

# 异构无线通信系统的协同分集性能研究

彭木根, 王文博, 张倩倩, 纪晓东

(北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘要:** 提出了一种基于协同机理的异构无线通信机制, 研究了影响该异构协同通信系统分集传输性能的关键因素, 从理论上给出了第二跳链路采用和不采用时间分集方案时中断概率和协同中继节点数量、第一跳和第二跳链路的信道增益、标称功率等的关系. 数值分析结果表明异构协同分集性能主要受分集机制、协同中继节点数、第二跳链路小尺度衰落、标称功率等因素影响.

**关键词:** 异构无线通信系统; 协同通信; 中断概率

**中图分类号:** TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)01-0021-05

## Performance Investigation of Cooperative Diversity in Heterogeneous Wireless Communication Systems

PENG Mergen, WANG Wenbo, ZHANG Qianqian, JI Xiaodong

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Key Laboratory of Universal Wireless Communication, Ministry of Education, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A cooperative theorem based heterogeneous wireless communication mechanism is presented, and key factors impacting on the cooperative diversity of heterogeneous communications are evaluated. An outage probability analysis solution is presented for the second hop with/without time diversity schemes, which is related to the cooperation relay number, the channel gains of the first and the second hop, the normalized power, and etc. Numerical results show that there exists some main facts impacting on the relay channel's outage, such as diversity mechanisms, cooperative relay number, the second hop's small scale fading, and normalized power.

**Key words:** heterogeneous wireless communication system; cooperative communication; outage probability

### 1 引言

异构无线通信网络的互联互通是目前业界关注的焦点, 目的在于充分利用目前存在的各种无线网络, 在只使用一种模式终端的前提下就能够接入各种异构无线接入网络, 实现便捷通信, 获得好的服务质量. 异构无线网络的融合可分为核心网和接入网融合两种类型. 核心网融合主要是基于全 IP 网络的融合, 它对现有无线接入网改动较小, 但存在传输时延大、经过网络实体多、需要占用有限的接入网和传输网资源等缺点<sup>[1]</sup>. 接入网融合大部分的研究集中在异构无线资源管理和异构移动性管理等<sup>[2]</sup>. 然而, 目前一般假设两个异构无线接入网是对等网络, 没有考虑移动运营商希望移动蜂窝网络占主导地位的需求, 即没有以目前的蜂窝移动网络为主要架构, 各种短程的宽带无线接入网络作为一种补充方式, 通过对蜂窝移动网络的集中控制和管理, 实现异构

无线网络的互联互通, 且提高整体网络的性能. 简化蜂窝移动网络的网络设计等.

为了提高网络的通信质量和扩展网络的覆盖范围, 业界对中继技术进行了广泛深入的研究. Laneman 等最早在 2003 年给出了同构中继信道环境下使用分布式空时编码获得分集增益时在一定信噪比条件下的中断概率, 证明了采用多中继节点能显著提高分集增益<sup>[3]</sup>. 而在文献[4]则进一步指出, 中继节点选择有一个合理值, 过多的中继节点并不能提高单链路的性能, 给出了在完全独立分布信道时选取不同数量中继节点的中继概率, 并就非完全独立分布信道时的中断概率底限进行了研究. 但文献[4]在进行中断概率分析时假设第一跳和第二跳链路的信噪比是相同的, 且每跳链路都采用严格的时间进行划分, 这 and 实际系统有较大差别. 文献[5]对 CDMA 制式的用户协同分集进行了详细描述, 对基于同构的半双工协同中继机制进行了理论分析; 文献[6]提

出了采用路由选择的策略以获得好的协同分集增益;而文献[7]中则进一步讨论了如何自适应获得好的协同分集和复用增益,从中断概率的角度分析了自适应协同分集和复用的策略.综上所述,目前大部分研究成果都基于同构中继链路进行分集和复用的研究,假设第一跳链路和第二跳链路通过时分进行区分,中继节点采用半双工通信模式,并且第一跳和第二跳的信道条件相同.

为了满足以基础架构网为主网,各种短程无线接入网作为补充子网接入主网的需求,本文首先提出了一种通过无线中继节点实现异构无线网络互联互通的通信机制,给出了系统模型.考虑到异构协同通信系统的中继节点采用解码转发的全双工通信模式,且第一跳链路和第二跳链路采用不同的通信机制,链路特性有较大差别,所以异构协同中继链路的性能和同构中继链路有很大差别,有关异构中继链路的性能以及影响其性能的关键因素在本文中专门研究.多中继分集的中断概率理论模型是其他关键技术研究的基础,对异构协同中继链路的中断概率理论进行分析和对性能进行评估是研究的首要问题.本文给出了第二跳链路采用时间分集和不采用时间分集的理论分析模型,并讨论了影响异构中继系统性能的关键因素,包括第一跳和第二跳链路小尺度衰落、标称接收功率、协同异构中继节点数量等.

## 2 系统模型

为了保证高速数据传输,特别是保证无论处于离基站近还是离基站远的用户都能获得一样的业务和服务质量,B3G/4G需要采用中继技术和协同技术.中继技术的引入主要源于未来采用高频(如5GHz)使得基站的覆盖范围大幅度下降,为了扩展基站覆盖范围和不大增加基站处的控制和管理复杂度而专门提出来的.而协同技术是为了生成单一网络或者单一技术所不具有的能力,通过协同处理后的网络或者技术的功能大于每个组成部分的功能之和,即追求系统理论中的“涌现”效应.

通过异构中继节点的协同,可以实现异构无线通信系统间的高速数据传输和无缝融合.本文所提的基于异构协同机理的异构无线接入网络的系统模型如图1所示,第一跳的无线接入技术(RAT1)可以是支持全移动的蜂窝移动通信技术,而RAT2可以是实现高速数据传输的短程无线宽带接入技术.通过“异构协同中继节点”(如图中的CRN1和CRN2)可以实现RAT1和RAT2间的高速互联互通,为处于RAT2覆盖范围的RAT2\_UE1提供接入RAT1\_BS的服务,从而简化异构无线网络的设计,实现无缝漫游.

为了解决两种异构无线接入网的传输瓶颈,异构无线中继节点需要协同以保证第一跳和第二跳的传输速率匹配.异构协同中继节点(如CRN1和CRN2)将采用解码转发(DF)机制,哪些潜在的CRN能作为RAT2中的异构协同中继节点由RAT1\_BS根据终端的反馈信息集中调度决定.为了简化设计,RAT2的终端配置为单模,它需要接入RAT1才能获得相应的服务.异构协同中继节点在接收到同构源节点发送来的信号之后,会将接收到的信息进行解码,然后再进行分布式编码发送给异构目标节点.为了获得分集增益,在对解码后的信号进行编码时,异构协同中继节点可以选择不同的码本发送给目标节点,从而获得协同分集增益.也就是说,从下行链路来看,RAT1\_BS和多个CRN可以采用组播通信机制,而多个CRN和RAT2终端间通信可以采用具有发射分集的多址通信机制.从上行链路来看,多个CRN收到来自RAT2终端发来的信息后,首先将进行编码,然后再把具有相同源信息但不同编码后的数据流通过多址方式发送给RAT1\_BS,在RAT1\_BS处将获得分集增益.

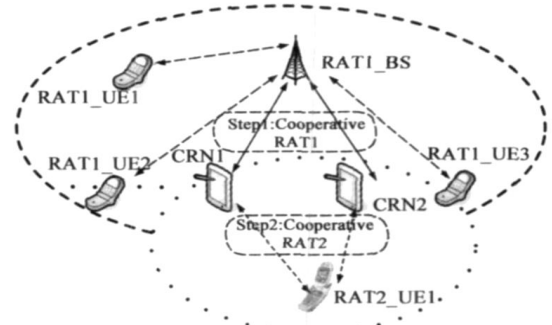


图1 异构无线通信系统的协同通信结构

在下面的理论分析中,我们集中在下行链路进行分析.第一跳采用广播通信方式,只有那些能正确解码的中继节点才可能向目标用户转发经过分布式空时编码的数据.当多个中继节点向目标用户转发数据时,可以采用时间分集,也可以采用频率分集、码分集、空间分集等.考虑到终端一般只设置一套射频和一套天线,所以频率分集和空间分集可以不考虑.如果使用码分集方案,需要保证到达目标用户的信息完全同步,如果不同步会带来非常大的干扰.从单位时间来看,频率分集、码分集、空间分集采用时域正交的传输方案,具有一定的相似性.为了简化,本文将从采用和不采用时间分集接收方案两方面进行理论分析推导.

## 3 理论分析

假设发射端 $i$ 到接收端 $j$ 的小尺度信道衰落特性表示为 $h_{ij}$ ,背景噪声为 $N_0$ .考虑了路径损耗的标称接收功率为 $P$ .这里的标称功率指不考虑小尺度衰落的接

收功率, 它包含了大尺度衰落(即路径损耗)的影响. 接收端的信噪比可以表示为:

$$\Omega_j = P_j |h_j|^2 / N_0 \quad (1)$$

对于分组数据业务来说, 理论比特传输效率可以表示为:

$$r_j = \log_2(1 + \beta \Omega_j) = \log_2(1 + \beta P_j |h_j|^2 / N_0) \quad (2)$$

其中参数  $\beta$  和业务的服务质量(即传输要求的误码率 BER)密切相关, 在瑞利信道中, 其可以表征为:

$$\beta = \frac{-1.5}{\ln(5 \cdot BER)} \quad (3)$$

如果采用链路自适应技术, 如自适应编码调制等, 信道的实际符号传输效率可以表示为:

$$c_j = f(\log_2(1 + \beta P_j |h_j|^2 / N_0)) \quad (4)$$

其中函数  $f(\cdot)$  和采用的调制编码方式密切相关.

对于异构协同通信系统来说, 第一跳采用广播通信, 潜在的可用中继节点要求其接收的符号效率大于预定门限值, 其概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P[c_j > C_s] &= P[|h_j|^2 > \frac{2^{R_s} - 1}{\beta_s P_{sr} / N_0}] \\ &= P[|h_j|^2 > \gamma_s] \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $C_s$  为第一跳广播链路的用户符号传输效率门限值,  $R_s$  为  $C_s$  的反  $f$  函数, 从符号效率转变为比特效率,

即  $R_s = f^{-1}(C_s)$ . 对单条链路来看,  $\gamma_s = \frac{2^{R_s} - 1}{\beta_s P_{sr} / N_0}$ , 其中  $P_{sr}$  为第一跳链路广播发送时  $P_j$  的标称功率,  $\beta_s$  为源到中继节点的  $\beta$  值,  $|h_j|^2$  表征第一跳链路的小尺度衰落, 由于可以看作是高斯信道, 所以它服从参数为  $\lambda_s$  的指数分布. 对接收节点  $i$  来说, 可用的中继节点集合  $D_i$  满足:

$$D_i = \{j: c_j > C_{sr}, j = 1, \dots, J\} \quad (6)$$

通过协同中继集中的多中继译码转发, 目标接收节点  $i$  符号传输效率可以表征为:

$$r_i = f(\log_2(1 + \beta_{rd} \sum_{j \in D_i} P_j' |h_{ij}|^2 / N_0)) \quad (7)$$

$P_j'$  为第二跳链路的标称功率, 对应的目标标称功率可以表征为  $P_{rd}$ . 无线信道增益  $(|h_{ij}|^2)$  服从参数为  $\lambda_{rd}$  的指数分布, 实际比特传输效率等于门限值  $C_{rd}$  的概率可以表示为:

$$P[r_i = C_{rd}] = P\left[\sum_{j \in D_i} (|h_{ij}|^2) = \frac{2^{R_{rd}} - 1}{\beta_{rd} P_{rd} / N_0}\right] \quad (8)$$

令  $\gamma_{rd} = \frac{2^{R_{rd}} - 1}{\beta_{rd} P_{rd} / N_0}$ ,  $\beta_{rd}$  为中继节点到目标用户的  $\beta$  值,  $C_{rd}$  为中继节点到目标节点的用户比特传输效率门限值,  $R_{rd}$  为  $C_{rd}$  的反  $f$  函数, 即  $R_{rd} = f^{-1}(C_{rd})$ .

如果经过  $|D_i|$  个中继节点进行分集传输, 则对于目标接收节点  $i$  来说, 其总的中断概率可以表示为:

$$P[r_i < C_{rd}] = \sum_{j \in D_i} P[r_i < C_{rd} | D_i] P[D_i] \quad (9)$$

要获得整条中继链路的中断概率, 需要分别计算第一跳链路和第二跳链路的中断概率. 第一跳进行广播通信时, 假设共计  $J$  个中继节点, 其中只有  $k$  个异构中断节点能正确解码转发的概率可以表示为:

$$P[k | D_i | = k] = \binom{J}{k} \left( e^{-\lambda_s \gamma_s} \right)^k \left( 1 - e^{-\lambda_s \gamma_s} \right)^{J-k} \quad (10)$$

而对于第二跳链路来说, 在有  $k$  个异构中断节点能正确解码转发的前提下, 其中断的概率可以表示为:

$$P[r_i < C_{rd} | D_i | = k] = P\left[\sum_{j \in D_i} (|h_{ij}|^2) < \gamma_{rd}\right] \quad (11)$$

对于第二跳的每条中继链路来说, 既然信道增益  $(|h_{ij}|^2)$  服从参数为  $\lambda_{rd}$  的指数分布, 则它的矩母函数(MGF)可以表示为:

$$M_j[(|h_{ij}|^2)] = \frac{\lambda_{rd}}{(|h_{ij}|^2) + \lambda_{rd}} \quad (12)$$

假设第二跳链路每条中继链路完全相互独立, 则选择  $k$  个中继节点时所有中继链路之和的 MGF 可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$M_k[(|h_{ij}|^2)] = \left[ \frac{\lambda_{rd}}{(|h_{ij}|^2) + \lambda_{rd}} \right]^k \quad (13)$$

对上式使用反拉普拉斯变换, 则根据 MGF 可以获得上式的概率分布, 然后转换为累积概率分布(CDF), 则式(11)可以表示为:

$$P\left[\sum_{j \in D_i} (|h_{ij}|^2) < \gamma_{rd}\right] = 1 - e^{-\lambda_{rd} \gamma_{rd}} \sum_{j=1}^k \frac{(\lambda_{rd} \gamma_{rd})^j}{j!} \quad (14)$$

综合公式(9)、公式(10)和公式(14), 整个链路的中断概率可以表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \sum_{k=0}^J P[r_i < C_{rd} | D_i | = k] P[D_i | = k] \\ &= \sum_{k=0}^J \left\{ 1 - e^{-\lambda_{rd} \gamma_{rd}} \sum_{j=0}^k \frac{(\lambda_{rd} \gamma_{rd})^j}{j!} \right\} P[D_i | = k] \\ &= \sum_{k=0}^J \left\{ 1 - e^{-\lambda_{rd} \gamma_{rd}} \sum_{j=0}^k \frac{(\lambda_{rd} \gamma_{rd})^j}{j!} \right\} \\ &\quad \times \binom{J}{k} \left( e^{-\lambda_s \gamma_s} \right)^k \left( 1 - e^{-\lambda_s \gamma_s} \right)^{J-k} \end{aligned} \quad (15)$$

如果第二跳链路采用非时分集方案, 则从单位时间来看, 比特传输效率可以表示为:

$$r_j = \log_2(1 + \beta P_j |h_j|^2 / N_0) \quad (16)$$

需要注意的是, 如果采用异步的码分集传输, 或者采用不理想的频率分集和空间分集, 则会存在多址间干扰, 上式中的  $N_0$  不仅仅代表热噪声, 还代表中继节点间的信号干扰. 由于干扰建模超出了本文的研究范畴, 这里不讨论.

式(15)中的  $\gamma_s$  和  $\gamma_{rd}$  有如式(17)的关系:

$$\gamma_{sr} = \frac{2^{R_{sr}} - 1}{\beta_{sr} P_{sr} / N_0}; \quad \gamma_{rd} = \frac{2^{R_{rd}} - 1}{\beta_{rd} P_{rd} / N_0} \quad (17)$$

但如果第二跳链路采用时间分集传输方案, 假设有  $k$  个中继节点, 则:

$$r_{ij} = \frac{1}{k} \log_2(1 + \beta P_{ij} |h_{ij}|^2 / N_0) \quad (18)$$

在单位时间内每条多址链路的比特传输效率可以表征为  $R_{rd}/k$ . 所以有:

$$\gamma_{sr} = \frac{2^{R_{sr}} - 1}{\beta_{sr} P_{sr} / N_0}; \quad \gamma_{rd} = \frac{2^{k R_{rd}} - 1}{\beta_{rd} P_{rd} / N_0} \quad (19)$$

对于两跳链路来说, 第一跳和第二跳链路的符号比特传输效率要求相等, 即  $C_{rd} = k * C_{sr}$ . 如果它们使用的编码调制方式相同, 则有  $R_{rd} = k * R_{sr}$ .

由上面的分析可知, 整条中继链路的中断概率与第一跳链路和第二跳链路的标称功率 ( $P_{sr}$  和  $P_{rd}$ )、调制编码方式 ( $\beta_{sr}$  和  $\beta_{rd}$ )、比特传输效率门限值 ( $R_{rd}$  和  $R_{sr}$ )、中继节点数量 ( $k$  和  $J$ )、中继信道小尺度衰落 ( $\lambda_{sd}$  和  $\lambda_{jd}$ ) 等密切相关. 由于调制编码方式和比特传输效率门限值和实际系统密切相关, 所以可以重点评估中断概率与标称功率、中继节点数量、第一跳和第二跳链路信道小尺度衰落等因素的关系.

#### 4 数值分析

在下面的数值仿真分析中假设  $R_{rd} = 1 \text{bit/s/Hz}$ ,  $\beta_{sr}$ 、 $\beta_{rd}$ 、 $E[\lambda_{sr}]$ 、 $E[\lambda_{rd}]$  都为 1, 其中  $E[\cdot]$  表示均值. 如果不考虑第二跳链路采用时间分集方案, 即  $R_{rd} = R_{sr}$ , 则仿真结果如图 2 所示. 图 2 给出了中继节点个数与中断概率在不同接收功率条件下的关系. 此时假设中继节点处的接收功率和终端用户处接收到的来自中继节点的功率相等, 这里所说的接收功率是指不考虑小尺度衰落的标称接收功率. 数值仿真分析结构表明, 系统的中断概率和选择的中继节点数密切相关, 可供选择的中继节点数越大, 则中断概率越小.

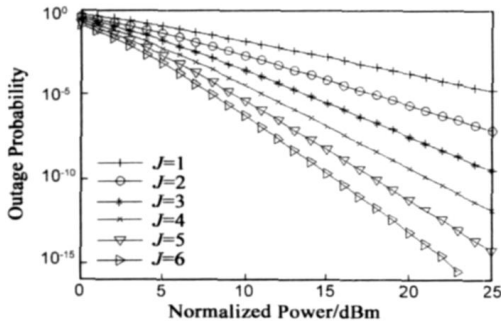


图2 非时间分集时的中继链路性能

如果第二跳链路采用时间分集通信机制, 即  $R_{rd} = k * R_{sr}$ , 则仿真结果如图 3 所示. 对采用时间分集的通信方式来说, 选择的中继节点数越多, 则获得的分集增益会越大, 但单位时间内一个中继节点得到服务的概

率越小, 所以系统传输效率并不会随着中继节点数量的增加而变好, 中继节点数量的确定有一个最优值. 当中继节点数量小于该最优值时, 系统性能随中继节点数量增加变好; 但当中继节点数量大于该最优值时, 系统性能随中继节点数量增加变差. 从图中可知, 当第二跳链路使用 4 个中继节点时, 链路的中断概率在不同发射功率下都能保持较好的性能.

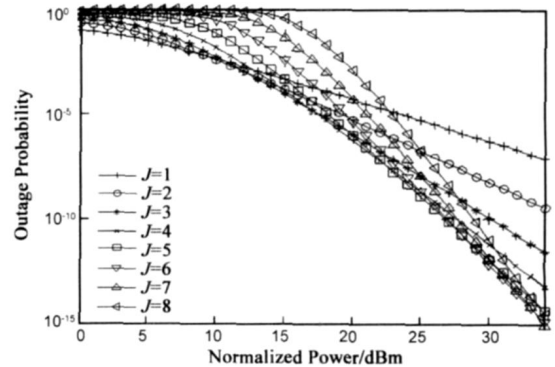


图3 时间分集时的中继链路性能

中继性能除了和中继节点数有关外, 还与第一跳和第二跳链路的小尺度衰落特征密切相关, 在前面的性能分析中假设  $E[\lambda_{sr}]$ 、 $E[\lambda_{rd}]$  都为 1. 假设选择的中继节点数为 4, 且采用时间分集接收方案, 图 4 给出了当  $E[\lambda_{sr}]$  固定为 1,  $E[\lambda_{rd}]$  可变时标称功率和中断概率的关系. 显然, 当第一跳链路固定, 第二跳链路的小尺度归一化均值越小, 中断概率越小. 为了提高中继链路的性能, 在时间分集通信链路中, 需要尽量减小第二跳链路的衰落, 以提高中继链路性能.

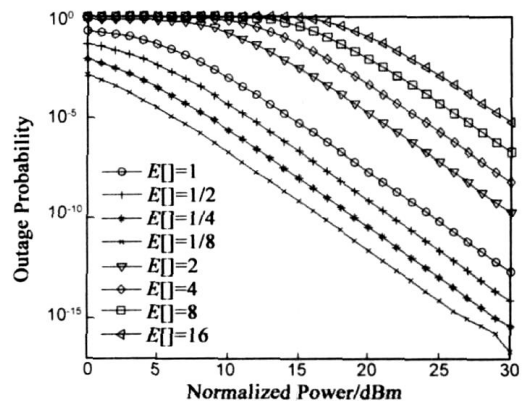


图 5 则是在第二跳采用时间分集, 第二跳链路  $E[\lambda_{rd}]$  为 1,  $E[\lambda_{sr}]$  可变时功率和中断概率的关系. 显然, 当标称功率较大时, 第一跳链路的小尺度衰落对中继链路的性能影响不大. 但当标称功率较小, 小尺度衰落均值越小, 由于中继节点无法正确解码, 所以中断概率较大; 小尺度衰落均值越大, 中断概率显著下降. 当功率足够大时, 由于第一跳链路不是传输瓶颈, 所以信道状况对其影响不大.

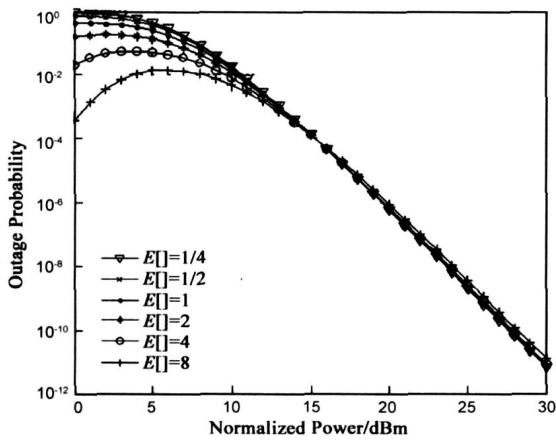


图5 第一跳链路小尺度衰落对中继性能影响

## 5 总结

采用本文所提基于协同机理的异构无线中继传输方案,可以显著提高传统蜂窝网络的性能,实现和其他补充覆盖无线网络的互联互通,且解决异构无线接入网传输瓶颈等问题。本文的理论分析和数值分析结构表明,异构协同中继第二跳链路传输方案对系统性能影响非常大。如果采用时间分集方案,则中继节点选择一个最优值。否则,选择的中继节点越多,中断概率越小,中继性能越好。另外,第二跳链路的小尺度衰落对中断概率影响较大,在实际工程中需要仔细优化。

选择的中继节点数越多系统的开销越大。从网络优化角度来看,为每个用户需要选择合适的中继节点是必要的,这是一个全局多优化目标问题。未来工作需要基于效用-成本函数,进一步研究采用时分复用和不采用时分复用分集方案下的中继节点选择和中断概率的关系,评估中继节点数量、标称功率、第一跳链路和第二跳链路小尺度衰落等对系统性能的影响。

### 参考文献:

- [1] Rung Hung Gau. Modeling concurrent search in ad hoc IP heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56 (5): 3137- 3148.
- [2] Mugen Peng, Wenbo Wang. A unified architecture and key techniques for interworking between WIMAX and beyond 3G/4G systems [J]. Wireless Personal Communication, 2008, 45 (1): 67- 90.

- [3] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49 (10): 2415- 2425.
- [4] Zhao Y, Adve R, Lim T J. Outage probability at arbitrary SNR with cooperative diversity [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9 (8): 700- 702.
- [5] A Sendonaris, E Erkip, B A Azhang. User cooperation diversity Part I: System description [J]. IEEE Transaction on Communications, 2003, 51 (11): 1927- 938.
- [6] A Bletsas, A Khisti, D P Reed, A Lippman. A simple Cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24 (3): 659- 672.
- [7] K Azarian, H El Gamal, P Schniter. On the achievable diversity multiplexing tradeoff in half duplex cooperative channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005, 51 (12): 4152 - 4172.
- [8] Wiebe R Pestman. Mathematical Statistics [M]. Walter de Gruyter Publishers. 1998.

### 作者简介:



彭木根 男, 1978年9月出生, 出生于江西省永丰县。2005年7月毕业于北京邮电大学获信号与信息处理专业博士学位, 毕业后留校任教至今。目前研究重点为无线网络协同信息论、下一代无线宽带通信系统无线资源管理算法和协议设计、多跳无线中继网络和网络编码技术等。已发表国际期刊论文4篇, 国际会议论文60余篇, 国内学术期刊20余篇, 出版专著6本。

E-mail: pmg@bupt.edu.cn



王文博 男, 教授、博士生导师。1965年1月出生于河北安国。1990年7月毕业于北京邮电大学获信号与信息处理专业博士学位。现为教育部“泛网无线通信”重点实验室学术委员会副主任、信息产业部TD-SCDMA 科研开发和产业化项目专家组成员、北京通信学会常务理事、北京邮电大学学报编委、北京邮电大学学术委员会常委。主要从事移动通信无线传输理论和技术研究、无线通信网络理论研究以及数字信号处理与软件无线电理论研究等。已发表论文100余篇, 出版专著7部。

E-mail: wbwang@bupt.edu.cn