

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.12.003

引用格式: 李小平, 王军选, 孙长印, 等. 异构网中一种能效最优的垂直切换算法[J]. 电讯技术, 2016, 56(12): 1316-1321. [LI Xiaoping, WANG Junxuan, SUN Changyin, et al. A vertical handoff algorithm with optimal energy efficiency for heterogeneous networks[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(12): 1316-1321.]

异构网中一种能效最优的垂直切换算法*

李小平**, 王军选, 孙长印, 万新亮

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

摘要:针对传统垂直切换算法中未能考虑能效这一关键因素,提出了一种能效最优的垂直切换算法,算法核心是移动终端检测并计算来至不同候选网络中的接收信号强度以及各候选小区中的系统容量,以候选小区中每单位能量所能提供的容量作为判决准则切入到最佳网络,同时结合传统的网络因子对多属性判决算法进行能效扩展。仿真结果表明,基于单位能量容量的切换算法较传统的切换算法节省 10% 左右的能量,扩展的多属性判决算法较传统的切换算法节省 7% 左右的能量,同时减少了“乒乓效应”,提高了用户的通信体验质量。

关键词:异构网;垂直切换;单位能量容量;多属性判决

中图分类号: TN929.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2016)12-1316-06

A Vertical Handoff Algorithm with Optimal Energy Efficiency for Heterogeneous Networks

LI Xiaoping, WANG Junxuan, SUN Changyin, WAN Xinliang

(School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: In view of the problem that traditional vertical handoff fails to take a crucial factor, energy efficiency, into consideration, an optimal energy efficiency vertical handoff algorithm is proposed. The algorithm's core is that the mobile terminal tests and calculates the intensity of different received signals from different candidate networks, and system capacity of different candidate areas. Capacity provided by the energy of each unit in candidate areas is taken as decision criterion to realize handoff to the optimal network. Meanwhile, traditional network factors are combined to perform energy efficiency expansion on the multiple attributes decision algorithm. Simulation results show that the handoff algorithm based on unit energy capacity saves about 10% energy when compared with the traditional one, while the expanded multiple attributes decision algorithm saves about 7% energy. Meanwhile, "ping pang effect" is reduced, thereby improving users' communication experience quality.

Key words: heterogeneous network; vertical handoff; unit energy capacity; multiple attributes decision

* 收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-07-18 Received date: 2016-04-06; Revised date: 2016-07-18
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA01A703); 国家自然科学基金资助项目(61501371); 陕西省国际科技合作与交流计划项目(2015KW-012)
Foundation Item: The National High-tech R&D Program(863 Program) of China(2014AA01A703); The National Natural Science Foundation of China(No. 61501371); The International Science and Technology Cooperation and Exchange Program in Shaanxi Province(2015KW-012)
** 通信作者: 18292861308@163.com Corresponding author: 18292861308@163.com

1 引言

近年来,越来越多的无线服务希望以最低的成本和最优的服务质量实现实时和非实时业务服务。下一代网络技术将完全存在于异构环境中,旨在改善网络性能、提高服务质量和保证无缝接入。然而,网络的密集部署势必带来大量能量的消耗以及增加二氧化碳的排出量。2008 年的欧洲协议委员会上要求到 2020 年二氧化碳的释放量减少到 20%,能量的有效利用成为影响未来无线通信系统部署的重要因素之一。结合能效的异构网垂直切换算法研究是实现能量有效利用的途径之一。

目前,垂直切换技术是根据接入网络的接收信号强度、有效带宽、传输速率、延时及费用等方面考虑,基于一种或者多种属性结合最优的数学方法实现最佳网络的接入。文献[1]提出了接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的策略,通过对比候选网络中的 RSS 来确定接入的网络,实现简单,但是会带来“乒乓效应”。文献[2-4]提出了基于代价函数的垂直切换机制,用移动用户的速度、能量利用、带宽等作为参量并各自分配权重构成决策函数来决定是否切换,能够得到较低的切换阻塞率和较大的系统吞吐量,但是带来了较大的切换延时和系统负载。文献[5]依靠模糊逻辑的方法将 RSS、可用带宽和网络开销 3 个属性通过模糊逻辑运算得到判决值来决定是否切换,该方法减少了切换延时和丢包率,但是增加了决策时间和实现的复杂度。文献[6]提出一种估计用户移动行为的移动预测机制,通过考虑一个特定网络的持续时间,切换历史以及位置作为切换参数,减少了切换引起的“乒乓效应”,但是用户行为改变会带来更大延时的丢包率。

传统的切换方法中只是实现最佳网络的选择并接入,未考虑能效的问题,然而有效的能量利用率是实现绿色通信的主要途径。为此,本文提出了一种基于单位能量容量的直切换算法,根据计算得到候选网络中每单位能量决定是否切换,达到节能的效果。同时,本文将单位能量容量这一属性引入多属性决策中对其做能效扩展,综合考虑多个属性实现最佳网络接入。仿真表明结合能效考虑的垂直切换算法比传统的算法更节能。

2 系统模型

本文首先给出一个恒定功率控制策略的系统模型,在该模型中不同小区基站的发射功率是恒定的,

即用户在各个小区获得相同的接收信噪比值。其中 A_k 、 R_k 、 P_k 、 $C(P_k, R_k)$ 分别表示 k 小区的覆盖面积、覆盖半径、基站的发射功率以及当前小区的系统容量,其中 $k=1$ 是宏小区, $k=2$ 是微小区, $k=3$ 是微微小区, $k=4$ 是毫微微小区。为了性能对比的公平性,同一个宏小区下不同微小区的发射功率和容量以宏小区为基准进行对比分析。

2.1 小区发射功率分析

根据系统模型来评价不同小区的基站能量消耗,文献[7]给出了在宏小区覆盖面积 A_1 下 k 小区的下行链路的发射功率的定义 s_k 为

$$s_k = P_k \frac{A_1}{A_k}, k=1,2,3,4. \tag{1}$$

式中: A_k 和 P_k 分别为 k 小区的覆盖面积和基站发射功率。系统模型满足在不同小区边缘具有相同的接收信噪比 p_r , 可表示为

$$p_r = \frac{\alpha P_1}{R_1^{n_1}} = \frac{\alpha P_k}{R_k^{n_k}}, k=1,2,3,4. \tag{2}$$

式中: α 为路径损耗参数; n_k 为第 k 小区的路径损耗指数。根据公式(2)可以得到如下表达式:

$$\frac{P_k}{P_1} = \frac{R_k^{n_k}}{R_1^{n_1}}, k=1,2,3,4. \tag{3}$$

根据公式(1)和公式(3)可以得到 k 小区和宏小区的发射功率比例 $\Gamma_s(k)$:

$$\begin{aligned} \Gamma_s(k) &= \frac{S_k}{S_1} = \frac{P_k \frac{A_1}{A_k}}{P_1 \frac{A_1}{A_1}} = \frac{P_k}{P_1} \cdot \frac{A_1}{A_k} = \frac{P_k}{P_1} \cdot \frac{2\pi R_1^2}{2\pi R_k^2} = \\ &= \frac{P_k}{P_1} \cdot \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 = \left(\frac{R_k^{n_k}}{R_1^{n_1}}\right) \cdot \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 = \\ &= \frac{R_k^{n_k-2}}{R_1^{n_1-2}}, k=1,2,3,4. \end{aligned} \tag{4}$$

式中: n_k 为路径损耗指数,一般为大于 2 的整数。公式(4)表明能量的消耗与小区覆盖的半径相关,半径越小的小区需要的发射功率越小,单位时间的能量消耗就小。因此,部署微小区能够有效地减少能量的消耗。

2.2 小区容量分析

提高小区的容量是未来移动通信系统部署的主要因素之一,香农公式论述了容量的大小与可用带宽和信干噪比相关,带宽和信干噪比越大系统容量就越大。然而,可用无线频谱资源短缺严重地影响了无线系统的容量提升。文献[8]提出,实现分布式的频谱分配策略来提升系统容量,即宏小区使用

低频段的可用频率,微小区使用空闲的高频段无线频谱资源,通过增加可用带宽和较少小区间的干扰来有效地提升小区容量。

文献[7]给出了 k 小区容量 $C(P_k, R_k)$ 的定义:

$$C(P_k, R_k) = B_k \int_0^{R_k} \lg(1 + \frac{\alpha P_k}{N_0 B_k \cdot r^{n_k}}) \frac{2r}{R_k^2} dr \quad (5)$$

式中: B_k 为 k 小区的带宽; N_0 是热噪声的功率谱密度,单位是 dBm/Hz; r 是小区边界到中心位置的有效集合。该文献同时证明了在恒定功率控制策略同时保证各个小区使用的带宽相等的条件下 $C(P_k, R_k) = C(P_1, R_1)$ 。

根据公式(5)结合性能对比的公平性,我们可以得到在宏小区覆盖范围内 k 小区的容量表达式:

$$C_k = C(P_k, R_k) \cdot \frac{A_1}{A_k} = C(P_k, R_k) \frac{R_1^2}{R_k^2} \quad (6)$$

根据公式(6)能得到 k 小区和宏小区的容量比例 $\Gamma_c(k)$:

$$\Gamma_c(k) = \frac{C_k}{C_1} = \frac{C(P_k, R_k) \frac{A_1}{A_k}}{C(P_1, R_1) \frac{A_1}{A_1}} = \frac{C(P_k, R_k)}{C(P_1, R_1)} \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 \quad (7)$$

因为恒定功率控制策略下 $C(P_k, R_k) = C(P_1, R_1)$, 所以公式(7)等效为

$$\Gamma_c(k) = \frac{C(P_k, R_k)}{C(P_1, R_1)} \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 = \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 \quad (8)$$

公式(8)表明,在保持带宽和功率一定的情况下,小区容量与小区半径成反比,部署微小区能够明显地提高系统容量的利用率。

2.3 小区单位能量容量分析

绿色无线通信成为未来移动通信发展的必然趋势,上述分析了异构网架构中不同覆盖范围小区的发射功率和系统容量,部署微小区不仅能够减少基站发射功率,而且能大幅度提升系统容量利用率,满足了人们日益增长的数据量的需求。本文引入新的评价系统性能的指标单位能量容量,该指标是对每单位能量能够获取系统容量值来评判系统的性能,综合考虑了能量和容量两个指标。单位能量容量 U_k 表示如下:

$$U_k = \frac{C_k}{S_k \cdot h}, k = 1, 2, 3, 4. \quad (9)$$

式中: C_k 、 S_k 为 k 小区的容量和发射功率; h 是单位时间; $S_k \cdot h$ 表示单位能量。同功率和容量一样,结合公式(4)、(8)、(9)可以得到 k 小区和宏小区的单

位能量容量的比例 $\Gamma_u(k)$:

$$\Gamma_u(k) = \Gamma_c \Gamma_s^{-1} = \left(\frac{R_1}{R_k}\right)^2 \cdot \frac{R_1^{n_1-2}}{R_k^{n_k-2}} = \frac{R_1^{n_1}}{R_k^{n_k}} \quad (10)$$

根据公式(10),由于部署的微小区的半径远小于宏小区的半径,所以一定程度上能够增加单位能量容量值,即提高了能量的利用率。

3 垂直切换算法

异构网网络架构下,垂直切换解决了不同接入技术下的网络接入问题。垂直切换过程分为三个阶段进行描述:网络发现阶段是将满足要求的网络加入备选网络集;决策阶段是通过不同的决策算法对候选网络进行评价得到最优的接入网络;切换阶段是当最优网络决策出以后控制端执行切换到最优网络。不同算法采用不同的决策属性,切入到最佳网络的评价指标不同。

3.1 基于单位能量容量

未来移动通信系统实现的标准之一是低能耗,上节论述了更小覆盖范围的小区具有较高的能量利用率。在很多情况下虽然某一个候选网络的接收信号强度大于另一个候选网络的,但其接收信号强度都达到了移动用户最低的接收信号强度,而它的每能量容量值小于另一个小区,在不影响通信的情况下我们会选择更高能量利用率的那个网络进行切换。算法实现原理如下:首先,移动台通过检测各网络的接收信号的功率,并结合当前网络的可用带宽来计算在该带宽和接收功率下得到的系统容量;然后,根据公式(9)计算出该功率下单位能量容量值;最后,通过对比各候选网络的单位能量容量的值的大小来切入到最佳网络。

以单位能量容量为标准实现最佳接入,很大程度上提高了能量的利用效率,符合节能减排的要求。然而,单一的决策因子会带来“乒乓效应”,因此,本文对多属性决策算法进行了能效扩展。

3.2 多属性决策

我们利用简单加权多属性判决方法^[9]做出最优网络的选择,该方法是采用各种属性的线性组合,也就是说候选网络的评价标准是所考虑的属性和相应的权值共同决定。计算每个候选网络的各个属性和相应的权值的乘积,然后进行相加得到决策值并比较,决策值最高的那个网络作为最优网络接入。简单加权方法可用公式表示如下:

$$F=\arg \max _{i \in m} \sum_{j=1}^n \omega_j r_{ij}, i=1,2, \cdots, m, j=1,2 \cdots, n_0 . \quad(11)$$

式中: r_{ij} 表示第 i 个网络的第 j 个属性值; ω_j 表示第 j 个属性的权值,满足 $\sum_{j=1}^n \omega_j=1$; n 表示参考属性的数量; m 表示候选网络的个数。

通信系统中接收信号强度作为能够实现通信的最重要因素之一在切换算法中必须考虑,可用带宽的大小直接与系统容量相关并且是线性相关,误码率作为通信质量的一个判决标准同样需要考虑,本文主旨是节能,所以单位能量容量是关键属性。因此,我们选择 RSS、单位能量容量、可用带宽以及误码率 4 个属性从候选网络中综合决策最优网络。决策函数可以写成如下形式:

$$F_n=w_{\text {RSS }} \cdot \text {RSS}+w_{\text {per-c }} \cdot \ln \left(U_{\text {per-c }}\right)+w_{\text {B }} \cdot \ln (B)+w_{\text {E }} \cdot \ln \left(\frac{1}{E}\right) . \quad(12)$$

式中: $w_{\text {RSS }} 、 w_{\text {per-c }} 、 w_{\text {B }} 、 w_{\text {E }} 、 U_{\text {per-c }} 、 B 、 E$ 分别是 RSS、单位能量容量、可用带宽及误码率的权值和当前时刻值,权值利用层次分析法并结合 1~9 标度法^[10]确定。权值的确定过程可以分为以下几个步骤:

- (1)确定执行某种业务由哪几个网络属性决策。
- (2)用 1~9 标度法确定判决矩阵 A ,在判决矩阵的构造过程中,以顶层的某一元素为准则,下面一层的各元素由两两比较的方式得出它们对顶层准则元素的重要程度。对于比较结果采用 1~9 标度法进行相对重要程度的赋值,如表 1 所示。

表 1 1~9 标度法

Tab. 1 The 1~9 scales method

标度 a_{ij}	含义
1	a_i 和 a_j 相比重要程度一样
3	a_i 和 a_j 相比稍微重要
5	a_i 和 a_j 相比明显重要
7	a_i 和 a_j 相比强烈重要
9	a_i 和 a_j 相比极端重要
2,4,6,8	重要性介于 1,3,5,7,9 之间
倒数	a_j 和 a_i 相比的重要程度

数据业务对容量需求比较大,带宽要求比较大,误码率相比较而言较低,接收信号强度和单位能量容量重要程度相当,但相比其他两个属性比较重要。所以,用标度法对接收信号强度、单位能量容量、可用带宽及误码率 4 种属性的重要程度进行比较时,其标度值如表 2 所示。

表 2 数据业务判决因素标度值

Tab. 2 Data business scale value judgment factors

标度值	含义
2	$U_{\text {per-c }}$ 比 RSS 重要一点
3	B 比 E 稍微重要
5	RSS 比 E 明显重要
6	$U_{\text {per-c }}$ 比 E 明显重要

根据文献[10]给出的算法,我们得到 4 种属性在执行数据业务时的权值分别是 0.329 2、0.465 5、0.120 2、0.008 5。假如当前移动终端检测到 3 个候选网络分别是 $C_1、C_2、C_3$,根据执行数据业务时确定的权值并结合终端检测并计算得到的属性值就可以确定各个候选网络的决策值 $F_1、F_2、F_3$,如果同时满足 $F_1>F_2、F_1>F_3$,那么我们就选择接入到网络 C_1 。多属性决策过程考虑了多个属性对决策的不同程度的贡献,使用户更公平地切入到最佳网络,提高了用户的体验质量,同时减少了“乒乓效应”。

4 仿真实验

本文在 Matlab 仿真软件下创建移动场景,部分仿真参数设置参考了文献[7],符合 LTE-A 标准。以切换次数、切换决策和能量作为算法的主要指标进行性能仿真。

4.1 场景设置

为了仿真容易实现,仿真场景如图 3 所示,包括 LTE、5G 虚拟小区、无线局域网(Wireless Local Area Network,WLAN),移动终端以速度 $V=5\text{ m/s}$ 在 LTE 宏小区从左向右沿直线移动。若终端跑出网络的最大覆盖区域,则仿真终止。其中 LTE 蜂窝网络的覆盖范围是以(0,50)m 为中心、以 1 000 m 为半径的圆区域。移动终端的起始坐标(−800,0)m,WLAN1 的坐标为(−400,20)m,WLAN2 的坐标(400,200)m,WLAN3 的坐标(600,−200)m,它们的覆盖半径为 300 m;在宏小区内有 5G 虚拟小区,其坐标设置为(180,−20)m,覆盖面积为 50 m。接入带宽分别为 5 MHz、25 MHz、25 MHz、25 MHz、25 MHz;发射功率分别为 43 dBm、33 dBm、33 dBm、33 dBm、20 dBm;最大误码率阈值为 0.006;最小信号强度阈值为 −110 dBm;热噪声功率谱密度为 −174 dBm/H;阴影衰落 $u(x)$ 服从零均值、标准方差 $\sigma=6\text{ dB}$ 的高斯随机分布函数。仿真过程中用到的路径损耗模型以及参数设置参阅了文献[11],符合通信系统仿真模型。

4.2 仿真分析

图 1 是简单的仿真场景图,根据该模型进行垂

直切换算法性能分析,图中包含 3 个 WLAN 小区和 1 个 5G 虚拟小区,不同的小区都在覆盖半径为 1 000 m 的 LTE 宏小区下。

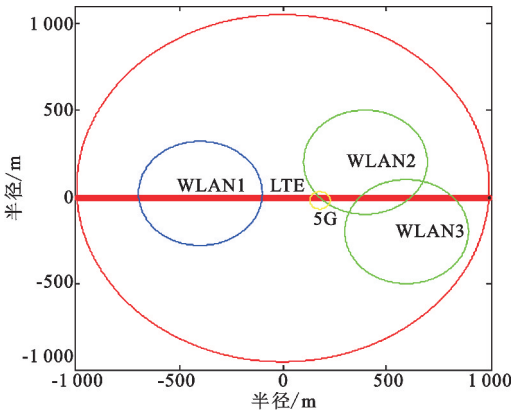


图 1 仿真场景图
Fig.1 The simulation scene

图 2 是不同算法随用户移动的决策值变化图。由图 2 可知,3 种不同的垂直切换算法的决策值随着移动用户的移动而不同,基于 RSS 的切换算法的决策值 RSS,越靠近基站接收信号功率越大,因为移动用户与小区基站的距离越来越小,那么该基站发射的信号到移动用户的路径损耗就越小,接收到的信号强度就越高。同时可以看出部署区配置的发射功率很小,但是单位能量容量值比较大,因此,基于 RSS 的切换算法有时候可能由于接收到高效小区的接收强度低于其他小区的而不选择能效更高的小区接入,同时基于单位能量容量切换算法会因为小区的能耗高不会接入低能耗小区,但高能耗小区的信号强度低于其他小区,使得业务质量有所下降。多属性切换综合考虑了网络的多种属性,更公平更合理地接入到最优网络,提高了用户的服务质量。

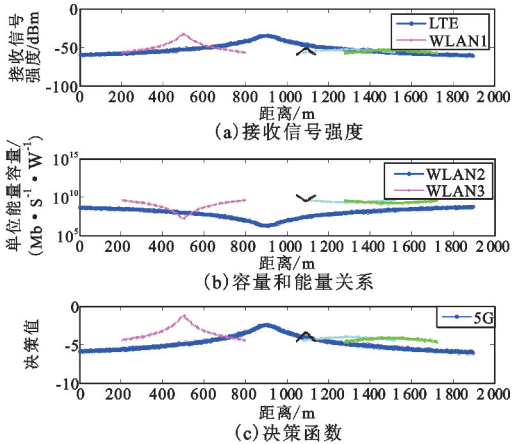


图 2 不同算法随着用户移动的决策值变化
Fig.2 The decision value changing with different algorithms as the user moves

图 3 为不同算法随时间变化的网络选择。从图中可看出,多属性垂直切换算法比基于 RSS 切换算法在高效小区驻留的时间要长,同时比基于单位能量容量的垂直切换算法有更少的切换次数。

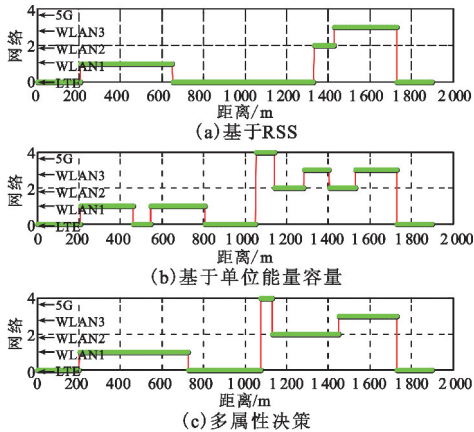


图 3 不同算法随时间变化的网络选择
Fig.3 Network selection of different algorithms with time changed

图 4 是不同算法的能量消耗情况。由图可知,基于单位能量容量的算法更节能,因为小区配置的发射功率小,即单位时间的消耗能量就小。基于 RSS 算法主要是根据功率大小来决策,功率大的选择接入这样的机制更耗能。基于多属性的垂直切换算法综合考虑了网络中不同属性对网络决策的不同贡献,能更公平更合理地利用不同属性接入到最优网络。

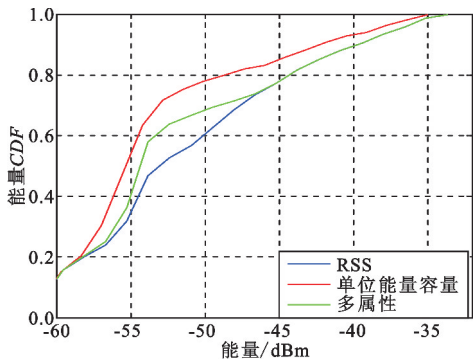


图 4 不同算法的能量消耗
Fig.4 Energy consumption of different algorithms

5 结束语

本文通过分析宏小区中部署不同半径的微小区在能量和容量上带来的好处,给出了单位能量容量这一能效因子,利用候选小区中每单位能量上所能提供容量的大小来决定最优网络的接入,以此来使移动用户接入的网络能效最优。同时,将这一能效因子对现有多属性垂直切换算法做了能效扩展。仿

真结果表明,基于单位能量容量的算法较传统切换算法能节省 10% 左右的能量,但是切换次数比较多。将单位能量容量因子引入到多属性决策算法中,研究表明,较传统切换算法和基于单位能量容量算法在能量和切换次数上有所改善,既达到了能量的高效利用的效果(7% 左右)又提高了用户的通信体验质量,符合节能减排的发展趋势。然而,实际中网络负载的不均匀性使得部分小区处于空闲状态,浪费了大量的能量。因此,下一步工作主要是结合小区开关进行能效最优的垂直切换算法研究。

参考文献:

- [1] HAIDER A, GONDAL I, KAMRUZZAMAN J. Dynamic dwell timer for hybrid vertical handover in 4G coupled networks[C]//Proceedings of 2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Budapest, Hungary:IEEE,2011:1-5.
- [2] JI X, ZHANG J, ZHU S. A novel vertical handoff algorithm for UMTS and WiMAX heterogeneous overlay networks[C]// Proceedings of 2015 International Conference on Information Science and Control Engineering. Shanghai:IEEE,2015:578-581.
- [3] AYYAPPAN K, KUMAR R. QoS based vertical handoff scheme for heterogeneous wireless networks[J]. International Journal of Research & Reviews in Computer Science,2010(1):1-6.
- [4] CHOI H H, LIM J B, HWANG H, et al. Optimal handover decision algorithm for throughput enhancement in cooperative cellular networks[C]// Proceedings of 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall). Ottawa, Canada:IEEE,2010:1-5.
- [5] BOUALI T, SENOUCI S M. A fuzzy logic-based communication medium selection for QoS preservation in vehicular networks[C]// Proceedings of the 5th ACM Symposium on Development and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications. New York:ACM,2015:101-108.
- [6] HOSSAIN F A, CHOWDHURY A M. User mobility prediction based handoff scheme for 60 GHz radio over fiber network[C]// Proceedings of 2014 IEEE 11th Consumer Communications and Networking Conference. Las Vegas, NV, USA:IEEE,2014:557-562.
- [7] LEEM H, BAEK S Y, DAN K S. The effects of cell size on energy saving, system capacity, and per-energy capacity[C]//Proceedings of 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Cancun, Mexico:IEEE,2010:1-6.
- [8] 李玥,彭木根. 基于虚拟小区的分层异构无线组网方案[J]. 电信科学,2013,29(1):8-14.
LI Yue, PENG Mugen. A novel networking scheme for hierarchical heterogeneous cellular network based on the phantom cell architecture [J]. Telecommunications Science,2013,29(1):8-14. (in Chinese)
- [9] 王竹兵. 异构网络多属性决策判决算法的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2013.
WANG Zhubing. Research on multiple attribute decision making algorithm in heterogeneous network [D]. Nanjing:Nanjing University of Posts and Telecommunications,2013. (in Chinese)
- [10] 亓海涛,刘伟. 3G-WLAN 融合网络中一种新的双模终端设计[J]. 电讯技术,2012,52(6):1003-1008.
QI Haitao, LIU Wei. A novel dual-mode terminal design for 3G-WLAN interworking networks [J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52 (6): 1003 - 1008. (in Chinese)
- [11] ZAHIR T, ARSHAD K, NAKATA A, et al. Interference management in femtocells [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials,2013,15(1):293-311.

作者简介:



李小平(1990—),男,山西吕梁人,2014 年于大同大学获学士学位,现为西安邮电大学硕士研究生,主要研究方向为宽带无线通信技术;

LI Xiaoping was born in Lyliang, Shanxi Province, in 1990. He received the B. S. degree from Datong University in 2014. He is now a graduate student. His research concerns wideband wireless communication technology.

Email:18292861308 @ 163. com

王军选(1970—),男,陕西户县人,2002 年于西安科技学院获硕士学位,2005 年于北京邮电大学信息工程学院获博士学位,现为教授,主要研究方向为下一代无线通信技术;

WANG Junxuan was born in Huxian, Shaanxi Province, in 1970. He received the M. S. degree from Xi'an Institute of Technology and the Ph. D. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2002 and 2005, respectively. He is now a professor. His research concerns next generation mobile communication.

孙长印(1963—),男,陕西人,2000 年于西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室获博士学位,现为副教授,主要研究方向为下一代无线通信技术。

SUN Changyin was born in Shaanxi Province, in 1963. He received the Ph. D. degree from Xidian University in 2000. He is now an associate professor. His research concerns next generation mobile communication.