



北邮信息理论  
与技术教研中心

BUPPT Information Theory & Technology Center

# 第十七章

# 新型无线网络



主讲人: 牛 凯

[niukai@bupt.edu.cn](mailto:niukai@bupt.edu.cn)

# 内容提要



- 随着现代移动通信的快速发展，具有分布式特征的各种新型无线通信网络得到了人们越来越多的关注
- 本章首先引入无线自组织(Ad Hoc)网络的模型，简要介绍了主流的分布式无线网络容量分析理论，指出分布式网络的关键技术特征。
- 其次介绍近年来出现的新型无线网络架构，包括无线云计算与C-RAN、无线边缘计算以及认知无线网络等。
- 然后详细阐述了三类重要的分布式无线网络：物联网(IoT)、车联网(VANET)以及无人机网络(UAV)。
- 最后，简要介绍了绿色无线网络的一些技术特点。

## § 17.1 分布式无线网络容量



- 1948年，仙农在经典文献[17.1]中，确立了点到点信道的可达速率，即信道容量。
- 但人们仍然无法回答一个基础理论问题：给定一个无线网络，能够传输的信息量是多大？这个基本问题，需要分析多点到多点的无线网络容量，这也是网络信息论[17.2]的核心概念。
- 针对一些单跳多用户信道模型，例如MAC/BC/Relay/IC/Two way等，推广了经典意义上的信道容量[17.2][17.3]。但即使是这些简单网络，信息论意义上的容量分析也非常困难。
- 21世纪初的网络信息论缺乏完整而系统的理论框架，对于实际无线网络的设计难以起到指导作用。

## § 17.1 分布式无线网络容量

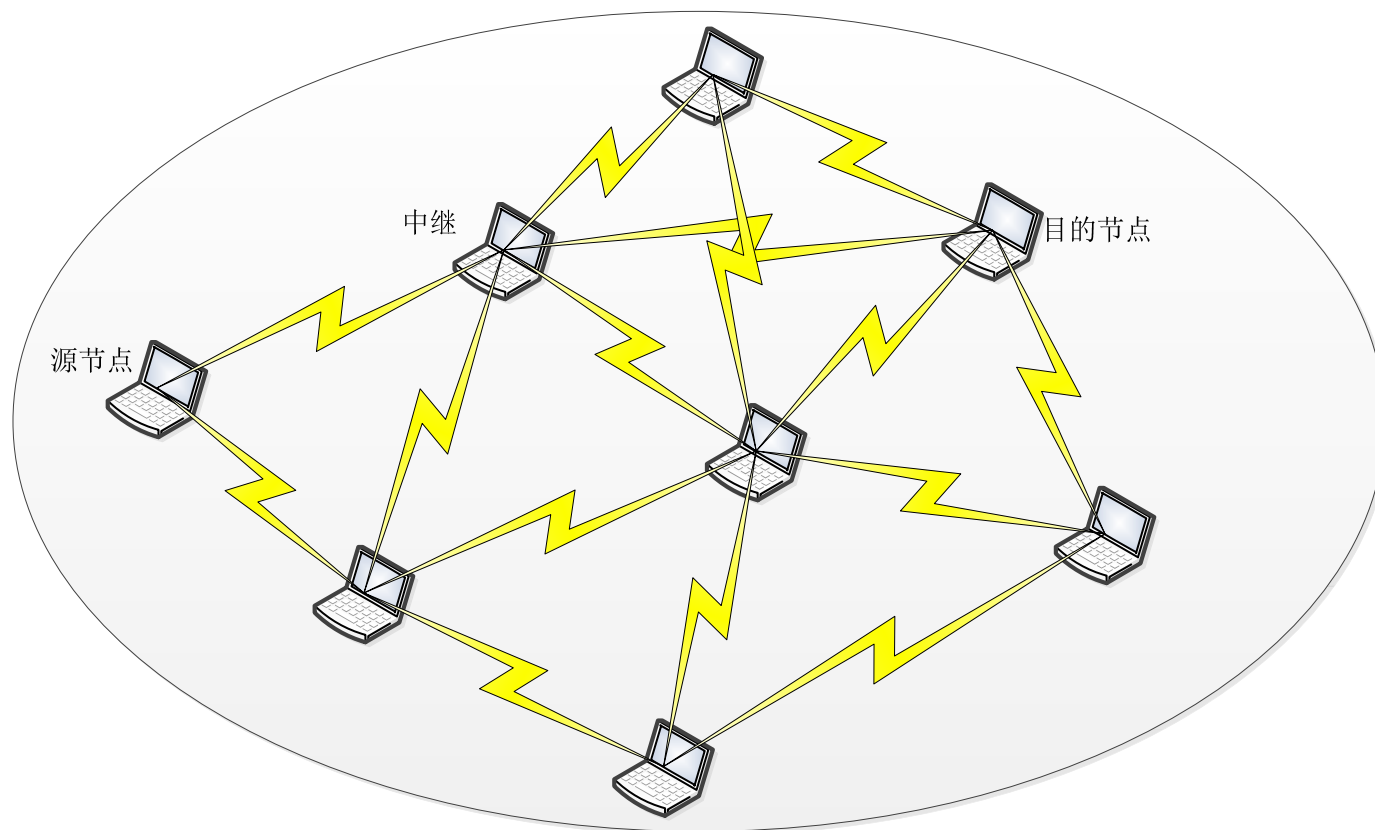


- 2000年以来，在无线自组网络的容量分析方面，学术界取得了重大进展，主要的代表性工作有两个。
- 首先是Gupta与Kumar在经典文献[17.7]中，引入了输运容量(Transport Capacity)的概念，从宏观角度揭示了无线自组织网络容量的渐近规律，这是网络信息论领域的一个重大突破。
- 其次是Weber等人在文献[17.26]中提出的发送容量(Transmission Capacity)，从微观角度，刻画了无线自组织网络单跳通信的中断概率行为。
- 这两项工作是最近二十年来，无线网络容量分析方面的标志性工作

# 17.1.1 无线自组织(Ad Hoc)网络概念



- 无线自组织(Ad Hoc)网络是一种分布式无中心的无线网络，各个通信节点通过多跳连接方式相互通信，其结构如图所示



- 一般的，基于节点的移动性，Ad Hoc网络可以分为静态自组网与移动自组网(MANET)。



## 17.1.2 输运容量分析

- Gupta与Kumar研究无限大规模网络的渐近容量行为。引入了新的输运容量概念，揭示了无线自组网容量的变化特征。
- 1. 网络模型

定义 17.3(协议模型: **ProModel**): 协议模型是一种几何模型, 强调了节点之间的有效通信距离。对于任意网络, 假设节点  $X_i$  通过第  $m$  个子信道向节点  $X_j$  发送数据, 如果满足下列条件,

$$|X_k - X_j| \geq (1 + \Delta) |X_i - X_j| \quad (17.1.1)$$

则这次传输能够被节点  $X_j$  成功接收。其中,  $X_k$  是选择同一个子信道同时发送数据的其他任意节点,  $\Delta > 0$  表征了节点间可靠通信的保护范围。

## 17.1.2 输运容量分析



### • 1. 网络模型

定义 17.4(物理模型: **PhyModel**): 物理模型是一种实际模型, 强调了正确检测的信干噪比(SINR)。令  $\{X_k; k \in \mathcal{T}\}$  表示某个时刻在一个子信道上同时发送信息的节点子集。令  $P_k$  表示节点  $X_k$  的发射功率,  $\sigma^2$  表示噪声功率, 给定通信距离  $r$ , 假设路径损耗模型为  $r^{-\alpha}$  ( $\alpha > 2$ )。对于任意网络, 当信干噪比满足如下条件。

$$\frac{P_i |X_i - X_j|^{-\alpha}}{\sigma^2 + \sum_{\substack{k \in \mathcal{T} \\ k \neq i}} P_k |X_k - X_j|^{-\alpha}} \geq \beta \quad (17.1.3)$$

则节点  $X_i$  通过第  $m$  个子信道向节点  $X_j$  发送的数据能够被正确接收。其中,  $\beta$  是节点正确接收数据的最低 SINR。





## 17.1.2 输运容量分析

### • 2. 容量尺度定律

定义 17.5(输运容量): 无线网络的输运容量是指网络节点对链路集合能够达到的最大比特输运能力。给定一个含有  $N$  个节点的无线网络  $\mathcal{W}$ ，假设从节点  $X_i$  向节点  $X_j$  传送的比特速率为  $\lambda_{ij} \text{ bit/s}$ ，则网络的输运容量表示为<sup>4</sup>

$$C(\mathcal{W}(N)) = \sup_{\{\lambda_{ij}: 1 \leq i, j \leq N\}} \sum_{i \neq j} \lambda_{ij} |X_i - X_j| \quad (17.1.5)^4$$

注意，输运容量的量纲为  $\text{bit} \cdot \text{m/s}$ 。<sup>4</sup>

定理 17.1: 一个含有  $N$  个节点的任意无线网络  $\mathcal{W}$ ，覆盖面积为  $A \text{ m}^2$ ，节点对传输速率  $W \text{ bit/s}$ ，在静态组网模式下，如果优化节点位置、业务连接方式以及每次发送的距离，则采用协议模型的输运容量为<sup>4</sup>

$$C(\mathcal{W}(N), \text{ProModel}) = \Theta(W \sqrt{AN}) \quad (17.1.6)^4$$

相应的，采用物理模型的输运容量也为<sup>4</sup>

$$C(\mathcal{W}(N), \text{PhyModel}) = \Theta(W \sqrt{AN}) \quad (17.1.7)^4$$



## 17.1.2 输运容量分析



### • 2. 容量尺度定律

定理 17.2: 给定一个含有  $N$  个节点的随机无线网络  $\mathcal{W}$ ，节点对传输速率  $W$  bit/s，在静态组网模式下，采用协议模型的吞吐容量为

$$\lambda(N) = \Theta\left(\frac{W}{\sqrt{N \log N}}\right) \quad (17.1.9)$$

而采用物理模型的吞吐容量为

$$\Theta\left(\frac{W}{\sqrt{N \log N}}\right) \leq \lambda(N) < \Theta\left(\frac{W}{\sqrt{N}}\right) \quad (17.1.10)$$

- 定理17.1与定理17.2反映了无线自组网容量与节点数目之间的渐近变化规律，称为尺度定律。



# 17.1.2 输运容量分析

## • 2. 容量尺度定律

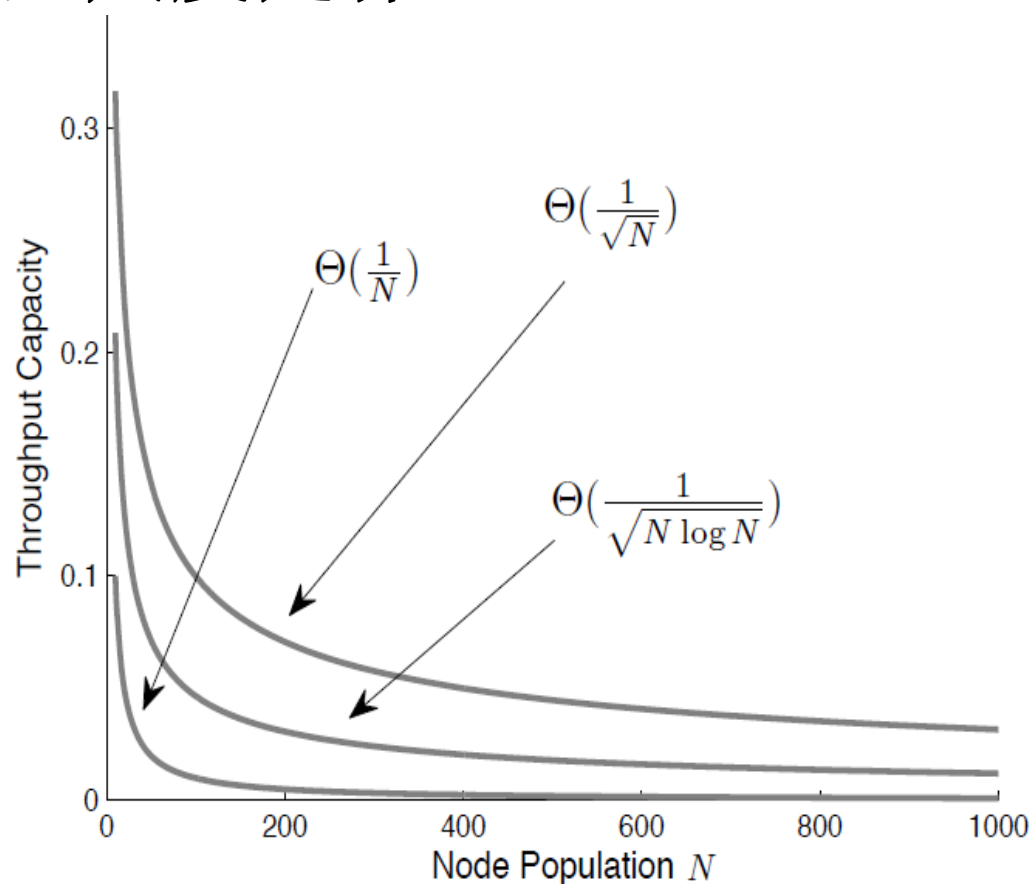


图17.2 随机网络吞吐容量的渐近性

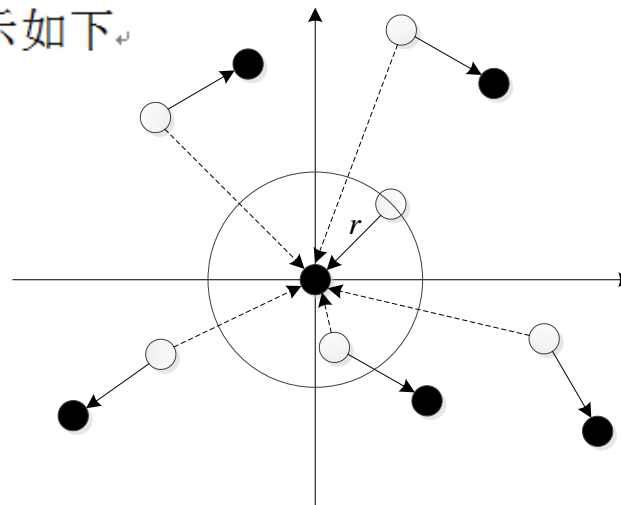


## 17.1.3 发送容量分析

- 1. 网络模型
- (1) 空间泊松点过程(PPP)模型
- 假设无线自组网由分布在无限大平面上的无限多节点构成，网络节点的空间位置分布服从平稳泊松点过程(PPP: Poisson point process),

定义 17.8(中断概率): 给定 Ad Hoc 网络节点强度  $\lambda$ ，假设参考链路通信距离为  $r$ ，信道衰落系数  $S$ ，干扰链路的衰落系数  $H_i$ ，链路正常工作的最低信噪比门限  $\beta$ ，则链路的中断概率定义为其信干比 SIR 低于门限  $\beta$  的概率，表示如下。

$$\begin{aligned} q(\lambda) &\triangleq \Pr(SIR < \beta) \\ &= \Pr\left(\frac{Sr^{-\alpha}}{\sum_{X_i \in \Pi(\lambda)} I_i |X_i|^{-\alpha}} < \beta\right) \\ &= \Pr\left(Y > \frac{1}{\beta}\right) \end{aligned}$$





## 17.1.3 发送容量分析

定义 17.9(发送容量): 给定中断概率的目标值  $\epsilon$ , Ad Hoc 网络的发送容量定义为,

$$C(\epsilon) \triangleq q^{-1}(\epsilon)(1-\epsilon), \epsilon \in (0,1) \quad (17.1.13)$$

发送容量的含义是指单位面积上成功发送数据的节点数目。其中  $\epsilon$  表征了网络中的业务 QoS, 链路成功通信概率为  $1-\epsilon$ 。

- 2. 路径损耗下的网络容量

$$\alpha = 4 \quad C(\epsilon) = \frac{\sqrt{2/\pi} (1-\epsilon) Q^{-1}((1+\epsilon)/2)}{\pi r^2 \sqrt{\beta}}$$

$$\frac{\alpha-2}{\alpha} \frac{1}{\pi \left( \frac{r \beta^{\frac{1}{\alpha}}}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2} < C(\epsilon) < \frac{1}{\pi \left( \frac{r \beta^{\frac{1}{\alpha}}}{\sqrt{\epsilon}} \right)^2}$$

## 17.1.4 两种容量分析比较

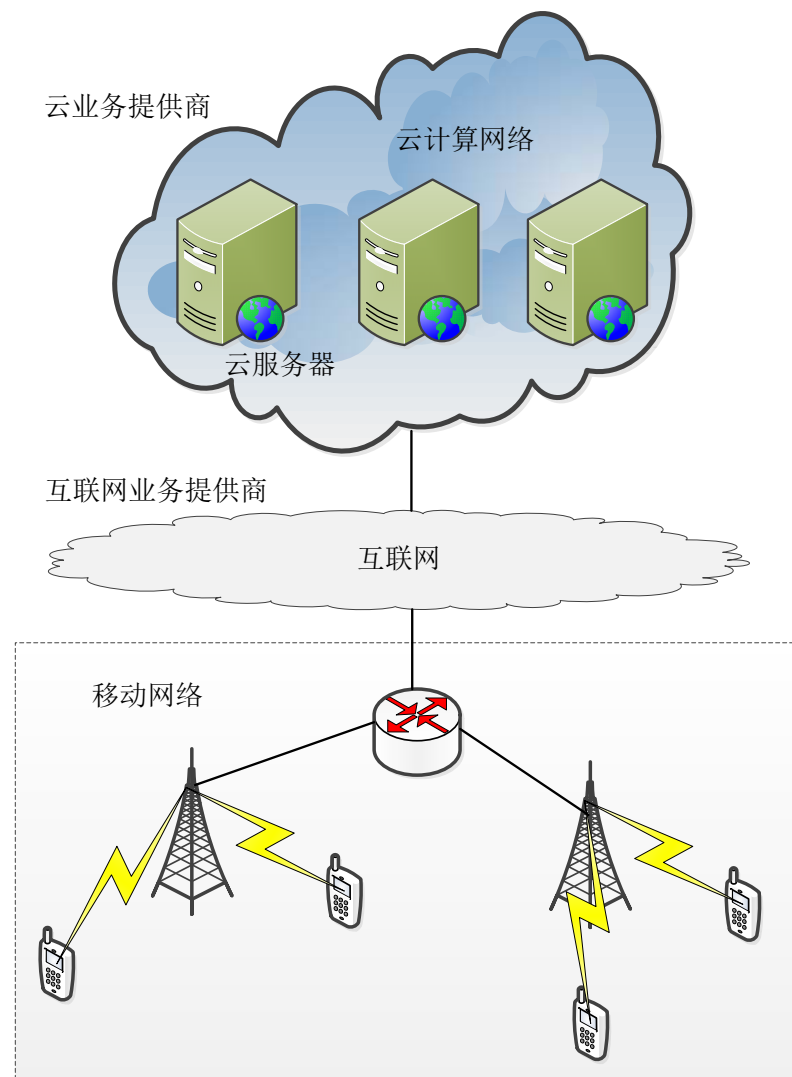


- Gupta与Kumar提出的输运容量，测量的是网络端到端和速率与端到端传输距离的乘积。
- 这个指标反映了无线网络的宏观特征，但是忽略了网络配置参数对容量的影响，因此无法精确评估网络容量。
- 在输运容量理论框架下，最重要的成果是尺度定律，它能够反映容量域随着网络节点数目增长的规律
- Weber等人提出的发送容量，是无线自组网容量的微观度量，表征的是单位面积单位时间的单位输运能力
- 发送容量与输运容量在量级尺度上是一致的。但是，发送容量的理论分析更细致，能够精细刻画无线网络的端到端与多跳性能，这一点是发送容量分析的优势，输运容量很难反映这些网络细节特征。

# § 17.2 新型无线网络架构



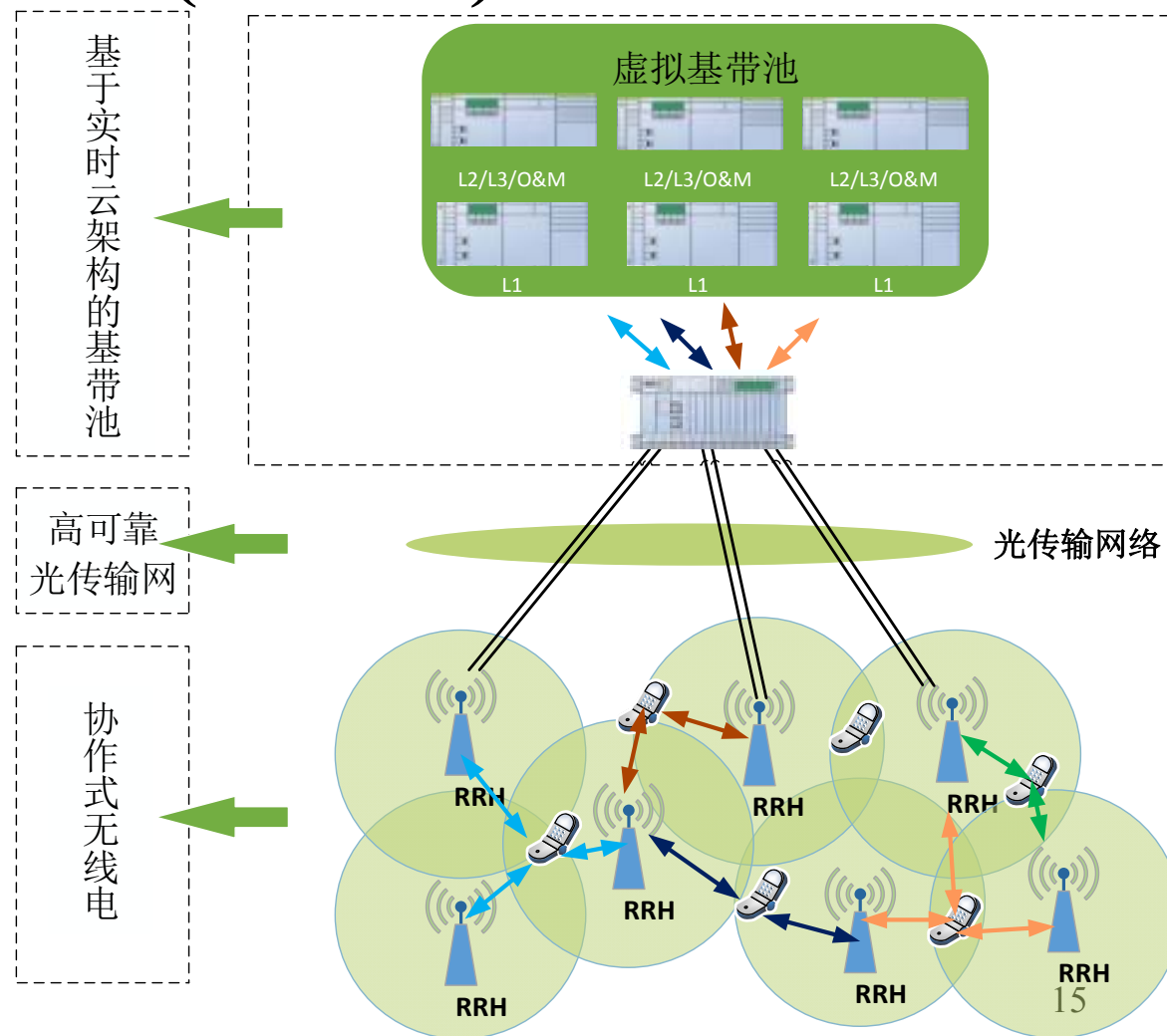
- 17.2.1 云计算架构
- 1. 移动云计算(MCC)
- 移动云计算一般指移动通信网络与云计算的集成架构，采用集中式架构，将计算资源、存储资源与无线资源进行整合与高效利用。





# 17.2.1 云计算架构

## • 2. 云无线接入网(C-RAN)

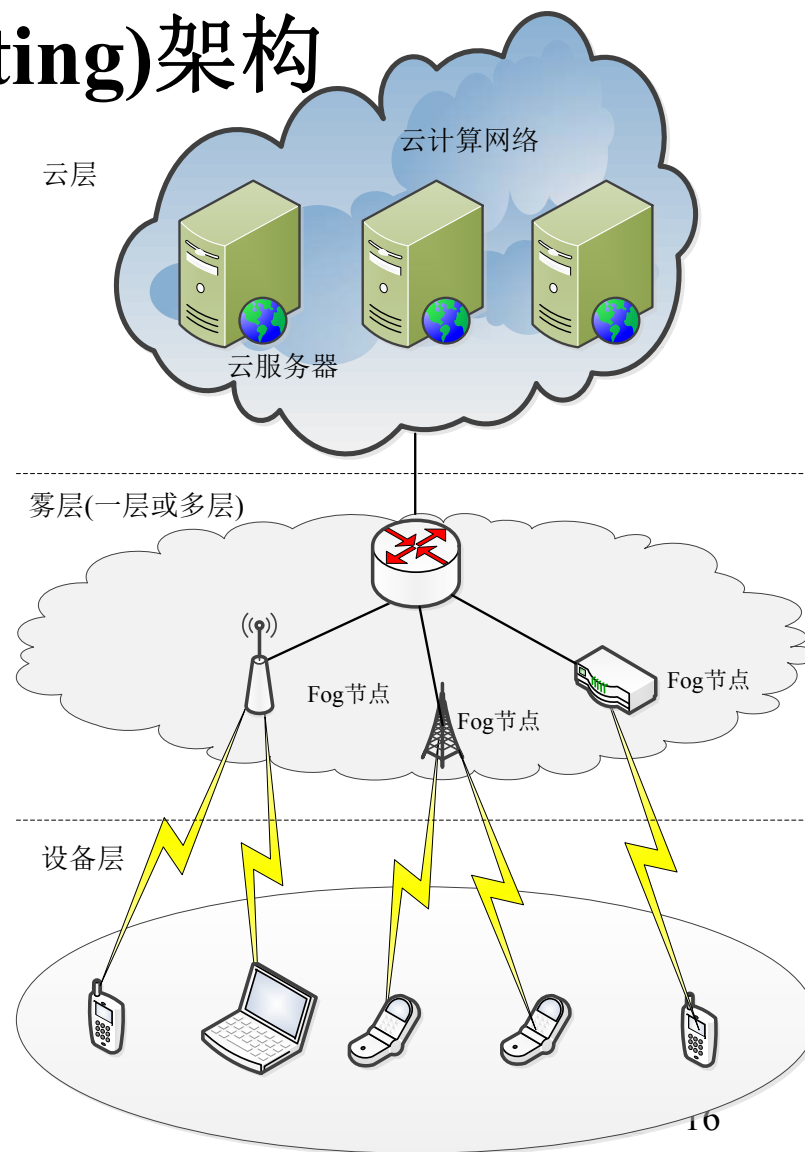




## 17.2.2 边缘计算架构

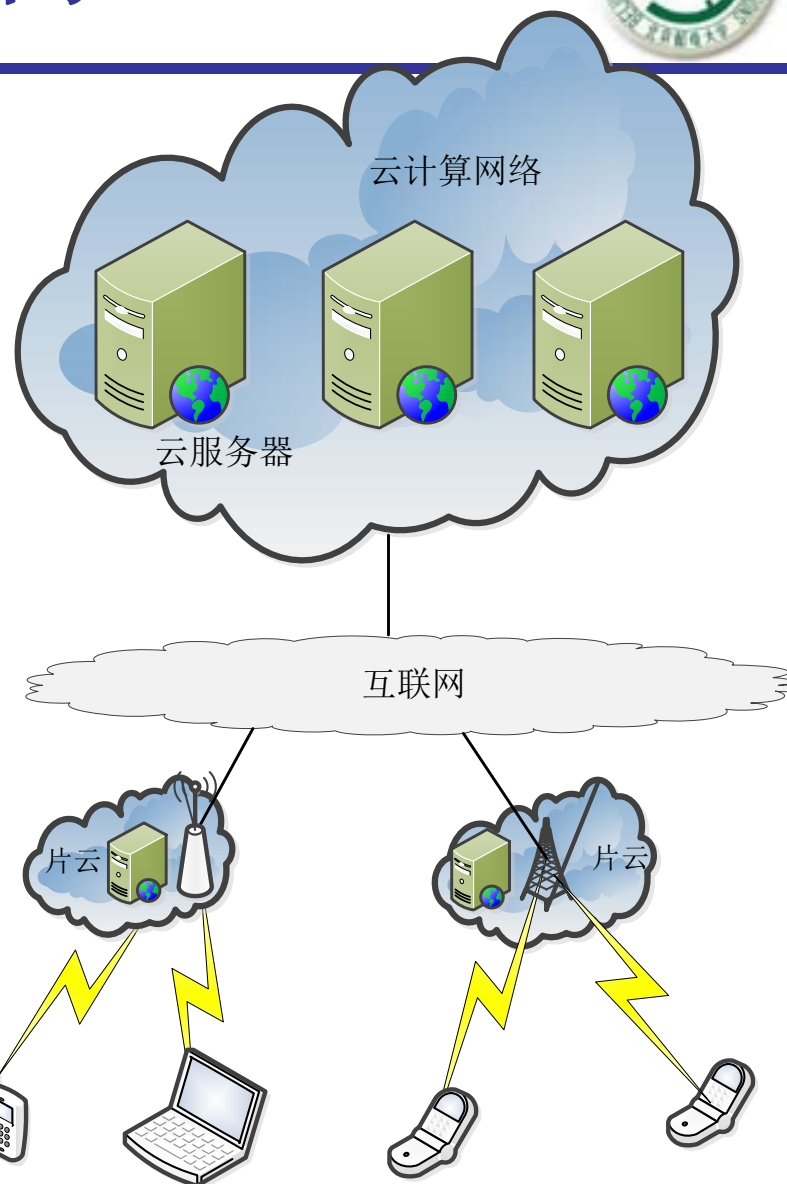
### • 1. 雾计算(Fog Computing)架构

- 雾计算名称由来是类比云计算，由于雾比云更接近网络边缘与终端。
- 雾计算网络是三层或多层结构，中间的雾层可以包含一层或多层雾节点，物联网传感器主要接入各层的雾节点，就近完成存储与处理，因此雾计算是全分布式网络架构。



## 17.2.2 边缘计算架构

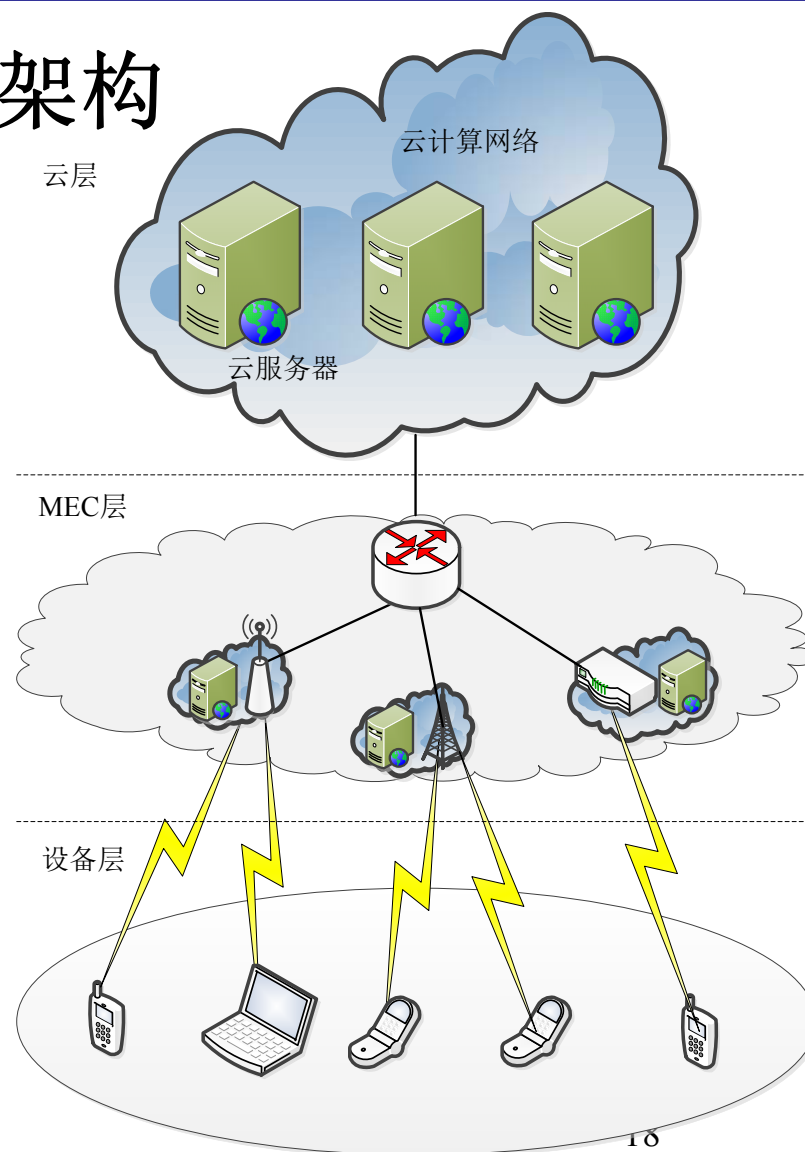
- 2.片云(Cloudlet)架构
- 片云概念是由卡内基梅隆大学团队提出[17.40], 它可以在WiFi网络或蜂窝网络中部署
- 片云的关键特点是支持边缘节点的实时应用, 以及终端移动时边缘节点之间的虚拟机映像切换[17.38]。



## 17.2.2 边缘计算架构

### • 3. 移动边缘计算(MEC)架构

- 移动边缘计算(MEC)是ETSI白皮书提出的网络架构[17.41]
- MEC包含五类组件，是三层结构，包括云层、MEC层与设备层



## 17.2.3 认知无线网络



- 随着无线/移动业务速率的递增和新业务涌现，对无线频谱的需求也不断增加。与此同时，大多数无线频段已经分配殆尽，找出新的频段支持新业务或提高现有业务速率变得越来越困难。

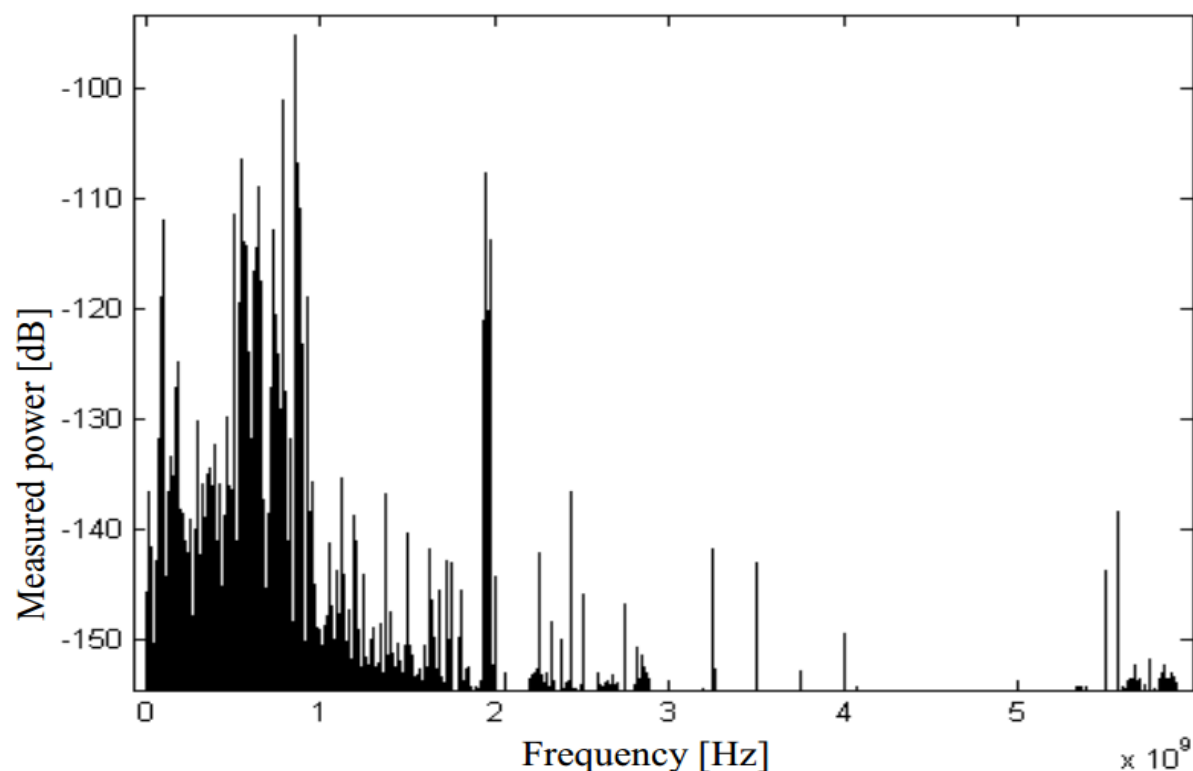
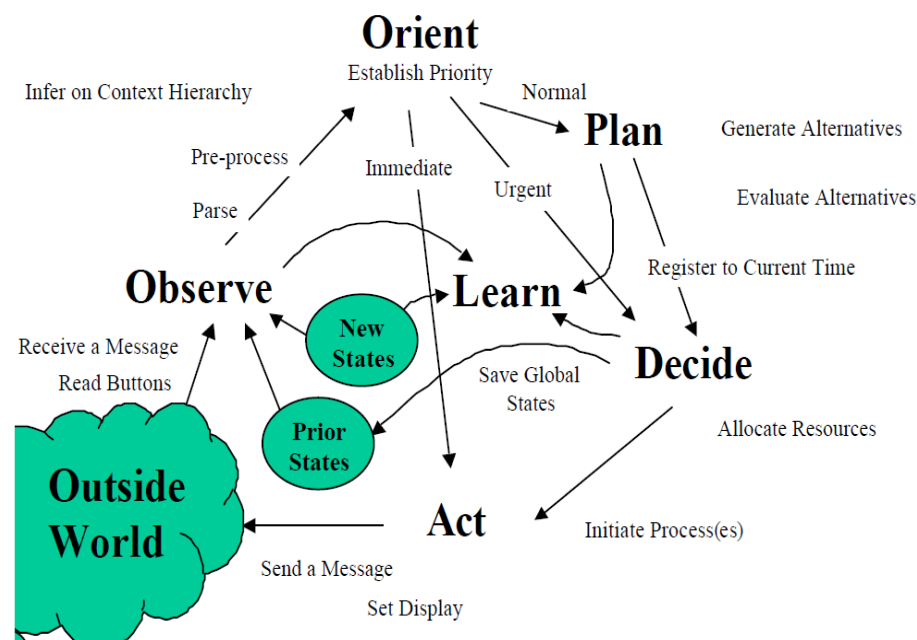


图17.12 加州伯克利大学测试无线频谱使用率测量情况

## 17.2.3 认知无线网络



- 1. 认知无线电
- 定义17.10(认知无线电):  
所谓认知无线电,是指在自学习系统中具有说明性和过程性知识的无线电系统。具体而言,认知无线电是软件无线电(SDR)的扩展,它可以根据外界环境的变化通过智能的计算来获得用户的需求,并对通信参数和功能进行重配置来提供无线电资源最有效的利用以及无线业务的最佳服务。

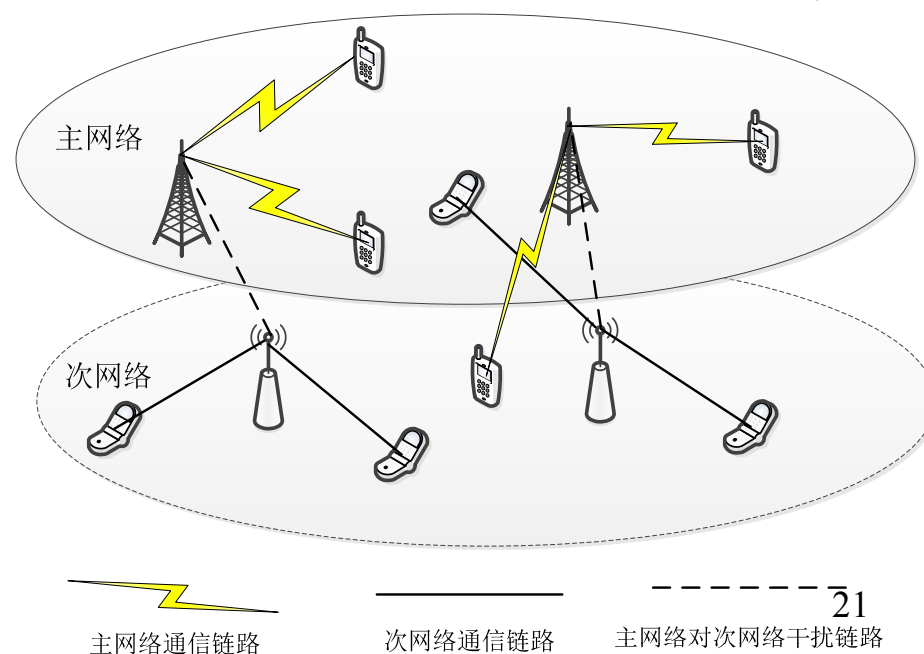




## 17.2.3 认知无线网络

### • 2. 认知无线网络

- 在认知无线网络中，多个异构网络工作于同一频段，这些异构网络通常可分为两种类型——主网络和次网络。
- 主网络中的用户(即主用户，PU)是该频段的授权用户，它们有频段优先使用权；而次网络中的用户(即次用户，SU)具有较低的频谱使用优先级，它们只能在不影响主用户通信的前提下使用频谱。
- 根据认知能力的不同，
- 可将认知无线网络的
- 频谱接入方式分为
- interweave接入、
- underlay接入和
- overlay接入三种



## § 17.3 IoT网络



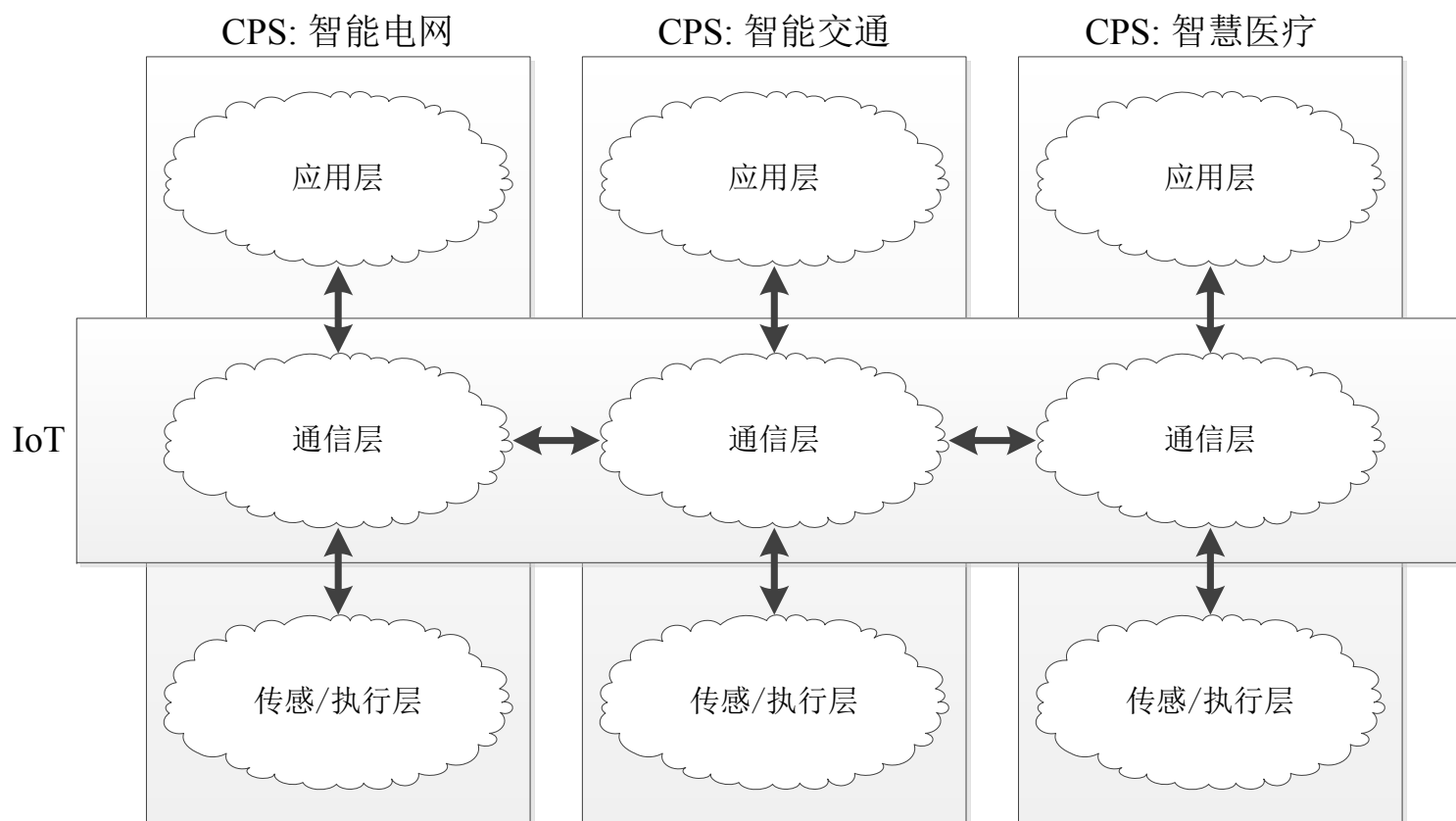
- **17.3.1 信息物理系统(CPS)与物联网(IoT)**
- **1. 信息物理系统(CPS)**
- **定义17.11:** 信息物理系统是指应用现代计算与通信技术，有效集成信息与物理单元构成的系统，实现人类社会、信息空间与物理世界的密切交互。CPS强调信息单元与物理单元的交互(Interaction)，目的是经由信息单元，实现物理单元的安全、有效与智能监测与控制。



# 17.3.1 信息物理系统(CPS)与物联网(IoT)



- 信息物理系统一般为三层结构：传感执行层、通信层与应用层，针对特定应用场景，从下到上构成了垂直结构。



## 17.3.1 信息物理系统(CPS)与物联网(IoT)



- **2. 物联网(IoT)**
- **定义17.12:** 物联网(IoT: Internet of Things)是采用现代信息技术, 连接海量设备用于监测与控制的网络基础设施。物联网强调的是设备间的连接, 主要目标是通过连接各种设备网络, 实现跨越异构网络的数据收集、资源共享、分析与管理。基于这样的网络基础设施, 能够提供可靠、有效、安全的业务。

## 17.3.1 信息物理系统(CPS)与物联网(IoT)



- **3. CPS与IoT比较**
- CPS与IoT有很多相似之处，共性特点总结如下：
- 两种系统目标相似，都是为了实现信息空间与物理世界之间的交互或连接；
- 两种系统采用的技术手段类似，都是通过智能传感设备，采集与测量系统或场景中物理单元的状态信息；
- 两种系统的交互机制类似，都是通过有线或无线通信网络，将测量的状态信息进行传输与共享；
- 两种系统的输出类似，对状态测量信息进行分析后，都能够提供安全、有效与智能的服务。两种系统的应用有很多类似场景，例如智能电网、智能交通、智慧城市等。

## 17.3.1 信息物理系统(CPS)与物联网(IoT)



- 尽管CPS与IoT有诸多相似之处，但它们之间也存在显著差异
- **(1)系统结构差异显著**
- CPS系统采用垂直架构，三层结构往往针对应用场景设计的专用方案。
- 网络的基本目标是实现连接，是更通用的异构通信平台，其控制平面比CPS复杂，要考虑多种场景、多种网络与应用的集成。
- **(2)业务应用要求不同**
- 简言之，CPS是针对特定场景设计的专用系统，而IoT是针对多应用场景的异构网络基础设施。



## 17.3.2 IoT网络架构

- IoT的参考架构包括四层：感知层、网络层、业务支持与应用支持层(SSAS)以及应用层，并且具有管理与安全功能。

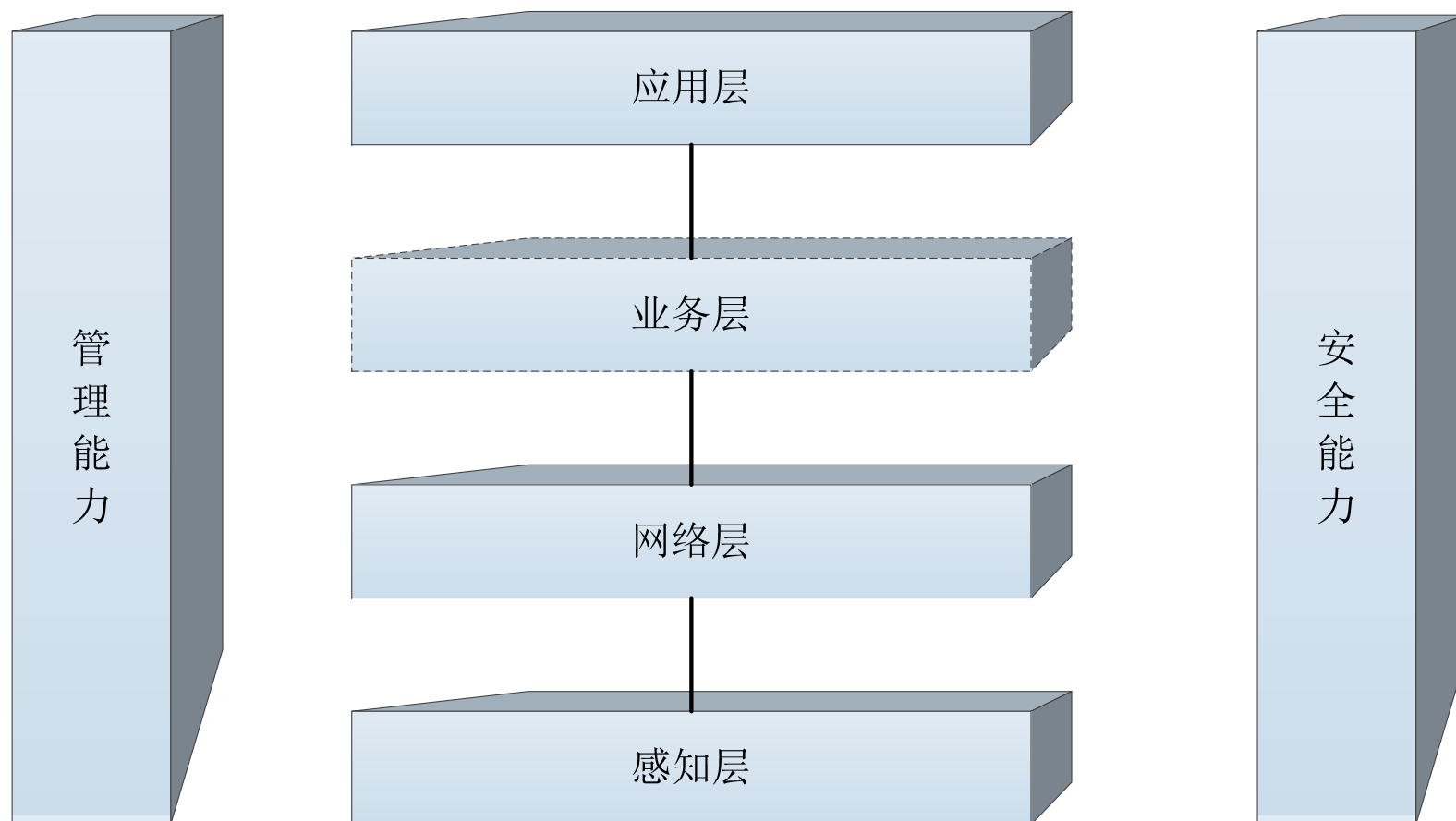


图17.16 IoT网络架构



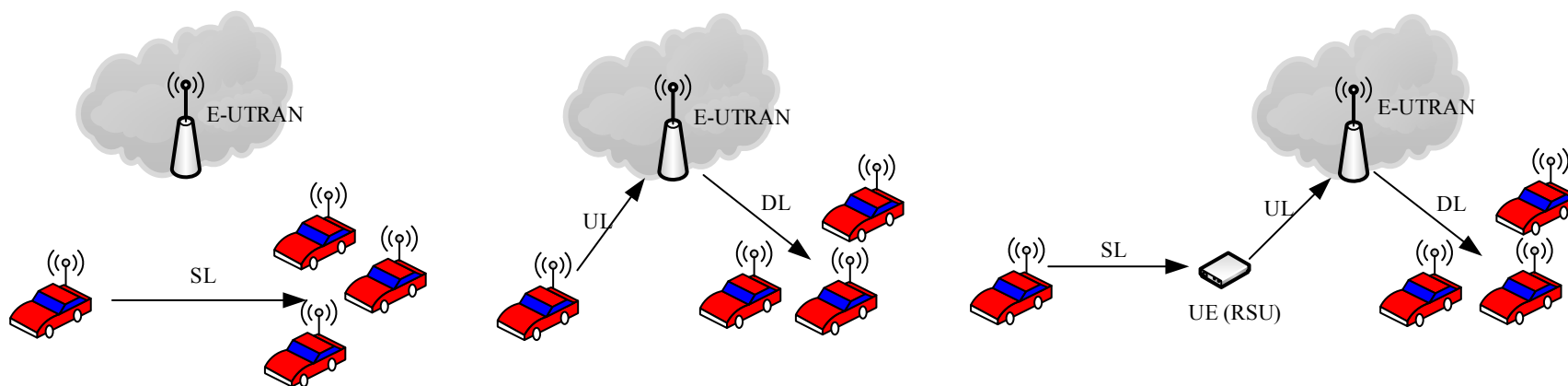
## 17.3.3 典型实现方案

- IoT架构的实现包括中短距离通信与低功率广域网(LPWAN: Low-Power Wide Area Network)两类方案。
  -
- 对于前者，典型技术包括ZigBee与Wi-Fi，主要满足短距离、局域网场景下的低功耗接入
- 对于后者，可以满足大范围海量节点低成本互联需求。一般的，LPWAN技术可以分为两类：授权频段链接技术与非授权频段连接技术。
- 前者的代表性技术包括：NB-IoT、LTE Cat-M、EC-GSM-IoT等，后者的代表性技术包括：LoRa、D7AP、SigFox、Wi-SUN等。

## § 17.4 VANET网络



- 车联网(Internet of Vehicles)是物联网重要的研究方向之一[17.56], 它是以行驶中的车辆为研究对象, 借助各种通信和计算机技术, 实现车与车、车与人、车与路边单元等之间的网络连接的技术。
- 17.4.1 车联网概述







## 17.4.2 最短路由算法

- 一个理想的路由算法应具有以下特点：满足正确性、计算简单、具有自适应性、稳定性、公平性和最优性。
- 集中式最短路由算法：Bellman-Ford算法、Dijkstra算法、Floyd-Warshall算法是三种标准的路由算法

## 17.4.3 MANET中经典路由算法



- **1. AODV**
- AODV(Ad Hoc On Demand Vector)是反应式按需路由算法，管理所有节点间的路由表并且维护路由。AODV路由过程有三类消息：路由错误消息(RERR)，路由请求消息(RREQ)，路由应答消息(RREP)。
- AODV为目的节点维持路由表并存储下一跳的路由信息，每个路由表可以使用一个周期的时间，如果在一个周期之内没有路由请求，就会过期，并且在需要的时候建立新的路由表。

## 17.4.3 MANET中经典路由算法



- **2. DSR**
- DSR(Dynamic Source Routing)是一种简单高效的按需路由协议，使用源路由思想设计。使用DSR路由协议时，网络完全自组织，不需要依赖任何网络基础设施或者网络管理设备。
- DSR协议主要包含路由发现过程和路由维护过程，其只需要维护正在通信的路由信息，不需要周期性的路由广播、链路状态探测。当一个节点需要同某个目的节点通信时，源节点根据算法动态地从路由缓存中选择一条，或者触发路由搜索过程发现一条新的路由；当节点发现与邻居节点间的链路中断后，则通过路由维护过程完成路由更新。

## 17.4.3 MANET中经典路由算法



- **3. DSDV**
- DSDV(Destination-Sequenced Distance Vector) 是MANET中最著名的表驱动路由算法之一，是对传统的Bellman-Ford路由算法的修正，它着重解决了RIP面对断开链接时发生的死循环现象，使之更合适Ad Hoc网络。
- DSDV使用周期性和触发性的路由更新来管理路由表。触发路由更新用于网络拓扑发生变化时，路由信息尽快传播。

## 17.4.3 MANET中经典路由算法



- **4. OLSR**
- OLSR(Optimized Link State Routing) 是MANET网络一种主动路由协议，继承了链路状态算法的稳定性，并且还具有一旦需要便立刻建立可用路由的优势。
- OLSR路由协议是表驱动式的链路状态路由协议，节点之间需要周期性地交换各种控制信息，通过分布式计算来建立和更新的网络拓扑图。

# 17.4.3 MANET中经典路由算法



表17.12 四种路由协议实现方式比较

协议名称	DSDV	OLSR	DSR	AODV
路由体系结构	无线路由	无线路由	无线路由	无线路由
更新方式	按需+周期	周期	按需	按需
路由维护策略	局部维护	局部维护	通知源节点	通知源节点
传输到达率	好	好	好	好
路由开销	非常大	大	大	大
传输时延	小	小	小	小
扩展性	弱	弱	弱	强
实现复杂度	非常容易	非常容易	非常容易	非常容易
节点信息	表驱动	表驱动	按需	按需
移动性	小	中	大	大
适应场景规模	小	中	中	大



# 17.4.4 多跳广播路由算法

## • 17.4.4 多跳广播路由算法

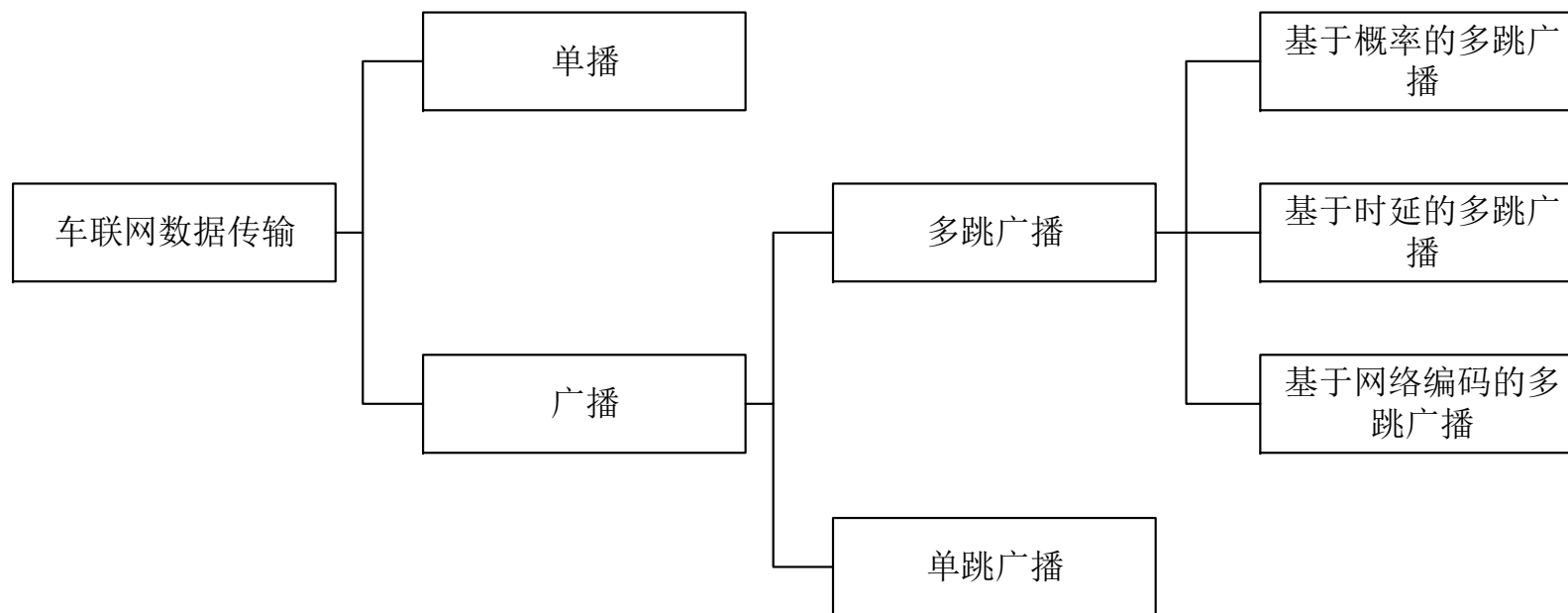


图17.34 车联网通信方式分类



## 17.4.4 多跳广播路由算法



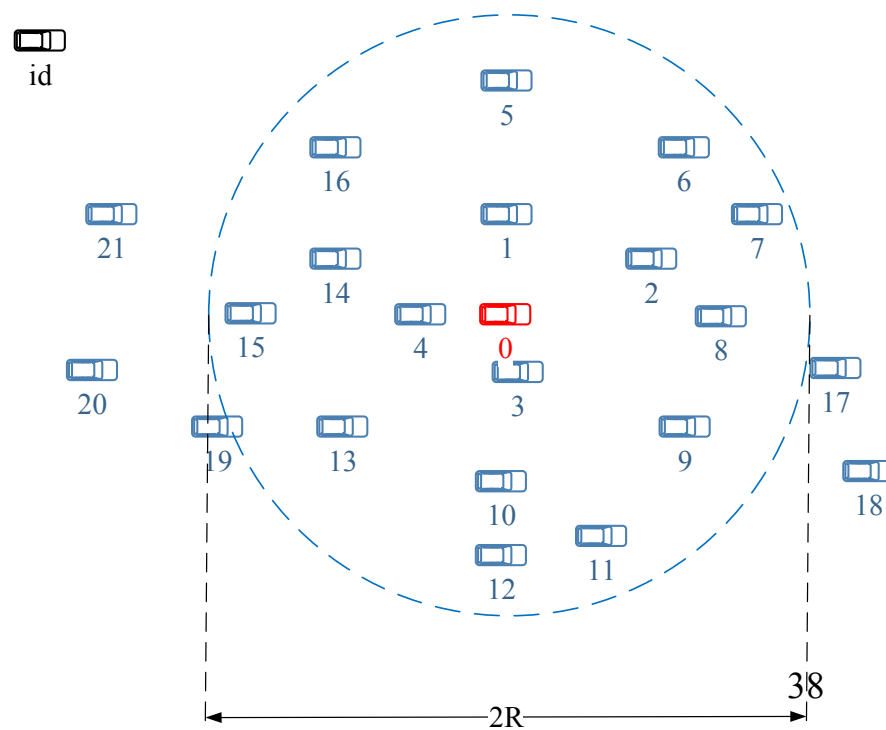
- 1. 基于概率的多跳广播
- 基于概率的多跳广播是指转发节点按照设定的概率转发数据包的多跳广播，这种广播由于转发节点按照转发概率转发数据包。
- 在节点较高密度场景中能一定程度上减少转发的数据包的数量，降低转发干扰，不过在节点低密度的场景下如果过多的减少转发，则会导致数据包到达率降低。



# 17.4.4 多跳广播路由算法

- 2. 基于时延的多跳广播
- 基于时延的多跳广播为每个转发节点确定一个等待时延，只有等到等待时延结束，才能转发数据包，以此来确定转发优先级，典型的基于时延的多跳广播有受限延迟广播

$$\begin{cases} \tau' = T_{MAX} \cdot \left| \frac{R - d}{R} \right| \\ \tau = \lfloor \tau' \rfloor \end{cases}$$



## 17.4.4 多跳广播路由算法

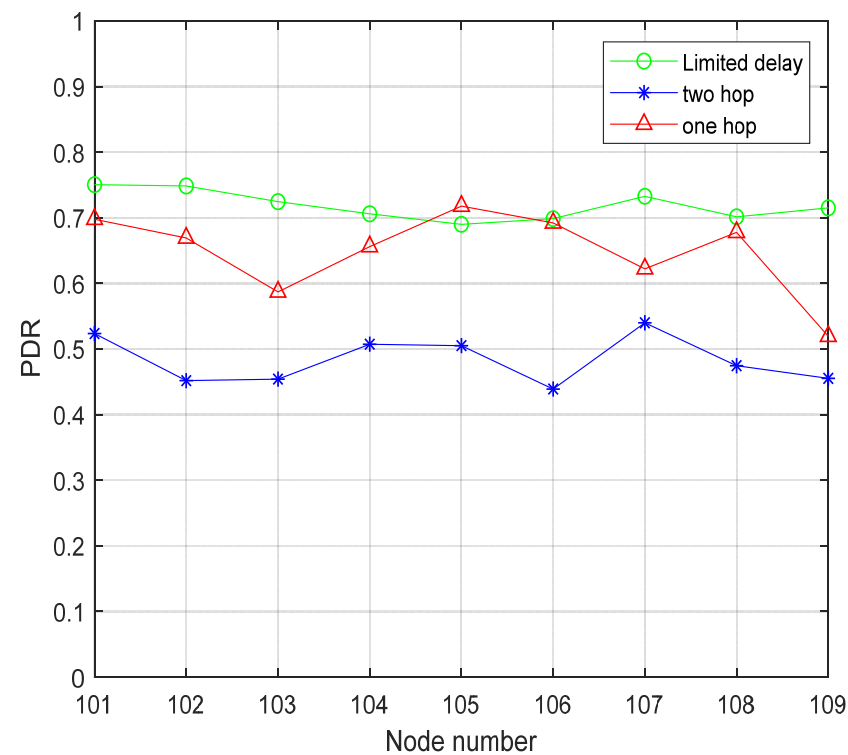


- 3. 基于网络编码的多跳广播
- 基于网络编码的广播是一种新的广播方式，能够有效提升系统整体的吞吐量。由Li等人提出的CODEB方案[17.65]，就是一种基于网络编码的多跳广播方案。

# 17.4.4 多跳广播路由算法



## • 4. 实测结果



## § 17.5 UAV网络

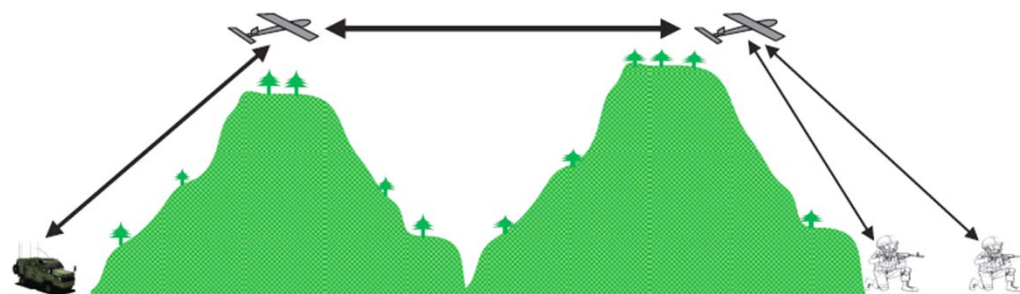


- 无人机(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)网络是最近10年非常热门的研究方向。
- UAV网络既是MANET网络也是VENET网络的特例，但由于无人机节点运动速度快，网络拓扑动态变化大，因此有自身的技术特点

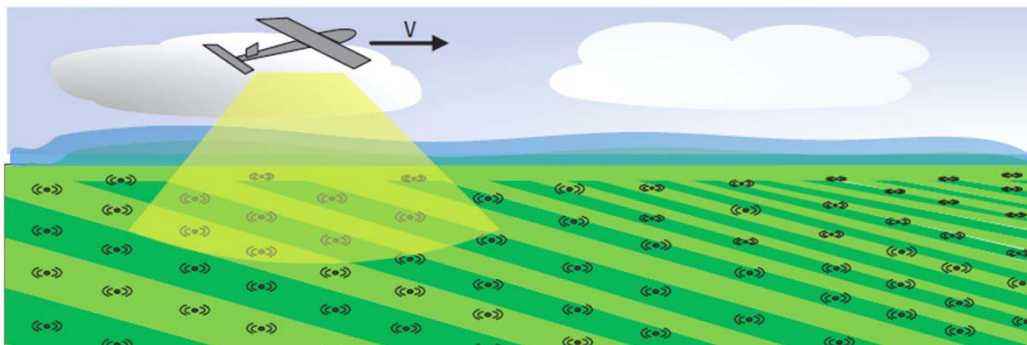
# 17.5.1 UAV应用场景



(a) 无人机辅助无线覆盖补充与增强



(b) 无人机辅助中继通信



(c) 无人机辅助信息播撒与数据收集

## 17.5.2 UAV网络架构

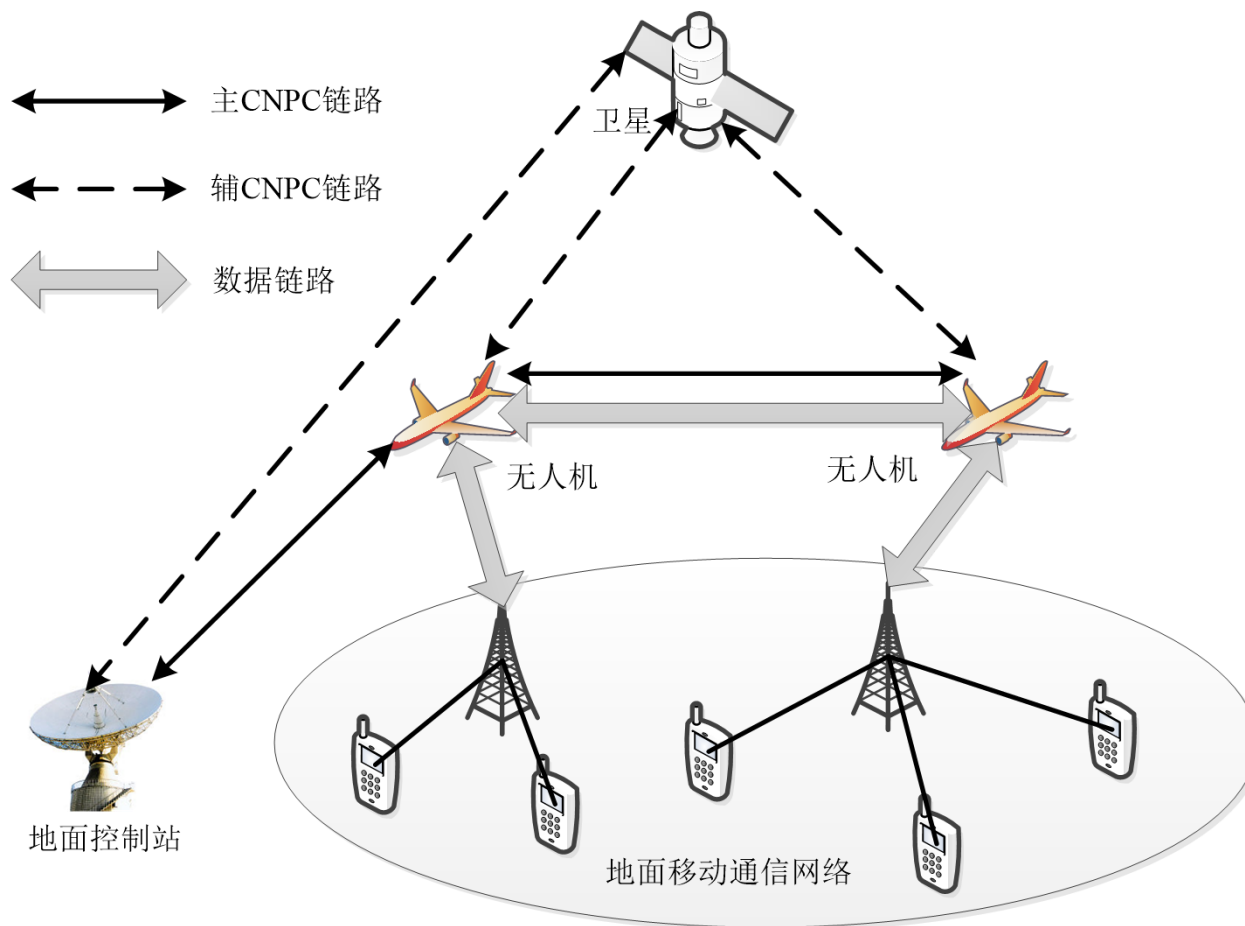


图17.42 无人机辅助移动通信网络架构

## 17.5.3 UAV信道特征



- (1)UAV-地面信道特征
- 由于无人机在空中飞行，一般而言，UAV与地面通信的信道会存在直射径(LoS)分量。
- 在低空飞行时，由于受到地面障碍物的反射、散射与漫反射，UAV-地面信道会存在多径效应。
- 当无人机在沙漠或海洋上飞行，双射线信道模型更为适用，其中包括一个LoS的主分量，还包括一个表面反射分量。





## 17.5.3 UAV信道特征

- **(2)UAV-UAV信道特征**
- 无人机之间的信道以LoS分量为主，由于低空地面反射，可能也存在一些有限的多径分量。
- 但相比UAV-地面信道，由于相对运动速度大，UAV-UAV信道会有较强的多普勒效应，时变性显著。这一点会直接影响UAV-UAV链路的频谱分配。

## 17.5.4 UAV关键技术



- **(1)UAV路径规划**
- 路径规划是UAV网络的一项关键技术，对于无人机辅助通信，合适的路径规划可以大幅度缩短通信距离，提高链路传输速率。
- **(2)网络节能部署**
- UAV网络的性能与运行时间主要受机上供电约束。首先需要考虑能够补充能量的无人机网络部署，要保证数据业务能够连续支持，没有明显中断。
- 其次，如果没有充电操作，则要考虑网络的节能部署，以最低的能耗构建网络拓扑，完成通信任务。

## 17.5.4 UAV关键技术

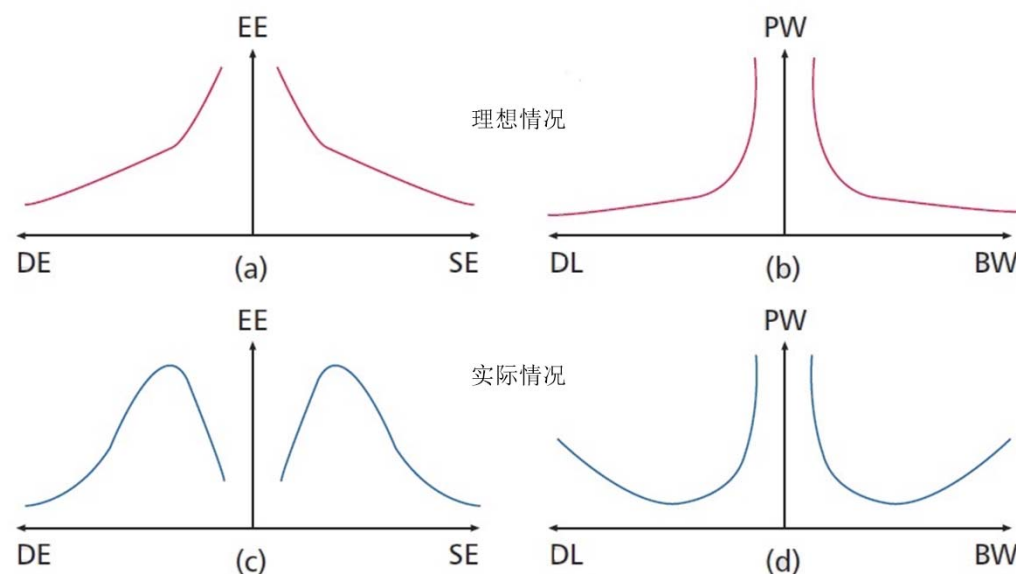


- **(3)MIMO技术应用**
- 应用MIMO是提高无线链路传输能力的关键技术。但在UAV链路中应用MIMO存在一些难点。
- **(4)移动中继**
- 利用无人机的高移动性，在地面源节点与目的节点之间充当中继，是一种新的动态转发技术。

## § 17.6 绿色无线网络



- 17.6.1 基本折中
- 1. 部署效率与能量效率折中
- 所谓部署效率(DE: Deployment Efficiency)是指网络规划、建设与管理费用，而能量效率(EF: Energy Efficiency)是指单位能耗达到的系统吞吐率或频谱效率。





## 17.6.1 基本折中

- DE与EE之间的存在折中关系，理想条件下二者的曲线如图(a)所示，需要针对不同的小区半径，在DE与EE之间折中优选。
- 2. 频谱效率与能量效率折中
- 频谱效率(SE: Spectrum Efficiency)定义为单位带宽中的系统吞吐率，既是移动通信系统的标志性指标，也是无线网络优化的重要指标。

$$\eta_{EE} = \frac{\eta_{SE}}{(2^{\eta_{SE}} - 1) N_0}$$



## 17.6.1 基本折中

- 3. 带宽与功率折中
- 发送功率与信号带宽满足如下关系

$$P = WN_0 \left( 2^{\frac{R}{W}} - 1 \right)$$

- 4. 时延与功率折中

$$P_b = WN_0 \left( 2^{\frac{1}{t_b W}} - 1 \right)$$

## 17.6.2 无线充电



- 无线充电是一个快速发展的新技术领域。

无线充电技术	技术优点	技术局限	有效充电距离
电磁感应耦合	对人体安全，实现简单	充电距离短，有热效应，不适合移动应用，充电器与受电设备之间必须紧贴	间距为毫米到厘米量级
电磁谐振耦合	充电器与受电设备之间可以松置，能够同时对多个设备充电，效率高，可以非视距充电	不适合移动应用，充电距离有限，实现复杂	间距为厘米到米量级
微波辐射	实现远距离充电，适合移动应用	高微波能量密度不安全，充电效率低，需要视距充电	典型距离为几十米，最大可达数公里。



## 17.6.3 环境后向散射通信

- 环境后向散射通信 (ABC: Ambient Backscatter Communication) 是2013年由Liu等人提出的一项无源无线电通信技术。

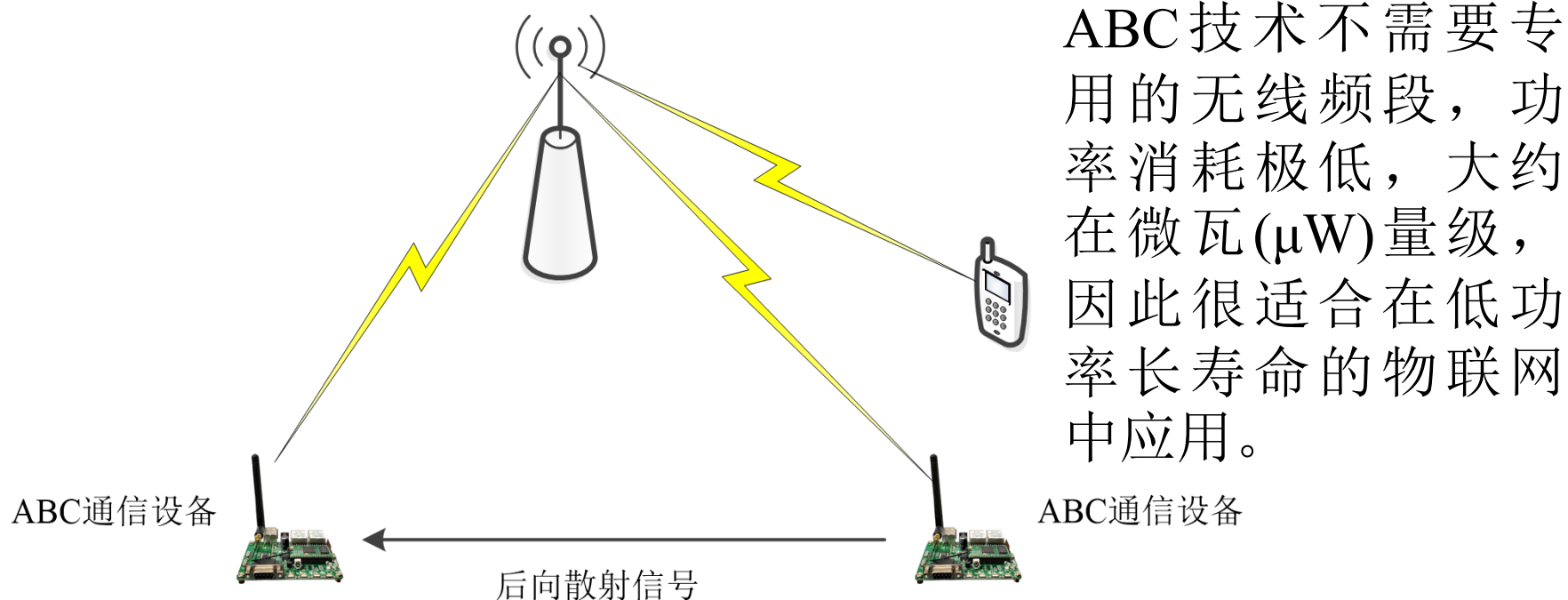


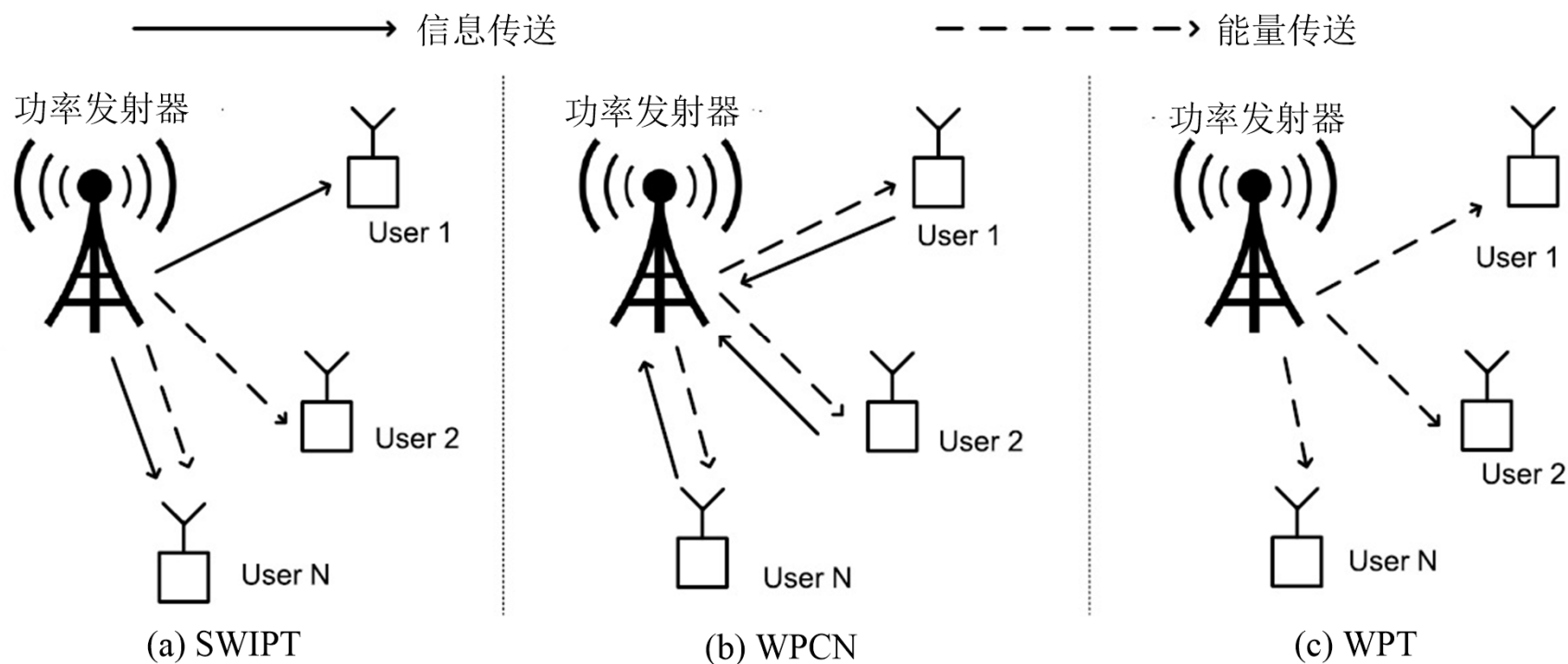
图17.44 环境后向散射通信场景





# 17.6.4 无线能量收集技术

- 无线能量收集(EH: Energy Harvesting)是近年来出现的绿色通信新技术，在传感器与物联网领域有重要的应用前景。





## 17.6.4 无线能量收集技术

- 无线功率传送(WPT)
- 在WPT模式下，功率发送器只是向用户设备发送能量，用于对设备电池充电，而不传送信息。这类技术的典型应用就是无线充电。
- 无线功率通信网(WPCN)
- WPCN模式下，多个用户设备首先收集功率发送器辐射的射频能量，等能量充分累积后，用户设备可以传输数据。这类技术主要在IoT或传感器网络中应用，实现万物互联。



## 17.6.4 无线能量收集技术

- 无线信息功率同时传送(SWIPT)
- 作为前两种模式的混合，SWIPT模式下，功率发射器即辐射能量，又发送信息，这两种操作同时进行。
- 虽然能量收集技术具有理论上的先进性，但在WSN与IoT网络中应用仍然还有很多局限
- 首先，无线充电技术目前还无法支持大规模与远距离应用，因此能量传送的应用比较有限。



## 17.6.4 无线能量收集技术

- 其次，在WPCN网络中，用户设备需要花很长时间进行能量收集，才能进行数据发送，因此也限制了系统性能。
- 第三，SWIPT虽然有一定创新，但需要对资源进行调度与优化，增加了网络运行的复杂度。并且SWIPT需要配置主动式的RF发送单元，增加了设备成本与复杂度，不太适合大规模低成本无线通信网络。



## 17.7本章小结

- 本章主要介绍新型无线通信网络技术。Ad Hoc网络具有分布式、去中心化特点，是现代无线网络的重要研究对象。
- 首先介绍了无线自组网的容量分析理论，然后归纳总结了无线网络的基本架构，包括移动云计算、移动边缘计算以及认知无线网络。
- 针对三种典型的分布式网络，物联网、车联网以及无人机网络，分别介绍了其网络结构、实现方案、路由算法、设计方案等基本原理。
- 最后，简要介绍了低功耗绿色无线通信网络的关键技术特征。



谢谢！