

基于 SDN 架构的 5G 通信网络中的切换算法^①



李立¹, 但峰^{2,3}, 彭罕之¹, 陶茂峰¹

¹(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

²(武汉科技大学 智能信息处理与实时工业系统湖北省重点实验室, 武汉 430065)

³(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 武汉 430000)

通讯作者: 但峰, E-mail: danfeng@wust.edu.cn

摘要: 针对传统的移动性管理基站在 5G 超密集网络部署的特定场景中所面临的信令开销大、数据传输效率低等问题, 本文研究基于 SDN 架构的 5G 通信网络中的垂直切换算法, 充分利用 SDN 控制器中的全局化的网络状态信息, 计算最优的切换决策结果, 尽可能的减少移动节点收集网络状态信息所带来的时延以及网络开销. 利用 Matlab 对提出的切换管理策略进行了仿真, 相对于 LTE 系统的切换管理机制, 在切换时延以及平均切换次数上都有优势.

关键词: SDN; 移动通信; 切换

引用格式: 李立, 但峰, 彭罕之, 陶茂峰. 基于 SDN 架构的 5G 通信网络中的切换算法. 计算机系统应用, 2020, 29(3): 228-233. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7281.html>

Handover Algorithms in 5G Based on SDN Architecture

LI Li¹, DAN Feng^{2,3}, PENG Han-Zhi¹, TAO Mao-Feng¹

¹(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co. Ltd., Wuhan 430063, China)

²(Hubei Province Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Real-time Industrial System, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

³(School of Information and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: As the high signaling cost and low data transmission efficiency of traditional mobile management strategy in 5G ultra-dense network deployment, this study proposed a handover algorithms in 5G based on SDN architecture. By the use of the global network state information in SDN controller to make the optimal handover decision, the delay and network resource cost caused by mobile node collecting network status information can be reduced. The proposed handover management strategy is simulated by Matlab. Compared with the handover management mechanism of LTE system, it has advantages in handover delay and average handover times.

Key words: SDN; mobile communication; handover

第五代移动通信网络将为用户提供更丰富的业务种类以及更好的服务质量. 下一代移动通信网络 5G 采用了密集部署小蜂窝的方法, 通过在宏蜂窝小区内部

署大量的低功率的小基站, 以提高网络容量、频谱效率、数据率. 但是演进型基站 (evolved NodeB, eNB) 的大量部署也将增加网络的干扰和能耗, 建设下一代

① 基金项目: 国家自然科学基金 (51405349); 湖北省自然科学基金面上项目 (2016CFB463); 智能信息处理与实时工业系统湖北省重点实验室开放课题 (znxx2018QN03); 武汉科技大学国防预研项目 (GF201803)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51405349); General Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFB463); Open Fund of Hubei Province Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Real-time Industrial System (znxx2018QN03); Pre-Study for National Defense of Wuhan University of Science and Technology (GF201803)

收稿时间: 2019-07-12; 修改时间: 2019-08-20; 采用时间: 2019-08-22; csa 在线出版时间: 2020-02-28

密集部署的异构移动通信网络将是一个复杂的挑战^[1]。

在下一代基站密集部署的异构移动通信网络环境中,传统的切换管理方法不再适用。首先,eNBs的密集部署以及数量庞大的移动节点将导致切换次数的增加,而频繁的切换可能导致通信性能的恶化;其次,eNBs的密集部署会增加预切换的时间。对于切换管理方面的研究有很多,例如文献[2,3]中,提出了减少切换次数的切换跳过技术。文献[4]提出了一种基于自组织映射的切换管理技术,以减少两层蜂窝网络中室内用户不必要的切换。在文献[5-7]中,提出了几种切换管理方法,针对两层下行蜂窝网络中如何减少不必要切换的问题。在文献[8]中,还需要移动设备的速度和小小区的位置来作出切换决定。文献[9]提出了一种包括车载无线通信在内的异构网络垂直切换技术,切换所需的信息包括轨迹、吞吐量、丢包率、每包延迟等。

然而,移动通信中不同业务/应用对于网络性能有着完全不同的需求。为了给移动用户找到最合适的目标基站,现有的切换管理策略越来越复杂。然而越复杂的算法往往需要更多的网络状态信息,移动节点必须在做出切换决策前(即预切换期间)收集这些网络状态信息^[8-10]。

在基于SDN架构的5G通信网络中,SDN控制器(Software Defined Network Controller, SDNC)是网络中的应用程序,持续监视整个网络,负责诸如流量控制、路由计算、无线接入等网络网络功能,以实现智能网络的正常运行^[11]。区别与传统分布式的切换决策方法,在SDN架构下的通信网络,利用SDN控制器中的全局化的网络状态信息能够更好的计算最优的切换决策结果,也可以减少移动节点收集网络状态信息所带来的时延以及网络开销。本文提出一种基于SDN架构的5G通信网络下的切换管理策略。不同于传统分布式切换管理策略,本文提出切换算法是基于SDN架构下的设计的集中控制方法,切换决策中尽量利用SDN控制层中的网络状态信息,减少移动节点预切换的时间以及通信开销。

1 基于SDN架构的5G通信网络下的切换管理策略

1.1 基于SDN架构的5G通信网络

5G通信网络体系结构融合了多种移动通信网络,是一个复杂的异构网络^[12]。5G可以实现广泛的覆盖、

移动支持和高数据速率。如图1所示,基于SDN架构的5G通信网络,将网络设备上的控制逻辑分离出来,由位于控制层的SDNC(SDN Controller)管理,而SDN的控制权是完全开放的。因此,某些可以自定义添加一些网络控制功能,某些操作和功能可以在控制层中执行。然后,数据层中的交换机和路由器可以遵循SDNC的指示。网络设备的行为可以由网络编程语言指定的应用程序定义。这些规范作为网络策略,在管理层中定义,在控制层中强制执行,并最终在数据层中相应地执行。因此,在基于SDN架构的5G通信网络中,位于控制层的SDNC具有抽象和集中的视角,可以预测用户的移动性,可以提前进行切换准备,获得切换延迟较低的无缝体验。

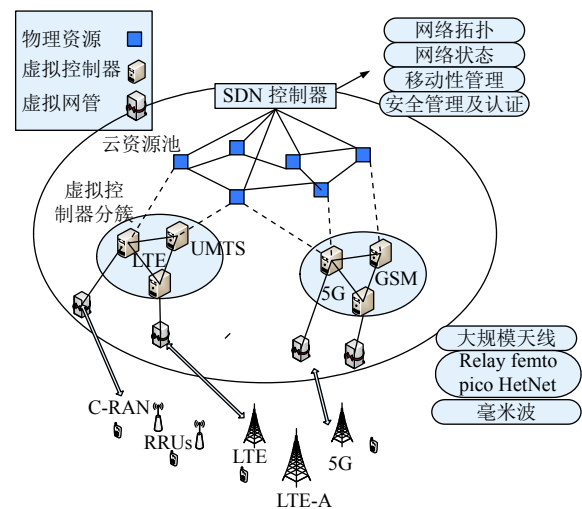


图1 基于SDN架构的5G通信网络^[12]

1.2 切换控制模块

我们在位于控制层的SDNC添加了一个切换控制模块对节点切换进行管理。该模块由两个部分组成:切换决策属性量化模型以及切换决策模型组成。切换控制模块从SDNC中获得网络状态信息以量化决策相关属性,然后通过本文提出的决策算法计算每个相邻基站的优先级并选择最合适的切换目标基站,位于控制层的SDNC控制移动节点的切换过程。

1.2.1 切换决策属性量化模型

该模型收集网络状态信息并量化基站eNB的属性,这些信息用来作出切换决策为移动节点选择最合适的eNB。假设有 m 个候选基站 $\{eNB_1, eNB_2, \dots, eNB_m\}$ 。

(1) eNB 负载. eNB 负载表示该基站的空闲情况. 该参数越低则表示连接到该基站的用户终端越少, 切换时延以及切换失败的概率越低. 否则该基站负载较高, 切换延迟较高, 发生切换失败的可能性更大.

为了便于研究, 我们假设每个基站最大拥有 N 个可用资源, 即每个基站最多允许 N 个用户终端同时连接. 如果一个新的用户终端连接到某基站, 则该基站的可用资源数减 1, 而连接结束则该基站可用资源数加 1, 若第 i 个基站当前有 n 个终端用户连接, 则其负载为:

$$L_i = \frac{N-n}{N}, n \leq N \quad (1)$$

(2) 平均切换时延. 切换时延 t 是指从触发切换操作开始, 移动节点从源基站切换到目标基站并开始正常通信所耗费的时间. 平均切换时延是指以所有该基站为目标基站的切换操作时延的历史加权平均值. 若有新的移动节点切换到对于第 i 个基站 eNB_i , 此次切换时延 t 将会用来更新该进站的平均切换时延, 平均切换时延计算公式如下:

$$T_i = \alpha \times T_i + \beta \times t \quad (2)$$

其中, $\alpha + \beta = 1$, 通常情况下 $0 < \alpha < \beta < 1$, 表示切换决策更侧重于当前网络环境. 特殊的, 初始状态下, 当 T_i 值为空, 令 $T_i = t$.

(3) 预计持续停留时间. 其值越大代表移动节点进入基站的覆盖范围并在该基站覆盖范围内持续停留时间越长. 为了减少通信量并减少 SDNC 和终端的负载, 本文提出的持续停留时间的预测仅依靠基站位置、移动节点当前位置信息, 利用基站位置来估计移动节点的速度大小以及方向, 见图 2.

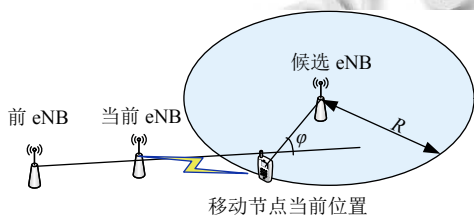


图 2 预计持续停留时间

如图 2 所示, 移动节点在第 i 个基站 eNB_i 预计持续停留时间的计算方法如下:

$$r_i = (2 \cdot r \cdot \cos \varphi) / (v) \quad (3)$$

其中, v 为移动节点速度大小, 其值利用当前接入基站和上一个接入基站的位置近似计算得到, 即 $v = d / tim_c$,

其中 d 为当前接入基站和上一个接入基站之间的距离, tim_c 为移动节点在当前接入基站的实际停留时间.

1.2.2 切换决策模型

切换决策模型计算所有邻居基站 eNB 的优先级, 然后选择最优的 eNB 作为目标基站.

目标基站的选择是一个多目标决策的过程, 需要综合考虑多个因素, 本文采用基于 TOPSIS 的多目标决策方法, 若一个移动节点附近存在 m 个候选接入点, 则有 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$, 可以依据下面的公式建立决策矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{14} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{m4} \end{bmatrix}$$

对于第 i 个候选接入点 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}\}$, 第 1 个属性 x_{i1} 是基站负载, 计算方法如式 (1) 所示; 第 2 个属性 x_{i2} 是基站的平均切换时延, 计算方法如式 (2) 所示; 第 3 个属性 x_{i3} 是预计持续停留时间, 计算方法如式 (3) 所示; 第 4 个属性 x_{i4} 是 RSSI, 由移动节点实测得到.

由于每个属性单位不同, 量纲不同, 因此需要进行归一化处理.

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq 4$$

可以得到归一化后的决策矩阵 $Y = [y_{ij}]_{m \times 4}$ 由于每个属性重要性不同, 需要计算属性权重.

利用 Saaty 教授提出的 1-9 标度法建立比较判断矩阵^[13], 根据人类区别物的好坏、优劣、轻重等经验方法将不同情况的比较结果可以数量标度.

$$AHP_{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_1 & 1/h_2 & 1/h_3 \\ h_1 & 1 & 1/h_4 & 1/h_5 \\ h_2 & h_4 & 1 & 1/h_6 \\ h_3 & h_5 & h_6 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

用特征根法计算权重, 特征根法也被称为特征向量法或幂法, 用来求解判断矩阵的 AHP_{matrix} 特征根.

$$AHP_{matrix} \cdot w = \lambda_{max} \cdot w \quad (5)$$

其中, λ_{max} 和 w 分别是 AHP_{matrix} 的最大特征根和特征向量, w 归一化后就就是所求的权重向量.

求解得满足精度 $\varepsilon > 0$ 权重向量 $w = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ ^[13], 加权后的决策矩阵如下所示:

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & v_{14} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & v_{m4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

与理想解的相对贴近度为 C_i^+ , 则对于 m 个候选接入方案 $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$, 最优接入点目标函数如下:

$$\text{Max}_{\forall a_i, i \in M} \left(\sum_{j=1}^4 (v_{ij} - v_j^-)^2 / \left(\sum_{j=1}^4 (v_{ij} - v_j^+)^2 + \sum_{j=1}^4 (v_{ij} - v_j^-)^2 \right) \right) \quad (7)$$

TOPSIS 算法伪代码如下:

算法 1. TOPSIS 算法

输入: 加权决策矩阵 V

输出: 最优解

for $j=1: 2$

$v_j^+ = \min_i (v_{ij})$ % 理想最优解 %

$v_j^- = \max_i (v_{ij})$ % 理想最劣解 %

End

For $j=3: 4$

$v_j^+ = \max_i (v_{ij})$ % 理想最优解 %

$v_j^- = \min_i (v_{ij})$ % 理想最劣解 %

end

for $i=1: m$ % 对于 m 个候选方案 %

利用式 (6) 计算 C_i

end

最优解 $v_i = \arg \max (C_i)$

1.3 切换决策流程

两种条件下均可以触发切换操作: (1) 当前 eNB 的 RSSI 低于预先设定的阈值; (2) 当前 eNB 的性能不能满足用户对 QoS 的要求。

在传统的移动通信技术如 3GPP 中, 移动节点必须在切换准备阶段进行测量控制, 其测量参数通过 eNB 的周期性广播得到, 移动节点向当前 eNB 发送测量报告, 然后由源 eNB 作出切换决策, 选择最优目标基站, 并向该基站发送切换请求。传统的切换流程主要存在以下几个问题: (1) 移动节点没有网络的状态信息, 必须搜索信道以获得网络状态信息, 该过程增加了切换延迟; (2) 传统的切换策略中, 为了选择更加合适的目标基站切换接入, 切换决策算法变得越来越复杂, 决策属性的增多移动节点也需要更多的时间搜集网络状态信息, 导致预切换时间的增加。LTE 切换流程中切换决策是基于移动节点的测量报告, 决策属性少, 节点竞争接入, 但这种方法未考虑业务或应用对于网络性能的需求, 也没有考虑移动节点的移动性。

当前基于多目标决策的切换管理策略大多在现有

的 LTE 切换策略的基础上改进, 通常需要更多的候选接入点的性能参数如带宽、延迟、抖动、用户历史移动轨迹等等, 这些参数的获取通常需要移动节点以及接入基站系统完成, 不仅需要占用更多的网络资源, 也将带来一定时延, 如图 3 所示。

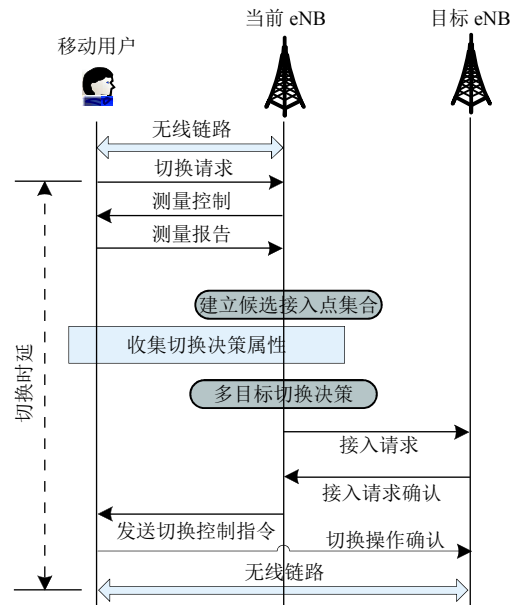


图 3 传统的基于多目标决策的切换流程

而在基于 SDN 架构的移动通信网络中, SDNC 继续监控整个网络并控制网络的正常运行, 如执行虚拟无线接入控制或切换控制。位于控制层的切换控制器可以从控制平面中的数据平面或 SDNC 的其他控制器获取切换所需的信息, 如 ENB 的状态信息、移动节点注册信息、移动标识、区域跟踪更新等。如图 4 所示, 当切换操作被触发后, 移动节点向控制器发送请求, 切换控制器搜集并计算候选 eNB 的优先级来进行切换判决, 切换控制器管理整个切换过程, 并且移动节点从源 eNB 切换到目标 eNB, 然后通过 OpenFlow 协议更新控制信息进行新连接。

2 实验与仿真

本文采用 Matlab 对本文提出的算法进行仿真, 仿真区域采用基于正六边形的坐标划分, 正六边形边长为 1000 m, 基站随机分布, 但每个正六边形内宏蜂窝基站的数量不超过 2 个。宏蜂窝基站数量为 10 个, 覆盖范围为半径 1000 m 的圆形区域, 微蜂窝基站数量 50-300 个, 覆盖范围为半径 200 m 的圆形区域。每个基

站资源数量 $N=50$, 低速移动节点速度范围为 0–10 m/s, 高速移动节点速度范围为 10–20 m/s.

如前文所述, 密集部署 eNB 可以显著提高网络容量、频谱效率和数据速率. 但是 eNBS 的密集部署也会增加网络的干扰和能量消耗, SDN 是下一代移动通信网络中密集部署 eNBS 的解决方案. 基于 SDN 架构的 5G 通信网络的数据平面由大量的虚拟小区和用户组成. 为了显示数据平面的致密化程度, 研究致密化程度与切换性能之间的关系, 我们定义了一个网络致密度, 其值为小蜂窝用户数量与宏蜂窝用户数量之比.

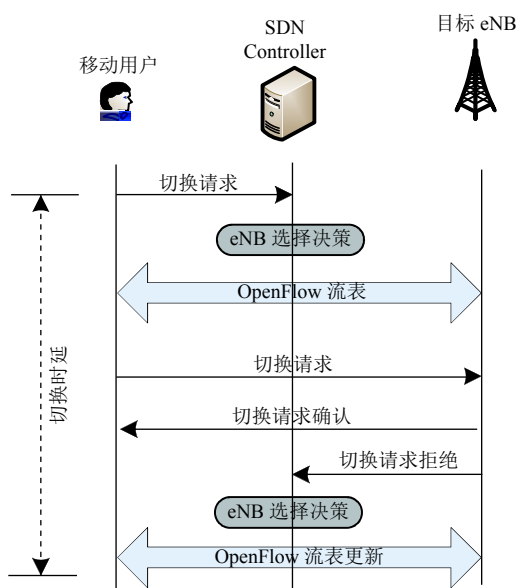


图4 基于SDN架构移动通信网络切换流程

在传统的分布式切换管理策略中, 移动节点必须在切换准备阶段搜索信道并获取网络状态信息, 将增加能量消耗, 降低吞吐量. 此外, 当移动节点的数量很大时, 队列中的等待时间就会变得相当长^[13].

与传统的切换方法不同, 本文提出的切换方法是在基于SDN的移动通信网络中设计的, 由于SDNC一直在监控整个网络并控制网络正常运行, 因此能够预先收集大量的网络状态信息, 而缩短切换准备阶段, 移动节点只需要根据SDNC作出的切换决策结果切换到目标eNB. 为了观察网络致密度对切换延迟的影响, 网络致密度反映的是网络用户密度. 从图5可以发现, 随着用户密度的提升, 延迟也在增加, 但仍优于传统的切换管理策略.

由于一段时间内节点切换次数与速度和切换算法

的优劣有关, 因此在图6的仿真中限制了节点的移动速度为 0–10 km/s, 在图7的仿真中限制节点速度为 10–30 km/s. 从两张图中可以发现随着网络致密度的增加, 平均切换次数增加明显. 另外两张图对比也可以发现, 移动节点速度的增加也会增加平均切换次数. 整体来看本节提出方法的平均切换次数要优于传统的LTE网络的切换方法. 原因是LTE网络中的移动节点根据参考候选基站信号质量进行切换决策, 没有考虑移动节点在候选基站覆盖范围内的持续停留时间, 可能导致切换次数的增加.

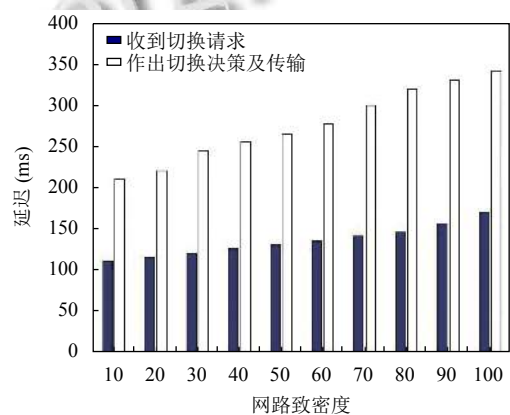


图5 切换时延分析

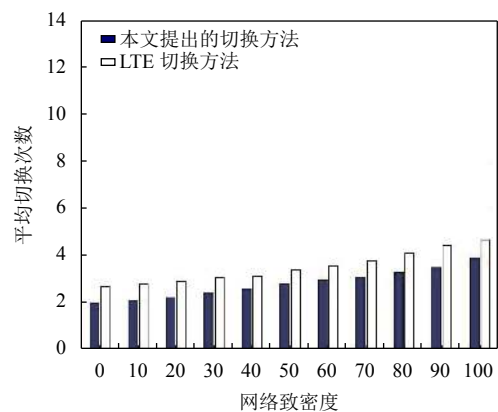


图6 平均切换次数(低速移动节点)

3 小结

针对下一代基于SDN架构的5G通信网络, 提出了一种基于新的网络架构下的切换控制方法. 区别与传统的分布式控制方法, 该方法的主要思想是充分利用控制层中的网络状态信息, 终端的移动性事件由位于控制层的SDNC集中控制管理, 能够减少预切换时移动终端获取网络状态信息的时间, 提高切换性能.

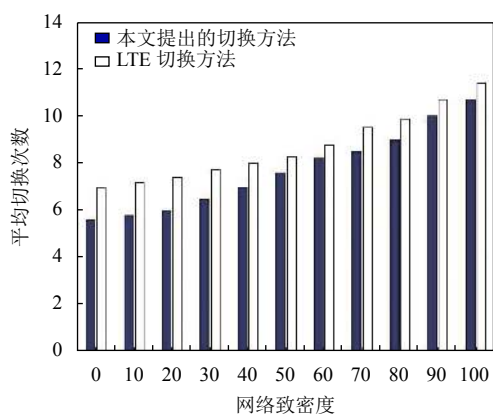


图7 平均切换次数 (高速移动节点)

参考文献

- Ding ZG, Lei XF, Karagiannidis GK, *et al.* A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2181–2195. [doi: 10.1109/JSAC.2017.2725519]
- Arshad R, Elsayy H, Sorour S, *et al.* Handover management in dense cellular networks: A stochastic geometry approach. 2016 IEEE International Conference on Communications. Kuala Lumpur, Malaysia. 2016.
- Arshad R, Elsayy H, Sorour S, *et al.* Cooperative handover management in dense cellular networks. 2016 IEEE Global Communications Conference. Washington, DC, USA, 2016. 1–6.
- Sinclair N, Harle D, Glover IA, *et al.* A kernel methods approach to reducing handover occurrences within LTE. 18th European Wireless Conference 2012. Poznan, Poland. 2012. 1–8.
- Buenestado V, Ruiz-Aviles JM, Toril M, *et al.* Mobility robustness optimization in enterprise. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Dresden, Germany. 2014. 1–5.
- Kong PY, Sluzek A. Average packet delay analysis for a mobile user in a two-tier heterogeneous cellular network. *IEEE Systems Journal*, 2015, 11(1): 2726–2736.
- Zhang HJ, Jiang CX, Hu RQ, *et al.* Self-organization in disaster-resilient heterogeneous small cell networks. *IEEE Network*, 2016, 30(2): 116–121. [doi: 10.1109/MNET.2016.7437033]
- Wang K, Wang YH, Zeng DZ, *et al.* An SDN-based architecture for next-generation wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(1): 25–31. [doi: 10.1109/MWC.2017.1600187WC]
- Liang YH, Chang BJ, Hsieh SJ, *et al.* Analytical model of QoS-based fast seamless handoff in IEEE 802.16j WiMAX networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7): 3549–3561.
- Marquez-Barja JM, Ahmadi H, Tornell SM, *et al.* Breaking the vehicular wireless communications barriers: Vertical handover techniques for heterogeneous networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(12): 5878–5890. [doi: 10.1109/TVT.2014.2386911]
- Trivisonno R, Guerzoni R, Vaishnavi I, *et al.* SDN-based 5G mobile networks: Architecture, functions, procedures and backward compatibility. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2015, 26(1): 82–92. [doi: 10.1002/ett.2915]
- Saaty TL. *Analytic Hierarchy Process*. New York, NY: Springer-Verlag, 2001. 40–53.
- Sesia M, Toufik M, Baker M. *LTE, The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2009. 1–21.