



5G+工业互联网应用技术和产业发展高级研修班

空天地一体化网络 赋能数字化转型

雒江涛

重庆邮电大学电子信息与网络工程研究院

2023.8.23



空天地一体化的背景



空天地一体化的必要性



数字化转型应用场景



空天地一体化面临的挑战



空天地一体化关键技术



从 6G 愿景和指标谈起

□ 2023 年 6 月 22 日，ITU-R 完成 IMT-2030 (6G) 推荐框架

□ 应用场景新增

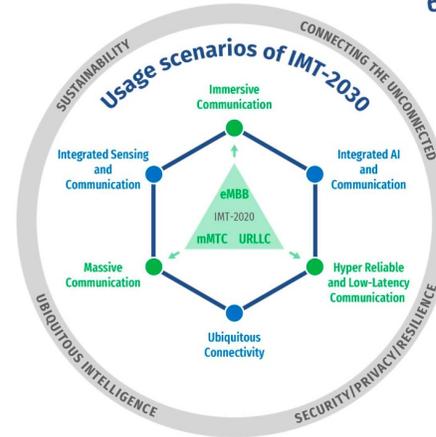
- 通感一体 (Integrated sensing and Communication)
- 智通融合 (Integrated AI and Communication)
- 泛在连接 (Ubiquitous Connectivity)

□ IMT 2030 能力集 (性能指标)

- 增强能力
- 新增能力

<https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2030/>

Usage scenarios



So called "Wheel diagram"

"wheel diagram"

6 Usage scenarios

Extension from IMT-2020 (5G)

- eMBB → Immersive Communication
- mMTC → Massive Communication
- URLLC → HURLLC (Hyper Reliable & Low-Latency Communication)

New

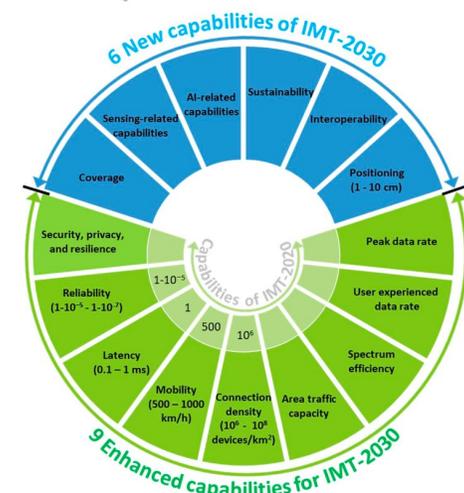
- Ubiquitous Connectivity
- Integrated AI and Communication
- Integrated Sensing and Communication

4 Overarching aspects:

act as design principles commonly applicable to all usage scenarios

Sustainability, Connecting the unconnected, Ubiquitous intelligence, Security/privacy/resilience

Capabilities of IMT-2030



新增能力

增强能力

"palette diagram"

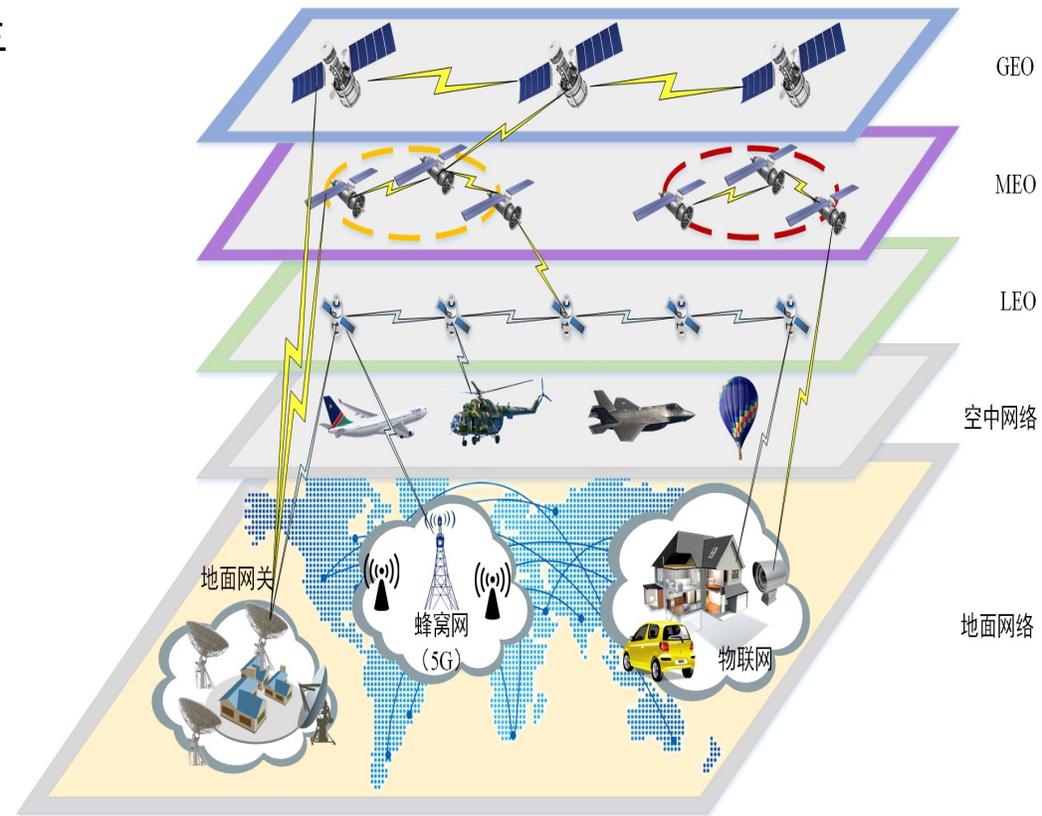


空天地一体化网络的组成

雒江涛 2023

4

- **天基 (Space)** : 卫星网络由卫星、星座以及相应的地面基础设施(例如地面站和网络运营控制中心等)组成。
 - 地球同步轨道(GEO)卫星 : 天基骨干网
 - 近地轨道(LEO)卫星 : 天基接入网
 - 空间站、飞船等航天装备
- **空基 (Air or Sky)** : 浮空平台、飞行器等等
- **地基 (Ground)** : 主要地面信息港、陆地移动通信网络、互联网等 ;
- **其他域** : 深空、海洋等



空天地海等一体化网络既是未来网络的基本形态，也是主要的应用场景

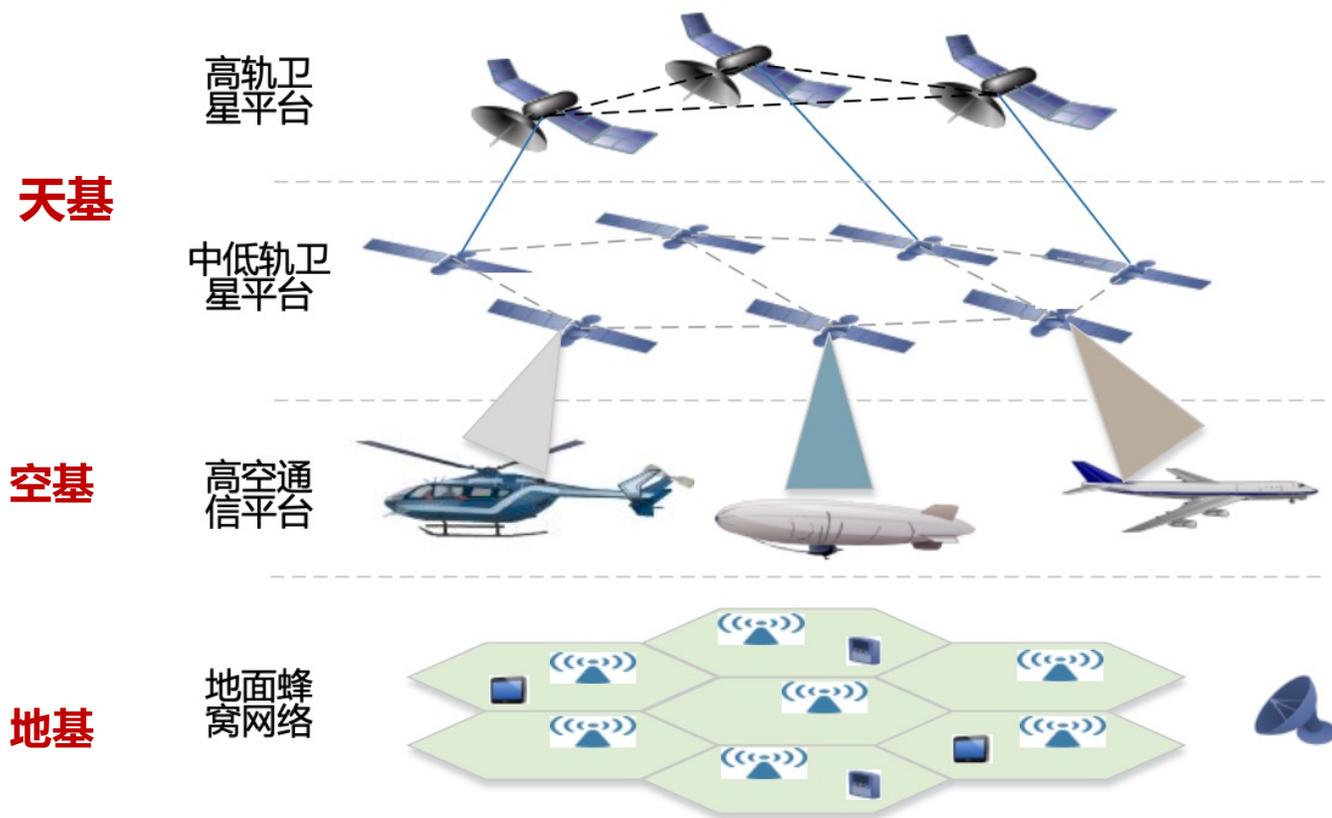


何为“一体化”？

雒江涛 2023

5

- 空天地一体化基本特点
 - 天基、空基、地基网络**统一规划**
 - **统一的空口技术和核心网架构**
 - **多层次覆盖，相互协作提供多重业务类型，提高效率**
 - 无感、极简的**泛在接入**
 - 端到端的**统一编排调度**



特别是效率，远未达到！

《中国联通空天地一体化通信网络白皮书》，2020.06



目前是什么状态？

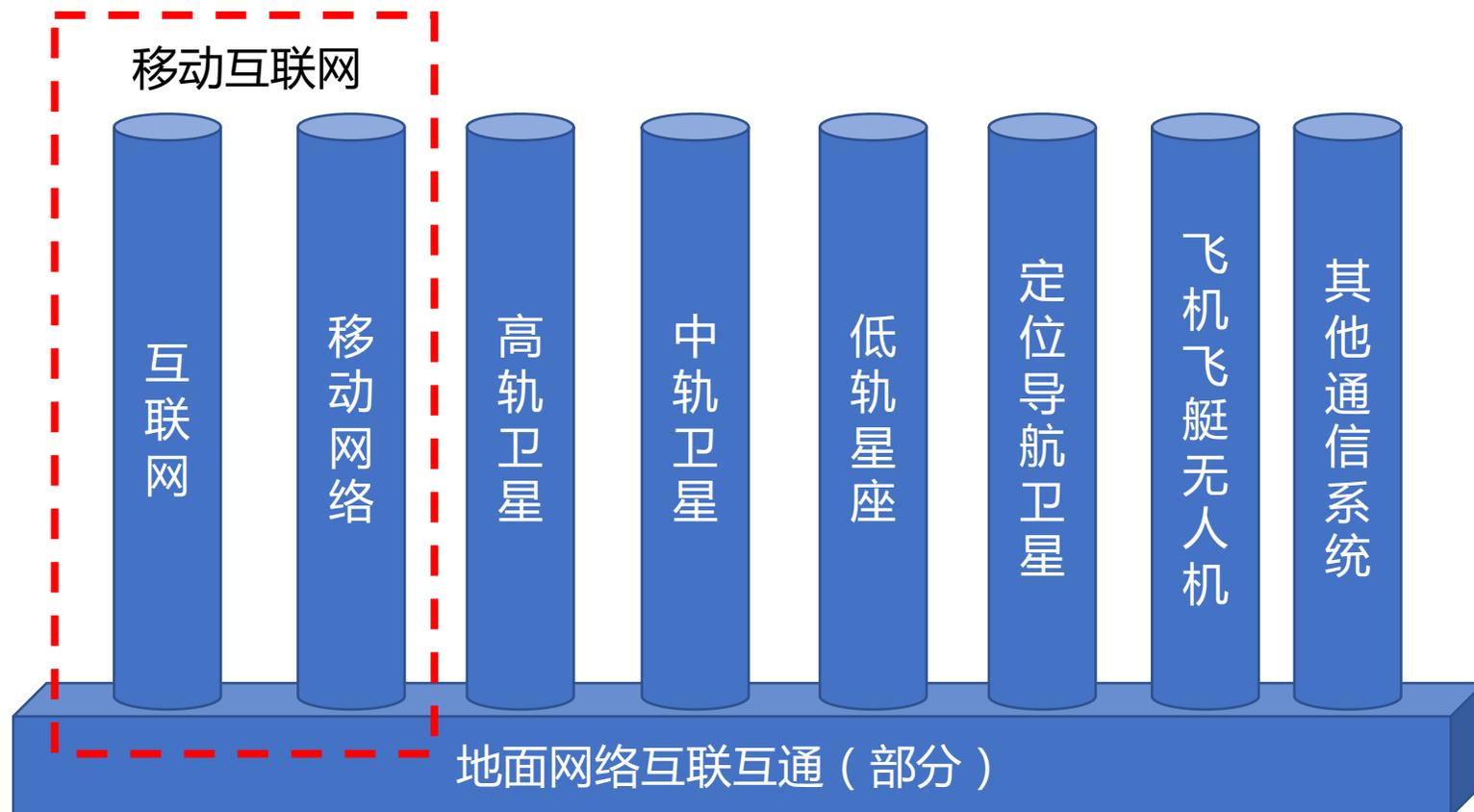
雄江涛 2023

6

□ 目前是“烟囱式”加“有限互联互通”

移动互联网有些一体化的影子或雏形

- 互联网为移动网提供传输承载
- 移动网为互联网提供接入和业务承载 (OTT)



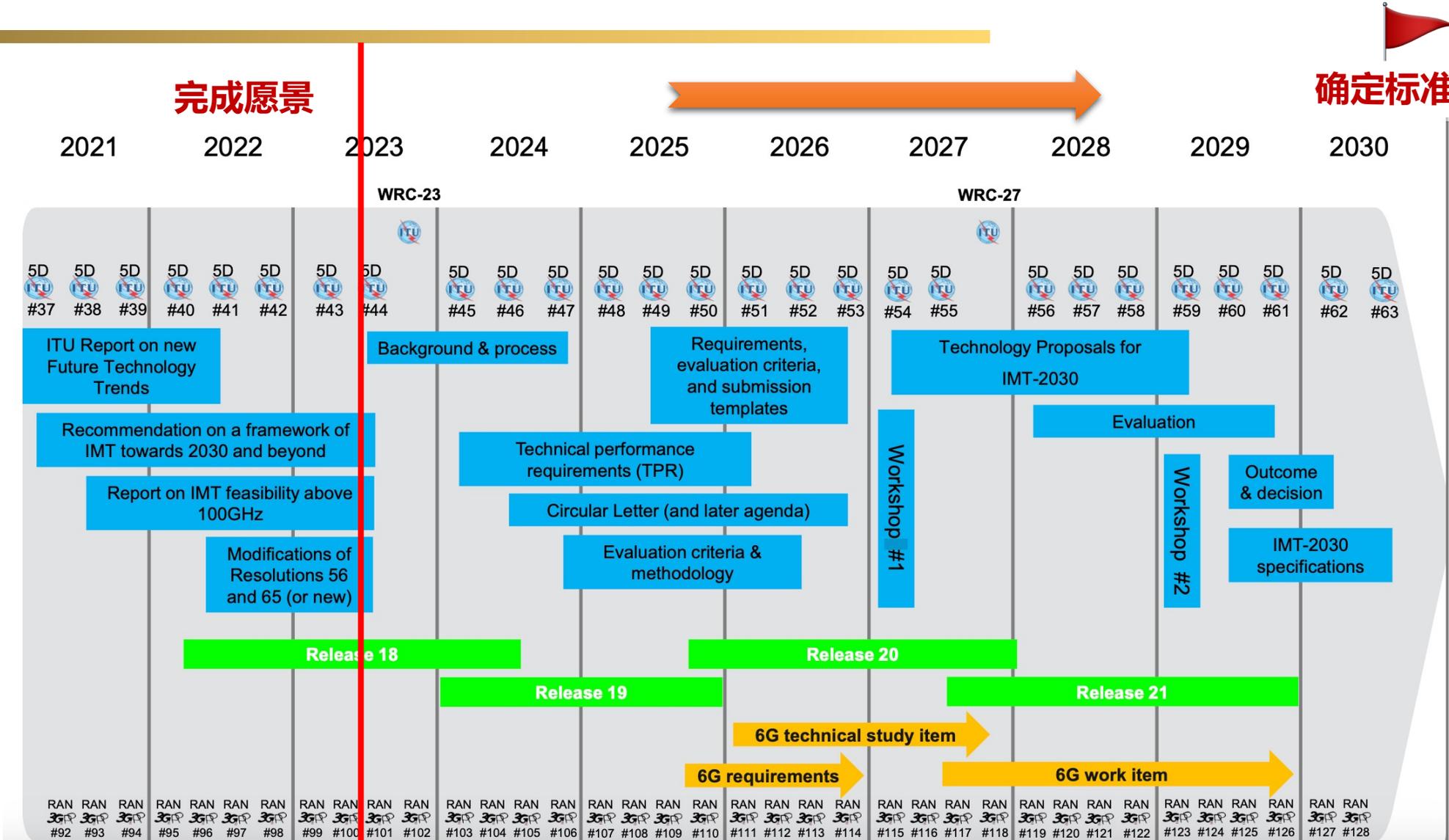
通过一体化，让组合效率最高



ITU-T/3GPP 6G 发展时间表

雒江涛 2023

7



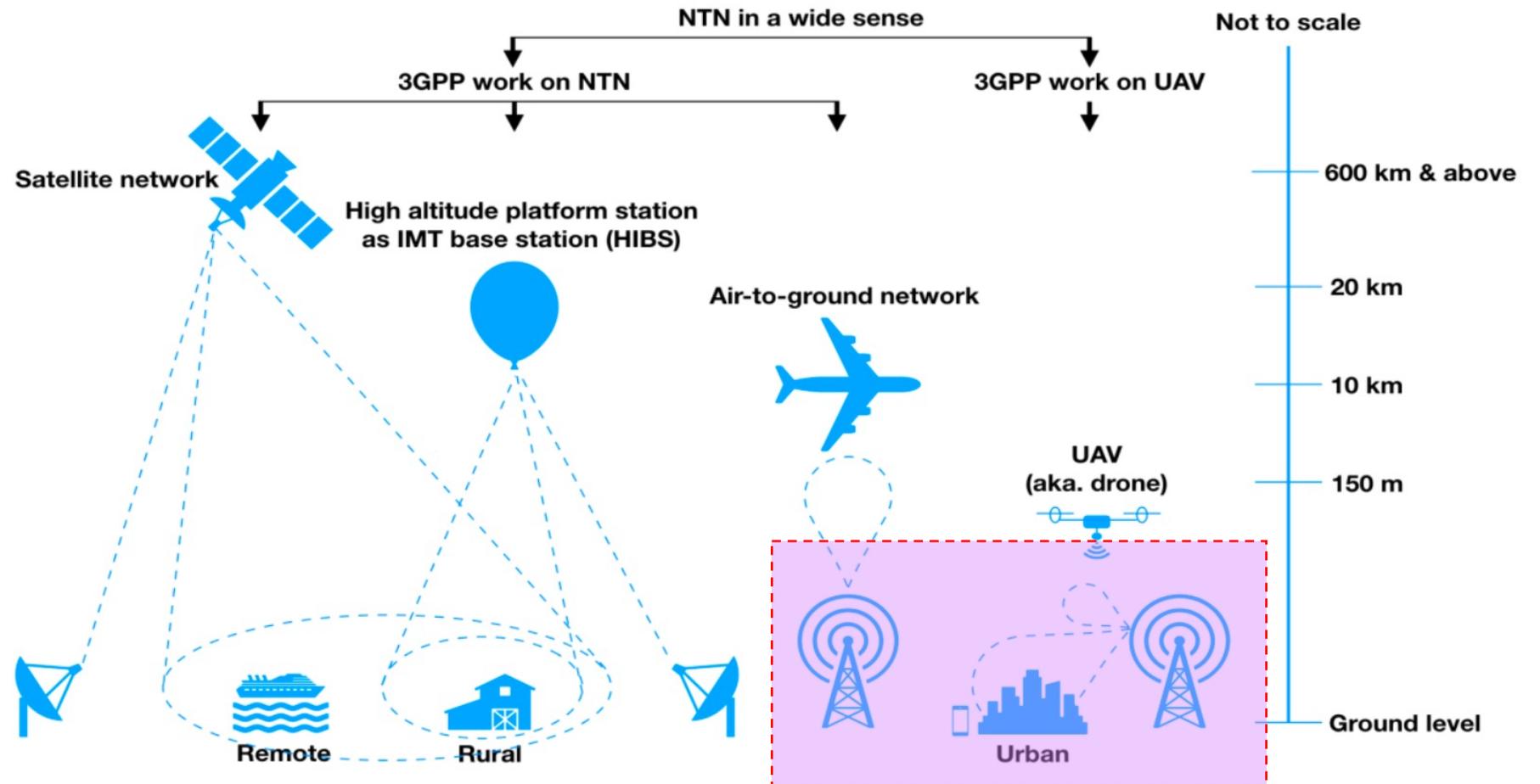


3GPP: 非陆地网络 NTN

雒江涛 2023

8

- 开始于 2017 R15，开始研究 NR NTN（Non-Terrestrial Networks，非陆地网络）



Xingqin Lin, et al., 5G from Space: An Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks, arXiv:2103.09156, Mar 2021

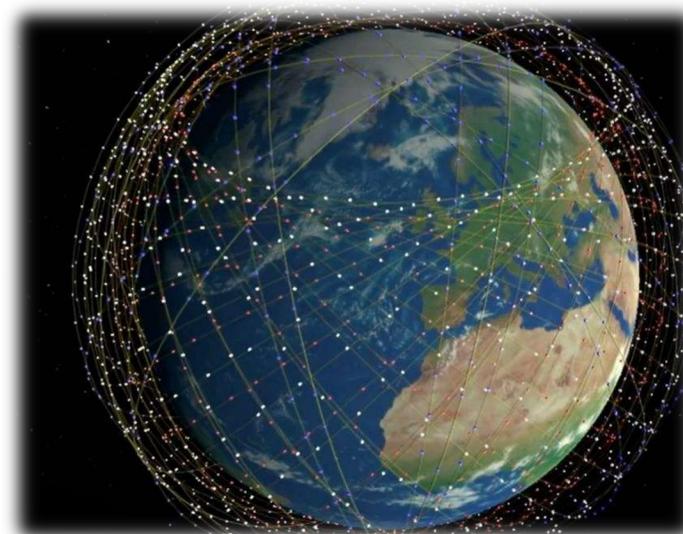


硅谷狂人马斯克与星链 (Starlink)

雒江涛 2023

9

- SpaceX 计划在2025年前发射 **1.2 万多** 颗卫星组成低轨卫星 **Starlink** 网络
- 2019 .05 , 首枚 “一箭60星” 火箭携带 60 颗Starlink卫星发射，拉开组网序幕。
- **2020. 06. 03** (当地时间) , SpaceX 第 **8** 批 “**一箭60星**” 发射成功，已将 **480 +2** 颗卫星送入轨道。
- 2022.07 , 在 **36** 个国家和地区提供服务。
- **2023.08.08** , 卫星发射数量 4918 , 失效或离轨 373 , 在轨 **4576** , 可用 4545 , 运营 3818.



Elon Musk, Tesla 和 SpaceX CEO

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Starlink_and_Starshield_launches



国际卫星互联网现状：主要星座

雒江涛 2023

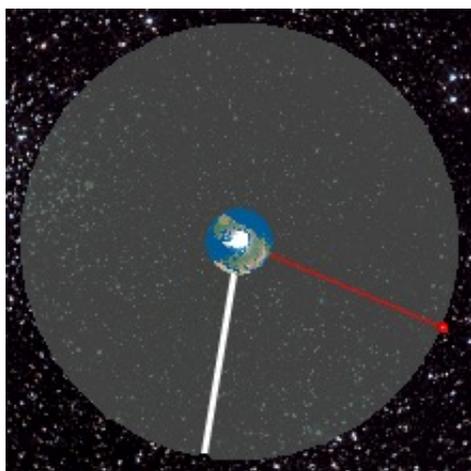
10

星座	卫星数量	轨道高 (km)	工作频段	星间链路	全球服务能力	支持业务	传输能力	已发射数量
Iridium Next	66	780	Ka/L	有	支持	移动通信、宽带通信、ADS-B、导航增强、物联网	移动：1.5Mbit/s 以下； 宽带：8Mbit/s	66
Global Star	48	1414	C/L,S	无	支持	语音通话、数据传输	语音：2.4/4.8/9.6kbit/s 数据：7.2kbps	42
Orbcomm	约47	740-975 (二代)	VHF/UHF	无	服务接近全球	短数据传输、AIS 数据 (星上存储转发)	一代：2.4kbit/s (上行) /4.8kbit/s (下行)； 二代：能力提升4 倍以上	35
O3b	60	8,062 (MEO)	Ka	暂无	支持	宽带服务	500Mbit/s	16颗
OneWeb (英国)	720	1200	Ka/Ku	暂无	支持	宽带互联网接入	上行：50Mbit/s 下行：100Mbit/s	648 (2023.05)
Starlink (美国 SpaceX)	4425+ 7518	340-550-1150	Ka / Ku, Laser	有 (1.5+)	支持	宽带互联网接入	1 Gbit/s	4918 (2023.8)
TeleSat (加拿大)	约117	1000	Ka	有	支持	宽带互联网接入	上行：50Mbit/s 下行：10Mbit/s	已发首颗 (规划 188)
Kuiper (Amazon)	3236	590, 610, 630	-	-	-	宽带互联网接入	-	0 (预计 2023.9.26 2颗原型)

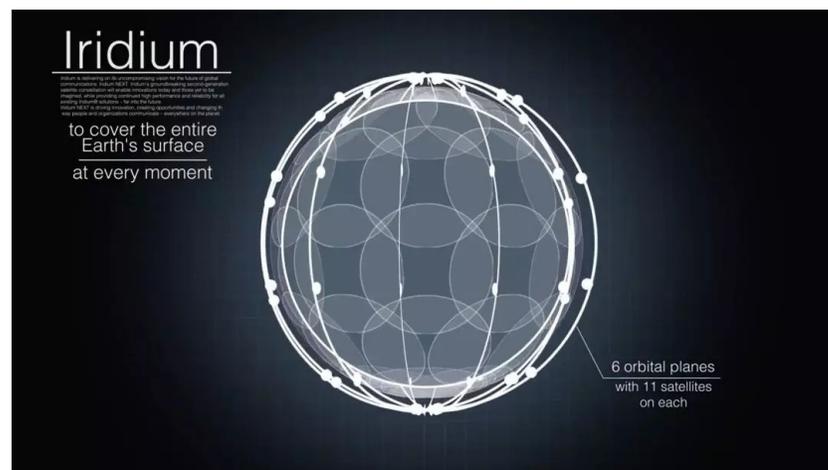


什么是卫星互联网？

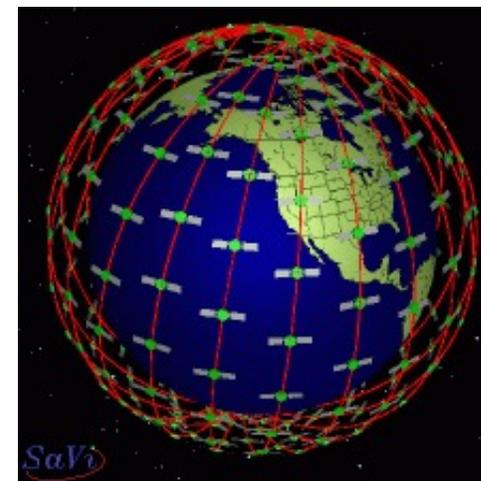
- **卫星互联网**是基于**卫星通信的互联网**。
- 过去的卫星通信系统：
 - 地球同步卫星GEO
 - 铱星系统（LEO）：提供**全球卫星**语音和**低速数据业务**
- 卫星互联网：有时特指主要**基于LEO**实现的互联网服务
- 服务内容：
 - 向地面和空中终端提供**宽带互联网**；
 - **广覆盖，低延时、宽带化、“低成本”**。



地球同步卫星 GEO, 35,786 km



铱星系统、新铱星, 780 km



近地轨道卫星 LEO, 400~2000 km



国家卫星工程：百花齐放

雒江涛 2023

12

行云工程（航天科工） 80颗卫星，LEO轨道

时间	进程
2017.01	“行云实验一号”入轨
2018.03	“行云工程”正式启动
α阶段 2020.05	“行云二号01星、如云二号02星”入轨
β阶段	实现小规模组网
γ阶段	实现全系统构建

鸿雁星座（航天科技） 300颗卫星，LEO轨道

时间	进程
2018.12	首颗实验星“重庆号”
2020.12	建成“2+4+2”系统
2022.12	一期60颗卫星组网运营
2023.12	建成窄带系统
2025.12	建成宽带系统

重大部署

天象星座
中电科集团
60颗综合+60颗宽带星
LEO轨道

时间	进程
2019.06	天象1星、2星入轨，构建开放式试验平台

天基联网星座（九天微星、中科天塔） 72颗卫星，LEO轨道

时间	进程
2018.12	瓢虫系列7颗卫星入轨
2021.12	部署12星、24星、72星

虹云工程（航天科工） 156颗卫星，LEO轨道

时间	进程
2018.12	首颗技术试验星“虹云武汉号”入轨
2020.12	发射4颗业务星，组成小星座
2025.12	实现156颗卫星组网运行

银河Galaxy卫星星座（银河航天） 650颗卫星，LEO轨道

时间	进程
2020.01	首发星“银河一号”入轨，在国内第一次验证Q/V/Ka频段通信

2019~2020



国家科技计划布局

雒江涛 2023

13

□ 863/973、国家科技支撑计划等都有布局

- 基于2G技术的天通一号卫星地面应用系统
- 基于 LTE 的地面验证系统

□ 国家重点研发计划 “宽带通信与新型网络” 重点专项 (2020)

- 3.1 面向天地一体化空间智能计算的卫星组网技术
- 3.2 面向天地一体化大规模星座超密组网系统设计及性能评估技术
-

□ 国家自然科学基金委联合基金

□ 科技创新2030重大项目- “天地一体化信息网络”

□ 国防科工与军民融合来源*

3. 卫星通信技术

3.1 面向天地一体化空间智能计算的卫星组网技术（共性技术类）

研究内容：为了进一步提升覆盖性能和快速响应能力，减少全球布站，下一代卫星通信网络应具备较强的在轨处理能力，能够高效地调度天基资源完成通信、组网和业务处理，实现在轨服务。面向多种垂直行业的智能通信服务保障需求，开展空间高效能、高性能、智能化组网和在轨服务技术研究，突破空间高性能异构分布式通信协议和业务处理、星地融合的网络虚拟化服务、空间移动边缘计算、通信载荷和资源的智能管控等关键技术，完成地面原型系统设计和演示验证。

考核指标：具备平台在轨自主运行管理能力；支持高低轨组

3.2 面向天地一体化大规模星座超密组网系统设计及性能评估技术（共性技术类）

研究内容：随着低成本小卫星技术的发展，星座规模不断扩大，空间超密组网对系统设计及性能评估提出了新的挑战，特别是在频谱资源管理、超密组网架构和协议设计、网络运行维护以及性能评估等方面。针对未来上万颗卫星构成的星座系统，开展多轨道大规模星座网络架构优化设计、宽窄结合/高低频结合的组网协议设计、协调用频和干扰管理、资源分配、高效运维、即插即用、性能评估等关键技术研究，研制半物理仿真演示验证系统。

考核指标：设计支持星座规模不小于10000颗；流量密度提升10倍；支持激光、毫米波和低频段；支持宽带、窄带等多种通信手段的综合利用和干扰管理；支持多种轨道的混合组网；建立完善的性能评估体系；仿真系统具备多种网络架构、协议、算法、



新基建：卫星互联网位列其中

雒江涛 2023

14

- 2020年4月20日，国家发改委召开新闻发布会，公开阐述“新基建”：
- **新型基础设施**，是以**新发展理念**为引领，以**技术创新**为驱动，以**信息网络**为基础，面向高质量发展需要，提供**数字转型**、智能升级、融合创新等服务的**基础设施**体系；
- “新基建”包括三大方面：**信息基础设施**、融合基础设施和创新基础设施；
- **卫星互联网**作为**通信网络基础设施**被纳入“新基建”范畴，成为国家**战略性工程**。



5G、
物联网、
工业互联网、
卫星互联网等

人工智能、
云计算、
区块链等

数据中心、
智能计算中
心等

通信网络
基础设施

新技术
基础设施

算力
基础设施

信息基础设施



星网集团：一统江湖

雒江涛 2023

15

- 2021年4月6日，中国卫星网络集团有限公司成立，简称“**中国星网**”
- 根据国务院国资委央企名录，中国卫星网络集团有限公司排名第**26位**，在中国电信、中国联通、中国移动与中国电子之间
- **高起点**谋划、**高标准**建设、**高质量**运行
- 业务：（**统筹和引领**）
 - 业务支撑及行业应用平台
 - 卫星运营服务
 - 网络系统集成服务
 - 综合信息服务





重庆力量：发力卫星互联网产业生态 雒江涛 2023 16

重庆市人民政府文件

重庆市人民政府
关于加快推进以卫星互联网为引领的
空天信息产业高质量发展的意见
渝府发〔2023〕7号

各区县（自治县）人民政府，市政府各部门，有关单位：
发展卫星互联网产业对重庆打造空天信息产业基地、推动产业转型升级意义重大。经研究，现就加快推进以卫星互联网为引领的空天信息产业高质量发展提出如下意见。

□ 2018年5月17日，我国首枚民营商用火箭“**重庆两江之星**”成功发射（零壹航天）

□ 2019.12.29，**中国星网应用公司**、**重庆星网系统院**揭牌

□ 2023.3.6，重庆市政府发布《关于加快推进以**卫星互联网**为引领的**空天信息**产业高质量发展的意见》：

重庆市政府发布《关于加快推进以**卫星互联网**为引领的**空天信息**产业高质量发展的意见》

- 2025年，构建**空天地一体化**、**通导遥深度融合**的**空天信息服务体系**，创建**国家级卫星互联网产业创新中心**；
- 计划到2030年，**全面建成卫星互联网综合应用示范区**，形成**千亿级空天信息产业集群**。

□ 2023.3.18，重庆数创园正式揭牌：

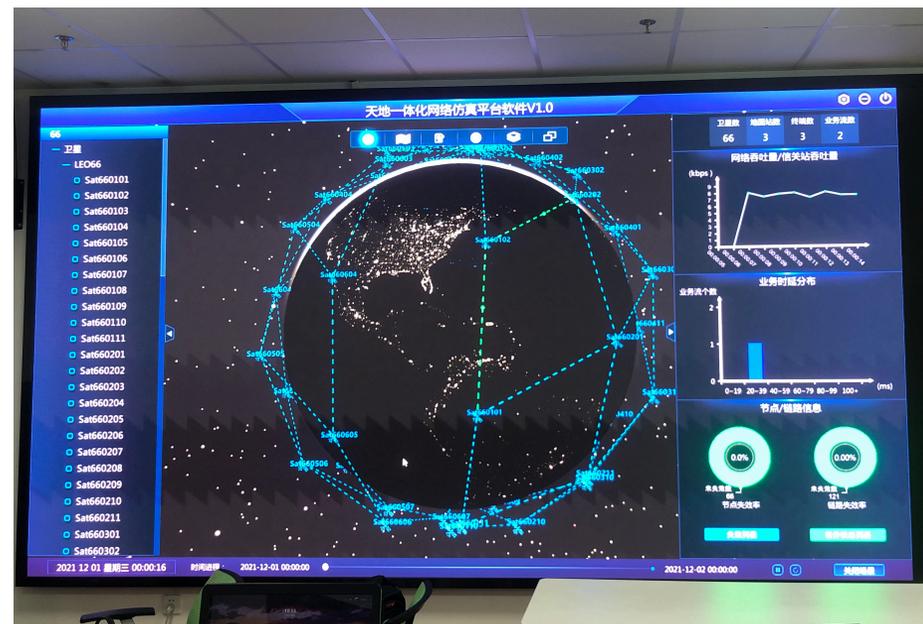
- 国家**数字经济**创新发展试验区核心载体暨重庆**卫星互联网产业园**，简称“**数创园**”



《人民日报》
(2023年03月20日 06版)



- 2022.5.7，重庆邮电大学空间通信研究院入驻两江新区。
- 新一代信息网络与终端省部共建协同创新中心
 - 建成空天地一体化半实物仿真平台
 - 支持开展5G 星地融合、智能路由、移动性管理、资源编排、智能反射面等研究
- 移动大数据与智能系统创新团队取得系列研究成果
 - 巨星座星座动态规划
 - 星上智能路由
 - 多维异质资源智能编排



空天地一体化半实物仿真平台

项目名称	来源及编号
一体化融合网络体系结构总体研究	国家重点研发计划项目课题 (2018YFB1800301)
面向空-地融合车联网的组网架构与高效内容分发机制研究	国家自然科学基金面上项目 (62171072)
面向移动高清视频传输的广义LDPC码性能研究与优化设计	国家自然科学基金面上项目 (61771081)
融合数字孪生的数据中心能耗建模与优化	国家自然科学基金青年项目 (62003067)
基于SIW圆极化赋形阵列的毫米波切换波束天线研究	国家自科基金青年项目(61801070)
基于名字标签交换的未来互联网高速数据转发机制研究	重庆市基金重点项目(cstc2015jcyjBX0009)
基于深度卷积神经网络的手持液晶面板缺陷检测方法研究和示范应用	重庆市产业类重点研发项目 cstc2018jszx-
NB-IoT物联网通信模组研发及产业化	重庆市重大主题专项
基于多视图神经网络的卫星星座动态路由机制研究	重庆市面上基金cstc2021jcyj-msxmX0586
卫星互联网智能网管平台	***企业



小结

1. **空天地一体化网络是未来 6G 的重要组成部分。**
2. **地面移动网络是基础，卫星互联网是焦点。**
3. **国际竞争和博弈异常激烈。**
4. **国家、地方、资本、学界非常重视。**
5. **重庆地位重要，机会很多。**



空天地一体化的背景



空天地一体化的必要性



数字化转型应用场景



空天地一体化面临的挑战



空天地一体化关键技术



发展空天地一体化的动因思考

雒江涛 2023

20

- 保障国家安全之急需
- 抢占稀缺资源之急需
- 发展更新技术之急需
- 发展国民经济之急需

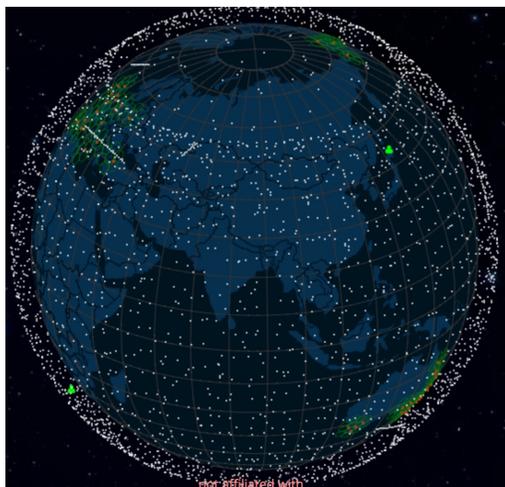


保障国家领土安全之急需

雒江涛 2023

21

- 俄乌冲突中，“星链”低轨卫星星座凭借大容量、高通量、低时延和重访周期短等优势**首次介入战场**
- SpaceX 宣布启动“星盾”（Starshield）计划，**定向服务于美国国家安全机构和五角大楼**：保密通信、态势感知、攻击与拦截...



<https://satellitemap.space>

http://www.81.cn/wj_208604/jdt_208605/10206053.html



<https://www.space.com/spacex-starshield-satellite-internet-military-starlink>

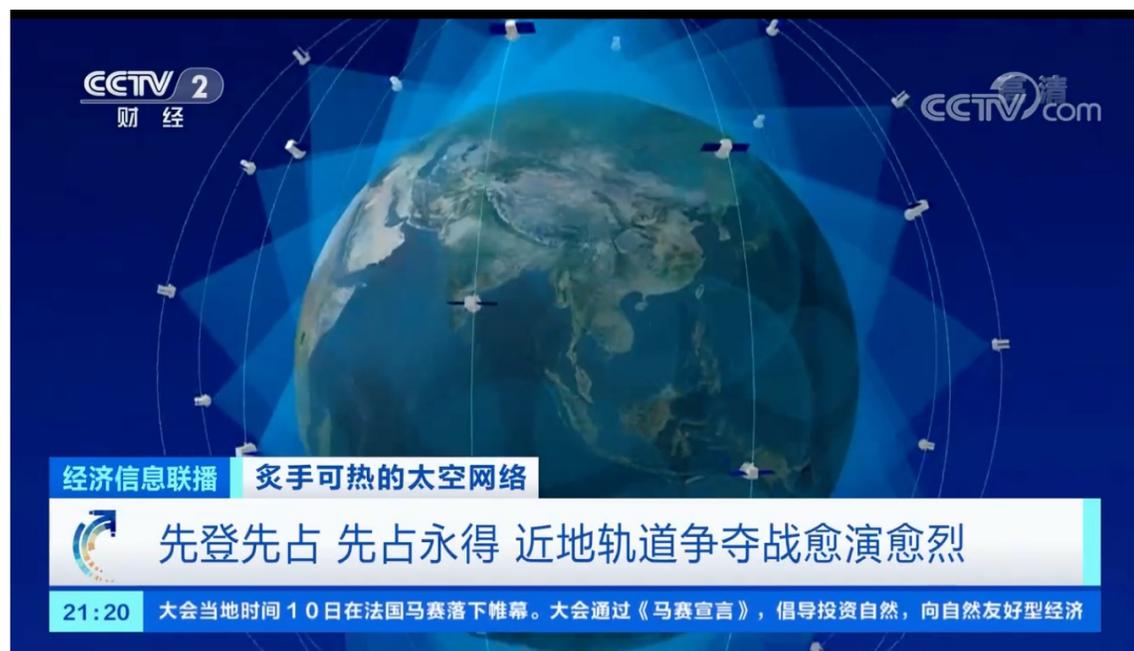


抢占空间资源之急需

雒江涛 2023

22

- 近地轨道位置稀缺：有专家计算近地轨道安全容纳约 60000 颗
- 频谱资源稀缺：Ku、Ka几乎耗尽，向Q/V、太赫兹（THz）延展
- 游戏规则：“先登先占、先占永得”



CCTV-2 财经频道[经济信息联播]炙手可热的太空2021年09月11日 22:40



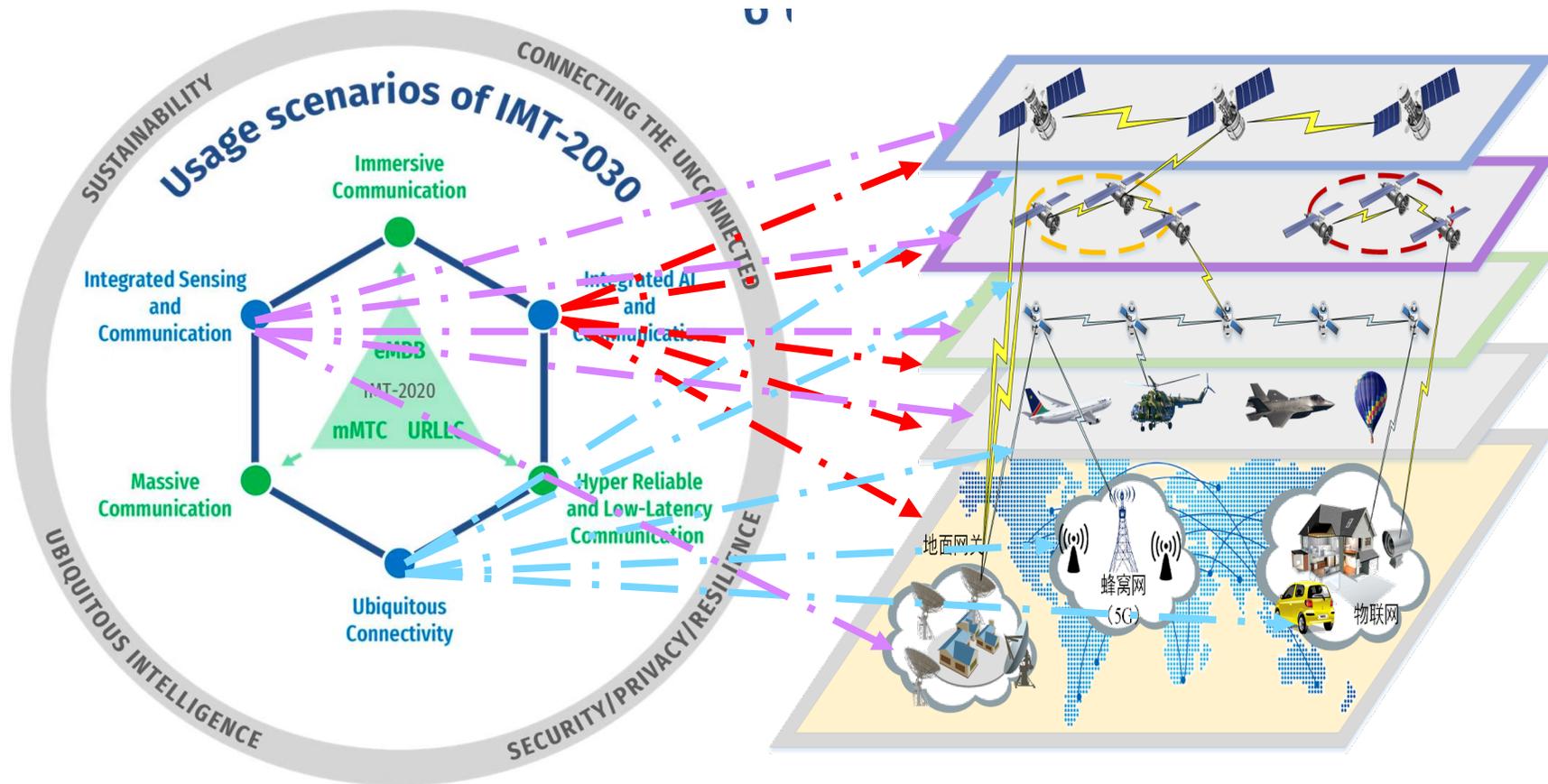
Amazon 每 16 天起诉一次 SpaceX



发展更新技术之急需：① 6G 排头兵

雒江涛 2023

23



6G 六大应用场景

空天地一体化

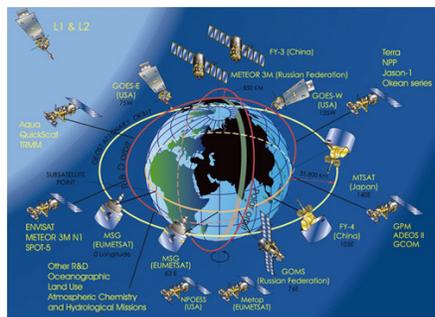
6G 潜在技术

- (一) 内生智能的新型网络
- (二) 增强型无线空口技术
- (三) 新物理维度无线传输技术
- (四) 太赫兹与可见光通信技术
- (五) 通信感知一体化技术
- (六) 分布式自治网络架构
- (七) 确定性网络
- (八) 算力感知网络
- (九) 星地一体融合组网
- (十) 支持多模信任的网络内生安全



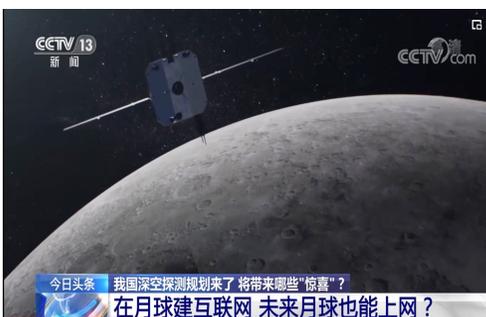
发展更新技术之急需：②深空探测和对地观测

- **深空探测**采用遥测等方法对月球及以远的星球进行的探测，以探索宇宙、研究行星地质学为主要目的
- **对地观测**是指采用人造卫星和航空平台，装载遥感探测器和地球物理仪器等对地球进行观(探)测。
- 2023/8/20，俄罗斯月球25号坠毁，47年来首次探月任务失败！
- 2023/8/19，中国天舟货运飞船成功部署微纳立方星！（**天基发射**）
- **天空地一体化**将为之提供更加便捷的基础平台。



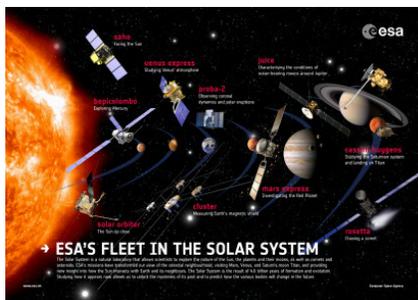
全球气象观测系统

https://www.eohandbook.com/eohb05/ceos/part2_6.html



我国探月新规划

今日头条 我国深空探测规划来了 将带来哪些“惊喜”？
在月球建互联网 未来月球也能上网？



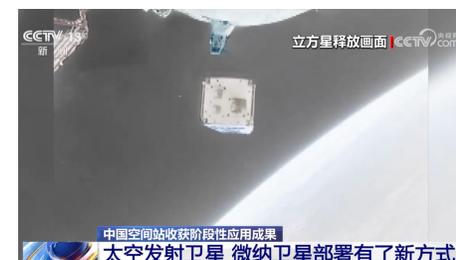
欧空局太阳系探测计划

<https://sci.esa.int/web/education/-/51381-esa-s-fleet-in-the-solar-system>



俄罗斯和印度探月

<https://new.qq.com/rain/a/20230820A073OX00>



中国太空部署微纳卫星

中国空间站收获阶段性应用成果
太空发射卫星 微纳卫星部署有了新方式



发展国民经济之急需：产业生态牵引

雒江涛 2023

25

- 新型信息基础设施，产业纵深长，辐射带动能力超强
- 空天地一体化涉及航空、航天、通信、材料、制造、控制、计算机、人工智能等众多重要行业领域，几乎所有的工科专业。
- 仅以卫星互联网产业为例，其直接的产业生态结构主要由**基础设施建设**、**卫星互联网运营**以及**终端用户**三大部分组成



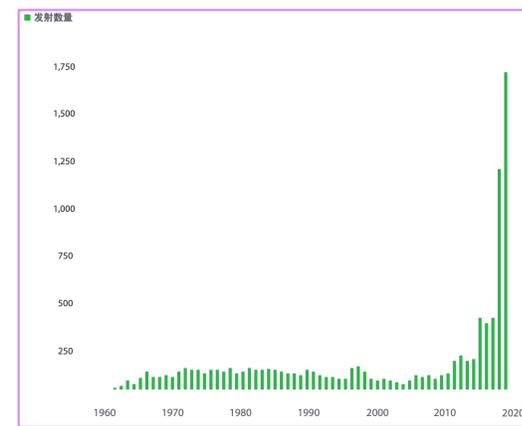


小结

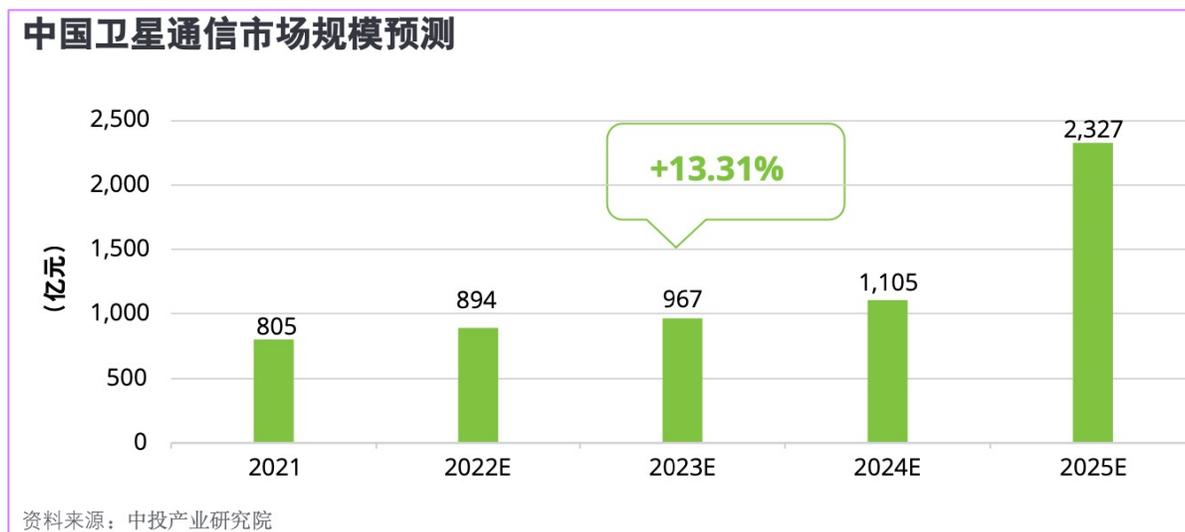
□ 空天地一体化涉及

- 国家领土安全
- 战略资源抢占
- 新兴技术驱动
- 国民经济各行各业

□ 产业前景广阔



年度发射卫星数
欧洲航天局，《2022年度太空环境报告》，2022.4.22





空天地一体化的背景



空天地一体化的必要性



数字化转型应用场景



空天地一体化面临的挑战



空天地一体化关键技术



- 数字化的三个阶段（Gartner、维基百科）：
 - 数字化¹（digitization）：Digitization是从模拟（analog）形式到数字（digital）形式的转变。比如文件扫描。
 - 数字化²（digitalization）：利用数字技术改变商业模式、创造新价值，是向数字企业转变的过程。比如电商、网络会议。
 - 数字化转型（Digital Transform）：digitalization对社会的总体和整体影响。比如共享经济。
- 国务院发展研究中心：
 - 数字化转型是指利用新一代信息技术，构建数据的采集、传输、存储、处理和反馈的闭环，打通不同层级与不同行业间的数据壁垒，提高行业整体的运行效率，构建全新的数字经济体系。
- 新一代信息技术是驱动力，数据是基础，智慧化是途径。



连接是基础

- 浙江、江苏、上海 --- 新疆远程手术：
 - 5000 公里
- 协同汽车设计
 - 远程、VR



5G+协同设计



<https://zhuatlan.zhihu.com/p/141962361>



2022/6/11, 新疆克州人民医院与江苏省人民医院5G 连线完成微创手术



2023/6/9, 浙大邵逸夫医院---新疆生产建设兵团第一师阿拉尔医院连线, 完成肝脏切除手术

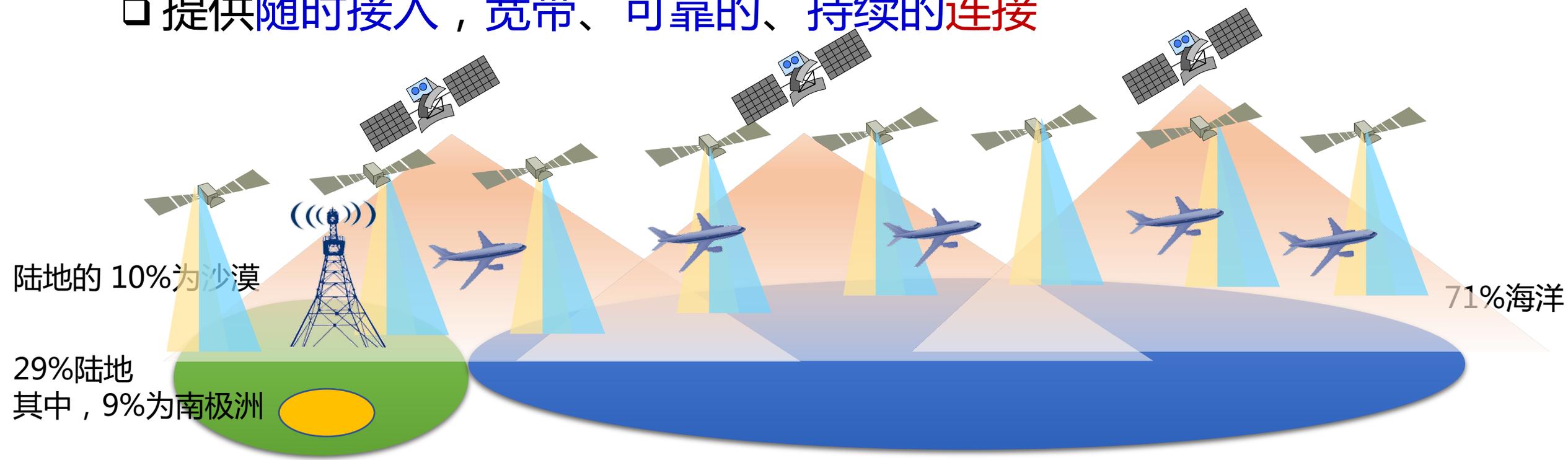


场景（一）：全域覆盖

雒江涛 2023

30

- ❑ “无所不包”：陆地、海洋、沙漠、极地、... ..
- ❑ “无一漏网”：覆盖所有的人群（O3b）
 - 目前移动通信人口覆盖率约为70%，但仅覆盖了约20%的陆地面积，不到6%的地球表面积
- ❑ 提供随时接入，宽带、可靠的、持续的连接



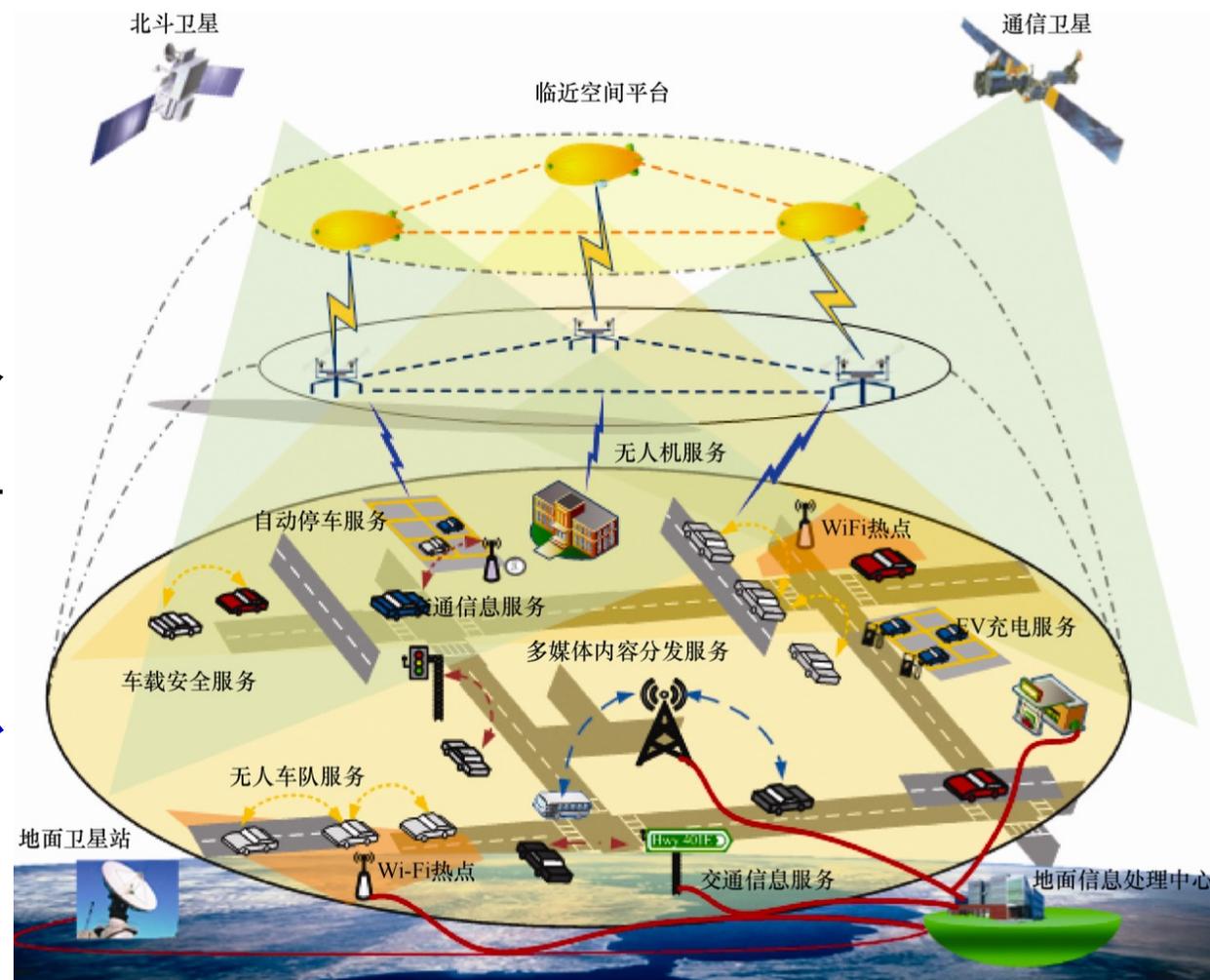


场景（二）：万物智联

雒江涛 2023

31

- 从人人互联、万物互联，到万物**智联**
- 典型场景：空天地一体化**车联网**或**智能网联汽车**
 - 智能交通、智慧城市重要组成部分
 - 地面网络与近空移动平台协同为主
卫星网络为辅
 - 空天地协同的**情境信息实时共享**
 - 车网协同的高时空分辨率**情境信息感知与融合**
 - 分布式及时**智能决策**





场景（三）：大时空尺度优势

- 对于地面上两个点： S 和 D ，分别通过 **LEO** 和 **GEO** 通信哪一个时延大？
- 通过 **LEO** 和 通过地面或海底**光纤**相比呢？哪个更快？
 - *Crossover distance*：跟星座高度、光纤折射率有关
- 时延对高频交易意味着什么？
 - 1ms 领先 转化为 **\$0.1 Billion/year @2007** <https://rubinow.com/2007/04/21/wall-streets-quest-to-process->

实测RTT (ms) :
GEO 600 ~ 1000
LEO : 40 ~ 200

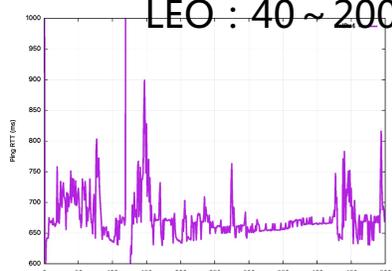


Figure 8: Ping measurements of the RTT for a Geostationary Satellite service

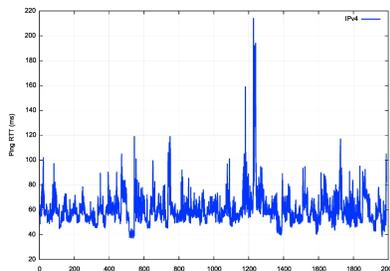
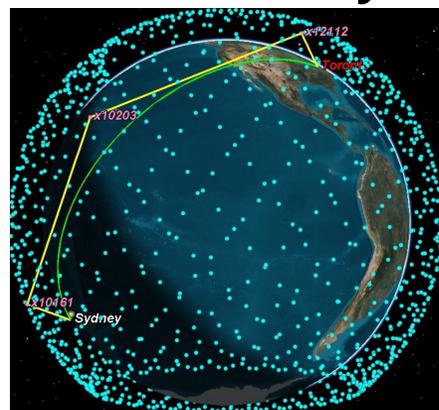
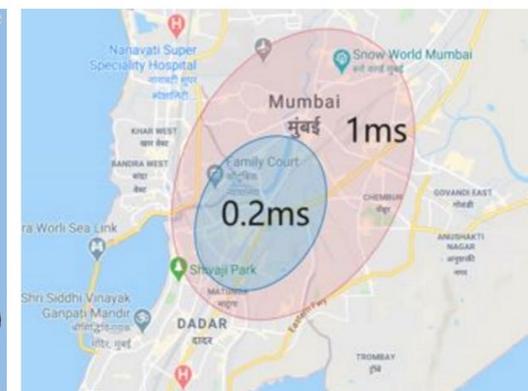


Figure 12: BBR Ping measurements of the RTT for the Starlink LEO Satellite service



Toronto-Sydney (15,585km):
OWSN.60.71 ms vs OFTN: 76.29 ms



上海-孟买股市 OTN 专线基于超低时延保证的 SLA



场景（四）：立体通信

□ 空天地海立体通信：

- 海洋通信系统通过 LEO 星座，构成立体通信系统

□ 天基对地观测

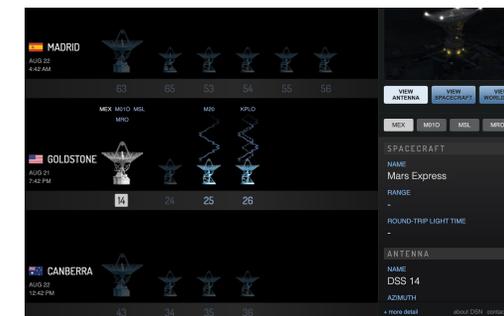
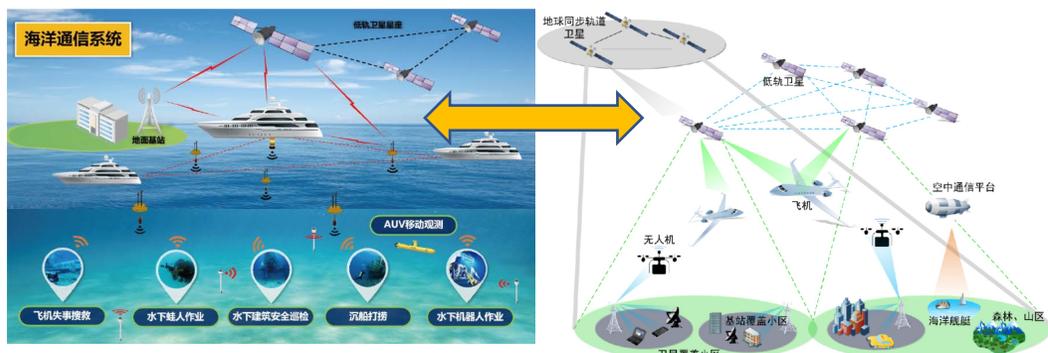
- 地形地貌、天气、生态、.....

□ 天基深空探测

- 探月工程、火星探测、星际系统、宇宙（时空）
- 如果 LEO 上每一颗卫星都是一只“小眼睛”？



中国天眼（FAST）



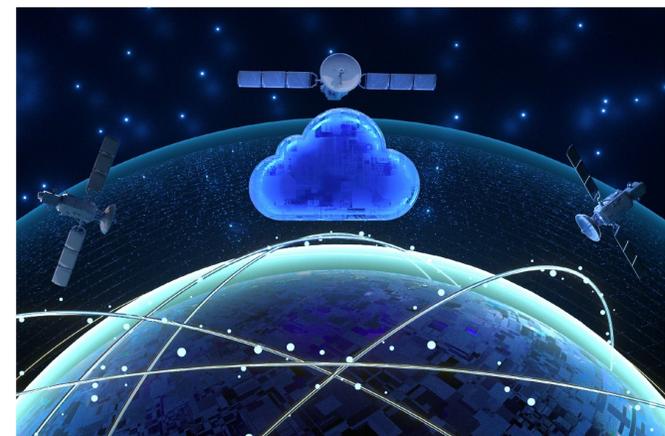


场景（五）：星地计算

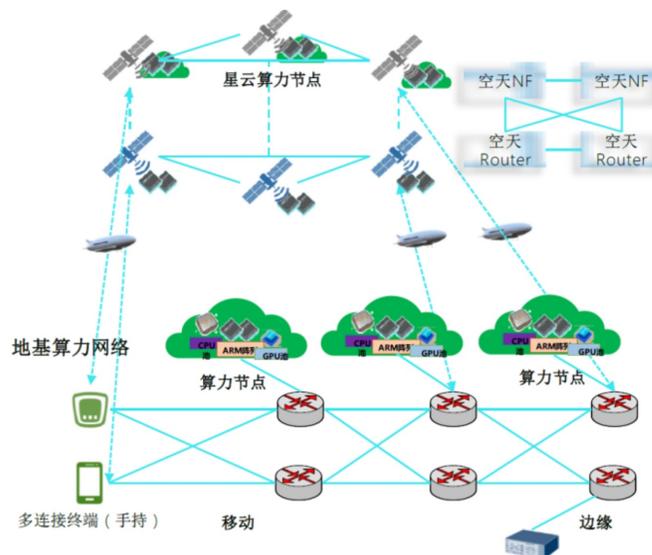
雒江涛 2023

34

- 达摩院：星地计算位列 2022 十大科技趋势之一！
 - 集成卫星系统、空中网络、地面通信和云计算，成为一种新兴的计算架构，扩展数字化服务的空间；卫星及地面一体化的通信与计算，促进空天地海全面数字化。
- ★ 个人观点：应用还早；用于天基数据在星上就近分析是可能的

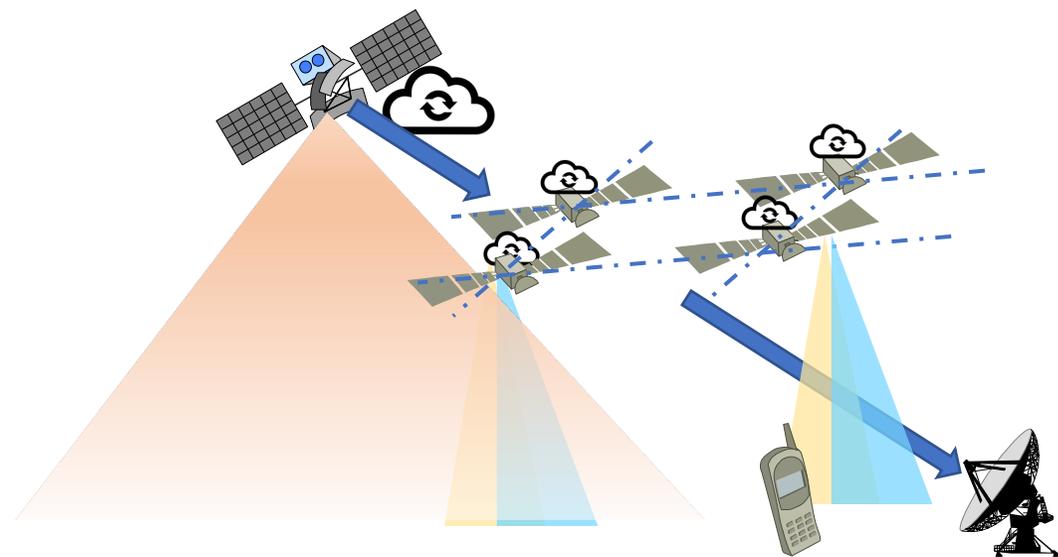


达摩院：星地计算，2022 十大科技趋势之一



中移动研究院：星算网络

<https://www.chinait.com/5g/114070.html>



对地观测数据星上计算



场景（六）：应急通信

雒江涛 2023

35

□ 已经有些初步应用，尚不构成成熟的系统

天基
卫星
系统

高空无
人机骨
干节点

地面
救援
战术
子网

高通量卫星

卫通终端

智能单兵手持

专网CPE

专网基站

无人机测控

无人机任务站

地面信关站

高点监测
卫星图传

应急光纤

核心网/骨干网

指挥专网

专网CPE

自组网装备

5G云基站

智能单兵手持

指挥通信终端

智能救援终端

- 卫星链路
- 自组网链路
- 终端链路
- 专网链路
- 5G 链路



来自重点研发计划项目申报



场景（七）：空中连接

雒江涛 2023

36

- 空中连接：IFC (in-flight connectivity)
- 覆盖范围、用户数、可用带宽、用户体验有待进一步提升
- ===》 GEO + LEO



2020/7/7，国内首架高速互联网飞机首航
利用中星16高通量Ka波段，GEO



2023/6/4，Oeweb、Starlink 多家签约 IFC 服务提供商

<https://www.flightglobal.com/systems-and-interiors/flying-to-faster-and-free-on-board-wi-fi/153019.article>





小结

- 新一代信息技术是数字化转型的驱动力，
空天地一体化是综合引擎！
- “泛在连接” 是空天地一体化应用的基础。
- 全域覆盖、万物智联是共同特征。
- 专业类网络不会消失；相辅相成
- 各类应用不同的成熟度，应急通信、车联网、空中连接先行。未列出的还有更多，比如定位导航增强等。



空天地一体化的背景



空天地一体化的必要性



数字化转型应用场景



空天地一体化面临的挑战



空天地一体化关键技术



主要挑战

雒江涛 2023

39

挑战（一）：协议体制的统一

挑战（二）：干扰减弱与消除

挑战（三）：动态按需的无线覆盖与传输

挑战（四）：智能融合终端

挑战（五）：多维异质资源的自适应调度



挑战（一）：协议体制的统一

- ❑ CCSDS (国际空间数据系统咨询委员会, Consultive Committee for Space Data System)

- ❑ TCP/IP

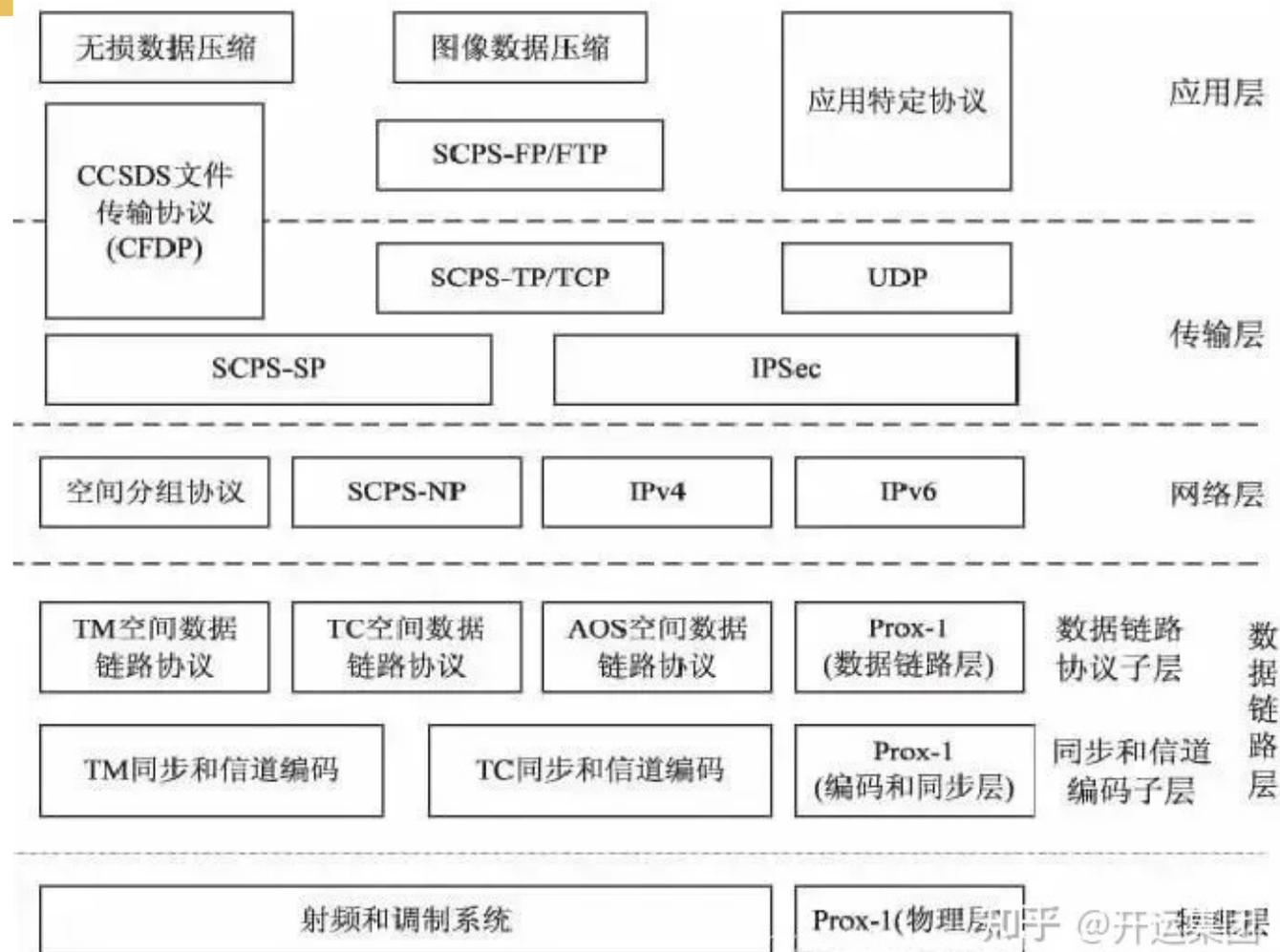
- ❑ 未来互联网

- ❑ New IP

- ❑

<https://zhuatlan.zhihu.com/p/391524514>

<https://www.zhihu.com/market/pub/120168662/manuscript/1368463307607826432>





一体化不是联合，二是深度融合

雒江涛 2023

41

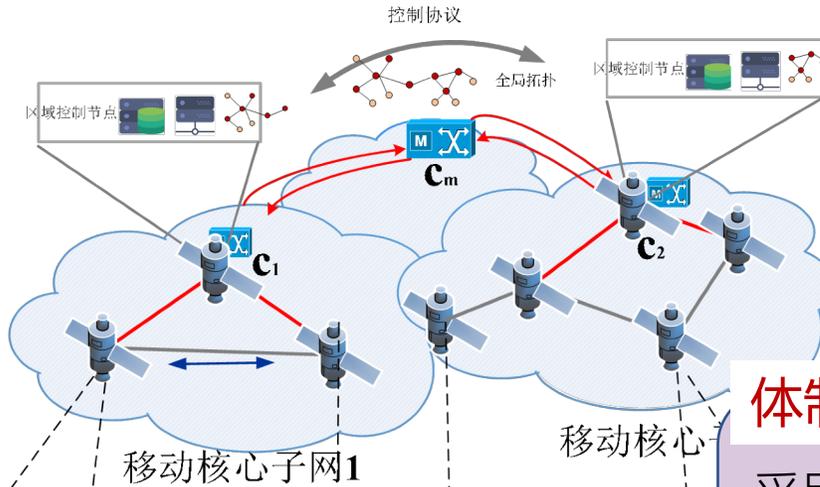
覆盖融合

卫星网络用于补充覆盖地面网络，通过多重连接支撑业务资源联合调度。



控制卫星节点

星载基站
控制流
数据流
无线链路



用户融合

使用同一的用户身份（码号）提供服务，用户身份唯一、统一计费，网络按需选择利用卫星或者地面网络提供服务。

业务融合

两者仍然独立组网，能够独立提供服务；需要时相互协同，提供连续可靠的服务保障。

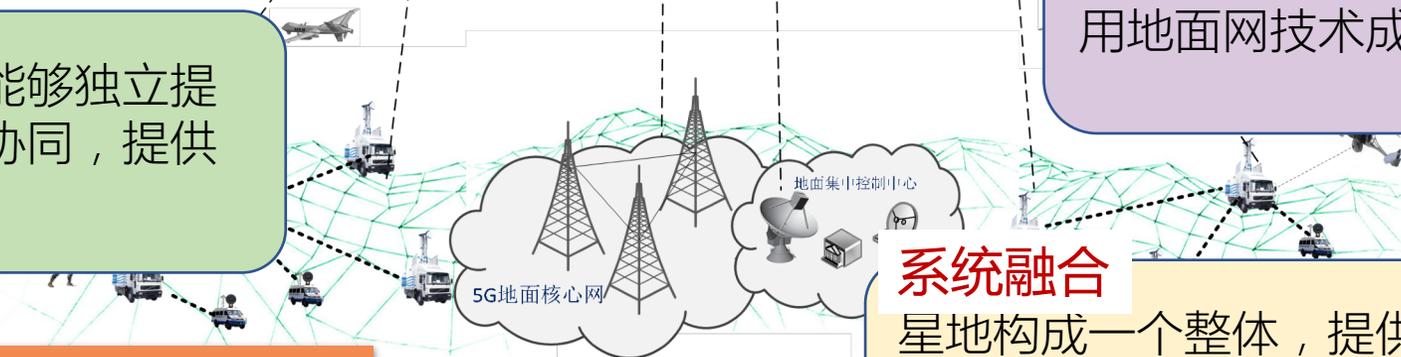
体制融合

采用相同的架构、传输和交换技术，用户终端、关口站或者卫星载荷可大量采用地面网技术成果。

系统融合

星地构成一个整体，提供用户无感的一致服务，采用协同的资源调度、一致的服务质量、星地无缝的漫游。

最大的难题，等待 6G 标准的统一；
必是两大阵营博弈的结果。



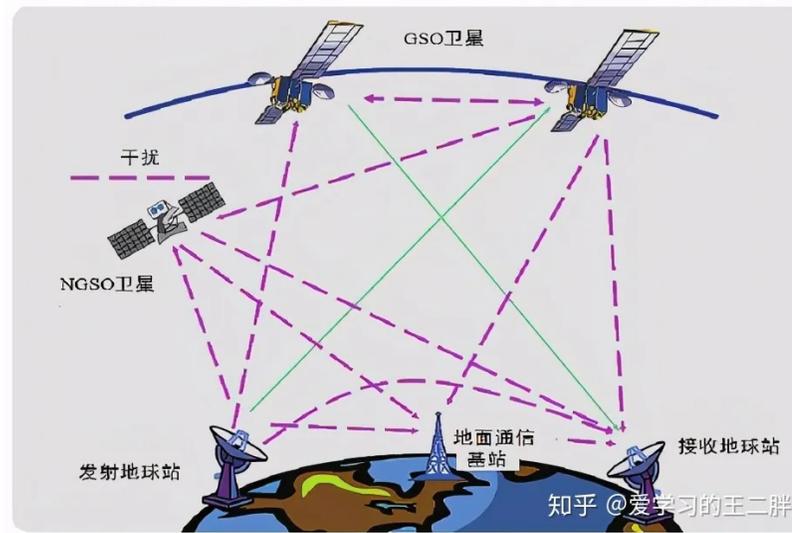
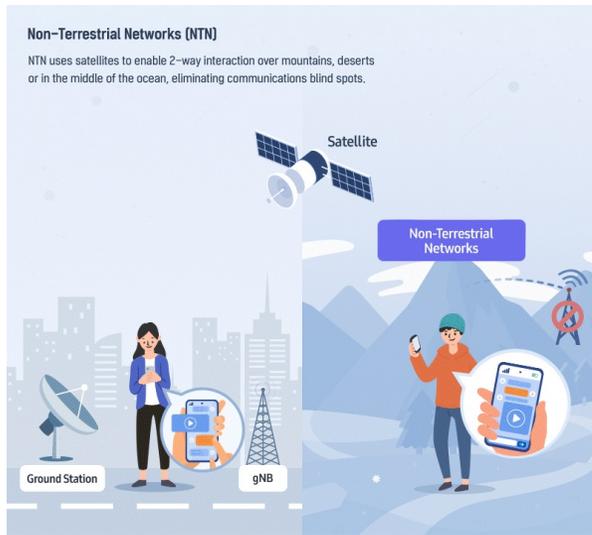


挑战（二）：干扰减弱与消除

雒江涛 2023

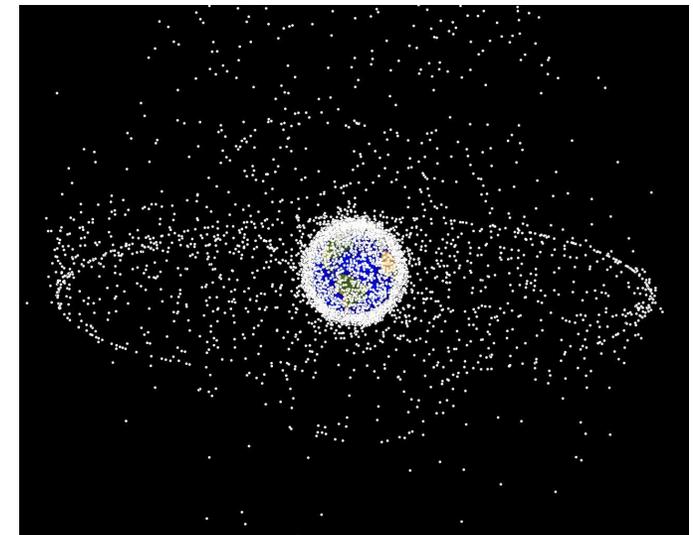
42

- 广义的干扰
- 保护卫星和业务：环境（大气、太空）干扰、无线干扰、多普勒效应、卫星碎片（变轨避撞），甚至社会政治因素
- 保护太空环境：太空垃圾、光污染



NGSO卫星系统产生干扰

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/269382862>



太空垃圾分布示意图

(NASA)
约4500吨

<https://news.samsung.com/global/samsung-electronics-introduces-standardized-5g-ntn-modem-technology-to-power-smartphone-satellite-communication>

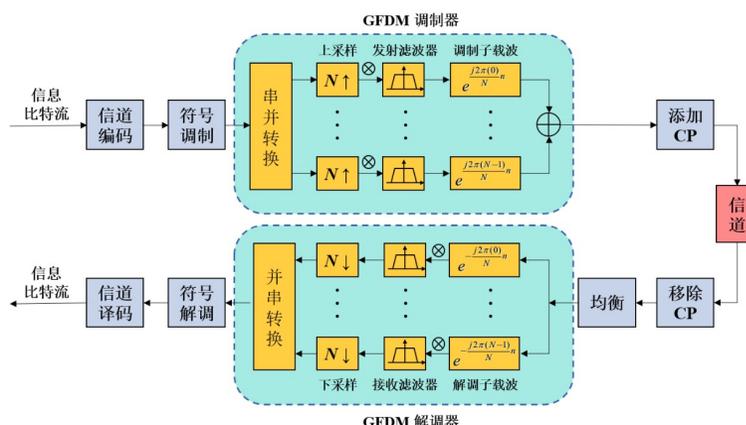


挑战（三）：动态按需的无线覆盖与传输

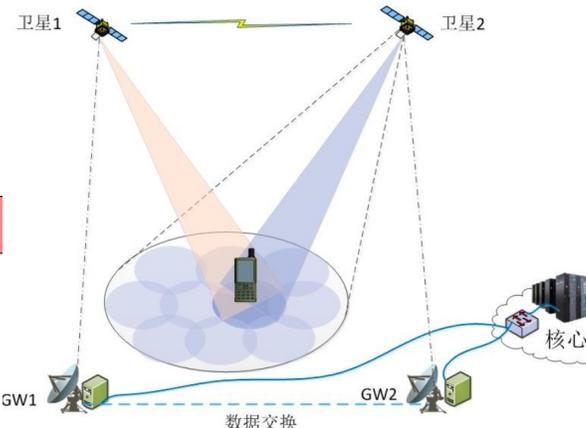
- 向更高的频段：Ku、Ka；Q/V；THz；Laser
- 材料、器件、模组、装备：性能的提升+成本的下降
- 无线传输技术：大规模相控阵天线（小型化）支持多星多点波束协作、新的调制波型、NOMA多址接入克服多重干扰

频段	频率范围	使用情况
L	1~2 GHz	资源几乎殆尽；主要用于地面移动通信、卫星定位、卫星移动通信及卫星测控链路等
S	2~4 GHz	资源几乎殆尽；主要用于气象雷达、船用雷达、卫星定位、卫星移动通信及卫星测控链路等
C	4~8 GHz	随着地面通信业务的发展，被侵占严重，已近饱和；主要用于雷达、地面通信、卫星固定业务通信等
X	8~12 GHz	通常被政府和军方占用；主要用于雷达、地面通信、卫星固定业务通信等
Ku	12~18 GHz	已近饱和；主要用于卫星通信，支持互联网接入
Ka	26.5~40 GHz	正在被大量使用；主要用于卫星通信，支持互联网接入
Q/V	36~46 GHz/ 46~75 GHz	正在进入商业卫星通信领域
大赫兹	0.1~10 THz	正在开发

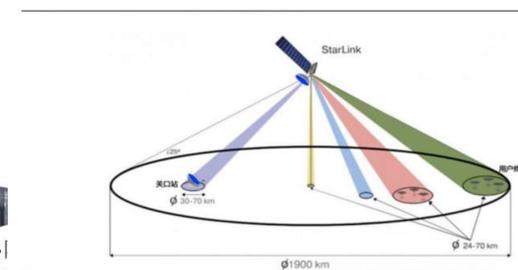
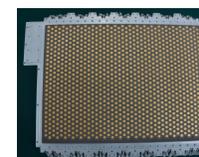
频段使用情况



GFDM调制，对频偏不敏感



多星波束协作



相控阵天线动态按需覆盖

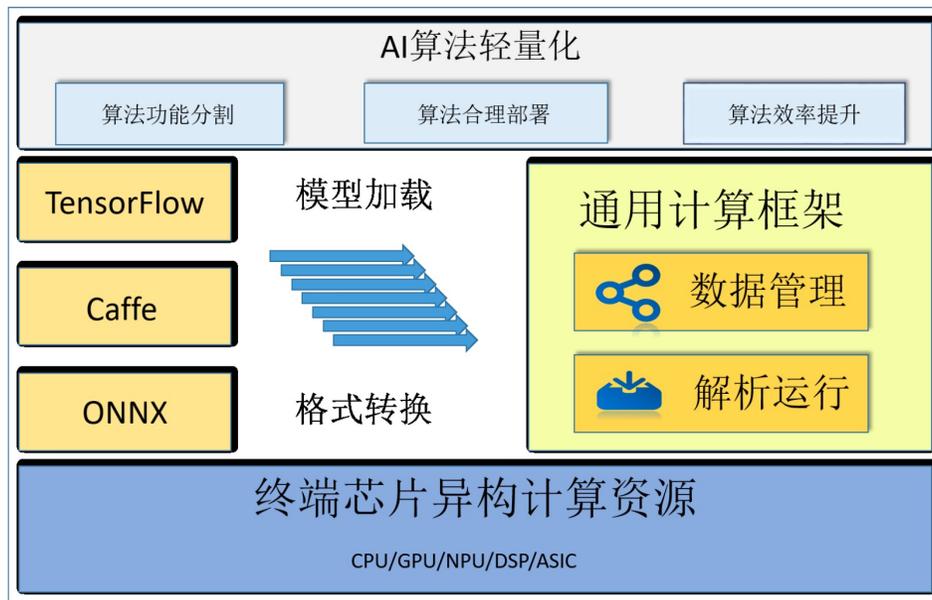


挑战（四）：智能融合终端

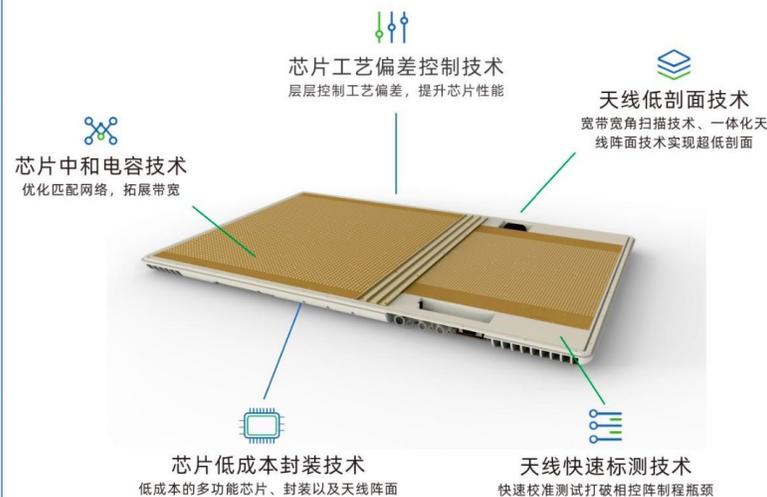
- 地位重要：连接用户与空天地一体化网络
- 关键特征：
 - 泛在化：全频段，择优接入；全球全域无缝接入
 - 智能化：智能感知、自动扫描、轻量级边缘计算、云边端协同



未来星地融合智能终端



终端侧轻量级边缘计算框架

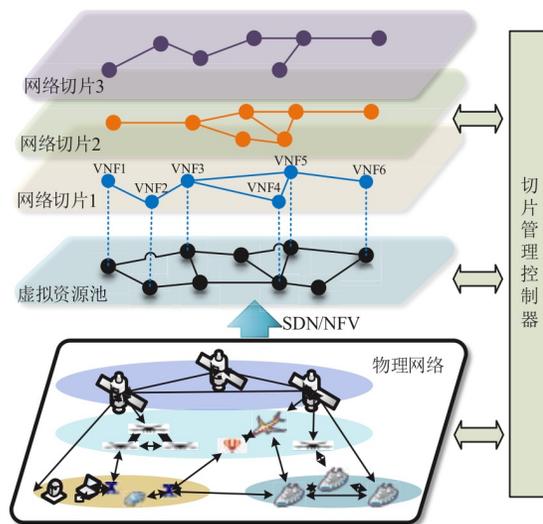


终端低成本相控阵天线

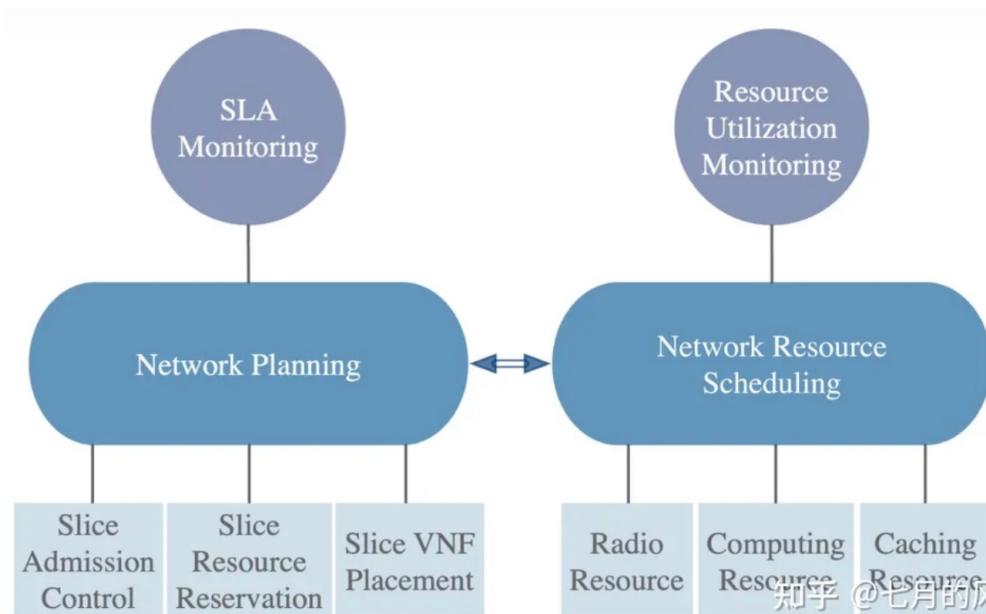


挑战（五）：多维异质资源的自适应调度

- 一体化组网的核心：资源的统一调度
- 困难：
 - 时空大尺度、多维、异质、动态、复杂、... ..
- AI 赋能：强化学习（Reinforcement Learning）



空天地海一体化网络切片示意图
管莹莹等，空天地海一体化网络切片研究综述，
移动通信，2022.10



业务需求、网络规划与资源调度的交互
<https://zhuatlan.zhihu.com/p/534867869>



小结：

- 所列协议体制统一、干扰减弱与消除、无线覆盖与传输、智能融合终端、资源调度等五方面的挑战，真实的挑战远不止这些！
- 所列挑战主要针对通信组网而言，实际涉及的工程环节更多，比如卫星制造与发射、安全威胁等



空天地一体化的背景



空天地一体化的必要性



数字化转型应用场景



空天地一体化面临的挑战



空天地一体化关键技术



空天地一体化关键技术

雒江涛 2023

48

□ 结合团队的工作，重点介绍以下关键技术研究：

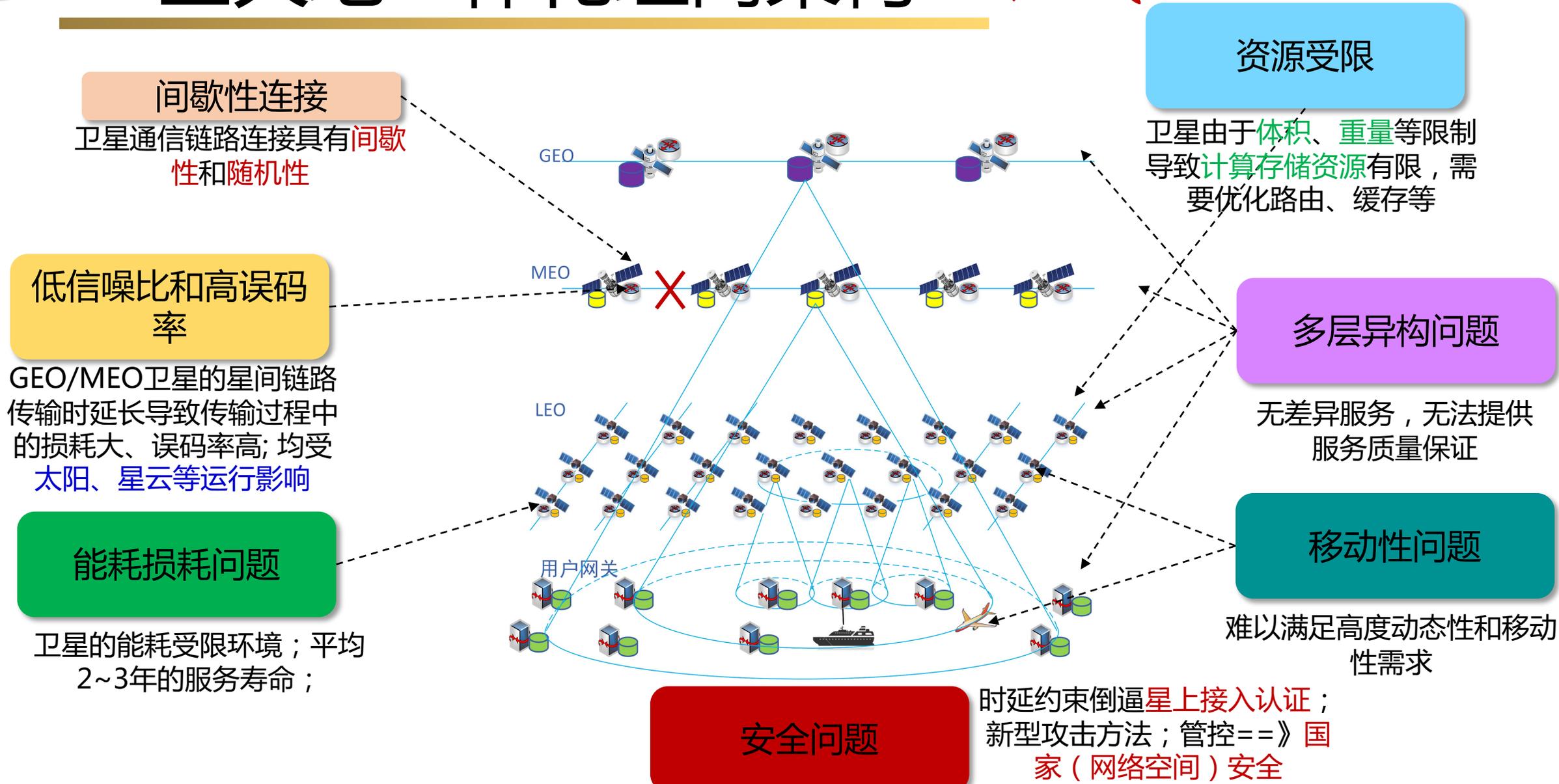
1. 空天地一体化组网架构
2. 巨星座座型动态智能规划
3. 星上智能路由
4. 多维资源智能调度
5. 半实物仿真技术与平台



1. 空天地一体化组网架构：挑战

雒江涛 2023

49





1. 空天地一体化组网架构：组网协议 雒江涛 2023 50

- 更快的速率（更大带宽）
- 更多的接入（海量连接）
- 更高的可靠性（高可靠）
- 低时延、确定性时延
- 更高效（时间效率）
- 更绿色（能量效率）
- 更安全（安全性）



基于“尽力而为” (Best Effort) 的 IP 力不从心

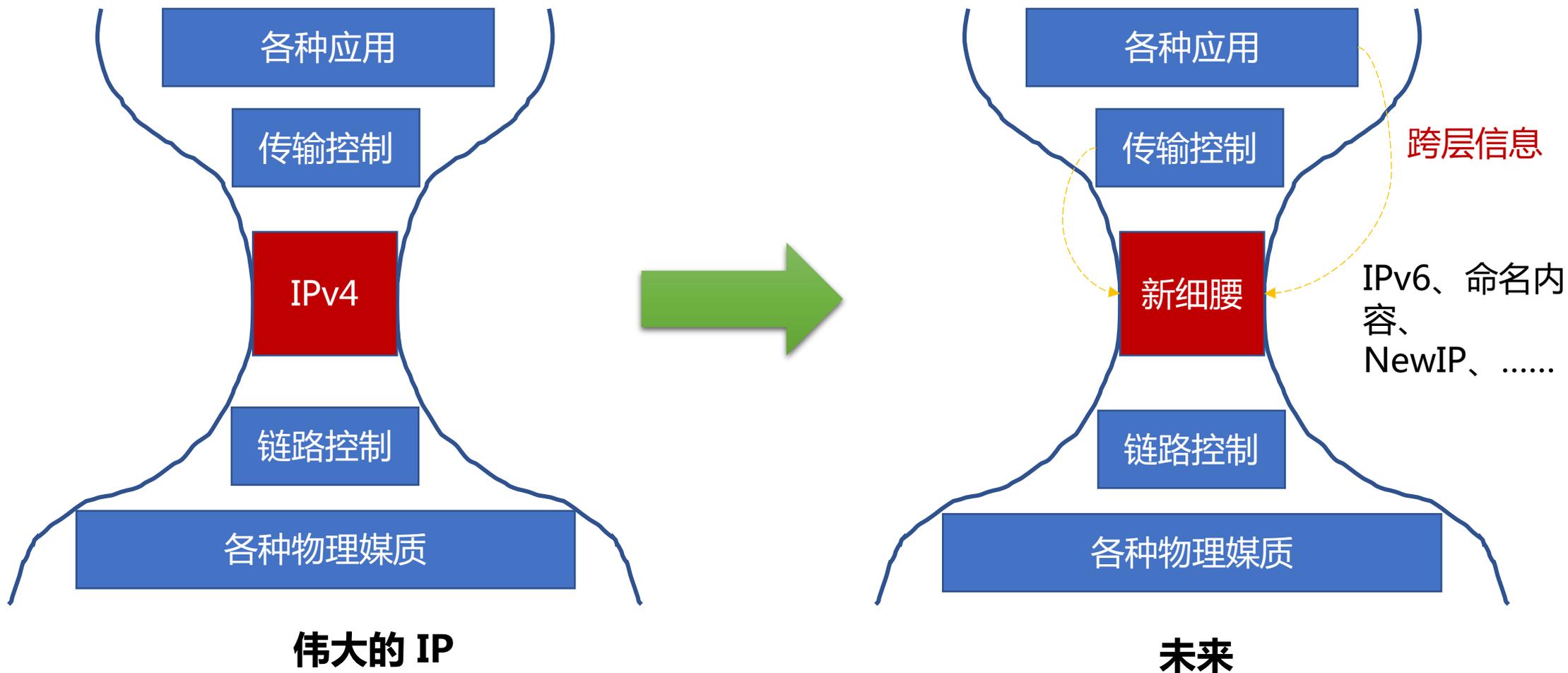
□ 更智能



IP 的演进：未来互联网研究

雒江涛 2023

51





未来网络发展历程：国外

雒江涛 2023

52

来自《全球未来网络发展白皮书》（2019版）

美国

2005年 美国科学基金会
FIND计划 (Future Internet Design)

2007年5月 Global Environment for
Network Innovations, GENI

2010年 美国科学基金会
FIA计划 (Future Internet
Architecture) , FIA-NP

欧盟

2008年 第七框架/Horizon 2020
FIRE计划 (Future Internet Research
and Experiment)

2016 年启动 Horizon 2020-Secure
societies 计划

ITU

2018 年成立 Network 2030 焦点组

美国NSF致力于创建未来互联网体系架构
(Future Internet Architecture, FIA)



未来网络研究仍处于探索阶段，为我国信息科技领域提供了几十年难得一遇的战略机会

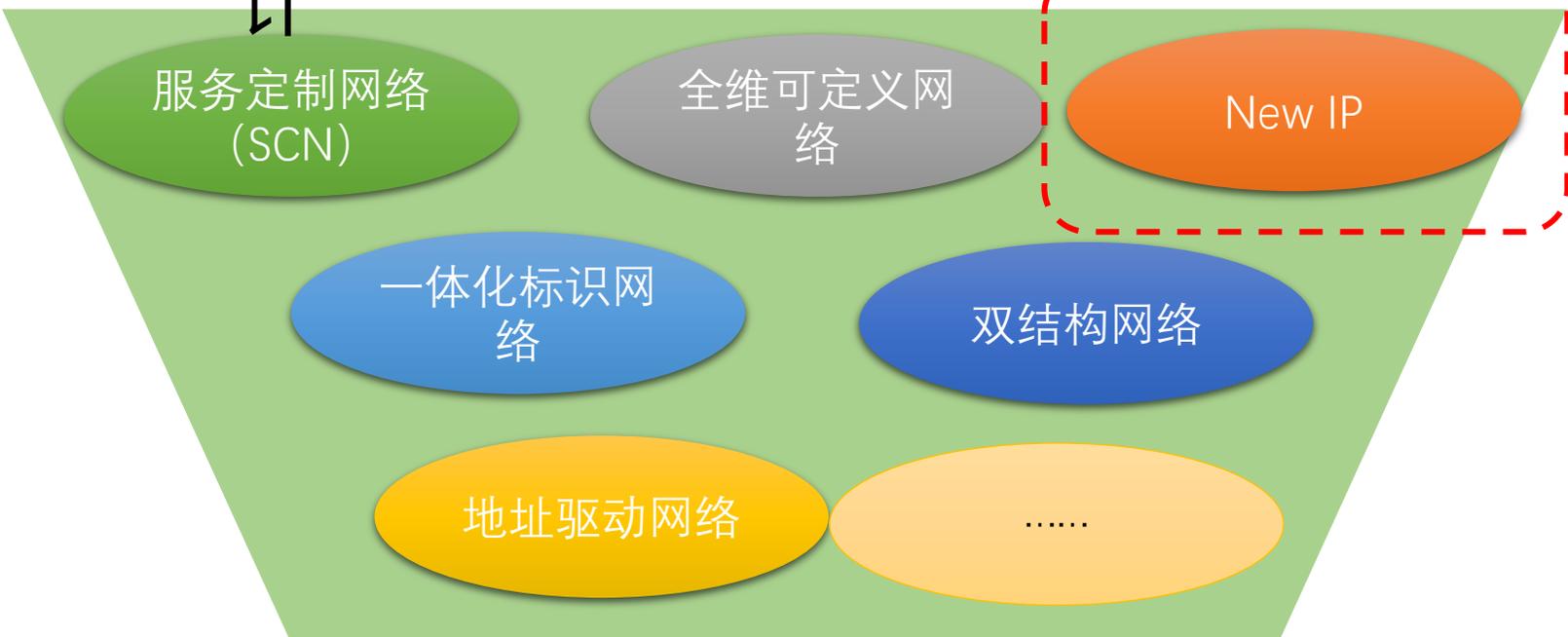


未来网络发展全貌：国内

来自《全球未来网络发展白皮书》（2019版）

国内的未来网体系架构设计

国家/准国家级平台与大装置



CENI 启动



大湾区未来网络试验与应用环境（鹏城实验室）

国家科技计划、创新土壤、经济实力



①信息中心网络（ICN）：发展历史

雒江涛 2023

54

TRIAD 架构（内容中心的萌芽）

内容层、缓存、路由 routing
Stanford Univ.

1999



2006

CCN（内容中心网络）
设计思想

Van. Jacobson在Google Tech Talk

DONA
（分散开放式网络
体系结构,第一个完整的
ICN 设计）

2007



2008

PSIRP
（发布和订阅Internet路由范例）

CCN正式提出

2009



2010

NDN(命名数据网络)

PURSUIT
（发布订阅网络技术）

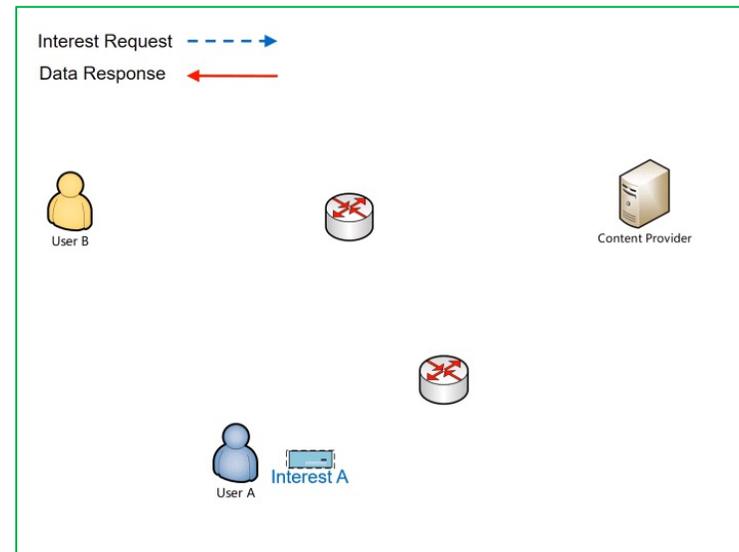
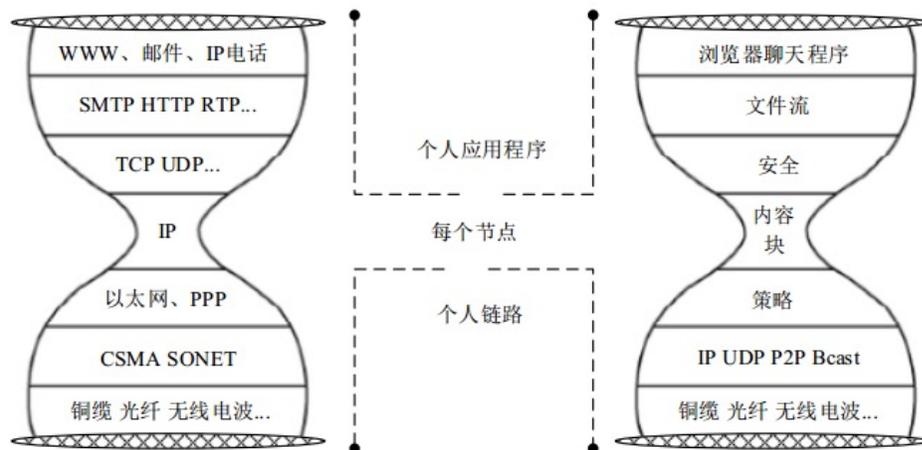


① ICN : ICN/NDN 的主要特点

- 从应用层 (HTTP) 借来 GET 操作，放到网络层 (命名数据)
 - 数据命名：内容已知
 - 用户驱动：PULL 模式
 - 两种包：Interest- GET 操作；Data --》 GET 响应

□其他特色

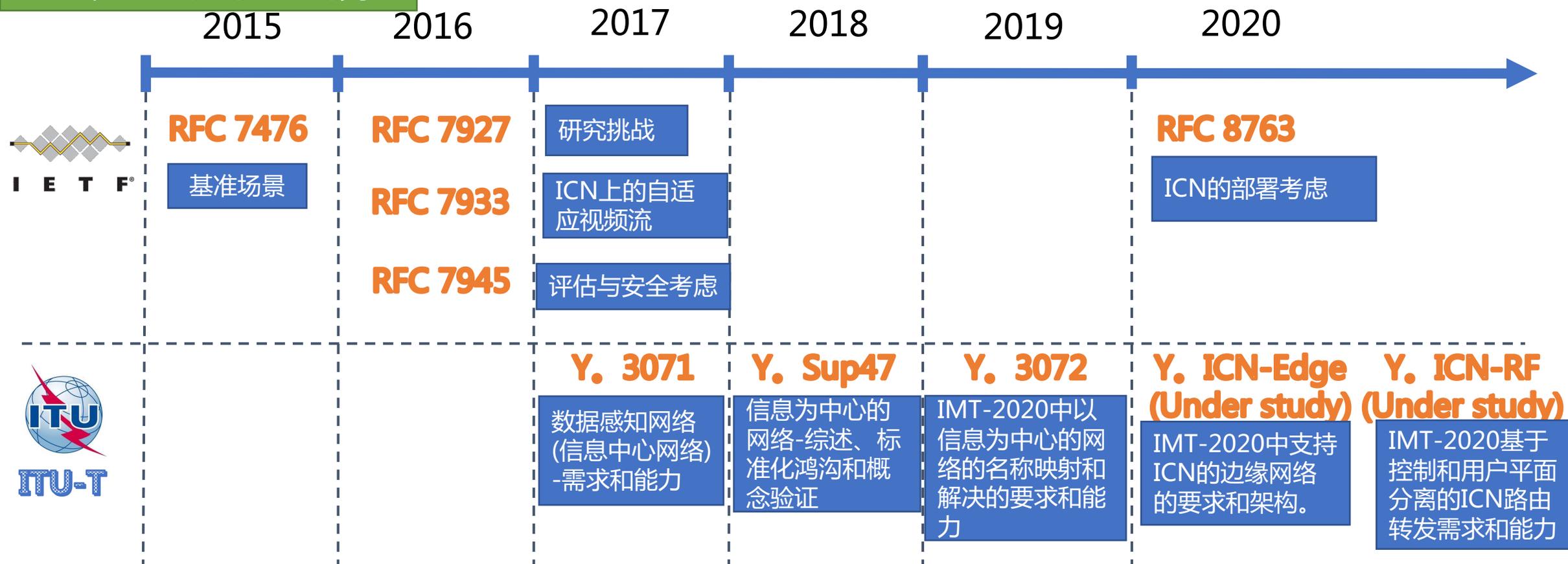
- 网内缓存：靠近用户
- 有状态的转发
- 基于内容加密的安全
- 天然多播...





① ICN : ICN 标准化之路

2012年IRTF成立了ICN研究组



ITU-T SG13 (未来网络研究组)

北京邮电大学牵头的ITU-T国际标准“基于ICN和区块链技术的去中心化物联网通信体系结构”获准立项，5.6-16，

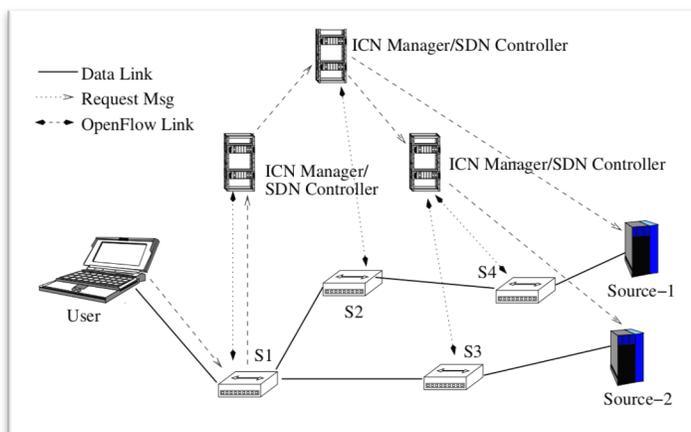


① ICN : ICN的实施与部署

From RFC 8763

1) ICN-as-an-Overlay

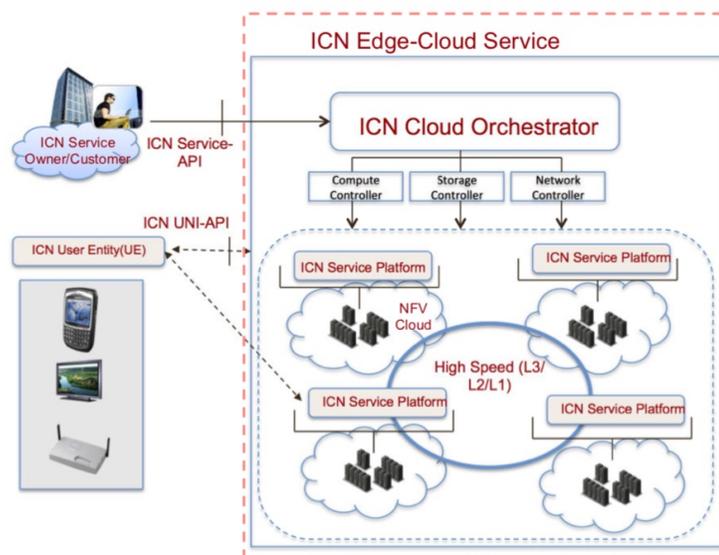
Overlay 部署方法可以通过 CCNx_UDP, ICN-in-L2-in-IP 等方式实现。



Shailendra, Samar, NCC 2015

2) ICN-as-an-Underlay

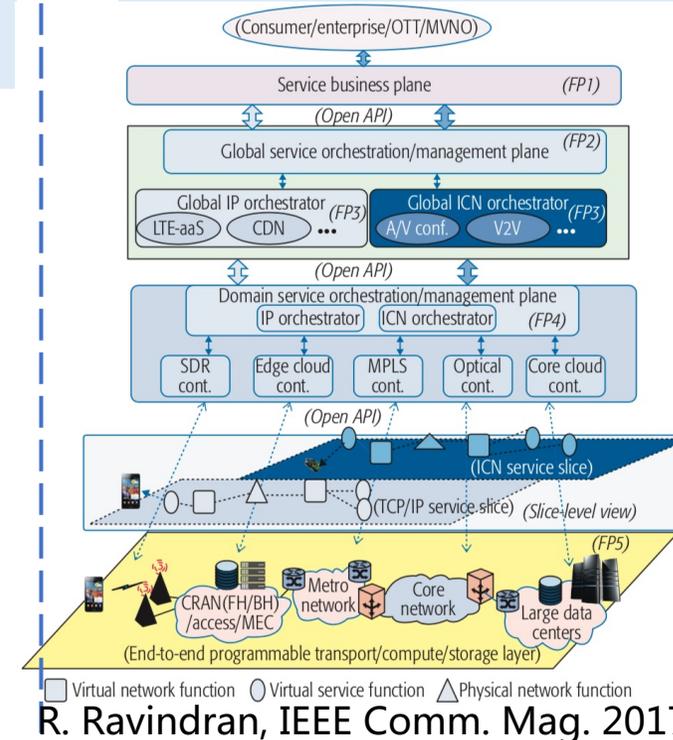
ICN作为孤岛的Underlay。在ICN岛之外，应用正常的IP路由协议。在ICN岛内，适用基于ICN的路由方案。网关在两个路由域之间传送消息的语义内容。



R. Ravindran, Cloudnet 2013

3) ICN-as-a-Slice

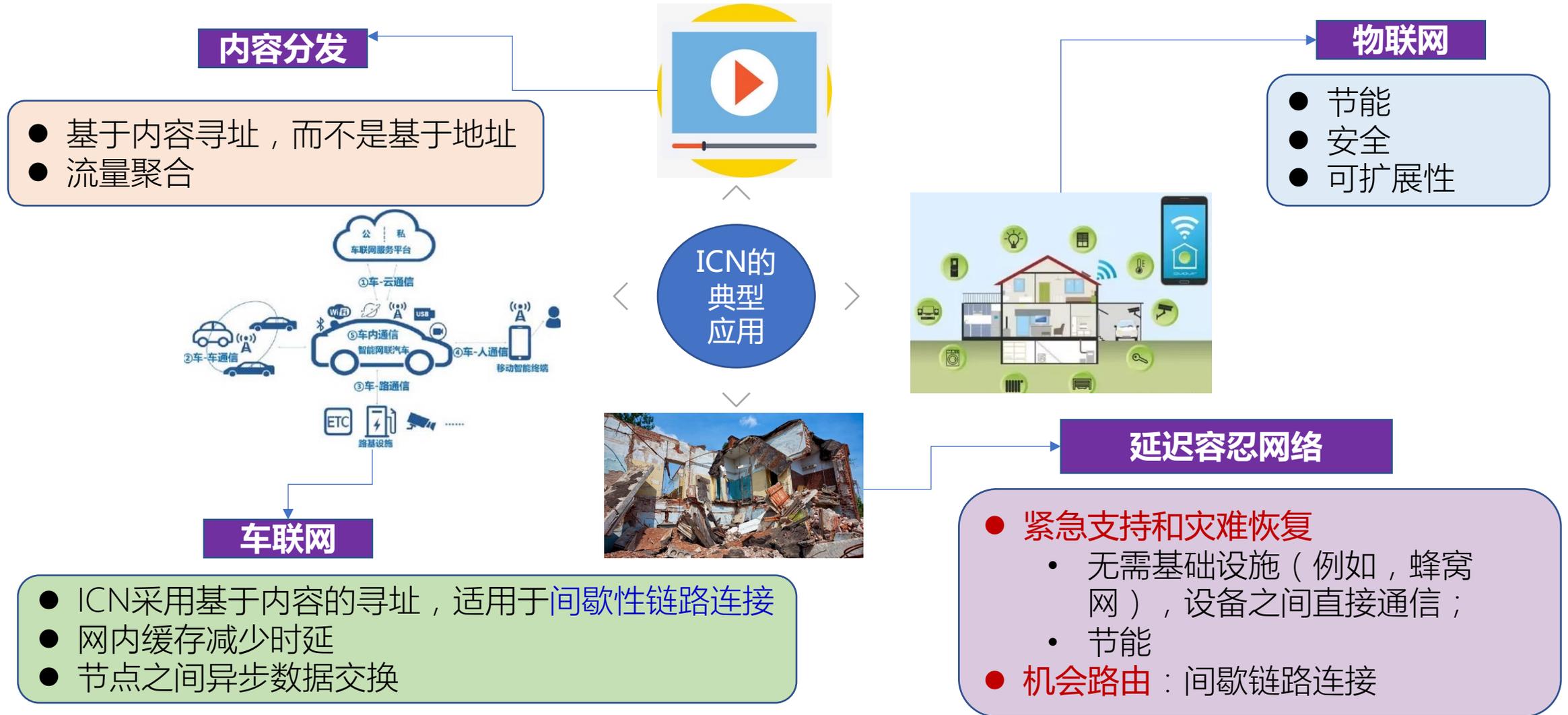
通过NFV和SDN技术，实现具有自己的控制和转发平面的ICN切片。



R. Ravindran, IEEE Comm. Mag. 2017



① ICN : ICN的典型应用



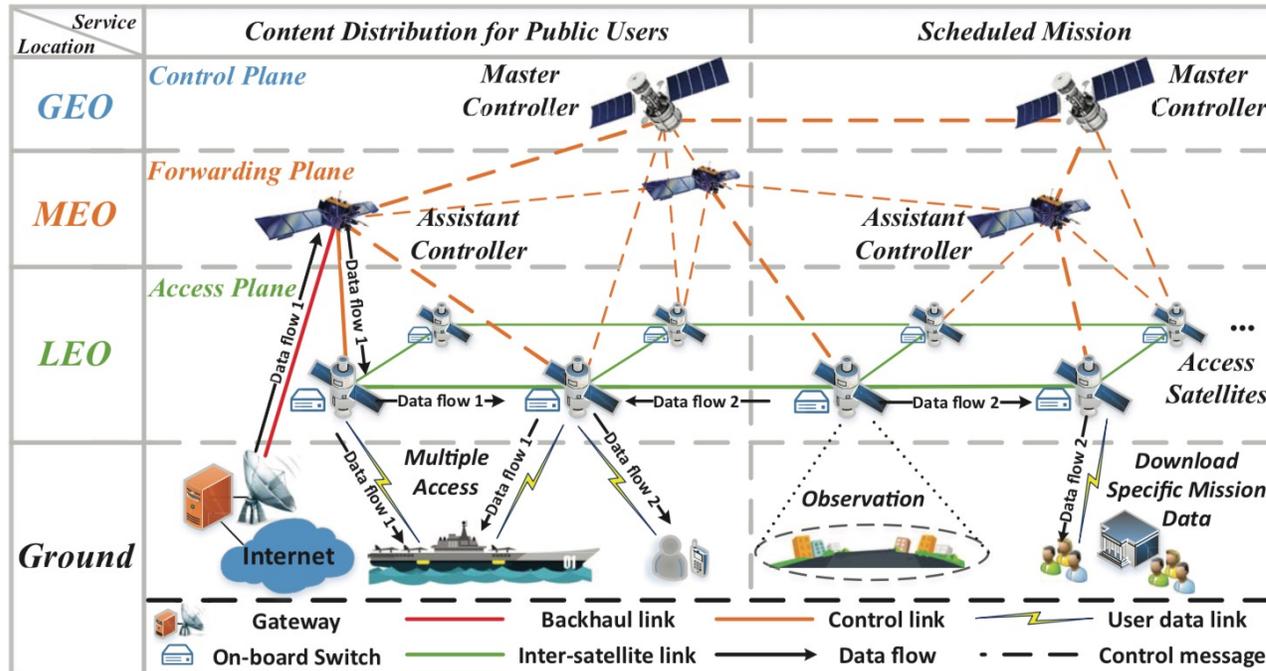


① ICN : 用于空天地一体化组网

雒江涛 2023

59

(1) 基于 ICN 的星地融合组网架构设计



一种 ICN/SDN 的星地融合组网架构：

- 针对内容检索应用中流量贡献最大的问题，提出了一种简单有效的地面用户协同内容检索方案；
- 为了充分利用其天然的网内缓存功能，进一步提高内容检索的效率，提出了一种协作缓存方案和一种编码缓存方案。
- 为了实现与 ICN 的兼容，设计了一种基于 POF (protocol oblivious forwarding) 的星上交换机。



① ICN：用于空天地一体化组网

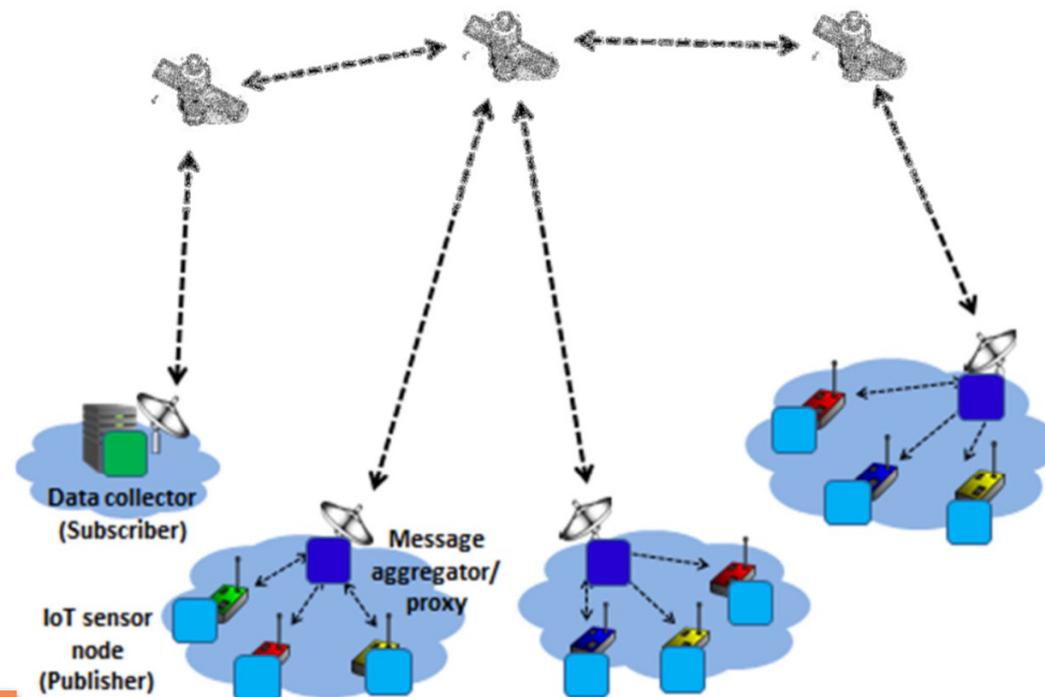
雒江涛 2023

60

(2) 利用 ICN 在星地融合网络中支持物联网

在基于信息中心网络 (ICN) 的卫星-地面融合网络场景下，提出物联网传感器网络通过 LEO 卫星连接的三种优化模型：

- 基于 PubSub 模式
- 代理的消息聚合
- 单一代理对数据加密
- 每个物联网节点单独使用代理

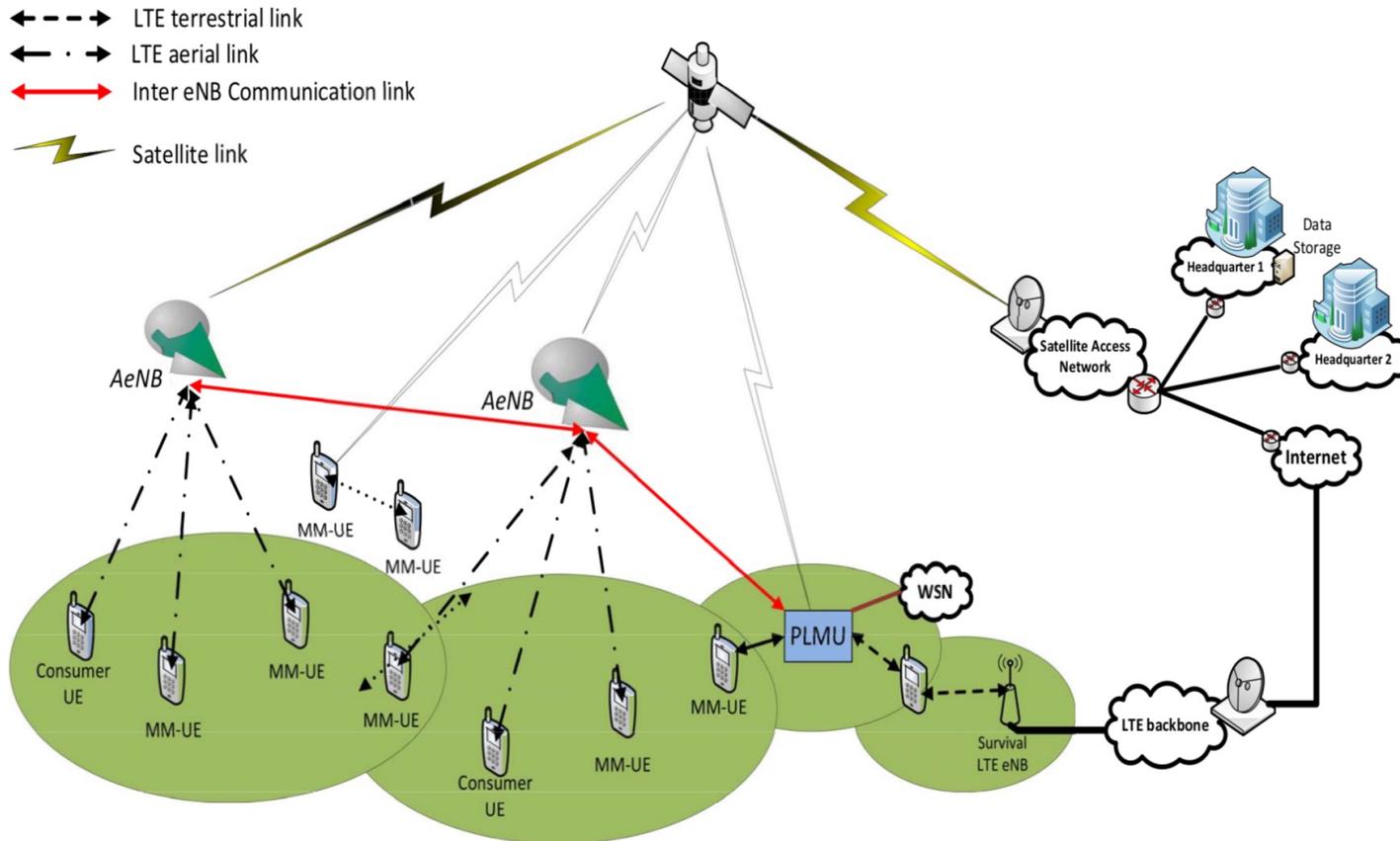


对数据感兴趣，而不是感知数据的传感器



① ICN : 用于空天地一体化组网

(3) 基于 ICN 的卫星辅助应急通信



利用热气球搭建 AeNB 应用 ICN 向受灾地区提供应急解决方案。

应用 ICN 的多路特性，仿真性能比 IP 应急方案提升近一倍。



① ICN：用于空天地一体化组网

雒江涛 2023

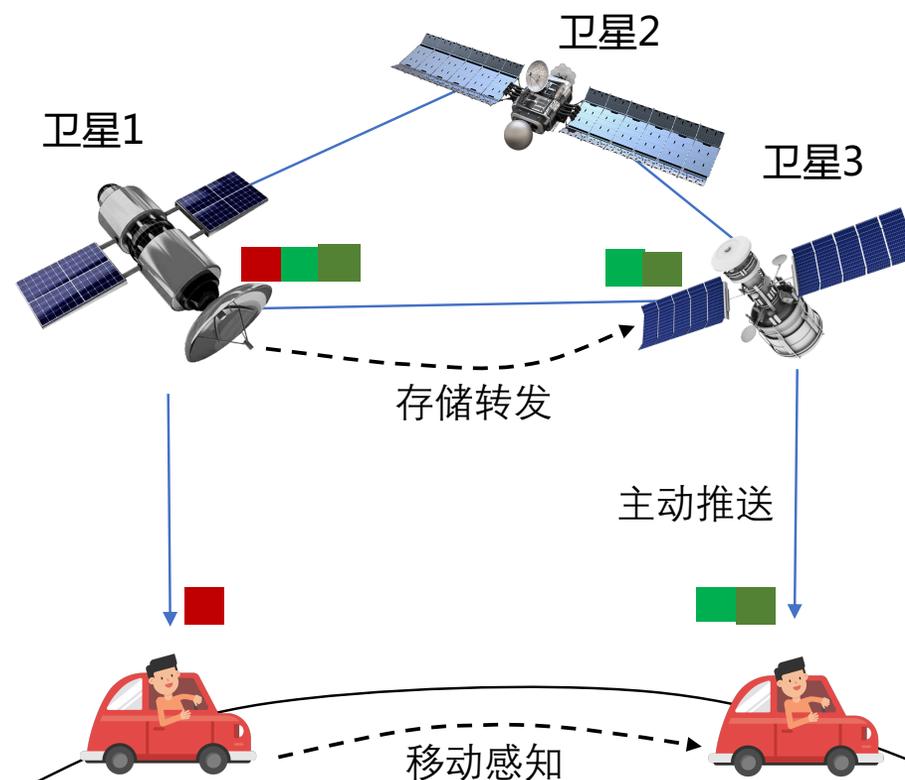
62

□ 网络移动性天然支持：

- 基于内容或命名数据的寻址
- 消费者移动性
- 生产者移动性
- 网络移动性（*）

□ 网内缓存的天然支持

- 逐跳缓存克服卫星通信链路连接具有间歇性和具有随机性
- 全局缓存感知
- 移动感知与预测性调度
- 主动推送*

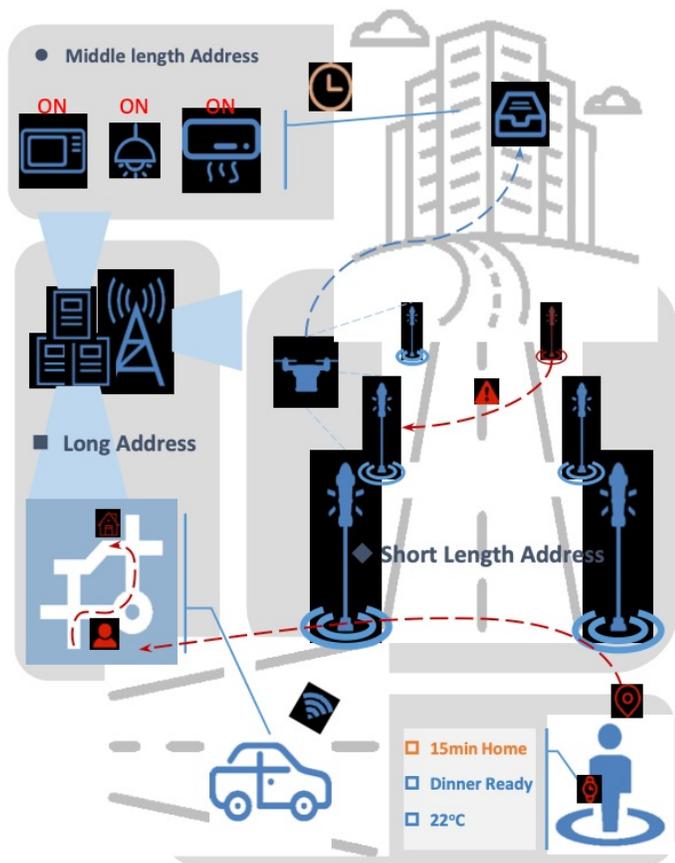


J. Luo, Asymmetric Framework Evolution of Named Data Networking and Use Cases in VANET, 2020 HotICN.



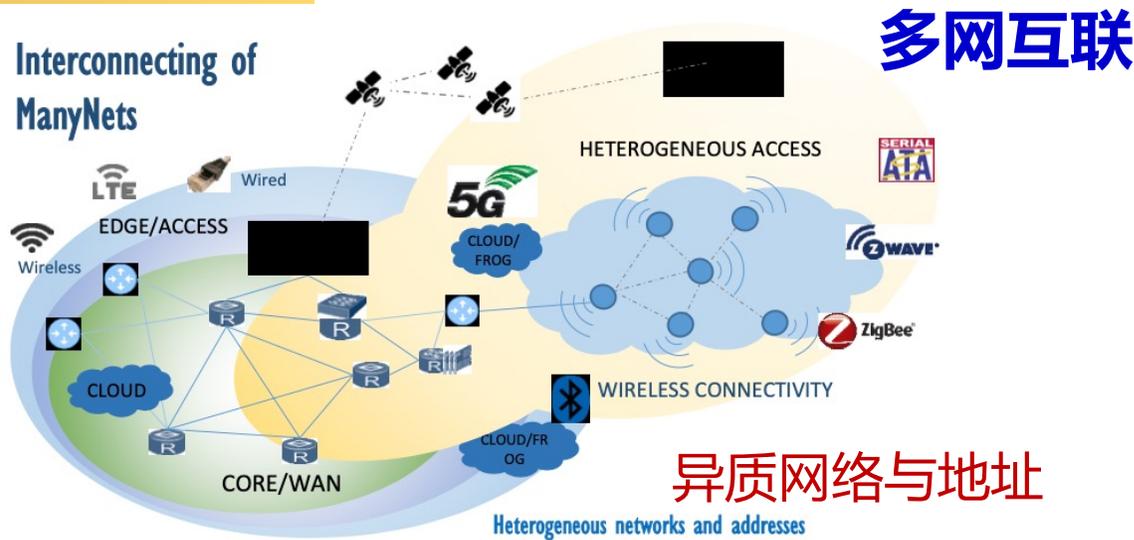
② New IP : 需求

万物互联 Interconnecting of Everythings



灵活变长地址 Flex valuable length address

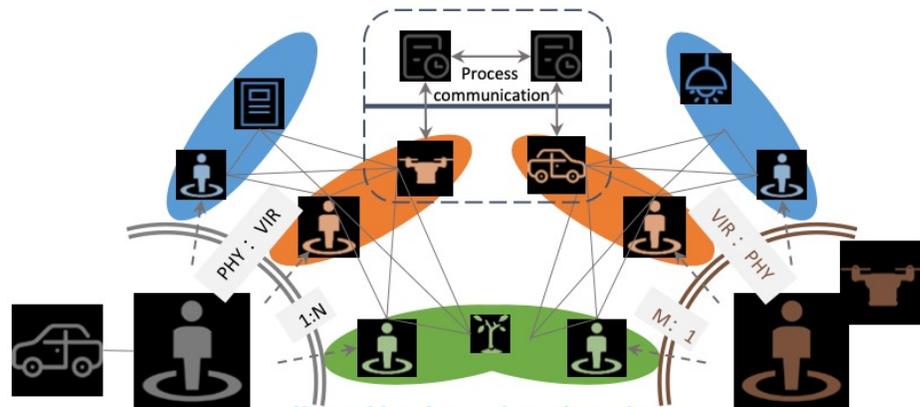
来源：华为，
New IP
Networking for
Network 2030



异质网络与地址

Heterogeneous networks and addresses

虚实融合 Integration of physical and virtual world

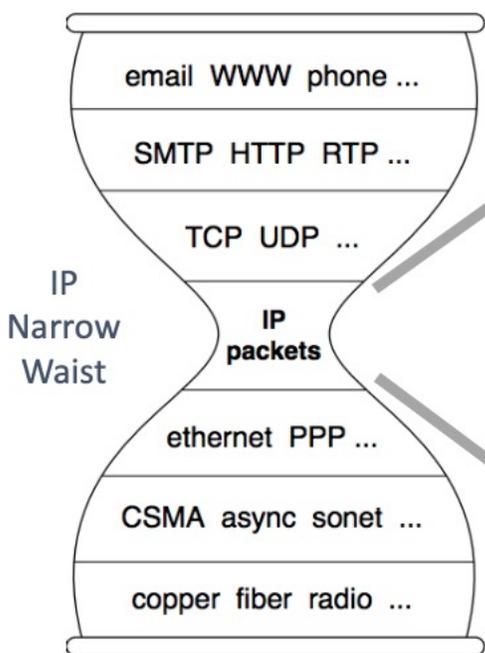


New addressing and routing scheme

新型寻址路由方案



② New IP : 新细腰



Best-effort can hardly provide reliability QoS and support strict requirements from complex application.

By remaining the advantages of statistical multiplexing and compatibility from traditional IP network, New IP aims to upgrade the fundamental capabilities then let the network become the incubator of the future services.

Only provide connectivity. All the elements will be mapped into equal-length digital address which is hard to support diversity services.

Support more applications

Compatible with diversity network elements

New Waist

New IP

+ Ultra-high throughput

+ Deterministic forwarding

Best Efforts

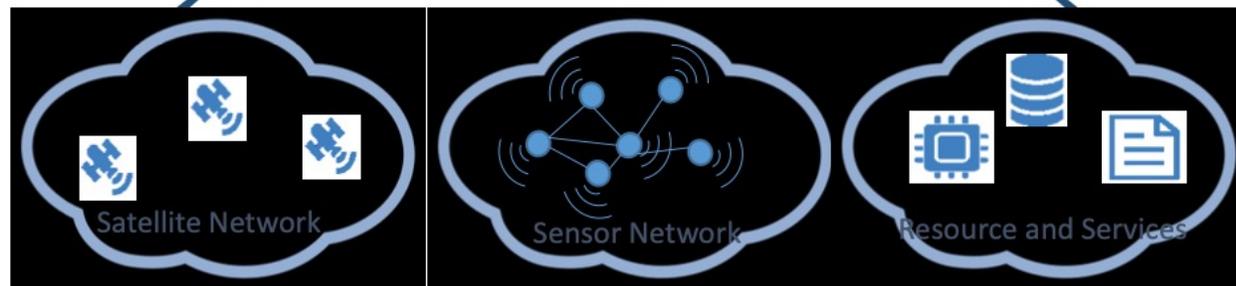
+ user customized

+ instinct security

Fixed length IP address

+ multi-semantic addressing

+ variable length address





③ 互联网 or 智能面

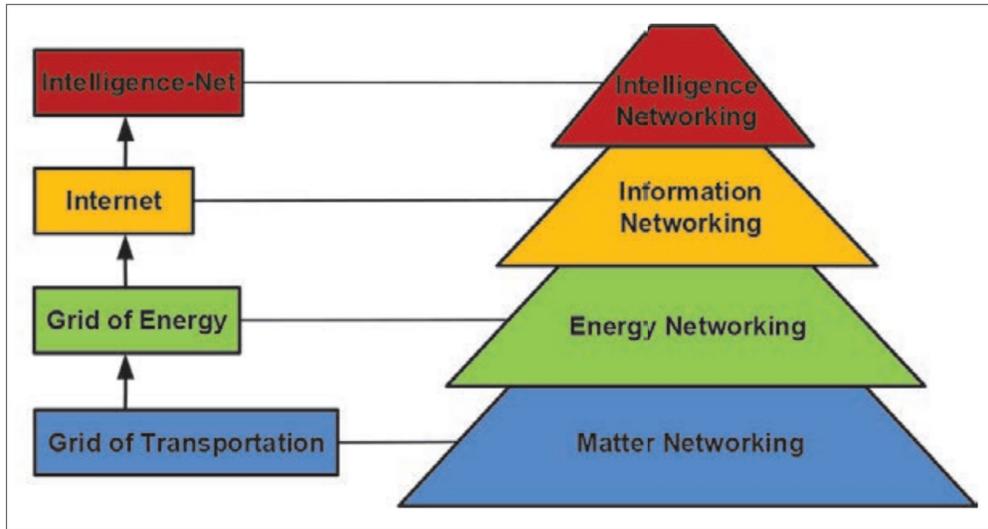
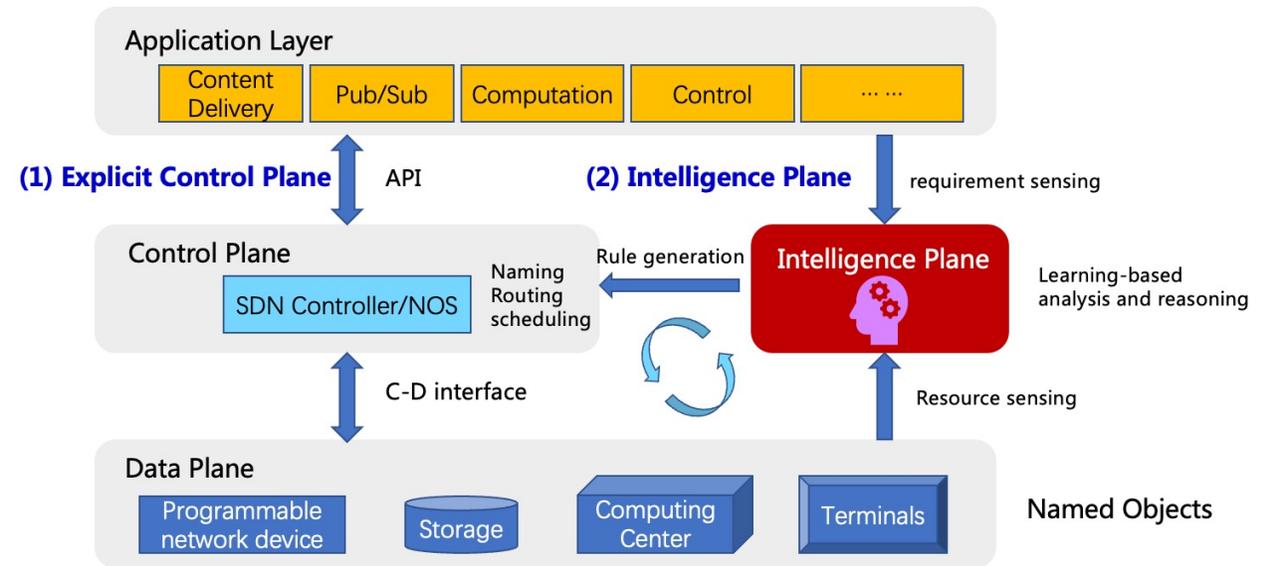


FIGURE 1. To facilitate humans' cooperation in our socio-economic systems, we have invented technologies enabling networking for matter (grid of transportation), for energy (grid of energy), and for information (the Internet). We envision that the next networking paradigm could be intelligence networking (Intelligence-Net)."

Intelligence Networking

来源：F. Richard Yu, From Information Networking to Intelligence Networking: Motivations, Scenarios, and Challenges. IEEE Network, 2021



Intelligence Plane

来源：Jiangtao Luo, Evolution of NDN Architecture (Invited), IEEE HotICN, 2021.11

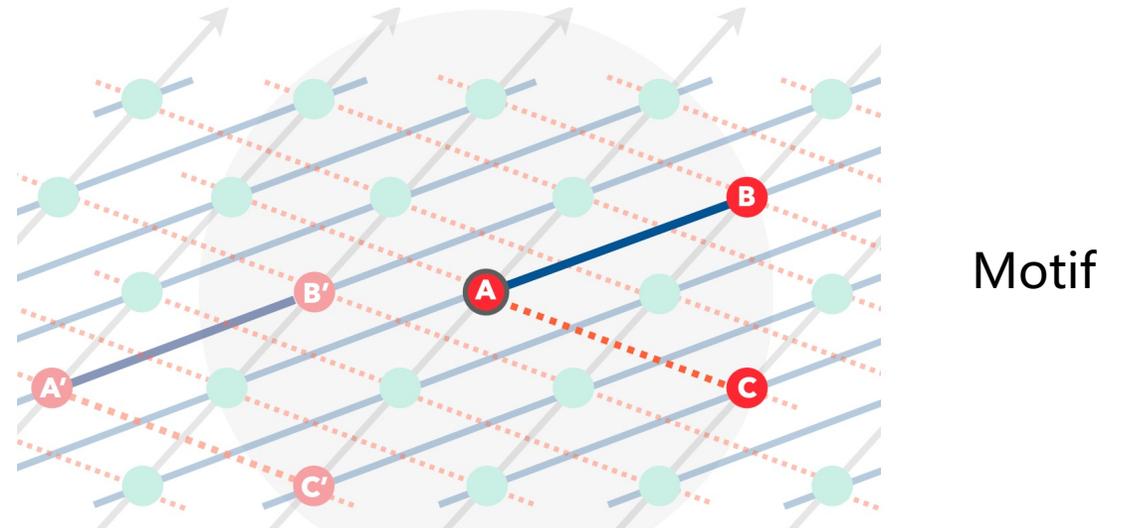
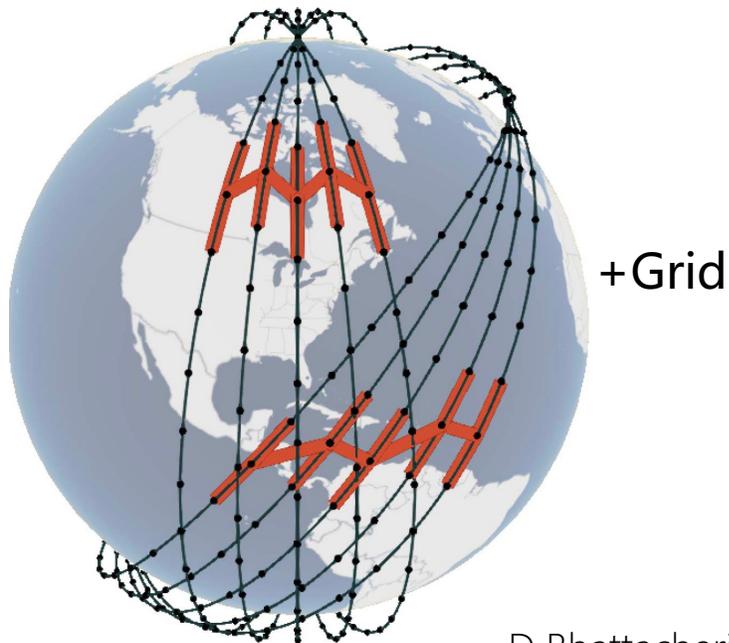


2. 巨星座座型动态智能规划：传统

雒江涛 2023

66

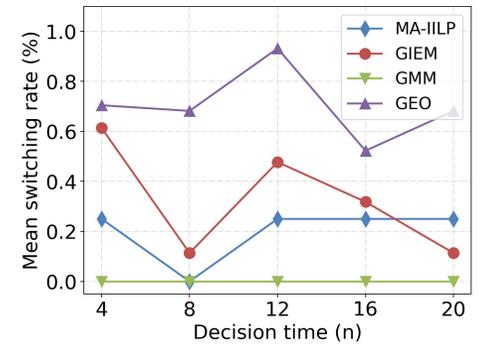
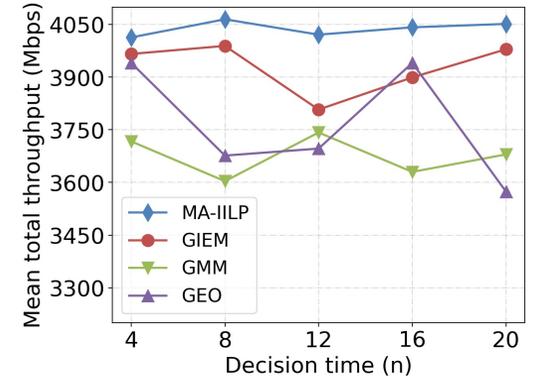
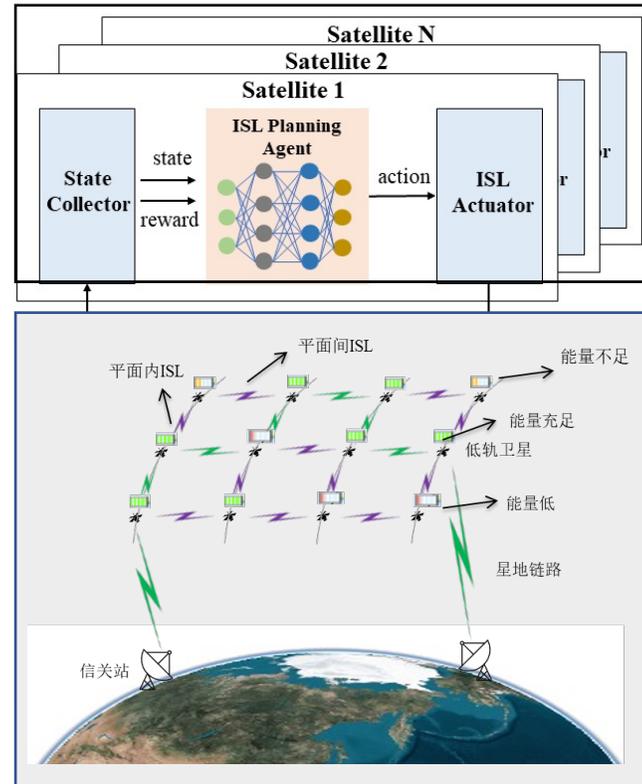
- 静态全连接方案：+Grid
- 经验业务矩阵穷举得到最优 Motif
- 这两类方案都属于静态规划，并不能在复杂约束条件下取得综合最优





2. 巨星座座型动态智能规划：

- 目标：①可用总体带宽最大；②切换综合成本最低
- 方法：深度强化学习
- 结果：
 - 星间链路动态规划算法通过集中式训练、分布式执行的多智能体范式
 - 在星座总吞吐量、卫星平均星间链路数量以及链路切换率等性能上都要优于基准算法（GMM）



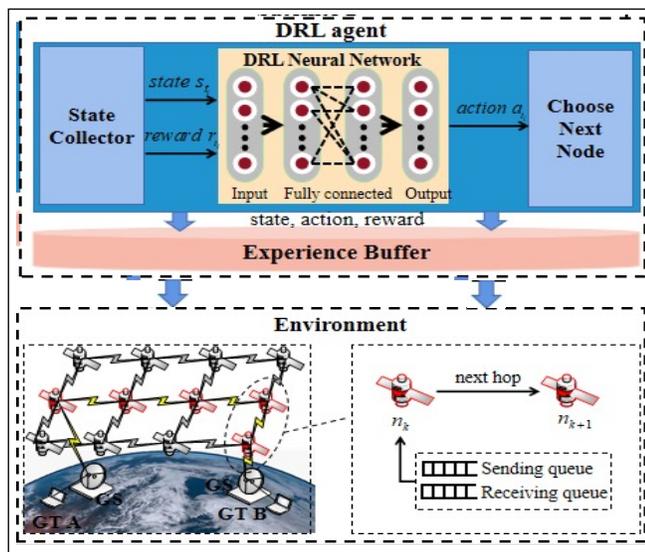
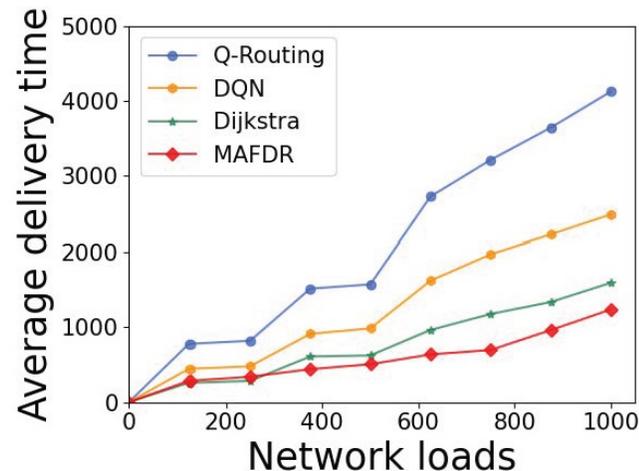
J. Pi, Y. Ran, H. Wang, Y. Zhao, R. Zhao and J. Luo, "Dynamic Planning of Inter-Plane Inter-Satellite Links in LEO Satellite Networks," [ICC 2022](#)

Y. Li, J. Luo, Y. Ran, "DeepISL: Joint optimization of LEO Inter-Satellite planning and power allocation via parameterized deep reinforcement learning", [Globecom 2023 \(accepted\)](#)



3. 星上智能路由

- ❑ 难点：星上资源有限、链路动态变化；业务需求突发多样；大规模网络传统路由协议收敛慢
- ❑ 目标：最小化End-to-End时延且丢包率最小
- ❑ 思想：基于局部可观测信息进行转发；利用多智能体深度强化学习方法



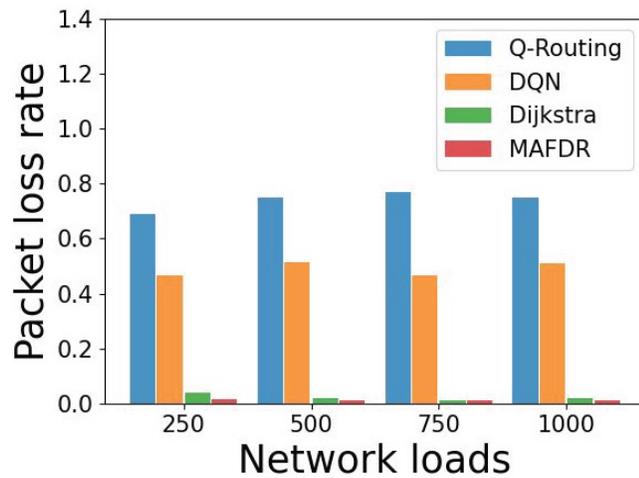
高动态性
 计算复杂度高
 高开销和高时延

理论

- 多智能体深度强化学习
- 部分可观马尔科夫决策过程

性能

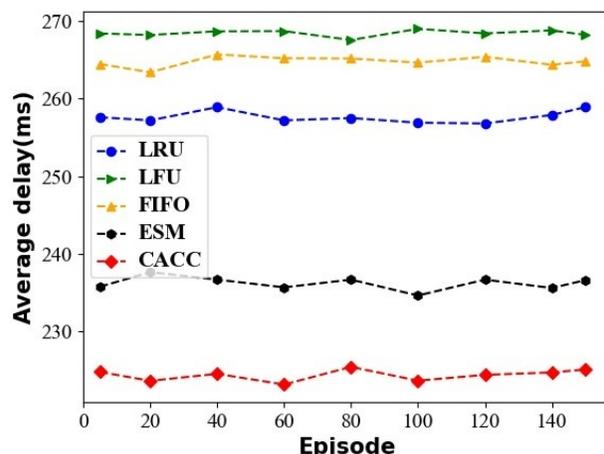
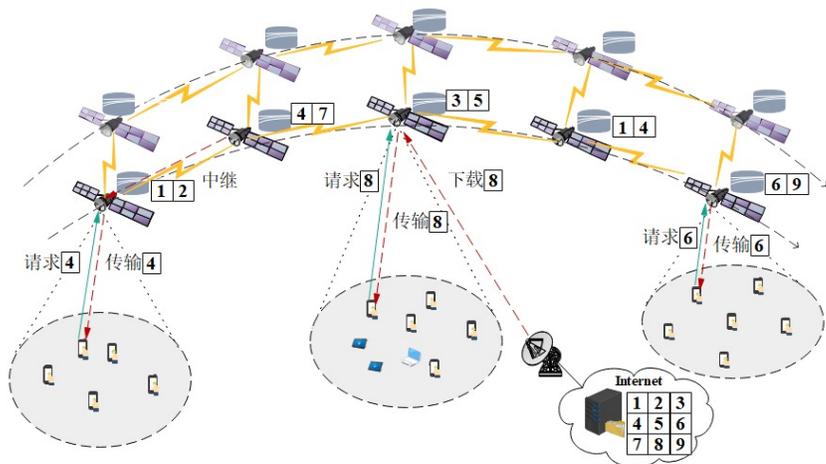
- 比基准算法的平均时延减少了约 **19.9%**
- 丢包率降低约 **26.5%**



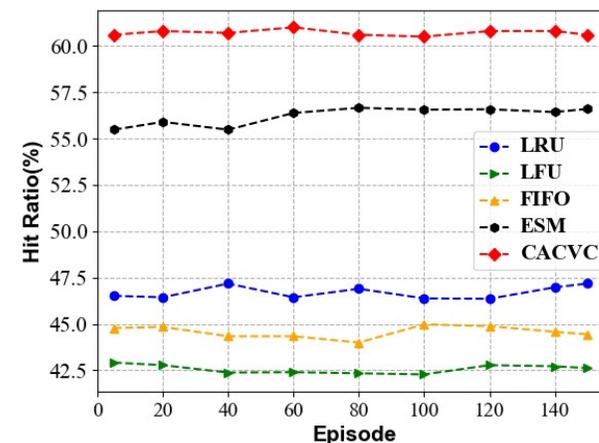


4. 多维资源智能调度：①星地星间协作缓存 江涛 2023 69

- **难点**：单颗卫星存储空间有限；但业务需求多样、全球分布
- **目标**：传输时延最小；缓存命中率最高（降低资源重复浪费）
- **思想**：提出基于覆盖带的内容流行度模型和内容服务模式，构建基于时延的优化模型，优化缓存放置，降低内容服务时延。
- **方法**：多智能体强化学习



(a) Average video service delay



(b) Cache hit ratio

优化后时延提升5.3% ~ 19.6%；缓存命中率提升 4-15%

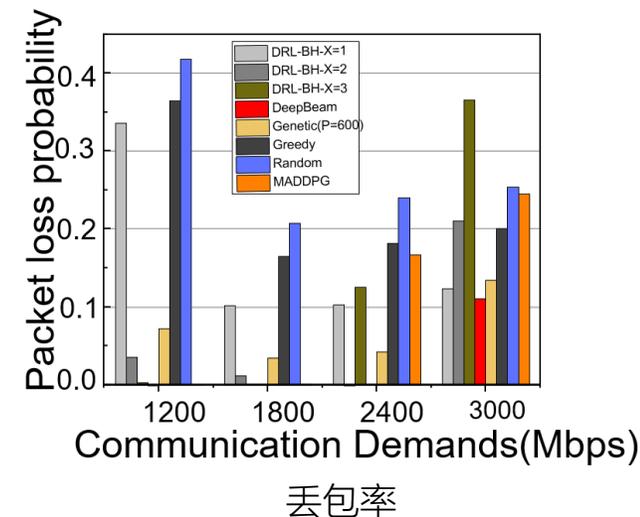
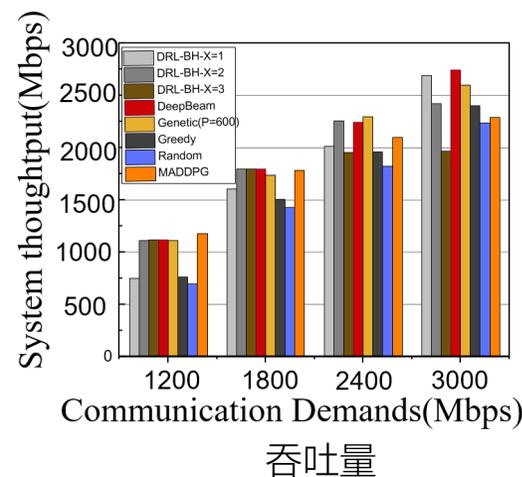
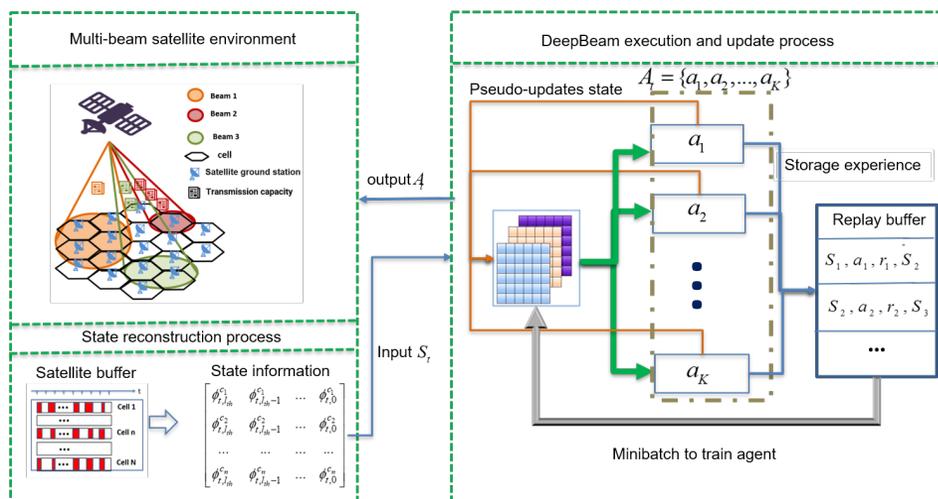
Ruili Zhao, Yongyi Ran, *Jiangtao Luo*, Shuangwu Chen, "Towards Coverage-Aware Cooperative Video Caching in LEO Satellite Networks," in *Globecom 2022*.

Ruili Zhao, *Jiangtao Luo*, et al. Coverage-Aware Cooperative Caching and Efficient Content Distribution Schemes in LEO Satellite Networks, ACM Satcom'2023 workshop (accepted)



4. 多维资源智能调度：②跳波束覆盖优化

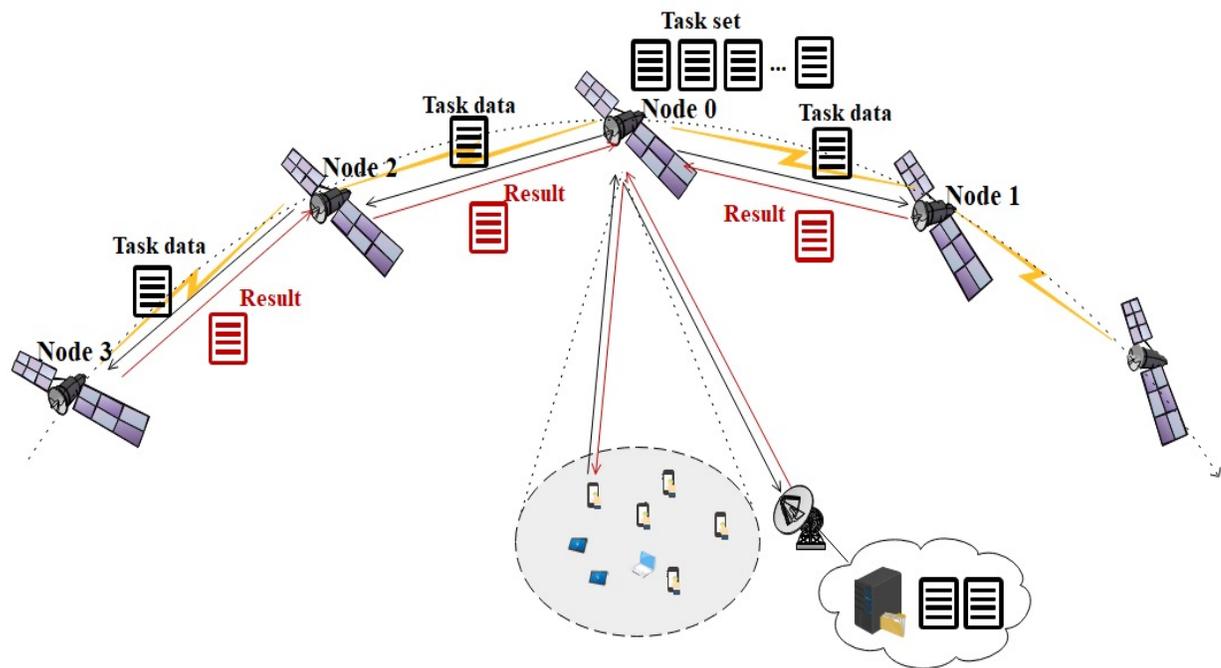
- **难点**：星上波束资源有限；但地面小区覆盖和业务需求突变
- **目标**：用户侧服务质量满足，系统整体吞吐量最优
- **思想**：对波束跳变及覆盖控制策略的联合优化
- **方法**：多智能体深度强化学习



所提 **DeepBeam** 算法能够更有效地提升了卫星的系统吞吐量，并且降低了卫星系统的丢包率。



4. 多维资源智能调度：③星间协同计算 雄江涛 2023



场景：天基数据的多星协同计算任务

核心思想：将MEC引入星地融合网络，构建基于时延和能耗联合优化的任务卸载模型，通过分布式强化学习算法进行卸载决策优化，确保网络的服务质量。

网络场景：地面或天基计算为主的任务，比如侦查目标快速检测。

难点：如何选择合适的任务卸载节点。

研究思路

1. 任务卸载的时延模型（通信时延，计算时延）
2. 任务卸载的能耗模型（通信能耗，任务计算能耗）
3. 基于Q-learning 的计算卸载



5.半实物仿真技术与平台：需求

大规模网络试验方法：

- 模拟 (Simulator) : ns2/ns3
- 测试床 (Testbed) : GENI , CENI
- 仿真 (Emulator) : Mininet

缺乏大规模空天地一体化半实物仿真平台！

Category / Tools		(i) Constellation Consistency	(ii) System and Networking Stack Realism	(iii) Flexible and Scalable Environment	(iv) Low-cost and Easy-to-use
Live LSNs or platforms	Live Starlink ([34])	✓	✓	✗	✗
	PlanetLab ([20])	✗	✓	✗	limited
	Emulab ([7])	✗	✓	✗	limited
Simulators and orbit analysis tools	STK ([35])	✓	✗	✓	limited
	GMAT ([11])	✓	✗	✓	✓
	SNS3 ([76])	for GEO only	✗	✓	✓
	Hypatia ([60])	✓	✗	✓	✓
	StarPerf ([61])	✓	✗	✓	✓
Emulators and variations	MiniNet ([55, 68])	✗	✓	✓	✓
	DieCast ([54])	✗	✓	limited at scale	✓
	Etalon ([69])	✗	✓	limited at scale	✓



5.半实物仿真技术与平台：已有条件 雒江涛 2023 73

- 已完成一套星地融合网络高精度仿真平台（与中科院软件所合作）
 - 基于国外 Exata 仿真引擎
 - 具备真实协议测试、典型星座导入、链路失效、业务模型、性能评估、3D可视化等丰富功能；
 - 具有半实物接入能力，映射星间、星地视频传输。
 - 支持 < 2000 颗星的路由仿真，但收敛很慢。
 - 缺点：核心还是基于离散事件驱动模式，保真度不足；扩展性不强；基础商用软件，License 费用昂贵。



还是需要基于容器的自主仿真平台。



- 结合本团队的研究工作，总结了空天地一体化组网，特别是卫星互联网部分关键技术，包括组网架构，提到了 ICN/NDN、New IP，以及物联网和智慧平面的模型、星座的动态规划、星上智能路由、多维资源联合调度、半实物仿真等工作。
- 重点谈了各部分工作面临的难点挑战、解决思路以及初步结果。
- 要点：面临空天地一体化组网的复杂环境，决策是重点采用人工智能，特别是强化学习方法；并结合半实物仿真平台。



1. 从 6G 愿景出发，阐明空天地一体化基本概念；它融合了 6G 愿景中通感一体、智通融合和泛在连接三大新增场景，并支撑对 5G 三大场景的提档升级。空天地一体化网络既是 6G 的重要组成部分，又是 6G 的重要应用场景。
2. 从国家安全、稀缺资源、技术进步、产业拉动四个角度阐述发展空天地一体化的必要性和紧迫性。
3. 阐明数字化转型基本内涵；以七个场景为例，突显空天地一体化在其中提供广域覆盖、智联万物的重要作用。
4. 针对空天地一体化组网的挑战，结合团队工作，总结组网架构、星座规划、智能路由、资源调度、半实物仿真等关键技术。



感谢聆听！

Web: eini.cqupt.edu.cn

Email: Luojt@cqupt.edu.cn

Mobile: 18680886698

