

一种分布式无线移动通信系统中远端天线单元动态选择模型

蒋占军^{①②} 赵新胜^① 尤肖虎^①

^①(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

^②(兰州交通大学电子与信息工程学院 兰州 730070)

摘要: 分布式无线移动通信系统中,远端天线单元的选择方案将影响移动通信系统的性能。该文基于软切换中激活集的思想,提出了一种远端天线单元动态选择模型,模型依据平均接收信号强度阈值以及延迟计数器确定激活集状态,而阈值由移动台运动速度决定。文章对模型作了详细的理论分析,并经过仿真证明了模型的合理性。

关键词: 移动通信; 分布式无线电系统; 远端天线单元选择; 激活集

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)02-0305-05

A Dynamic RAU Selection Model in Distributed Radio Mobile Communication System

Jiang Zhan-jun^{①②} Zhao Xin-sheng^① You Xiao-hu^①

^①(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

^②(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In distributed radio mobile communications system, Remote Antenna Unit (RAU) selection scheme will influence the system performance. In this paper, a selection model is presented for RAU selection in distributed radio system based on soft handoff theories. The selection strategy is based on received signal strength (RSS) measurements and described as a multiple state Markov chain. The RSS threshold is determined by velocity of MS. Performance analysis results show that numeric data achieved from the model are in good agreement with simulation results, which verifies the validity of the model.

Key words: Mobile communication; Distributed radio mobile communications system; RAU selection criterion; Active set

1 引言

分布式无线移动通信系统具有无线信号的覆盖范围大、系统容量和系统功率效率高等优点,已经被广泛认为是未来移动通信网络中的一种关键的多天线接入方式,并已成为移动通信领域的研究热点^[1-3]。分布式网络中,下行信号由多个远端天线单元(Remote Antenna Units, RAU)同时广播出去;上行信号被多个RAU接收在基站(Base Station, BS)完成信号合并,因此就无线的信号传输模式而言,分布式天线系统可视为软切换(soft handoff)方式的一种逻辑延拓结构。文献[4-5]对单天线蜂窝网络中基于接收信号强度(Received Signal Strength, RSS)的切换模型作了详细的分析。文献[6]已证明软切换能够扩大无线小区的覆盖范围,提高上行链路的性能;然而对于下行链路,软切换会引入更大的干扰以及占用更多的信道资源^[7]。为了克服分布无线系统中存在的类似缺点,文献[8]提出了一种分布式系统控制收发策略,并通过仿真验证了采用RAU选择可以提高链路质量,但是并没有给出具体的理论分析模型。

本文软切换原理的基础上,提出了一种基于接收信号强度的RAU动态选择模型,移动台(Mobile Station, MS)可以同时和几个选定的RAU通信,这些RAU构成该MS的激活集(Active set),并且只有激活集中的RAU可以和MS通信,激活集大小由MS的移动速度决定。该模型可以用于分布式移动通信系统中的收发控制,以及GN-cell间的切换分析。

2 分布式无线网络

分布式无线网络结构^[1]如图1所示,多个RAU通过光纤、电缆连接到相同的BS形成一个GN-cell。RAU可以根据环境需要灵活放置,每个RAU的无线信号覆盖范围称为一个射频单元(RF-cell),通常一个射频小区无线信号覆盖在几十至几百米之间;MSC为移动交换中心, D_{GN} 和 D_{RF} 分别表示GN-cell和RF-cell的覆盖半径。假设每个GN-cell中有 N 个RAU,记作 RAU_i , $i=1,2,\dots,N$ 。

本文主要描述单个GN-cell内根据MS的运动速度实现RAU动态选择问题。为了分析方便,文中采用离散时间模型,抽样时间间隔为 t_s ,抽样时刻统一使用 k 表示。图1中 $d_i(k)$ 表示 k 时刻MS与 RAU_i 之间的距离。文中提出的RAU选择模型以MS接收信号强度为依据,和经典的切换模型相

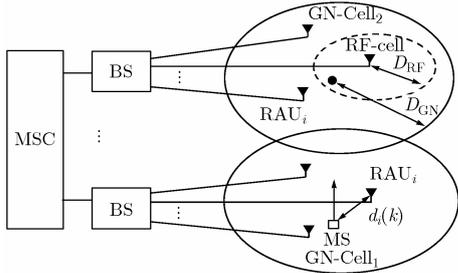


图 1 分布式无线移动通信系统结构

同，信道快衰落可以通过时间平均消除其影响，故 RSS 仅考虑路径衰耗和阴影的作用，记 k 时刻 MS 接收到来自 RAU $_i$ 的 RSS 为 $s_i(k)$ ，则

$$s_i(k) = L_i(k) + u_i(k) = C_1 - C_2 10 \log_{10}(d_i(k)) + u_i(k) \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

其中 $L_i(k)$ 是导频信号平均强度， C_1 由 RAU 发射功率等决定， C_2 是路径衰减系数， $u_i(k)$ 为阴影大小，其自相关函数为^[4,5,9]：

$$E[u_i(k)u_i(k+n)] = \sigma^2 \exp(-|n|t_s v / d_{\text{corr}}) \quad (2)$$

式(2)中 d_{corr} 为阴影自相关衰落距离， σ^2 是阴影方差， v 是 MS 的移动速度。本文采用与文献[3]相同的一阶自回归模型产生 $u_i(k)$ ：

$$u_i(k) = \sqrt{1 - \alpha^2} z_i(k) + \alpha u_i(k-1) \quad (3)$$

式中 $\alpha = \exp(-t_s v / d_{\text{corr}})$ 为产生阴影的自相关系数， $z_i(k)$ 为均值是零，方差是 σ^2 的统计独立的高斯随机变量。从而 $u_i(k)$ 的分布与 $z_i(k)$ 相同。假设不同 RAU 到 MS 的路径上的阴影彼此不相关，同一条路径不同时刻的阴影服从联合高斯分布。

3 RAU 选择模型

RAU 选择模型选用了两个参数：加入阈值和退出计时器来确定 RAU 进出 MS 的激活集，分别记作 T_{add} 和 t_d 。记 k 时刻 MS 的激活集为 $S_{\text{AS}}(k)$ ，若 RAU $_i \notin S_{\text{AS}}(k-1)$ ，且 $s_i(k) > T_{\text{add}}$ ，则 RAU $_i \in S_{\text{AS}}(k)$ ；若 RAU $_i \in S_{\text{AS}}(k-1)$ ，而 $s_i(k) < T_{\text{add}}$ ，则启动退出计时器，但是 RAU $_i$ 仍然保持在激活集中，当 $s_i(k+t_d) < T_{\text{add}}$ 时 RAU $_i$ 才退出激活集，如果 $s_i(k+m) > T_{\text{add}}$ ， $m < t_d$ ，则 RAU $_i$ 仍然保留在激活集中，同时计数器复位。退出计时器的作用主要是为了克服阴影的影响，保证激活集的相对稳定性，因为激活集频繁更新，将会占用更多的系统资源。

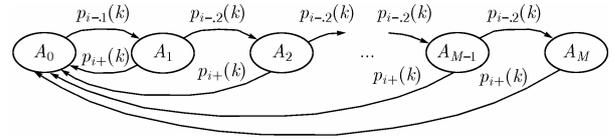
3.1 RAU 状态分析

对于一个特定 MS 的激活集而言，RAU $_i$ 仅有两种状态，用状态指示函数表示如下：

$$I_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{RAU}_i \in S_{\text{AS}}(k) \\ 0, & \text{RAU}_i \notin S_{\text{AS}}(k) \end{cases} \quad (4)$$

因为 RAU 之间彼此独立，故仅需分析其中一个的状态即可。考虑到退出计数器的作用，设 $t_d = Mt_s$ ，RAU $_i$ 的状

态转移过程可以由 Markov 链建模，如图 2 所示，图中状态转移概率 $p_{i-1}(k)$ 如式(5)所示：

图 2 k 时刻 RAU $_i$ 的状态转移模型

$$\begin{aligned} p_{i-1}(k) &= \Pr\{s_i(k) < T_{\text{add}} / s_i(k-1) > T_{\text{add}}\} \\ &= \frac{\Pr\{u_i(k) < T_{\text{add}} - L_i(k), u_i(k-1) > T_{\text{add}} - L_i(k-1)\}}{P\{u_i(k-1) > T_{\text{add}} - L_i(k-1)\}} \\ &= \int_{-\infty}^{T_{\text{drop}} - L_i(k)} Q_x(T_{\text{add}}, L_i(k-1)) f_{u(k)}(x) dx / Q(T_{\text{add}}, L_i(k-1)) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $Q(T, L) = \text{erfc}((T-L)/(\sqrt{2}\sigma))/2$ ， $Q_x(T, L) = \text{erfc}((T-L-\rho x)/(\sqrt{2(1-\rho)^2}\sigma))/2$ ， $f_{u(k)}(x) = \exp(-x^2/(2\sigma^2))/(\sqrt{2\pi}\sigma)$ 为 $u(k)$ 的一阶概率密度，同理可得：

$$\begin{aligned} p_{i-2}(k) &= \Pr\{s_i(k) < T_{\text{add}} / s_i(k-1) < T_{\text{add}}\} \\ &= \int_{-\infty}^{T_{\text{add}} - L_i(k)} [1 - Q_x(T_{\text{add}}, L_i(k-1))] f_{u(k)}(x) dx \\ &\quad / [1 - Q(T_{\text{add}}, L_i(k-1))] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} p_{i+}(k) &= \Pr\{s_i(k) > T_{\text{add}} / s_i(k-1) < T_{\text{add}}\} \\ &= \int_{-\infty}^{T_{\text{add}} - L_i(k-1)} Q_x(T_{\text{add}}, L_i(k)) f_{u(k)}(x) dx \\ &\quad / [1 - Q(T_{\text{add}}, L_i(k-1))] \end{aligned} \quad (7)$$

因为当 RAU $_i$ 停留在状态 A_m ， $m = 1, 2, \dots, M-1$ 时 $I_i(k) = 1$ ，从而：

$$S_{\text{AS}}(k) = \bigcup_{m=0}^{M-1} A_m \quad (8)$$

此外，由图 2 可以得到 RAU $_i$ 状态转移矩阵：

$$\begin{aligned} \Pi_i(k-1, k) &= \begin{bmatrix} 1 - p_{i-1}(k) & p_{i-1}(k) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{i+}(k) & q(k) & p_{i-2}(k) & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ p_{i+}(k) & 0 & 0 & \dots & q(k) & p_{i-2}(k) \\ p_{i+}(k) & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 - p_{i+}(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $q(k) = 1 - p_{i-2}(k) - p_{i+}(k)$ 。到此，就可以计算出停留在图 2 中各状态的概率，将其记作 $P_{i,A}(k) = (p_{i,A_0}(k), p_{i,A_1}(k), \dots, p_{i,A_M}(k))$ ，则： $P_{i,A}(k) = P_{i,A}(k-1)\Pi_i(k-1, k)$ 。所以给定初始值 $P_{i,A}(0)$ ，通过逐步迭代即可得到 $P_{i,A}(k)$ ，进而可得到 RAU $_i$ 时刻 k 在 MS 激活集中的概率，记作 $p_i(k)$ ：

$$\begin{aligned} p_i(k) &= \Pr\{\text{RAU}_i \in S_{\text{AS}}(k)\} = \sum_{m=0}^{M-1} p_{i,A_m}(k) \\ &= p_i(k-1) + p_{i,A_M}(k-1)p_{i+}(k) - p_{i,A_{M-1}}(k-1)p_{i-2}(k) \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 模型性能参数

本文采用激活集的平均大小, 激活集更新次数, 以及通信中断概率^[9]来描述RAU选择模型的性能。MS可以同时与多个RAU通信, 这些RAU组成了激活集。又由式(10)即可得 k 时刻激活集的平均大小为:

$$N_{\text{act}}(k) = \sum_{i=1}^N p_i(k) \quad (11)$$

对于给定的MS的激活集而言, 各RAU状态的改变正反映了该激活集的变化情况, 因此本文中采用所有RAU相对MS激活集的变化次数来描述激活集的变化情况, 记其为 N_{var} 。因为在 k 时刻状态发生变化的概率为:

$$p_{i,\text{var}}(k) = p_{i,A_{M-1}}(k-1)p_{i-2}(k) + p_{i,A_M}(k-1)p_{i+1}(k) \quad (12)$$

所以

$$N_{\text{var}}(k) = \sum_{i=1}^N p_{i,\text{var}}(k) \quad (13)$$

在该模型中, 在下面两种情况下通信会出现中断: 第一, 激活集为空, 其概率为:

$$\begin{aligned} \Pr\{S_{\text{AS}}(k) = \phi\} &= \prod_{i=1}^N \Pr\{\text{RAU}_i \notin S_{\text{AS}}(k)\} \\ &= \prod_{i=1}^N (1 - p_i(k)) \end{aligned} \quad (14)$$

第二, 激活集非空, 但是由于退出计时器的作用, 来自激活集中各RAU的信号受阴影的影响均低于实现正常通信的强度, 将满足正常通信所需的最小信号强度记作 T_{int} , 则此概率为:

$$\begin{aligned} \Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / S_{\text{AS}}(k) \neq \phi\} \\ = \prod_i \Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / S_{\text{AS}}(k) \neq \phi\} \end{aligned} \quad (15)$$

式(15)中 $i \in \{i | \text{RAU}_i \in S_{\text{AS}}(k)\}$ 由于

$$\begin{aligned} \Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / \text{RAU}_i \in S_{\text{AS}}(k)\} \\ = \Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / s_i(k) > T_{\text{add}}\} p_{i,A_0}(k) / \sum_{m=0}^{M-1} p_{i,A_m}(k) \\ + \sum_{m=1}^{M-1} (\Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / s_i(k-1) < T_{\text{add}}\} p_{i,A_m}(k)) \\ / \sum_{m=0}^{M-1} p_{i,A_m}(k) \end{aligned} \quad (16)$$

因为 $T_{\text{add}} > T_{\text{int}}$, 所以式(16)右侧第1项为0, 并且

$$\sum_{m=0}^{M-1} p_{i,A_m}(k) = p_i(k), \text{故第2项为:}$$

$$\begin{aligned} \Pr\{s_i(k) < T_{\text{int}} / s_i(k-1) < T_{\text{add}}\} \sum_{m=1}^{M-1} p_{i,A_m}(k) / p_i(k) \\ = \frac{(1 - p_{i,A_0}(k) - p_{i,A_M}(k)) \int_{-\infty}^{T_{\text{int}} - L_i(k)} [1 - Q_x(T_{\text{add}}, L_i(k-1))] f_{u(k)}(x) dx}{p_i(k) [1 - Q(T_{\text{add}}, L_i(k-1))]} \end{aligned} \quad (17)$$

最终得到中断概率 $p_{\text{out}}(k)$ 为式(14)和式(15)之和, 平均中断概率为:

$$P_{\text{out}} = \left(\sum_{k=1}^K p_{\text{out}}(k) \right) / K \quad (18)$$

其中 K 为通信过程中的总采样次数。

3.3 动态阈值分析

除 T_{add} 和 t_d 之外, MS的移动速度也可以作为一个必要的参数, 来控制模型的性能参数的变化。移动通信系统中典型的速度如表1所示^[10]:

表1 MS 移动的典型速度

平均速度	<20cm/s	1m/s	10m/s	20m/s	>30m/s
实例	几乎静止	步行	正常行驶车辆	快速行驶车辆	高速行驶车辆

通常RF-cell的半径 D_{RF} 在300~500m左右, 按照通常通话的平均时长3min计算, 对于10m/s运行的MS, 在一次通话过程中, MS会穿过多个RF-cell, 此时为保证较低的通信中断概率, 需要较大的激活集来提供可靠的无缝链接; 对于低速MS, 一旦激活集确定, 整个通话过程中可能不会再变化, 所以只需较少的RAU就能够满足通信要求。当 t_d 一定时, T_{add} 是影响3.2节中3个性能参数的唯一指标, 所以, 我们采用 v 来动态调节 T_{add} 大小。

首先需要对 T_{add} 的可调范围作严格限定, T_{add} 太大或太小都会导致较大的中断概率。一方面, 每个RF-cell的覆盖半径至少应能够保证GN-cell无缝覆盖, 能够保证GN-cell无缝覆盖的RF-cell的最小半径记为 $D_{\text{RF},\text{min}}$; 另一方面, 考虑到对相邻GN-cell中的MS的干扰以及路径衰耗, 要求每个RF-cell的覆盖范围不能大于GN-cell的半径 D_{GN} , 所以选择:

$$\begin{cases} T_{\text{add},\text{max}} = C_1 - C_2 10 \lg(D_{\text{RF},\text{min}}) \\ T_{\text{add},\text{min}} = C_1 - C_2 10 \lg(D_{\text{GN}}) \end{cases} \quad (19)$$

然后按照MS速度的变化动态调节 T_{add} , 如式(20)所示在这种约束条件下, $N_{\text{act}} \leq N$ 。式中 v_{max} 为设定的MS最大速度, 本文中 $v_{\text{max}} = 30\text{m/s}$ 。

$$T_{\text{add}}(v) = \begin{cases} T_{\text{add},\text{max}} - v(T_{\text{add},\text{max}} - T_{\text{add},\text{min}}) / v_{\text{max}}, & v \leq v_{\text{max}} \\ T_{\text{add},\text{min}}, & v > v_{\text{max}} \end{cases} \quad (20)$$

4 仿真分析

图3给出了一个GN-cell实例以及MS在其中的移动轨迹, 该GN-cell由9个RAU均匀分布构成, GN-cell的半径为 $D_{\text{GN}} = 1000\text{m}$, 本节将以其为例作理论计算与仿真分析, 并对二者的结果做比较, 所得结论同样适用于其它结构的GN-cell。各参数取值如下: $C_1 = 0\text{dB}$, $C_2 = 3$, $\sigma = 6\text{dB}$, $d_{\text{corr}} = 20\text{m}$ 。考虑到对相邻小区的干扰以及路径衰耗, 取 $T_{\text{int}} = C_1 - C_2 10 \lg(D_{\text{GN}}) - 1\text{dB}$ 。

假设MS以速度 $v = 10\text{m/s}$ 由A点匀速运动到B点, 为了得到准确的仿真统计结果, 在MS的运动路径上作10000次仿真后完成数据统计。取 $t_s = 0.1\text{s}$, $t_d = 2t_s$, 此时对应

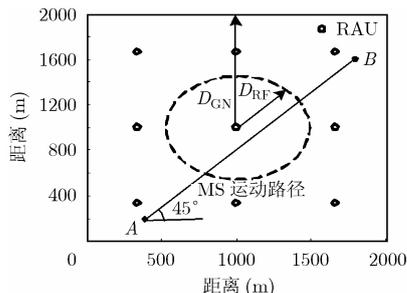


图 3 广义小区结构和 MS 移动路径

的路径抽样距离为 $d_s = vt_s = 1\text{m}$ 。各性能参数的曲线如图 4 所示, 图中实线是理论分析结论通过数值积分得到的结果, 虚线是仿真结果, 可以看出二者吻合良好, 从而证明了模型的合理性。其中图 4(a)给出了 N_{act} 与 T_{add} 之间的关系, 减小 T_{add} 会扩大激活集; 图 4(b)给出了 N_{var} 曲线, 容易理解当 T_{add} 很大以及很小时, N_{var} 都会比较小。当 $N_{\text{act}} = 9$ 时 N_{var} 达到最小, 但根据 T_{int} 的取值, T_{add} 不能取得很小, 此时距离 MS 较远的 RAU 将不能满足通信要求。图 4(c)是中断概率曲线, 随着 T_{add} 的降低, P_{out} 会降低。图 5 进一步给出了平均中断概率与模型参数之间的关系, 当 $T_{\text{add}} < -77\text{dB}$ 时, $P_{\text{out}} < 10\%$ 。

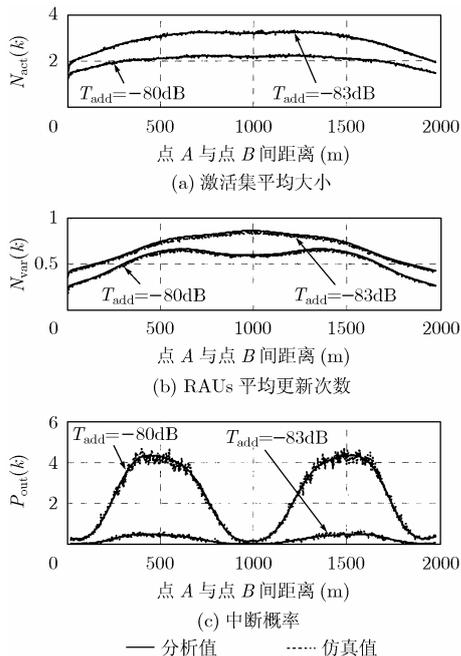


图 4 各性能参数曲线

如图 3 所示的网络结构中, $D_{\text{GN}} = 1000\text{m}$, $D_{\text{RF.min}} = 2^{1/2}D_{\text{GN}}/3$, 所以 $T_{\text{add.min}} = -90\text{dB}$, $T_{\text{add.max}} = -80.2\text{dB}$ 。由图 5 可知, 当 $T_{\text{add}} < -80.2\text{dB}$ 时, $P_{\text{out}} < 5\%$ 。为分析 MS 移动速度对模型性能参数的影响, 假设通话时长设置为 60s(该参数设置为 60s 仅为保证 MS 运动时不离开 GN-cell), MS 以不同速度从 A 点向 B 点移动, T_{add} 按照式(20)变化。图 6 和图 7 分别给出了激活集平均大小和所有 RAU 的平均

更新次数。可见随速度增大, N_{act} 会增大, 从而为 MS 提供更可靠的链接, 其代价是 N_{var} 也会增大, 这将占用了更多的网络资源; 此外由图 7 可看出增加 t_d 会降低 N_{var} , 即 t_d 对维持激活集的稳定度有所贡献。

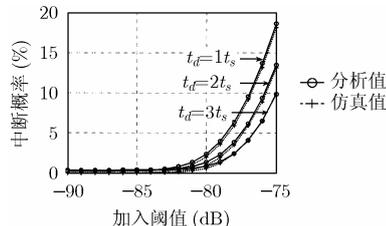


图 5 平均中断概率与模型参数之间的关系

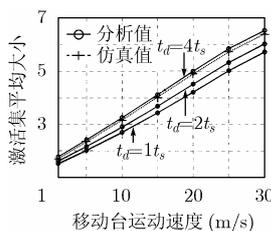


图 6 激活集平均大小

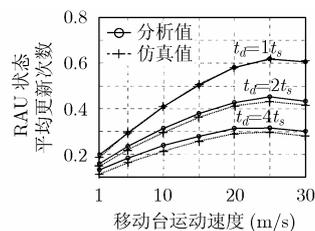


图 7 RAU 状态平均更新次数

5 结束语

本文基于软切换中激活集的思想, 提出了一种远端天线单元的 Markov 模型, 以及根据 MS 移动速度动态调节激活集大小的策略。文章作了详细的理论分析, 并通过仿真对进一步验证了模型的合理性。该模型可以用于分布式移动通信系统中的收发控制, 以及广义小区之间越区切换分析等方面。

参考文献

- [1] 尤肖虎, 赵新胜. 分布式无线电和蜂窝移动通信网络结构. 电子学报, 2004, 32(12A):16-21.
- [2] Zhou Shidong, Zhao Ming, and Xu Xinbin, *et al.* Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access. *IEEE Commun. Magazine*, 2003, 41(3): 108-113.
- [3] Kerpez K J. A radio access system with distributed antennas. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 1996, 45(2): 265-275.
- [4] Vijayan R and Holtzman J M. A model for analyzing handoff algorithms. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 1993, 42(3): 351-356.
- [5] Zhang N and Holtzman J M. Analysis of CDMA soft-handoff algorithm. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 1998, 47(2): 710-714.
- [6] Viterbi A J, Viterbi A M, and Gilhousen K S, *et al.* Handoff extends CDMA cell coverage and increases reverse link capacity. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1994, 12(8): 1281-1287.
- [7] Das S, Macdonald W M, and Viswanathan H. Sensitivity

- analysis of handoff algorithms on CDMA forward link. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 2005 54(1): 272-285.
- [8] Lee J H, Roh J H, and Kwun J H, *et al.* A controlled distributed antenna system for increasing capacity in the DS-CDMA System. IEEE 1998 International conference on universal person communications, Florence, Italy, Oct. 1998, 1: 345-348.
- [9] Prakash R and Veeravalli V V. Locally optimal soft handoff algorithms. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 2003, 52(2): 347-356.
- [10] Fei H and Neeraj K S. Priority-determined multiclass handoff scheme with guaranteed mobile QoS in wireless multimedia network. *IEEE Trans. on Vehic. Tech.*, 2004, 53(1): 118-135.
- 蒋占军: 男, 1975年生, 在职博士生, 主要研究方向为未来移动通信网络结构及其关键技术.
- 赵新胜: 男, 1963年生, 教授, 主要研究方向为移动通信系统和通信网络系统的体系结构、网络协议等.
- 尤肖虎: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为未来宽带移动通信理论与技术、智能信号处理与通信等.