



## 5.3 SCMA在无线网络网络中的应用



# 目录



- 研究背景和意义
- 基于SCMA的蜂窝网络容量研究
- 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的网络容量研究
- 基于SCMA的超密集无线网络容量研究



# 目录



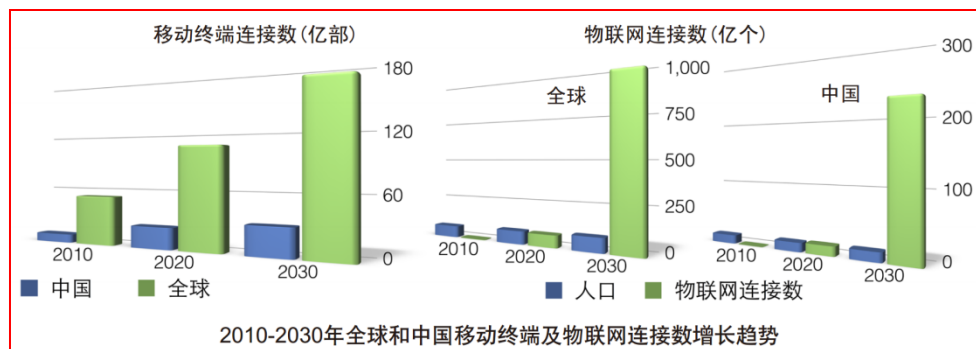
- **研究背景和意义**
- **基于SCMA的蜂窝网络容量研究**
- **基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的网络容量研究**
- **基于SCMA的超密集无线网络容量研究**



- 未来移动通信网络
  - ✓ 高度融合的异构网络。



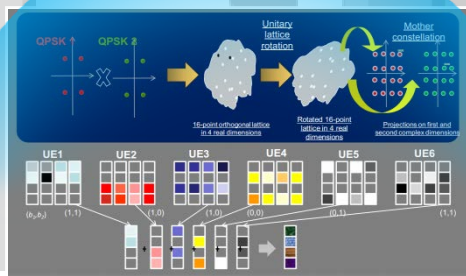
- 移动数据流量爆炸式增长
  - ✓ 2010-2020, 增长200倍
  - ✓ **2010-2030, 增长2万倍**



- 移动终端数目激增
  - ✓ 2020年, 达100亿
  - ✓ **2030年, 接近200亿**

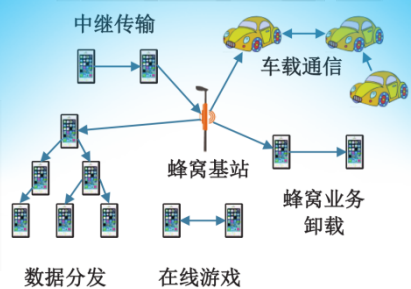
## 目标：提升网络容量

### 新型多址接入技术



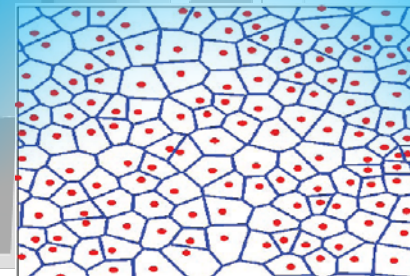
✓增加接入用户数

### 终端直通技术



✓提升网络资源利用率

### 网络密集化部署



✓增强资源空间复用

## 核心挑战1: 多址干扰难以刻画

- 非正交多址接入-- 稀疏码多址接入 (SCMA)
  - ✓ 多址资源可以被多个用户同时占用
  - ✓ 网络中干扰不仅包含实现多址接入的主动干扰, 还存在复用多址资源导致的被动干扰

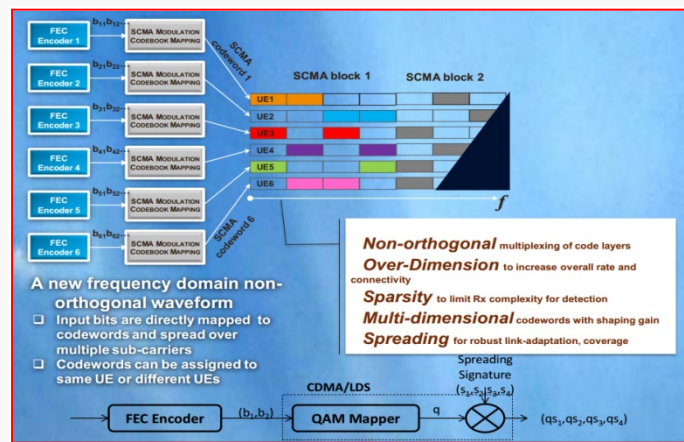
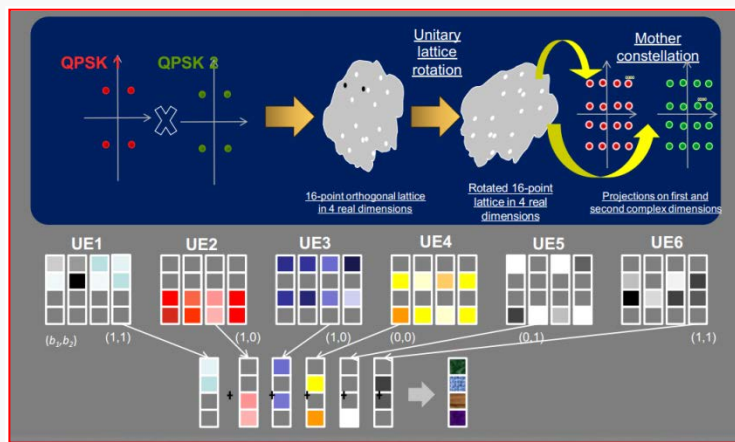
## 核心挑战2:

跨层干扰难  
建模、网络  
性能难优化

1. 如何刻画使用非正交多址接入技术网络中的多址干扰?
2. 如何建立多址干扰和网络容量的数学关系?

## 核心挑战3:

近场传播对  
容量影响难以分析





# 研究背景

核心挑战1:  
多址干扰难以刻画

核心挑战2:  
跨层干扰难以建模、网络性能难优化

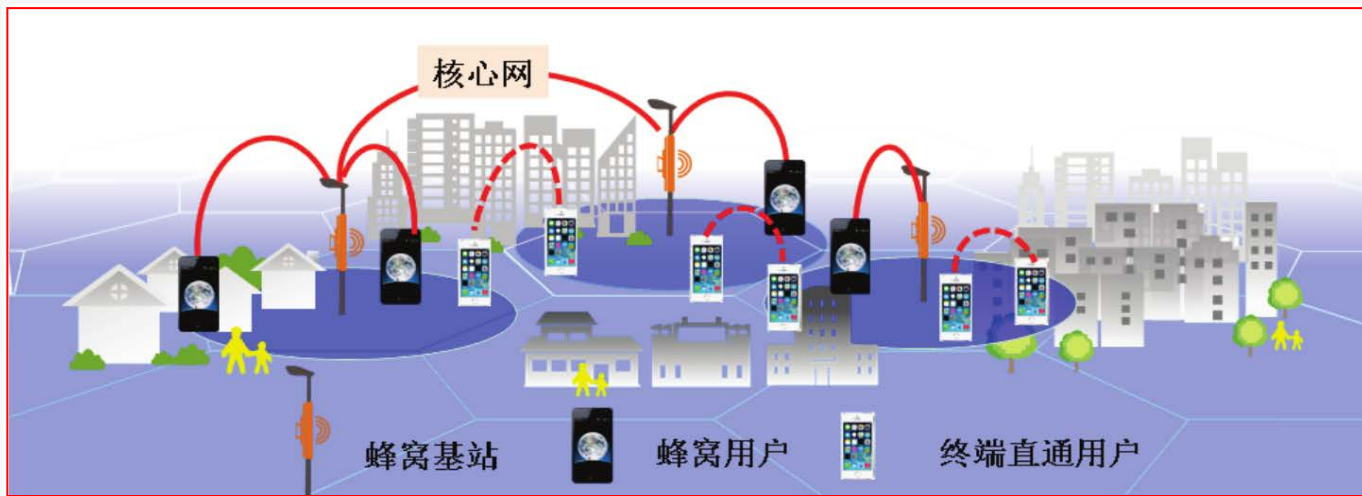
核心挑战3:  
近场传播对容量影响难以分析

- 在蜂窝网络架构下引入**终端直通 (D2D) 技术**
  - ✓ 近域传输增益、资源复用增益、单跳传输增益、卸载增益
- **蜂窝和终端直通 (D2D) 融合网络**
  - ✓ 复用模式: 跨层干扰
  - ✓ 专用模式: 资源分配方案



严重影响网络性能

1. D2D技术究竟能够带来多大的**网络容量增益**?
2. 如何对**跨层干扰**进行高效管控?
3. 如何对**资源分配**进行优化?







# 研究背景

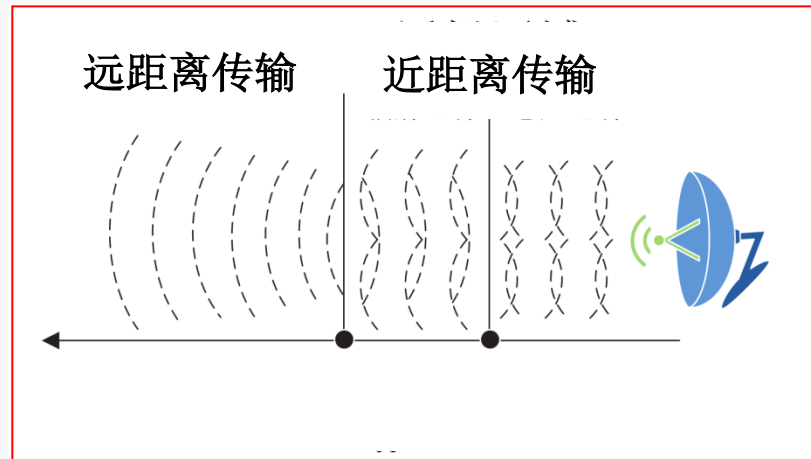
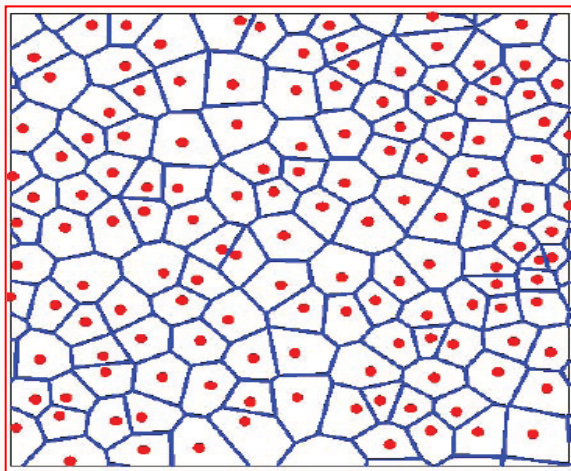
核心挑战1:  
多址干扰难以刻画

核心挑战2:  
跨层干扰难以建模、网络性能难以优化

核心挑战3:  
近距离传播对容量影响难以分析

- 蜂窝网络的**密集化布设**
  - ✓ **减小收发节点距离、提高网络资源空间复用程度**
- 信号传播
  - ✓ **远距离传输过渡到近距离传输**

1. 如何对**近距离传播**进行**建模**?
2. **近距离传播**对**网络容量分析**带来哪些**影响**?
3. 考虑近距离传播, **网络密集化**对**网络容量**的**本质影响**是什么?







# 研究背景



探究多种技术（新型非正交多址接入技术、D2D技术、网络密集化）对网络容量的本质影响，建立网络容量与重要网络参数（布设参数、无线信道参数、SCMA参数）的数学表达，实现多种技术的优化配置，为它们在实际网络中的应用提供理论指导。



# 目录



- 研究背景和意义
- 基于SCMA的蜂窝网络容量研究
- 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的网络容量研究
- 基于SCMA的超密集无线网络容量研究

## 大规模网络中SCMA性能分析

### ➤ SCMA技术:

- ✓ SCMA对频率资源和码域资源的联合设计，频率资源可以非正交地分配给多个用户，多个用户通过码域资源进行区分。

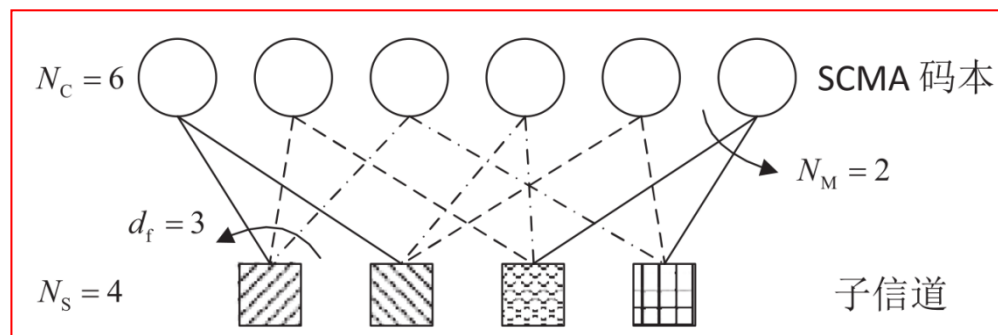


图1 SCMA码本与子信道映射关系示意图

$$\text{过载增益} = \frac{\text{SCMA码本数}}{\text{子信道个数}} \quad (\text{单小区})$$

### ➤ 容量分析困难:

- ✓ SCMA的非正交接入特性导致系统中干扰复杂，既包含码本映射导致的主动干扰，又包含用户复用资源导致的被动干扰；
- ✓ 干扰统计特性难以刻画给SCMA机制下网络容量分析带来巨大挑战。

## ➤ 大规模蜂窝网络系统模型

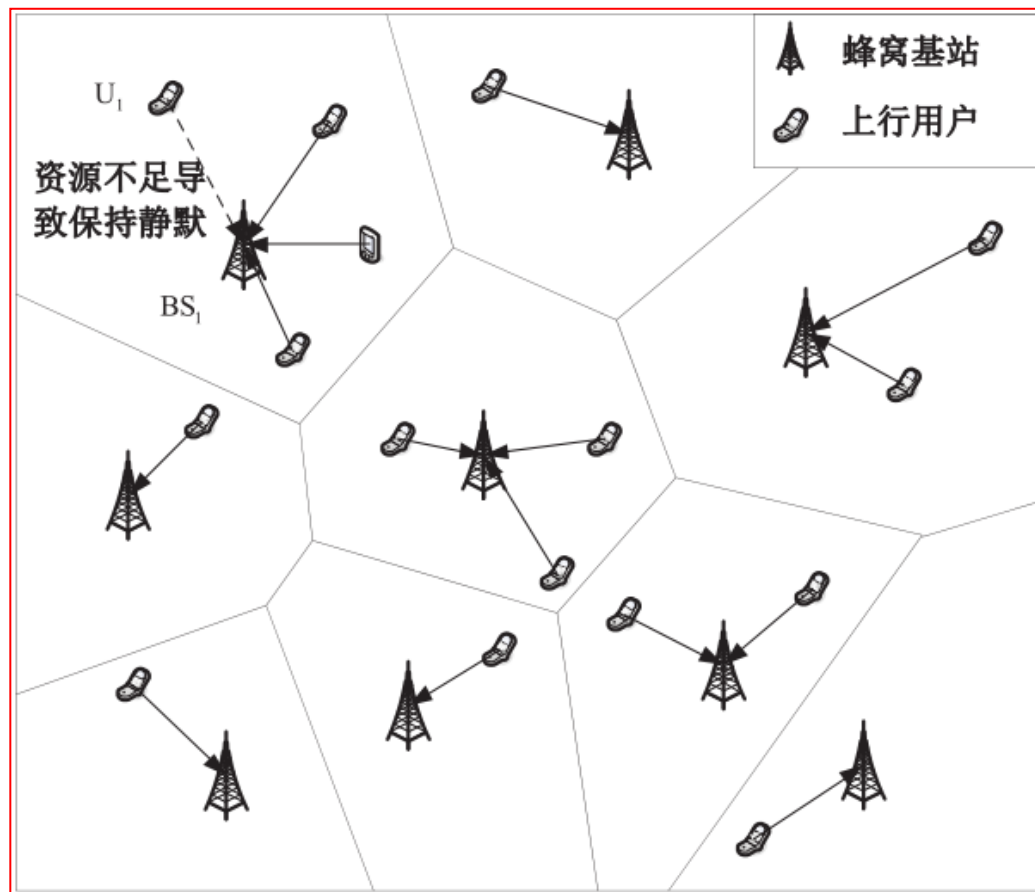


图2 上行蜂窝网络场景示意图

蜂窝基站、用户位置分布采用**泊松点过程**进行建模

用户采用**最近关联策略**与基站进行关联

基站为每个用户分配**至多一个多址资源** (SCMA码本)

由于资源不足, 可能导致用户不能分配资源保持静默

**小区内不允许多址资源复用、小区间允许多址资源复用**



## 性能指标

### ➤ 成功传输概率

$$SP_{BS_0} = \mathbb{P}(\text{SIR}_{BS_0} > \tau_{BS}), \quad (1)$$

其中,  $\text{SIR}_{BS_0}$  表示基站  $BS_0$  处的信干比 (SIR),  $\tau_{BS}$  表示蜂窝基站解调信号需要满足的信干比门限。

### ➤ 空间吞吐量

$$ST = \hat{\mu}_U SP_{BS_0} \log_2(1 + \tau_{BS}), \left[ \text{bits} / (\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{m}^2) \right] \quad (2)$$

其中,  $\hat{\mu}_U$  表示激活用户密度,  $\log_2(1 + \tau_{BS})$  为通过香农公式进行定义的数据传输速率。

空间吞吐量能够表征单位面积上单位时间内成功传输的数据比特数, 该指标能够准确刻画无线网络容量。



# 基于SCMA的蜂窝网络容量研究

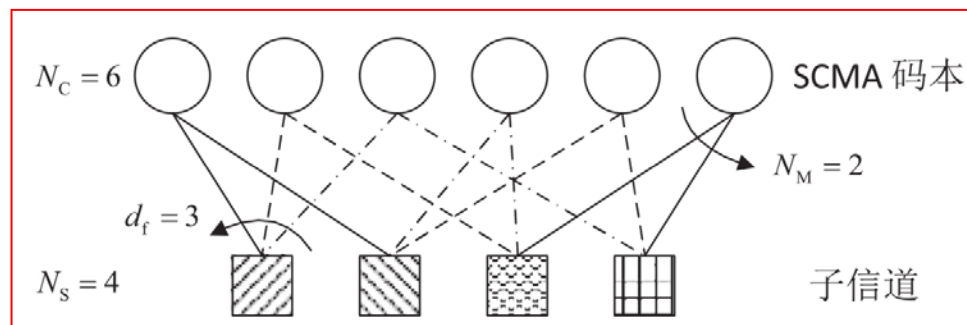
## ➤ 大规模网络中SCMA性能分析

分析由 $U_0$ 和 $BS_0$ 组成的**典型链路**接收端信干比 (SIR)

$$\text{SIR}_{BS_0}^S = \frac{\sum_{m=1}^{N_M} P_U r_{U,0}^{-\alpha} \|h_{BS_0, U_0, m}\|^2}{I^S}, \quad (3)$$

其中,  $I^S = \sum_{U_i \in \tilde{\Pi}_{UT}^S} \sum_{m=1}^{N_M} P_U \|h_{BS_0, U_i, m}\|^2 \|U_i - BS_0\|^{-\alpha}$  为与 $U_0$ 复用相同SCMA码本的激活蜂窝用户所引起的小区间干扰。

➤ 由于一个SCMA码本映射到多个子信道上, **接收端的有用信号和干扰信号功率为所有子信道上功率之和。**



➤ 这导致SIR统计特性难以刻画!

图3 SCMA码本与子信道映射关系示意图



# 基于SCMA的蜂窝网络容量研究



**定理2.3:** 在SCMA上行蜂窝系统中，网络空间吞吐量能够通过下式给出：

$$ST_C^S = \mu_U^S SP_{BS_0}^S \log_2 (1 + \tau_{BS}), \quad (4)$$

其中， $\mu_U^S$  表示激活用户密度， $SP_{BS_0}^S$  的近似结果由下式给出：

$$SP_{BS_0}^S \approx \frac{\mu_{BS}}{\mu_{BS} + \hat{\mu}_U^S \left( {}_2F_1 \left( N_M, -\delta, 1 - \delta, -\frac{\tau_{BS}}{N_C} \right) - 1 \right)}. \quad (5)$$

定理2.3中结果建立了网络空间吞吐量与网络重要参数，例如蜂窝基站密度  $\mu_{BS}$ 、SIR解调门限  $\tau_{BS}$ 、可用码本数  $N_C$ 、码字稀疏程度  $N_M$ 、激活用户密度  $\mu_U^S$  以及路径损耗因子  $\alpha$  的数学关系。

为SCMA技术在蜂窝网络中应用以及参数优化提供重要理论依据！





# 基于SCMA的蜂窝网络容量研究



## ➤ 仿真结果

为突出SCMA性能，我们对传统的多址接入技术，即**码分多址接入（CDMA）**以及**正交频分多址接入（OFDMA）**的性能也进行分析，得到相应上行蜂窝网络的空间吞吐量！

## ➤ 默认仿真参数配置如下

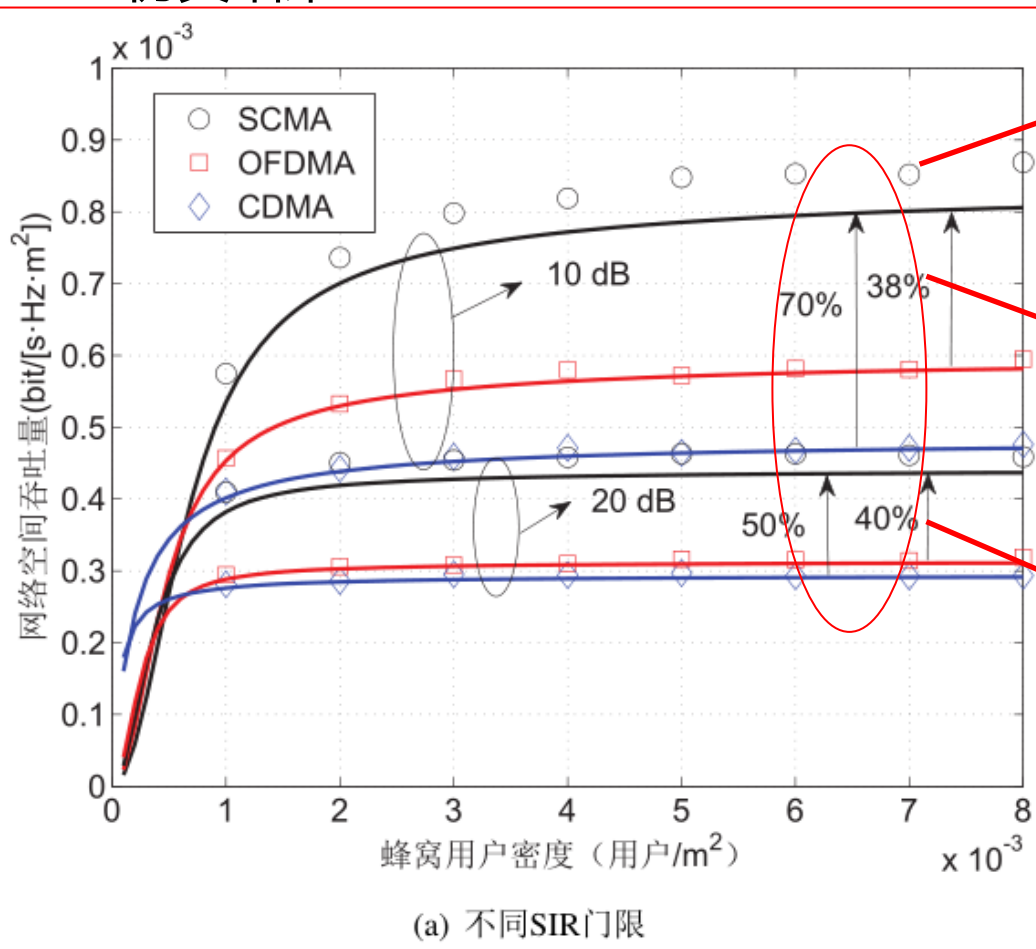
表 2.1 蜂窝网络默认仿真参数

仿真场景边长 (m)	1000
仿真次数	$1 \times 10^6$
路径损耗因子	4
子信道数目	20
SCMA码本数目	30
上行用户传输功率 (dBm)	20

在每次仿真中，基站和用户的分布**重新产生一次**，进行相应的基站关联和资源分配！

默认情况下，**SCMA过载因子**设置为1.5。

## 仿真结果



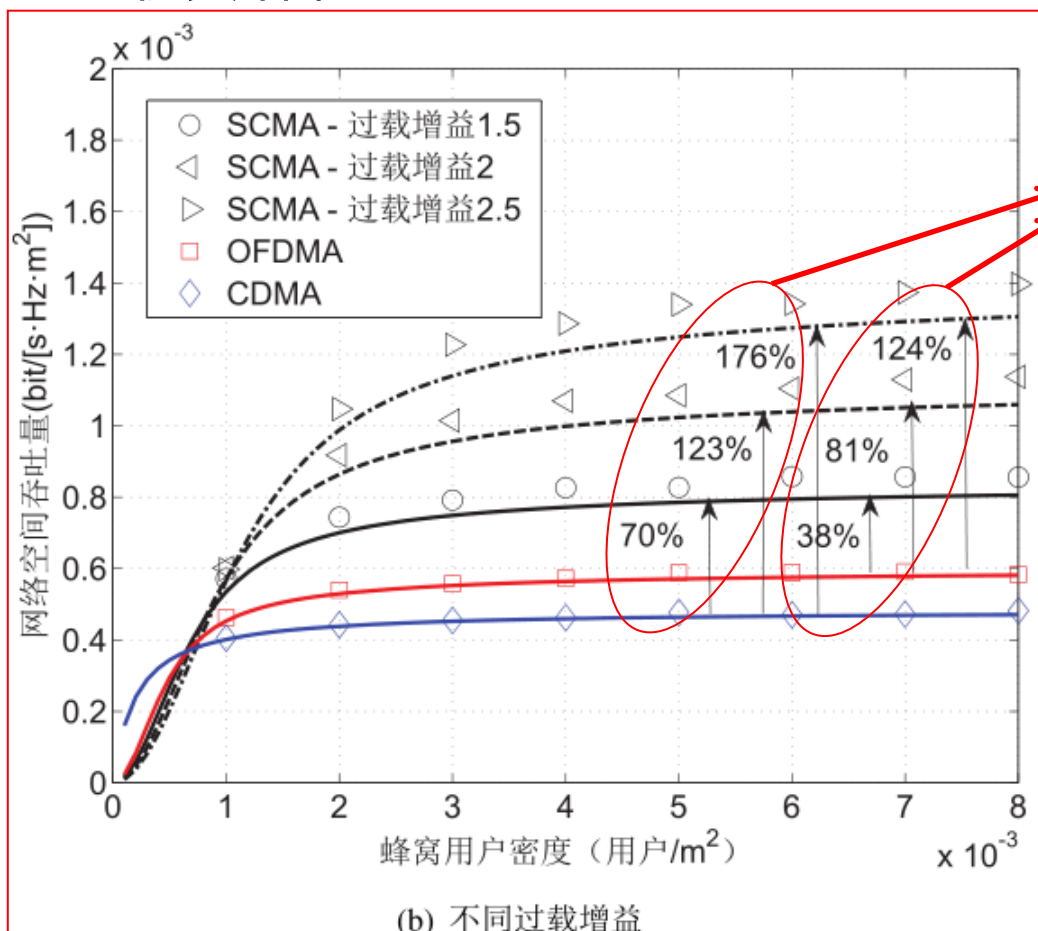
理论和仿真结果差距较小，验证所采用近似方法的准确性！

相比于CDMA和OFDMA，SCMA将空间吞吐量显著提升！

对空间吞吐量的增强作用在用户分布密集的情况尤为明显！

图4 不同多址接入技术上行蜂窝网络空间吞吐量

## 仿真结果



SCMA过载增益的提高, 使得SCMA相比于CDMA和OFDMA提供的空间吞吐量增益也随之增加!

由于SCMA码本设计是一个NP难问题, 实际设计得到码本所达到的过载增益最大为3!

图4 不同多址接入技术上行蜂窝网络空间吞吐量



# 目录



- 研究背景和意义
- 基于SCMA的蜂窝网络容量研究
- 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的网络容量研究
- 基于SCMA的超密集无线网络容量研究



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究

➤ 未来网络是高度融合、异构互联的网络

✓ 蜂窝网络架构下引入D2D技术

➤ 问题:

✓ D2D技术能够将容量提升多少?

✓ 复用模式下, 如何进行有效的干扰管理?

✓ 专用模式下, 如何进行有效的资源配置?

➤ 挑战:

✓ 融合网络中干扰形态复杂, 跨层干扰难以刻画!

✓ 密集环境下, 难以实现有效的干扰管理和资源配置!

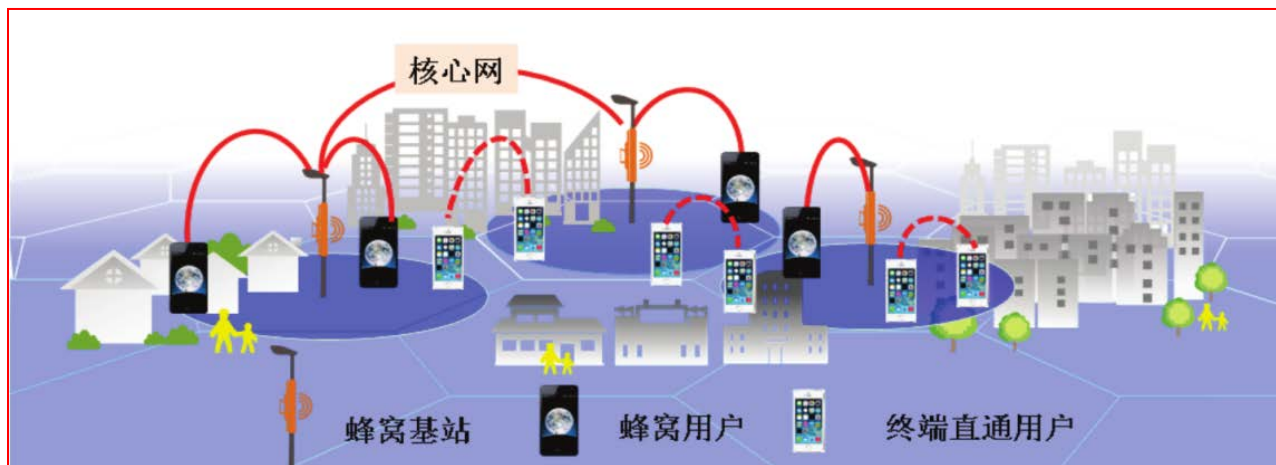


图5 蜂窝和D2D融合网络示意图

## 融合网络系统模型

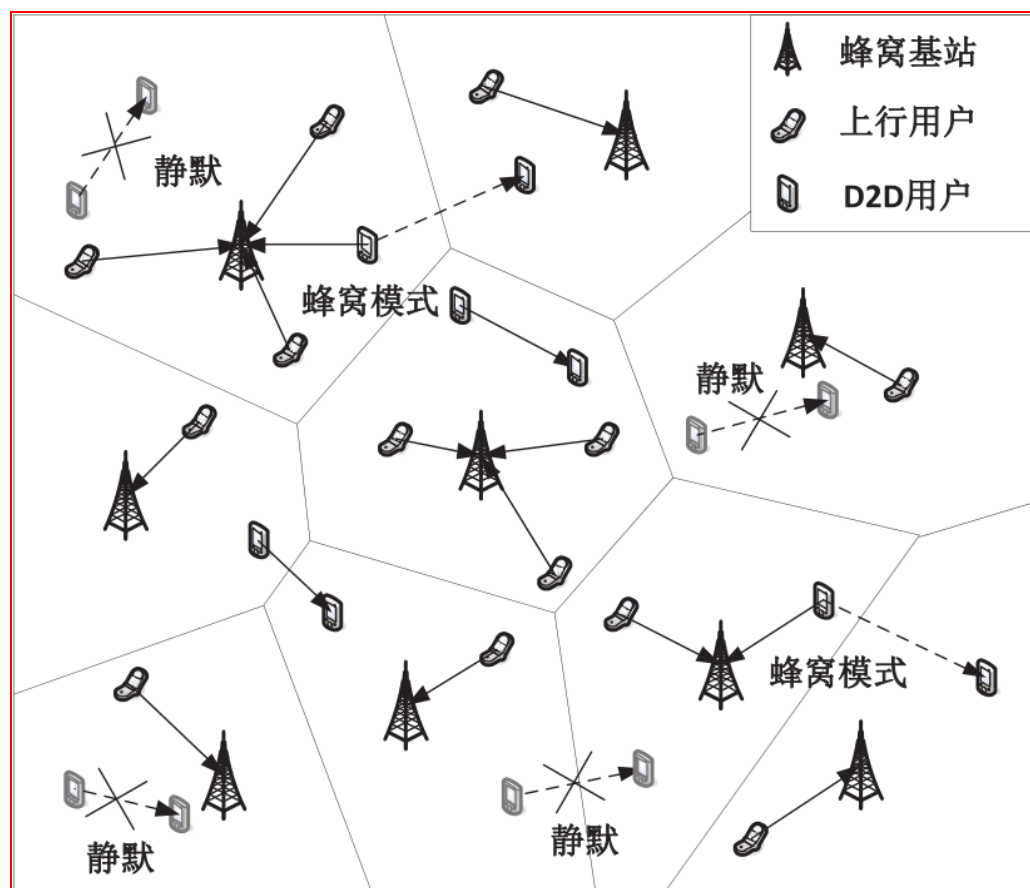


图6 上行蜂窝和D2D融合网络示意图

D2D收发端距离概率密度函数:

$$f_{r_{D,k}}(x) = 2\pi\xi x \exp(-\xi\pi x^2),$$

基于链路长度的模式选择策略:

蜂窝模式:  $r_{D,k} > \tau_{\text{dis}}$

D2D模式:  $r_{D,k} \leq \tau_{\text{dis}}$

基站为蜂窝用户至多分配一个SCMA码本, D2D用户随机占用一个SCMA码本

复用模式: D2D用户以概率 $q_D$ 进行干扰避免

专用模式:  $N_C = N_{CC} + N_{CD}$



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



## 性能指标

### ➤ 成功传输概率

蜂窝用户  $SP_{BS_0} = \mathbb{P}(\text{SIR}_{BS_0} > \tau_{BS}),$  (6)

D2D用户  $SP_{DR_0} = \mathbb{P}(\text{SIR}_{DR_0} > \tau_{DR}),$  (7)

### ➤ 空间吞吐量

$$ST = ST_C + ST_D, \left[ \text{bits} / (\text{s} \cdot \text{Hz} \cdot \text{m}^2) \right] \quad (8)$$

其中,  $ST_C = \hat{\mu}_{UT} SP_{BS_0} \log_2(1 + \tau_{BS})$  和  $ST_D = \hat{\mu}_{DT} SP_{DR_0} \log_2(1 + \tau_{DR})$  分别是蜂窝网络和D2D网络的空间吞吐量。

由于干扰统计特性的差异性, 在复用模式和专用模式中,  $ST_C$ 和 $ST_D$ 的内涵有所不同!





# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



**定理3.1:** 在**复用模式**下, 以SCMA为多址接入机制的蜂窝和D2D 融合网络中, 网络空间吞吐量能够通过下式给出:

$$ST^{SU} = \mu_{UT}^{SU} SP_{BS_0}^{SU} \log_2 (1 + \tau_{BS}) + \mu_{DT}^{SU} SP_{DR_0}^{SU} \log_2 (1 + \tau_{DR}), \quad (9)$$

其中,

$$SP_{BS_0}^{SU} \approx \frac{\mu_{BS}}{\mu_{BS} + \hat{\mu}_{UT}^{SU} \left( {}_2F_1(N_M, -\delta, 1-\delta, -\tilde{\tau}_{BS}) - 1 \right) + \frac{2\pi \hat{\mu}_{DT}^{SU} (\tilde{\tau}_{BS} \eta_P)^\delta}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)}.$$

$$SP_{DR_0}^{SU} \approx \pi \xi \rho_S^{-1} \left( 1 - e^{-\rho_S \tau_{dis}^2} \right), \quad \rho_S = \pi \xi + \frac{2\pi^2 \tilde{\tau}_{DR}^\delta \left( \hat{\mu}_{DT}^{SU} + \mu_{UT}^{SU} \eta_P^{-\delta} \right)}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)$$

复用模式下, 跨层干扰形态复杂, 但定理3.1中结果建立了**网络空间吞吐量**与**蜂窝网络重要参数**、**D2D网络重要参数**以及**无线信道参数**的关系!

根据定理3.1, 我们能够获得**D2D带来的容量增益**, 同时为**复用模式下干扰避免策略**的设计和优化奠定理论基础!



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



**推论3.1:** 在**专用模式**下, 以SCMA为多址接入机制的蜂窝和D2D融合网络中, 网络空间吞吐量能够通过下式给出:

$$ST^{SO} = \mu_{UT}^{SO} SP_{BS_0}^{SO} \log_2 (1 + \tau_{BS}) + \mu_{DT}^{SO} SP_{DR_0}^{SO} \log_2 (1 + \tau_{DR}), \quad (10)$$

其中,

$$SP_{BS_0}^{SO} \approx \frac{\mu_{BS}}{\mu_{BS} + \frac{q_U^O \mu_{UT}}{N_{CC}} \left( {}_2F_1(N_M, -\delta, 1-\delta, -\tilde{\tau}_{BS}) - 1 \right)},$$

$$SP_{DR_0}^{SO} \approx \frac{\pi \xi}{\rho_O} \left( 1 - e^{-\rho_O \tau_{dis}^2} \right), \quad \rho_O = \pi \xi + \frac{2\pi^2 \tilde{\tau}_{DR}^\delta \mu_{DT}}{N_{CD} \alpha \sin(2\pi / \alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)$$

推论3.1中结果建立了**网络空间吞吐量**与**融合网络参数**以及**专用模式下SCMA码本分配策略**的数学关系, 为该模式下**资源分配策略**的优化提供理论依据!



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



## ➤ 复用模式（干扰避免策略优化）：

- ✓ 赋予D2D用于接入概率 $q_D$ ，从而调控蜂窝网络和D2D网络跨层干扰
- ✓ 定义比例公平效用函数，优化D2D接入概率

$$q_D^* = \arg \max_{q_D} u_U \left( \text{ST}_C^{\text{SU}}, \text{ST}_D^{\text{SU}} \right), \quad (11)$$

比例公平效用函数： $u_U \left( \text{ST}_C^{\text{SU}}, \text{ST}_D^{\text{SU}} \right) = \log \text{ST}_C^{\text{SU}} + \log \text{ST}_D^{\text{SU}}.$

**定理3.2：**在复用模式的蜂窝和D2D融合网络中，当 $\rho_S \tau_{\text{dis}}^2 \rightarrow 0$ 时，能够最大化目标函数（11）的最优D2D用户激活概率为 $q_D = 1$ 。

定理3.2对应蜂窝用户和D2D分布较为稀疏且D2D模式选择门限设置较小的情况。此时，资源利用率较低，即使考虑比例公平，D2D用户也应全部进行接入！



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



**定理3.3:** 在复用模式的蜂窝和D2D融合网络中, 当  $\tau_{\text{dis}} \rightarrow \infty$  时, 能够使目标函数 (11) 达到最大的最优D2D用户激活概率为:

$$q_D^* = \begin{cases} \sqrt{\frac{Q_1 Q_4}{Q_2 Q_3}}, & \text{if } Q_1 Q_4 < Q_2 Q_3, \\ 1, & \text{if } Q_1 Q_4 \geq Q_2 Q_3, \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$Q_1 = \mu_{\text{BS}} + \mu_{\text{UT}}^{\text{SU}} \left[ {}_2F_1(N_C, -\delta, 1-\delta, -\tilde{\tau}_{\text{BS}}) - 1 \right], \quad Q_3 = \frac{2\pi \tilde{\tau}_{\text{DR}}^\delta \mu_{\text{DT}}}{N_C \alpha \sin(2\pi / \alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)$$
$$Q_2 = \frac{2\pi \mu_{\text{DT}} (\tilde{\tau}_{\text{BS}} \eta_P)^\delta}{N_C \alpha \sin(2\pi / \alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right), \quad Q_4 = \xi + \frac{2\pi \tilde{\tau}_{\text{DR}}^\delta \hat{\mu}_{\text{UT}}^{\text{SU}} \eta_P^{-\delta}}{\alpha \sin(2\pi / \alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)$$

定理3.3对应D2D用户不进行模式选择的情况!



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



➤ 专用模式（资源分配策略优化）：

✓ 定义比例公平效用函数，优化SCMA码本分配

$$N_{CC}^* = \arg \max_{N_{CC}} u_O \left( ST_C^{SO}, ST_D^{SO} \right), \quad (13)$$

比例公平效用函数： $u_O \left( ST_C^{SO}, ST_D^{SO} \right) = \log ST_C^{SO} + \log ST_D^{SO}.$

**定理3.4：**考虑蜂窝用户密度远大于基站密度，同时考虑D2D用户不采用蜂窝模式进行通信，最大化目标函数（13）的最优SCMA码本分配方案为：

$$N_{CC}^* = \text{round} \left( N_C + Q_6 - \sqrt{Q_6^2 + N_C Q_6} \right), \quad (14)$$

其中， $Q_6 = \frac{2\pi\tilde{\tau}_{DR}^\delta \mu_{DT}}{\xi\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \prod_{n=2}^{N_M} \left( \frac{2}{(n-1)\alpha} + 1 \right)$



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究



## ➤ 仿真结果

- ✓ 进一步地论证D2D技术在提升网络容量方面的有效性
- ✓ 验证D2D用户最优激活概率和最优码本分配分析的准确性

表 3.1 蜂窝和D2D融合网络默认仿真参数

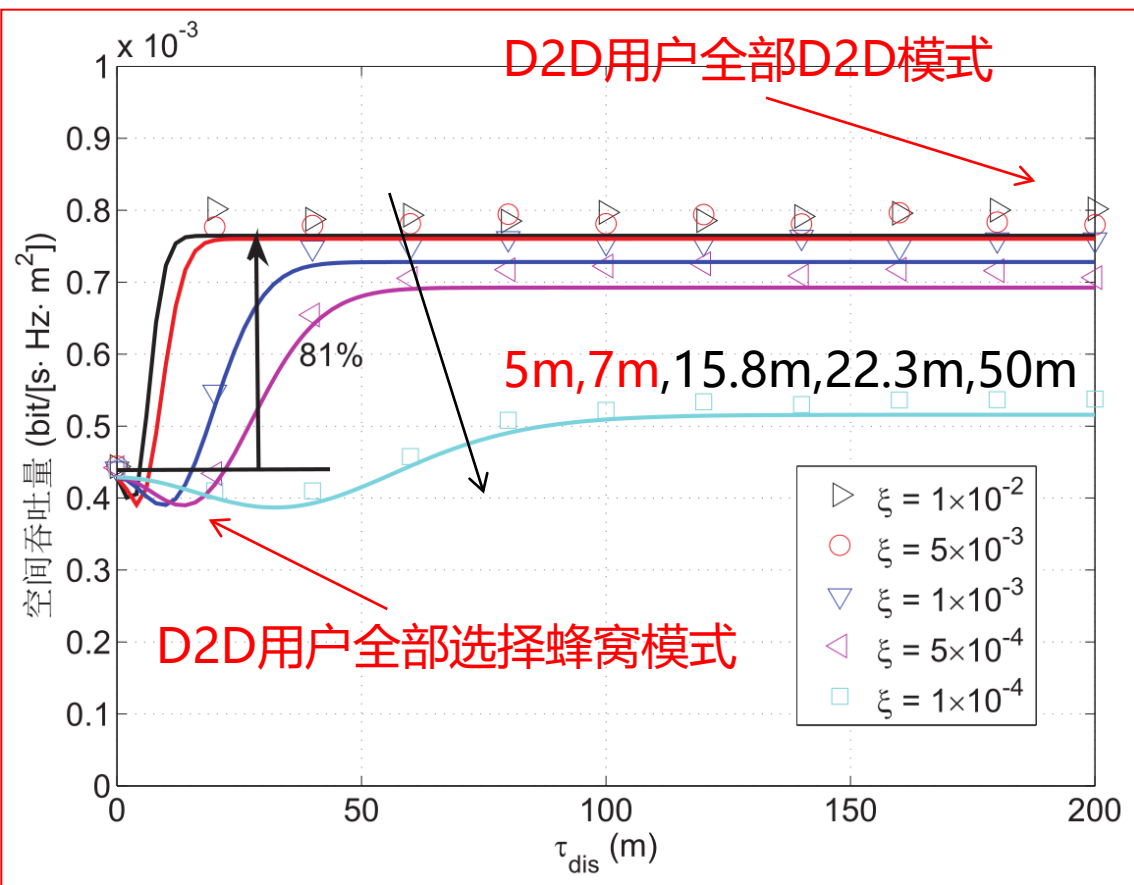
仿真场景边长 (m)	1000
仿真次数	$1 \times 10^6$
路径损耗因子	4
子信道数目	20
SCMA码本数目	30
上行用户传输功率 (dBm)	20
D2D用户传输功率 (dBm)	20

默认情况下，SCMA过载因子  
设置为1.5。



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究

## 仿真结果



在实际网络中，D2D链路长度通常是10m之内，否则D2D技术将不能够有效获得空间复用增益！

因此，在典型参数配置下，D2D技术能够将网络空间吞吐量有效提升近1倍！

图7 复用模式下融合网络空间吞吐量随D2D模式选择门限 $\tau_{\text{dis}}$ 变化情况示意图

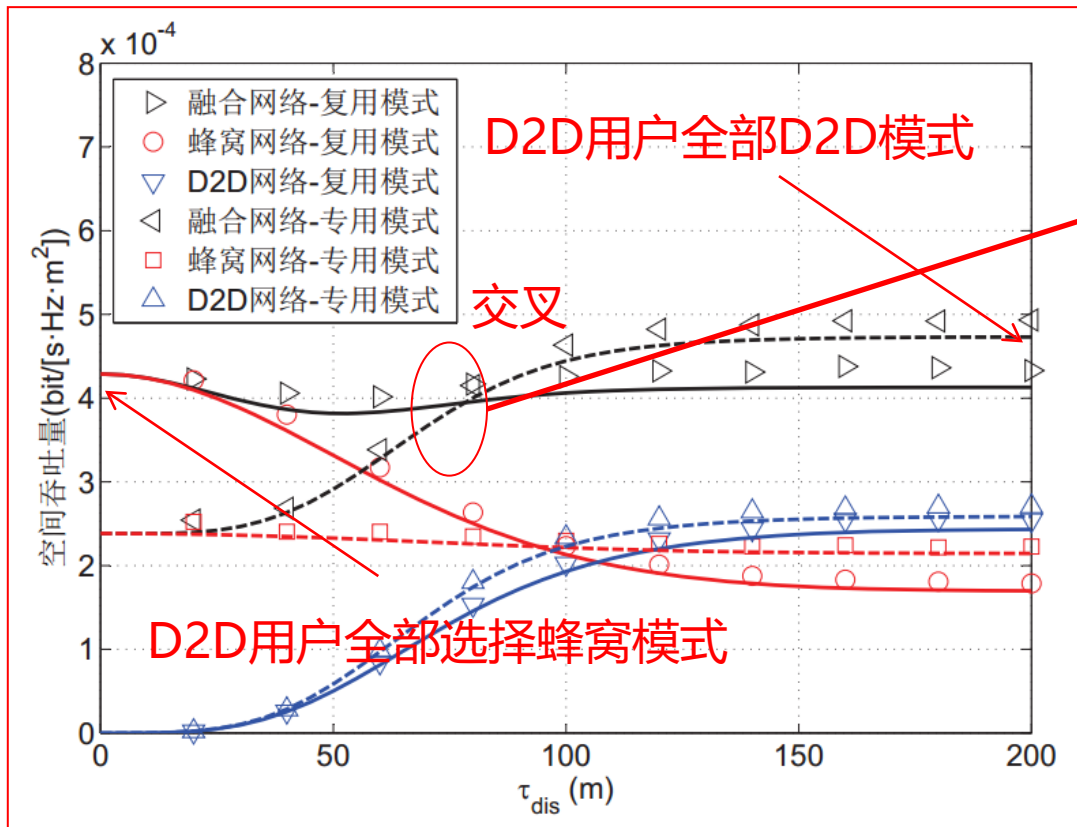




# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究

## 仿真结果

$$N_{CC} = 10 \quad N_{CD} = 20$$



通过合理配置D2D模式选择门限，复用模式下，能够调控跨层干扰，专用模式下，能够按需分配资源，从而使不同模式带来更大的网络容量增益！

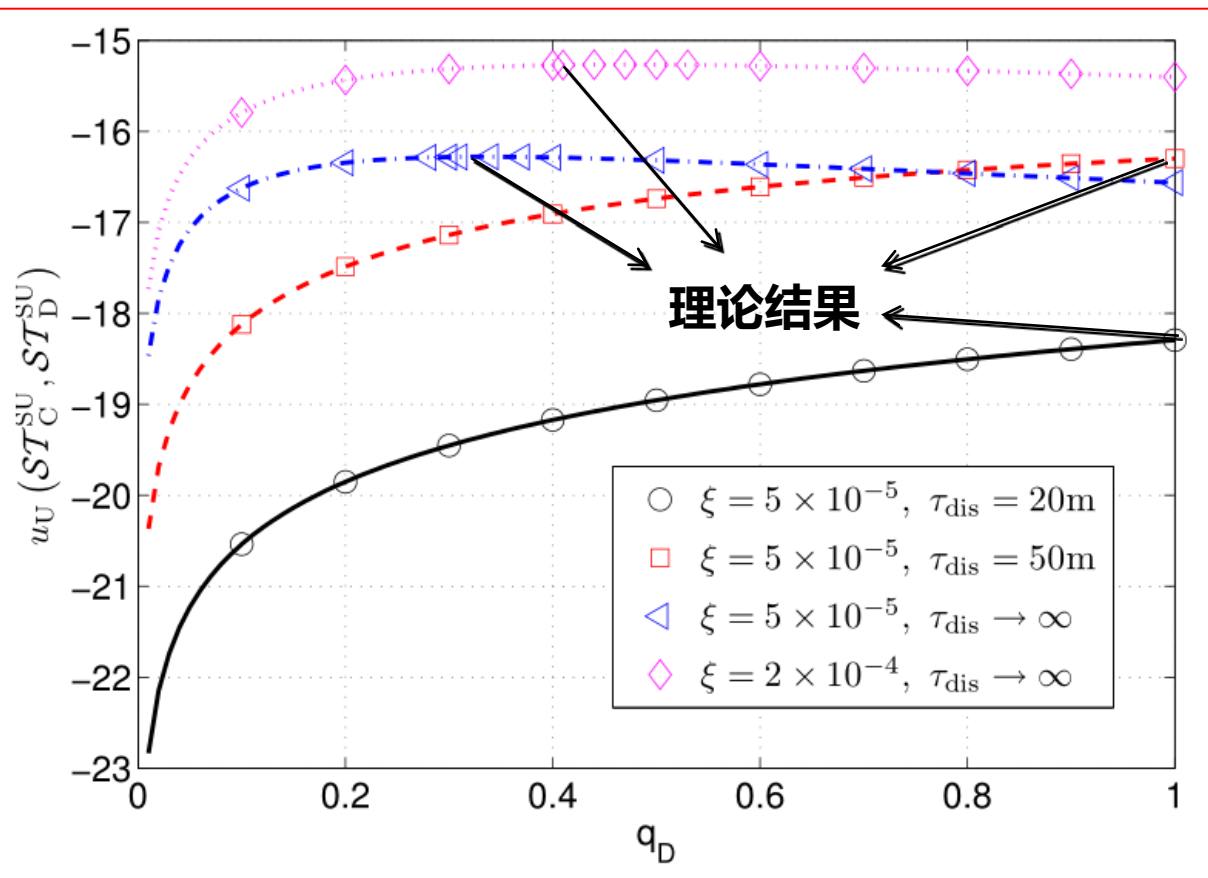
在不同参数配置下，可以根据上述结论，合理选择资源共享方式，提升多址资源利用率！

图8 专用模式和复用模式下空间吞吐量随D2D模式  
选择门限 $\tau_{dis}$ 变化情况示意



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究

## 仿真结果



由于空间吞吐量结果通过近似获得，最优激活概率的理论结果和实际结果存在一定偏差。

但是结果表明：近似结果偏差较小，精度较高！

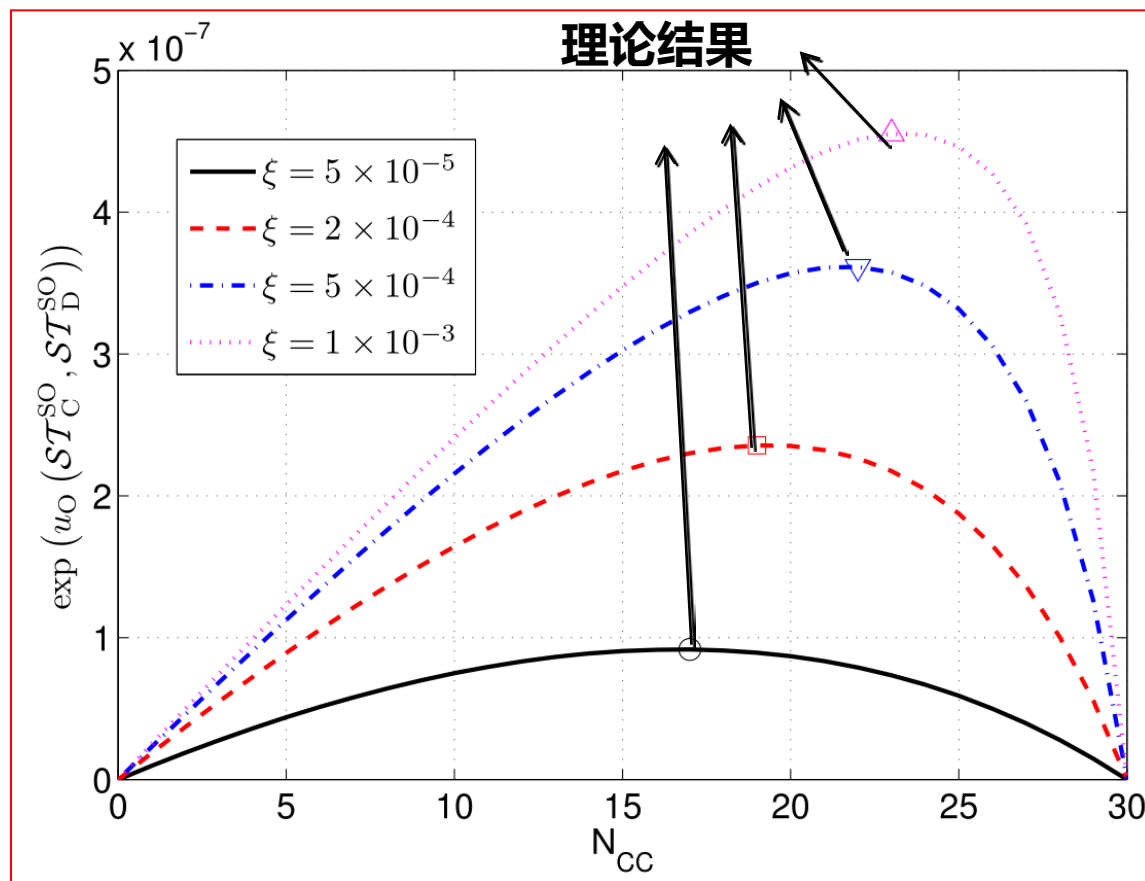
表明：所得结论能够为实际网络中复用模式下干扰避免策略的设计提供理论指导！

图9 复用模式下比例公平效用函数随D2D激活概率 $q_D$ 变化情况示意图



# 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的 网络容量研究

## 仿真结果



SCMA码本分配最优结果与  
实际值偏差较小!

表明：所得结论能够为实际  
网络中专用模式下资源分配  
方案的设计提供理论指导!

图10 专用模式下比例公平效用函数随 $N_{CC}$ 的变  
化情况示意图



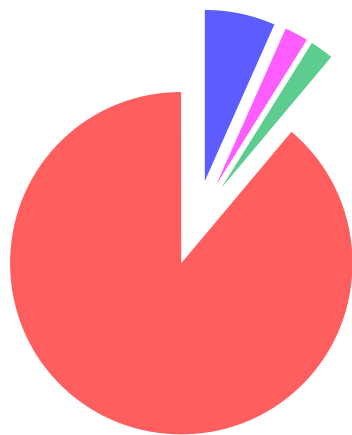
# 目录



- 研究背景和意义
- 基于SCMA的蜂窝网络容量研究
- 基于SCMA的蜂窝与D2D融合网络的网络容量研究
- 基于SCMA的超密集无线网络容量研究



# 基于SCMA的超密集无线网络容量研究



- 增加频谱资源 15倍
- 高效的接入及解调方式 5倍
- 先进的编码技术 5倍
- 网络密集化 2700倍

图11 1950年到2000年间不同技术对网络容量提升的情况

超密集无线网络是未来网络的典型场景

➤ 问题：

- ✓ 网络密集化导致的干扰是否会抑制网络容量的持续提升？
- ✓ 网络容量随网络密集化布设的变化趋势是怎样的？
- ✓ 网络密集化提升网络容量的极限在哪里？

➤ 挑战：

- ✓ 网络的密集化布设致使信号传播由远距离传播过渡到近距离传播，近距离传播特性导致传统基于远距离传播进行容量分析的方法不再适用！

举例：

➤ **AT&T上行频段**：704-716MHz，信号波长为0.419-0.426m，均值为0.423m，蜂窝用户设备天线通常为小尺寸天线，因此，**距用户发射天线2倍波长范围内区域**可视为近距离区域。

1. 当基站布设密度达 $1 \times 10^4 \text{ BS/km}^2$ 时，**2.2%**链路长度在近场传播范围内；
2. 当基站布设密度达 $1 \times 10^5 \text{ BS/km}^2$ 时，**20.1%**链路长度在近场传播范围内。

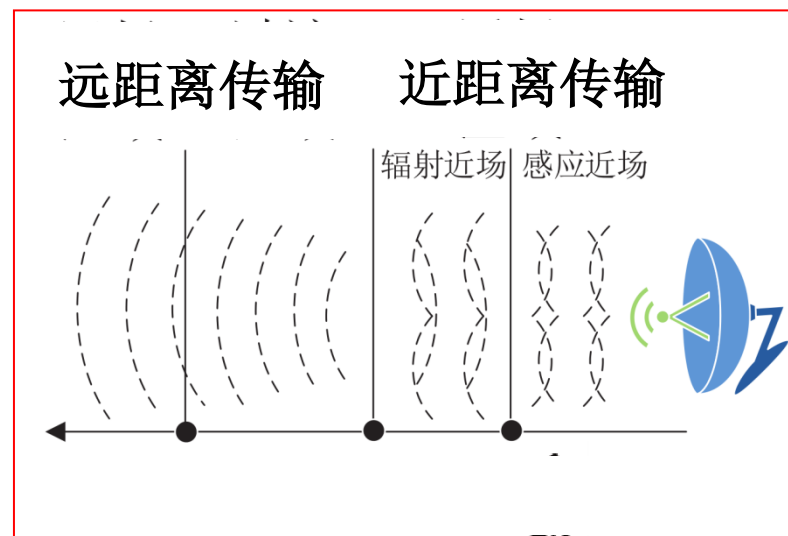
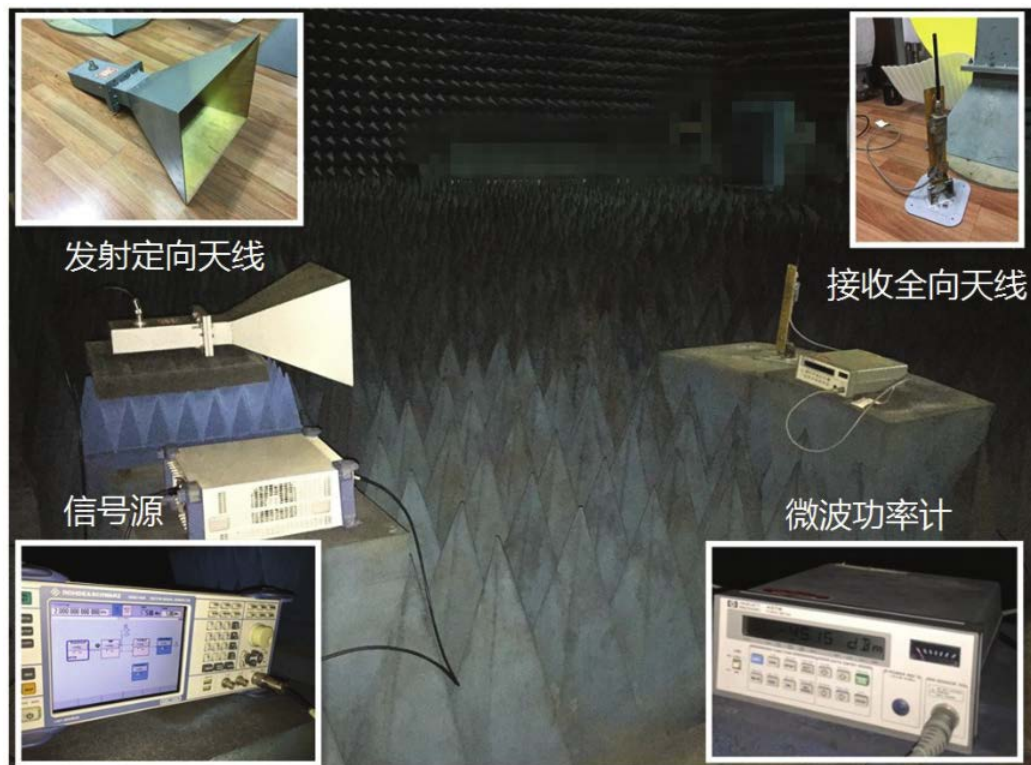


图12 天线电磁波传播远距离和近距离划分示意图

- 基站密度增加时，越来越多的蜂窝链路长度在近距离传播距离！
- 如何刻画信号近距离传播特性？

## ➤ 信号近距离传播特性测试



天线工作频率: 1.72-2.61 GHz

测试频率: 1.8, 2.0以及2.4 GHz

$R_F$ : 3, 3.33以及4 m

功率计: HP-437B

信号发生器: Rohde & Schwarz SMBV100A

图13 信号近距离传播测试场景示意图

在微波暗室环境下，测试（近距离）信号接收功率随传播距离的变化情况！





# 基于SCMA的超密集无线网络容量研究



## ➤ 信号近距离传播特性测试

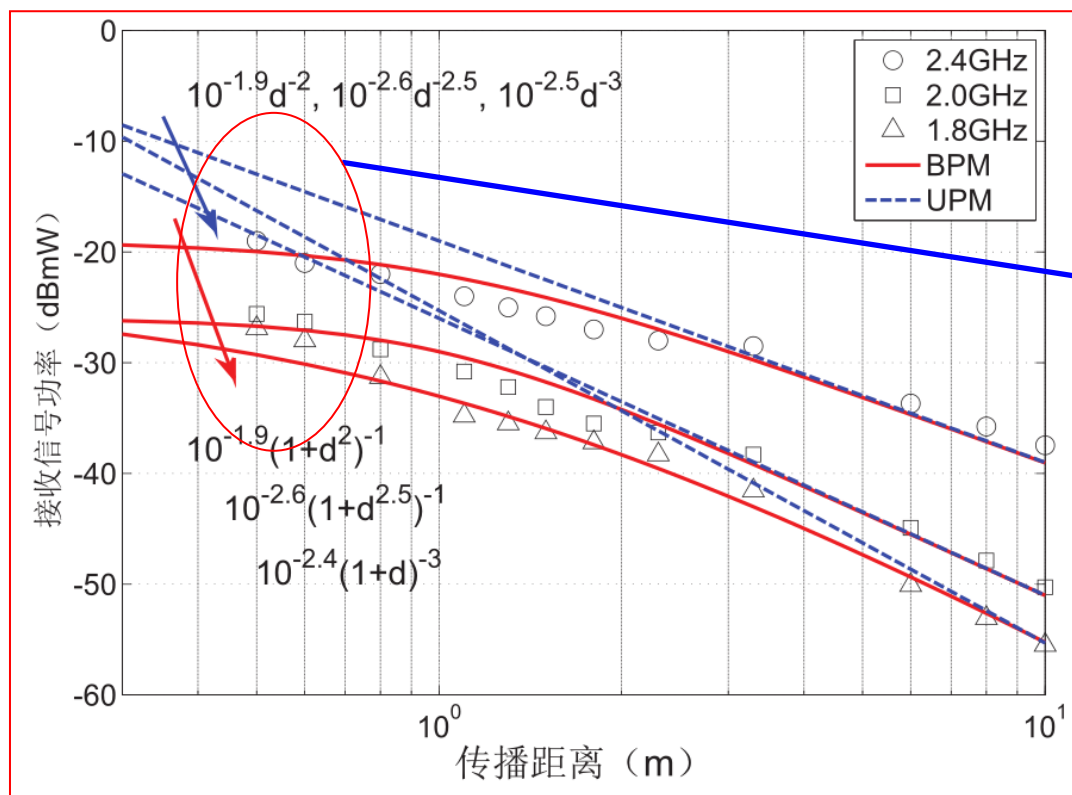


图14 信号近距离传播路径损耗的测试结果

测试结果表明，用于刻画信号远距离传播特性的**无界路径损耗模型 (UPM)** 在近距离环境下**不再适用!**

近距离环境下，**有界路径损耗模型 (BPM)** 能够准确刻画信号功率随传播距离的变化情况!

研究容量随密集程度的变化趋势时，应采用**有界路径损耗模型 (BPM)** !

## ➤ UPM与BPM对比

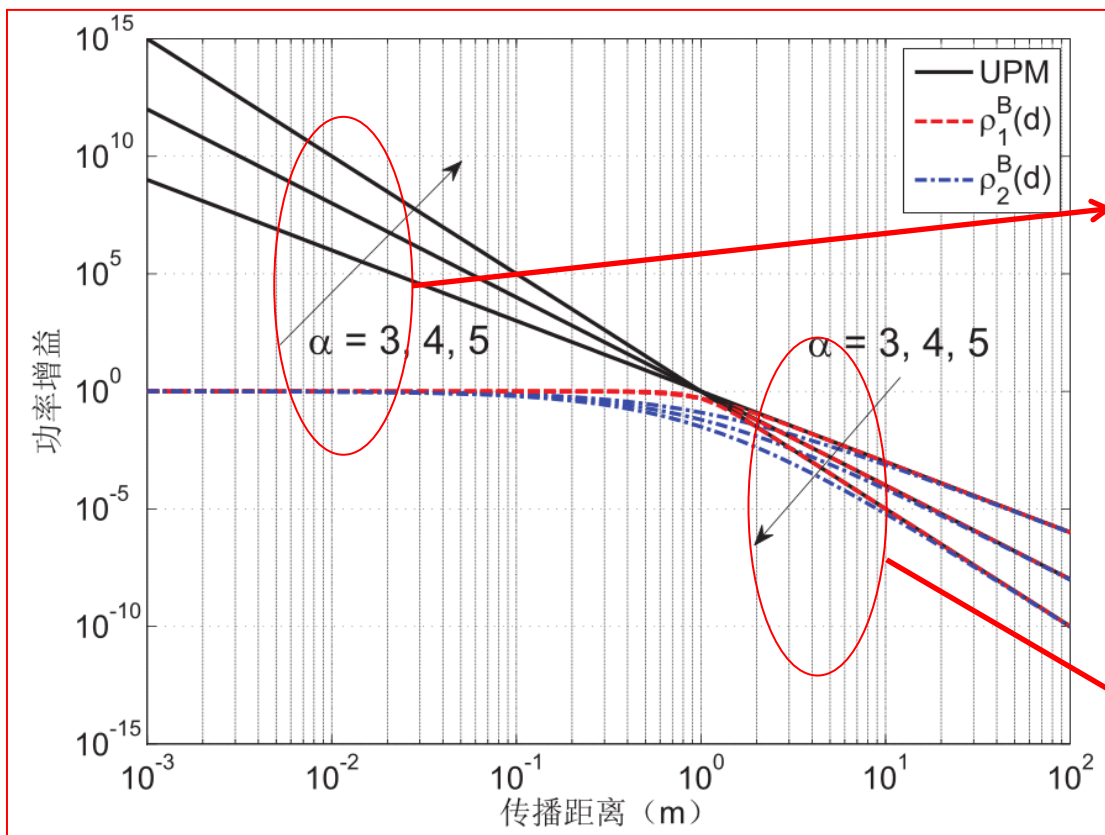


图15 路径损耗功率增益随传播距离变化示意图

在传播距离较小时，使用UPM对功率增益刻画不准确！

UPM:  $\rho^U(r) = r^{-\alpha}$

在  $r = 0 \text{ m}$  处，存在奇点；  
在  $r \in [0, 1] \text{ m}$ ，对信号有增强作用。

距离远时，UPM和BPM在刻画功率增益方面差别不大！

BPM

$$\rho^B(r) = (1 + r^\alpha)^{-1}$$

BPM既能刻画近距离传播特性也能刻画远距离传播特性！

## ➤ 上行蜂窝网络建模

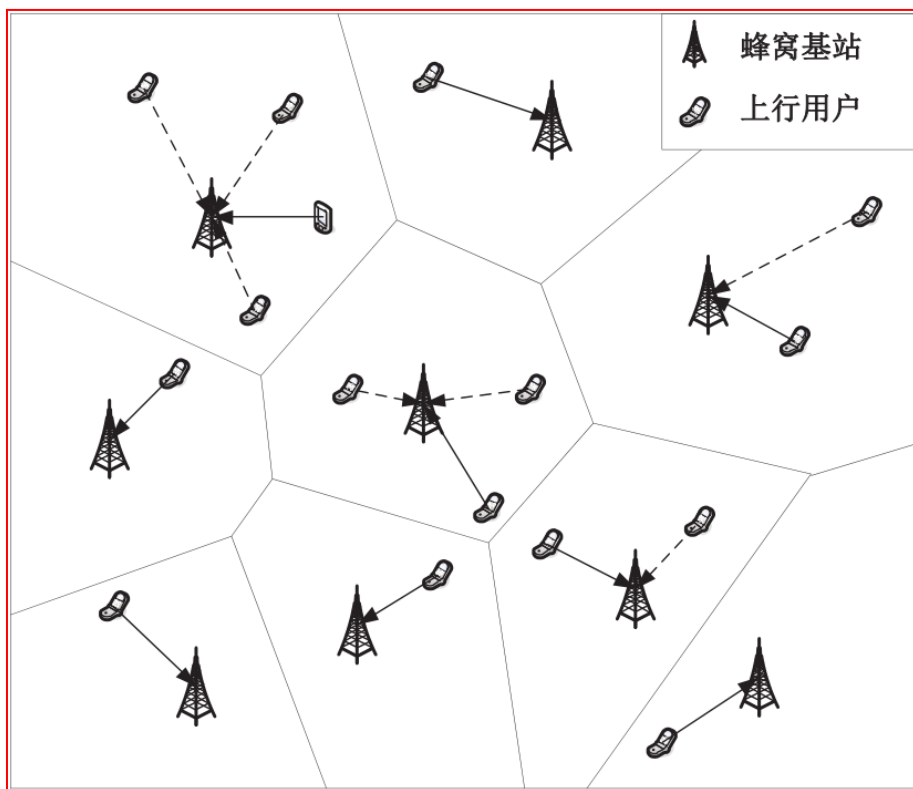


图16 上行蜂窝网络场景示意图

假设用户密度远大于基站密度

路径损耗模型:

典型的BPM:

$$\rho_1^B(r) = (1+r)^{-\alpha} \quad (15)$$

$$\rho_2^B(r) = (1+r^\alpha)^{-1} \quad (16)$$

UPM:

$$\rho^U(r) = r^{-\alpha} \quad (17)$$

用户采用最近关联策略与基站进行关联

BPM能够克服UPM在刻画信号近距离传播的不准确性!



➤ 使用BPM进行网络容量分析

**定理4.1:** 使用  $\rho_1^B(r) = (1+r)^{-\alpha}$  对路径损耗进行建模, 上行蜂窝网络的空间吞吐量上界为:

$$ST_{\rho_1^B}^U(\mu_{BS}) = \mu_{BS} SP_{SIR, \rho_1^B}^U(\mu_{BS}) \log_2(1 + \tau_{BS}), \quad (18)$$

其中,

$$SP_{SIR, \rho_1^B}^U(\mu_{BS}) = \frac{e^{-\pi\mu_{BS}\hat{c}}}{1+\hat{c}} - \frac{e^{-\frac{\pi\mu_{BS}\hat{c}}{1+\hat{c}}}}{(1+\hat{c})^{\frac{3}{2}}} \pi\sqrt{\mu_{BS}\hat{c}} \operatorname{Erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi\mu_{BS}\hat{c}}}{\sqrt{1+\hat{c}}}\right)$$

网络空间吞吐量的下界为:

$$ST_{\rho_1^B}^L(\mu_{BS}) = \mu_{BS} SP_{SIR, \rho_1^B}^L(\mu_{BS}) \log_2(1 + \tau_{BS}), \quad (19)$$

其中,

$$SP_{SIR, \rho_1^B}^L(\mu_{BS}) = \frac{e^{-\pi\mu_{BS}c_1}}{1+c_1} - \frac{e^{-\frac{\pi\mu_{BS}c_1}{1+c_1}}}{(1+c_1)^{\frac{3}{2}}} \pi\sqrt{\mu_{BS}c_1} \operatorname{Erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi\mu_{BS}c_1}}{\sqrt{1+c_1}}\right)$$



➤ 使用BPM进行网络容量分析

**定理4.2:** 使用  $\rho_2^B(r) = (1 + r^\alpha)^{-1}$  对路径损耗进行建模, 上行蜂窝网络的**空间吞吐量上界**为:

$$ST_{\rho_2^B}^U(\mu_{BS}) = \mu_{BS} SP_{SIR, \rho_2^B}^U(\mu_{BS}) \log_2(1 + \tau_{BS}), \quad (20)$$

其中,

$$SP_{SIR, \rho_2^B}^U(\mu_{BS}) = \frac{e^{-\pi \mu_{BS} 2^{-\alpha} \hat{c}}}{1 + 2^{-\alpha} \hat{c}}$$

**网络空间吞吐量的下界**为:

$$ST_{\rho_2^B}^L(\mu_{BS}) = \mu_{BS} SP_{SIR, \rho_2^B}^L(\mu_{BS}) \log_2(1 + \tau_{BS}), \quad (21)$$

其中,

$$SP_{SIR, \rho_2^B}^L(\mu_{BS}) = \frac{e^{-\pi \mu_{BS} (1 + 2^{\alpha} c_1)}}{1 + 2^{\alpha-2} c_1} - \frac{2^{\alpha-2} c_1 \pi \sqrt{\mu_{BS}} e^{-\frac{\pi \mu_{BS} c_1 2^{\alpha-2}}{1 + 2^{\alpha-2} c_1}} \operatorname{Erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi \mu_{BS}} (1 + 2^{\alpha-1} c_1)}{\sqrt{1 + 2^{\alpha-2} c_1}}\right)}{(1 + 2^{\alpha-2} c_1)^{\frac{3}{2}}}.$$

## ➤ 网络容量渐近趋势研究

**定理4.3:** 使用BPM对路径损耗进行建模，上行蜂窝网络的空间吞吐量ST随蜂窝基站密度 $\mu_{BS}$ 的变化趋势是： $ST \sim \mu_{BS} e^{-\kappa \mu_{BS}}$ ，其中 $\kappa$ 是系统参数（不包括基站密度）的函数，当系统参数固定时， $\kappa$ 为常量。

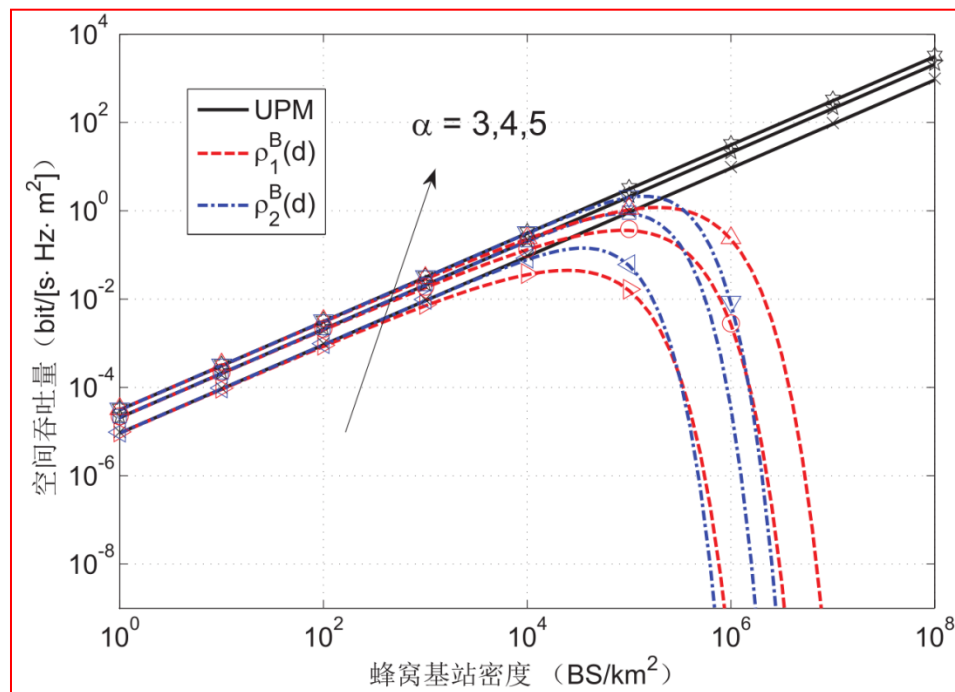


图17 上行蜂窝网络空间吞吐量随基站密度变化示意图

➤ 空间吞吐量随基站布设密集程度先增后减，然后趋近于0！

➤ 原因：考虑超密集环境下信号近距离传播特性时，干扰信号功率增加的程度远大于有用信号功率增加的程度！

➤ 表明：网络超密集布设对网络容量的增强作用存在瓶颈！

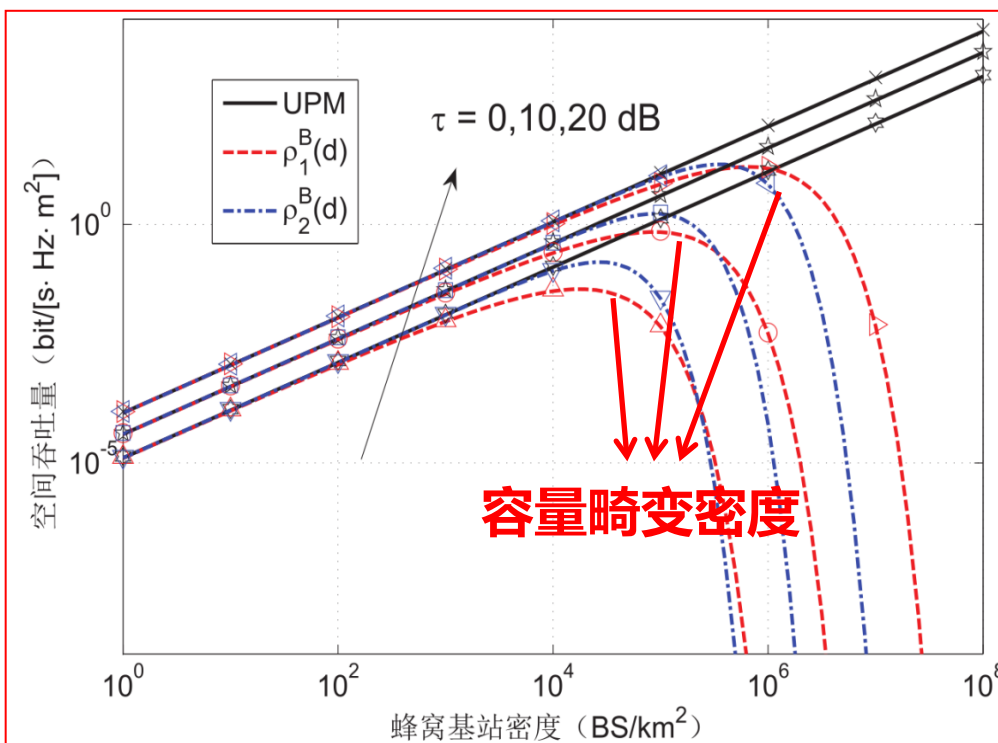


图18 上行蜂窝网络空间吞吐量随基站密度变化示意图

➤ 在LTE/LTE-A系统中，蜂窝基站的站间距离 (ISD) 典型值为200m，以此为比较基准：

- ✓  $\tau_{BS} = 20\text{dB}$  : ISD 进一步减小至 100m, 35m, 5m, 7.1m 时，网络空间吞吐量分别增加4倍，33倍，300倍以及405倍；
- ✓  $\tau_{BS} = 10\text{dB}$  : ISD 进一步减小至 100m, 35m, 5m, 4m 时，网络空间吞吐量分别增加4倍，32倍，1131倍以及1303倍。

虽然存在极限，但网络密集化能够带来巨大的容量增益！



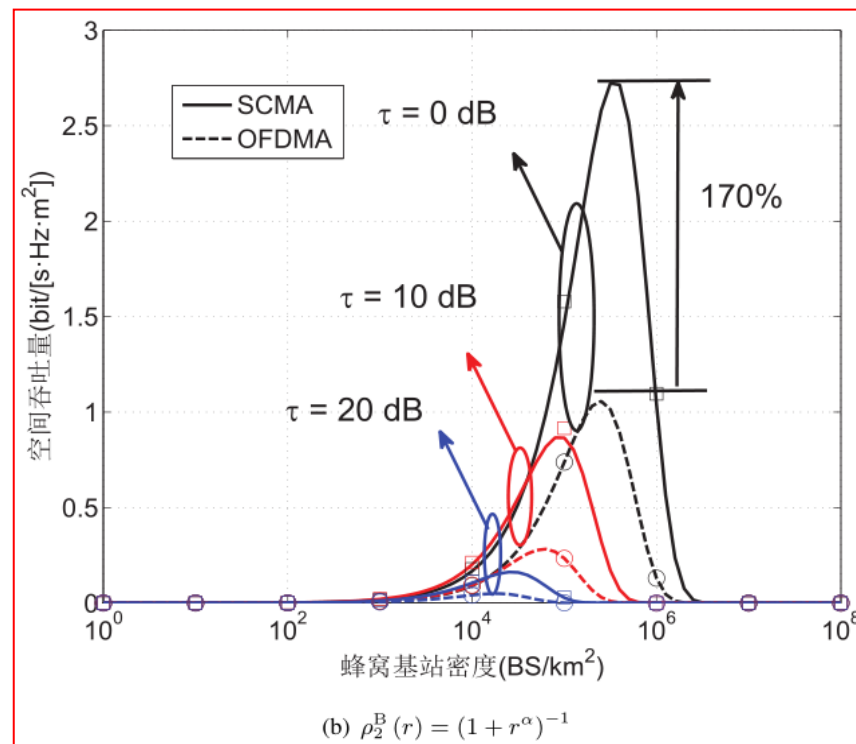
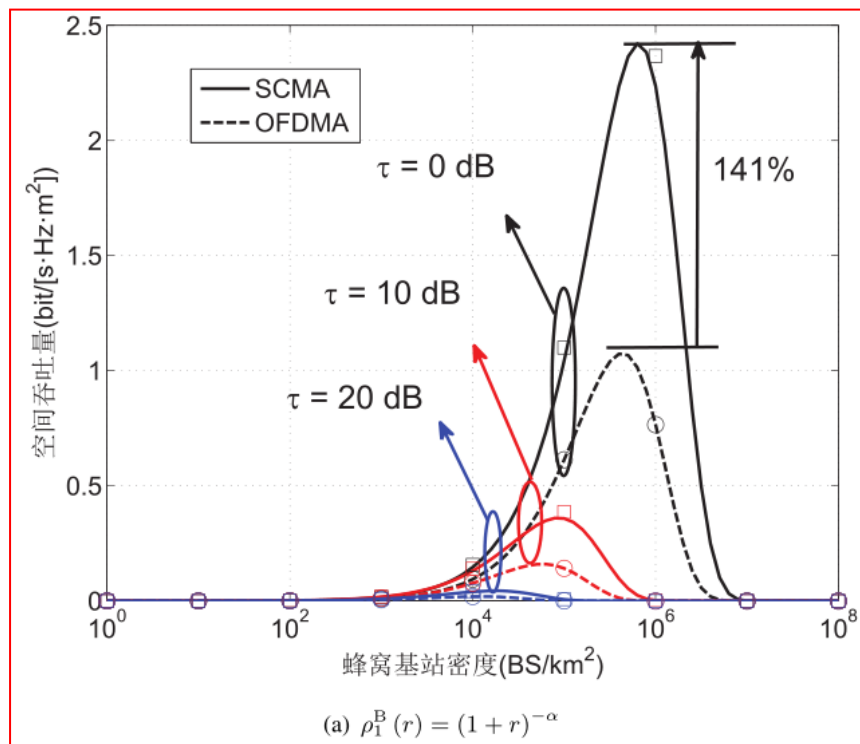


图19 OFDMA、SCMA两种多址接入技术下网络空间吞吐量随  
密集化程度渐近趋势

SCMA能够提供更大的容量畸变密度，因此更适用于密集场景！