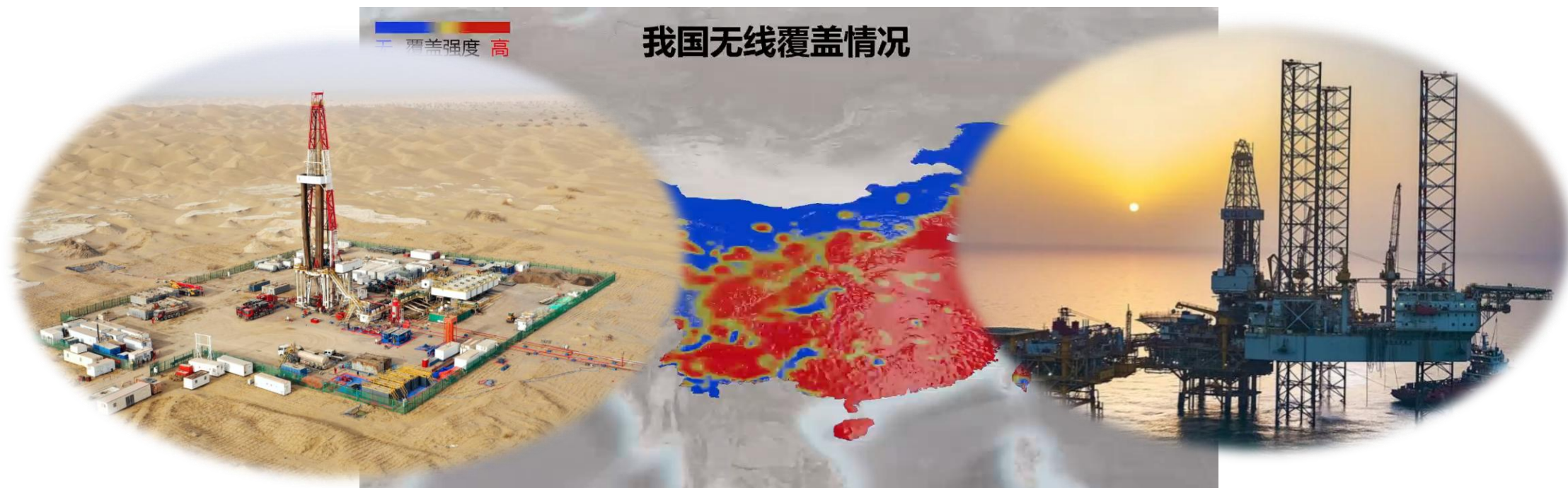
IEEE Computer Society/LAN/MAN Standards Committee
P802.1Qdy/Draft 2.2
IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Bridges and Bridged Networks -Amendment 40: YANG for the Multiple Spanning Tree Protocol

提 纲

- 密集深度覆盖瓶颈问题
- 无线广域立体覆盖体系
 - 超密覆盖技术
 - 超高覆盖技术
 - 超远覆盖技术
- 超低能耗致密覆盖技术

超远覆盖技术—移动通信盲区

- 在塔里木盆地、渤海油气田等人烟稀少的远距离极端环境下无移动通信覆盖



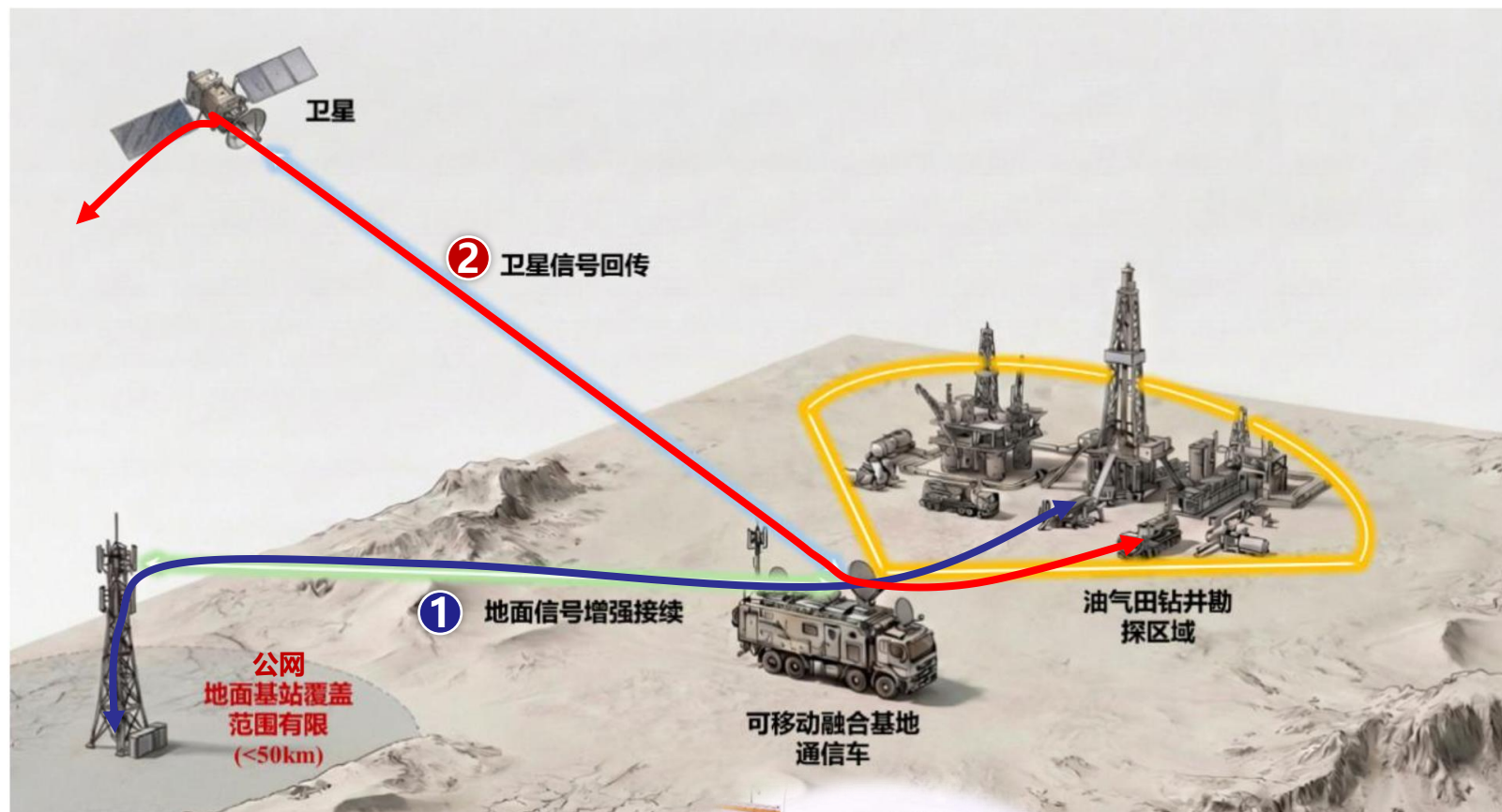
用地面固定蜂窝基站进行覆盖成本昂贵、效率低下

超远覆盖技术—多种接续模式

■ 提出了地面接续、卫星接续、星+地协同并传接续等模式

① 地面接续模式

② 卫星接续模式



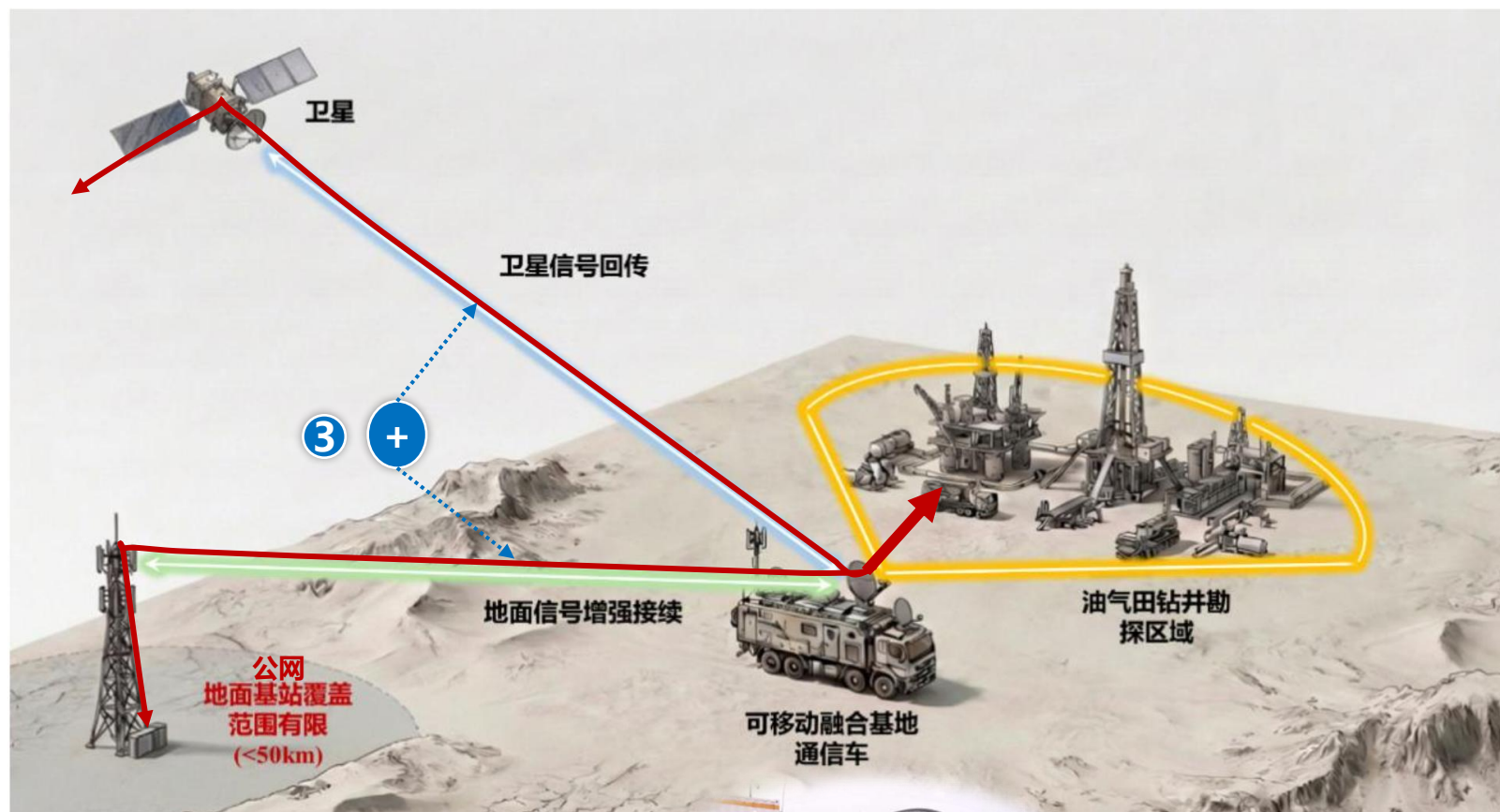
超远覆盖技术—多种接续模式

■ 提出了地面接续、卫星接续、星+地协同并传接续等模式

① 地面接续模式

② 卫星接续模式

③ 星地协同接续模式



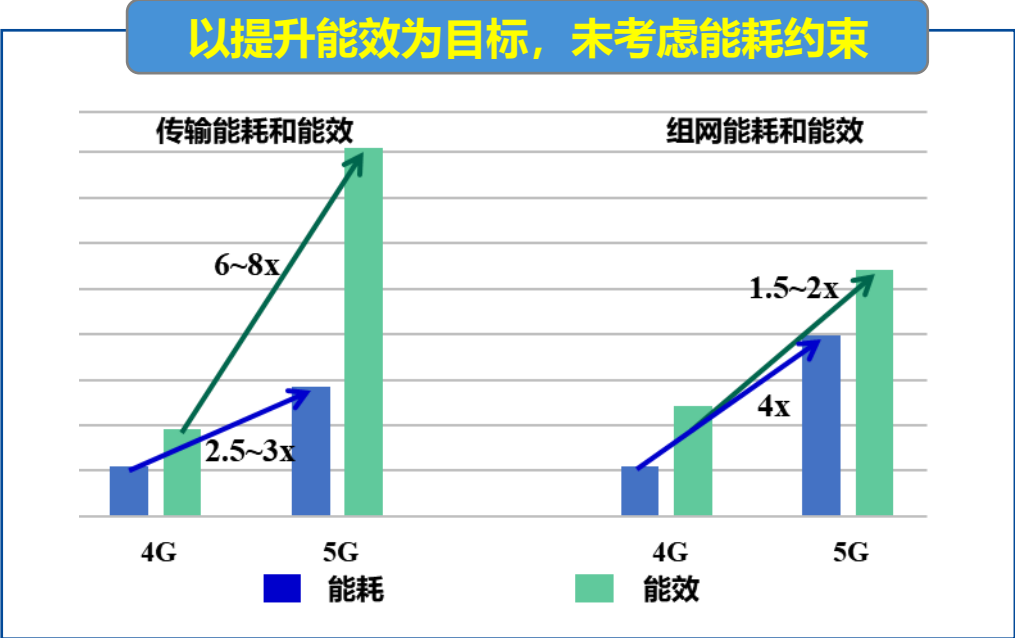
提 纲

- 密集深度覆盖瓶颈问题
- 无线广域立体覆盖体系
 - 超密覆盖技术
 - 超高覆盖技术
 - 超远覆盖技术
- 超低能耗致密覆盖技术

超低能耗致密立体覆盖技术

■ 现有无线移动通信系统能耗问题分析

4G/5G系统典型参数对比 ^[*]		
传输功率/带宽	4G LTE (40W@20MHz)	5G NR (240W@100MHz)
天线	8T8R	64T64R
基带功率 (W)	150	220
RRU功率 (W)	950	4077
总功率 (W)	1100	4297
吞吐量 (Mbps)	120	1963



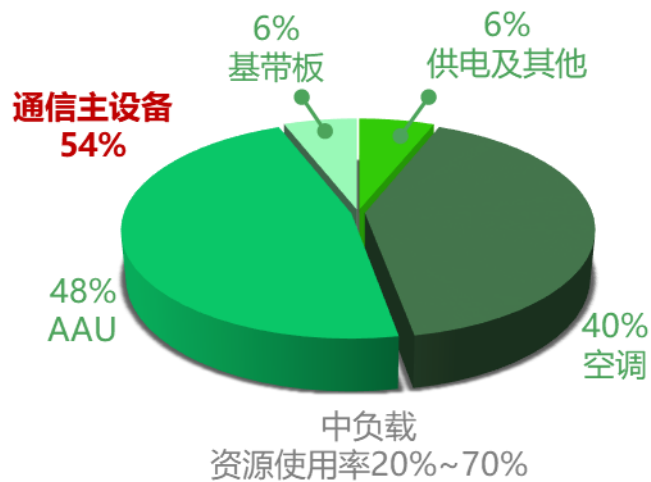
- ◆ 5G相较于4G在能效方面提升16倍以上，但由于单站能耗提升，部署密度增加，5G移动通信系统总体能耗相较于4G移动通信系统总体能耗增加约12倍以上，导致高能效和高能耗并存

拟解决的科学问题：探索耗能演变规律→实现超低能耗覆盖

[5] I, CL., Han, S. & Bian, S. Energy-efficient 5G for a greener future. Nat Electron 3, 182–184 (2020).

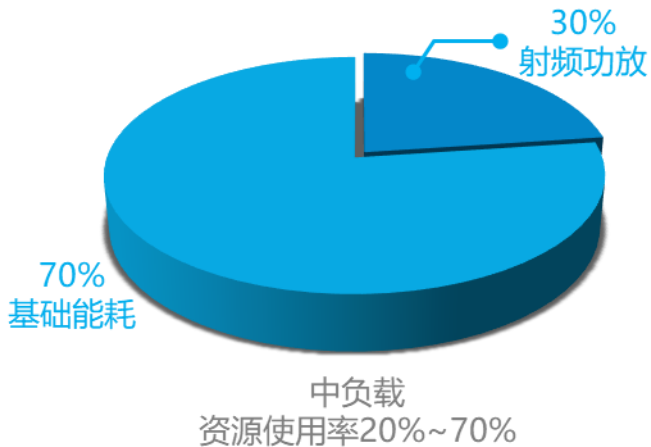
超低能耗致密立体覆盖技术

■ 无线移动通信系统基础能耗分布



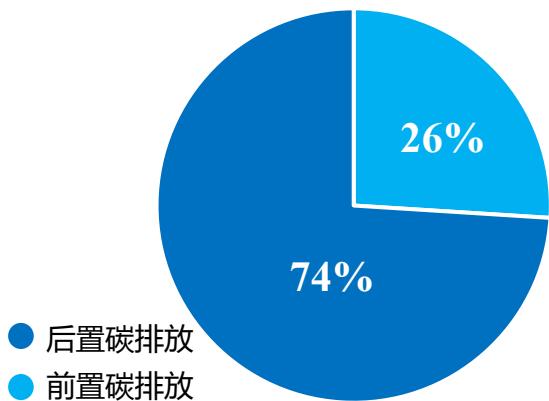
全宏站场景（郊区、农村）

基站**密度低** ($0.4\sim1$ 个/ km^2)，以维持网络广覆盖为主，单站功率较高 ($2\sim3\text{kW}$)



全微站场景（办公楼、高层住宅楼）

基站**密度极高** ($10^3\sim10^4$ 个/ km^2)，以提供大容量业务服务为主，单站功率低 ($35\sim70\text{W}$)



2030年（绿能占比52.5%）

通信网络的**碳排放**构成主要包括：设备生产部署碳排放（前置）、设备运行碳排放（后置）

超低能耗致密立体覆盖技术

■ 无线移动通信系统运行能耗分布

◆ 典型业务场景

	典型业务场景	主要能力KPI	网络场景	能耗来源	
扩展	沉浸式通信	峰值数据速率、 频谱效率	微站	需要满足大容量业务，完成大量的数据传输， 能耗主要来源于大量通信资源占用	通信
	海量通信	连接密度	宏站/微站	需要支持大量设备的连接和数据回传， 能耗主要来源于大量信令的交互	
	超可靠低延迟通信	可靠性、时延	宏站	需要保证高可靠性和低延迟， 能耗主要来源于大量冗余通信资源占用	
新增	泛在连接	覆盖范围	宏站	需要满足远距离覆盖， 能耗主要来源于使用较大的发射功率	计算 感知
	AI与通信融合	AI相关能力	宏站/宏微结合	需要处理大量的AI计算任务， 能耗主要来源于AI模型的训练和推理	
	感知与通信融合	感知相关能力	宏站/微站/宏微结合	需要感知环境并进行相应的通信资源调整， 能耗主要来源于感知资源使用和数据处理	

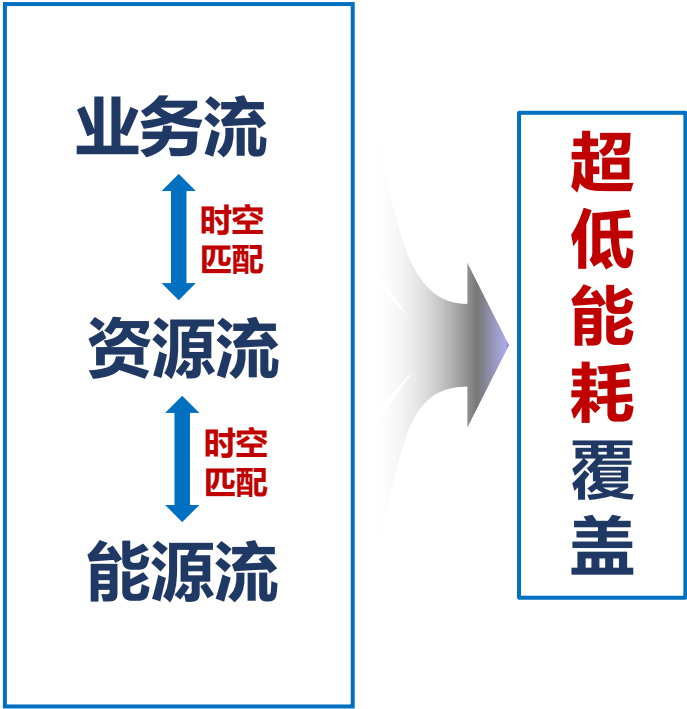
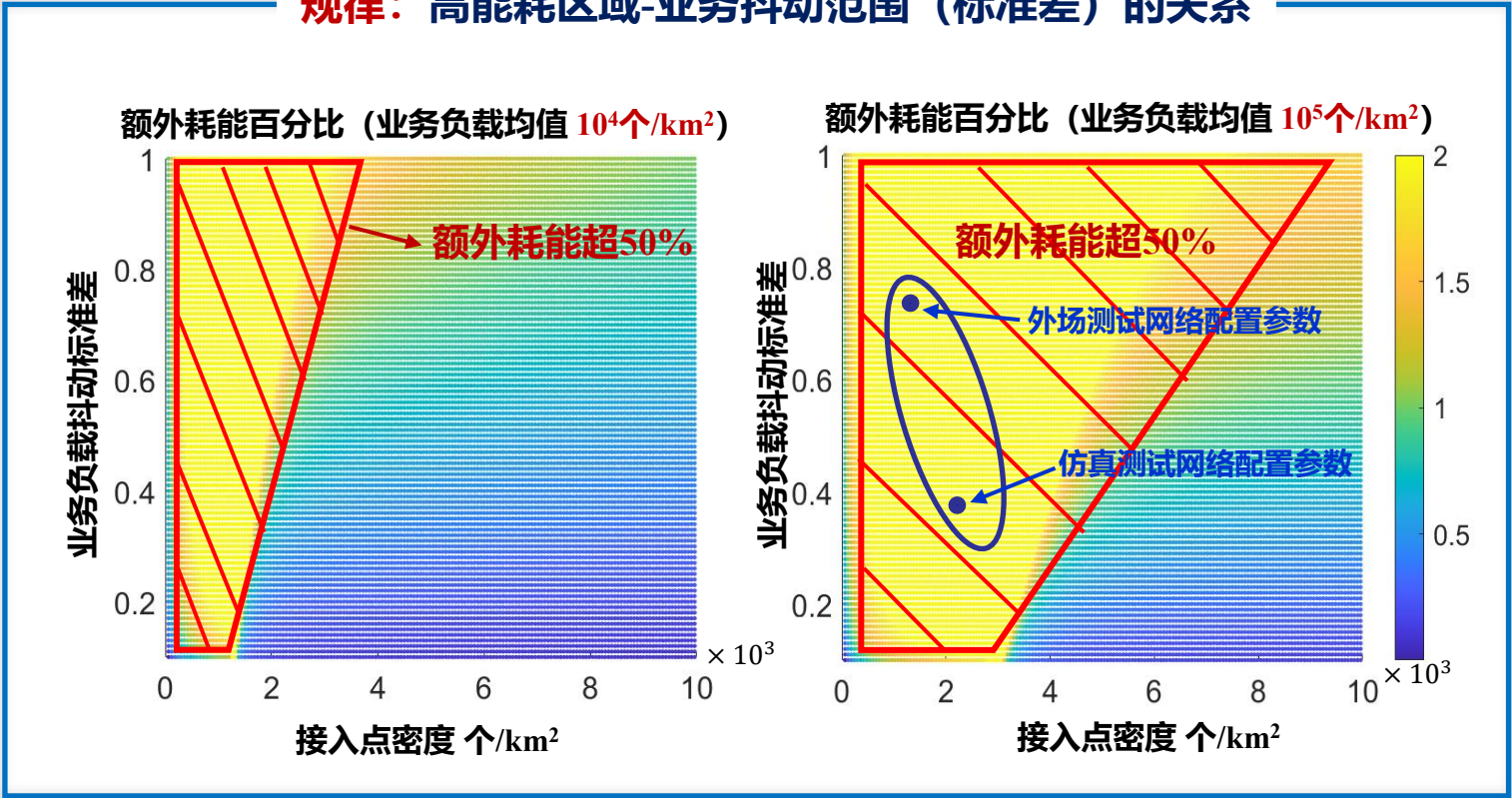
通信主要能耗来源于大容量数据传输需求及大范围网络覆盖需求，

未来大量AI计算和感知也会带来大量能耗

超低能耗致密立体覆盖技术

■ 揭示了能耗随业务变化的规律

规律：高能耗区域-业务抖动范围（标准差）的关系



面向超低能耗覆盖的需求，实现业务流-资源流-能源流时空上按需匹配

超低能耗致密立体覆盖技术

■ 建立了评价“双碳”性能的指标体系

- ◆ 将以“比特能耗”为中心的单一能耗KPI指标扩展到以“服务能耗”为中心的分层“双碳”KPI指标体系，引导网络结构从提供“更好服务”向“按需服务”转变



分层“双碳”KPI指标体系

无线通信系统节能减排关键技术白皮书

西安电子科技大学、华为技术有限公司、中国科学技术大学、
西北工业大学、上海大学、清华大学、复旦大学、东南大学、
北京邮电大学、华中科技大学、中国移动陕西分公司、
中国信息通信研究院

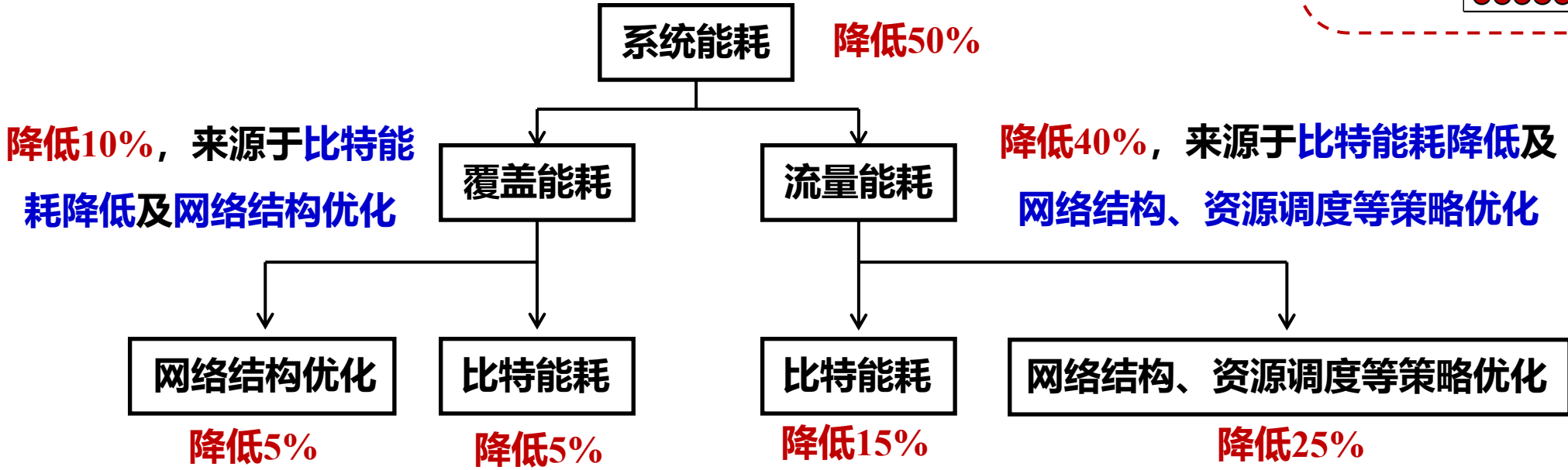
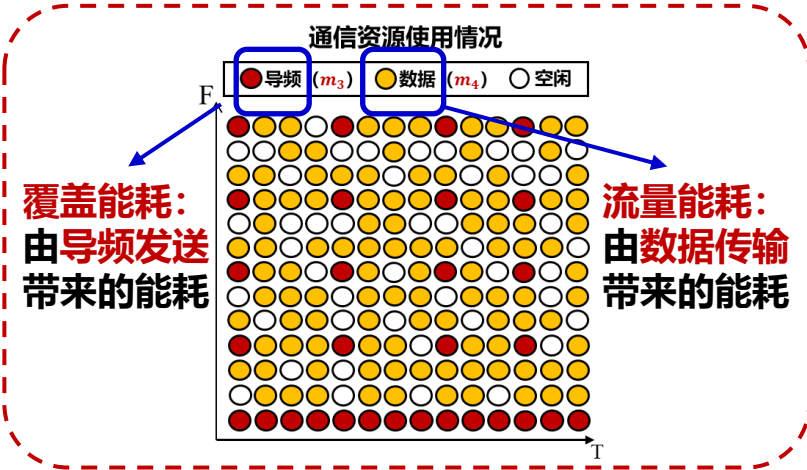
2024.10.24

超低能耗致密立体覆盖技术

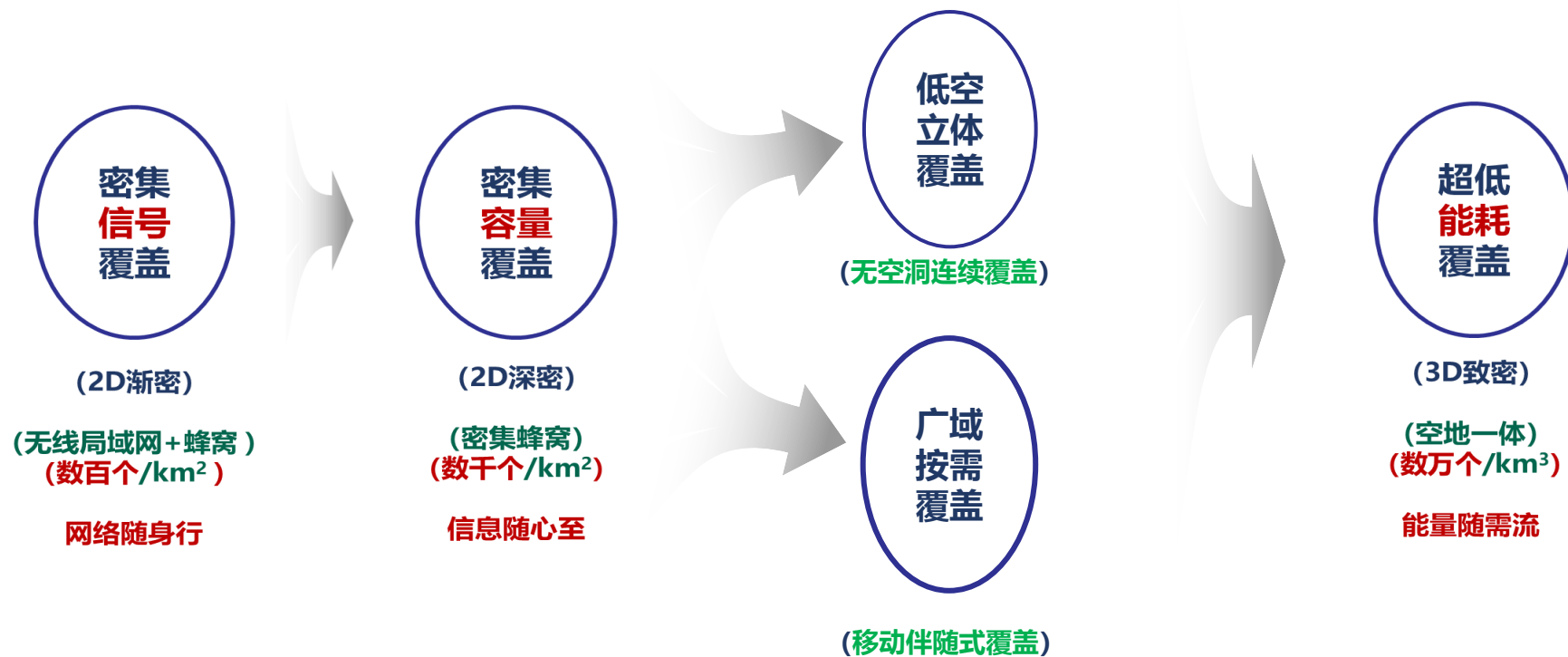
■ 提出了超低能耗覆盖性能指标分配方法

$$EC = \sum_{n_2} \left[\underbrace{E^{cover}}_{\text{覆盖能耗}}(NET, RSRP, \underbrace{E^{trans}}_{\text{传输能耗}}) + \underbrace{E^{traffic}}_{\text{流量能耗}}(NET, RB, \underbrace{E^{trans}}_{\text{传输能耗}}) \right]$$

系统能耗



总结



广域立体密集无线移动通信覆盖体系

总 结

- 探索了逼近密集无线系统容量和低能耗极限的**基本规律和方法**
- 提出了突破平面蜂窝覆盖局限，向超密、超高、超远立体按需覆盖发展的创新方法，建立了**无线广域立体覆盖体系**
- 指出了**超低能耗致密立体覆盖**是无线通信系统发展的**重大挑战**

敬请批评指正！