doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.03.009
引用格式:戴晓龙,张静,纪晓龙,等.一种基于混合智能算法的协作中继选择新方法[J].电讯技术,2014,54(3):296-301.[DAI Xiao-long, ZHANG Jing, JI Xiao-long, et al. A New Method for Cooperative Relay Selection Based on Hybrid Intelligent Algorithm[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(3):296-301.]

一种基于混合智能算法的协作中继选择新方法*

戴晓龙,张 静**,纪晓龙,马悦忻
(上海师范大学 信息与机电工程学院,上海 200234)

摘 要:针对多用户多中继场景下协作通信系统的中继选择问题,提出了一种基于混合智能算法的协作中继选择新方法。不同于现有的为每个源节点分配一个中继节点的中继选择方法,新方法建立了为每个源节点分配一个或多个中继节点的优化模型,以最大化多用户多中继协作系统的最小接收信噪比为优化目标,采用结合了模拟退火与遗传算法的混合智能算法来搜寻中继选择问题的最优解。仿真结果表明,所提方法可显著提高目的端的接收信噪比,且算法具有较强的全局搜索和快速寻优能力。

关键词:协作通信;中继选择;模拟退火;遗传算法
中图分类号:TN929.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-893X(2014)03-0296-06

A New Method for Cooperative Relay Selection Based on Hybrid Intelligent Algorithm

DAI Xiao-long, ZHANG Jing, JI Xiao-long, MA Yue-xin
(College of Information & Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: Aiming at the problem of relay selection in multi-user multi-relay cooperative communication system, a new mothod for cooperative relay selection based on hybrid intelligent algorithm is proposed. The proposed method is different from the current relay selection method which assigns one relay node for each source node. It establishes an optimization model which assigns one or more relay nodes for each source node, and maximizes the minimum received signal-to-noise ratio (SNR) of multi-user multi-relay cooperative system. A hybrid algorithm which combines simulated annealing(SA) and genetic algorithm(GA) is employed to search the optimal solution for relay selection problem. Simulation results show that the proposed method can significantly improve the received SNR at the destination, and the algorithm possesses strong global search capability and fast optimization capability.

Key words: cooperative communication; relay selection; simulated annealing; genetic algorithm

1 引 言

协作分集作为一种有效的抗衰落技术,通过共享无线通信环境中其余用户终端的天线,形成虚拟多天线阵列,从而有效抵抗多径衰落并提高系统容

* **收稿日期**:2013-10-29;**修回日期**:2014-01-07 Received date:2013-10-29;Revised date:2014-01-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61101209);上海市自然科学基金资助项目(11ZR1426600);上海师范大学重点学科基金资助项目(DZL126)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61101209); The Natural Science Foundation of Shanghai (11ZR1426600); The Program of Shanghai Normal University (DZL126)
** **通讯作者**:jannety@shnu.edu.cn **Corresponding author**:jannety@shnu.edu.cn

量[1],成为了近年来研究的一个热点。在协作通信系统中,协作中继节点的选取是影响最终传输质量的关键因素。按源节点的数量可将中继选择划分为单用户中继选择和多用户中继选择。单用户中继选择是只考虑单个源节点的中继节点选择,目前许多中继选择的研究大多都基于单用户中继选择,其中较经典的是机会中继选择[2]。然而在实际系统中,多个用户节点同时需要进行信息传输的场景更为常见。由早期的单用户单中继扩展到单用户多中继,再进一步延伸到多用户多中继应用,是协作通信技术研究的发展趋势。对于这种较大规模的无线网络,研究如何同时为多个源节点分配相应的中继节点比起单个源节点的情况更加复杂。

目前学术界对于多用户多中继场景下的协作中继选择已有较多的研究。文献[3]采用多项式时间的解法,均衡各用户的公平性,最大化最小信道容量,具有快速收敛的优点。文献[4]提出了一种异构网络的中继选择方案,通过排序和子带分割法,对用户进行两两迭代运算,对多用户分配合适的中继,最大化网络平均效用值。文献[5]将吞吐量最大化与信道配置的组合优化问题转换成最大加权双向匹配问题,采用多项式时间方法求解。此外,无线网络中存在多个发送接收对时,文献[6]提出了一种基于最大化最小接收信噪比的最优以及次优的中继节点配对机制,提高了系统误比特率性能。此外,当无线网络中存在多个发送接收对时,文献[7]提出了最优以及次优的中继节点配对机制,优化了系统中断概率性能。以上这些文献研究的都是为每个源节点选择一个合适的中继节点,当源节点选择多个协作中继来协助转发数据时,可以获得额外的涌现增益[8-9]。文献[10]研究了为每个源节点选择多个中继节点的一种基于博弈论的中继选择算法,然而该算法假设一个中继节点可同时协助多个源节点,对于硬件复杂度的要求较高,不适用于实际应用。

本文对多用户多中继场景下为每个源节点选择多个协作中继的情况展开研究,分析了该情况下中继选择问题的复杂性,结合模拟退火与遗传算法,提出一种基于混合智能算法的中继选择方法,该方法具有较高的全局寻优能力和寻优效率,可以有效地提升目的端接收信噪比。

2　系统模型

考虑一个通用的多用户多中继场景下协作通信系统模型。如图 1 所示,系统包含 M 个源节点、N 个中继节点和一个目的节点,中继节点个数 N 始终大于源节点个数 M。中继节点采用半双工模式转发信号,对接收到的信号采取放大转发(Amplify-and-forward, AF)处理方式。受移动终端设备复杂度的限制,中继节点只能同时协助转发一个源节点的数据。所有信道均为准静态瑞利衰落信道,在一次传输周期内信道状态保持不变。对于每一条“源节点-中继节点-目的节点”链路,信号发送总功率限制为 P,源节点占用一半总功率,剩余功率由中继节点平均分配。将 M 个源节点标记为 $\{S_1, S_2, \cdots, S_i, \cdots, S_M\}$,$N$ 个中继节点标记为 $\{R_1, R_2, \cdots, R_i, \cdots, R_N\}$。将第 i 个源节点 S_i 与第 j 个中继节点 R_j 之间的信道衰落系数定义为 f_{ij};中继 R_j 与目的节点之间的信道衰落系数为 g_j。f_{ij} 和 g_j 为均值为零、方差为 δ_{ij}^2 和 δ_{jD}^2 的复高斯随机变量。

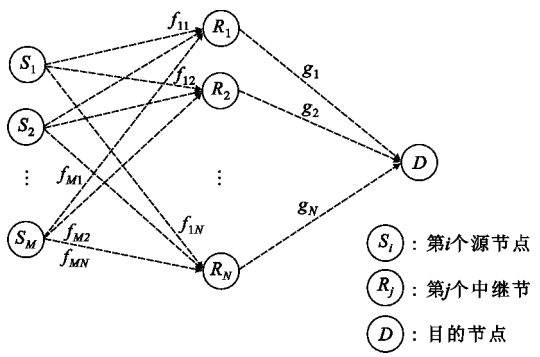

图 1　系统模型

Fig. 1 System model

定义一个 $M\times N$ 的中继选择矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$,矩阵内的元素均为取值为 0 或 1 的二进制数。其中第 i 行、第 j 列元素 α_{ij} 表示源节点 S_i 是否选择中继节点 R_j 协助其转发信息至目的节点,其表达式为

$$\alpha_{ij}=\begin{cases}1, & \text{源节点 } S_i \text{ 选择与中继节点 } R_j \text{ 协作}\\ 0, & \text{源节点 } S_i \text{ 不选择与中继节点 } R_j \text{ 协作}\end{cases} \tag{1}$$

由于每个源节点至少需要一个协作中继节点协助转发信号,且一个中继节点同时只能协作一个源节点,因此矩阵每一列至多只有一个非零元素,每一行至少有一个非零元素。

3　基于混合智能算法的中继选择

3.1　问题描述

当源节点 S_i 选择多个中继协助转发时,目的节点处接收到的信号 y_D^i 为多个中继转发信号副本的

叠加,表示为

$$y_D^i = \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_{ij}\sqrt{P_{S_i}}\sqrt{P_{R_j}}\,|f_{ij}g_i|}{\sqrt{P_{S_i}\,|f_{ij}|^2 + N_0}}x + \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha_i\sqrt{P_{R_j}}\,|g_i|}{\sqrt{P_{S_i}\,|f_{ij}|^2 + N_0}}n_j + n_D \tag{2}$$

式中,P_{S_i}和 P_{R_j}为源节点和中继节点的发送功率;n_j 和 n_D 为中继和目的端的高斯白噪声,N_0 为白噪声的方差。在目的节点处的接收信噪比 SNR_D^i 为

$$SNR_D^i = \frac{P_{S_i}P_{R_j}\left(\sum_{i=1}^{N}\frac{\alpha_{ij}\,|f_{ij}g_i|}{\sqrt{P_{S_i}\,|f_{ij}|^2 + N_0}}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\frac{\alpha_{ij}^2P_{R_j}\,|g_i|^2N_0}{P_{S_i}\,|f_{ij}|^2 + N_0} + N_0} \tag{3}$$

根据“木桶理论”,多用户多中继协作通信系统的容量性能受限于所有“源节点-中继节点-目的节点”链路中接收信噪比最小的那条链路。因此,本文将最小接收信噪比作为优化目标,表示为

$$\begin{cases}\max[\min(SNR_D^1, SNR_D^2, \cdots, SNR_D^M)] \\ \text{s. t. } P_{S_i} = \sum_{j}^{N} P_{R_j} = \frac{P}{2}\end{cases} \tag{4}$$

以式(4)为优化目标搜寻出最优的中继选择矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$。当中继采用 AF 转发方式时,目的节点处的接收信号相互耦合[11],信噪比函数式(3)是 $\boldsymbol{\alpha}$ 的非线性函数,此时对最优中继选择矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$ 的求解问题是一个非线性 0-1 规划问题。非线性 0-1 规划问题是一个 NP 完全问题,通过穷举搜索法对该问题的所有候选解进行遍历是获得最优解的最有效方法。然而穷举搜索的计算复杂度很高,尤其是在多用户多中继场景下,候选解个数随着中继个数呈指数式增长,对所有候选解进行遍历将会花费较多的计算时间。通过传统数值优化方法求解非线性规划问题得到全局最优解的概率较低,目前许多研究都采用一些智能寻优算法对非线性规划问题进行求解。然而对于网络规模较大的多用户多中继场景,由于解空间较大,一些传统的智能算法受限于有限的寻优能力无法应用于求解该问题的全局最优解。

模拟退火的退火过程可避免寻优过程陷入局部最优解,加强了算法在解空间的全局寻优能力;遗传算法的内在并行性则有利于提高寻优过程的寻优效率。若能将模拟退火算法与遗传算法相结合,互相取长补短,则可以开发出性能优良的全局搜索算法。本文采用一种结合模拟退火与遗传算法的混合智能算法对中继选择问题进行求解。根据所求问题特性,将模拟退火过程与遗传算法相结合,设计了染色体编码方式、交叉算子、变异算子和适应度函数,提高算法全局搜索能力的同时使算法适用于求解本文所描述的中继选择问题。

3.2 混合智能算法构成要素

3.2.1 模拟退火过程

遗传算法具有过早收敛的缺陷,容易陷入局部最优解。模拟退火算法具有较强的局部搜索能力,能够使搜索过程避免陷入局部最优解。通过在遗传算法的寻优过程中结合模拟退火过程,引入温度控制参数 T,对当前解重复产生“新解→计算目标函数差→替换或舍弃新解”的迭代,从而避免寻优过程陷入局部最优解,提高混合算法的全局寻优能力。

3.2.2 染色体编码方式

本文所需解决的多用户多中继选择问题是个多变量的复杂寻优问题,若采用传统的二进制编码方式会导致染色体较长,导致计算量大、精度低、计算时间长,且无法满足每个中继同时只能协助一个源节点这一约束条件。根据中继选择矩阵每一列至多只有一个非零元素这一特点,采用实数编码来构成染色体,可使得中继选择问题的所有候选解均能由实数编码的染色体来表现,且满足于约束条件。将中继选择矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$ 映射为中继选择向量 $\boldsymbol{\beta}$:

$$\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \cdots \quad \beta_j \quad \cdots \quad \beta_N] \tag{5}$$

$\boldsymbol{\beta}$ 内的元素 β_i 为$[0, M]$之间的整数,表示矩阵 $\boldsymbol{\alpha}$ 中第 j 列的非零元素所在的位置。在实际中则表示中继 R_j作为源节点 S_{β_j}的协作中继,当β_i 为 0 时则表示 R_j不与任何一个源节点协作。

3.2.3 交叉操作

交叉操作是按照一定的交叉概率 P_c在种群中随机选取两个染色体进行的,通过在染色体中随机选定一个或两个交叉点,两个染色体在交叉点前后进行部分交换,产生新的个体。交叉操作能够有效地保证种群内染色体的多样性,避免寻优过程快速收敛,同时还能使父代染色体的优良个体特性一定程度被保持。对于复杂的多变量问题,采取两点交叉和均匀交叉的效果优于传统的一点交叉。本文算法中的交叉操作采用两点交叉的方法。

3.2.4 变异操作

变异操作通过随机改变种群中染色体某些基因的值,从而避免进化过程中某些重要信息的永久性

丢失,确保搜索空间的完整性,保持种群的多样性,以防止寻优过程陷入局部最优解。对于实数编码的染色体,变异操作采取均匀变异方式,在种群中按照变异概率随机选择一个基因,然后在该基因的定义区间内随机生成一个整数代替该基因,其过程表示如图 2 所示,其中 C'_k 为区间[0,M]之内的一个随机整数。

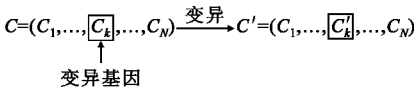

图 2　变异操作

Fig. 2 Mutation operator

3.2.5　适应度函数选择

为了体现染色体的适应能力,引入一个度量函数计算每一条染色体的适应度,称这个函数为适应度函数。在本文的多用户多中继场景下的中继选择问题中,根据式(4),选择最小接收信噪比表达式作为适应度函数:

$$f=\min(SNR_D^1,SNR_D^2,\cdots,SNR_D^i,\cdots,SNR_D^M) \quad (6)$$

3.3　中继选择方法具体步骤描述

基于混合智能算法的中继选择方法具体步骤描述如下:

步骤 1:初始化温度控制参数 $T_k=T_0$,$i=0$,$k=0$,$count=0$,$f_{\text{temp}}=0$,随机产生包含 K 个染色体的初始种群;

步骤 2:采用适应度函数计算当前种群内各染色体的适应度;

步骤 3:若 $T_k>T_{\text{final}}$,或者 $count=loop_{\text{end}}$,则算法结束,输出当前种群内适应度最大的染色体作为中继选择的最优解;否则将进入下一步骤;

步骤 4:若内循环次数 $i<loop_{\text{in}}$,则 $i=i+1$;否则,$i=0$,$T_{k+1}=\partial T_k$,$0<\partial<1$,∂ 为降温系数,$k=k+1$;

步骤 5:根据交叉概率 P_c 从种群中随机选取染色体作为父代,对每一对父代进行如下操作:

(1)由父代 P_1、P_2 使用交叉算子进行交叉操作,根据概率 P_m 使用变异算子进行变异操作,生成子代 C_1、C_2,并计算 C_1、C_2 的适应度;

(2)若 $f_{C_j}>f_{P_j}$,$j=1,2$,则用 C_j 替换 P_j;否则以概率 $P_{\text{retain}}=\exp((f_{C_j}-f_{P_j})\times 100/T_k)$ 保留 P_j;

步骤 6:若适应度的最大值 $f_{\max}=f_{\text{temp}}$,则 $count=count+1$;否则,$f_{\text{temp}}=f_{\max}$,$count=0$;

步骤 7:返回步骤 2。

中继选择方法流程图如图 3 所示。

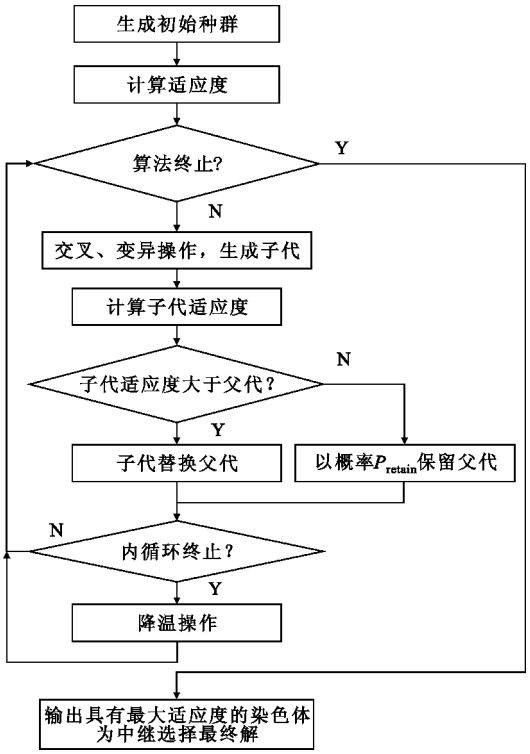

图 3　中继选择方法流程图

Fig. 3 Flowchart of relay selection method

4　仿真分析

为了验证本文提出的基于混合智能算法的中继选择方法的有效性,将其与文献[6]中为每个源节点分配单个中继的基于最大化最小接收信噪比的中继选择方法进行比较;同时,为了检验本文所提方法的全局搜索和快速寻优能力,将该方法与采用穷举搜索法以及采用遗传算法搜寻中继选择最优解的中继选择方法进行了比较。

仿真环境参数设置如下:信道衰落系数的方差 $\delta_{ij}^2=\delta_{jD}^2=0.5$;源节点个数 $M=3$;中继节点个数 $N=9$。设置混合智能算法的参数为:种群大小 $K=50$;初始温度 $T_0=50$,终止温度 $T_{\text{final}}=0.1$,降温系数 $\partial=0.9$;内循环终止次数 $loop_{\text{in}}=20$,终止连续迭代数 $loop_{\text{end}}=50$;交叉概率 $P_c=0.8$,变异概率 $P_m=0.01$(设置混合智能算法参数的问题为将来研究的方向之一,这里不作展开讨论)。为了不失一般性,所有仿真结果的值均为随机运行10^4 次之后的平均结果。

图 4 和图 5 分别给出了不同功率噪声比下各中继选择方法的最小接收信噪比和平均接收信噪比的仿真结果。仿真结果表明,当采用本文提出的基于混合智能算法的中继选择方法时,多用户多中继协

作系统的最小接收信噪比和平均接收信噪比均优于文献[6]的基于最大化最小接收信噪比的中继选择方法。从仿真结果中还可以看到,与采用穷举搜索法相比,采用基于遗传算法的中继选择方法的系统性能低于采用穷举搜索法获得的理论最优性能,表明了遗传算法的寻优能力无法获得多用户多中继场景下的中继选择最优解;采用本文所提方法的系统性能接近于采用穷举搜索,表明了本文所提方法得出的中继选择解接近于理论最优。

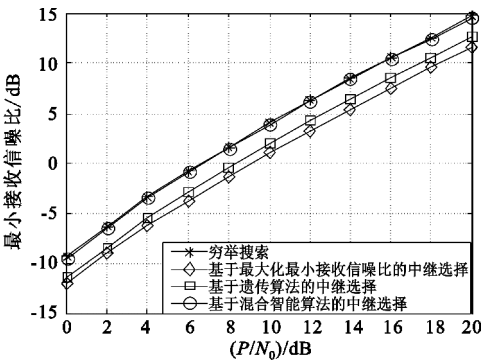

图 4 最小接收信噪比比较

Fig. 4 Comparison of minimum received SNR

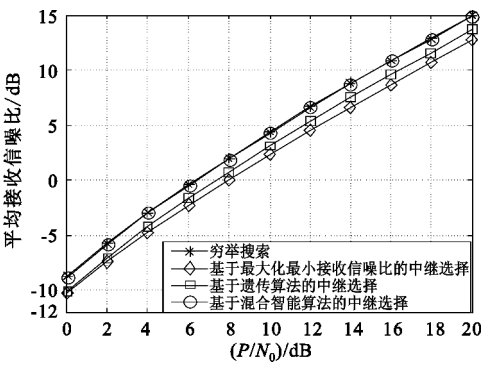

图 5 平均接收信噪比比较

Fig. 5 Comparison of average received SNR

表 1 给出了源节点个数 $M=3$、$P/N_0=15$ dB的情况下,中继节点个数从 5 增加到 10 时分别采用本文中继选择方法和穷举搜索法求解中继选择问题最终解的平均候选解搜索个数。从表中可以看出,随着中继节点个数的增长,穷举搜索法搜索候选解的个数呈指数式增长。采用本文方法求解中继选择问题时,随着中继个数的增加,平均搜索的候选解个数的增涨幅度较小。当中继节点个数较多时,本文方法的平均候选解搜索个数远低于穷举搜索,表明了在网络规模较大时,该方法相对于穷举搜索法具有寻优效率上的优越性。

表 1 不同中继节点个数下平均候选解搜索个数比较

Table 1 Comparison of average searching number of candidate solutions with different number of relays

中继节点个数	搜索个数	
	穷举搜索法	基于混合智能算法的中继选择方法
5	1 024	3 000
6	4 096	3 160
7	16 384	3 521
8	65 536	3 755
9	262 144	4 115
10	1 048 576	4 456

5 结 论

本文研究了多用户多中继协作场景下为每个源节点分配一个或多个中继节点的中继节点选择问题,提出了一种基于混合智能算法的中继选择方法,采用结合了模拟退火与遗传算法的混合智能算法搜寻中继选择问题的最优解,对协作系统中所有传输对的最小接收信噪比进行优化。仿真结果表明,与现有的为每个源节点只分配一个中继节点的中继选择方法相比,本文所提中继选择方法可显著提高目的端的接收信噪比,且具有较强的全局搜索和快速寻优能力。然而,本文的假设任意两个节点之间的信道是准静态瑞利衰落的,下一步工作是研究如何将现有的成功运用到更复杂的衰落环境下。此外,如何根据协作系统的节点数量的变化合理地设置混合智能算法的参数,保证算法具有接近理论最优的全局搜索能力的同时降低算法复杂度,也是未来需要解决的问题。

参考文献:

[1] 郑国强, 邝育军. 空时编码协作中的中继选择与功率分配联合方案[J]. 电讯技术, 2010, 50(2):38-42. ZHENG Guo-qiang, KUANG Yu-jun. Joint Scheme for Relay Selection and Power Allocation in Space-Time Coding Cooperative Communication[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(2): 38-42. (in Chinese)

[2] Bletsas A, Khisti A, Reed D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Select in Areas Communication, 2006, 24(3): 659-672.

[3] Shi Y, Sharma S, Hou Y T, et al. Optimal relay assignment for cooperative Communications[C] //Proceedings

of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). Hongkong: ACM,2008:3-12.

[4] 彭木根, 王文博. 异构无线通信系统的协同中继选择[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(5): 82-87.
PENG Mu-gen, WANG Wen-bo. Cooperative Relay Selection in Heterogeneous Wireless Communication System [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(5): 82-87. (in Chinese)

[5] Liu Y, Tao M. Optimal channel and relay assignment in OFDM-based multi-relay multi-pair two-way communication networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(2):317-321.

[6] Zhang X, Ghrayeb A, Hasna M. Relay assignment schemes for multiple source destination cooperative networks[C] //Proceedings of the 17th International Conference on Telecommunication. Doha: IEEE, 2010: 147-152.

[7] Atapattu S, Jing Yindi, Jiang Hai, et al. Relay Selection and Performance Analysis in Multiple-User Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(8):1517-1529.

[8] 高伟东, 王文博, 袁广翔. 等. 协作通信中的中继节点选取和功率分配联合优化[J]. 北京邮电大学学报, 2008, 31(2): 68-71.
GAO Wei-dong, WANG Wen-bo, YUAN Guang-xiang, et al. Joint Relay Selection and Power Allocation Optimization in Cooperative Communications[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008, 31(2):68-71. (in Chinese)

[9] Chen Dan, Ji Hong, Li Xueming, et al. A Novel Multi-Relay Selection and Power Allocation Optimization Scheme in Cooperative Networks[C] //Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Sydney: IEEE, 2010:1-6.

[10] Yang D, Fang X, Xue G. HERA: An optimal relay assignment scheme for cooperative networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30 (2): 245-253.

[11] Jing Y, Jafarkhani H. Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8 (3): 1414-1423.

作者简介:

戴晓龙(1989—),男,上海人,2011 年于上海师范大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为协作通信技术;

DAI Xiao-long was born in Shanghai, in 1989. He received the B. S. degree from Shanghai Normal University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns cooperative communication techniques.

Email: princeloong@aliyun.com

张　静(1971—),女,江西上犹人,2004 年于上海交通大学获博士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为移动通信、自适应信号处理、统计信号处理;

ZHANG Jing was born in Shangyou, Jiangxi Province, in 1971. She received the Ph. D. degree from Shanghai Jiaotong University in 2004. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research concerns mobile communication, adaptive signal processing, statistical signal processing, etc.

Email: jannety@shnu.edu.cn

纪晓龙(1987—),男,山东高密人,2010 年于潍坊学院获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为异构无线网络切换技术;

JI Xiao-long was born in Gaomi, Shandong Province, in 1987. He received the B. S. degree from Weifang University in 2010. He is now a graduate student. His research concerns handover techniques in heterogeneous wireless networks.

马悦忻(1990—),女,安徽淮南人,2012 年于上海师范大学获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向协作通信技术。

MA Yue-xin was born in Huainan, Anhui Province, in 1990. She received the B. S. degree from Shanghai Normal University in 2012. She is now a graduate student. Her research concerns cooperative communication techniques.