

放大转发中的最优功率分配与最佳中继选择^①

王仕果^{②*} 纪红^{**} 温斌^{**}

(* 湘潭大学信息工程学院 湘潭 410005)

(** 北京邮电大学无线泛网通信教育部重点实验室 北京 100876)

摘要 用最优功率分配与最佳中继选择相结合的方法实现了放大转发系统的误比特率最小化。为了使单中继非协作放大转发系统的误比特率最小,通过分析媒体接入控制(MAC)层的请求发送/允许发送(RTS/CTS)信息,获得候选中继前向信道和后向信道的增益,以信道增益为变量,得到最佳功率分配的闭合表达式。同时,以误比特率作为中继选择准则,实现分布式最佳中继选择。仿真结果表明,与同类算法相比,该功率分配与中继选择策略使系统的误比特率达到最小。

关键词 放大转发, 最优功率分配, 最佳中继选择, 无线中继, 解码转发

0 引言

在无线通信系统中,通过中继转发与协作,可以实现空间分集,减小发射功率,减弱信道干扰,扩大信号覆盖范围和增加系统容量,因此,如何有效地将中继引入现有无线通信系统则成为通信界的研究热点^[1,2],而最优功率分配与最佳中继选择是充分发挥中继系统潜质的两个关键技术。

在总功率受限时,节点之间的功率分配将严重影响无线中继系统的性能。文献[3]建立了多中继广播模型,从理论上得出广播每比特信息所需的最小能量,为最优化功率分配树立了目标。在已知信道状态的条件下,文献[4]提出一种集中式的功率分配策略。文献[5]对获取信道状态的能量消耗进行了建模,得出多中继选择和功率消耗之间的关系。文献[6]对几种经典的中继协作转发模型进行了分析,得到协作模式下的功率分配策略。文献[7,8]提出了以中断概率最小化为目的的最优功率分配算法,得到了功率最优分配的闭合表达式,并求得了次优解。文献[9]针对协作和非协作中继转发系统,提出了两跳正交频分复用(OFDM)多载波通信系统的多载波之间的能量分配方法。

关于中继节点的最佳选择,文献[10,11]利用中继媒体接入控制(MAC)层的请求发送(RTS)/允许

发送(CTS)获得后向信道(中继至源节点)以及前向信道(中继至目的节点)的信道信息,并根据不同准则将这2个信道的信息进行综合,利用该综合参数对中继进行选择。在文献[12]中,邹玉龙等人在文献[10,11]的基础上,对非协作中继选择问题进行了理论分析,并提出了一种分布式最优单中继选择方案。

在特定的通信环境下,以上算法都能分别从功率分配和中继选择两个方面对系统的性能进行改进。但是,这些算法都只局限于单方面,并没有将功率的最优分配与中继的最佳选择相结合,因而,当功率受限时,上述文献中的最佳中继并不是最佳的。因此,本文以最小化误比特率为标准,在总功率受限的情况下,将最优功率分配与最佳中继选择相结合,利用MAC层的RTS/CTS获得前向信道和后向信道的信道增益,以信道增益为变量,得出最优功率分配的闭合表达式和最佳中继选择方案,从而实现真正的最佳中继选择。

1 系统模型

本文对单中继非协作放大转发进行了研究,假定所有的终端都工作在半双工方式,用单天线进行发射和接收。设源节点(S)、中继节点(R)和目的节点(D)位于同一平面上,如图1所示。

^① 863计划(2009AA01Z246, 2009AA01Z211)和国家自然科学基金(60672124)资助项目。

^② 男,1975年生,博士;研究方向:无线中继网,无线自组网,认知网络;联系人, E-mail: sgwang7508@gmail.com
(收稿日期:2009-07-06)

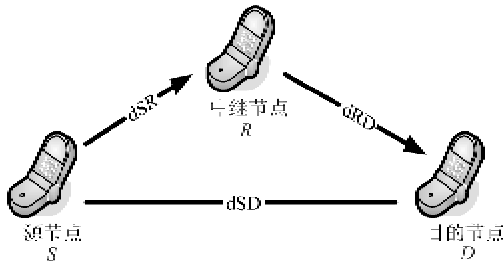


图 1 单中继非协作放大转发模型

在数据传输过程中,每帧数据的通信由两个时隙组成,即源节点广播时隙和中继节点放大转发时隙。在第一时隙,源节点进行信号发送,中继节点进行接收,其接收到的信号为 $R_r = \sqrt{G_{SR}k_s E}h_{SR}x_1 + n_R$, 其中 G_{SR} 为源节点到中继节点的信道增益, k_s 为功率调节系数 ($0 < k_s < 1$), E 为系统的总功率, h_{SR} 为源节点与中继节点之间的瑞利衰落, x 为单位功率的发射信号, n_R 为中继节点处产生的加性高斯噪声。设 $E |h_{SR}|^2 = 1, E |n_R|^2 = N_0$, 对中继节点的接收信号进行归一化后得

$$\bar{R}_r = \frac{\sqrt{G_{SR}k_s E}h_{SR}}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}}x + \frac{n_R}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}}$$

则目的节点在第二时隙的接收信号为

$$\begin{aligned} R_D &= \frac{\sqrt{G_{RD}k_R E} \sqrt{G_{SR}k_s E}h_{SR}h_{RD}x + \sqrt{G_{RD}k_R E}h_{RD}n_R}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}} \\ &\quad + n_D \\ &= \frac{\sqrt{G_{RD}G_{SR}k_s k_R E}h_{SR}h_{RD}x}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}} + \frac{\sqrt{G_{RD}k_R E}h_{RD}n_R}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}} \\ &\quad + n_D \\ &= Ax + n \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\sqrt{G_{RD}G_{SR}k_s k_R E}h_{SR}h_{RD}}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}} \\ n &= \frac{\sqrt{G_{RD}k_R E}h_{RD}n_R}{\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}} + n_D \end{aligned}$$

h_{RD} 为源节点与中继节点之间的瑞利衰落, n_D 为节点 D 处产生的加性高斯噪声。

由于 $\sqrt{G_{RD}k_R E}h_{RD}n_R/\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0}$ 和 n_D 是两个相互独立的白高斯噪声,因此它们的线性组合还是白高斯噪声,容易求得其均值和相关函数分别为

$$E\{(\sqrt{G_{RD}k_R E}h_{RD}n_R/\sqrt{G_{SR}k_s E + N_0} + n_D)\} = 0,$$

$$R(\tau) = [G_{RD}k_R E/(G_{SR}k_s E + N_0) + 1]N_0\delta(\tau).$$

设物理层用相移键控 (PSK) (2PSK 或正交 PSK (QPSK)) 进行调制,则误比特率为

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2G_{SR}G_{RD}k_s k_R E^2}{(G_{RD}k_R E N_0 + (G_{SR}k_s E + N_0)N_0)}}\right) \quad (1)$$

系统可达的最大数速为

$$R = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{G_{SR}G_{RD}k_s k_R E^2}{G_{RD}k_R E N_0 + (G_{SR}k_s E + N_0)N_0} \right) \quad (2)$$

2 最佳能量分配策略

为了使系统的误比特率达到最小值,只要使 Q 函数达到最小即可。由于 Q 函数是单调递减函数,因而只要调系数 k_s, k_R 使

$\sqrt{2G_{SR}G_{RD}k_s k_R E^2/(G_{RD}k_R E N_0 + (G_{SR}k_s E + N_0)N_0)}$ 取最大值。由于 $k_s + k_R = 1, k_s > 0, k_R > 0$, 因此上述问题转化为求如式

$$f(k_s) = \frac{2G_{SR}G_{RD}k_s(1-k_s)E^2}{(G_{RD}(1-k_s)N_0 E + (G_{SR}k_s E + N_0)N_0)} \quad (3)$$

所示函数的最大值。

$f(k_s)$ 是一个连续函数,在 $(-\infty, +\infty)$ 上必然存在极值。由于 k_s 必须满足 $0 < k_s < 1$, 因此,在 $(0,1)$ 定义域内的极大值点就是源节点最佳功率分配比例。对(3)式求极值,得到符合题意的解为

$$k_{OP} = \frac{-(G_{RD}E + N_0) + \sqrt{(G_{RD}E + N_0)(G_{SR}E + N_0)}}{(G_{SR} - G_{RD})E} \quad (4)$$

证明如下:为获得(4)式的取值范围,对其变形得

$$\begin{aligned} k_{OP} &= \frac{(G_{RD}E + N_0)}{\sqrt{(G_{RD}E + N_0)(G_{SR}E + N_0)} + (G_{RD}E + N_0)} \\ &= \frac{G_{RD} \frac{E}{N_0} + 1}{\sqrt{(G_{RD} \frac{E}{N_0} + 1)(G_{SR} \frac{E}{N_0} + 1)} + (G_{RD} \frac{E}{N_0} + 1)} \end{aligned} \quad (5)$$

可以容易看出,(5)式的值域为 $(0,1)$, 符合实际要求。而且,当 $G_{SR} = G_{RD}$ 时, $f(k_s)$ 在 $k_s = \frac{1}{2}$ 处取到最大值,即源节点与中继节点等能量分配。

因此,当源节点按(4)式的功率比例进行信号发射时,(1)式和(2)式同时分别达到最小值和最大值。从而实现了源节点与中继节点之间的最优化功率分配。可以看出,该最优化功率分配比例不但与广播信道和中继信道的增益有关,而且与系统的信噪比

有关。

3 最佳中继选择机制

中继节点根据信道增益,可由(4)式计算出最佳功率分配比例 k_{OP} ,再将其代入(3)式得出函数 $f(k_{OP})$ 的值,即

$$f(k_{OP}) = \frac{2G_{SR}G_{RD}k_{OP}(1-k_{OP})\left(\frac{E}{N_0}\right)^2}{G_{RW}(1-k_{OP})\frac{E}{N_0} + G_{SR}k_{OP}\frac{E}{N_0} + 1}。$$

以该函数值为准则,值最大的节点即为最佳中继。实现分布式中继选择时,根据 $f(k_{OP})$ 的值设定定时器的初值,定义中继节点的定时器的初值为

$$T = \frac{C}{f(k_{OP})} \quad (6)$$

其中 C 为归一化时间常数。

中继节点的分布式实现与文献[12]类似,实现过程主要包括 3 个步骤:

首先,所有候选中继通过 RTS/CTS 来进行信道估计。

其次,由估计得到的信道增益由(4)式计算最优功率分配比例,并得到 $f(k_{OP})$ 的值。

然后,由(6)式得到定时器的初值并启动定时器,最终最佳中继的定时器将率先归零,并广播协作发送(PTS)控制包。

最后,源节点解调 PTS 包头以获得最佳中继的 MAC 地址和最佳功率分配比例,之后开始发送数据包(如图 2 所示)。具体实现过程如下:

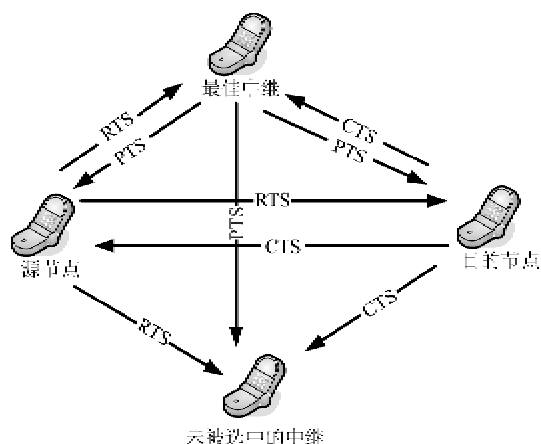


图 2 分布式最佳中继选择实现过程

(1)首先,源节点侦听信道状态,若信道在一个分布式帧间间隔(distributed interframe space, DIFS)

时间段内处于空闲状态,当源节点完成了退避过程,则广播一个 RTS 包。若信道忙,源节点则必须等待直至信道空闲一个 DIFS 周期,然后再发送 RTS。与此同时,目的端在收到 RTS 包后将发送 CTS 包。

(2)所有候选中继将根据先后从源节点和目的节点收到的 RTS 和 CTS 进行信道估计,以获得源节点到中继节点和中继节点到目的节点之间的信道状态信息。然后,中继节点开始按着式(10)计算各自的定时器初值,并启动定时器。于是,最佳中继的定时器将率先减至零,之后将广播发送 PTS。

(3)所有候选中继在收到 PTS 包后,将各自的定时器清零,并开始进行退避以免造成冲突。若源节点收到 PTS 控制包,将解出 PTS 包中的 MAC 地址域和最佳功率分配比例,开始按最佳功率分配比例向最佳中继传送数据包。若源节点在一个 PTS 超时周期内仍未收到 PTS 包,则采用直传模式,即直接向目的节点发送数据包。

(4)目的节点收到数据包之后,将发送一个 AC 应答。如源节点一直收不到目的端的 ACK 应答,则在一个超时周期后认为本次发送失败,并启动指数退避算法。

4 仿真与性能分析

在系统仿真过程中,物理层采用 QPSK 调制。同时,为了减小仿真时间,系统没有利用任何信道编码技术,所有的无线信道都采用 Jakes 模型进行建模。无线网络的规模设置为 10 个网络点,即源节点、目的节点和 8 个候选中继节点。由于信道估计不是本文研究的内容,因此在对最佳中继进行选择时,我们假设候选中继的前向和后向信道增益都已经知道,即 8 个候选节点随机地从(1dB, 30dB)范围内获得两个值作为前向信道增益和后向信道增益。

图 3 给出了不同方式下系统误比特率。其中“等功率最佳中继”即文献[12]所给算法的误比特率;“等功率随机中继”表示等功率分配时依次选择每个中继时的误比特率的平均;“随机中继最佳功率”表示依次取每个中继进行最佳功率分配时的误比特率的平均,也就是相关文献中只考虑最优功率分配时的误比特率。从图上仿真结果可以看出,当以最佳功率分配时的误比特率作为最优中继选择准则时,可以使系统获得最小误比特率,与前面的理论分析相一致。同时,可以看出,当只单独考虑最佳中继选择或最优功率分配时,前者的误比特率比后者

要低,因为在一般情况下,中继选择比功率分配对误比特性能影响更大。

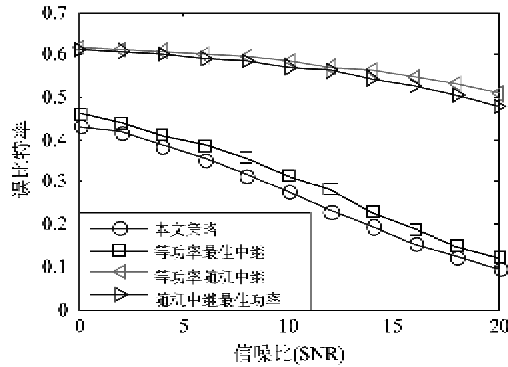


图 3 不同中继选择和功率分配下的误比特率

为分析信道增益对系统最优分配的影响,设前向增益与后向增益之和一定(仿真中取值为 30db),当增益分配不同时,对源端的最优分配比例进行了统计,其结果如图 4 所示。从图可以看出,当后向信道增益小于前向信道增益时,源端的最优功率分配比例大于 0.5,即源端的发射功率小于中继的发射功率。反之亦然。

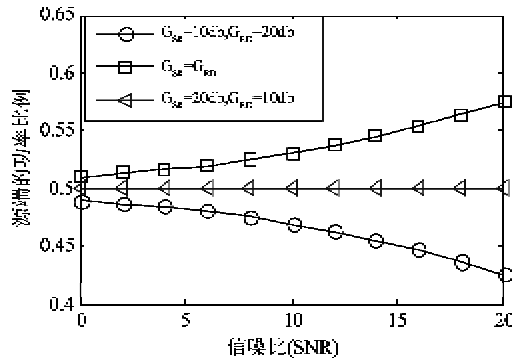


图 4 不同信道增益时源端最佳功率比例

同时,本文对系统的最大可达速率进行了统计,如图 5 所示。与其他功率分配方法相比,该最佳功

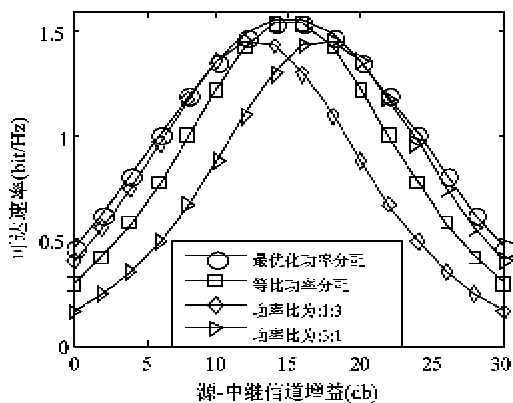


图 5 不同功率分配方式下可达速率比较

率分配策略在任何信道增益情况下,可达速率最大。同时表明,在总信道增益一定时,当前向信道增益与后向信道增益相等时,系统可达速率达到最大值。

5 结 论

本文将最佳中继选择与最优功率分配相结合,通过理论分析,以最小误比特率为最佳中继选择标准,得出最优功率分配的闭合表达式和最佳中继选择策略。同时,阐述了如何利用 MAC 层的 RTS/CTS 信息实现分布式中继选择。并通过仿真,验证了理论分析的正确性,解决了单中继非协作放大转发系统中的最佳功率分配和最优中继选择的问题。我们的下一步工作,将对协作放大转发及解码转发系统中的功率分配和中继选择问题进行研究。

参考文献

- [1] Hong C Y, Pang A C. 3-Approximation algorithm for joint routing and link scheduling in wireless relay networks. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 856-861
- [2] Caleb K L, Sriram V, Robert W H. Relay subset selection in wireless networks using partial decode-and-forward transmission. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2009, 58(2): 692-704
- [3] Liang S, Dimitrios H. Broadcasting energy efficiency limits in wireless networks. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(7): 2502-2611
- [4] Harish V, Sayandev M. Performance of cellular networks with relays and centralized scheduling. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2318-2328
- [5] Ritesh M, Neelesh B, Jin Z. Energy-efficient cooperative relaying over fading channels with simple relay selection. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(8): 3013-3025
- [6] Muhammad M F, Murat U. BER-optimized power allocation for fading relay channels. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 3150-3159
- [7] Walid H, Pascal B, Philippe C. Outage probability-based power and time optimization for relay networks. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2009, 57(2): 764-782
- [8] 李国兵,朱国华等. 最佳中继协作通信系统的功率分配算法, 电子学报, 2008, 6(10): 1944-1948
- [9] Li Y, Wang W. Sub-carrier pairing for amplify-and-forward and decode-and-forward OFDM relay links. *IEEE Communications Letters*, 2009, 13(4): 209-211
- [10] Bletsas A, Khisti A, Reed D P. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(3): 659-672

- [11] Bletasas A, Khisti A, Reed D P. A simple distributed method for relay selection in cooperative diversity wireless networks based on reciprocity and channel measurements. In: Proceeding of the 61st IEEE Semiannual Veh Technol Conf. Stockholm, Sweden, 2005. 1484-1488
- [12] 邹玉龙, 郑宝玉, 崔景伍等. 基于跨层机制的最佳协作中继选择及其系统实现. 通信学报, 2008, 29(8): 1-10

Optimal power allocation and relay selection in amplify-and-forward relay systems

Wang Shiguo^{* **}, Ji Hong^{**}, Wen Bin^{**}

(^{*} School of Information and Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 410005)

(^{**} Key Laboratory of Universal Wireless Communication Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

Abstract

The minimization of the bit error rate (BER) of amplify-and-forward relay systems was achieved using the method of combining the optimal power allocation with the optimal relay selection. In order to minimize the BER of a single-relay non-cooperative amplify-and-forward system, the forward-channel gain and the backward-channel gain at the candidate relay were obtained through analyzing the request to send/clear to send (RTS/CTS) information in the medium access control (MAC) layer, and a closed form expression to allocate power optimally was got, which is the function of the channel gain. At the same time, considering the BER as the relay selection criterion, a distributed method to select the best relay was presented. The simulation results show that when using the proposed strategy, the system BER is the smallest compared to other similar methods.

Key words: amplify-and-forward, optimal power allocation, optimal relay selection, wireless relay, decode-and-forward