

Adaptive Relay Selection Algorithm in Cooperative Communication

Pingtian Yin

Southeast University, Nanjing
Email: 3131165840@qq.com

Abstract: Based on the traditional cooperative communications' protocol for fixed forwarding based on the research according to a dynamic network environment for network topology changes dynamically and wireless transmission timing characteristics, an adaptive transmission relay selection strategy and power allocation method was proposed. Simulation results showed that, compared with traditional fixed cooperative diversity, the proposed adaptive relaying scheme further improved the performance gain, bit error rate dropped significantly, and that the network life was prolonged.

Keywords: Amplify Forward; Decode Forward; Outage Possibility Adaptive Selection; Algorithm Power Allocation

协作通信中自适应中继选择和功率控制算法

殷平天

东南大学, 南京
Email: 3131165840@qq.com

摘 要: 本文基于传统协作通信中的对于固定转发协议研究的基础上, 针对了动态网络环境中网络拓扑的变化与无线传输的时序特性, 提出了自适应中继选择算法和功率分配方案。仿真结果表明, 相对于传统固定协作分集而言, 本文提出算法进一步提高了性能增益, 误比特率显著下降, 延长网络寿命。

关键词: 放大转发; 解码转发; 中断选择; 功率分配

1. 引言

多天线技术(MIMO)^[1]由于可以提供空间分集, 在不增加系统带宽和发送信号功率的情况下, 提高频谱效率, 近年来在无线通信系统中已经能够成为研究的热点。然而移动终端由于尺寸, 复杂度, 成本以及其他因素的制约, 使得其无法安装多个天线。为了解决这些限制问题, A. Sendonaris^[2]等人提出了用户间协作通信技术。协作通信的基本思想就是每个单用户之间

共享彼此的天线, 从而形成一种虚拟的多天线系统, 以实现发送分集。从而达到增强网络覆盖能力和提高网络吞吐量^[3,4]的目的。

经过数学建模和性能分析之后, 协作通信中最关键的问题就是怎么从多个可选中继中选出合适的节点参与转发以及确定中继节点的转发方式和功率分配情况。目前的研究方向集中在放大中继(Amplify and Forward AF), 检测中继(Decode and Forward, DF), AF

转发方式下,中继节点只是将接收到的信息进行简单的放大。在 DF 中,中继节点将接收到的信息进行解码,然后对解码后的信息进行重新编码后发送给目的节点。

目前的大多数研究主要基于 AF 或者 DF,很少能够根据信道的情况把两者结合起来。文献[5-7]提出了在 DF 协作网络中,通过启发式的中继节点选择和功率分配方法来降低接点的功率消耗和延长网络的生命周期。文献[8,9]中研究了 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。本文则为了能够提高通信系统的性能,更好的利用系统资源提出了一种新的中继选择方法和功率分配方案。然后仿真分析了 LDPC 码在 AF、DF,自适应中继选择三种协作策略下的系统性能。并且将该系统目的节点接收信噪比作为目标函数,在总功率恒定的约束条件下,推导了源节点和中继节点的功率分配表达式,还通过蒙特卡洛仿真分析了 ARS 算法和传统的等功率分配进行了性能比较。证明了本文提出来的功率分配方案可以使通信系统消耗系统资源更少,从而节省了系统开销,在提高系统性能的同时延长网络寿命。这种研究对于资源非常有限的无线通信系统的来说是很有理论和应用意义的。

2. 系统模型

图 1 是我们研究的系统模型,系统中包含一个源节点,一个目的节点和 N 个中继节点。我们假设因为源节点和目的节点之间由于障碍物的干扰不存在直传链路。所有的中继节点可以采用 AF 或 DF 协作策略。目的节点能同时接收来自于 AF 协作和 DF 协作方式传来的信号。在发送信息前,通信系统中的各节

点间发送信息序列对信道性能进行估计,目的节点通过获知的信道信息选择合适的中继节点然后对这些参与信息转发的节点进行功率分配控制,最后将这些信息反馈给信源节点和选择的中继节点进行信息的发送。

源节点的信号通过两个时隙进行传输,第一个时隙源节点向所有中继节点发送广播信号,第二个时隙是选择出来的中继节点继续向目的节点发送信息。

我们定义源节点和中继节点之间的信道为 $S \rightarrow R$ 链路,把中继节点到目的节点的信道定义为 $S \rightarrow D$ 链路。 h_{sr_i} 、 h_{sd_i} 、 h_{rd_i} ($i=1,2,\dots,N$) 分别表示源-中继、源-目的,中继-目的节点间链路的信道增益。 P_s 表示发送节点的功率, $P_{r,i}$ 表示第 i 个节点的发射功率, P_{total} 表示总的发送功率 $P_{total} \geq P_s + \sum_{i=1}^N P_{r_i}$ 。目的节点通过反馈信道获得 $S \rightarrow R$ 和 $S \rightarrow D$ 的链路的瞬时信道增益选择中继选择方案并对源节点和中继节点进行功率控制。虽然目的节点的接收反馈信号会带来一定的开销,但是我们可以采用一种根据信道变化的自适应中继方案改善系统性能。

3. 改进的自适应算法描述

本文我们提出了一种改进的自适应中继选择算法,使得目的节点 SNB 最大的情况下,在 N 个节点下选择两个中继。一个中继采用 DF 协作转发策略,另一个中继选择 AF 协作转发策略。这样我们就可以把 AF 和 DF 转发协作结合起来使用进而克服各自中继转发策略自身的缺点。

3.1. 选择采用 AF、DF 协作策略的中继节点

从 N 个中继节点中选择一个满足式的中继节点采

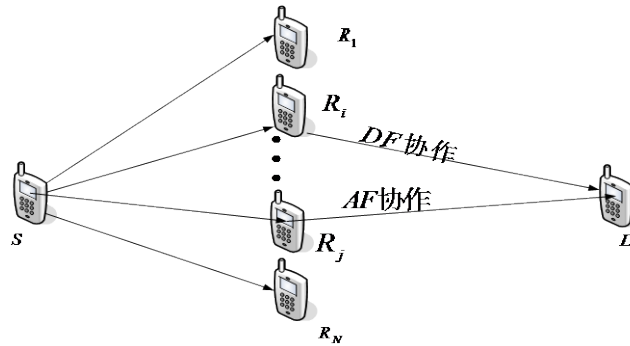


Figure 1. Network model of the system
图 1. 网络模型图

用 DF 中继选择。根据信息论的知识，我们知道选出的这个中继节点可以使得接收端拥有最大的 SNR，所以选择采用 DF 协作方式的中继节点的准则是

$$\arg \max_{i \in R} \left(\min \left(P_s |h_{s,ri}|^2, P_{ri} |h_{ri,d}|^2 \right) \right) \quad (1)$$

根据信息论的知识，我们也可以得到采用 AF 协作转发策略的中继节点应该满足以下准则：

$$\arg \max_{i \in R} \left(\frac{P_s P_{ri} |h_{s,ri}|^2 |h_{ri,d}|^2}{P_s |h_{s,ri}|^2 + P_{ri} |h_{ri,d}|^2 + 1} \right) \quad (2)$$

3.2. 改进的自适应中继选择算法

根据上面推导出来的两个准则，我们可以很轻易的选出合适的中继节点，但是实际上当两个中继节点选出来后，哪一个应该被首先选出来也应该被考虑，因为中继节点的选择顺序也会影响系统的性能。所以我们提出来一种自适应中继选择算法并且具体算法流程图如下所示。

在图 2 的流程图中：假设目的节点知道 $S \rightarrow R$ 和 $S \rightarrow D$ 的链路的瞬时信道增益，然后一种情况是先选择出使用 DF 协作策略的中继节点，然后选择出使用 AF 协作策略的中继节点。另一种情况则与之相反。根据两种不同的选择顺序，计算出接收端的信噪比分别如式(3)和式(4)所示，然后从两个方案中选择出使得接收信噪比最大的那个中继节点的选择顺序。

$$\gamma_{overall_DF_AF} = \min_{i \in R} \left(P_s |h_{s,ri}|^2, P_{ri} |h_{ri,d}|^2 \right) + \frac{P_s P_{ri} |h_{s,ri}|^2 |h_{ri,d}|^2}{P_s |h_{s,ri}|^2 + P_{ri} |h_{ri,d}|^2 + 1} \quad (3)$$

$$\gamma_{overall_AF_DF} = \min_{i \in R} \left(P_s |h_{s,rj}|^2, P_{rj} |h_{rj,d}|^2 \right) + \frac{P_s P_{rj} |h_{s,rj}|^2 |h_{rj,d}|^2}{P_s |h_{s,rj}|^2 + P_{rj} |h_{rj,d}|^2 + 1} \quad (4)$$

其中， $\gamma_{overall_DF_AF}$ 和 $\gamma_{overall_AF_DF}$ 分别表示两种选择

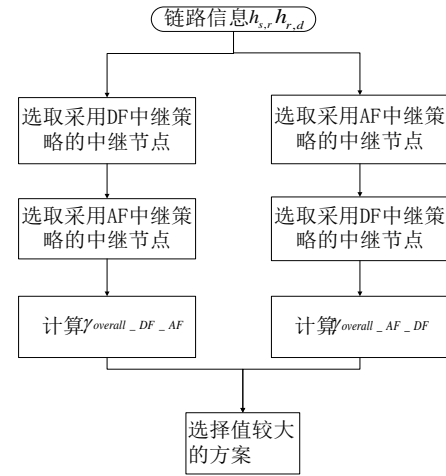


Figure 2. The flowchart of the adaptive relay selection algorithm
图 2. 自适应中继选择算法流程图

策略下的目的节点的接收信噪比。

3.3. 自适应功率分配控制

功率对于协作通信的影响很大，不仅影响用户间的相互干扰还涉及到网络整体寿命，所以我们必须对网络模型中各节点的发送功率进行一定的控制。我们假设通信系统中源节点和参与转发的中继节点们的总功率的受限的，即 $P_{total} = P_s + P_{r_AF} + P_{r_DF}$ ，我们采用的功率分配方案的准则是最大化目的节点的接收信噪比。

$$F(P_s, P_{r_AF}, P_{r_DF}) = \min \left(P_s |h_{s,r_DF}|^2, P_{r_DF} |h_{r,d}|^2 \right) + \frac{P_s P_{r_AF} |h_{s,r_AF}|^2 |h_{r,d_AF}|^2}{P_s |h_{s,r_AF}|^2 + P_{r_AF} |h_{r,d_AF}|^2 + 1} \quad (5)$$

其中 $F(P_s, P_{r_AF}, P_{r_DF})$ 表示目的节点的接收信噪比， P_{r_AF} 是采用 AF 协作策略的中继节点的发送功率， P_{r_DF} 采用 DF 协作策略的中继节点的发送功率。

接下来的任务就是将该系统目的节点接收信噪比作为目标函数，系统总功率 P_{total} 恒定作为约束条件，推导了源节点和中继节点的功率分配表达式。

$$\max_{[P_s, P_{r_DF}, P_{r_AF}]} \left\{ \min \left(P_s |h_{s,r_DF}|^2, P_{r_DF} |h_{r,d}|^2 \right) + \frac{P_s P_{r_AF} |h_{s,r_AF}|^2 |h_{r,d_AF}|^2}{P_s |h_{s,r_AF}|^2 + P_{r_AF} |h_{r,d_AF}|^2 + 1} \right\} \quad (6)$$

Subject to $P_{total} = P_s + P_{r_AF} + P_{r_DF}$

1) 第一种情况:

$$P_s |h_{s,r_DF}|^2 \leq |h_{r,d_DF}|^2 P_{r_DF} \quad (7)$$

当 \min 函数的值根据第一种情况确定后, 结合式

(6) 和 $P_{\text{total}} = P_s + P_{r_AF} + P_{r_DF}$ 得到

$$\begin{aligned} P_s &= \arg \max F(P_s) \\ &= \frac{-d(1+cP_{\text{total}})}{(d+b)(e-c)} \\ &\quad \pm \frac{d\sqrt{K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}})}}{K(e-c)(d+b)} \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= |h_{s,r_AF}|^2, \quad b = |h_{s,r_DF}|^2, \\ c &= |h_{r,d_AF}|^2, \quad d = |h_{r,d_DF}|^2, \end{aligned}$$

$$K = ef - ec - cf,$$

$$L = ecP_{\text{total}} + f + fcP_{\text{total}},$$

$$e = \frac{ad}{b+d}, \quad f = \frac{bd}{b+d}.$$

如果式(8)中根号下面的值是个负数, P_s 就是一个复数。如果根号下面的值是正数, 那么 P_s 就是一个凹函数, 所以两种情况都应该考虑到。

$$\textcircled{1} K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}}) < 0$$

$$P_s = \frac{d}{d+b} P_{\text{total}}, \quad P_{r_DF} = \frac{b}{d+b} P_{\text{total}}, \quad P_{r_AF} = 0 \quad (9)$$

因为我们得到的采用 AF 协作策略的中继节点分配功率为 0, 所以系统就可以看成是采用 DF 协作策略进行通信的系统。

$$\textcircled{2} K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}}) \geq 0$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{-d(1+cP_{\text{total}})}{(e-c)(d+b)} \pm \frac{d\sqrt{K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}})}}{K(d+b)(e-c)} \\ P_{r_DF} = \frac{-b(1+cP_{\text{total}})}{(e-c)(d+b)} \pm \frac{b\sqrt{K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}})}}{K(d+b)(e-c)} \\ P_{r_AF} = P_{\text{total}} + \frac{(1+cP_{\text{total}})}{(e-c)} \mp \frac{b\sqrt{K^2(1+cP_{\text{total}})^2 - KL(e-c)(1+cP_{\text{total}})}}{K(e-c)} \end{cases}$$

2) 第二种情况:

$$P_{r_DF} |h_{r,d}|^2 < P_s |h_{s,r_DF}|^2 \quad (10)$$

同情况一的计算步骤, 在情况二过程中, 我们可以得到如下表达式

$$F(P_s, P_{r_AF}, P_{r_DF}) = \frac{acP_s P_{r_AF}}{aP_s + cP_{r_AF} + 1} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_s = \frac{-(1+cP_{\text{total}})}{a-c} \pm \frac{\sqrt{(1+cP_{\text{total}})^2 - P_{\text{total}}(a-c)(1+cP_{\text{total}})}}{a-c} \\ P_{r_AF} = P_{\text{total}} + \frac{(1+cP_{\text{total}})}{a-c} \mp \frac{\sqrt{(1+cP_{\text{total}})^2 - P_{\text{total}}(a-c)(1+cP_{\text{total}})}}{a-c} \\ P_{r_DF} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

第二种情况适用于采用 DF 协作策略的中继节点与和目的节点之间的信道链路很差的状况。因为 $R \rightarrow D$ 所在的链路状况比较差，所以 P_{r_DF} 分配的功率大小为 0。这个结果也证明了给那些信道状况很差的中继节点分配功率是不必要的。

4. 仿真分析

假设协作通信系统中有 10 个可选中继节点，系

统总功率为 $3w$ ，并且考虑用户采用的是具有良好性能的低密度奇偶校验(LDPC)进行编码，LDPC 编码的译码采用和 - 积译码算法。图 3、4 分析了三种协作方式下，中断概率随系统总功率的关系以及信噪比与误码率的关系，仿真结果可以看出，采用自适应中继选择算法的系统比采用另外两种固定中继协作策略的系统的拥有更低的中断概率和误码率。

我们利用蒙特卡洛仿真验证了 ARS 算法的理论

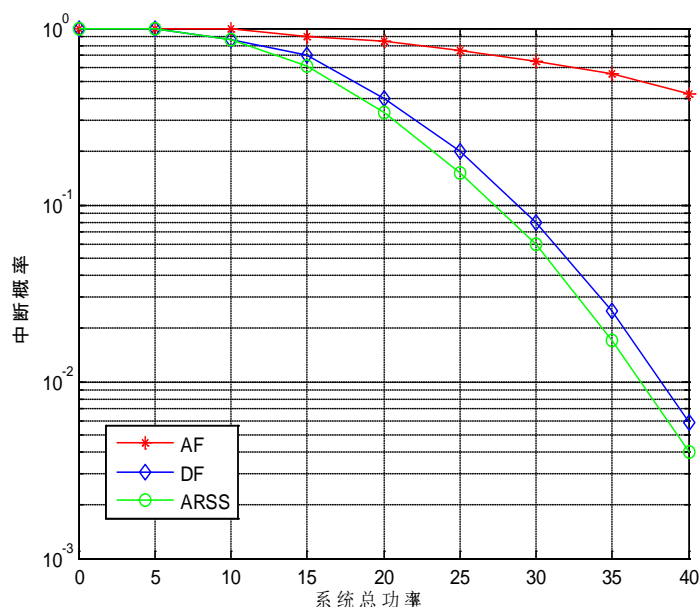


Figure 3. The outage probability of the system depending on the total power
图 3. 不同协作方式功率与中断概率关系

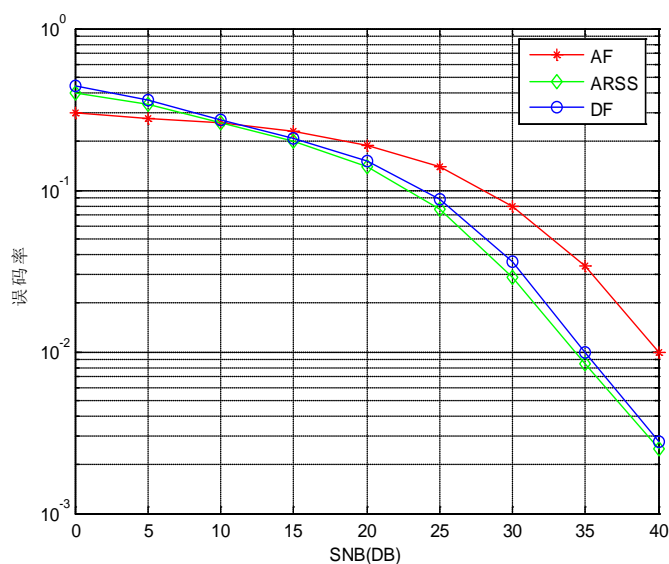


Figure 4. The BER of the system depending on the SNR
图 4. 不同协作方式 SNB 与误码率关系

分析, 假设协作通信中各信道满足加性高斯白噪声的瑞利分布且相互统计独立。图 5 分析了当协作通信系统拥有 10 个中继节点的时候, 两种功率分配方案中信噪比与系统总功率的关系。仿真结果表明, 在消耗相同资源情况下, ARS 算法中的目的接收端可以获得更高的信噪比。图 6 仿真分析了两种功率分配方案中信噪比与中继节点数目的关系。仿真中, 假设系统的总功率为 20 w, 可以看出本文提出的功率分配算法比等功率算法有 1~3 dB 的增益, 进而证明 ARS 算法可以很好的改善系统的性能。虽然 ARS 算法在进行中继选择的时候会给系统带来一定的时延, 但是对于无

实时要求的通信系统来说是可以接受的。

5. 结束语

本文提出基于各个信道的链路状况的提出了自适应的中继选择和功率控制算法。ARS 算法的主要优势是在于根据实际信道状态自适应选择中继以及协作方式。研究表明这种方案和固定中继转发协议相比, 增加了系统的通信可靠性并且更加合理地利用了系统资源, 降低了链路的 BER, 获得了更优的协作性能。

参考文献 (References)

- [1] Dohler, M., Gkelias, A. and Aghvami, H. (2003) 2-Hop distributed MIMO communication system. *Electronics Letters*, **39**, 1012-1016.
- [2] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B. (2003) User cooperation diversity—Part 11: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions on Communications*, **51**, 1939-1948.
- [3] Telatar, I.E. (1999) Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications*, **10**, 585-595.
- [4] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B. (2003) User cooperation diversity part I II. *IEEE Transactions on Communications*, **51**, 1927-1948.
- [5] Laneman, J.N., Tse, D.N.C. and Wornell, G.W. (2004) Cooperative diversity in wireless network efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions on Information Theory*, **50**, 3062-3080.
- [6] 赵知劲, 杨进丽, 汪海泉 (2011) 中继未知任何信道信息条件下中继选择的研究. *信号处理*, **27**, 468-474.
- [7] Krikidis, I., Thompson, J., McLaughlin, S., et al. (2008) Amplify-and-forward with partial relay selection. *IEEE Communications Letters*, **12**, 235-237.
- [8] Guo, H., Ge, J.H. and Ding, H.Y. (2011) Symbol error probability of two-way amplify-and-forward relaying. *IEEE Communications Letters*, **15**, 22-24.
- [9] Li, C.X., Yue, G.S., Wang, X.D., et al. (2008) LDPC code design for half-duplex cooperative relay. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **7**, 4558-4567.

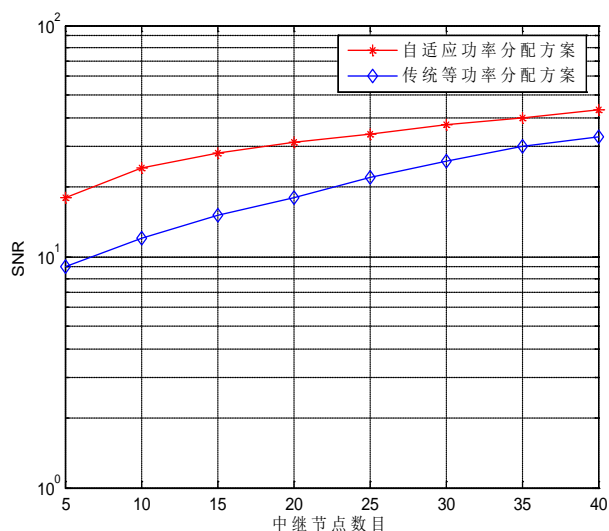


Figure 5. The received SNR depending on the number of relays
图 5. 不同功率方案 SNR 与中继节点

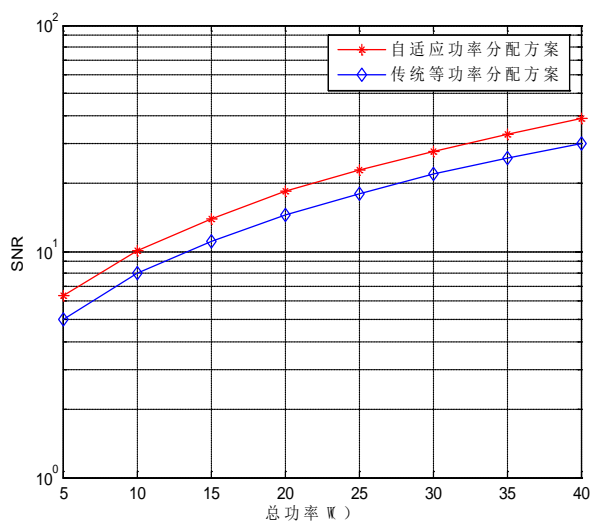


Figure 6. The received SNR depending on the total power
图 6. 不同功率方案 SNR 与总功率关系