

# 协同通信中继选择技术的研究

闫力媛<sup>1</sup> 王玥<sup>2</sup> 陈晨<sup>3</sup>

(中国联通陕西分公司运维部 西安 710075)<sup>1</sup>

(武警工程学院基础部共同科目教研室 西安 710086)<sup>2</sup>

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)<sup>3</sup>

**摘要** 协同通信是目前无线通信的研究热点,如何进行协同中继的选择成为协同通信中需要解决的首要问题。提出了协同中继选择技术的评价标准,并对近年来的算法进行了分类分析和比较,最后对协同中继选择算法的发展方向进行了展望。

**关键词** 协同通信, 中继选择, 无线通信, 中继方案

**中图分类号** TN915 **文献标识码** A

## Research on Relay Selection Strategy in Cooperation Communication

YAN Li-yuan<sup>1</sup> WANG Yue<sup>2</sup> CHEN Chen<sup>3</sup>

(Operation and Maintenance Department, China Unicom Shaanxi Branch, Xi'an 710075, China)<sup>1</sup>

(Military Physical Education Teaching and Research group Foundation Department, Engineering College of APF, Xi'an 710086, China)<sup>2</sup>

(National Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)<sup>3</sup>

**Abstract** Cooperation communication is a hot research topic in wireless communication presently. The first problem to be solved is how to select the cooperative relay in cooperation communication. We Proposed a criterion to evaluate the technology of cooperative relay selection. Then we classified, analyzed and compared these algorithms that proposed in recent years. At last, we look forward to the developed direction of the algorithm of cooperative relay selection.

**Keywords** Cooperative communication, Relay selection, Wireless communication, Relay scheme

## 1 引言

无线通信系统中,由于传输环境复杂多变,同时存在多径和快、慢衰落效应,采用多发射和接收天线,即使用多输入/多输出(MIMO)系统,可以获得额外的分集增益,增强无线传输链路的可靠性。近年来,研究空时编码提高空间分集和复用增益一直是无线通信领域研究的热点,但其性能会随着天线间信道衰落的相关性增加而下降。此外,很多移动台受到硬件设备(体积和功耗)的限制,只能配备一对天线,使得MIMO技术的实现变得困难。而协同通信技术的出现使得传统MIMO技术的优势得以发挥。Sendonaris A在文献[1,2]中对蜂窝网络和Ad-hoc网络中的多用户协作分集传输进行了研究,结合系统容量、吞吐量和网络覆盖等方面进行了性能分析,并对协作的配对用户选择和接收机进行了具体的研究和设计。文献[3]中提出了一种低复杂度的协作协议使得一对配置单天线的无线终端可以完全地利用空间分集。文献[4]给出了协作的信息论模型,研究了可达信息率和中断概率,阐明了运用信道编码技术可以得到协作的分集增益。文献[5]

提出在不同协议层都存在协同通信,并且可以引入跨层的设计和优化。

协同通信技术的基本原理是在多用户环境下的单天线用户在传输自己数据信息的同时,也能传送其所接收和检测到的协同用户信息。该技术的实质是利用协同用户的天线与自身天线构成多发射天线,形成虚拟的MIMO系统来得到分集增益。

很显然,协同通信可以带来以下优点。

- 1)更高的空间分集:对抗小尺度衰落和阴影衰落。
- 2)更高的吞吐量/较低的时延;更高的可达数据率,更低的传输时延和重传率。
- 3)减少干扰/降低发送能量;在WSN(Wireless Sensor Network)或蜂窝系统中更好的频率复用。

目前对协同通信的研究主要包括以下方面。

- 1)协同空时编码和信道编码,协同MIMO的核心原理在于协同分布式空时编码,其通过协同MIMO技术,单天线的移动终端也可以实现空间分集。
- 2)协同中继分集复用自适应理论,对于无线中继系统来

本文受国家自然科学基金重点项目(60832005),NSFC-广东联合基金重点项目(U0835004),高等学校学科创新引智计划(B08038),中央高校基本科研业务费专项资金(JY10000901023, JY10000901002)资助。

闫力媛(1979-),女,硕士,主要研究方向为无线通信协作技术, E-mail: 15619280289@wo.com.cn; 王玥(1985-),女,硕士,主要研究方向为协同通信; 陈晨(1977-),男,博士,副教授,主要研究方向为无线近距离通信。

说,通过多个中继节点的相互协同,每个节点类似协同 MIMO 中的一个天线,也可以获得协同 MIMO 增益,提高无线中继系统的性能。

3) 虚拟多天线技术,其实质就是希望利用合作伙伴的天线与自身的天线构成多发射天线,得到分集增益,形成虚拟的 MIMO 系统。

4) 协同的资源分配机制,在协同网络中,由于需要协同节点辅助进行信息的传输,必然导致消耗额外的带宽、时隙和功率等资源,因此与直接通信相比,协同通信需要更加合理的资源分配算法,保证以较低的复杂度和较高的资源利用率获得较好的通信性能。

5) 协同中继选择,与传统蜂窝网络相比,由于中继节点的加入,移动台可以选择不同的中继节点集合来进行数据的转发,因此如何进行协同中继节点选择将是一个需要首要解决的问题。

协同中继选择的基本问题包括:在什么情况下需要进行协同;由谁来判断,中心式还是分布式;存在多个中继节点时,如何选择,选择一个还是多个等问题。

本文第 2 节介绍协同节点选择所要遵循的标准;第 3 节介绍协同中继选择算法分类和比较;最后总结了本文内容,并对将来协同中继选择算法的发展方向进行了展望。

## 2 协同节点选择所要遵循的标准

协同中继选择研究的问题是:在保证一定通信质量的前提下,兼顾自适应性、算法复杂度、网络生命周期、干扰和竞争、中断率和误码率、通信开销等性能,形成优化的协同中继选择算法。不同的应用对应不同的算法,使得设计标准也不尽相同,下面介绍协同中继选择中一般要考虑的条件。

**自适应性:**静态网络中,节点位置是固定的或者节点移动很微小,协同节点选择算法在网络运行前就对各个节点之间是否协同及所采用的协同方式进行设定,算法一旦建立起来就不用经常改变。而在大多数情况下,Ad-hoc 网络的拓扑结构会随着节点的失效或移动而动态变化,此时协同中继选择算法要根据节点的当前位置、移动速度等情况每隔一段时间就重新分配节点之间的协同关系以及协同方式。

**算法复杂度:**算法所涉及网络的多个参数使得该问题变成一个多参数优化问题,这是一个 NP(Non-deterministic Polynomial)问题,如何简化,使算法复杂度降低到系统可以应用的范围,更多地是采用次优算法逼近最优算法来降低算法的复杂度。

**网络生命周期:**网络生命期有多种定义。一般将网络生命周期定义为直到死亡节点的百分比低于某个阈值时的持续时间,也可以通过网络的服务质量度量来定义网络的生命周期。节点多次作为其他节点的协同中继必定会使能量消耗过快,导致该节点能量耗尽而死亡,合理地选择中继保持所有节点的生存时间基本相同,可以有效地增长整个网络的生命周期。

**干扰和竞争:**在中继个数的选择问题上,选择较多的中继节点会使通信的可靠性得到提高,但也会带来更多的干扰。越多的中继个数也就意味着越多的干扰源,以及更大的网络资源消耗。本身各个节点是否成为中继节点是一个竞争的过

程,选择过程中会有冲突,如何选择合适的中继节点以及节点个数使得干扰和竞争减小是评价算法的一个标准。

**中断率和误码率:**中断概率和端到端错误比特概率一直作为衡量一个通信系统性能优劣的标准。信道可支持的传输速率低于业务要求的最低传输速率时会发生中断,中断概率越低,则说明系统的稳定性越好。误码率(Bit Error Rate, BER)是衡量数据在规定时间内数据传输精确性的指标。

**通信开销:**节点之间的协作包括信息的相互交换、信道信息的检测以及各节点的能量现状等,这必定会使网络的开销变大,给系统带来负面影响,只有在通信开销带来的资源消耗低于协作增益时,才能进行协作,否则放弃协作。

## 3 算法分类

研究者基于前面提到的选择标准,提出了很多不同的策略,主要有以下几大类:基于瞬时信道状态的协同中继选择;基于中断概率的协同中继选择;基于信噪比门限的协同中继选择;基于端到端错误比特概率的协同中继选择;基于能量分配的协同中继选择。下面我们将详细介绍。

### 3.1 基于瞬时信道状态的协同中继选择

由于无线信道的时变性,需要中继选择算法具有一定的自适应性,Bletsas 在文献[6]中首先提出了将 MAC 层的机会中继与物理层的协作分集相结合的一种基于网络路径选择的协同节点选择算法。由一个源节点 S、一个目的节点 D 和多个中继节点构成的系统,需要在多个中继节点的候选集合中找到最优的中继节点,进行协同通信。所需的瞬时信道状态信息可以通过 802.11 中的 RTS/CTS 得到。

如图 1 所示, $a_{si}$  为源节点 S 到中继节点  $i$  的信道参数, $a_{id}$  为中继节点  $i$  到目的节点 D 的信道参数, $h_i$  为信道条件。采用最小准则或调和平均准则得到信道条件  $h_i$ ,信道状态较好的信道得到的信道条件  $h_i$  较大。

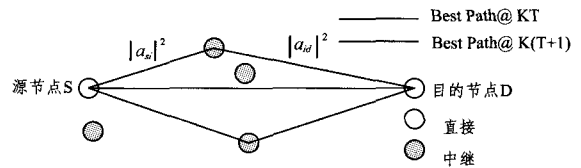


图 1 动态选择最优中继节点

最小准则:

$$h_i = \min \{ |a_{si}|^2, |a_{id}|^2 \} \quad (1)$$

调和平均准则:

$$h_i = \frac{2}{\frac{1}{|a_{si}|^2} + \frac{1}{|a_{id}|^2}} = \frac{2|a_{si}|^2|a_{id}|^2}{|a_{si}|^2 + |a_{id}|^2} \quad (2)$$

开启一个定时器,定时器的退避时间  $T_i$  和信道条件  $h_i$  成反比, $\lambda$  是一个常数。

$$T_i = \frac{\lambda}{h_i} \quad (3)$$

信道条件  $h_i$  越大,则退避时间  $T_i$  越小,定时器就越容易超时。这样,信道条件好的中继节点就会优先接入信道,发送一个 FLAG 帧通知源节点、目的节点和其他中继节点,其他中继节点退出竞争,从而完成一次中继选择,即从可行的中继节点集合中选择一个最好的协同节点。

文献[7]在文献[6]基础上又提出了基于解码重传(De-

code and Forward, DF)下的被动式最佳协作中继选择准则,这种中继选择准则要优于传统的最小准则和调和平均准则。文献[8]提出了一种空时编码协作中的中继选择与功率分配联合方案,称为DD(Destination Decision)方案。该方案由目的终端根据协作终端的信道状态信息进行中继选择与功率分配,并决定各中继发送 STBC(Space-Time Block Code)编码矩阵的哪一行,从而避免了通过中继之间的信息交互进行中继选择的冲突。

### 3.2 基于中断概率的协同中继选择

中断概率实际上是链路容量的另一种表述方式。当信道容量不能满足所要求的用户速率时就会发生中断,其表达式如下:

$$P_{out} = \{R < C(\gamma) = \log_2(1 + \gamma)\} = \{\gamma < 2^R - 1\} \\ = \int_0^{2^R - 1} p(\gamma) d\gamma \quad (4)$$

式中, $R$ 为用户速率, $\gamma$ 为瞬时信噪比, $C(\gamma)$ 表示链路容量, $p(\gamma)$ 表示信噪比概率分布密度, $P_{out}$ 表示中断概率。

文献[9]中提到了一种存在干扰的中继选择协议(relay selection protocol with interference, RSI),该协议以最小化中断概率为目标,选择端到端瞬时信干比(SINR)最大的中继节点转发源节点的消息,如图2所示。

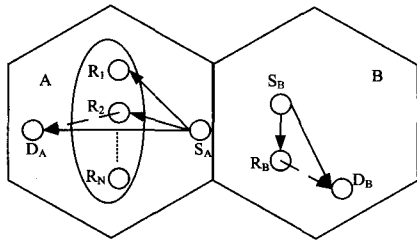


图2 无线协作网络的系统模型

在小区A中,源节点 $S_A$ 要从中继节点集合 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 中选择一个中继节点发送信息到目的节点 $D_A$ 。在小区B中,源节点 $S_B$ 通过中继节点 $R_B$ 传输信息到目的节点 $D_B$ 。分两种情况:

1)源节点 $S_B$ 产生干扰时:如果源节点 $S_B$ 直接传输信息到目的节点 $D_B$ ,则只有源节点 $S_B$ 产生干扰,为了最小化系统中断概率,RSI协议选择的中继节点为:

$$\hat{k} = \arg \max_{k \in R} \min(\rho_{S_A, R_k}, \rho_{R_k, D_A}) \quad (5)$$

式中, $\rho_{S_A, R_k}, \rho_{R_k, D_A}$ 分别为中继传输在中继节点 $R_k$ 和目的节点的SINR,中继传输瞬时端到端的SINR表示为 $\gamma, \gamma_{i,j}$ 表示节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的SINR,在目的节点采用选择合并(Selection Combine, SC)策略合并直接传输和中继传输后,RSI协议的中断概率表示为:

$$P_{out, SC} = P(\rho_{S_A, D_A} \leq \gamma_{th}) P_{out} \quad (6)$$

2)源节点 $S_B$ 和中继节点 $R_B$ 都产生干扰时:如果源节点 $S_B$ 通过中继节点 $R_B$ 发送信息,并且源节点 $S_B$ 与 $S_A$ 同步发送,中继节点 $R_B$ 与 $R_k$ 也是同步发送,则RSI协议选择的中继节点为:

$$\hat{k} = \arg \max_{k \in R} \min\left(\frac{\gamma_{S_A, R_k}}{\gamma_{S_B, R_k} + 1}, \frac{\gamma_{R_k, D_A}}{\gamma_{R_B, D_A} + 1}\right) \quad (7)$$

如果目的节点采用SC合并直接传输和中继传输,则RSI协议的中断概率为:

$$\bar{P}_{out, SC} = P(\bar{\rho}_{S_A, D_A} \leq \gamma_{th}) P(\bar{\gamma} \leq \gamma_{th}) \quad (8)$$

RSI协议不需要中继节点之间交互信息,通过竞争的方式完成数据传输,节省了系统开销,具有较好的实用性。

文献[10]在已知信道状态信息的情况下,逐个比较候选协作伙伴的中断概率,从而获得中断概率最小的协作伙伴。文献[11]基于跨层协作思想,提出了一种基于MAC层和物理层的跨层中继选择方案。该方案解决了中继协作时机问题,以最小中断概率为目标,给出了如何选择中继节点以及分配发射功率的方法。由于参与中继的节点数量增多会使得干扰源的数量增多,文献[12]提出了基于门限的自适应中继选择方案,该方案在满足一定的中断概率的要求下尽可能使中继数量最小。

### 3.3 基于信噪比门限的协同中继选择

文献[13]首先得到了单中继方案的分集,然后概括了允许多于一个中继进行协同的中继选择方法,通过穷举得到了信噪比最优的多中继选择方案,但它的复杂性随着网络规模呈指数增长。为了降低复杂度,提出了一些信噪比次优的多中继选择方法,它们的复杂度随着中继个数的增长呈线性增长,已证明可以得到全分集增益。仿真结果得到,其优于单中继选择方案并且更接近信噪比(Signal to Noise Rate, SNR)最优的多中继选择方案。另外大型网络中多中继选择方案需要在接收端和单中继选择方案相同的反馈比特。

文献[14]根据信道统计特性,研究了放大转发(Amplify and Forward, AF)协作中继网络中的中继选择协作通信方法。首先分析指出在等功率条件下,当信噪比小于某个门限时,选择单个中继节点进行转发(pre-select Single relay AF, SAF)比所有节点都转发(All relays AF, AAF)的中断概率小。基于此信噪比门限提出一种中继选择协作通信方法,并且指出这种选择方法使得SAF的中断概率最小;然后结合功率分配提出了一种使中断概率最小化的最优中继选择协作通信方法;最后为了降低复杂度,提出了一种次优中继选择协作通信方法。

### 3.4 基于端到端错误比特概率的协同中继选择

端到端无错误比特概率除了考虑速率和信噪比外,还考虑了网络物理层使用的调制传输方式以及终端的信号合并方式等。

文献[15]针对编码协作中采用循环冗余校验(CRC)方案会降低系统传输速率的问题,提出了一种改进的门限选择中继方案,该方案首先推导了使用穿孔卷积码情况下系统的误码率上界,并以误码率最小为原则得到了最佳判决门限值,然后利用估计出的协作用户接收信噪比与该门限值比较判断是否协同。

文献[16]根据DF协作网络中继选择的分集阶数,针对DF提出了很多检测方案,协作最大比合并(Cooperative-MAC, C-MAC)可以得到跟最优最大似然译码相同的性能以及更低的复杂度。因此,首先将C-MAC和中继选择算法合并,通过得到平均误码率上限获得全分集增益。为了降低信令开销,将链路自适应再生(Link Adaptive Regeneration, LAR)和中继选择结合。通过获得平均误码率上限,得到当存在两个中继时,中继选择LAR的分集阶数上限是3,下限是 $3 - \xi, \xi$ 是一个任意小的正数。

### 3.5 基于能量分配的协同中继选择

能量合理分配到各个节点可以做到有效地延长每个节点的工作时间,从而延长整个网络的生存时间。

文献[17]提出了在 DF 协同网络中,通过启发式的中继节点选择和功率分配方法以及中继节点位置的布设来降低节点的功率消耗、延长网络生命周期。

文献[18]中为了延长 AF 协作网络的生存时间,提出了联合中继选择和功率分配策略。在接收端以一定的概率能够达到所期望的 SNR 的持续时间就定义为生存时间。在在中继选择基础上考虑到每个中继的局部信道状态信息(Channel State Information, CSI)和局部剩余能量(Residual Energy Information, REI),来选择合适的中继节点进行通信,可以有效地延长网络生存时间。这个方案只需要局部 CSI 和 REI,而性能和得到全局 CSI 和 REI 的最优策略相差无几。

文献[19]中作者在相同的模型下又通过离散化功率的调整范围,使得算法更加实际,同时利用马尔可夫链估计了网络的生存期。

文献[20]在多用户协作通信网络中,提出了分布式的买卖博弈论方案来刺激协作,提高了系统性能。通过两级博弈联合考虑源节点作为买家,中继节点作为卖家的好处。这个方法不仅使源节点明智地在相对好的位置找到了中继节点并从他们处买到了最优的功率,而且通过询问价格使得竞争的

中继节点最大化他们的利用率。这个方法得到了较好的均衡。在较好位置的中继可以在增长源节点利用率方面发挥更好的作用,所以源节点想要从这些优先的中继节点处购买较多的功率。此外,由于和其他中继节点的竞争以及源节点的选择,中继节点会设置合适的价格来吸引源节点购买。

考虑到在网络中总有一些节点和其他节点相比会有更大的机会参与中继,而这些节点的能量也会比其他节点更快用尽,为了提高公平性,文献[21]提出了 FAP(Fair cooperative protocol)。定义了一个功率奖励  $W$ ,如果节点作为中继帮助了其他节点,它的  $W$  就会增长,反之,节点要求其他节点做中继来帮助自己通信,它的  $W$  就会降低。对于每个源节点目的节点对的候选中继集合,源节点在竞争时隙之前要根据功率奖励  $W$  来计算它的请求发送数据率。源节点是否能协作就由  $W$  的大小来决定。只有当  $W$  大于源节点的所有中继所要求的功率之和时才能进行协作。而源节点也要根据代价来选择中继节点,每个源节点都有一个代价功率,在中继范围之内能承担得起代价的节点才会被选为中继节点。

### 3.6 算法比较

以上算法分别从瞬时信道状态信息、中断概率、信噪比门限、端到端错误比特概率和能量分配角度出发研究了协同中继的选择问题,现将各种算法的优缺点进行比较,如表 1 所列。

表 1 各算法优缺点

方法	文献	思想	优点	缺点
基于瞬时信道状态信息的协同中继选择	文献[6-8]	根据瞬时信道条件来选择中继节点,随着信道衰落情况的变化来选择不同的中继节点	自适应性较好,比较灵活,选择出的中继节点的信道状态很好	可能发生碰撞,从而导致无法正确的选择到中继节点
基于中断概率的协同中继选择	文献[9-12]	以减小中断概率,保持通信的可靠性为目标来选择中继节点	保证通信过程更可靠,不容易中断	盲目追求低中断概率会导致采用多节点中继,造成资源浪费
基于信噪比门限的协同中继选择	文献[13,14]	根据信道状态设置信噪比门限,信噪比大于该门限的节点作为中继	选择出了信道状态较好的中继节点	资源分配不均匀
基于端到端错误比特概率的协同中继选择	文献[15,16]	以降低误码率为目标	将物理层调制传输方式和终端信号合并方式考虑进来,更贴近实际	除了高信噪比情况外,中继数量的增多会使误码率降低,需要联合优化
基于能量分配的协同中继选择	文献[17-21]	以延长网络生存周期为目标,合理分配资源	节省能量,有效延长网络生存周期,自适应性较好	复杂度较高

**结束语** 本文介绍了几种协同中继的选择算法,根据不同网络环境、节点个数、协同方式、协同时间等等提出了不同的协同中继选择算法,不同的算法给系统带来不同的优化。

对于协同中继选择已不仅仅局限于单个参数的优化,而是向多参数优化发展。文献[17]就是将中继节点选择和功率分配方法以及中继节点位置的布设结合起来,降低节点的功率消耗、延长网络生存期。文献[22]根据端到端信道增益选择出几组中继节点,功率和最小的一组作为最优中继节点。针对不同的协作传输策略 DF 和 AF 分别提出了中继节点优化选择方法,通过理论分析和相关的仿真,可以证明这两种方法可以在相同的 SNR 情况下获得更多的信道容量。文献[23]提出了一种基于位置信息、基于平均接收信噪比和基于瞬时信道状态的中继选择算法。

单个参数的变化只能改变系统的某一方面性能,而多参数联合优化才能提高系统的整体性能。在进行多参数优化时不仅要考虑中继节点选择的问题还要将系统要采用的协同模式考虑进来,综合考虑选择中继节点,才能使系统更好地优

化,有效完成通信,延长网络的生命周期。

协同中继选择已经取得了初步的研究成果,但是大多数的算法还只停留在理论研究阶段,协同中继选择算法还有许多问题需要进一步研究,特别是需要探索更加实用的技术。以实际应用为背景、多种机制参数联合优化、综合考虑网络性能将是协同中继选择研究的发展趋势。

### 参考文献

- [1] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User Cooperation diversity-Part I: System description[J]. IEEE Transactions on Communication, 2003, 51(10):1927-1938
- [2] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User Cooperation diversity-Part II: Implementation aspects and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Communication, 2003, 51(11):1939-1948
- [3] Laneman J N, Tse D N C, G, et al. Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12):

- [4] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 68-73
- [5] Liu Pei, Tao Zhi-feng, Liu Zi-nan, et al. Cooperative wireless communications A cross-layer approach [J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(4): 84-92
- [6] Bletsas A, Reed D P, Lippman A. A simple cooperative diversity method based on network path selection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 59-672
- [7] 李桥福. 基于解码重传的最佳协作中继选择策略[J]. 信息技术, 2010, 2: 65-67
- [8] 郑国强, 邢育军. 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
- [9] 司江勃, 李赞, 刘增基. 无线协作网络中存在干扰时的中继选择协议[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 72-76
- [10] 洪路峰, 杨晓非, 刘占军. 基于中断概率的协作伙伴选择策略[J]. 广东通信技术, 2010, 2: 39-42
- [11] 邹玉龙, 郑宝玉, 崔景伍, 等. 一种基于跨层机制的中继选择策略及实现[J]. 通信学报, 2008, 29(8): 1-10
- [12] Ban T W, Jung B C, Sung D K, et al. Performance analysis of two relay selection schemes for cooperative Diversity[C]//Proceeding of IEEE 18th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC' 07), Sep 3-7, 2007, Athens. Greece Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2007; 5
- [13] 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
- [14] 吴素文, 王振, 朱近康. 基于信道特性的中继选择协作通信方法研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(11): 1136-1140
- [15] 韩春雷, 葛建华, 林一, 等. 编码协作中的一种门限选择中继方案[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2009, 36(2): 198-202
- [16] Yi Zhi-hang, Kim I-M. Diversity Order Analysis of the Decode-and-Forward Cooperative Networks with Relay Selection [J]. IEEE Transactions on Communication, 2008, 5(7): 1792-1799
- [17] Himsoon T, Siriwongpairat W P, Zhu Han, et al. Lifetime Maximization via Cooperative Nodes and Relay Deployment in Wireless Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 306-317
- [18] Huang Wan-Jen, Hong Yao-win, Kuo C C J. Lifetime maximization for amplify and forward cooperative networks[C]//Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference(WCNC' 07). Mar 11-15, 2007, Hong Kong, China. New York, NY. USA; IEEE, 2007; 814-1318
- [19] Huang Wan-Jen, Hong Yao-Win, Kuo C C J. Discrete power allocation for lifetime maximization in cooperative networks[C]//Proceedings of the 66th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall'07). Sep 30-Oct 3, Baltimore, MD, USA Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2007; 581-585
- [20] Wang Bei-bei, Han Zhu, Liu K J, et al. Distributed Relay Selection and Power Control for Multiuser Cooperative Communication Networks Using Buyer/Seller Game[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7): 975-990
- [21] Dai Lin, Chen Wei, Cimini L J, et al. Fairness Improves Throughput in Energy-Constrained Cooperative Ad-Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 7(8): 3679-3691
- [22] 姜戩, 马建. 一种多跳无线传感器网络中继节点优化选择算法[J]. 计算机科学, 2007, 34(9 专刊): 266-269
- [23] 覃琴, 曾志民, 张天魁. 协作分集中中继选择算法的研究[J]. 电信科学, 2009, 5: 56-61
- [24] 彭木根, 王文博, 等. 协同无线通信原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 244-262

(上接第 358 页)

- [2] Liu M, Gong H G, Mao Y C, et al. A distributed energy-efficient data gathering and aggregation protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(12): 2106-2116(in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16/2106.htm>
- [3] Li Lu-qun. An Optimistic Differentiated Service Job Scheduling System for Cloud Computing Service Users and Providers[C]//2009 Third International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2009: 295-299
- [4] Dubois-Ferriere H, Grossglauser M, Vetterli M. Age matters: Efficient route discovery in mobile ad hoc networks using encounter ages[C]//The Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad-hoc Networking and Computing(MobiHoc), 2003
- [5] Small T, Haas Z. The shared wireless infostation model- a new ad hoc networking paradigm(or where there is a whale, there is a way)[C]//The Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad-hoc Networking and Computing(MobiHoc), 2003
- [6] Chakrabarti A, Sabharwal A, Aazhang B. Using predictable observer mobility for power efficient design of sensor networks[C]//The second International Workshop on Information Processing in Sensor Networks(IPSIN), 2003
- [7] Tian Di, Georganas N D. A Node Scheduling Scheme for Energy Conservation in Large Wireless Sensor Networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2003, 3(2): 271-290
- [8] Yan Ting, He Tian, Stankovic J A. Differentiated Surveillance for Sensor Networks[C]//Conference on Embedded Networked Sensor Systems archive Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems table of contents. Los Angeles, California, USA, 2003; 51-62
- [9] Muruganathan S D, Ma D C F, Bhasin R I, et al. A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Communications Society, March 2005; 8-13
- [10] Ye Mao, Li Cheng-fa, Chen Gui-hai, et al. An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks[J]. Ad-hoc & Sensor Wireless Networks, 2006, 3: 99-119
- [11] Efthymiou C, Nikolettseas S, Rolim J. Energy Balanced Data Propagation in Wireless Sensor Networks [J]. Wireless Networks, 2006, 12(6): 691-707
- [12] 陆传赉. 排队论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社
- [13] 唐焕文, 秦学志. 实用最优化方法(第三版)[M]. 大连: 大连理工大学出版社