

## 动态超密集网络中的 Markov 预测切换

孟庆民, 赵媛媛, 岳文静, 邹玉龙, 王小明

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 针对超密集蜂窝网络中大规模机器类通信所涉及的通信与计算问题, 提出了一种基于 Markov 预测的切换方案。首先考虑半结构化的中心控制的异构网络设计, 该设计中含有密集部署的虚拟节点, 以实现低成本和高效率的覆盖。该网络可以根据用户的移动性及网络通信量动态调整接入点。其次构建 Markov 模型, 引入负载感知思想, 通过权衡信号质量与小区负载, 有效地预测用户的下一个最优接入点。仿真实验结果证明了该方案用于小区切换预测的可行性与有效性。

**关键词:** 超密集蜂窝网络; 大规模机器类通信; Markov 模型; 负载感知; 切换

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2018225

## Markov prediction based handover in dynamic ultra dense network

MENG Qingmin, ZHAO Yuanyuan, YUE Wenjing, ZOU Yulong, WANG Xiaoming

College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** In order to solve the problem of the communication and computational problems of large-scale machine communication in an ultra-dense cellular network, a Markov prediction based handover scheme (MPHS) was proposed. Firstly, a kind of heterogeneous network design with semi-structure and central control was considered which contains the densely deployed virtual nodes and thus realized a low cost and efficient coverage. The network can dynamically adjust the access point according to the user's mobility and network traffic. Secondly, a Markov model was constructed, and the idea of load-aware was introduced. By weighing the signal quality and the cell load, the user's next optimal access point was effectively predicted. The simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed scheme for cell handover predicting.

**Key words:** ultra-dense cellular network, large-scale machine communication, Markov model, load-aware, handover

### 1 引言

为满足更高容量与更好覆盖、极高通信可靠性与极低时延以及大规模机器类通信等技术需求, 异构网络 (HetNet, heterogeneous network)、超密集网络和软件定义网络 (SDN, software defined network) 等新型架构正在成为新一代无线网络的候选

架构<sup>[1-3]</sup>。本文探讨一种中心式控制的 HetNet, 它包含一个具有高传输容量的宏基站 (MBS, macro base station) 以及在其覆盖范围内密集部署的低覆盖范围的微基站 (PBS, pico base station)。研究的网络架构具有双重特点, 一方面该 HetNet 可以为用户提供更大的带宽和更高的数据速率; 另一方面大量的接入点将带来频繁切换等移动管理挑战。

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61522109, No.61501253, No.61801240); 江苏省自然科学基金资助项目 (No.15KJA510003, No.BK20151506)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61522109, No.61501253, No.61801240), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.15KJA510003, No.BK20151506)

目前,国内外已经有很多研究学者对 HetNet 和超密集网络进行了深入的研究,以解决其中的移动管理和资源分配等问题。文献[4]提出了一种异构云接入网络(H-CRAN, heterogeneous cloud radio access network),其核心是将云无线接入网(C-RAN, cloud radio access network)与密集异构无线网络相结合。H-CRAN 可以充分发挥 HetNet 与中心控制式的 C-RAN 的优势,基于云计算的处理也可以解决 HetNet 中存在的问题。其中,远端射频单元(RRH, remote radio head)可以根据业务量的多少在集中式基带处理单元(BBU, base band unit)的允许下进入激活状态或休眠状态。文献[5]提出了一种基于模糊逻辑和层次分析法的垂直切换决策算法。首先将用户之前的移动数据作为模糊逻辑系统的输入,以决定是否触发切换;确定切换后采用层次分析法与简单加权求和相结合的方法建立虚拟终端。该算法在降低切换次数的同时满足了应用需求和用户偏好。文献[6]研究了过时的信道状态信息(CSI, channel state information)对切换决策的影响。在密集网络中,切换决策对用户速度和 CSI 不完备性非常敏感。因此在密集网络中,需要更精确的 CSI 来实现切换决策。文献[7]提出了预测切换后的信号与干扰加噪声比(SINR, signal to interference plus noise ratio)和信道质量指示符(CQI, channel quality indicator)算法。它通过准确的 CQI 预测,导出切换后用户所需的资源块数量,避免在切换过程中目标小区由于缺乏资源而导致用户掉线。文献[8]提出了一种速度感知的二级下行蜂窝网络管理方案,在切换过程中通过跳过一些沿用户轨迹的基站,以保持更长的持续时间和更低的切换率。文献[9]提出了一种基于环境感知和体验质量(QoE, quality of experience)的垂直切换算法,通过定义决策函数来避免不必要的切换。文献[10]提出了一种基于路径距离预测的切换方案,其原理是:当目标小区的参考信号接收功率(RSRP, reference signal received power)高于服务小区时,预测小区覆盖范围内的路径距离,如果该距离大于目标小区半径的 $\frac{2}{3}$ ,则执行切换。文献[11]提出了切换管理概念以及环境感知的切换策略。切换决策过程的目标是:根据用户需求、网络资源和终端容量,寻找恰当的时间来执行切换和筛选最佳的接入网络。文献[12]根据贝特朗奇论(Bertrand's para-

dox)提出了适用于用户移动轨迹的模型,分析了用户在时间序列上的位置和 RSRP。定义当用户高速移动时始终选择 MBS,以解决 HetNet 中高速运动的用户不必要的切换问题。

密集异构网络切换方案通常涉及多种网络参数,如接收信号强度、移动设备速度、带宽、能效、信号与干扰加噪声比、路径损耗等<sup>[13-14]</sup>。文献[15]提出一种考虑用户上行能量消耗的切换方法,用户设备与可以提供最高 RSRP 的基站(BS, base station)相关联。文献[16]研究了一种按照速度值来设定双门限的切换设计。有不少工作研究考虑网络负载度的切换设计,即把带宽看作切换前的一种判别依据,以提高切换成功率。文献[17]提出了一种综合方案,即兼顾网络负载、接收信号强度、业务类型和移动设备速度等来完成切换判决。通过考虑相邻小区间负载不均衡,文献[18]提出了一种基于自适应小区选择的优先级信道预留切换算法,利用 Markov 排队模型完成预留信道的优先级切换。文献[19]研究了以节能为中心的垂直切换方案算法,它也集成内容感知功能。此外,相关的工作研究了基于信号与干扰加噪声比切换方案,即兼顾 RSRP 和 SINR 的最优小区切换<sup>[20]</sup>。

如上所述,尽管很多文献讨论了多种切换技术,但由于密集部署微基站的 HetNet 是一种新型的蜂窝网络,其切换方案尚有待于进一步的研究。因为 HetNet 小区特征的多样性, HetNet 的切换设置不应该照搬传统切换方案中的设置参数,如触发时间(TTT, time to trigger)和切换滞后差值。当采用较大的 TTT 值和切换滞后差值,穿过一个微小小区的用户在 TTT 期间内可能经历严重的 RSRP 恶化。另一方面,较小的 TTT 值和切换滞后差值可能导致切换乒乓效应,因信令开销和切换时间而产生性能损失。降低切换失败率和遏制乒乓效应显然是两个相互冲突的目标,切换策略需要在这两个方面进行权衡。

针对一种含有多个虚拟节点的中心式的 HetNet,本文提出一种基于 Markov 预测的联合切换设计。通过 Markov 方案预测新的目标接入小区,其中,用户在小区间的转移概率取决于 SINR 以及切换阈值。该设计一方面可以动态激活相应的虚拟节点,平衡网络负载,提高能量效率;另一方面用户可以提前向预测小区发送认证,请求并进行数据转发准备,以降低不必要的资源浪费。

其中，虚拟节点的状态为休眠状态与激活状态。移动用户的越区切换可以采用中心式的控制，即该网络是一种部分集成 SDN 中心控制器实体的接入网<sup>[3]</sup>。

## 2 系统模型

### 2.1 系统模型和半结构化的异构网络

所考虑的系统模型是一种联合的通信与计算模型。下行接入采用类似 LTE 下行的 OFDMA 传输方案，通信模型为下行可达速率，主要指标为传输速率、切换触发时间等。这里的蜂窝网络具体为一种含有若干虚拟节点、半结构化的异构网络，因此它便于实现一种低成本和高效率的覆盖。所部署的虚拟节点采用一种半结构化的拓扑，即采用环状分布，环的半径和虚拟节点的数量将根据小区的负载状况、用户位置动态定义<sup>[21]</sup>。此外，小区内的虚拟节点一般处于休眠状态。图 1 中的计算模型基于 Markov 模型。对于所研究的异构超密集网络，本文将依据 Markov 预测结果，根据 SDN 的中心控制思想来动态地选择、激活相应的虚拟节点，这不仅可以减少干扰和功率消耗，也可以提高切换方案的效率。

所研究的场景包含  $N_M=1$  个 MBS，并在其覆盖域内分布着  $N=12$  个虚拟节点，这里虚拟节点是一种低功耗和低复杂度的虚拟基站 (VBS, virtual base station)，使用相同频带的虚拟节点需要中心式的网络控制和网络计算。将一簇用户或机器类通信设备的移动过程建模为一个拥有  $N+2$  种状态的集合，即  $state \in \{MS, VS, H\}$ ，其中， $VS = \{VS_1, VS_2, \dots, VS_N\}$ 。按符号出现的次序，MS 表示用户与 MBS 连接的状态，VS 表示用户与 VBS 连接的状态，H 表示用户正处于从源小区向目标小区切换的状态。

图 1 为半结构化的异构网络网络拓扑，它还展示一个大规模机器类通信用户簇，簇中用户均匀分布在簇中心周围。所有用户采用相同的移动模型，即按照特定的角度  $\omega$  和速度  $v$  运动，其中， $\omega \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 。本文设想一种 5G 物联网场景，即大量机器人按照特定模型进行移动。超密集异构网络不仅可以利用网络边缘感知来进行位置信息和信道质量信息的采集与处理，还可以获取各小区的传输负载信息，以实现高效的移动管理和资源

分配。对图 1 所示的架构，宏蜂窝小区的半径为  $R$ ，虚拟节点所在圆环的半径为  $\frac{R}{\sqrt{3}}$ 。用户移动方向如箭头所示，初始时刻，簇用户位于小区左下边缘处；运动截止时刻，簇用户运动到小区右上边缘处。

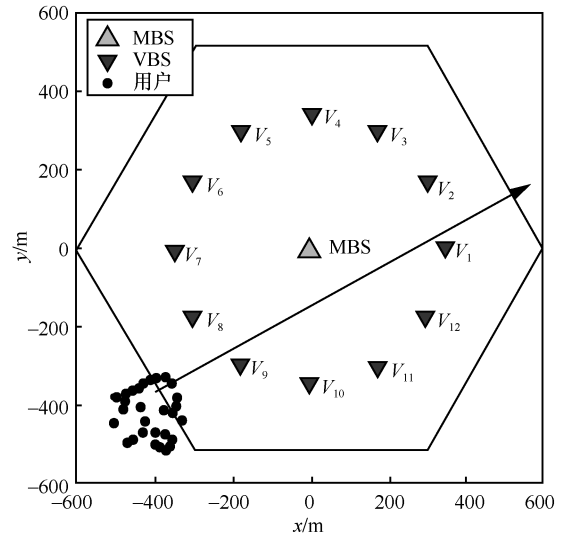


图 1 半结构化的异构网络网络拓扑

### 2.2 切换管理策略

根据 3GPP 标准<sup>[22]</sup>，传统的切换过程主要分为如图 2 所示的 3 个状态。

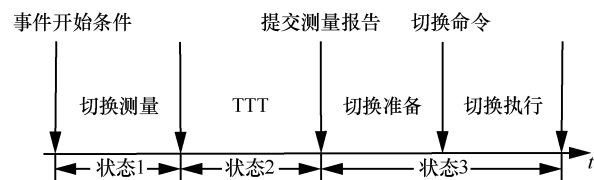


图 2 传统切换过程

首先用户监测所有被测小区经过滤波器后的 RSRP，并给服务小区发送测量报告。当式(1)中的条件在给定的 TTT 内持续被满足时，将对用户进行切换。

$$R_T > R_S + Q_{hyst} \quad (1)$$

其中， $R_T$  是目标小区的 RSRP， $R_S$  是当前服务小区的 RSRP。 $Q_{hyst}$  是切换滞后差值，其大小决定了切换延时长短。根据用户的速度来设定 TTT 参数，可有效防止切换乒乓效应。

传统的切换过程是根据 RSRP 进行的。但由于用户通信量的急剧增加、小区的超密集部署、网络场景的复杂化，传统的切换策略已经不能满足当前

需求。因此，为提高密集网络中大规模机器类通信的切换性能，本文把切换与移动路径预测技术相结合，预测用户将要移动到的下一个目标小区。

### 3 基于预测的切换设计

#### 3.1 Markov 预测设计

离散时间 Markov 链是一种计算模型，它通常可以用于各种性能分析和网络决策。本文试图把 Markov 预测集成到一种联合的切换设计中。通过计算该 Markov 链的转移概率矩阵，来辅助决策最佳可用网络和预测真实系统中的用户未来接入点，在大量用户接入多微基站的场景下，有助于降低切换时延和减少对信道资源与缓存的占用等。本文所提策略的目的是实现高效率的密集网络移动性管理，避免不必要的切换。这里使用非齐次的离散时间 Markov 链来预测移动用户路径。假定移动用户的位置  $X$  是一个随机变量，随机变量序列  $X_k(1 \leq k \leq N_k)$ ，构成一个 Markov 过程，并且满足

$$p\{X_{k+1} = b_{k+1} | X_k = b_k, X_{k-1} = b_{k-1}, \dots, X_1 = b_1\} = p\{X_{k+1} = b_{k+1} | X_k = b_k\} \quad (2)$$

其中， $b_k$  代表用户当前选择的连接小区， $b_1 b_2 \dots b_k$  代表了用户所经历的基站连接序列， $N_k$  代表沿用户轨迹总的采样次数，即用户下一个可能选择的目标小区由当前的服务小区决定。

定义采样时刻有小区间的  $(N+1) \times (N+1)$  维转移概率矩阵  $\mathbf{M}(k)$ ，其行元素代表用户当前服务小区，列元素代表用户的目标小区。矩阵元素代表用户在与服务小区连接状态下，切换到目标小区的概率。基于 Markov 预测的设计就是在  $\mathbf{M}(k)$  中找到当前服务小区的对应行，其中概率值最大的对应列即为预测结果  $X_p$ ，即

$$X_p = \arg \max_n \mathbf{M}_{X_k, n}(k) \quad (3)$$

其中， $n$  代表第  $n$  个基站的序号， $1 \leq n \leq N+1$ ， $n=N+1$  为 MBS，其余为 VBS。取相干时间  $T_c$  为采样间隔，即

$$T_c = \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} = \frac{c}{v f_c} \sqrt{\frac{9}{16\pi}} \quad (4)$$

其中， $c$ 、 $v$ 、 $f_c$ 、 $f_m$  分别为光速(m/s)、用户移动速度(m/s)、载频(GHz)、多普勒频移 ( $f_m = \frac{v}{\lambda}$ ， $\lambda$  为

波长)。

这里定义用户簇中用户数为  $U$ ， $u$  代表簇中第  $u$  个用户， $1 \leq u \leq U$ 。取  $t = kT_c$ ，则  $t$  时刻用户  $u$  到基站  $n$  的欧氏距离为

$$dis_{u,n}(t) = \sqrt{(x_u(t) - xBS_n)^2 + (y_u(t) - yBS_n)^2} \quad (5)$$

其中， $(x_u(t), y_u(t))$  与  $(xBS_n, yBS_n)$  分别为  $t$  时刻用户所在坐标和基站坐标。在实际移动通信网络中，利用 SDN 的全局化视图，可以实时获得网络和终端信息。用户位置也可根据当前设备的 GPS 标准系统获得。本文考虑的信道模型含有路径损耗、阴影以及衰落。这里不考虑处于激活状态的虚拟节点之间的相互干扰。在时刻  $t$  测量基站  $n$  的 RSRP<sup>[23]</sup> 为

$$R_{u,n}(t) = X_{u,n}(t) \beta_{u,n}(t) \quad (6)$$

其中， $X_{u,n}(t) = P_n^\alpha g_{u,n}(t)$ ， $P_n^\alpha$  是基站的发射功率， $g_{u,n}(t)$  与  $\beta_{u,n}(t)$  分别为  $t$  时刻的路径增益和快衰落信道增益。假设该衰落服从瑞利分布，则定义  $\beta_{u,n}(t)$  是均值为 1 的指数型随机变量。定义  $d_0$  与  $\mu_n$  分别为参考距离 ( $d_0 = 1$  m) 与路径损耗因子，则通用的路径损耗模型<sup>[24]</sup> 表示为

$$loss_{u,n}(t) = 20 \lg \left( \frac{4\pi d_0 f_c}{c} \right) + 10 \mu_n \lg \left( \frac{dis_{u,n}(t)}{d_0} \right) \quad (7)$$

定义  $gain_{SF}$  为阴影，则路径增益为

$$g_{u,n}(t) = gain_{SF} - loss_{u,n}(t) \quad (8)$$

由于虚拟节点初始为休眠状态，需要根据 Markov 预测方案来激活。为了简化分析，图 3 仅给出 3 个基站的 Markov 切换场景，即采用状态  $B \in \{MS, VS_1, VS_2\}$  的 Markov 状态图。定义当前服务小区为  $b_S$  且  $b_S \in \{M, V\}$ ，目标小区为  $b_T$  且  $b_T \in \{M, V\}$ ，其中， $M$  代表 MBS， $V = \{V_1, V_2\}$  代表 VBS 集合。这里， $V_m$  表示第  $m$  个 VBS。状态  $H[i](1 \leq i \leq N_h)$  代表用户切换过程中的第  $i$  次采样，

这里  $N_h$  由切换时间  $T_h$  决定，有  $N_h = \left\lceil \frac{T_h}{T_c} \right\rceil$ ，本文中

$T_h$  代表 TTT 的具体取值。 $B[j]$  代表用户处于状态  $B$  的第  $j$  次采样，其中  $0 \leq j \leq N_S$ 。用户从基站  $M$  向基站  $V_1$  的切换过程为  $H_{M,V_1}$ ，从状态  $MS$  到状态  $H_{M,V_1}$  的转移概率为  $p_{M,V_1}(k)$ ，从状态  $H_{M,V_1}$  向状态  $VS_1$  的转移概率为 1。因此用户从  $b_S$  到  $b_T$  的转移概率为  $p_{S,T}(k) \cdot 1^{N_h} = p_{S,T}(k)$ 。

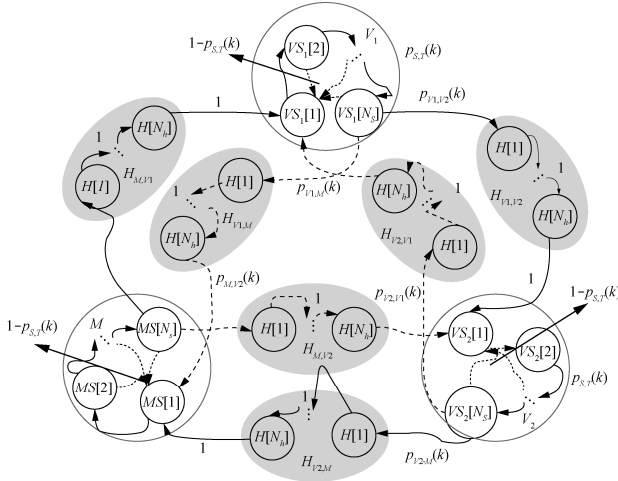


图 3 密集网络含 3 个基站时的 Markov 状态链

这里将根据切换阈值  $Q_{\text{hyst}}^S$  和 SINR 计算转移概率，做出切换决策。根据文献[25]可知，当用户向  $b_T$  移动，并处于  $b_S$  和  $b_T$  之间的某个位置时，若  $b_S$  和  $b_T$  的 RSRP 之差低于  $Q_{\text{hyst}}^S$ ，则 TTT 开始计时。如在整个 TTT 时期内这一条件被持续满足，则将对用户执行切换到  $b_T$  的切换过程。为简化模型，这里假定  $b_T$  是  $b_S$  的邻近小区。并且，对于下行用户， $b_S$  和  $b_T$  两个基站选择同频信道，则定义

$$\text{SINR}_{S,T}(t) = \frac{R_{u,S}(t)}{R_{u,T}(t)} = \bar{X}_{S,T}(t)\xi_{S,T}(t) \quad (9)$$

其中，

$$\bar{X}_{S,T}(t) = \frac{X_{u,S}(t)}{X_{u,T}(t)} = \frac{P_S^\alpha g_{u,S}(t)}{P_T^\alpha g_{u,T}(t)} \quad (10)$$

且随机变量  $\xi_{S,T}(t)$  是两个独立同分布指数随机变量的比值，即

$$\xi_{S,T}(t) = \frac{\beta_{u,S}(t)}{\beta_{u,T}(t)} \quad (11)$$

可推出式(11)中  $\xi$  的分布函数 (CDF, cumulative distribution function)，具体推导过程见附录 1。

$$P[\xi \leq x] = \frac{x}{x+1}, x \in [0, +\infty] \quad (12)$$

则从服务小区  $b_S$  到目标小区  $b_T$  的转移概率为

$$\begin{aligned} p_{S,T}(k) &= p\left[\text{SINR}_{S,T}(t) < Q_{\text{hyst}}^S\right] = p\left[\xi_{S,T}(t) < \frac{Q_{\text{hyst}}^S}{\bar{X}_{S,T}(t)}\right] \\ &= \frac{Q_{\text{hyst}}^S P_T^\alpha g_{u,T}(t)}{Q_{\text{hyst}}^S P_T^\alpha g_{u,T}(t) + P_S^\alpha g_{u,S}(t)} \quad (13) \end{aligned}$$

在系统应用时，根据式(13)即可得状态转移概率这一先验条件。将式(13)代入式(3)中，就可得到沿用户轨迹的基于 Markov 模型的预测目标小区，

即

$$b_T = \arg \max_n \{p_{S,T}(k)\} \quad (14)$$

### 3.2 负载感知下的方案优化

为了使用户选择最佳小区，本文将进一步优化方案，即权衡考虑信号质量和各个小区的传输负载。假定每个虚拟节点处采用一个正交化的资源块，考虑非理想编码和调制方案。定义  $B_a$  为子信道的有效带宽，可得用户从  $b_S$  向  $b_T$  移动时基站的可达速率为

$$C_{u,S}(t) = B_a \text{lb}(1 + \text{SINR}_{S,T}(t)) \quad (15)$$

假定网络控制器实体已获取用户周围每个小区的可用资源率  $\rho_n \in [0, 1]$ ，则基于负载感知条件下  $b_S$  的可达速率为

$$\tilde{C}_{u,S}(t) = \rho_n C_{u,S}(t) = \rho_n B_a \text{lb}(1 + \text{SINR}_{S,T}(t)) \quad (16)$$

当  $\text{SINR}_{S,T}(t)$  低于阈值  $Q_{\text{hyst}}^S$  时，用户从  $b_S$  向  $b_T$  的切换被触发。定义在触发点  $t^*$  以及在负载感知条件下的触发点  $\tilde{t}^*$ ，分别有

$$\begin{aligned} \bar{X}_{S,T}(t^*) &= Q_{\text{hyst}}^S \\ \bar{X}_{S,T}(\tilde{t}^*) &= \tilde{Q}_{\text{hyst}}^S \quad (17) \end{aligned}$$

其中， $\tilde{Q}_{\text{hyst}}^S$  为负载感知下的切换阈值。由于  $C_{u,S}(t)$  和  $\tilde{C}_{u,S}(t)$  都是关于随机变量  $\xi_{S,T}(t)$  的函数，若考虑对其取期望的形式，则根据参考文献[23]推出在  $t^*$  时刻速率比为  $\frac{C_{u,S}(t^*)}{C_{u,T}(t^*)} = Q_{\text{hyst}}^S$ 。

同理，在负载感知条件下的阈值转换点  $\tilde{t}^*$  时刻的速率比为  $Q_{\text{hyst}}^S$ 。令  $\tilde{t}^*$  时刻，则  $b_S$  和  $b_T$  的速率期望之比仍为  $Q_{\text{hyst}}^S$ ，即

$$\frac{\tilde{C}_{u,S}(\tilde{t}^*)}{\tilde{C}_{u,T}(\tilde{t}^*)} = \frac{\rho_S C_{u,S}(\tilde{t}^*)}{\rho_T C_{u,T}(\tilde{t}^*)} = \frac{\rho_S}{\rho_T} \tilde{Q}_{\text{hyst}}^S = Q_{\text{hyst}}^S \quad (18)$$

由此可得  $Q_{\text{hyst}}^S$  与  $\tilde{Q}_{\text{hyst}}^S$  的关系为

$$\tilde{Q}_{\text{hyst}}^S = \frac{\rho_T}{\rho_S} Q_{\text{hyst}}^S \quad (19)$$

将式(19)代入式(13)可得到负载感知下小区间的转移概率为

$$\tilde{p}_{S,T}(k) = \frac{\tilde{Q}_{\text{hyst}}^S}{\tilde{Q}_{\text{hyst}}^S + \bar{X}_{S,T}(t)} = \frac{\rho_T Q_{\text{hyst}}^S}{\rho_T Q_{\text{hyst}}^S + \rho_S \bar{X}_{S,T}(t)} \quad (20)$$

将式(20)代入式(14)中即可得到沿用户轨迹的基于负载感知的预测目标小区。

### 3.3 含预测的切换方案流程

综合上述分析，本文提出了如下所示的含预测的切换方案流程。

- 1) 假定  $t=kT_c$  时刻用户与  $b_S$  相连接，且已知各小区负载率为  $\rho_n$ 。
- 2) 估计  $t$  时刻用户与其他小区  $b_S$  的欧氏距离为  $dis_{u,S}(t)$ ，路径增益为  $g_{u,S}(t)$ 。
- 3) 建立 Markov 模型，计算负载感知下， $b_S$  到  $b_S$  的转移概率为  $\tilde{p}_{S,T}(k)$ 。
- 4) 若有  $b_T = \arg \max_n \{\tilde{p}_{S,T}(k)\}$ ，则 TTT 开始计时。
- 5) 若在持续时间  $0 < t < T_h$  内， $b_T = \arg \max_n \{\tilde{p}_{S,T}(k)\}$  始终成立，则  $b_T$  为预测目标小区。
- 6) 若 5) 不成立，则返回 1)，用户仍与  $b_S$  相连接。
- 7) 若  $b_T$  为虚拟节点，由 SDN 的中心控制策略控制  $b_T$  激活，用户可以提前向  $b_T$  发送认证，请求并准备转发数据。

### 4 仿真分析

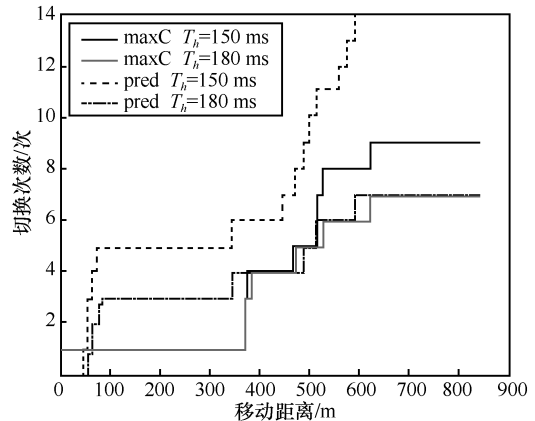
仿真场景如图 1 所示，采用下行的 OFDMA 传输方案，这里考虑虚拟节点数目为  $N=12$ ，簇中用户数目为  $U=30$ 。系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数说明		
参数	说明	值
$R$	宏小区半径	600 m
$D$	宏基站到虚拟基站的距离	$\frac{600}{\sqrt{3}}$ m
$P_M^{\alpha}$	宏基站的信号发射功率	46 dBm
$P_V^{\alpha}$	虚拟基站的信号发射功率	24 dBm
$\mu_M$	宏基站路径损耗系数	4.5
$\mu_N$	虚拟基站路径损耗系数	2.5
$D_{SF}$	阴影方差	4 dB
$f_c$	系统载频	3.65 GHz
$N_0$	噪声功率谱密度	-174 dBm/Hz
$B_a$	含 12 个子载波子信道的有效带宽	72 kHz
$N_{ch}$	子信道总数	32
$\omega$	簇用户的移动方向	$\frac{\pi}{6}$

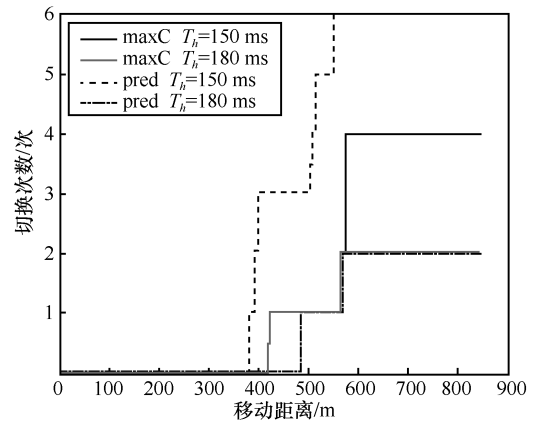
文献[21]研究了一种超密集部署的蜂窝网络的负荷卸载设计，通过计算簇用户到所有基站的链路和容量，采用最大容量切换方案 (MCHS, maximum

capacity handover scheme) 来进行基站选择。这里，将对 MCHS 和本文所提出的 MPHS 两种方案进行分析。经仿真观察，这里取 MBS 和 VBS 的参考切换阈值为  $Q_{hyst}^M = Q_{hyst}^V = 1$  dB。

图 4 分别统计了簇中单个用户在 MCHS (标注 maxC) 和 MPHS (标注 pred) 两种方案下的切换次数随用户移动距离变化曲线。其中，图 4(a) 不考虑基站负载，即  $\rho_n=1$ ；图 4(b) 中自定义负载，各小区负载情况  $\rho_n$  如表 2 所示。这里取用户移动速度为 2 m/s，抽样时间为 30 ms，共进行了 14 000 次仿真，用户共移动 840 m。在低速率的移动场合，最优的 TTT 是避免由衰落而产生乒乓效应的最小值，因此，它只与信道的相干时间  $T_c$  有关，也就是只取决于用户速度，而与小区的大小无关<sup>[23]</sup>。TTT 过低会使切换门槛降低，造成切换乒乓；TTT 过高会使切换门槛提高，使用户速率降低。这里相干时间即为 30 ms，经计算机仿真，验证  $T_h=180$  ms 时效果最佳，为对比显示，图 4 中给出了 TTT 分别为 150 ms 和 180 ms 的仿真曲线，即  $T_h=150$  ms 和  $T_h=180$  ms 2 种情况。



(a) 不考虑负载，即  $\rho_n=1$



(b) 考虑负载，按表 2 定义  $\rho_n$

图 4 不同 TTT 下的切换次数随用户移动距离变化曲线

由图 4 中可以看到, TTT 能够有效地避免切换乒乓, 且 TTT 越大, 用户总切换次数越少。并结合图 1 用户移动方向可知, 在用户移动 500 m 左右, 用户周围环绕密集部署的基站, 使用户的切换次数急剧增加。并且当  $T_h=180$  ms 时, 两种方案在小区负载相同的情况下, 切换总次数保持一致, 因此在下面的分析中本文取  $T_h=180$  ms。

与表 2 不同, 表 3 为另外一种随机生成的不同小区负载设置, 表 4 统计了 MPHS 方案在不同负载条件下用户所选择基站序列。将表 4 分别与图 4(a)和图 4(b)相对应, 再结合图 1 所示的网络拓扑以及表 2 所示的  $\rho$  分布进行分析。参见表 2, 沿用户的移动轨迹, 当设置虚拟基站  $V_8$  和  $V_{10}$  的负载为 0.3,  $V_9$  和  $V_{11}$  的负载为 1 时, 综合信号质量与小区负载后的预切换方案跳过了  $V_8$  和  $V_{10}$ , 直接从  $V_9$  切换到  $V_{11}$ 。表 3 配置下的预切换方案将直接从  $V_{10}$  切换到  $V_2$ , 注意图 4(b)中没有显示出该小概率事件。因此不同的负载条件下用户所进行的基站选择存在差异, 在引入小区负载这一上下文信息后, 预测切换方案会综合信号质量与小区负载为用户选择最佳切换小区。

表 2 基站负载定义 1

基站	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$M$
$\rho_n$	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0	0.3	1.0

表 3 基站负载定义 2

基站	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_9$	$V_{10}$	$V_{11}$	$V_{12}$	$M$
$\rho_n$	0.7	1.0	0.5	0.3	1.0	0.5	0.7	0.3	0.7	1.0	0.5	0.7	1.0

表 4 用户在不同负载条件下所选择基站 ( $T_h=180$  ms)

负载配置	用户所选择基站序列
不考虑负载, 即 $\rho_n=1$	$V_8 \rightarrow V_9 \rightarrow V_8 \rightarrow V_9 \rightarrow V_{10} \rightarrow V_{11} \rightarrow V_{12} \rightarrow V_1$
$\rho_n$ 如表 2 所示	$V_9 \rightarrow V_{11} \rightarrow V_1$
$\rho_n$ 如表 3 所示	$V_{10} \rightarrow V_2$

由于信道的随机性, 定义在信道估计不完善时有

$$\tilde{g}_{u,T}(t) = g_{u,T}(t)(1 + \eta), \eta \in [0\%, 30\%] \quad (21)$$

式(13)中变量包括切换阈值、发射功率和  $t$  时刻的路径增益估计等。尤其最后的路径增益参数, 实际移动管理的切换方案不可能获取绝对精确的路径增益估计。式(21)考虑用户与目标小区链路存在路径增益估计误差的情况。计算机仿真实验结果显示, 在所研究的面向低速率移动的简单模型下, 该路径增益估计误差所引起转移概率的

偏差不显著。另一方面, 式(13)的分母还包含了用户与当前服务小区链路的路径增益。当存在该路径增益估计误差时, 转移概率的偏差将不可忽略。此外, 所研究的方案将根据切换阈值和 SINR 计算转移概率来做出切换决策。路径增益估计误差将对切换方案的 SINR 值产生直接影响, 从而降低方案的性能。

图 5 显示了在 MCHS 和 MPHS 两种方案下的用户切换概率随用户移动速度变化的关系曲线, 其中, 取  $\rho_n=1$ 。观察可得, MPHS 的切换概率略高于 MCHS。并且, 随着用户移动速度的增加, 用户的切换概率也逐渐增加。

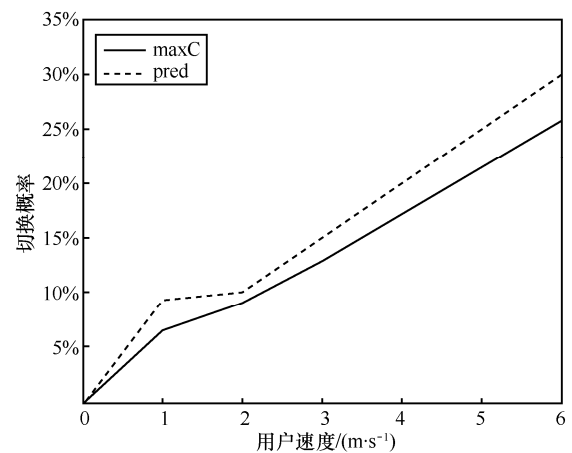


图 5 用户切换概率随用户速度变化曲线

利用互补网络也就是虚拟基站进行数据传送, 能够减轻蜂窝网络负载, 以平衡整个网络负载。图 6 描述了 MPHS 的容量增益随时间变化曲线, 其中,  $v=2$  m/s。计算机仿真结果表明, 在用户的移动过程中, 其平均容量增益约为 18.4%, 即当用户选择虚拟基站时, 移动数据负荷被卸载, 有效地平衡了网络的负载。

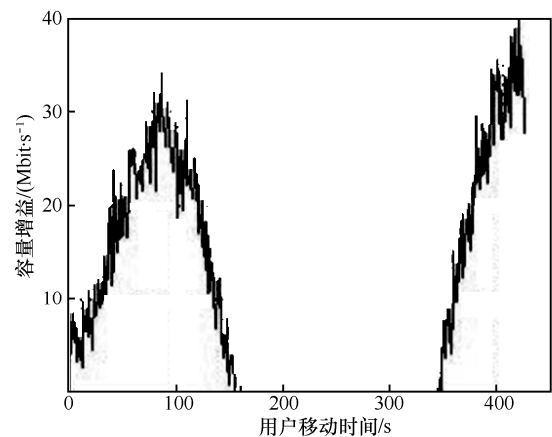


图 6 用户容量增益随移动时间变化曲线

图 7 是 MCHS 和 MPHS 两种方案下的用户平均速率随用户移动距离变化曲线, 设置  $\rho_n=1$ ,  $v=2$  m/s。图 7(a)为单用户平均速率仿真结果, 且同时考虑路径损耗、独立阴影和衰落。可以看到两种切换设计的单用户速率曲线大部分重叠。图 7(b)为簇中所有用户和速率仿真结果, 为了便于观察, 仅考虑路径损耗和衰落。可以观察到两种方案的用户簇和速率曲线大部分一致, 但由于 MPHS 的预切换设计, 整个簇用户的和速率要高于 MCHS。

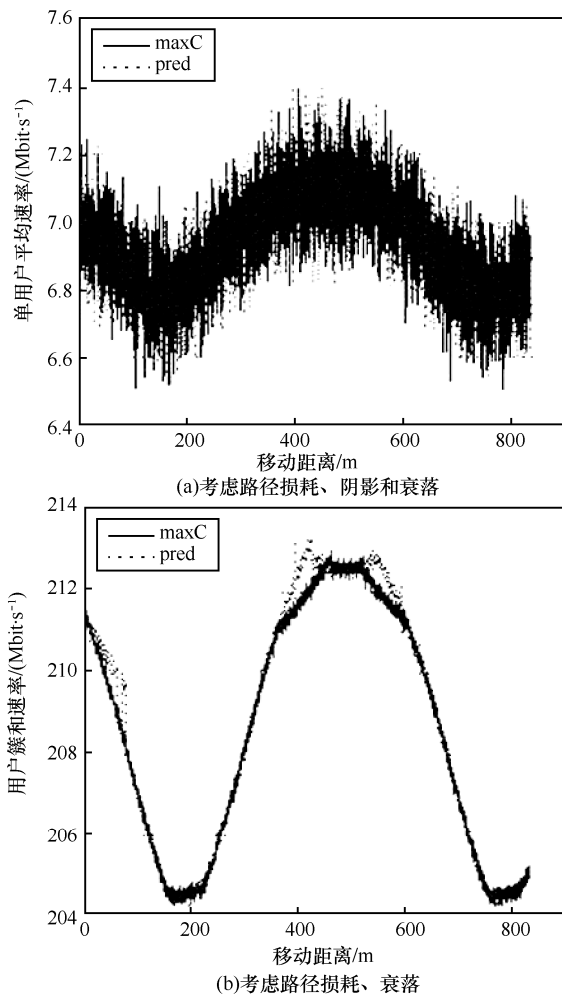


图 7 用户平均速率随用户移动距离变化曲线

MPHS 是一种预切换的设计, 它是在当前时刻预测用户下一时刻选择的小区, 相比较实时计算小区选择的 MCHS 来说, MPHS 下用户可以提前向预测小区发送认证, 请求并进行数据转发准备, 当用户在当前小区下的接收信号强度减弱时, 可以直接向预测小区发送连接请求, 降低切换时延, 减少了占用信道资源和缓存, 便于保证 QoE 和网络的性能。综上所述, 低速率 (如 2 m/s) 的移动场合,

本文所提出的 MPHS 性能更优。

## 5 结束语

切换技术是保证用户跨小区移动时正常通信的关键移动管理和资源分配技术。为了应对超密集部署的异构网络下大规模机器类通信的切换性能提升问题, 本文提出了一种基于 Markov 预测的半结构化的切换设计, 使用 Markov 模型预测用户的下一个目标小区以及每个虚拟节点的激活状态与休眠状态。此外, 该设计还融入了负载感知思想。计算机仿真结果表明, 在低速率 (如 2 m/s) 的移动场合, 基于 Markov 预测的切换设计在保证切换性能的基础上能够有效地预测用户下一个接入网络。大量用户接入多宏基站/多微基站场景下的移动管理问题依然是存在的。因此, 在下一步的工作中, 将继续研究多宏蜂窝配置下的切换以及通过 SDN 控制器来优化调整虚拟节点的几何分布等资源分配问题。

## 附录 1

设  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  是相互独立的指数分布随机变量, 具有相同的参数  $\lambda_e=1$ , 则  $(\bar{X}, \bar{Y})$  的联合密度函数为

$$f(\bar{x}, \bar{y}) = f_{\bar{x}}(\bar{x})f_{\bar{y}}(\bar{y}) = e^{-(\bar{x}+\bar{y})}, \bar{x} > 0, \bar{y} > 0 \quad (22)$$

令  $Z = \bar{X} / \bar{Y}$ , 则

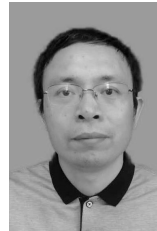
$$\begin{aligned} P\{Z \leq z\} &= P\left\{\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} \leq z\right\} = \int_0^{+\infty} d\bar{y} \int_0^{z\bar{y}} f(\bar{x}, \bar{y}) d\bar{x} \\ &= \int_0^{+\infty} (-e^{-\bar{y}(z+1)} + e^{-\bar{y}}) d\bar{y} \\ &= \frac{z}{z+1}, z \in [0, +\infty] \end{aligned} \quad (23)$$

## 参考文献:

- [1] 尤肖虎, 潘志文, 高西奇, 等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(5): 551-563.  
YOU X H, PAN Z W, GAO X Q, et al. The 5G mobile communication: the development trends and its emerging key techniques[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2014, 44(5): 551-563.
- [2] 尤肖虎, 赵新胜. 分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构[J]. 电子学报, 2004, 12A(32): 16-21.  
YOU X H, ZHAO X S. Distributed radio and cellular mobile communications network architecture[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 12A(32): 16-21.
- [3] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERISSIMO P E, et al. Software-defined networking: A comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [4] PENG M, LI Y, ZHAO Z, et al. System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE Net-

- work, 2015, 29(2): 6-14.
- [5] 任焱晔, 赵季红, 曲桦. 基于模糊逻辑的多终端协同的垂直切换决策算法[J]. 通信学报, 2014, 35(9): 67-78.  
REN G Y, ZHAO J H, QU Y. Vertical handoff decision algorithm for cooperation of multi-terminal based on fuzzy logic terminal[J]. Journal on Communications, 2014, 35(9): 67-78.
- [6] TENG Y L, LIU M T, SONG M. Effect of outdated CSI on handover decisions in dense networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, PP(99): 1-4.
- [7] BECVAR Z, MACH P. Prediction of channel quality after handover for mobility management in 5G[C]//International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU 2014), 2014: 35-39.
- [8] RABE A, HESHAM E, SAMEH S, et al. Velocity-aware handover management in two-tier cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1851-1867.
- [9] MAALOUL S, AFIF M, TABBANE S. Handover decision in heterogeneous networks[C]// IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2016), 2016: 588-595.
- [10] YAN X, MANI N, SEKERCIOGLU Y A. A traveling distance prediction based method to minimize unnecessary handovers from cellular networks to WLANs[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(1): 14-16.
- [11] KASSAR M, KERVELLA B, PUJOLLE G. An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(10): 2607-2620.
- [12] DING Z X, WANG X J, WANG X, et al. An effective handover scheme in heterogeneous networks[C]// International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2016: 1-6.
- [13] 刘淑慧. LTE 及 Macrocell/Femtocell 双层网络无线资源管理的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.  
LIU S H. Research on wireless resource management of LTE and Macrocell/Femtocell dual-layer networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [14] 万晋京. Macrocell-Femtocell 分层网络中切换算法研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.  
WAN J J. Research on handover algorithm in Macrocell-Femtocell hierarchical network[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2017.
- [15] SHARMA A K, SUMAN P N, JAIN A. Improving energy efficiency of femtocell network by joint estimation of downlink throughput and uplink power[C]//2015 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems, 2015: 1-5.
- [16] ULVAN A, BESTAK R, ULVAN M. The study of handover procedure in LTE-based femtocell network[C]//WMNC2010, 2010:1-6.
- [17] 王汝言, 周晓军, 吴大鹏. 带有负载均衡的 LTE 自适应切换算法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2156-2163.  
WANG Y Y, ZHOU X J, WU D P. Adaptive LTE handover algorithm with load balancing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(9): 2156-2163.
- [18] 马秀荣, 张会龙, 白媛, 等. 基于自适应小区选择的切换控制算法研究[J]. 通信学报, 2011, 32(9): 9-17.  
MA X R, ZHANG H L, BAI Y, et al. Switching control algorithm based on adaptive cell selection[J]. Journal on Communications, 2011, 32(9): 9-17.
- [19] XENAKIS D, PASSAS N, GREGORIO L D, et al. A context-aware vertical handover framework towards energy-efficiency[C]. 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011: 1-5.
- [20] ANTORO A D, MUSTIKA I W, WIBOWO S B. Downlink cross-tier interference mitigation for macrocell user in open access femtocell using handover scenario[C]// 2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI), 2015: 656-660.
- [21] MENG Q M, ZHONG S, ZOU Y L. Offloading in dynamic ultra dense small cell networks[C]// 2016 7th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2016: 148-152.
- [22] 3GPP TR 36.814. Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)[S]. 2010.
- [23] GUIDOLIN F, PAPPALARDO I, ZANELLA A, et al. Context-aware handover policies in HetNets[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 1895-1906.
- [24] GHOSH A, THOMAS T A, CUDAK M C, et al. Millimeter wave enhanced local area systems: A high data rate approach for future wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1152-1163.
- [25] 3GPP TR 36.839. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Mobility enhancements in heterogeneous networks (Release 11)[S]. 2012.

## [作者简介]



孟庆民 (1965–), 男, 江苏滨海人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为信号处理、网络智能、网络自动化、绿色通信、安全通信、移动边缘计算等。



赵媛媛 (1992–), 女, 山东东营人, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线资源管理。

岳文静 (1982–), 女, 山西应县人, 博士, 南京邮电大学副教授, 主要研究方向为协作通信、认知无线电等。

邹玉龙 (1984–), 男, 江西新干人, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为认知无线电、信息安全等。

王小明 (1986–), 男, 山东聊城人, 博士, 南京邮电大学讲师, 主要研究方向为绿色通信、资源分配等。