

浙江省信息通信技术前沿论坛

动态频谱共享的现状和发展

汇报人：金 明

jinming@nbu.edu.cn

宁波大学



01

研究背景

02

频谱共享

03

频谱感知

01

PART ONE

研究背景

研究背景

➤ 移动通信多样化业务



车联网



无人机通信



增强现实



企业私有5G网络



智能电网

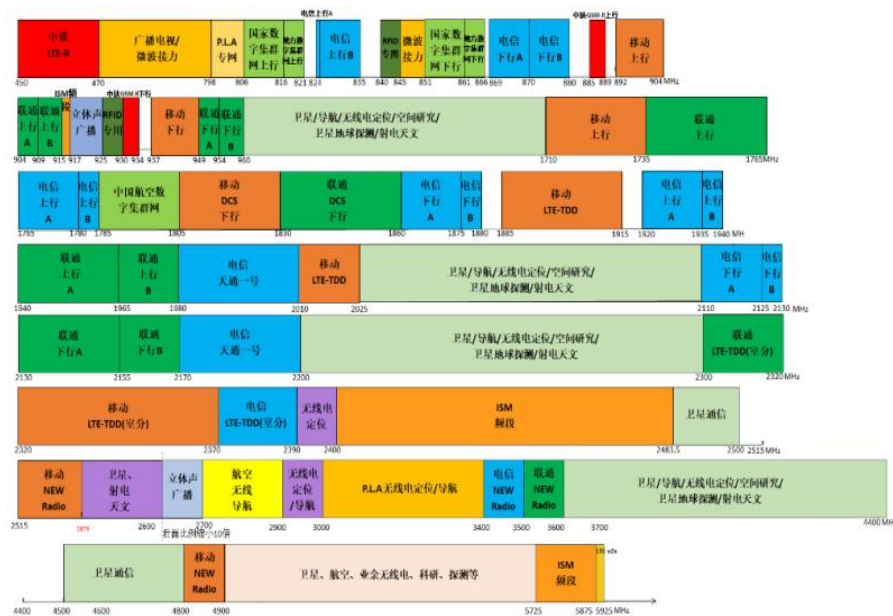
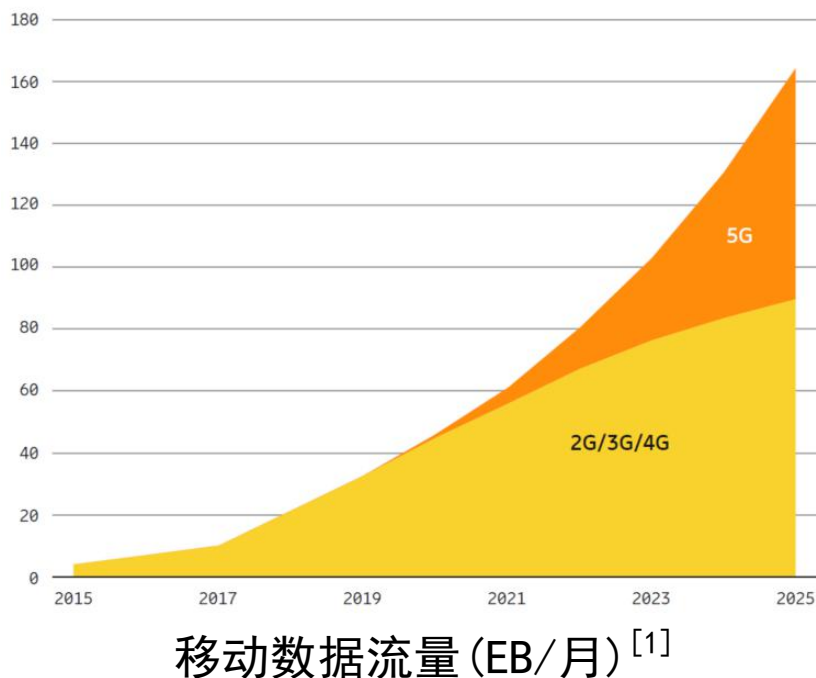


移动急救

研究背景

➤ 移动数据流量激增

➤ 频谱资源短缺 (特别是sub-6GHz, 碎片化独占)



[1] 爱立信移动通信报告, 2020



研究背景

➤ 应用场景如高清视频监控、云文件传输等需求

1) 大带宽

2) 广覆盖

➤ 解决途径

1) 毫米波

2) 频谱共享

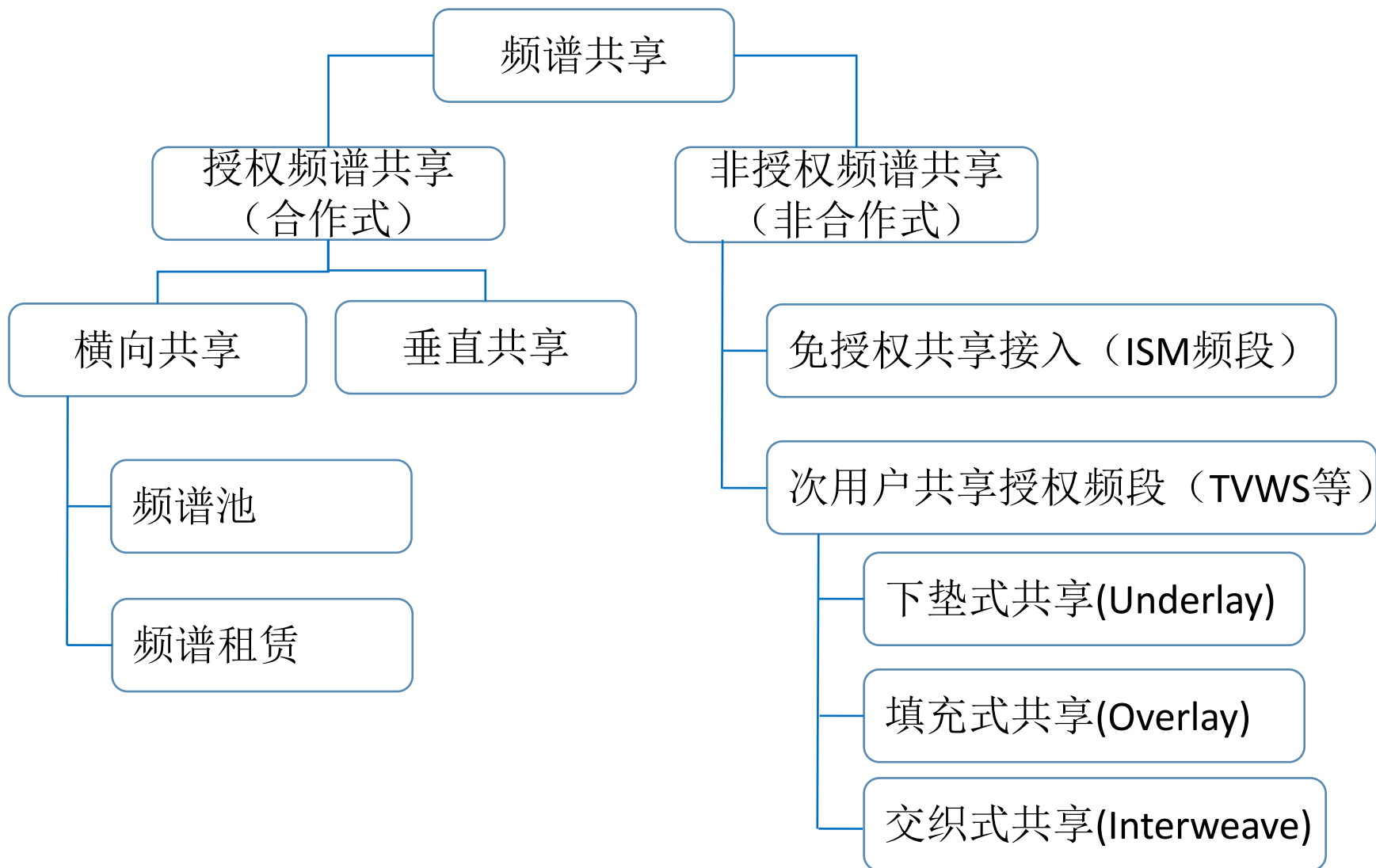
02

PART TWO

频谱共享



频谱共享分类





频谱共享潜在应用例子

➤ 非热点覆盖增强

- 1、建设基础设施，成本高
- 2、独占优良传播特性的频谱（如sub-1GHz），但剩余频谱资源缺乏
- 3、频谱共享

➤ 热点容量提升

利用频谱共享技术能够处理流量峰值问题。

➤ 非移动通信频段部署小蜂窝

当宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝等部署在同一频段时，会引入复杂的干扰问题。把小蜂窝布置在共享频带，可以减轻干扰。

LTE频谱共享技术

共享方案	共享方式	是否授权频谱	部署策略
LAA	共享	授权	由运营商和其他部署模式共享

LTE 与WiFi链路聚合（LWA）：分离LTE数据有效载荷，部分业务流量通过WiFi网络传输。与LAA/LTE-U的区别是借助

非授权频谱共享接入（MulteFire）：在非授权频谱上独立运行LTE技术来部署无线网络。MulteFire需要LBT（先监听再通话）技术。

LAA（LTE-Arrival at Access）：3GPP R13标准方案，是LTE-U的演进升级。将LTE网络中部分业务卸载到未授权频段（如WiFi频段），授权频谱与非授权频谱通过载波聚合（CA）的方式捆绑使用。LAA支持先监听再通话（LBT-Listen Before Talk），避免干扰原有系统。2017年初，沃达丰在土耳其开通首个LAA商用网络，利用5GHz的40MHz非授权频谱和2.6GHz的15MHz授权频谱进行三载波聚合。



频谱共享的挑战

➤ 如何避免/减轻共享频谱用户之间的干扰？

A. 独占频谱时，蜂窝网络避免干扰的方法：

- 1、UE的信道状态信息反馈，实现有效的频谱资源分配；
- 2、小区内干扰管理
- 3、小区间干扰协调（ICIC）

B. 频谱共享时，用户之间：

如何避免干扰？



干扰协调技术

➤ 1、集中式干扰协调技术

频谱状态的地理信息数据库 + 集中式管理（非实时）

问题：1）需要部署新的硬件

2）用户对共享的频谱状态数据会有所保留

3）频谱状态动态变化时，会频繁的更新/请求集中式管理中心（实际中频谱状态具有多样性）

➤ 适用于静态/准静态的频谱共享



干扰协调技术

➤ 2、分布式干扰协调技术

频谱感知技术（具有实时性）

- 问题：
- 1）恶意干扰、隐终端降低频谱感知的可靠性
 - 2）频谱感知消耗时间资源，会降低资源利用率

➤ 实现动态频谱共享，准确可靠的频谱感知是一大挑战

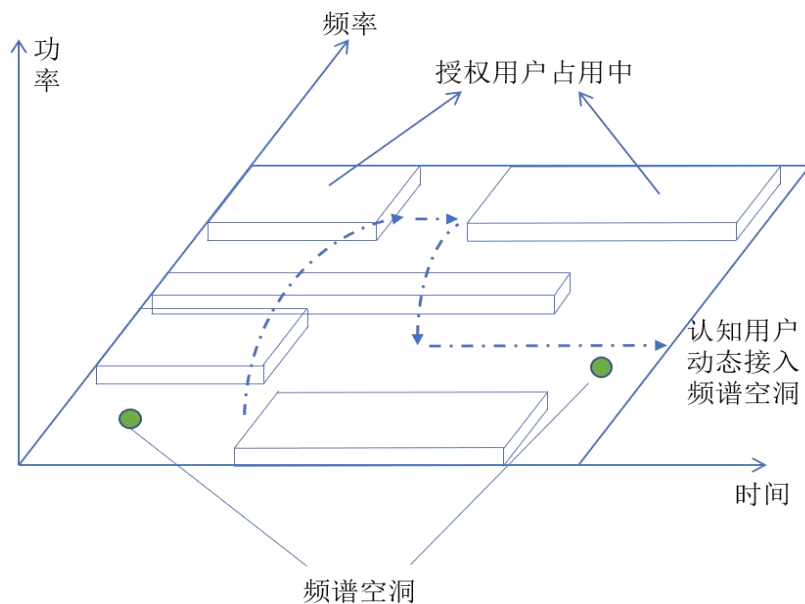
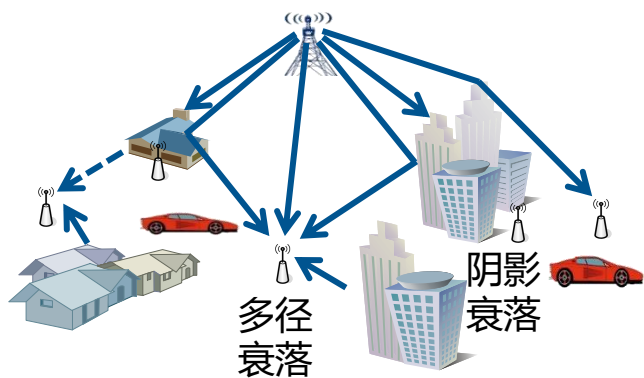
03

PART THREE

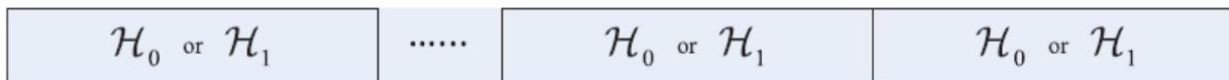
频谱感知方法



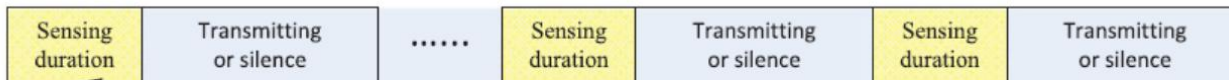
频谱感知



Activity states of primary users



Frame structure of secondary user

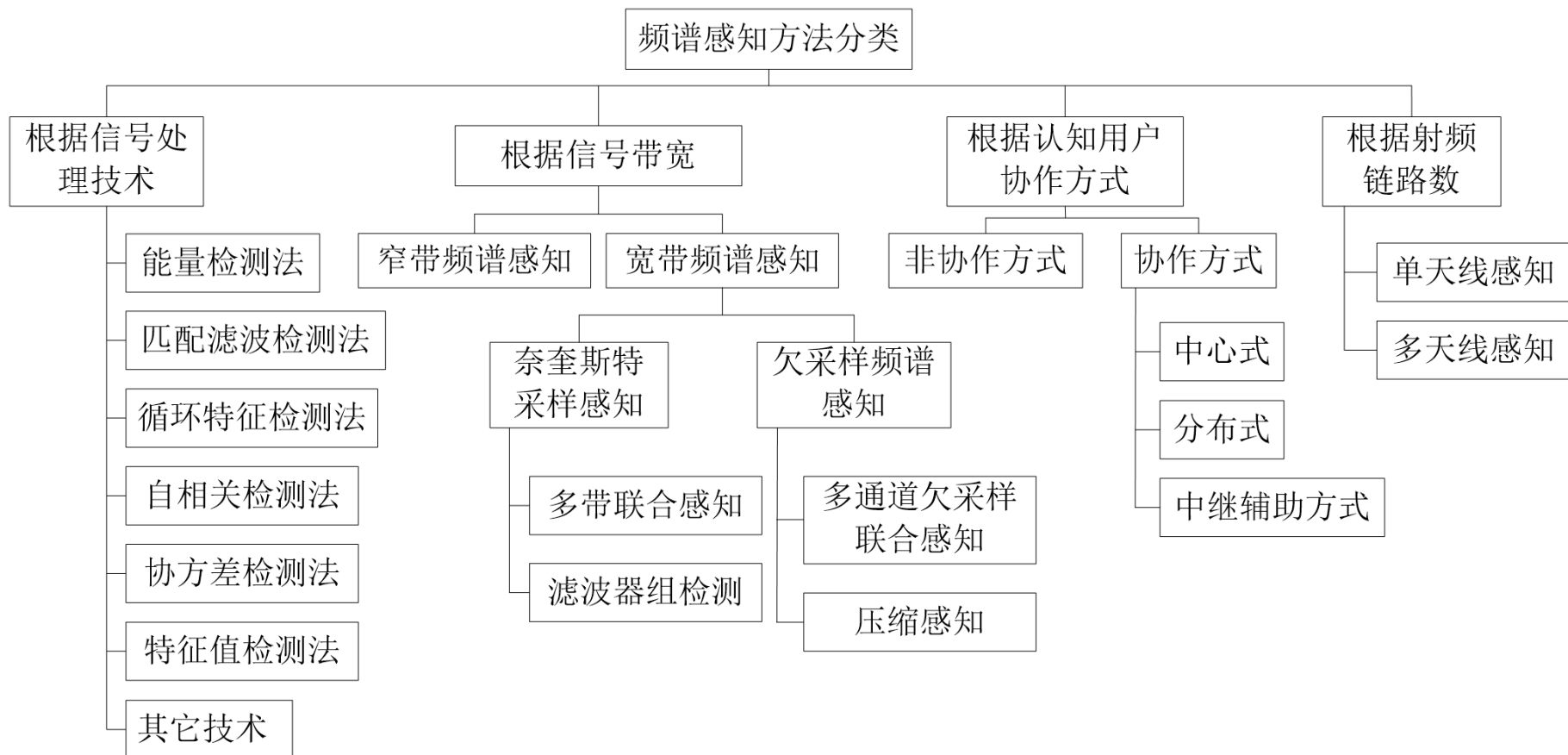


Outdated durations

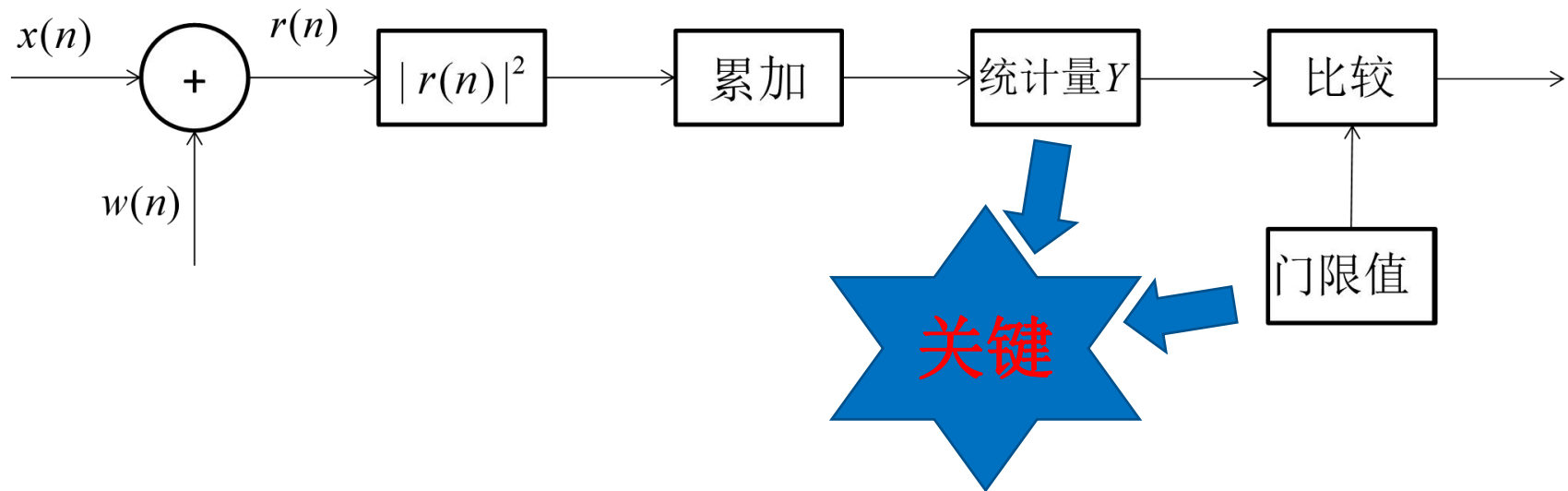
Current duration



频谱感知方法分类



频谱感知基础：以能量检测法为例



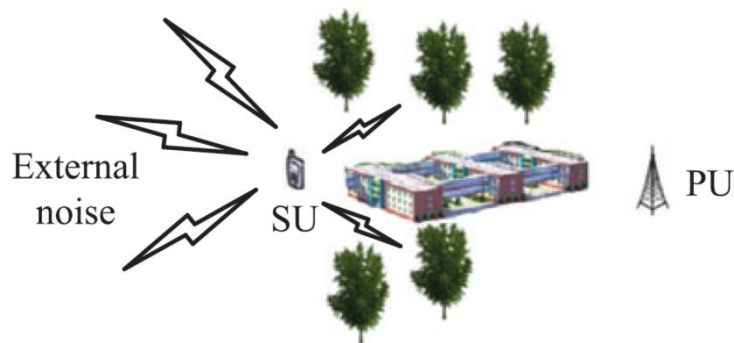
3GPP R14 LAA采用能量检测法，判决门限为-52dBm或-72dBm

WiFi信号出现概率低时

WiFi信号出现概率高时

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 信号模型



$$x(n) = \begin{cases} w_i(n) + w_e(n), & \mathcal{H}_0 \\ h(n) \otimes s(n) + w_i(n) + w_e(n), & \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

信道冲击响应函数

循环前缀OFDM信号

噪声

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 统计分布模型

$$\mathbf{x} \sim \begin{cases} \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_0), & \mathcal{H}_0 \\ \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_1), & \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

其中

$$\mathbf{R}_0 = \sigma_w^2 \mathbf{I}_{K(N_c + N_d)}$$

$$\mathbf{R}_1 = (\sigma_s^2 + \sigma_w^2) \begin{pmatrix} \Phi_f & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \Phi & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \Phi & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \Phi_t \end{pmatrix}$$

一个完整OFDM符号样本向量的协方差矩阵:



$$\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{N_c} & 0 & \rho \mathbf{I}_{N_c} \\ 0 & \mathbf{I}_{N_d - N_c} & 0 \\ \rho \mathbf{I}_{N_c} & 0 & \mathbf{I}_{N_c} \end{pmatrix} \quad \rho = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_w^2}$$

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 统计分布模型

$$\mathbf{x} \sim \begin{cases} \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_0), & \mathcal{H}_0 \\ \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_1), & \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

$$f_0(\mathbf{x} | \sigma_w^2) = \frac{e^{-\mathbf{x}^H \mathbf{R}_0^{-1} \mathbf{x}}}{\pi^{K(N_c + N_d)} \det(\mathbf{R}_0)} = \frac{e^{-\mathbf{x}^H \mathbf{x} / \sigma_w^2}}{(\pi \sigma_w^2)^{K(N_c + N_d)}}$$

$$f_1(\mathbf{x} | \sigma_w^2, \rho, \tau) = \frac{e^{-\mathbf{x}^H \mathbf{R}_1^{-1} \mathbf{x}}}{\pi^{K(N_c + N_d)} \det(\mathbf{R}_1)}$$

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

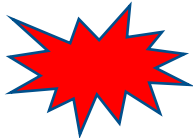
➤ 参数估计（首先考虑 τ 已知的情況）

两个未知参数： σ_w^2, ρ

两种分布模型： $f_0(\mathbf{x}|\sigma_w^2)$, $f_1(\mathbf{x}|\sigma_w^2, \rho, \tau)$

一个感知周期采样数据： $\mathbf{x}$ （授权用户状态未知）

最大似然方法估计参数

出现两种不同的参数估计值 

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 参数估计（首先考虑 τ 已知的情況）

两种分布模型造成参数估计偏差过大

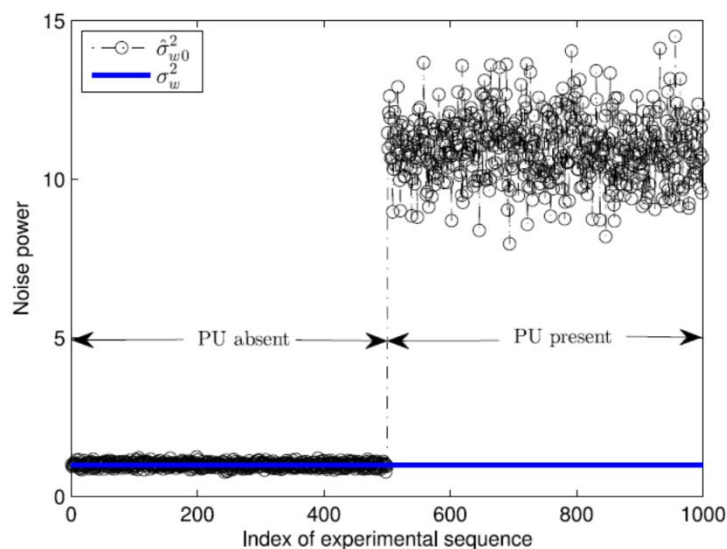


Fig. 3. ML estimate of noise power σ_w^2 by maximizing $f_0(\mathbf{x}|\sigma_w^2)$ under $\mathcal{H}_0$ (Left: PU absent; Right: PU present). Note that σ_w^2 in LRT is single valued.

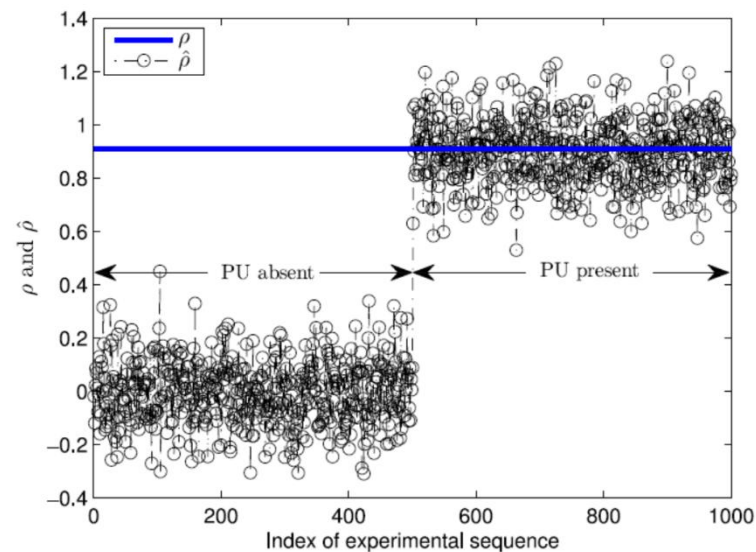


Fig. 4. ML estimate of ρ by maximizing $f_1(\mathbf{x}|\sigma_w^2, \rho, \tau)$ under $\mathcal{H}_1$ (Left: PU absent; Right: PU present). Note that ρ in LRT is single valued.

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 统一分布模型

$$\text{令 } \gamma = \begin{cases} 0, & \mathcal{H}_0 \\ \rho, & \mathcal{H}_1 \end{cases}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_0(\mathbf{x}|\sigma_w^2) \\ f_1(\mathbf{x}|\sigma_w^2, \rho, \tau) \end{array} \right\} f(\mathbf{x}|\sigma_w^2, \gamma, \tau) = \frac{(1-\gamma)^{K(N_c+N_d)}}{(\pi\sigma_w^2)^{K(N_c+N_d)}(1-\gamma^2)^{(K-1)N_c+M(\tau)}} \times \exp\left\{-\frac{A_x - \gamma B_{x|\tau} - \gamma^2 C_{x|\tau}}{\sigma_w^2(1+\gamma)}\right\}$$

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 统一分布模型的最大似然估计

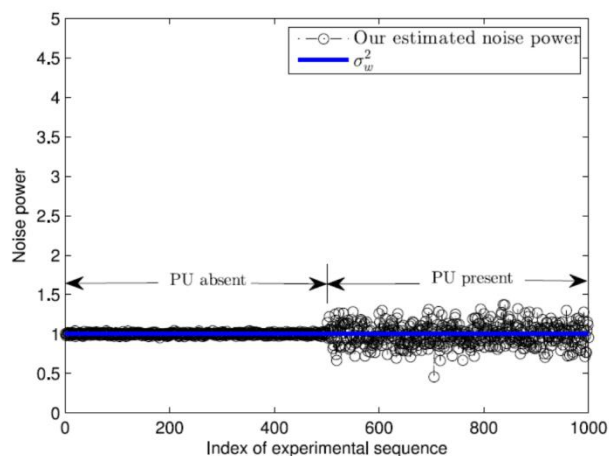
$$\hat{\sigma}_w^2 = \arg \max_{\sigma_w^2, \gamma} f(\mathbf{x} | \sigma_w^2, \gamma, \tau)$$



$$\hat{\gamma}(\tau) = \frac{K(N_c + N_d)B_{x|\tau}}{2(KN_c - N_c + M(\tau))A_x}$$

非同步情况下，通过最大化
gamma来估计tau

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{A_x}{K(N_c + N_d)} - \frac{B_{x|\tau}}{2(KN_c - N_c + M(\tau))}$$



历史感知周期噪声功率估计
值取平均，提高估计精度

Fig. 6. Estimated noise power using the proposed estimator (Left: PU absent; Right: PU present).

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 检测性能比较（与理论最优性能接近）

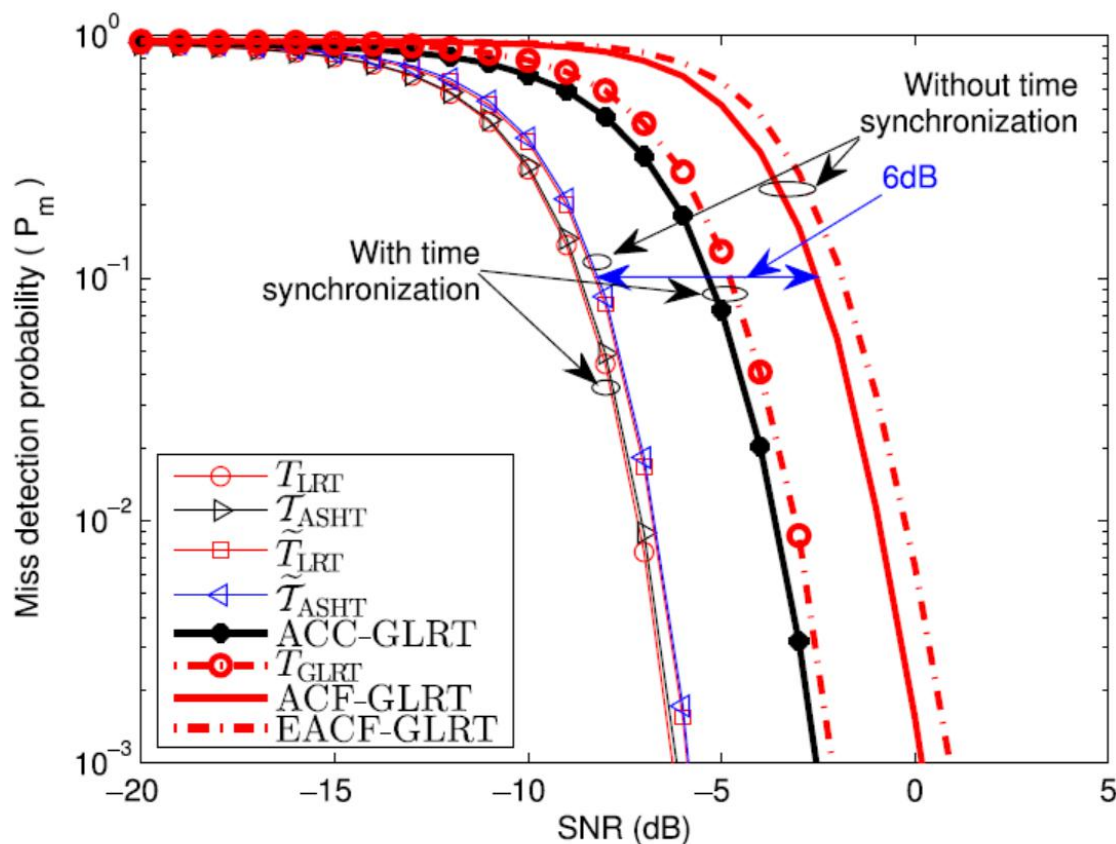


Fig. 12. Miss detection probability versus SNR where $P_f = 0.05$, $N_d = 32$, $N_c = 8$, $K = 10$ and $Q' = 100$.

基于统一参数估计的OFDM频谱感知方法

➤ 检测性能比较（多径信道影响）

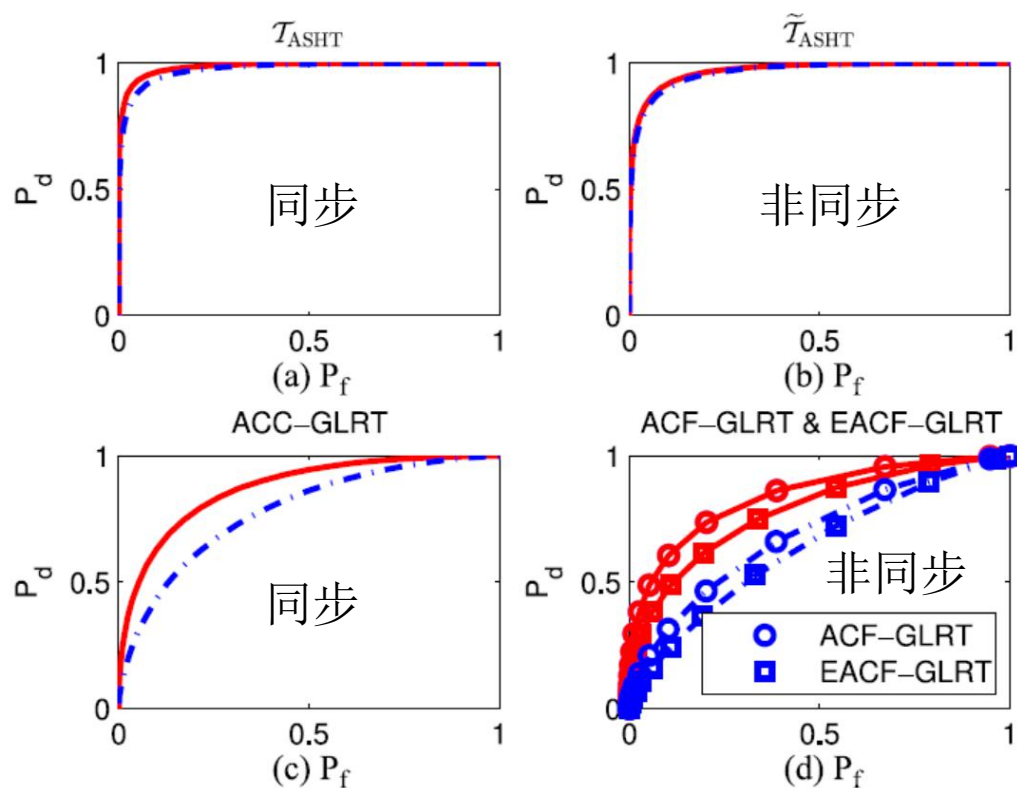


Fig. 15. ROC curves with $L = 1$ (solid line) and $L = 6$ (dot dash line) for (a) $\mathcal{T}_{ASHT}$, (b) $\tilde{\mathcal{T}}_{ASHT}$, (c) ACC-GLRT and (d) ACF-GLRT and EACF-GLRT where $N_d = 32$, $N_c = 8$, $K = 4$ and $\text{SNR} = -6$ dB.

感谢聆听

敬请批评指正！