



清华大学
Tsinghua University

未来无线移动通信思考

周世东

清华信息科学技术国家实验室

2022年9月23日

内容提要

- 无线移动通信**业务需求**思考
- 无线移动通信**技术发展**思考



清华大学
Tsinghua University

无线移动通信业务需求思考

面向人的媒体信息产生与处理

- 人类五官及大脑对信息的处理需求
 - 视觉信息占了约**70%**
 - 听觉**10%**
 - 触觉**10%**
 - 味觉**5%**
 - 嗅觉**5%**
- 人体其他信息媒体形式
 - 情感、思维、意图、

图像信息

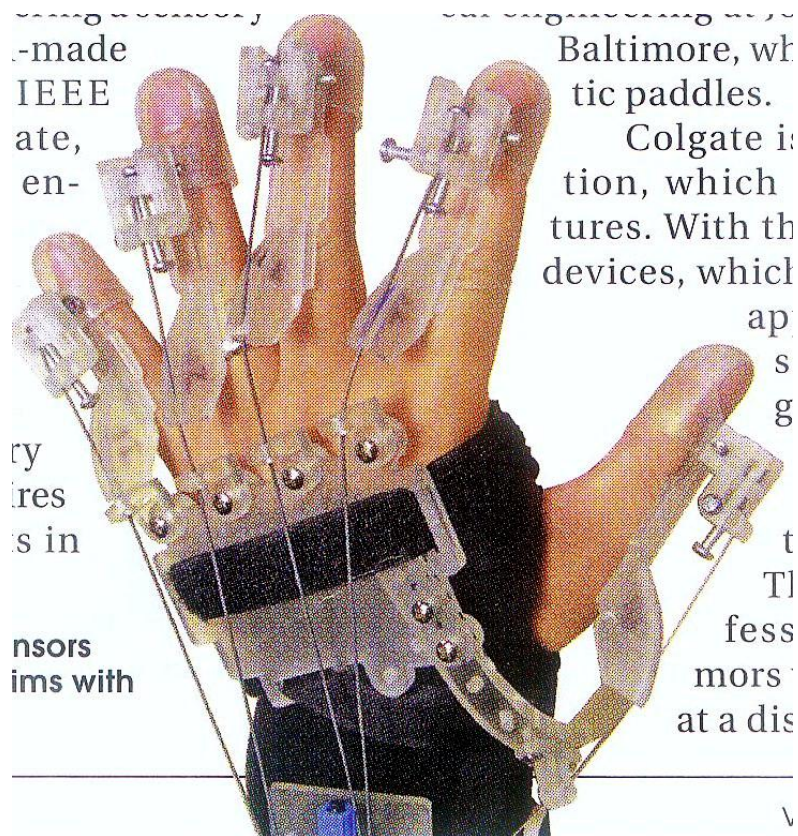
- 手机视频: **64~384kbps**
- 标清(480p): **2~4Mbps**
- 家庭高清(1080p): **15~40Mbps**
- 数字影院: **600Mbps~1Gbps**
- 多视角3D电视(1080p): **1Gbps**
- 3D数字影院: **3Gbps~6Gbps**
- VR/AR: **20Gbps~**



声音信息

- 移动电话语音：4~8kbps
- 固定电话：64kbps
- MP3：200kbps
- CD：1Mbps
- 7.1声道HD-DTS：5.7Mbps
- Dolby TrueHD Audio 5.1：13.122Mbps
- 蓝光LPCM 5.1：27.648 Mbps
 - 192KHz采样，24bits量化

新媒介——触觉、嗅觉



以人为终点的的信息处理与传输 “三个层次”

- 信息载体—机器可接受
 - 比特：“01001011”
- 信息媒介—感官可接受
 - 人类感官可接受的媒体形式；声音、图像、...
 - 麦克风——扬声器，摄像机——电视机
- 信息内容—大脑可接受
 - 人类大脑理解
 - 计算机辅助理解，搜索引擎，AI

信息服务——通过改变物理世界服务于人

面向内容的无线移动通信

- **30年前个人通信业务的“梦想”成为现实**
 - 任何时间、任何地点与任何人通信
- **下一个20年的追求**
 - 在人们需要的时间、需要的地点、提供所需要的信息服务
- **自主通信业务**
 - 通过传感器收集信息，通过上下文分析，判断用户意图
 - 根据用户意图、用户位置情况和自然环境状况，自动触发各类关联业务
 - 通过合适的执行器在无需用户主动干预的前提下提供适当的服务

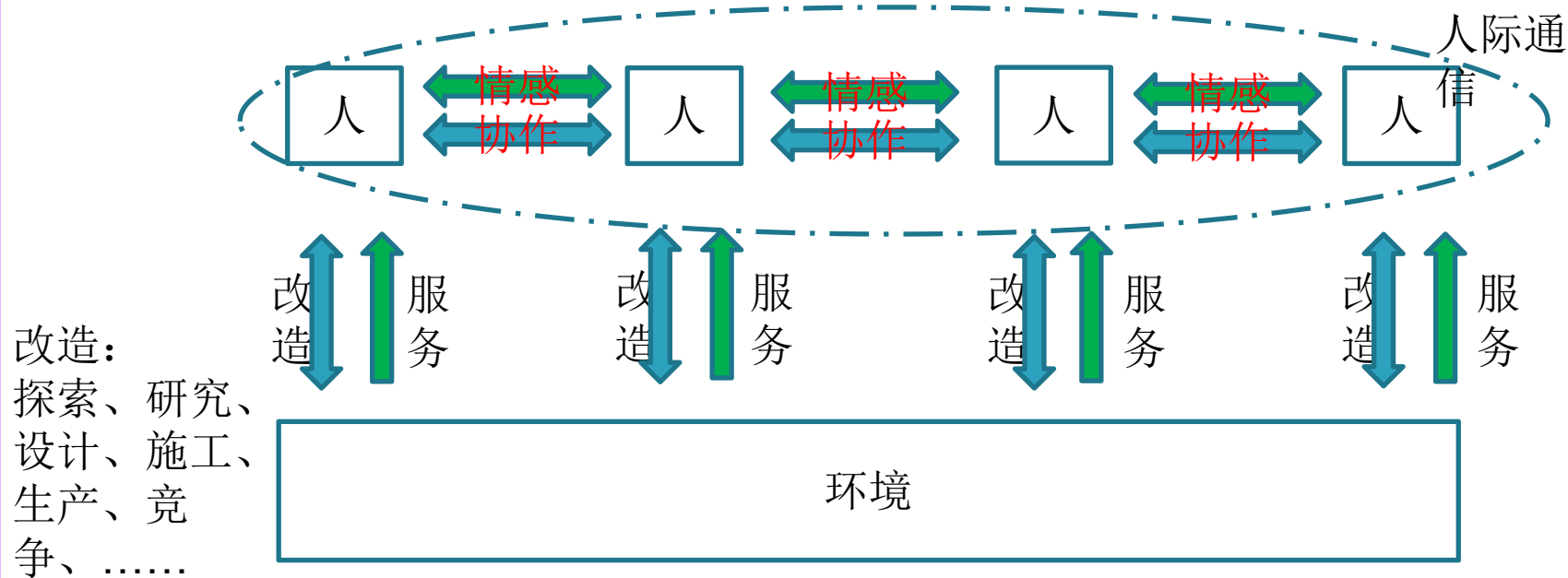
适当的信息服务

- 向用户进行主观呈现的信息（音、视频）
- 延伸服务：与物理世界、智能体的交互
 - 交通、环境控制、社交、外骨骼
 - 特点：与一个充分互联的信息世界进行交互

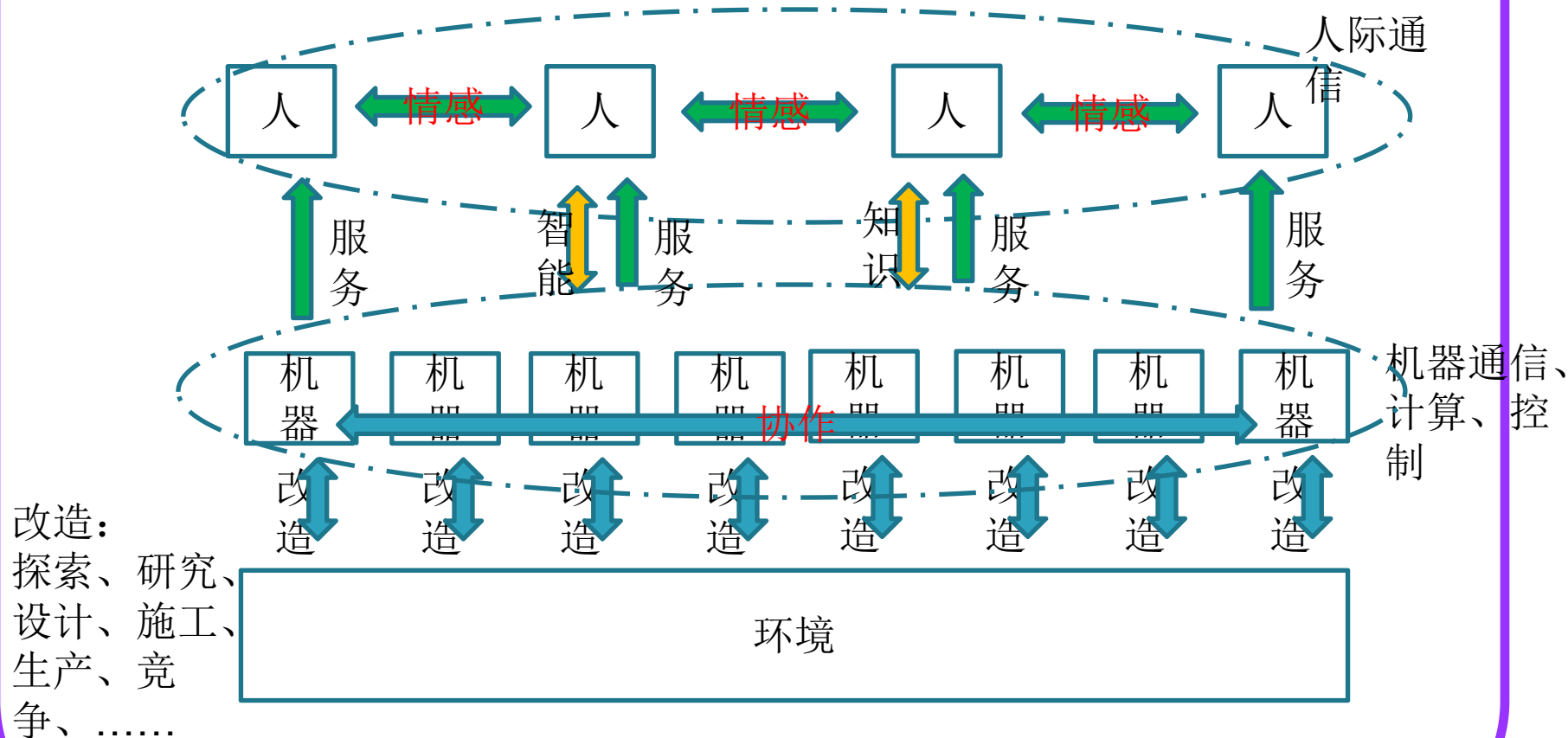
构建自主通信的要素

- 传感器网络功能
 - 人周边：延伸人类感官的感知度、感知范围、感知时间、感知地点，可以突破人类感观瓶颈
 - 机器网络：物理世界的一切可测量的采集与传输
- 执行器网络功能
 - 将服务转换成为人类最适宜接受的形式提供给用户：听觉、视觉、触觉、.....
 - 机器网络：物理世界的一切可操作的动作
- 海量信息内容处理
 - 基于上下文的信息处理
- 海量信息传输的通信网

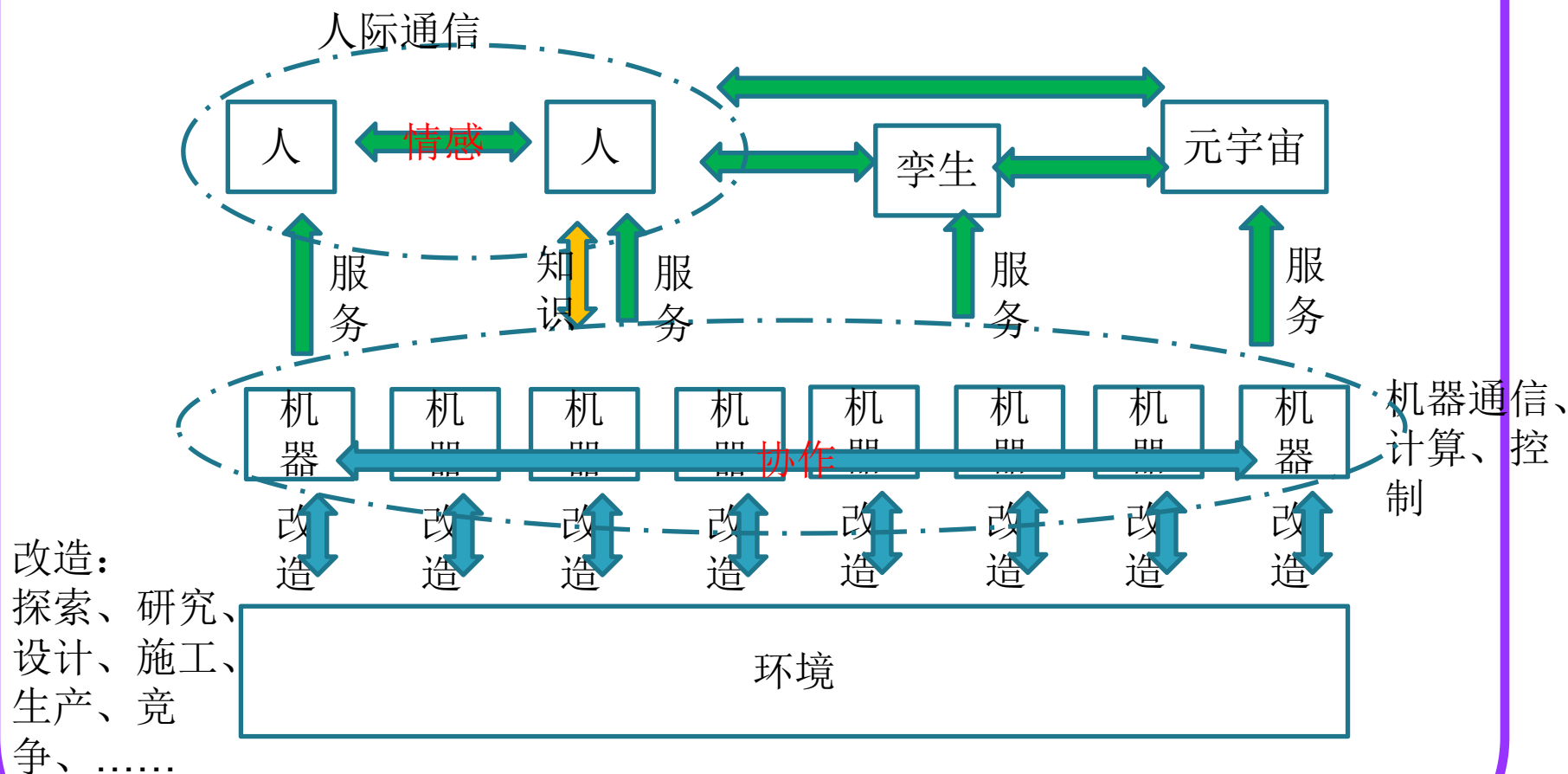
长远趋势：当前



长远趋势：未来



人与环境的关系变迁



引起通信需求分布的演化

超大型计算环境（信息系统）

- 感知外部世界、做出决策、控制外部世界
- 差异巨大：任务，节点（能力、责任、收益）
- 通信是基础
- 移动性：人/动物、传感器、生产设备、运载工具、物流.....
- 业务特点：大规模、大动态、高移动、高可靠、低延时、差异化



清华大学
Tsinghua University

无线移动通信技术发展的思考

无线移动通信的挑战与技术

- 覆盖问题：能量是否可达
 - 信息覆盖的需求：偏远陆地、海空、水下、地下、体内
 - 解决途径：
 - 新的传播机理：机械波、磁感应、分子
 - 延伸平台：卫星、飞机、气球
 - 协作组网：分布式天线、协作中继、自组织网、智能表面.....



无线移动通信的挑战与技术

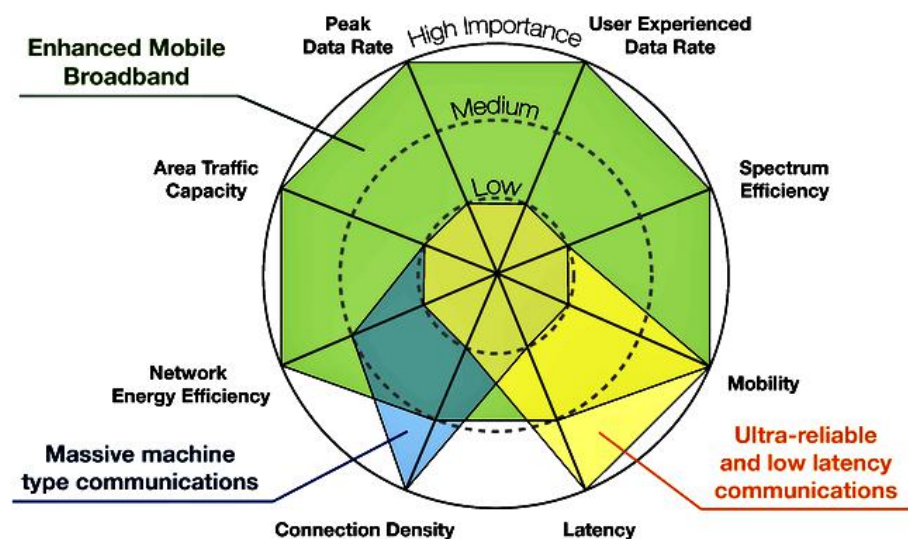
- 容量问题：带宽资源的有效利用
 - 有限带宽与的速率/用户数量的矛盾
 - 解决途径：
 - 扩展高频段：mmW、THz、红外、可见光.....
 - 可用带宽巨大，但穿透能力太差
 - 低频段的再利用：电视频段、认知无线电
 - 频率资源的空间重利用：大规模MIMO、多小区协同.....

主要技术努力方向

- 新频段、新通信平台
- 新指标：高可靠、低延时、安全性
- 定制化
 - 动态的环境感知
 - 基于业务需求感知的通信服务
 - 开放的网络架构

通信指标的极致化

- 超高速率：突破人类视觉需求
- 超大连接数：从物联网到工业制造
- 极致的实时性、可靠性
- 极致覆盖率：陆、海、空、天、水下、地下
- 安全性
- 绿色节能



主要关注的三个矛盾

- 移动性 与 可靠性/实时性
 - 空口侧
- 超大规模 与 控制效率
 - 空口侧
- 多指标大动态范围 与 产业链效率（设计、生产、部署、运营）
 - 网络架构与生态

巨连接短包业务的支持

- 多：物联网的首要关键词
- 业务特点：繁杂
 - 移动性：
 - 有高移动性要求，但以低移动性为主，甚至大量的无移动性，
 - 但出于安装、使用、维护方便考虑，即使静止仍需要无线
 - 数据量需求：动态范围很大
 - 大部分终端数据量不大，但要保持连接，需要传数时要能得到服务
 - 少部分终端要求大数据量，挑战更高
 - 时延要求：动态范围很大
 - 时延要求不高的，可积攒到一定时候再传，提高系统效率
 - 时延要求高的，很小的数据包也要传，相对开销是个挑战
 - 低功耗、可靠性、安全性
- 延时组成
 - 业务层面：采样、调度、处理
 - 通信层面：空口、核心网
 - 控制、处理向网络边缘推进，空口延时会成为最终瓶颈

短包业务无线传输时延影响因素

$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

活跃用户数：一个定时周期待传用户数

= 系统总用户数 \times 定时周期内激活概率

可用带宽：
系统分配给短包业务的带宽
终端低功耗 -> 低频段
-> 可用带宽往往比较紧张

短包业务无线传输时延影响因素

活跃用户数

$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

带宽

重传率：
为提高可靠性而引入

改进手段：提高一次成功率

- (1) 编码调制
- (2) 频率分集
- (3) 空间分集
- (4) 功率裕量
- (5) 改进重传协议



短包业务无线传输时延影响因素

活跃用户数

重传率

带宽

$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

每包符号数：
每次发包需要占用的时频资源数
可以是单载波上的符号数，也可以是OFDM的频域符号数

需要完成多重任务：
(1) 身份标识
(2) 信道估计
(3) 业务数据
(4) 消息认证

提升空间：
降开销、AMC

短包业务无线传输时延影响因素

活跃用户数 每包符号数 重传率

$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

带宽

过载率：
每个时频资源可重叠传输
的用户数

有调度的正交多址：1

CDMA：<1

Slotted Aloha: 0.368

有调度的SCMA: 1.5

改进空间：多址编码、资源调度

短包业务无线传输时延影响因素

活跃用户数 每包符号数 重传率

$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

过载率

带宽

空分复用
利用多天线提高频率重用
效率
集中式、分布式、CoMP

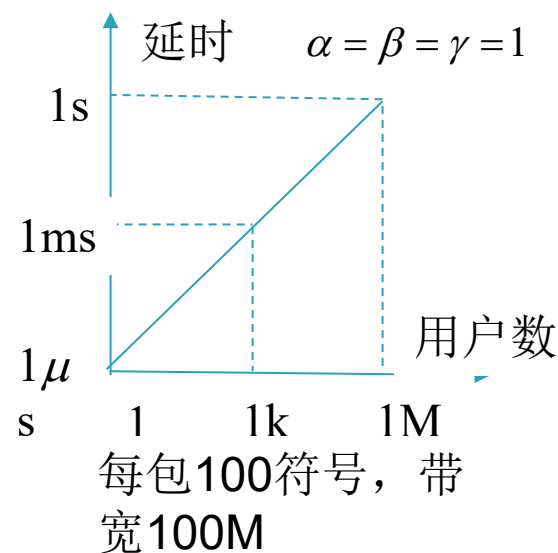
挑战：复杂度、开销

短包业务无线传输时延影响因素

活跃用户数 每包符号数 重传率

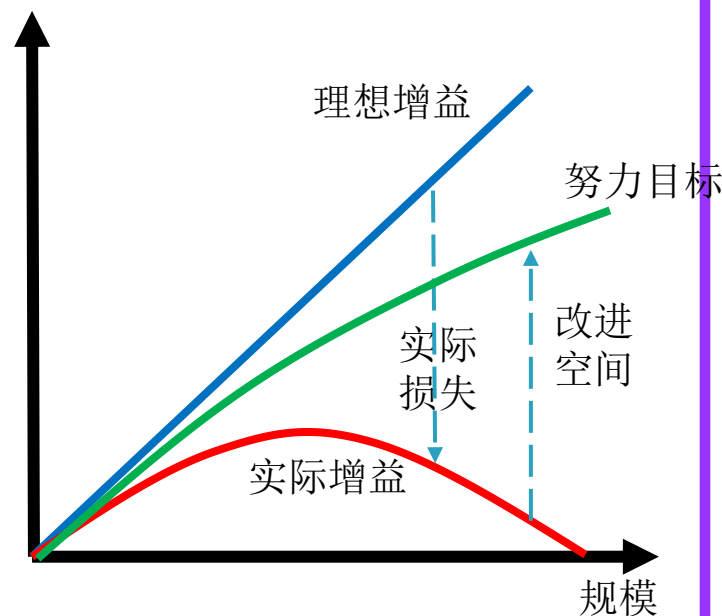
$$Delay = \frac{NL\gamma}{\alpha\beta B}$$

过载率 空分 带宽

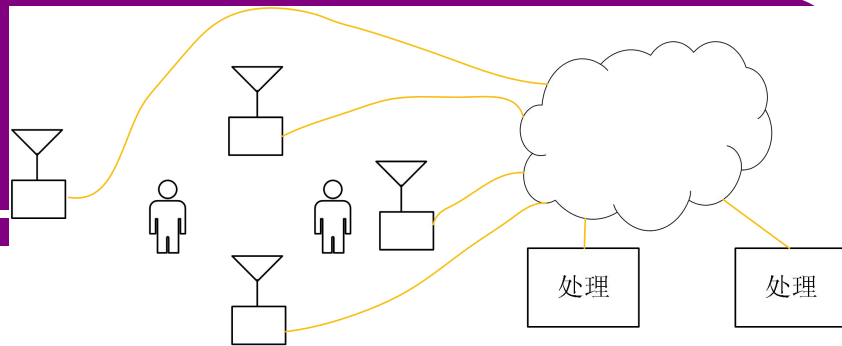


低频段（高覆盖效率）的进一步挖掘

- 超大规模MIMO：集中、分布
- 缩小与理想理论极限的差距，挖掘实际信道和实际约束下的性能极限
- 波束成形：全数字DBF、模拟ABF、混合HBF
- 天线形态：阵列天线、IRS/RIS
- 损失来源：协同互联（前传链路约束）、导频开销、反馈控制开销、误差恶化
- 实际信道与理论信道模型的差异：
 - 稀疏
 - 非高斯
 - 非平稳
 - 环境相关的空时频模型



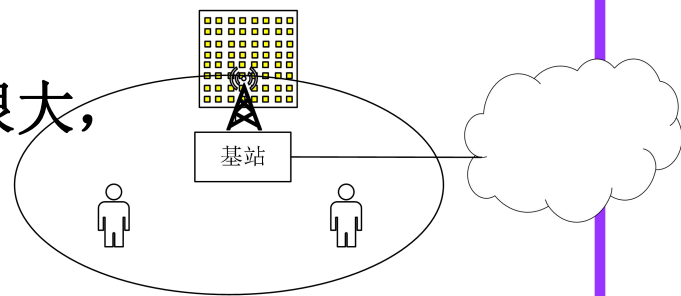
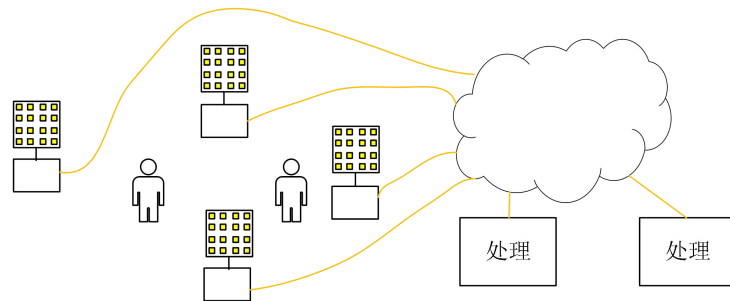
天线完全分布



- 特点：
 - 单天线前端，有线回传/前传（**BH/FH**），全网大规模协同
- 优势：
 - 在相同天线数量的情况下，覆盖能力最强
 - 也能支持终端多天线多流，但不会太多
 - 支持以用户为中心的虚拟小区
- 缺点：
 - 站址数量要求大，有线**BH/FH**工程量和维护要求高
- 挑战：
 - 虚拟小区重叠严重，规模化联合处理时，复杂度的控制有一定难度
 - 移动性对小尺度**CSI**的感知精度影响较大，可能导致较大的测量反馈开销

(M) MIMO节点的协同

- 特点:
 - 每个节点多天线,
 - 节点间协作
- 可用于低频段/高频段
- 优势:
 - 节省站点数, 协作的干扰抑制和管理
 - 支持单用户多流, 可实现覆盖盲点互补
- 缺点: 对前传链路 (FH) 的容量要求很大,
- 挑战:
 - 导频开销
 - 小区内/小区间/用户的动态波束管理
 - 机会: 更大的规模天线带来的: 可分辨性、稀疏性, 终端相关的基站相关性

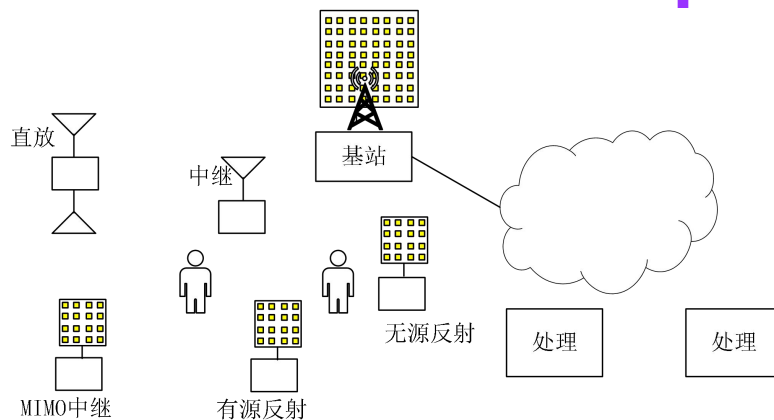


MMIMO节点协同中的关键问题

- 导频重用（节点内、节点间）
- 节点间的信道联合估计与跟踪
- 节点间的联合检测
- 多种协作模式的动态优化
 - 节点内空分：大尺度（波束间）、小尺度（波束内）
 - 节点间空分：大尺度（路损/遮挡）、小尺度（协同）

无线BH（回传）/FH（前传）

- 特点：协作节点与核心网无须有线连接
- 优势：
 - 部署灵活，没有FH压力
 - 协作节点间的无线信道相对稳定
 - 依靠多种方式进行覆盖增强
 - 也能支持终端多流
 - 支持高、低频段
- 缺点：需依托大规模天线基站
- 挑战：多种方式下的动态调配，**CSI**获得，多种预编码形式（节点内、节点间、基站）



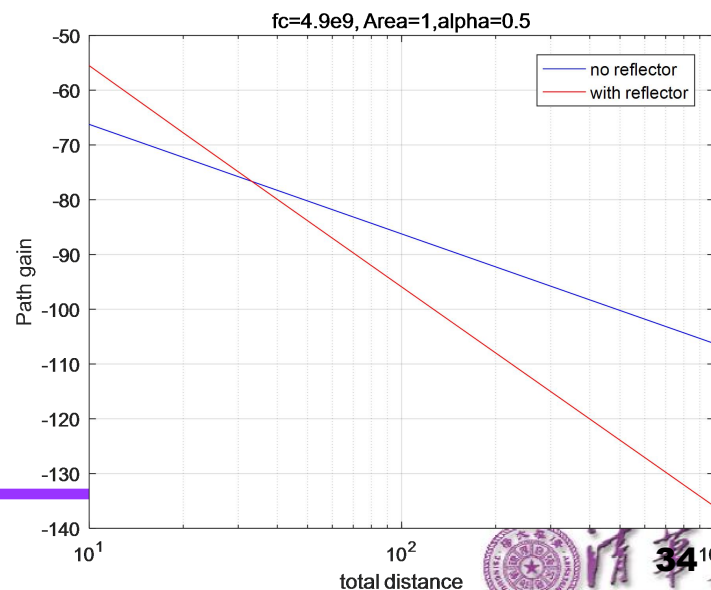
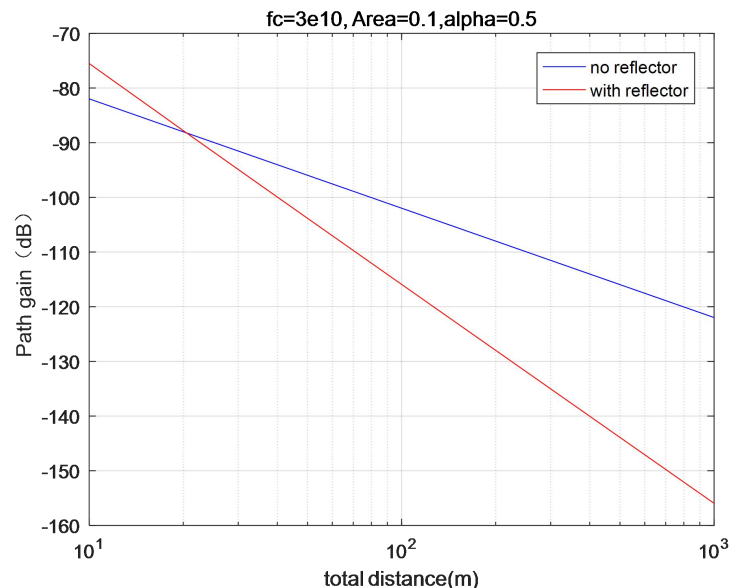
中继：无源v.s.有源

- 多跳之后的总路损增加
 - 口径补偿（挑战：智能表面）
 - 有源补偿（挑战：动态波束、收发隔离问题、模拟/数字）

$$G_{\text{直}} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$G_{\text{总, 反射}} \leq G_T G_A^2 G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{4\pi d_2} \right)^2$$

$$G_A = \frac{4\pi A}{\lambda^2}$$



终端多天线的利用

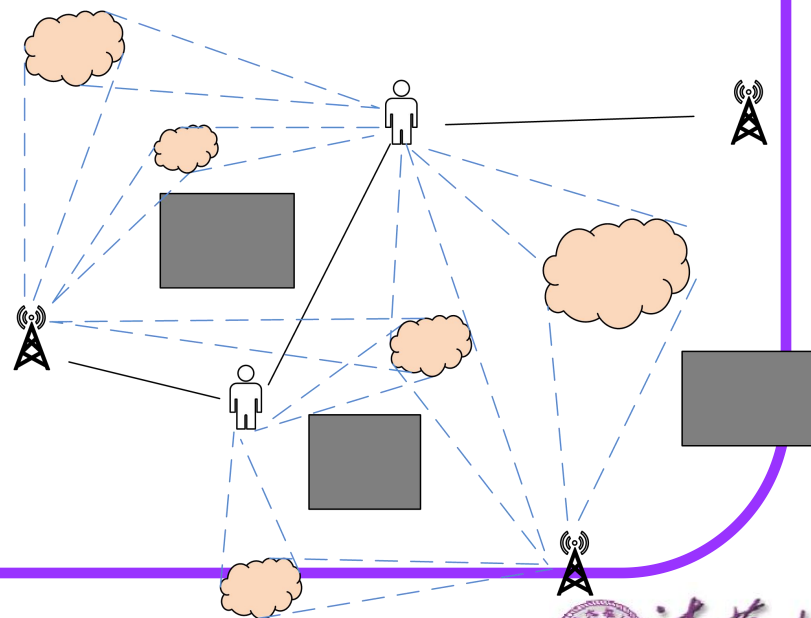
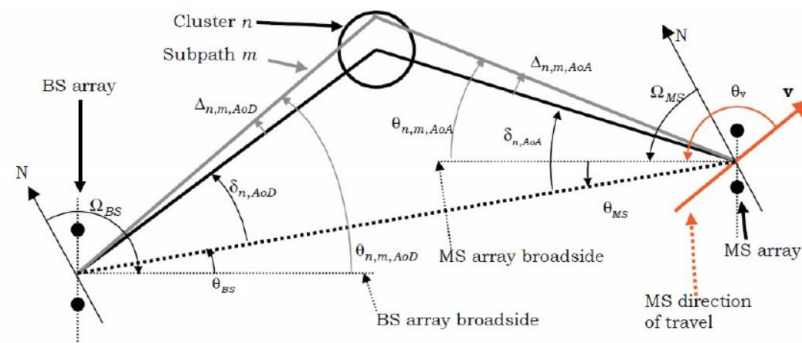
- 面向峰值速率提升：多流
 - 小区内多流，条件：散射环境丰富，
 - 小区间多流，条件：欠散射，或LoS
 - 小区内/间多流资源的动态调度
- 面向**EMBB**用户数的提升：干扰抑制

大规模协作的scalability

- 主要挑战：不同用户的虚拟小区部分重叠，全网联合求解的平均复杂度随联合的规模至少多项式增加
- 目标：线性复杂度、线性容量
- 主要解决思路：利用大尺度特性的不平稳性、稀疏性，发挥大规模集中天线的空间分辨能力和传播路损的差异，增强干扰隔离，减少用户/小区间的耦合
 - 如：利用终端多天线，近的时候用低功率多流，远时用单流
 - 又如：基站对不同地域定点投射能量，提高导频重用效率

与用户相关的信道模型

- 从单链路集中式MIMO模型
- 到多链路大规模MIMO模型
 - 更精细的角度结构
 - 更精细的时延结构
 - 更强的空/时/频稀疏性
 - 更强的非平稳性
 - 与用户相关的空间特性
 - 共同散射体
- 基于地理信息的信道模型



机会：基于大尺度信道信息的资源管理

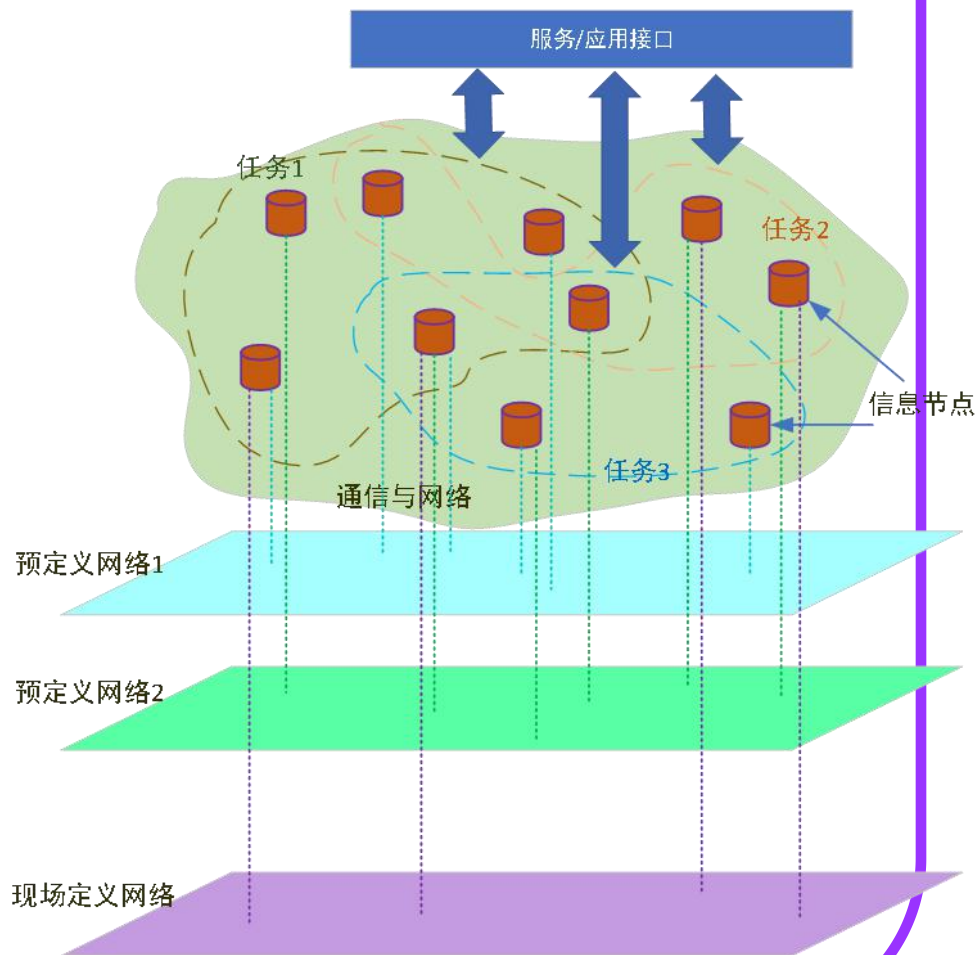
- 哪些信息：损耗、**LoS/NLoS**、簇的角度/时延特征、及其与用户位置之间的关系
- 波束设计、分配与干扰协调
- 导频分配与重用、导频污染管理
- 虚拟小区的动态划分与干扰隔离，**Scalability**
- 子流分配与功率控制
- 动态基站/扇区/波束激活
- 减少导频开销
- **FDD**信道预测
-

未来移动业务差异化趋势

- 多重目标/指标、多重场景
- 持续极端化，更高、更快、更强、更稳、更广、更省、更。。。。
- 应用种类繁多、层出不穷
 - 指标需求指标动态范围大，
 - 更新频繁、生命周期跨度更大
 - 面向应用的需求订制，提高效率，但应用特性越来越细，应用种类数量大，单个应用市场规模小，周期可短可长，入市及时性要求高，
- 单一标准、运营、设备，无法高效率地适应。
 - 十年一代不适应（来不及）
 - 面向海量市场的设备商看不上
 - 封闭的硬件/软件环境难以长期支持，竞争壁垒高。
 - 中小企业、研究机构、团队的的研究成果无法快速转化

面向任务的信息网络

- 以任务形式提供服务，通过服务/应用接口
- 每个任务都通过认知、决策和执行与环境发生关系
- 任务间：有分层（嵌套）结构、串/并行乃至网状的依赖结构
- 每个任务由若干空间/时间上分布的信息节点通过通信网的联系协作完成
- 信息节点能力：探测、感知、控制、执行、计算、存贮
- 任务的生灭和演化



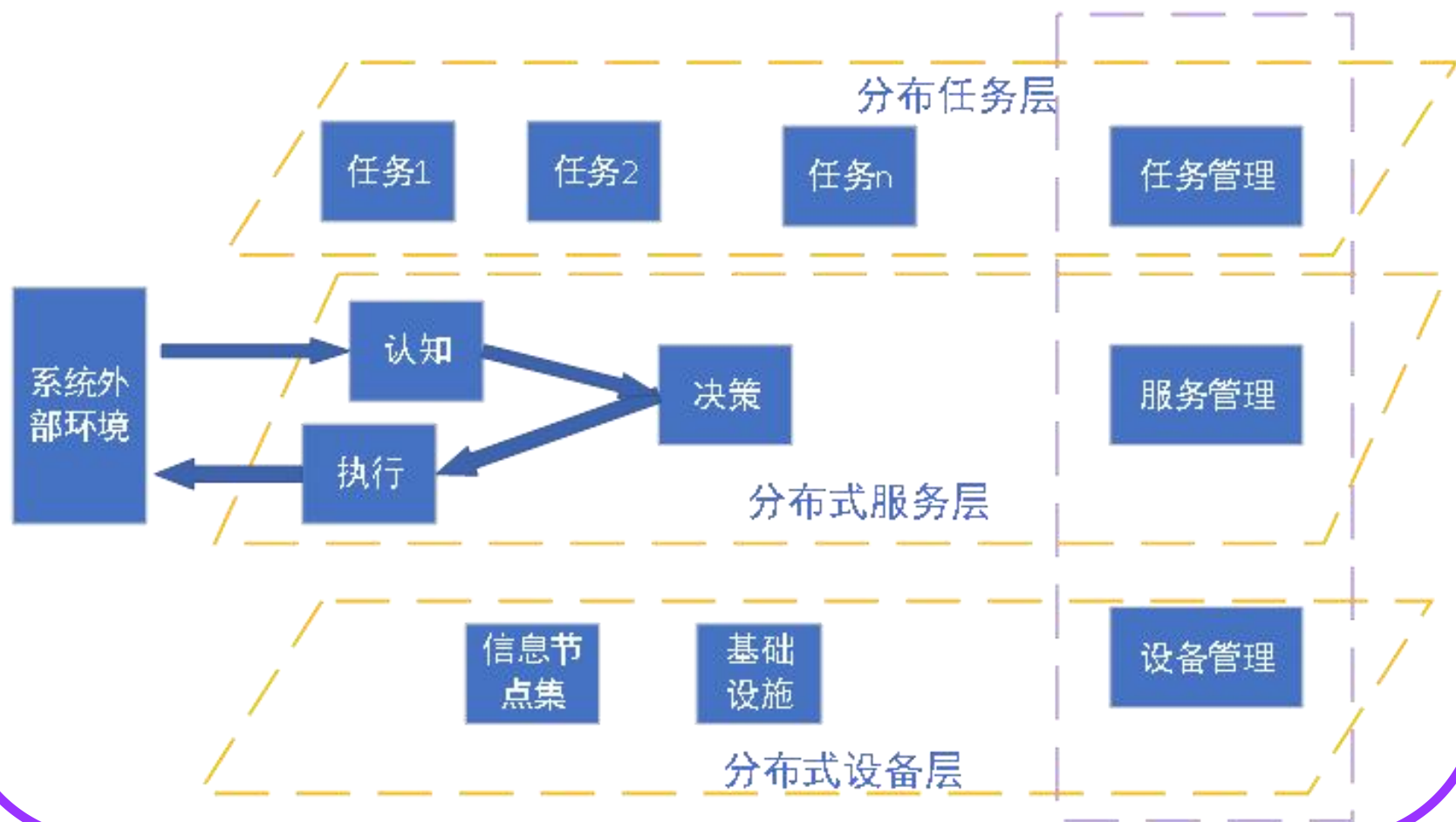
面向任务的现场定义的网络

- 在一定的空间里，由信息节点和基础设施组成，为满足多个动态生成的多个信息使能的任务（人-人，人-环，环-环）根据任务需求和环境条件的动态变化而现场动态构建、运行、维护、优化的信息网络

基本要素

- **基础设施**特指专为通信提供通道的基础条件，基站、骨干网、核心网等，
- **信息节点**的基本模块：信息处理，通信，管理/控制
- **信息处理**：感、存、算、控等，需支持算法和参数的动态调整；
- **通信功能**：需支持与波形、协议、参数的动态适配
- **管理控制**：根据情境（任务及环境）适时地对信息处理和通信进行管理和控制。

面向任务的现场定义网络



特点

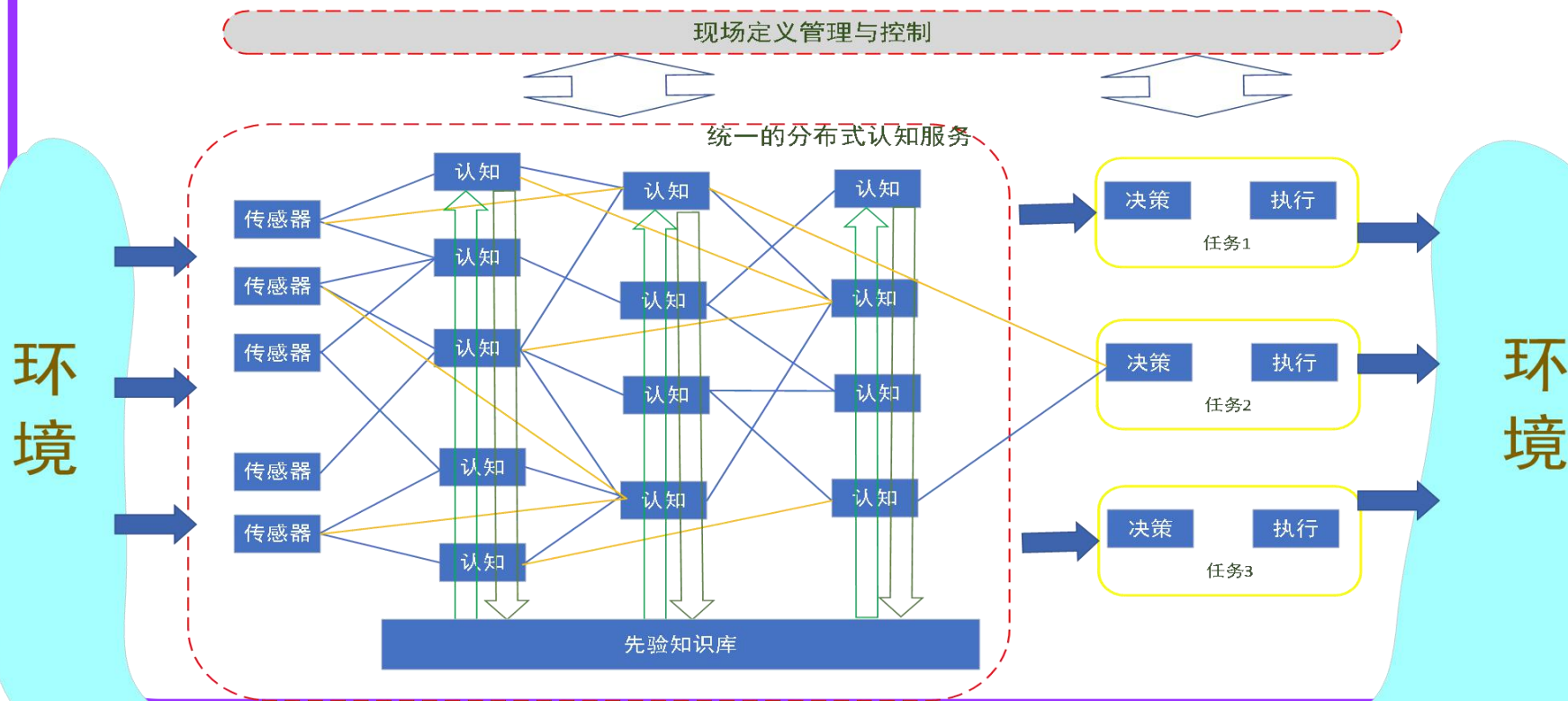
- 以任务为核心，以环境为条件
 - 任务适应网络 **v.s** 网络适应任务
- 信息节点、基础设施在任务间高度共享
 - 计算/存贮/执行/感知资源的分享、数据共享、认知共享、协作执行
- 动态性
 - 每个任务的信息节点集合、依托的网络集合、节点功能分配、传输网络拓扑、协议与参数

特点（续）

- 解耦性
 - 任务与设备解耦，寿命解耦
- 演进性
 - 网络、设备、体制、协议、标准的现场定义，实现渐进式的演进
 - 通过局部更新实现快速升级
 - 避免业务-研发-标准化-产业化的漫长流程

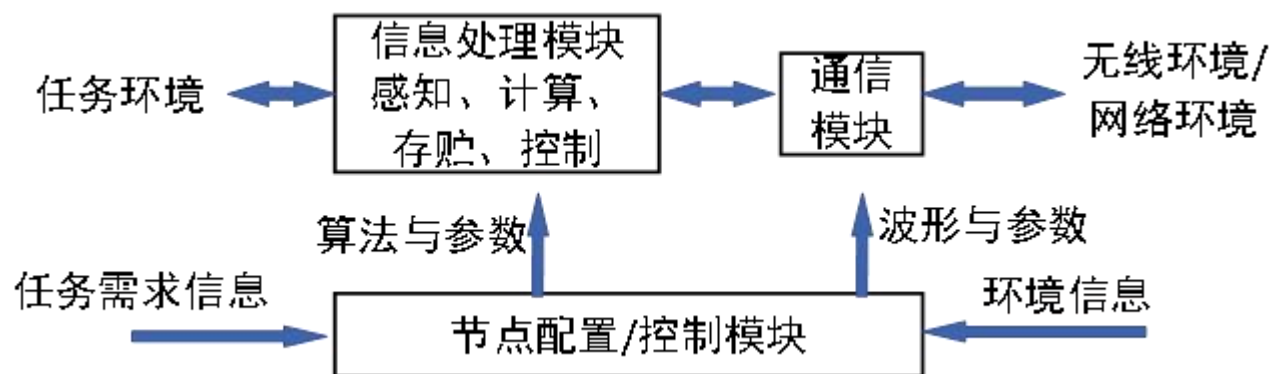
统一的分布式认知、计算服务

- 共识意义上的通信
- 广义的通感算控一体化

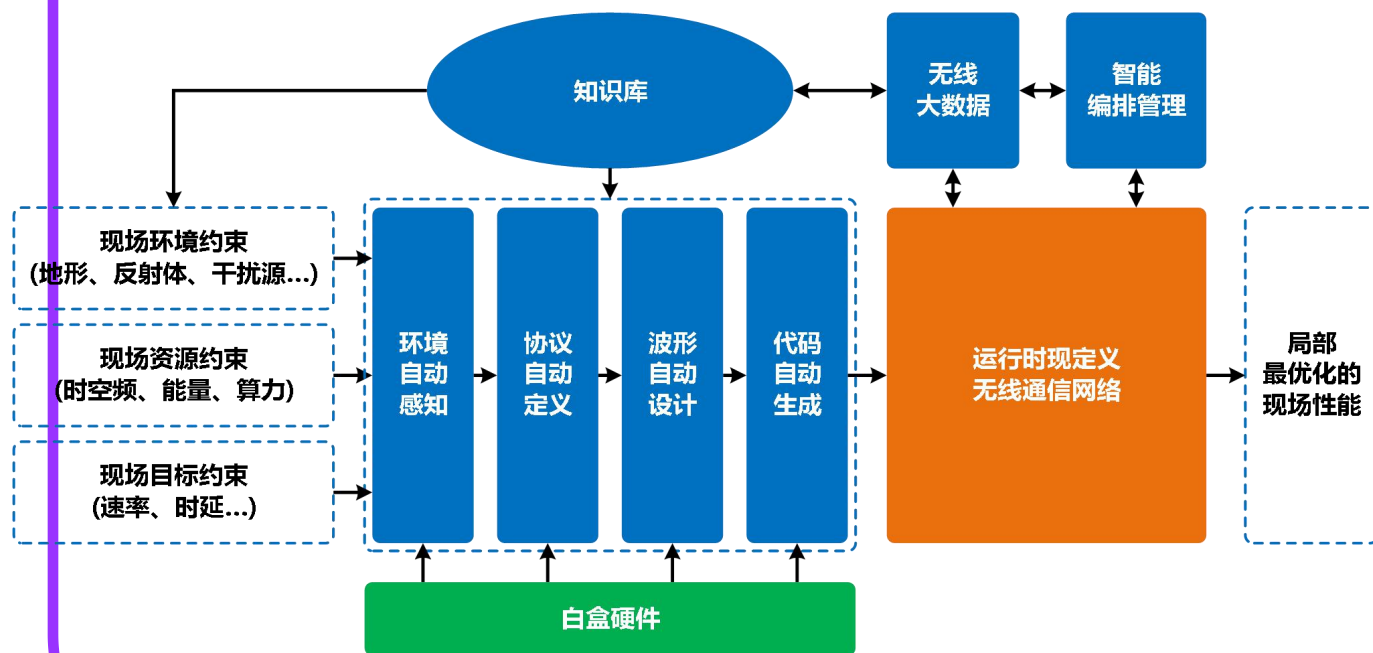


现场可定义网络支撑条件

- 开放架构与白盒硬件
- 宽带/全频谱可编程**RF**前端与天线
- 多层次情境认知
- 任务编排与代码生成自动化



通信功能的现场可定义



- 网络即时建立
- 性能现场最优
- 无代平滑演进
- 内生安全保证

信道与环境的协同认知

环境：影响电磁波传播的一切环境，
包括地形、建筑、动植物、车辆的
物理尺寸、材质、粗糙度……

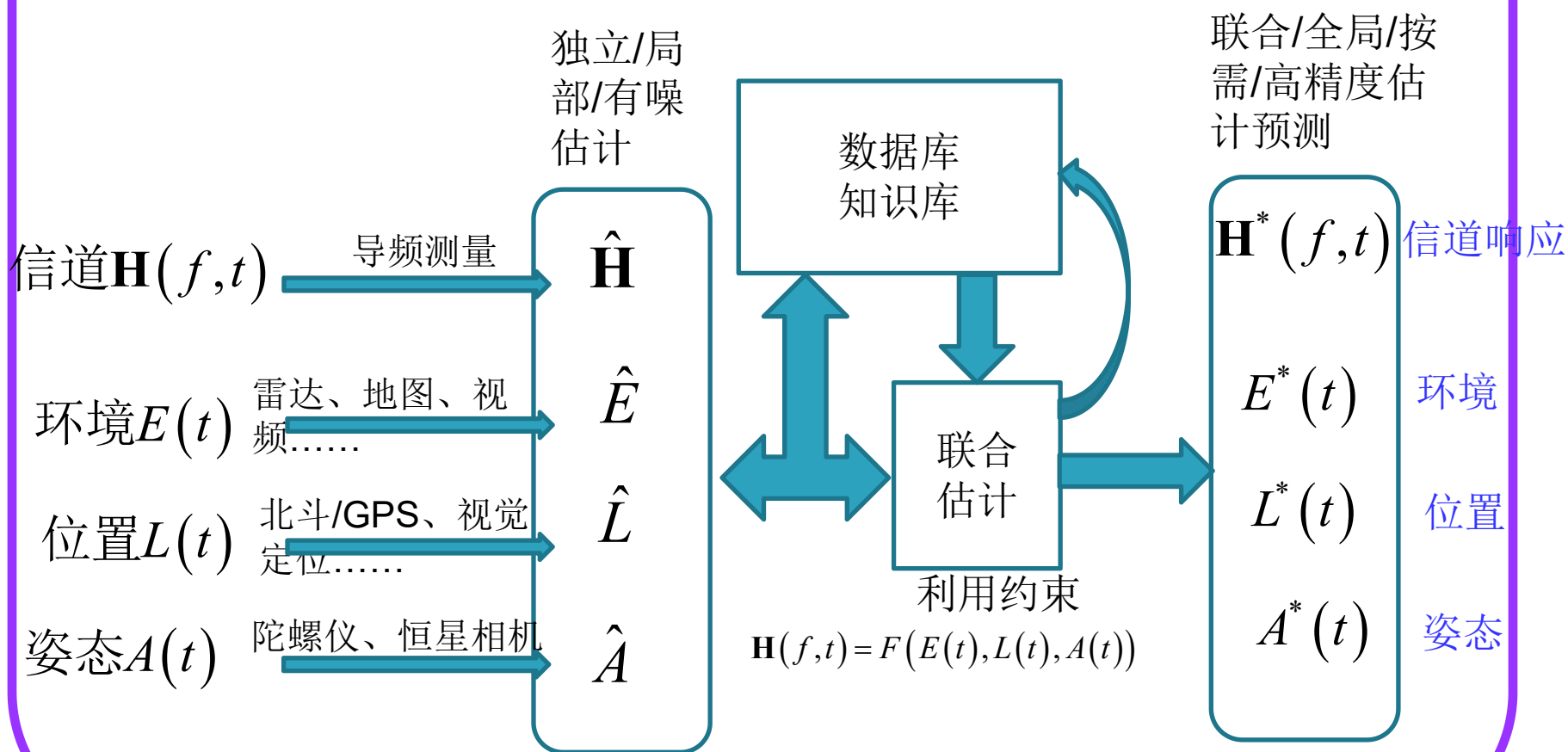
$$\text{信道响应 } \mathbf{H}(f, t) = F\left(f, \overset{\text{环境}}{E(t)}, \overset{\text{位置}}{L(t)}, \overset{\text{姿态}}{A(t)}\right)$$

信道响应：从发射频输出到接收射频输入之间
随时间、频率的变化
的增益

位置：
发射、接收机在
空间中相对于环
境的位置

姿态：
发射、接收天线
特性，及其在运
动中姿态的变化

信道与环境的协同认知



环境: 影响电磁波传播的一切环境，包括地形、建筑、动植物、车辆的物理尺寸、材质、粗糙度.....

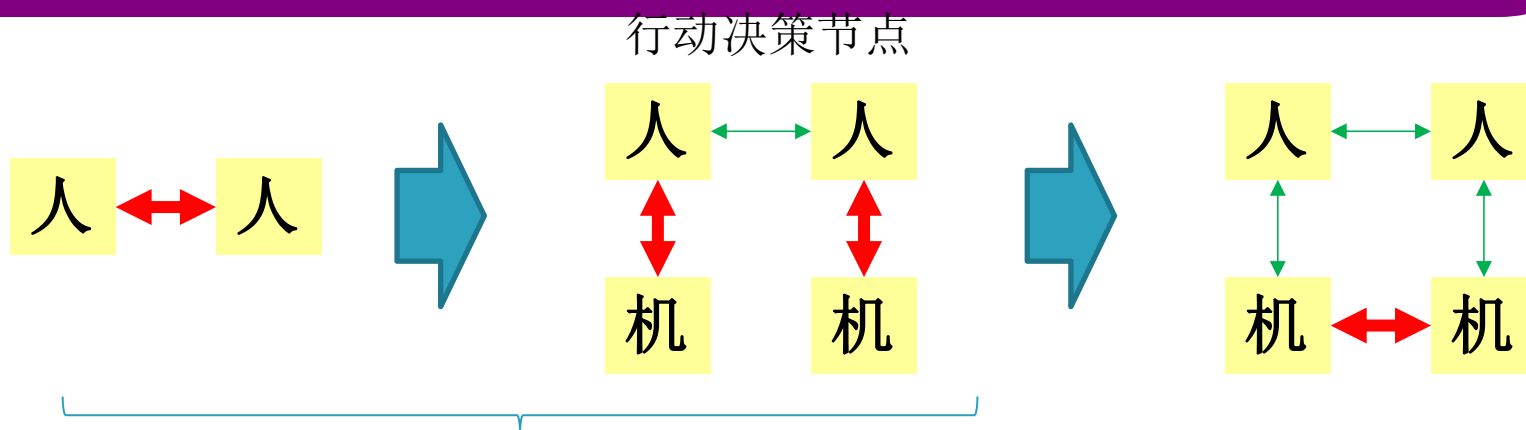
技术与网络的演进

- 设备、服务、任务之间解耦
- 充分利用“已有”的设备、网络和服务
- 逐渐提升设备和网络的可定义能力
- 逐渐增添特殊场景、任务的设备部署
- 新指标的渐进式添加
- 新场景、环境、任务的自动编排完成
- 新机理、协议的渐进式添加和自主式升级

目标：更高效（时间、资源）

- 任务完成的有效性
- 能力形成的有效性
- 设备建设、部署的有效性
- 系统升级的时效性
- 新旧共存，跨行业共建的有效性

回归到人



人：行动决策节点

人：任务发起/验收节点

- 角色转换：->
- 伦理保证——服务于人
 - 体现人的意志，人民、民族的意志