

# 针对解码转发协作分集的分布式伙伴节点选择算法

屈春河<sup>1),3)</sup> 杨 景<sup>1),2)</sup> 张国清<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

<sup>2)</sup>(UT 斯达康公司 北京 100027)

<sup>3)</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘 要** 该文研究了在解码转发协作分集系统中的伙伴节点选择问题. 文中首先建立了伙伴节点选择问题的数学模型, 其能够在伙伴节点和目的节点分别满足一定误比特率性能的前提下, 使源节点和伙伴节点的发射功率之和最小化. 因此, 该模型不仅能够开发多用户无线系统所固有的空间分集能力, 显著地提高无线传输性能, 而且能够增加无线网络的通信容量和降低移动节点的能耗. 文中还推导了在瑞利衰减信道中使用 M-QAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation) 时伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式, 从而揭示了系统性能与伙伴节点之间的依赖关系. 根据数学模型和误比特率公式, 文中提出了一种伙伴节点选择算法, 能够在分布式的无线网络环境中以极小的控制协议开销, 逐个消息地选择最优的伙伴节点参与转发消息. 不仅如此, 该算法还能够随着信道状态的变化动态地调整所选择的伙伴节点, 所以对信道状态具有自适应能力. 最后, 文中通过仿真验证了所提出的算法.

**关键词** 协作分集; 误比特率; 伙伴节点选择; 分布式算法

中图法分类号 TP393

DOI 号: 10.3724/SP.J.1016.2010.00726

## Distributed Partner Selection Algorithm for Decode-and-Forward Cooperative Diversity

QU Chun-He<sup>1),3)</sup> YANG Jing<sup>1),2)</sup> ZHANG Guo-Qing<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup>(UTStarcom, Beijing 100027)

<sup>3)</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** In this paper, the authors study the partner selection problem in decode-and-forward cooperative diversity systems. First, the authors present the mathematical model of the partner selection problem, which can minimize the total power consumption of the source and the partner subject to the average bit error rate (BER) constraints at the partner and the destination. Therefore, the model not only can exploit the inherent spatial diversity in multiuser wireless systems and remarkably enhance the transmission performance, but also can improve the capacity of wireless networks and conserve the power consumption in mobile nodes. In order to provide insight into the manner in which the performance depends on the partner, the authors then derive the closed-form average BER expressions at the partner and the destination for M-ary quadrature amplitude modulation (M-QAM) over Rayleigh fading channels. According to the mathematical model and these expressions, the authors propose a distributed partner selection algorithm, which can select the optimal partner to forward messages at the expense of little overhead in distributed wireless networks. In addition, the proposed distributed algorithm can dynamically adjust the selected partner in response to the changes of channel states. Accordingly, the algorithm

can be adaptive to channel states. Furthermore, the authors present simulations to confirm the proposed algorithm.

**Keywords** cooperative diversity; bit error rate; partner selection; distributed algorithm

## 1 引言

在无线通信中多径衰落能够产生很大的功率损失,因而是恶化无线传输性能的主要因素之一.多天线技术能够利用空间分集来克服多径衰减的不利影响,显著地提高传输可靠性和传输速率.然而,由于价格、电量和体积等因素的制约,在很多无线网络中每个移动节点只能安装一个天线,从而严重地阻碍了多天线技术在无线网络中的应用.为了克服这种阻碍,Laneman 等人<sup>[1-4]</sup>首先提出了协作分集(在有些文献中也被称为用户分集)技术.在协作分集系统中,虽然每个节点只有一个天线,但是通过在无线网络中选择适当的伙伴节点(在本文中协助源节点转发消息的节点称为伙伴节点)参与转发消息,能够使源节点所发射的消息通过不同衰减路径到达目的节点,从而形成一个虚拟的多天线系统,获得可观的空间分集增益.

协作分集技术能够被广泛地应用于蜂窝网络、无线传感器网络和 Ad Hoc 网络,用于扩大传输半径、增加传输速率和提高传输可靠性.因此,自从被提出,协作分集技术就迅速地成为无线通信领域的研究热点之一.早期对于协作分集的研究主要集中在伙伴节点的协作模式及其性能分析.根据伙伴节点的协作模式,可以将已有的协作分集方案划分为 3 类<sup>[5]</sup>,被分别称为解码转发(decode-and-forward)<sup>[3-4]</sup>协作分集、放大转发(amplify-and-forward)<sup>[1,6]</sup>协作分集和解码再编码(decode-and-reencode)<sup>[2,7]</sup>协作分集.解码转发协作分集也被称为再生转发(regenerate-and-forward)协作分集,其类似于传统的无线中继模式,伙伴节点需要对来自源节点的无线信号进行检测和译码,如果能够正确地恢复原始的二进制消息,就利用正交信道(时分多址、频分多址或者码分多址)向目的节点转发这个消息,否则就丢弃这个消息.不同于解码转发协作分集,在放大转发协作分集中伙伴节点对来自源节点的无线信号不进行检测和译码,而是直接对所接收到的模拟信号进行放大和转发.解码再编码协作分集在协作过程中引入编码技术,所以也被称为编码协作(coded cooperation),在转发过程中伙伴节点不仅需要再次生成原始的二

进制消息,而且需要对这个消息进行编码操作.因此,除了分集增益,解码再编码协作分集还能够获得额外的编码增益.

在实际的协作分集系统中,由于距离和地形等因素的影响,节点之间具有不同的信道状态.这意味着对一对源节点和目的节点而言,选择不同的伙伴节点参与协作可能导致迥然不同的节点能耗和传输性能.因此,随着对协作分集的研究不断地深入,伙伴节点选择问题开始受到广泛的关注<sup>[8-11]</sup>.针对编码协作分集,在文献[8]中首先通过定义用户协作增益(user cooperation gain)来评估协作分集的相对性能,然后建立了能够最大用户协作增益的节点选择规则.针对放大转发协作分集,在文献[9]中根据经典的背包算法提出了一种优化的伙伴节点选择方法,能够分别在总的能量消耗约束下实现最小的中断概率和在中断概率约束下实现最小的能量消耗.在文献[10]中分别提出了集中式的和分布式的伙伴节点选择协议,并分析了这两种协议的中断概率.针对 BPSK(Binary Phase Shift Keying)调制方式,在文献[11]中提出了一种集中式的匹配算法,能够在无线网络中实现最大的能量增益.

然而令人遗憾的是,作为一种新兴的无线通信技术,对于协作分集的研究还仅仅处于起步阶段,因而在伙伴节点选择问题中尚有诸多难点没有圆满解决.第一个难点是如何评估协作分集系统在多径衰落信道中的性能.多径衰落导致实时的接收信噪比随机地变化.此外,目的节点通过合并来自源节点和伙伴节点的信号以实现最大的输出信噪比.这使得难于比较不同协作分集方案的优劣.第二个难点是如何在分布式的无线网络环境中实现和部署伙伴节点选择算法.在无线网络中只有接收节点能够估计信道状态信息,而其它节点无法获得信道的任何信息,所以伙伴节点选择算法通常需要额外的控制协议提供支持.特别是像 Ad Hoc 网络和无线传感器网络这样没有中心控制节点的网络,为了选择最优的伙伴节点需要利用大量的控制消息估计、收集和交换信道状态信息.由于无线频谱资源是一种稀有资源,必须尽可能地减小控制协议的通信开销,从而增加了伙伴节点选择算法的复杂度.第三个难点是如何适应信道状态的变化.在无线网络中由于移动

节点不断地移动,节点之间的信道状态往往随着节点之间相对位置的变化而随机地变化.为此,伙伴节点选择算法需要根据信道状态动态地调整所选择的伙伴节点.

围绕着上述难点,本文研究了在解码转发协作分集系统中的伙伴节点选择问题.本文利用平均误比特率来衡量伙伴节点和目的节点的接收性能,并建立了伙伴节点选择问题的数学模型,其能够在伙伴节点和目的节点的平均误比特率分别满足给定约束下,使源节点和伙伴节点的发射功率之和最小化.该模型不仅能够开发多用户无线系统所固有的空间分集能力,保证在无线链路上的传输性能,而且能够进一步提高网络的通信容量和降低移动节点的能耗.本文还推导了当使用 M-QAM(M-ary Quadrature Amplitude Modulation)时伙伴节点和目的节点在瑞利衰减信道中的平均误比特率公式.这些公式不仅能够刻画协作分集系统在多径衰落信道中的性能,而且能够揭示系统性能与伙伴节点之间的依赖关系.根据数学模型和误比特率公式,本文提出了一种分布式的和自适应的伙伴节点选择算法.本文所提出的算法不仅能够分布在分布式的无线环境以极小的通信开销选择最优的伙伴节点参与协作转发,而且能够根据信道状态的变化动态地调整所选择的伙伴节点.因此,该算法能够适应无线网络的分布性和动态性,易于在无线网络中实现和部署.

本文第 2 节提出在解码转发协作分集系统中伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式,并建立伙伴节点选择问题的数学模型;第 3 节推导伙伴节点和目的节点闭合形式的平均误比特率公式,并基于此提出一种集中式的算法;第 4 节提出一种分布式的选择算法,不仅具有较小的通信开销,而且能够适应信道状态的变化;第 5 节对第 4 节所提出的伙伴节点选择算法进行数字仿真,并给出仿真结果;第 6 节总结全文.

## 2 系统模型

因为电磁波在传播过程中受到各种障碍物的反射和散射,所以一个节点的接收信号是由大量经过独立衰减路径的反射波和散射波组成.由于不同的反射波和散射波具有不同的随机相位,对接收信号产生加强或者破坏作用,从而产生多径衰落现象.根据无线传输环境和节点之间的相对位置,目前已经提出了大量的多径信道模型用于刻画多径衰落的统

计特征.不失一般性,本文假设在任意一对发射和接收天线之间的信道为瑞利衰减信道,而且不同节点之间的信道衰减相互独立.根据上述假设,当节点  $i$  以功率  $\Gamma_i$  发射消息时,节点  $j$  的实时接收符号信噪比  $\gamma_{ij}$  为一个服从指数分布的随机变量,其概率密度函数可以表示为

$$p(\gamma_{i,j}) = \frac{1}{\Gamma_i \bar{\gamma}_{i,j}} \exp\left(-\frac{\gamma_{i,j}}{\Gamma_i \bar{\gamma}_{i,j}}\right) \quad (1)$$

其中  $\bar{\gamma}_{i,j}$  表示当节点  $i$  在单位发射功率时节点  $j$  的平均符号信噪比.显而易见,  $\bar{\gamma}_{i,j}$  的取值与发射功率无关,反映了节点之间信道的本质特征.为了简单起见,在本文中称  $\bar{\gamma}_{i,j}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间的信道状态.由于路径损耗,接收信号的平均功率与无线信号传输距离的  $n$  次方成反比.因而,信道状态能够表示为(单位为 dB)

$$\bar{\gamma}_{i,j} = \bar{\gamma} - 10n \log_{10} d_{i,j} \quad (2)$$

其中  $\bar{\gamma}$  表示当发射节点在单位发射功率时接收节点位于单位距离处的平均信噪比,  $d_{i,j}$  为两个节点之间的距离,  $n$  为路径损耗指数.

如图 1 所示为一个简单的解码转发协作分集系统,其中节点  $s$  和节点  $d$  分别为源节点和目的节点,其它节点为候选的伙伴节点.当源节点以功率  $\Gamma_s$  向目的节点发射数据消息时,因为无线信道被一定范围内的节点所共享,所以除了目的节点之外,候选伙伴节点往往也能够监听并接收这个数据消息.为了开发多用户无线系统所固有的空间分集能力,需要从所有的候选伙伴节点中选择一个适当的节点  $p$  作为源节点和目的节点的伙伴节点.所选出的伙伴节点对来自源节点的无线信号进行解调和译码,并重新生成原始的二进制数据消息,然后通过正交信道以功率  $\Gamma_p$  向目的节点转发.如果伙伴节点能够正确地接收和转发所有数据消息,则目的节点就能够通过两个正交信道分别接收到两路独立衰减的信号.在这种情况下,解码转发协作分集系统等价于一个发射天线数为 1 和接收天线数为 2 的多天线系

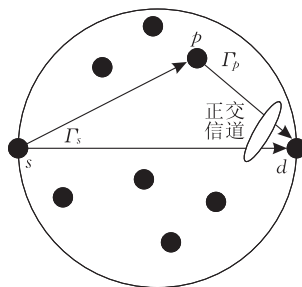


图 1 解码转发协作分集系统

统,所提供的分集增益为 2. 目的节点按照最大比合并准则<sup>[12]</sup>将两路信号合并输出,输出信号的实时信噪比等于两路接收信号的实时接收信噪比之和

$$\gamma_S = \gamma_{s,d} + \gamma_{p,d} \quad (3)$$

其中  $\gamma_{s,d}$  和  $\gamma_{p,d}$  分别表示在源节点和目的节点之间以及在伙伴节点和目的节点之间信道的实时接收信噪比.

正如前文所述,如何评估协作分集系统的性能是伙伴节点选择问题的关键之一. 根据式(1)和式(3),伙伴节点和目的节点的实时符号信噪比为随机变量,也就是说,其随着时间随机变化. 因此,实时的符号信噪比难于准确地比较在多径衰落信道中的系统性能. 为此,本文利用平均误比特率来刻画在协作分集系统中伙伴节点和目的节点的接收性能. 平均误比特率表示接收节点在一段时间内的错误比特概率,是衡量在多径衰落信道中无线传输性能的主要指标之一. 接收节点的平均误比特率依赖于发射节点的发射功率,并随着发射功率的增大而相应地减小. 在无线通信中随机的多径衰减和噪声使接收信号产生失真、重叠和畸变. 较小的发射功率常常导致在接收节点产生大量的误码,甚至造成节点之间无法正常通信. 与此相反,较大的发射功率能够相应地提高实时接收信噪比和减小误比特率,从而减轻多径衰减的不利影响. 因此,为了确保节点能够“正常”地接收消息,发射节点必须保证一定的发射功率. 但是另一方面,当接收节点的平均误比特率减小到一定程度时,为了进一步降低平均误比特率,需要以极大的发射功率作为代价. 因此,发射功率和平均误比特率是两个相互矛盾的指标. 换言之,实际的协作分集系统面临着在两者之间进行一定的权衡取舍.

在实际的无线通信系统中,广泛采用交织和前项纠错编码等信道容错技术来消除少量错误比特的影响. 当接收节点满足一定的误比特性能时,信道容错技术能够完全恢复原始的发射消息,忽略由随机的多径衰减和噪声所引起的错误. 为此,本文采用平均误比特率门限  $P_{th}$  来刻画伙伴节点和目的节点是否能够正常接收消息. 平均误比特率门限  $P_{th}$  代表了接收系统所能容忍的最大平均误比特率,其取值依赖于特定的信道编码和调制方式,但是在本文的分析中假设  $P_{th}$  为一个已知常数.

根据平均误比特率门限  $P_{th}$ ,伙伴选择问题的一个合理目标是从候选伙伴节点集合中选择一个最优的,从而在保证伙伴节点和目的节点的平均误比特率不超过  $P_{th}$  的同时,使源节点和伙伴节点的发

射功率之和最小化. 之所以将发射功率作为优化目标,是因为如下两个原因. 首先,优化发射功率是为了减小同道干扰. 在无线网络中为了提高无线频谱的利用率,相隔一定距离的节点复用相同的无线信道,从而在无线网络中引入了严重的同道干扰. 减小发射功率能够降低网络中的同道干扰,从而明显地提高整个无线网络的通信容量. 其次,优化发射功率是为了减小移动节点的能耗. 移动节点依赖于电池供电,由于电池容量非常有限,所以对于无线网络而言,移动节点的电能也是一种稀有资源,尤其在 Ad Hoc 网络和无线传感器网络中. 减小发射功率能够节约移动节点的电能,从而显著地延长移动节点的寿命或者电池的充电间隔.

从伙伴节点选择问题的目标不难看出,平均误比特率门限  $P_{th}$  在本质上是误比特率性能与发射功率之间的一个优化折衷. 通过优化折衷,协作分集不仅能够获取多用户无线系统所固有的空间分集增益,保证无线链路的误比特率性能,而且能够显著地提高无线网络的通信容量和降低移动节点的能耗.

当采用矩形星座的 M-QAM 和相干法进行解调时,伙伴节点基于实时接收符号信噪比的条件误比特率可以表示为<sup>[12, table 6.1]</sup>

$$P_b(e|\gamma_{s,p}) = AQ(\sqrt{B\gamma_{s,p}}), \\ A = \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M}\log_2 M}, B = \frac{3}{M-1} \quad (4)$$

其中  $Q(x)$  是由下式定义的高斯 Q 函数

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (5)$$

平均误比特率是条件误比特率按照实时符号信噪比的概率密度函数进行统计平均,所以伙伴节点的平均误比特率可以表示为

$$P_b(e) = \int_0^{+\infty} AQ(\sqrt{B\gamma_{s,p}}) p(\gamma_{s,p}) d\gamma_{s,p} \quad (6)$$

如果伙伴节点的平均误比特率  $P_b(e)$  小于或者等于平均误比特率门限  $P_{th}$ ,则利用信道容错机制,伙伴节点能够正确地接收和恢复来自源节点的数据消息,并向目的节点转发. 因此,当伙伴节点满足给定的误比特率性能时,目的节点能够完整地接收两路独立衰减信号. 根据式(3),我们可以得到目的节点的条件误比特率

$$P_d(e|\gamma_{s,d}, \gamma_{p,d}) = AQ(\sqrt{B(\gamma_{s,d} + \gamma_{p,d})}) \quad (7)$$

实时符号信噪比  $\gamma_{s,d}$  和  $\gamma_{p,d}$  为服从指数分布的随机变量,而且相互独立,所以目的节点的平均误比特率能够表示为

$$P_d(e) = \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} A Q(\sqrt{B(\gamma_{s,d} + \gamma_{p,d})}) \times p(\gamma_{s,d}) p(\gamma_{p,d}) d\gamma_{s,d} d\gamma_{p,d} \quad (8)$$

根据上述平均误比特率公式,我们为伙伴节点选择问题建立如下的数学模型

$$\begin{aligned} \min_{p \in \Omega} \min_{\Gamma_s, \Gamma_p} & \Gamma_s + \Gamma_p \\ \text{s. t. } & P_p(e) \leq P_{th} \\ & P_d(e) \leq P_{th} \end{aligned} \quad (9)$$

其中  $\Omega$  表示在协作分集系统中候选的伙伴节点集合. 虽然上述的数学模型非常简单和容易理解,但是  $P_p(e)$  和  $P_d(e)$  为非闭合形式的积分表达式,难以准确地评估伙伴节点和目的节点的误比特率性能. 这意味着不能用这两个公式直接地求解上述的数学模型. 在这种情况下,平均误比特率的近似表达式就扮演着极为重要的角色,尤其是当这些近似表达式具有足够的精确度时.

### 3 集中式算法

本节首先推导了  $P_p(e)$  和  $P_d(e)$  闭合形式的近似表达式,然后提出了一种集中式的伙伴节点选择算法.

使用高斯 Q 函数的 Graig 公式<sup>[13]</sup>

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad (10)$$

$$P_d(e) = \begin{cases} \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \frac{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} - B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}} \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}\right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{A}{2} \frac{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d} - B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}} \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}\right)^{-\frac{1}{2}}, & B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d} \neq B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} \\ \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}\right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{A}{2} \frac{1}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}} \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}\right)^{-\frac{3}{2}}, & B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d} = B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} \end{cases} \quad (16)$$

不同于伙伴节点的误比特率公式,目的节点的误比特率式(16)是一个复杂函数,从而导致数学模型式(9)是一个非常复杂的非线性优化问题,确定目标函数的最优值往往需要大量的计算,耗费大量的时间和计算能力,所以难于在资源受限的无线网络中应用. 在实际的协作分集系统中,为了确保节点和伙伴节点所发射的无线信号能够分别被目的节点正常检测,而不被淹没于随机的噪声和干扰中,两路信号的平均接收信噪比需要远远大于1,因此,

$\frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}$  和  $\frac{2}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}$  的数值趋近于 0. 根据泰勒公式

$$\begin{aligned} (1+x)^{-\frac{1}{2}} &= 1 - \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 + o(x^2) \\ (1+x)^{-\frac{3}{2}} &= 1 - \frac{3}{2}x + o(x) \end{aligned} \quad (17)$$

可以将式(4)和式(7)中的条件误比特率分别改写为

$$P_p(e|\gamma_{s,p}) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{B\gamma_{s,p}}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad (11)$$

$$P_d(e|\gamma_{s,d}, \gamma_{p,d}) =$$

$$\frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{B\gamma_{s,d}}{2\sin^2\theta}\right) \exp\left(-\frac{B\gamma_{p,d}}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad (12)$$

根据式(1),实时符号信噪比  $\gamma_{s,p}$  为服从指数分布的随机变量,因此利用指数分布的矩生成函数(moment generating function)<sup>[13]</sup> 能够将伙伴节点的平均误比特率式(11)表示为

$$P_p(e) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,p}}{2\sin^2\theta}\right)^{-1} d\theta \quad (13)$$

利用积分变化  $x = 1/\sin^2\theta$ , 可以将式(13)中的被积函数转化为简单函数,然后求积分,从而能够得到伙伴节点的平均误比特率

$$P_p(e) = \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \sqrt{\frac{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,p}}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,p} + 2}} \quad (14)$$

因为实时符号信噪比  $\gamma_{s,d}$  和  $\gamma_{p,d}$  相互独立,所以利用式(10)可以类似地将式(12)改写为

$$P_d(e) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}{2\sin^2\theta}\right)^{-1} \left(1 + \frac{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}{2\sin^2\theta}\right)^{-1} d\theta \quad (15)$$

并能够进一步求得式(16)所示闭合形式的平均误比特率公式.

可以利用多项式级数分别替代平均误比特率公式

$P_d(e)$  中的  $\left(1 + \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}\right)^{-\frac{1}{2}}$ 、 $\left(1 + \frac{2}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}\right)^{-\frac{1}{2}}$  和  $\left(1 + \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}\right)^{-\frac{3}{2}}$ , 从而得到  $P_d(e)$  的一个近似计算公式

$$P_d(e) \approx \frac{3A}{4B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}} \quad (18)$$

利用多项式级数近似替代精确公式,虽然简化了计算,却带来了截断误差. 式(18)所示的近似计算公式和式(16)相比,由截断高阶级数所产生误差的上界可以表示为

$$\epsilon < \frac{A}{2} \frac{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} - B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}} \frac{5}{16} \left(\frac{2}{B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}\right)^3 -$$

$$\frac{A}{2} \frac{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} - B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}} \frac{5}{16} \left( \frac{2}{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}} \right)^3$$

$$= \frac{5A}{4} \frac{B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d} + B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}}{(B\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d})^2 (B\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d})^2} \quad (19)$$

例如, 当采用 4-QAM 时, 如果平均接收信噪比  $\Gamma_s \bar{\gamma}_{s,d}$  和  $\Gamma_p \bar{\gamma}_{p,d}$  分别为 20dB, 则由近似误比特率公式(18)所产生的计算误差  $\epsilon$  要小于  $2.5 \times 10^{-6}$ . 因此, 完全可以忽略近似计算所产生的误差, 直接利用  $P_d(\epsilon)$  的近似计算公式来替代其精确表达式.

根据式(14)和式(18), 可以将伙伴节点选择问题的数学模型简化为

$$\min_{p \in \Omega} \min_{\Gamma_s, \Gamma_p} \Gamma_s + \Gamma_p$$

$$\text{s. t. } \frac{(A - 2P_{\text{th}})^2}{2B\bar{\gamma}_{s,p}P_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})} \leq \Gamma_s$$

$$\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{p,d}\bar{\gamma}_{s,d}P_{\text{th}}} \leq \Gamma_p \Gamma_s \quad (20)$$

$$(\Gamma_s, \Gamma_p) = \begin{cases} \left( \sqrt{\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{p,d}\bar{\gamma}_{s,d}P_{\text{th}}}}, \sqrt{\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{p,d}\bar{\gamma}_{s,d}P_{\text{th}}}} \right), & \frac{\bar{\gamma}_{p,d}}{\bar{\gamma}_{s,p}^2} \leq \frac{3AP_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})^2}{\bar{\gamma}_{s,d}(A - 2P_{\text{th}})^4} \\ \left( \frac{(A - 2P_{\text{th}})^2}{2B\bar{\gamma}_{s,p}P_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})}, \frac{3A\bar{\gamma}_{s,p}(A - P_{\text{th}})}{2B\bar{\gamma}_{p,d}\bar{\gamma}_{s,d}(A - 2P_{\text{th}})^2} \right), & \frac{\bar{\gamma}_{p,d}}{\bar{\gamma}_{s,p}^2} > \frac{3AP_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})^2}{\bar{\gamma}_{s,d}(A - 2P_{\text{th}})^4} \end{cases} \quad (22)$$

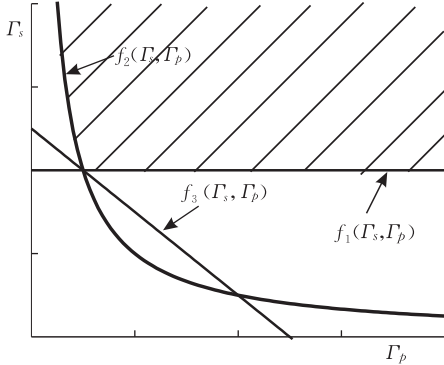


图 2  $\frac{\bar{\gamma}_{p,d}}{\bar{\gamma}_{s,p}^2} > \frac{3AP_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})^2}{\bar{\gamma}_{s,d}(A - 2P_{\text{th}})^4}$  时的功率分配问题

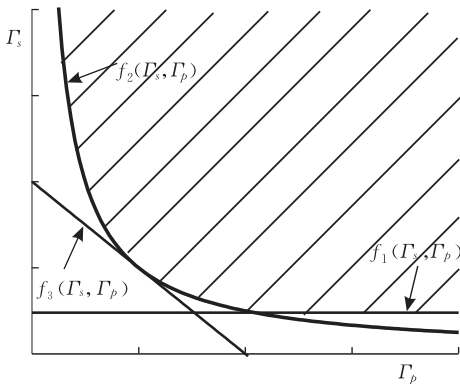


图 3  $\frac{\bar{\gamma}_{p,d}}{\bar{\gamma}_{s,p}^2} \leq \frac{3AP_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})^2}{\bar{\gamma}_{s,d}(A - 2P_{\text{th}})^4}$  时的功率分配问题

在式(20)中, 当给定一个伙伴节点  $p$  时, 伙伴节点选择问题就简化为一个对应的功率分配问题. 功率分配问题可以描述为: 在给定的伙伴节点和目的节点的平均误比特率分别小于或者等于  $P_{\text{th}}$  的前提下, 求使源节点和伙伴节点的发射功率之和最小化的功率分配方案  $(\Gamma_s, \Gamma_p)$ . 功率分配问题是一个简单的非线性问题. 图 2 和图 3 分别显示了在不同参数条件下功率分配问题的最优解, 其中阴影区域为可行域, 边界函数定义为

$$f_1(\Gamma_s, \Gamma_p) = \Gamma_s - \frac{(A - 2P_{\text{th}})^2}{2B\bar{\gamma}_{s,p}P_{\text{th}}(A - P_{\text{th}})},$$

$$f_2(\Gamma_s, \Gamma_p) = \Gamma_p \Gamma_s - \frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{p,d}\bar{\gamma}_{s,d}P_{\text{th}}},$$

$$f_3(\Gamma_s, \Gamma_p) = \Gamma_s + \Gamma_p \quad (21)$$

根据图 2 和图 3, 我们可以得到式(22)所示的最优功率分配方案.

基于式(22), 在集中式环境中可以很容易地选出最优的伙伴节点

$$p = \arg \min_{p \in \Omega} \{ \Gamma_s + \Gamma_p \mid (\Gamma_s, \Gamma_p) \text{ 为最优功率分配方案} \} \quad (23)$$

## 4 分布式算法

虽然集中算法能够直接地从候选的伙伴节点集合  $\Omega$  中为任意一对源节点和目的节点选取最优的伙伴节点, 但是分布式的环境、节点的移动和受限的无线带宽却使其难于在实际的无线网络中应用和部署. 为此, 本节提出了一种分布式的伙伴节点选择算法.

在实际的无线通信中, 只有接收节点能够估计信道状态, 而其它节点无法获得信道的任何信息, 所以为了选择最优的伙伴节点, 需要额外的控制协议提供支持. 为此, 本文设计了 4 种控制消息, 被分别称作 RTS (Request-To-Send) 消息、CTS (Clear-To-Send) 消息、RTC (Request-To-Cooperate) 消息和 CTC (Clear-To-Cooperate) 消息. 由于篇幅所限, 本文并不介绍如何构造和传输这些控制消息, 而是着重说明这些控制消息需要携带何种参数信息. 这些

控制消息所包括的主要参数如表 1 所示,其中 ID 用来唯一地标识一个节点,导频符号用于协助接收节点估计信道状态.和数据消息相比,这些控制消息仅仅传递少量参数信息,所以具有较短的消息长度,只需占用较少的带宽.

表 1 控制消息所携带的参数

控制消息	主要参数
RTS	导频符号、源节点 ID、目的节点 ID
CTS	导频符号、源节点 ID、目的节点 ID、源节点和目的节点之间的信道状态
RTC	源节点 ID、目的节点 ID、最优功率分配率方案( $\Gamma_s, \Gamma_p$ )
CTC	源节点 ID、目的节点 ID、伙伴节点 ID、源节点和伙伴节点的功率之和

利用上述控制消息,本文提出了一种分布式的伙伴节点选择算法,其由三部分组成,分别负责在源节点发射消息、在候选伙伴节点参与协作和在目的节点接收消息,相应的伪代码分别如算法 1、算法 2 和算法 3 所示.

#### 算法 1. 源节点的发射过程.

```
send_data_messages()
1. send a RTS message over the data channel;
2. receive the CTS message and the RTC message;
3. send a CTC message;
4. set the transmit power according to the RTC message;
5. send L data messages.
```

#### 算法 2. 候选伙伴节点的协作过程.

```
variable sum_power; //The initial value is  $+\infty$ .
constant T;
cooperate()
1. receive the RTS message and estimate the channel state  $\bar{\gamma}_{s,p}$ ;
2. receive the CTS message and estimate the channel state  $\bar{\gamma}_{p,d}$ ;
3. set  $\bar{\gamma}_{s,d}$  according to the CTS message;
4. compute the optimal power allocation scheme ( $\Gamma_s, \Gamma_p$ ) based on (22);
5.  $n \leftarrow 1$ ;
6. random_access_channel;
7. if  $\Gamma_s + \Gamma_p = \text{sum\_power}$ 
8.    $t \leftarrow n \times T$ ;
9. else if  $\Gamma_s + \Gamma_p < \text{sum\_power}$ 
10.   $t \leftarrow n \times \text{rand}() \times T$ ;
11. else
12.   $t \leftarrow n \times (1 + \text{rand}()) \times T$ ;
13. end
14. send a RTC message over the random access
```

```
channel after waiting  $t$  seconds;
15. if the node doesn't receive the CTC message;
16.    $n \leftarrow n \times 2$ ;
17.   goto random_access_channel;
18. end.
19. set sum_power according to the CTC message;
20. if the node is selected as the partner
21.   receive L data messages from the source;
22.   forward L data message with power  $\Gamma_p$ ;
23. end.
```

#### 算法 3. 目的节点的接收过程.

```
receive_data_messages()
1. receive the RTC message and estimate the channel state  $\bar{\gamma}_{s,d}$ ;
2. send a CTC message over the data channel;
3. receive and combine the two branch signals;
4. output L data messages.
```

变量  $\text{sum\_power}$  代表源节点和伙伴节点的发射功率之和,在接收到一个 CTC 消息后,候选伙伴节点立即更新这个变量.  $T$  为一个常数,其取值依赖于候选伙伴节点的数目.函数  $\text{rand}()$  为一个随机数产生器,能够按照均匀分布在  $(0, 1)$  区间内取值.通过等待间隔的随机化,能够减小由候选伙伴节点争相发射 RTC 消息所引起的冲突概率.  $\bar{\gamma}_{s,d}$  表示源节点和目的节点之间的信道状态.

整体而言,本节所提出的分布式算法可以划分为两个连续过程:伙伴节点选择过程和数据传输过程.在伙伴节点选择过程,一个新的伙伴节点从一个候选伙伴节点集合  $\Phi$  中随机地选出.和上一次数据传输过程所选用的伙伴节点相比,在  $\Phi$  中的候选伙伴节点需要更小的功率消耗.在数据传输过程中,源节点首先发送  $L$  个数据消息,这些消息随后被所选择的伙伴节点转发.显然,在某一次伙伴节点选择过程中所选出的伙伴节点可能不是最优的.如果如此,通过多次执行伙伴节点选择过程和数据传输过程,源节点和伙伴节点所消耗的功率之和将逐渐减少,直到最优的伙伴节点被挑选出来.

具体而言,本节所提出的算法按照如下分布的和迭代的方式执行.为了发送  $L$  个数据消息,源节点首先发送一个 RTS 消息,其它节点(包括目的节点和所有的候选伙伴节点)需要接收这个 RTS 消息,并估计源节点和本节点之间的信道状态.在接收到这个 RTS 消息后,目的节点应答一个 CTS 消息,其中包含源节点和目的节点之间的信道状态信息  $\bar{\gamma}_{s,d}$ . 对于一个候选伙伴节点  $p$  而言,需要接收这个

CTS 消息, 并估计自己和目的节点之间的信道状态  $\bar{\gamma}_{p,d}$ . 利用 RTS 消息和 CTS 消息, 任意一个候选伙伴节点  $p$  都能够实时地获得信道状态信息  $\bar{\gamma}_{s,p}$ 、 $\bar{\gamma}_{s,d}$  和  $\bar{\gamma}_{p,d}$ , 其中  $\bar{\gamma}_{s,p}$  表示在源节点和节点  $p$  之间的信道状态. 根据这些信道状态信息, 节点  $p$  利用式(22)计算最优的功率方案  $(\Gamma_s, \Gamma_p)$ . 然后, 节点  $p$  独立自主地向源节点发送 RTC 消息, 其包含本节点的 ID 和最优功率分配方案  $(\Gamma_s, \Gamma_p)$ . 因为所有的候选伙伴节点共享同一个随机接入信道, 所以为了减小冲突的概率, 节点  $p$  利用比较  $\Gamma_s + \Gamma_p$  与在上一次消息传输过程中所需要的总发射功率(储存在变量  $sum\_power$  中)之间的大小关系, 来确定自己的发送时机. 通过合理地设定不同的随机等待间隔, 需要更小功率消耗的候选伙伴节点往往能够优先发送 RTC 消息. 即便如此, 冲突也在所难免. 如果一个候选伙伴节点没有接收到 CTC 消息, 那么就认为已经发生冲突, 将调度再次发送一个 RTC 消息. 当源节点成功地接收到第一个 RTC 消息时, 就立刻应答一个 CTC 消息, 其包含伙伴节点 ID 和所需要的发射功率之和. 任意一个候选的伙伴节点一旦接收到 CTC 消息, 就记录下本次数据传输过程中所需要的总功率. 不仅如此, 如果这个候选伙伴节点被 CTC 消息指定为这次数据传输过程的伙伴节点, 其就准备接收和转发数据消息. 在 RTS-CTS-RTC-CTC 消息序列传输顺利完成后,  $L$  个数据消息开始通过直接传输和伙伴节点转发分别到达目的节点. 如此, 完成一次伙伴节点选择过程和数据消息传输过程.

本节所提出的伙伴节点选择算法具有非常小的通信开销. 如果使用如式(23)所示的集中式算法, 则不可避免地需要交换和收集所有节点之间的信道状态信息, 从而必将产生大量的控制协议开销和浪费宝贵的无线频谱资源. 为了防止这种情况的发生, 本文所提出的分布式算法充分地利用了无线数据信道的广播特性和随机接入信道的随机特性. 通过在数据传输信道中广播 RTS 和 CTS 消息, 每个候选伙伴节点能够独立地估计信道状态, 并计算如果自己参与协作所需要的最优功率分配方案. 通过与之前数据传输过程中所消耗的功率相比较, 能够有效地抑制那些需要较大发射功率的候选伙伴节点参与协作. 利用共享的随机接入信道, 能够从那些需要更小功率消耗的候选伙伴节点中随机地挑选一个伙伴节点参与转发. 虽然对于某一次数据传输过程而言, 参与协作转发的伙伴节点可能不是网络中最优的伙伴节点, 但是通过逐个消息地执行伙伴节点选择过程,

伙伴节点选择算法能够不断地选择更优的伙伴节点参与转发过程, 直到最终收敛到最优的伙伴节点. 与集中式算法相比, 本节所提出的算法能够非常显著地减小控制协议开销.

该算法的另一个优点是对信道状态具有自适应能力. 因为移动节点的移动, 节点之间的信道状态往往随着节点之间相对位置的改变而动态地变化. 固定模式的节点选择算法不可避免地产生较大的误比特率或者较大的能量消耗. 为了在满足误比特率性能的同时, 最小化功率消耗, 本文所提出的算法在传输  $L$  个消息后, 通过 RTS 和 CTS 消息, 及时地更新信道状态信息和所需要的最小功率消耗. 一旦在网络中存在更优的候选伙伴节点, 其需要更小的能量消耗, 该算法就能够通过 RTC 和 CTC 消息, 高效地将其选出. 不仅如此, 本节所提出的算法还能够调整参数  $L$  以适应信道状态的变化. 当信道状态快速变化时, 可以减小参数  $L$ , 从而加速算法的收敛速度, 更快地选择最优的伙伴节点. 另一方面, 当信道状态变化比较缓慢时, 还可以增大参数  $L$ , 从而能够在每次数据消息传输过程中传输更多的数据消息.

总而言之, 本节所提出的伙伴节点选择算法是一种分布的、迭代的和自适应的算法. 和集中式算法相比, 该分布式算法具有较慢的收敛速度, 但是却能够极大地减小控制消息开销. 减小协议开销对于分布式的和动态的无线网络来说特别重要, 尤其当网络拥有众多的候选伙伴节点时. 因此, 该算法易于在无线网络中实现和部署.

## 5 仿 真

本节利用 MATLAB 对第 4 节所提出的伙伴节点选择算法进行了数字仿真, 并给出了仿真结果.

本节采用的仿真场景如图 1 所示, 源节点和目的节点之间的距离为 2 个长度单位, 其中源节点和目的节点的坐标分别为  $(-1, 0)$  和  $(1, 0)$ . 候选的伙伴节点随机地分布在以坐标  $(0, 0)$  为圆心, 以 1 个长度单位为半径的圆盘内. 仿真所采用的具体通信参数如下: 候选的伙伴节点数目  $|\Omega| = 100$ , 路径损耗指数  $n = 3$ , 调制方式为 16-QAM, 每个数据消息所包含的符号个数为 1000, 接收系统所能容忍的平均误比特率门限  $P_{th} = 0.005$ , 在节点选择算法中的参数  $L = 3$ , 即在每次数据消息传输过程中传输 3 个数据消息. 为了阐明多经衰落对于无线通信的影响, 在仿真中没有采用前向纠错编码和交织技术, 而且假

设接收节点能够正确地估计发射节点和接收节点之间的信道状态.

图 4 和图 5 分别显示了伙伴节点和目的节点的误比特率性能,其中纵坐标表示在接收每个数据消息过程中的误比特率.从图 4 和图 5 中,我们可以发现伙伴节点和目的节点在接收每个数据消息时的误比特率分别在  $P_{th}$  上下随机波动.这种波动是由多径衰落所引起.在多径衰落信道中,当发生多径衰落时,接收节点就会相应地产生大量的突发误码.在实际的无线系统中,广泛采用交织技术,将突发的误码分散到多个数据消息中,从而产生均匀的随机误码.当具有足够的交织深度时,能够保证伙伴节点和目的节点在接收每个数据消息时的误比特率分别小于或者等于  $P_{th}$ ,满足系统所需的平均误比特率性能.

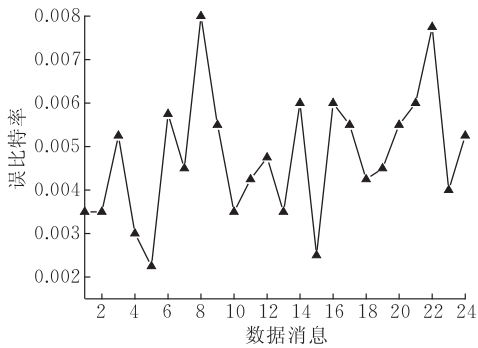


图 4 伙伴节点的误码率性能

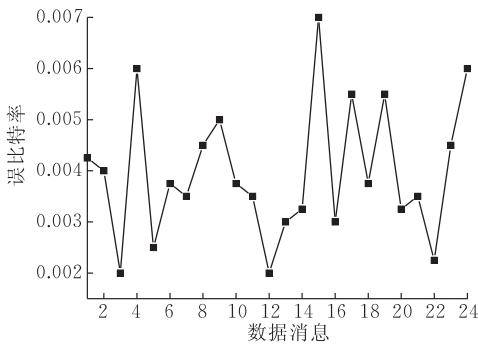


图 5 目的节点的误码率性能

图 6 显示了源节点与伙伴节点在发射每个数据消息时的功率,其中纵坐标表示发射功率与加性高斯白噪声功率  $N_0$  的比值.从图 6 中,我们可以看出在传输前 16 个数据消息的过程中,源节点和伙伴节点的发射功率之和逐渐减小,但是在传输 16 个数据消息之后,两个节点的发射功率不再发生变化.这意味着在执行 6 次伙伴节点选择过程后,即通过 6 次 RTS-CTS-RTC-CTC 消息序列传输,就能够成功地从 100 个候选伙伴节点中选出最优的伙伴节点.

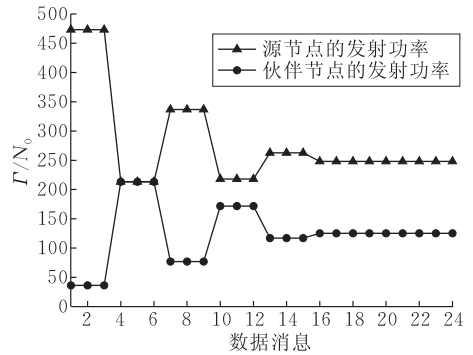


图 6 源节点和伙伴节点的发射功率

综上所述,本节的仿真结果比较好地吻合了第 3 节中的理论分析结果.换言之,第 4 节所提出的分布式伙伴节点选择算法能够在无线网络中为一对源节点和目的节点高效地选择最优的伙伴节点,从而不仅能够满足给定的平均误比特率性能,还能够使源节点和伙伴节点的发射功率之和最小化.

## 6 总 结

协作分集能够有效克服多径衰落对于无线传输的不利影响,所以能够被广泛地应用于蜂窝网络、无线传感器网络和 Ad Hoc 网络,用于扩大传输半径、增加传输速率和提高传输可靠性.在实际的协作分集系统中,距离和地形等因素致使节点之间具有不同的信道状态.因此,为一对源节点和伙伴节点选择不同的伙伴节点将会导致迥异的传输性能、节点能耗和同道干扰.为此,本文研究了在解码转发协作分集系统中的伙伴节点选择问题.和已有的工作相比,本文主要有以下三点贡献.首先,本文提出了一种数学模型,其能够在误比特率性能和发射功率之间优化折衷,从而在保证误比特率性能的同时,最小化源节点和伙伴节点的发射功率.其次,本文推导了在瑞利多径衰落信道使用 M-QAM 时伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式.这些公式不仅能够评估协作分集系统的性能,而且能够揭示系统性能和伙伴节点之间的依赖关系.最后也是最重要的,本文提出了一种分布式的和自适应的伙伴节点选择算法,其能够适应随机变化的信道状态和分布式的网络环境,因此易于在无线网络中实现和部署.

## 参 考 文 献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage be-

- havior. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080
- [2] Laneman J N, Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425
- [3] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity-Part I: System description. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1927-1938
- [4] Sendonaris A, Erkip E, Aazhang B. User cooperation diversity-Part II: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 2003, 51(11): 1939-1948
- [5] Nosratinia A, Hunter T E, Hedayat A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 2004, 42(10): 74-80
- [6] Ding Y, Zhang J, Wong M. The amplify-and-forward half-duplex cooperative system: Pairwise error probability and precoder design. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(2): 605-617
- [7] Stefanov A, Erkip E. Cooperative coding for wireless networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(9): 1470-1476
- [8] Lin Z, Erkip E, Stefanov A. Cooperative regions and partner choice in coded cooperative systems. *IEEE Transactions on Communications*, 2006, 54(7): 1323-1334
- [9] Michalopoulos D S, Karagiannidis G K, Tsiftsis T A, Mallik R K. An optimized user selection method for cooperative diversity systems//*Proceedings of the IEEE GLOBECOM'06*. San Francisco, USA, 2006: 1-6
- [10] Nosratinia A, Hunter T E. Grouping and partner selection in cooperative wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 369-378
- [11] Mahinthan V, Cai L, Mark J W, Shen X S. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative diversity systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 511-520
- [12] Goldsmith A. *Wireless Communications*. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005
- [13] Simon M K, Alouini M-S. *Digital Communication over Fading Channels*. 2nd Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005



**QU Chun-He**, born in 1977, Ph. D. candidate. His research interests include space-time coding, cooperative communication and network service.

**YANG Jing**, born in 1952, professor, Ph. D. supervisor. His recent research interests include network service architecture and integration.

**ZHANG Guo-Qing**, born in 1965, Ph. D., master supervisor. His current research interests include computer networks and network science.

## Background

Cooperative diversity is an emerging technology for mitigating the destructive effects of multipath fading without requiring the deployment of multiple antennas in a mobile node. The basic idea behind cooperative diversity is that when a source transmits signals to a destination, a partner is selected to receive and forward the signals, so that the destination can receive two branch independently faded signals. In this way, the inherent spatial diversity in multiuser wireless systems can be exploited. In practical systems, the channel states between nodes are different due to the distance and terrain. This means that selecting different node as the partner for a given source-destination pair can lead to very different performance and power consumption. For this reason, the partner selection problem has been actively studied in recent years.

This paper proposes a distributed and adaptive partner selection algorithm which can minimize the total power consumption of the source and the partner subject to the average bit error rate (BER) constraints at the partner and the destination. Furthermore, the proposed algorithm can efficiently use the limited wireless channel bandwidth while at the same time can be adaptable to the changes of the channel states. Accordingly, the algorithm conforms to the decentralized and dynamic nature of wireless networks.

This work was supported in part by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60673168 and by the National High Technology Research and Development Program (863 Program) of China Nos. 2006AA01Z207 and 2008AA01Z203.