

一种针对协作分集的分布式功率分配算法

屈春河^{1,3}, 杨 景^{1,2}, 张国清¹

(1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190; 2. UT 斯达康公司, 北京 100027;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文研究在解码转发协作分集中的功率分配问题. 本文首先建立了功率分配问题的数学模型, 其能够在满足一定平均误比特率的前提下, 使源节点和伙伴节点的发射功率之和最小化, 从而不仅能够开发多用户无线系统所固有的空间分集能力, 而且能够降低移动节点的能耗和网络中的同道干扰. 本文还推导了伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式, 用于刻画在多径衰落中协作分集系统的性能. 利用平均误比特率公式, 本文提出了一种分布式的功率分配算法, 能够使源节点、伙伴节点和目的节点逐个消息地计算最优的功率分配方案. 本文所提出的算法不仅具有较小的控制协议开销, 而且对信道状态的变化具有自适应能力. 因此, 该算法能够适应分布式的和动态的无线网络环境. 最后, 本文通过仿真验证了所提出的算法.

关键词: 协作分集; 误比特率; 功率分配; 分布式算法

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0060-08

Distributed Power Allocation Algorithm for Cooperative Diversity

QU Chun-he^{1,3}, YANG Jing^{1,2}, ZHANG Guo-qing¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. UTStarcom, Beijing 100027, China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, we study the power allocation problem in decode-and-forward cooperative diversity systems. We first present the mathematical model of the power allocation problem, which can minimize the total power consumption of the source and partner under the average bit error rate (BER) constraints at the partner and the destination. Accordingly, the model not only can exploit the inherent spatial diversity in multiuser wireless systems, but also can reduce both the energy consumption of mobile nodes and the cochannel interference in wireless networks. We then derive the BER expressions at the partner and the destination which can characterize the performance of cooperative diversity systems over multipath fading channels. According to the expressions, we propose a distributed power allocation algorithm by which the source, the partner and the destination can compute the optimal power allocation scheme (OPAS) on a message-by-message basis. The proposed algorithm not only has little overhead but also adapts to the changes of channel state. Therefore, the algorithm can conform to the decentralized and dynamic nature of wireless networks. In addition, we present simulations to confirm the proposed algorithm.

Key words: cooperative diversity; bit error rate; power allocation; distributed algorithm

1 引言

在无线通信中多径衰落是恶化传输性能的主要因素, 而多天线技术却能够利用空间分集来对抗多径衰减的不利影响, 显著地改善无线传输的可靠性. 但是, 由于价格、电量和体积等因素的局限, 在一些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通信系统中的应用. 为了克服这些阻碍, Laneman 等人^[1~4]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. 在协作分集中, 虽然每个移动

节点只有一个天线, 但是利用在无线网络中选择适当的伙伴节点(在本文中把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.

协作分集能够被广泛地应用于蜂窝网络、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,可以把协作分集划分为三类^[5],被分别称为解码转发(Decode and Forward)^[3,4]协作分集、放大转发(Amplify and Forward)^[1,6]协作分集和解码再编码(Decode and Recode)^[2,7]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于源节点的无线信号不进行检测和译码,而是直接对这个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了编码技术,所以也被称为编码协作(Coded Cooperation),在接收和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处理。因此,除了分集增益,解码再编码协作还能获得额外的编码增益。

随着对于协作分集的研究不断地深入,在源节点和伙伴节点之间的功率分配问题开始受到关注。针对解码转发的协作分集,在文献[8]中提出了一种近似最优的功率分配算法,能够在功率限制下实现最小的中断概率。在文献[9]中提出了一种分布式的功率分配方法,能够在目的节点实现最大的接收信噪比。在文献[10]中针对多跳的协作传输提出了一种最小最大功率分配策略,能够实现网络存活时间的最大化。针对 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying),在文献[11]中提出了一种最小化能量消耗的功率分配策略。

功率分配问题之所以受到广泛的关注,是因为如下三个原因。首先,在实际的无线网络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。这意味着在源节点和伙伴节点分配不同的发射功率往往导致迥然不同的通信性能。其次,优化的功率分配方案能够减小同道干扰。在无线网络中广泛地利用空间复用技术来提高无线资源的利用率,即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。因此,优化的功率分配方案能够降低无线网络中的同道干扰,显著地提高整个网络的通信容量。最后,优化的功率分配方案能够减小移动节点的能耗。在无线网络中移动节点依赖于电池供电,而移动节点电池容量非常有限,是一种稀有资源,所以优化的功率分配方案能够减小移动节点的发射功率,有效地延长移动节点的寿命或者电池的充电间隔。

但是,作为一种新兴的无线通信技术,对于协作分集的研究还处于起步阶段,因此功率分配问题尚有诸多难点没有解决。第一个难点是如何评估协作分集系

统的性能。随机的多径衰落导致实时的接收信噪比随着时间动态地变化,而且目的节点通过合并来自于源节点和伙伴节点的无线信号以实现最大的输出信噪比,从而难于评估伙伴节点和目的节点的接收性能。第二个难点是如何在分布式的无线网络环境中实现功率分配算法。在无线网络中只有接收节点能够获取信道状态信息,而其他节点无法获得信道的任何信息,所以为了确定各自的最优发射功率,源节点和伙伴节点需要额外的控制协议支持。特别是像 Ad Hoc 网络和无线传感器网络这样没有中心控制点节点的网络,为了计算最优的功率分配方案需要利用大量的控制消息估计、收集和交换信道状态。由于无线频谱资源是一种稀有资源,功率分配算法需要尽可能地减小控制协议的通信开销,从而极大地增加了算法的复杂度。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变化而随机地变化,因而功率分配算法需要对信道状态的变化具有自适应能力。

针对上述难点,本文研究了在解码转发协作分集系统中的功率分配问题。本文首先建立了功率分配问题的数学模型,其目标是在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,从而不仅能够开发多用户无线系统所固有的空间分集能力,而且能够进一步优化移动节点的发射功率。然后,本文推导了在瑞利多径衰落信道中使用 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。这两个公式分别刻画了伙伴节点和目的节点在一段时间内的错误比特概率,所以能够很好地揭示在多径衰落中协作分集系统的性能与发射功率之间的依赖关系。根据平均误比特率公式,本文提出了一种分布式的和自适应的功率分配算法。在分布式的和动态的无线网络环境中,本文所提出的算法不仅能够利用极小的控制协议开销,使源节点、伙伴节点和目的节点独立地计算最优的功率分配方案,而且能够根据实时的信道状态估计动态地调整源节点和伙伴节点的发射功率。因此,该算法易于在无线网络中实现和部署。

2 系统模型

电磁波在传播过程中受到障碍物的反射、散射、折射和衍射,所以节点的接收信号是由大量经过独立衰减路径的多径分量组成。由于不同的多径分量具有不同的随机相位,对接收信号产生加强或者破坏作用,从而导致多径衰落现象。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,在本文中假

设在任意一对发射天线和接收天线之间的信道为瑞利衰减信道,而且不同信道的衰减相互独立.根据上述假设,当节点 i 以功率 Γ_i 发射消息时,节点 j 的实时接收信噪比 γ_{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 Γ_i 表示节点 i 的发射功率, $\bar{\gamma}_{i,j}$ 表示当节点 i 在单位发射功率时节点 j 的平均接收信噪比.显而易见, $\bar{\gamma}_{i,j}$ 与发射功率无关,反映了信道的本质特征.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信号传输距离的 n 次方成反比,因此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接收信噪比, $d_{i,j}$ 为两个节点之间的距离, n 为路径损耗指数.

如图 1 所示为一个简单的协作分集系统,有三个节点参与解码转发过程,在本文中被分别称为源节点

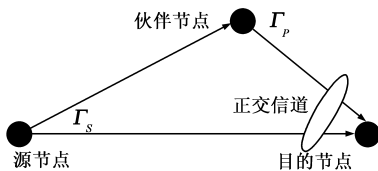


图1 解码转发的协作分集

(Source)、伙伴节点(Partner)和目的节点(Destination).当源节点以功率 Γ_S 向目的节点发射消息时,由于无线信道具有广播特性,所以伙伴节点和目的节点都能够监听到这个消息.伙伴节点首先对这个消息进行解调和译码,并重新生成原始的二进制消息,然后通过正交信道以功率 Γ_P 向目的节点转发这个二进制消息.如果伙伴节点能够正确地接收和转发消息,那么目的节点就能够通过两个正交信道分别从源节点和伙伴节点接收到两路独立衰减的接收符号.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一和接收天线数为二的多天线系统,能够提供的分集增益为二.目的节点按照最大比合并准则^[12]将两路接收符号分别按照权重相加并输出,输出符号的实时信噪比等于两路接收符号的信噪比之和

$$\gamma_{\Sigma} = \gamma_{S,D} + \gamma_{P,D} \quad (3)$$

根据式(1)和式(3),伙伴节点和目的节点的实时接收信噪比为随机变量,因此如何评估这两个节点在多条衰落中的接收性能就成为功率分配问题的关键.本文利用平均误比特率刻画解码转发协作分集的性能,其表示接收节点在一段时间内的错误比特概率,是衡量在多条衰落中无线传输性能的主要指标之一.在无线通信中接收节点的平均误比特率依赖于发射功

率,并随着发射功率的增大而减小.随机的多径衰减和噪声导致无线信号产生失真、重叠和畸变,甚至造成节点之间无法正常通信,所以为了确保节点能够正常地接收消息,必须保证一定的发射功率.但是另一方面,当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,从而不仅会增进移动节点的能耗,而且会导致严重的同道干扰,降低整个无线网络的通信容量.因此,发射功率和平均误比特率是两个相互矛盾的目标,在实际的无线系统中需要在两者之间进行权衡取舍.

在无线通信中广泛地采用前项纠错编码和交织等容错技术来消除少量错误比特的影响,其能够保证在平均误比特率低于一定门限时,接收节点能够完全地恢复原始的发射消息,从而忽略由随机的衰减和噪声所引起的错误比特.于是,在功率分配问题中一个合理的目标是根据节点之间的信道状态信息,为源节点和伙伴节点分配合适的发射功率,在伙伴节点和目的节点的平均误比特率不大于一个给定门限的约束下,使两个节点的发射功率之和最小化.为此,功率分配问题能够建立如下的数学模型

$$\begin{aligned} \min \quad & \Gamma_S + \Gamma_P \\ \text{s.t.} \quad & P_P(e) \leq P_{th} \\ & P_D(e) \leq P_{th} \end{aligned}$$

其中 $P_P(e)$ 和 $P_D(e)$ 分别表示伙伴节点和目的的平均误比特率, P_{th} 表示接收系统所能够容忍的平均误比特率门限. P_{th} 用来刻画伙伴节点和目的节点是否能够正常接收消息,其具体取值依赖于特定的前项纠错编码和调制方式,但是在本文中假设其为一个已知常数.通过在误比特率性能和发射功率之间进行优化折衷,协作分集不仅能够开发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,而且能够进一步降低移动节点的能耗和网络中的同道干扰.

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信噪比的条件误比特率可以表示为^[12, table 6.1]

$$\begin{aligned} P_P(e | \gamma_{S,P}) &= AQ(\sqrt{B\gamma_{S,P}}) \\ A &= \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M \log_2 M}}, \quad B = \frac{3}{M-1} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $Q(x)$ 是由下式定义的辅助差错函数

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (6)$$

如果伙伴节点的平均误比特率小于或者等于 P_{th} , 则伙伴节点能够利用容错机制正确地接收和恢复来自于源节点的消息,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

接收两路信号. 根据式(3), 目的节点的条件误比特率可以表示为

$$P_D(e|\gamma_{S,D}, \gamma_{P,D}) = AQ(\sqrt{B(\gamma_{S,D} + \gamma_{P,D})}) \quad (7)$$

实时信噪比为服从指数分布的随机变量, 而且相互独立, 所以平均误比特率是条件误比特率针对多径衰减分布的统计平均. 然而, 由于条件误比特率复杂的形式, 难于根据式(5)和式(7)直接计算伙伴节点和目的节点的平均误比特率. 在这种情况下, 平均误比特率的近似表达式扮演这极为重要的角色, 尤其是当这些近似表达式具有足够的精确度时.

3 最优功率分配方案

本节首先推导了伙伴节点和目的节点闭合形式的平均误比特率, 然后根据这些表达式计算了在源节点和伙伴节点之间的最优功率分配方案.

使用高斯 Q 函数的 Craig 公式^[13]

$$Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad (8)$$

$$P_P(e) = \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \sqrt{\frac{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,P}}{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,P} + 2}}$$

$$P_D(e) = \begin{cases} \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \left(\frac{\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}}{\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} - \Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \right) \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{A}{2} \left(\frac{\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}}{\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D} - \Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right) \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \right)^{-\frac{1}{2}} & \Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D} \neq \Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} \\ \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{A}{2} \left(\frac{1}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right) \left(1 + \frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right)^{-\frac{3}{2}} & \Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D} = \Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} \end{cases} \quad (11)$$

在式(11)中目的节点的平均误比特率公式 $P_D(e)$ 是一个复杂的非线性函数, 造成式(4)是一个复杂的非线性优化问题. 在这种情况下, 确定最优的功率分配方案需要大量复杂的计算, 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. 在实际的无线网络中, 为了确保源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地检测, 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, 所以 $\frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}}$ 和 $\frac{2}{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}}$ 为趋近于 0 的小数. 根据泰勒公式

$$(1+x)^{-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{3}{8}x^2 + o(x^2) \quad (12)$$

$$(1+x)^{-\frac{3}{2}} = 1 - \frac{3}{2}x + o(x)$$

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 $(1 + \frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}})^{-\frac{1}{2}}$ 、 $(1 + \frac{2}{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}})^{-\frac{1}{2}}$ 和 $(1 + \frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}})^{-\frac{3}{2}}$, 从而得到 $P_D(e)$ 的近似计算公式

$$P_D(e) \approx \frac{3A}{4B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \quad (13)$$

利用多项式级数近似替代精确公式, 虽然简化了

可以将式(5)和式(7)中的条件误比特率分别改写为

$$P_P(e|\gamma_{S,P}) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{B\gamma_{S,P}}{2\sin^2\theta}\right) d\theta$$

$$P_D(e|\gamma_{S,D}, \gamma_{P,D}) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{B\gamma_{S,D}}{2\sin^2\theta}\right) \exp\left(-\frac{B\gamma_{P,D}}{2\sin^2\theta}\right) d\theta \quad (9)$$

根据式(1), 实时接收信噪比 $\gamma_{S,D}$ 、 $\gamma_{R,D}$ 和 $\gamma_{S,R}$ 为服从指数分布的随机变量, 而且相互独立. 因此根据指数分布的矩生成函数(Moment Generating Function), 伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式能够分别表示为

$$P_P(e) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,P}}{2\sin^2\theta} \right)^{-1} d\theta$$

$$P_D(e) = \frac{A}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}}{2\sin^2\theta} \right)^{-1} \left(1 + \frac{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}}{2\sin^2\theta} \right)^{-1} d\theta \quad (10)$$

设 $x = 1/\sin^2\theta$, 可以将式(10)中的被积函数转化为简单函数, 然后分别求积分, 从而能够得到如式(11)所示闭合形式的平均误比特率表达式.

计算, 却带来了截断误差. 式(13)中的近似计算公式和式(11)中的精确公式相比, 由截断高级数所产生误差的上界为

$$\begin{aligned} \epsilon &< \frac{A}{2} \left(\frac{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} - B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \right) \frac{5}{16} \left(\frac{2}{B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \right)^3 \\ &\quad - \frac{A}{2} \left(\frac{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} - B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}} \right) \frac{5}{16} \left(\frac{2}{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}} \right)^3 \\ &= \frac{5A}{4} \left(\frac{B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D} + B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}}{(B\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D})^2 (B\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D})^2} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

例如, 当采用 4-QAM 时, 如果两路接收符号的平均信噪比 $\Gamma_S \bar{\gamma}_{S,D}$ 和 $\Gamma_P \bar{\gamma}_{P,D}$ 分别为 20dB, 则由 $P_D(e)$ 的近似公式所产生的计算误差 ϵ 要小于 2.5×10^{-6} . 因此, 完全可以用 $P_D(e)$ 的近似计算公式替代其精确表达式, 而忽略近似公式所产生的计算误差.

根据式(11)和式(13), 可以把功率分配问题的数学模型简化为

$$\begin{aligned} &\min \Gamma_S + \Gamma_P \\ &\text{s.t.} \quad \frac{(A - 2P_{th})^2}{2B\gamma_{S,P} P_{th} (A - P_{th})} \leq \Gamma_S \\ &\quad \frac{3A}{4B^2 \bar{\gamma}_{P,D} \bar{\gamma}_{S,D} P_{th}} \leq \Gamma_P \Gamma_S \end{aligned} \quad (15)$$

显而易见, 式(15)是一个简单的非线性优化问题. 图 2

(a)和图 2(b)分别显示了在不同参数条件下式(15)的最优值,其中边界函数定义如下

$$\begin{aligned} f_1(\Gamma_S, \Gamma_P) &= \Gamma_S - \frac{(A - 2P_{th})^2}{2B\bar{\gamma}_{S,P}P_{th}(A - P_{th})} \\ f_2(\Gamma_S, \Gamma_P) &= \Gamma_P\Gamma_S - \frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}} \\ f_3(\Gamma_S, \Gamma_P) &= \Gamma_S + \Gamma_P \end{aligned} \quad (16)$$

根据图(2),可以方便地确定在源节点和伙伴节点之间的最优功率分配方案,如式(17)所示.

$$(\Gamma_S, \Gamma_P) = \begin{cases} \left(\sqrt{\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}}}, \sqrt{\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}}} \right), \\ \frac{(A - 2P_{th})^2}{\bar{\gamma}_{S,P}P_{th}(A - P_{th})} \leq \sqrt{\frac{3A}{\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}}} \\ \left(\frac{(A - 2P_{th})^2}{2B\bar{\gamma}_{S,P}P_{th}(A - P_{th})}, \frac{3A\bar{\gamma}_{S,P}(A - P_{th})}{2B\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}(A - 2P_{th})^2} \right), \\ \frac{(A - 2P_{th})^2}{\bar{\gamma}_{S,P}P_{th}(A - P_{th})} > \sqrt{\frac{3A}{\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}}} \end{cases} \quad (17)$$

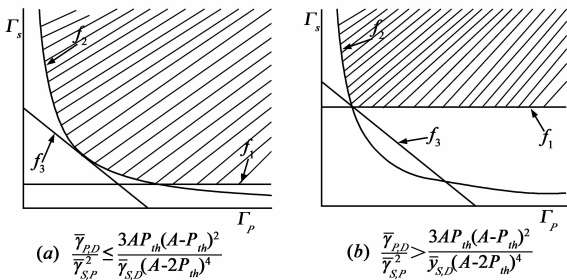


图2 最优功率分配方案

4 分布式算法

在集中式环境中,利用式(17)能够直接地计算最优功率分配方案,但是在无线网络中,分布式的环境、节点的移动和受限的无线带宽给功率分配算法的实现和部署带来严峻的挑战,从而导致源节点和伙伴节点难于直接根据式(17)来计算各自的最优发射功率.为此,本节提出了一种分布式的和自适应的功率分配算法,利用实时的信道估计和少量的控制协议开销,动态地计算最优的功率分配方案.

式(17)所示的最优功率分配方案是信道状态 $\bar{\gamma}_{S,D}$ 、 $\bar{\gamma}_{S,P}$ 和 $\bar{\gamma}_{P,D}$ 的函数,所以为了计算最优功率分配方案不可避免地需要估计源节点-伙伴节点、源节点-目的节点和伙伴节点-目的节点之间的信道状态.当节点 i 以功率 Γ_i 发射一个数据消息时,节点 j 的接收符号可以表示为

$$y_{i,j}(l) = \sqrt{\Gamma_i}h_{i,j}(l)x(l) + w_{i,j}(l) \quad (18)$$

其中 $x(l)$ 和 $y(l)$ 分别表示第 l 个发射符号和接收符

号, $h_{i,j}(l)$ 表示信道衰减系数, $w_{i,j}(l)$ 为加性高斯白噪声.通过在所发射的消息中插入已知的导频信息,节点 j 能够获得信道衰减信息 $\sqrt{\Gamma_i}h_{i,j}(n)$,并进一步估计两个节点之间信道状态

$$\hat{\gamma}_{i,j} = \frac{1}{\Gamma_i} \left[\frac{\sum_{l=1}^L |\sqrt{\Gamma_i}h_{i,j}(l)\hat{x}(l)|^2}{\sum_{l=1}^L |y_{i,j}(l) - \sqrt{\Gamma_i}h_{i,j}(l)\hat{x}(l)|^2} \right] \quad (19)$$

其中 L 表示每个消息中的符号个数, $\hat{x}(l)$ 表示接收节点 j 对节点 i 所发射符号 $x(l)$ 的估计值.显然,节点 j 需要节点 i 的发射功率值,以估计信道状态信息.

根据式(19),当接收到来自源节点的一个数据消息后,伙伴节点估计信道状态 $\bar{\gamma}_{S,P}$,然后计算

$$\Gamma_1 = \frac{(A - 2P_{th})^2}{2B\bar{\gamma}_{S,P}P_{th}(A - P_{th})} \quad (20)$$

参数 Γ_1 反映了源节点-伙伴节点之间的信道状态,表示源节点为了保证伙伴节点能够正确地接收并转发数据消息所必需的发射功率.类似地,当分别接收来自于源节点和伙伴节点的数据消息后,目的节点分别估计信道状态 $\bar{\gamma}_{S,D}$ 和 $\bar{\gamma}_{P,D}$,然后计算

$$\Gamma_2 = \sqrt{\frac{3A}{4B^2\bar{\gamma}_{P,D}\bar{\gamma}_{S,D}P_{th}}} \quad (21)$$

参数 Γ_2 反映了源节点-目的节点和伙伴节点-目的节点之间的信道状态,表示为了使目的节点能够正常地接收数据消息,源节点和伙伴节点的发射功率所需要的最小积.为了快速地响应信道状态的变化,对于信道状态的预测是不可或缺的.对于连续的数据传输而言,数据消息的传输间隔非常小.为简单起见,在本文中假设在这段间隔内信道状态不发生变化,因此可以利用当前信道状态信息计算下一次数据传输过程所需的最优功率分配方案.由于参数 Γ_1 和 Γ_2 反映了当前的信道状态,根据这两个参数能够很容易地得到最优功率分配方案

$$(\Gamma_S, \Gamma_P) = \begin{cases} (\Gamma_2, \Gamma_2), & \Gamma_1 \leq \Gamma_2 \\ \left(\Gamma_1, \frac{\Gamma_2^2}{\Gamma_1} \right), & \Gamma_1 > \Gamma_2 \end{cases} \quad (22)$$

具体的分布式功率分配算法由三部分组成,分别负责在源节点发射消息、在伙伴节点转发消息和在目的节点接收消息,相对应的 UML(Unified Modeling Language)活动图分别如图 3、图 4 和图 5 所示,其中 Γ_{\max} 表示无线网络默认的发射功率.在无线网络中,因为只有接收节点能够获取信道状态信息,而其他节点无法得到信道的任何信息,所以计算最优的功率分配方案需要额外的控制协议提供支持,用于传输参数 Γ_1 和 Γ_2 的信息.依赖于特定的网络协议,节点之间能够通过独立的控制消息或者数据消息携带的方式传输这些参数

信息. 本文并不介绍如何传输参数信息, 而是着重说明需要在节点之间传递何种参数信息. 需要指出的是由于信道的广播特性, 如果使用独立的控制消息, 只需两个控制消息就能够使源节点、伙伴节点和目的节点分别获得各自所必需的参数信息.

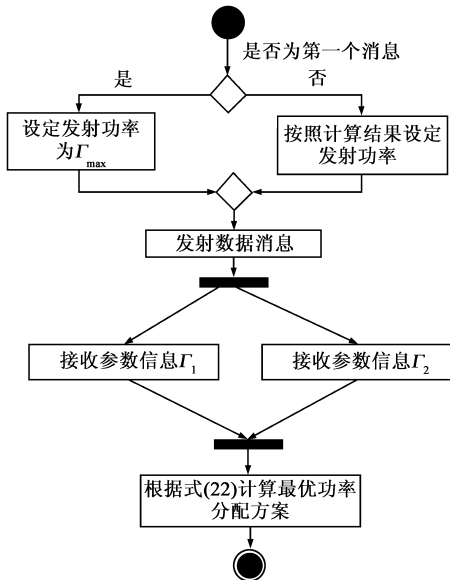


图3 源节点发射过程活动图

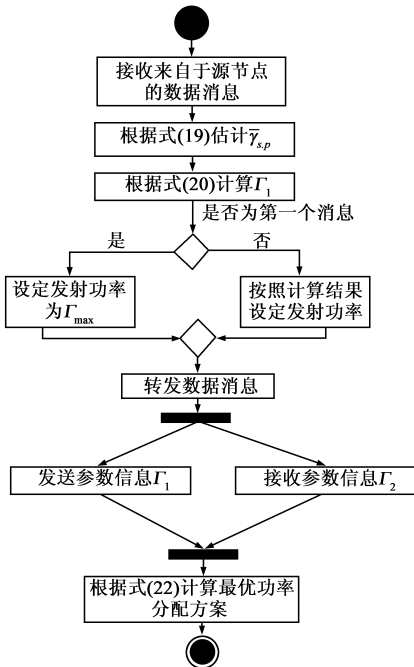


图4 伙伴节点转发过程活动图

本文所提出的分布式算法具有自适应能力. 因为节点的移动, 节点之间的信道状态随着节点之间相互位置的改变而动态地变化. 固定模式的功率分配算法往往会恶化传输性能或者消耗大量的功率. 为了在满足传输性能的同时, 使功率消耗最小化, 本文所提出的算法通过实时的信道估计, 能够逐个消息地调整源节

点和伙伴节点的发射功率, 从而适应信道状态的变化. 不仅如此, 本节所提出的分布式算法还具有较小的通信开销. 仅仅需要传输两个参数信息, 就能够使源节点、伙伴节点和目的节点在分布式的无线环境中分别独立地计算最优发射功率, 用于发送和转发下一个数据消息. 因此, 本文提出的算法能够适应分布式的和动态的无线网络环境, 从而易于在无线网络中实现和部署.

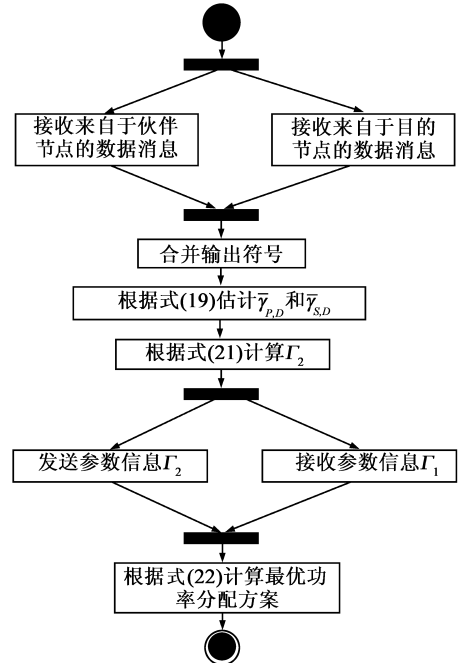


图5 目的节点接收过程活动图

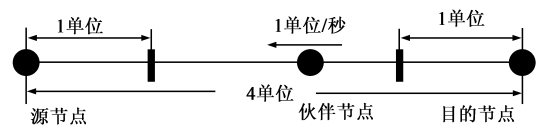


图6 仿真场景

5 仿真

为了验证第四节所提出的分布式功率分配算法, 本节对该算法进行了仿真, 并且评估了误比特率性能和最优功率分配方案.

本节的仿真场景如图6所示, 源节点和目的节点之间的距离为4个单位, 坐标分别为(0,0)和(4,0), 伙伴节点以1单位/秒的速率从起点(3,0)运动到终点(1,0). 在仿真中所采用的主要通信参数如下: 调制方式为16-QAM, 路径损耗指数 $n = 2$, 接收系统所能容忍的最大平均误比特率 $P_{th} = 0.005$, 每个数据消息中所包含的符号个数 $N = 1000$, 源节点每秒发送15个数据消息, 在单位距离处和单位发射功率时的平均信噪比 $\bar{\gamma} = 0\text{dB}$. 在仿真过程中, 我们假设接收节点能够正确地估计信道衰减信息 $\sqrt{\Gamma}h(m)$.

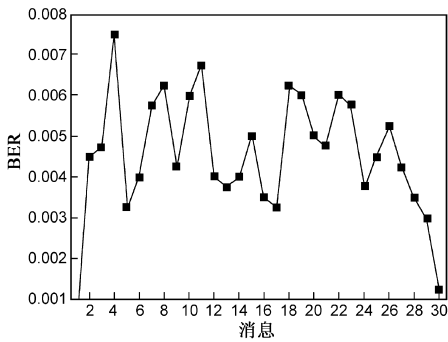


图7 伙伴节点的误比特率

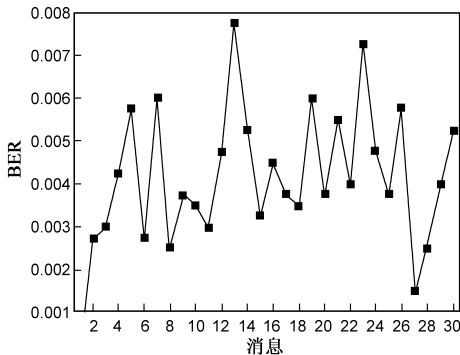


图8 目的节点误比特率

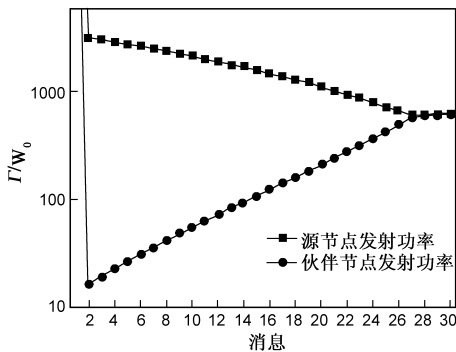


图9 源节点和伙伴节点的发射功率

图7和图8分别显示伙伴节点和目的节点在接收每个数据消息时的误比特率。从图7和图8,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,当发生深度衰落时,接收节点就会相应地产生大量的突发错误比特。在实际的无线系统中,广泛地采用交织技术,使突发的错误比特分散到多个数据消息中,从而产生均匀的随机错误。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} ,从而满足所需的误比特率性能。图9显示了源节点和伙伴节点在发射每个数据消息过程中的发射功率,其中 W_0 表示加性高斯白噪声的功率。从图9中,我们可以看出随着伙伴节点位置的变化,源节点和伙伴节点能够动态地调整各自的发射功率以适应信道状态

的变化。从图9中,我们还可以发现伙伴节点处于不同位置时,源节点和伙伴节点的功率消耗将会产生非常明显的差异。这对于选择适当的伙伴节点参与转发而言尤为重要。

综上所述,仿真结果比较好地吻合了第三节中的理论分析结果。换言之,第四节提出的分布式功率分配算法不仅能够使伙伴节点和目的节点的平均误比特率分别满足约束,而能够使源节点和伙伴节点的发射功率之和极小化。

6 结论

在协作分集系统中,源节点、目的节点和伙伴节点之间具有不同的信道状态,所以为源节点和伙伴节点分配不同的发射功率往往导致迥异的传输性能、节点能耗和同道干扰。为此,针对解码转发的协作分集,本文提出了一种分布式的和自适应的功率分配算法。和已有的工作相比,本文主要有以下三点贡献。第一,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。第二,本文分别推导了在瑞利多径衰落信道中使用M-QAM时伙伴节点和目的节点的平均误比特率公式,从而刻画了解码转发协作分集系统的性能。第三,本文所提出的功率分配算法是一种分布式的和自适应的算法,其能够适应非集中式的和动态的无线网络环境,所以易于在无线网络中实现和部署。

参考文献:

- [1] J N Laneman, D N C Tse, G W Wornell. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 50(12): 3062 - 3080.
- [2] J N Laneman, G W Wornell. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(10): 2415 - 2425.
- [3] A Sendonaris, E Erkip, and B Aazhang. User cooperation diversity-part I: system description [J]. IEEE Trans. Commun, 2003, 51(11): 1927 - 1938.
- [4] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity-part II: implementation aspects and performance analysis [J]. IEEE Trans. Commun, 2003, 51(11): 1939 - 1948.
- [5] A Nosratinia, T E Hunter, and A Hedayat. Cooperative communication in wireless networks [J]. IEEE Commun. Mag., 2004, 42(10): 74 - 80.
- [6] Y Ding, J Zhang, M Wong. The amplify-and-forward half-duplex cooperative system: pairwise error probability and precoder design [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2007, 55(2): 605 - 617.

- [7] A Stefanov and E Erkip. Cooperative coding for wireless networks[J]. IEEE Trans. Commun, 2004, 52(9): 1470 – 1476.
- [8] J Luo, R S Blum, L J Cimini, L J Greenstein. Decode-and-forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun. , 2007, 6(3): 793 – 799.
- [9] Y Li, B Vucetic, Z Zhou, and M Dohler. Distributed adaptive power allocation for wireless relay networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun, 2007, 6(3): 948 – 958.
- [10] S Savazzi, U Spagnolini. Energy aware power allocation, strategies for multihop-cooperative transmission schemes[J]. IEEE J. Selected Areas Commun. , 2007, 25(2): 318 – 327.
- [11] V Mahinthan, L Cai, J W Mark, X S Shen. Partner selection based on optimal power allocation in cooperative diversity systems[J]. IEEE Trans. on Veh. Technol, 2008, 57(1): 511 – 520.
- [12] A Goldsmith. Wireless Communications [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2005.
- [13] M K Simon, M-S Alouini. Digital Communication over Fading Channels (Second Edition)[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. , 2005.

作者简介:



屈春河 男, 1977年3月出生于河北. 2001年毕业于南京邮电学院通信工程系, 现在中科院计算技术研究生攻读博士学位, 主要从事空时编码、协作通信和网络服务等方面的研究工作.

E-mail: qch@ict.ac.cn



杨景 男, 教授、博士生导师. 1952出生于上海. 现为 UT 斯达康首席科学家, 主要从事网络业务控制和集成体系结构等方面的研究工作.

E-mail: James.yang@utstar.com



张国清 男, 副研究员、硕士生导师. 1965出生于浙江浦江. 现为中科院计算技术研究所副研究员, 主要从事计算机网络和网络科学等方面的研究工作.

E-mail: gqzhang@ict.ac.cn