

基于误码率的 AF 协作通信系统功率分配方法的研究

蒋宇轩

(东南大学 信息工程与科学学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 协作通信思想通过用户间彼此共享天线, 互为通信中继, 实现虚拟发射分集, 从而为 MIMO 的实用提供了一个可行的思路。针对单中继 AF 协作的功率分配问题, 本文提出了一种基于误码率的 Lagrange 算法, 并通过 MATLAB 仿真, 验证了对协作通信系统的改善。

关键词: 协作通信; AF; 最优功率分配; 误码率; Lagrange 算法

Research on Power Allocation Method of AF Cooperative Communication System Based on BER

Jiang Yu-xuan

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Absrtact: Cooperative communication idea realizes virtual transmit diversity by sharing antennas among users and relaying each other, thus providing a feasible idea for the application of MIMO. Aiming at the power allocation problem of single relay AF cooperation, this paper proposes a Lagrange algorithm based on bit error rate, and verifies the improvement of cooperative communication system through MATLAB simulation.

Key words: cooperative communication; AF; optimal power allocation; bit error rate; Lagrange algorithm

0 引言

在无线通信系统中, 传输能量的优化、无线资源的分配可以大大提升整个通信系统的性能。在无线通信技术飞速发展的今天, 传统的点对点通信模式已经不能满足用户对通信可靠性和高传输速率的要求了, 多节点协作传输模式因其优越具有的性能而备受青睐。根据不同的中继技术, 主要的协作策略主要包括有放大转发 (Amplify and Forward:AF) [1]、解码转发 (Decode and Forward:DF) [2]。在这样的系统中, 每条链路性能的变化都会引起系统整体性能的变化, 因此功率优化和资源分配就显得格外重要。其中协作节点间的功率优化分配是需要考虑的基本问题之一。

协作通信系统的功率优化分配问题比较复杂, 按其优化目标可分为: 固定总功率优化分配 (Fixed-Sum-power, FSP), 最小化总功率优化分配 (Minimize-Sum-Power, MSP) [3]。文献[4]研究了 DF 方式下的功率分配方法。文献[5]提出了一种中继位置与功率分配的联合优化方案, 但作者在功率分配上使用的方法是等功率分配方法。本文在以 FSP 为目的, 提出了一种基于 Lagrange 算法的最佳功率分配方案以优化 AF 协作方式下的功率分配。

1 放大转发模式

1.1 AF 模式基本原理及性能

放大转发模式 (Amplify-and-Forward, AF), 有文献中也称为前向放大、非再生中继。在 AF 协议下, 中继采用模拟处理, 不对接收的信号进行解调和解码, 而是直接对接收到的带有噪声的信号进行放大, 然后发送给接收端。图 1 所示为单中继 AF 协

作者简介: 蒋宇轩, (1998-), 男, 本科生,

E-mail:213161212@seu.edu.cn.

议的原理及其基本过程。

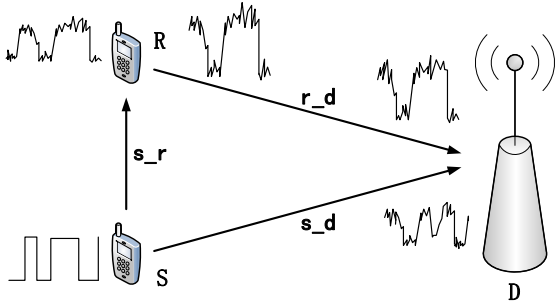


图 1 单中继 AF 协作通信原理

AF 模式是最简单的一种中继方式，相比于直传方式，AF 协作通信总能带来一定的信噪比增益，但是由于中继节点除了转发源节点的有用信息外，引入的噪声也同样被放大转发，因此，当源节点与中继节点之间的链路信道条件较差时，信号几乎淹没在噪声之中，因而转发的大部分为噪声，从而会降低目的节点的接收性能。

1.2 单中继 AF 协作通信过程

1.2.1 源端广播过程

源节点 S 以广播的方式向周围发送信号 x_s ，其中一路直接发送到目的节点 D，一路发送到中继节点 R。经过信道后，则中继节点 R 接收到的信号为 $y_{s,r}$ ：

$$y_{s,r} = \sqrt{P_s} h_{s,r} x_s + n_{s,r} \quad (1.2.1)$$

目的节点 D 接收到的信号为 $y_{s,d}$

$$y_{s,d} = \sqrt{P_s} h_{s,d} x_s + n_{s,d} \quad (1.2.2)$$

其中， P_s 源发送的信号功率为， $n_{s,r}$ 为源节点与中继节点间信道噪声。

1.2.2 中继端放大转发过程

中继节点 R 直接将收到的来自源节点 S 的信号 $y_{s,r}$ 以系数 β 进行功率放大，然后转发给目的节点 D（基站）。AF 方式可以看成是具有两个发射端的重复码，唯一不同的是中继节点将自身接收到的噪声信号也放大并发送到目的节点。目的节点通过合并两路信号，对源节点的发送信号进行估计。

为保证中继节点功率受限，放大系数 β 应满足：

$$\beta = \sqrt{\frac{P_s}{P_s |h_{s,r}|^2 + N_0}} \quad (1.2.3)$$

可见 β 取决于信道的衰落系数 $h_{s,r}$ 、源发送的信号功率 P_s 和噪声功率 N_0 。

那么，中继放大后的信号为 y_{AF} ：

$$y_{AF} = \beta y_{s,r} \quad (1.2.4)$$

目的节点接收的来自中继的信号为 $y_{r,d}$ ：

$$y_{r,d} = \sqrt{P_r} h_{r,d} y_{AF} + n_{r,d} \quad (1.2.5)$$

其中 P_r 为中继节点发送的信号功率。

1.2.3 目的端接收处理

目的节点将接收到的来自源节点的直传信号 $y_{s,d}$ 和来自中继节点的信号 $y_{r,d}$ ，按照 MRC 方案进行合并，得到信号 y ：

$$y = a_1 y_{s,d} + a_2 y_{r,d} \quad (1.2.6)$$

其中 a_1 、 a_2 分别为目的节点接收到的来自源、来自中继的信号加权系数，为：

$$a_1 = \frac{\sqrt{P_s} h_{s,d}^*}{N_0} \quad (1.2.7)$$

$$a_2 = \frac{\beta \sqrt{P_r} h_{s,r}^* h_{r,d}^*}{(\beta^2 |h_{r,d}|^2 + 1) N_0} \quad (1.2.8)$$

式中， P_s 和 P_r 分别为协作情况下源节点和中继节点的发送功率， $h_{s,d}^*$ 、 $h_{s,r}^*$ 和 $h_{r,d}^*$ 分别为源节点与目的节点、源节点与中继节点、中继节点与目的节点之间的瑞利衰落信道系数的复共轭， N_0 为噪声功率。

1.3 信噪比分析

假定所传输的信号功率归一化，采用 MRC 合并方式，则此单中继模型下的 AF、DF 协作通信系统的理论信噪比为：

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (1.3.1)$$

其中，对于 AF 模式：

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{|a_1 \sqrt{P_s} h_{s,d}|^2}{|a_1|^2 N_0} \\ &= \frac{P_s |h_{s,d}|^2}{N_0} \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

和

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \frac{\left| a_2 \frac{\sqrt{P_r}}{\sqrt{P_r |h_{s,r}|^2 + N_0}} \sqrt{P_r} h_{r,d} h_{s,r} \right|^2}{N_0^2 |a_2|^2} \\ &= \frac{\frac{P_r^2}{P_r |h_{s,r}|^2 + N_0} |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{\left(\frac{P_r |h_{r,d}|^2}{P_r |h_{s,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0} \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{N_0} \frac{P_r^2 |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{P_r |h_{s,r}|^2 + P_r |h_{r,d}|^2 + N_0} \quad (1.3.3)$$

对于 BPSK 系统,当发送“1”符号和发送“0”符号概率相等时,最佳判决门限 $b^*=0$,则系统的总误码率 P_e 为:

$$P_e = P(0)P(0|1) + P(1)P(1|0) \\ = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\gamma}) \quad (1.3.4)$$

其中, $P(0|1)$ 为符号“0”被判为符号“1”的概率。

在大信噪比条件下,式(1.3.4)可近似表示为:

$$P_e \approx \frac{1}{2\sqrt{\pi\gamma}} e^{-\gamma} \quad (1.3.5)$$

可见,系统的总误码率 P_e 与信噪比 γ 具有反相关性,随着信噪比的增加,总误码率也得以下降。

2 固定总功率 (FSP) 优化分配算法

在单继点系统中,源节点 s 要发送信息给目的节点 d ,由于无线信道的广播特性,其中一些中继节点能够监听到发送的信息,从而能协作源节点发送数据。系统中任意两个节点之间的链路建模为瑞利衰落信道,噪声为加性高斯白噪声。假定不同链路的信道衰落是统计独立的。这个假设是合理的,因为各个中继节点之间通常是分离的。所有接收端的加性噪声建模为方差为 N_0 ,均值为零的复高斯随机变量。假设各中继节点在正交信道上发送,中继节点之间没有干扰。

如图所示, $h_{s,r}$ 、 $h_{s,d}$ 、 $h_{r,d}$ 分别是源和中继节点 ($s-r$)、源和目的节点 ($s-d$)、中继和目的节点 ($r-d$) 之间的信道系数,并相互独立。 P_s 、 P_r 分别为源节点 S 和中继节点 R 的发射功率,系统总发射功率为 P ,即

$$P_s + P_r = P \quad (2.1)$$

当目的节点采用最大合并比 (MRC) 时,根据 (1.3.1) ~ (1.3.3),接收信噪比为:

$$\gamma = \frac{P_s |h_{s,d}|^2}{N_0} + \frac{1}{N_0} \frac{P_r^2 |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{P_r |h_{s,r}|^2 + P_r |h_{r,d}|^2 + N_0} \quad (2.2)$$

将接收信噪比作为待优化的目标函数,式(2.1)为其约束条件。

采用 Lagrange 乘算子法求出最优解:

$$L = \frac{P_s |h_{s,d}|^2}{N_0} + \frac{1}{N_0} \frac{P_r^2 |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2}{P_r |h_{s,r}|^2 + P_r |h_{r,d}|^2 + N_0} + \lambda (P_s + P_r - P) \quad (2.3)$$

分别对 P_s 、 P_r 求偏导数,令其等于零,求解方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_s} = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial P_r} = 0, \\ P_s + P_r = P, \end{cases} \quad (2.4)$$

求解方程可得最佳功率分配为:

$$P_s = \frac{(ab-d)c + \sqrt{(d-ab)(b+c)cd}}{b(d-ab)} P \quad (2.5)$$

$$P_r = P - P_s \quad (2.6)$$

其中 $a = |h_{s,d}|^2$, $b = |h_{s,r}|^2 - |h_{r,d}|^2$,

$$c = |h_{r,d}|^2 + \frac{N_0}{P}, d = |h_{s,r}|^2 |h_{r,d}|^2$$

3 程序模块实现

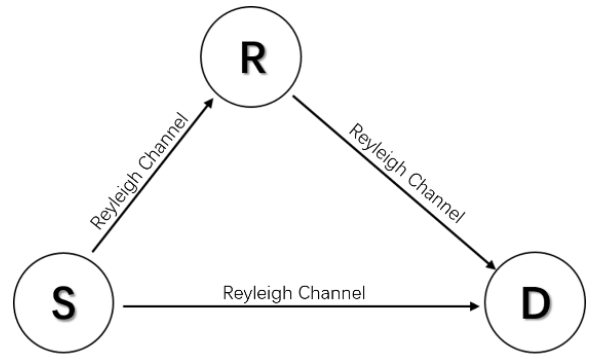


图 2 程序通信过程

图 2 为程序的流程图,在生成信号并进行 BPSK 调制后,生成信道参数。之后再进行不同信噪比下的仿真循环,每个信噪比均进行多次蒙特卡罗循环。

3.1 信道模型

为简化程序,信道采用恒参的瑞利衰落信道,即在一次通信过程中(一次蒙特卡罗过程),衰落系数表现为一恒定复数的形式:

function H = RayleighCH(sigma2)

% average value(0)

mu = 0; sigma = sqrt(sigma2);

% Standard deviation(σ)

H = normrnd(mu,sigma)+j*normrnd(mu,sigma);

信道的正态分布的均值为方差 $\mu = 0$,只需输入方差 σ^2 ,即可得到信道系数 H 。函数 $R = \text{normrnd}(MU,SIGMA)$ 的功能是生成均值为 MU 、标准差为 $SIGMA$ 的正态分布的随机数据。高斯白噪声通

过 awgn 函数实现。

3.2 MRC 实现

MRC 的伪代码为：

1. 输入参数

信道系数、中继放大系数、信号功率、噪声功率、需要合并的两路信号

2. 伪代码为：

$a_{sd} = CH_{sd}' * \sqrt{POW_S_{sd}} / POW_N_{sd};$

$a_{rd} = (\beta * \sqrt{POW_S_{rd}} * CH_{sr}' * CH_{rd}') / ((\beta^2 * (\text{abs}(CH_{rd}))^2 + 1) * POW_N_{rd});$

3. 返回合并信号

$y_{combine} = a_{sd} * \text{signal}_{sd} + a_{rd} * \text{signal}_{rd};$

3.3 AF 实现

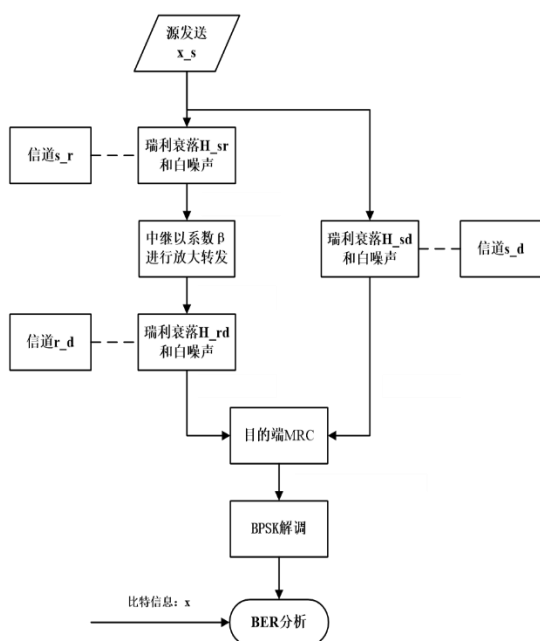


图3 AF流程图

在中继节点，对接收到的来自源节点的信号 s_r 放大，并向目的节点转发，函数通过输入 S 和 R 之间的信道衰落系数、信号与噪声的功率和需要转发的信号 s_r ，实现中继的 AF 过程，返回值为：经放大处理后的信号，它将被发送到目的节点；以及放大系数 β ，以供目的节点 MRC 使用。

4 仿真结果

假设信道类型为瑞利衰落信道 (Rayleigh) 和加性高斯白噪声信道 (AWGN)，信号采用 BPSK 调制方式。为验证理论分析结果，本文采用 Monte Carlo

方法，对功率分配与 BER 性能的关系进行了仿真。

图 4 表示的是直传模式下与采用固定放大转发中继协议模式下，SNR 与 BER 之间的关系仿真。可以看出当信道信噪比较小时，采用 AF 协议对系统误码率几乎没有改善。但当信道的信噪比逐渐增大时，采用 AF 协议能够明显改善系统的误码率，而且这种趋势越来越明显。

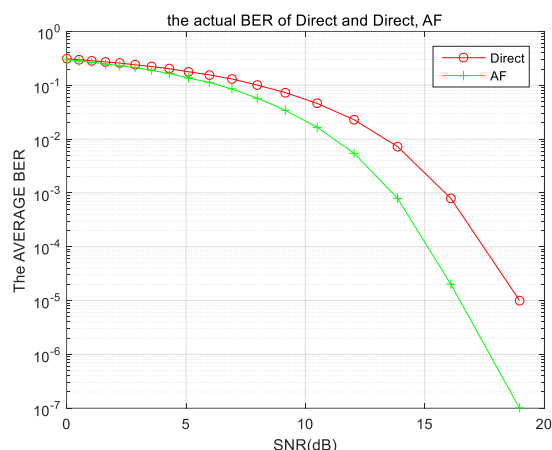


图4 非协作通信与 AF 的误码率比较

图 5 给出了在 AF 通信系统中，采用最佳功率分配方案和其他功率分配的误码率的对比。由图可见，最佳功率分配的性能优于其他功率分配的性能，能够明显降低误码率。

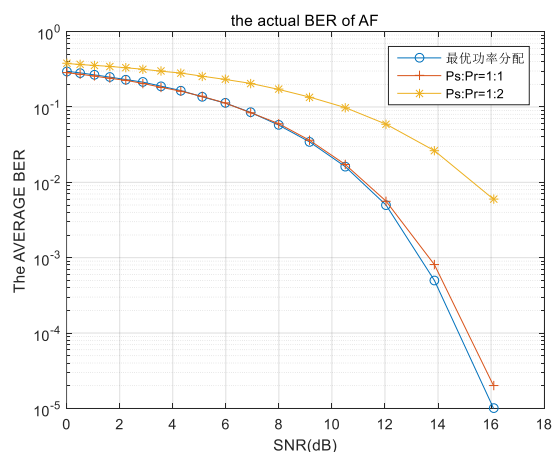


图5 最佳功率分配与 $P_s: P_r=1:1, 1:2$ 功率分配误码率比较

同时从图 5 中还可以发现，在信道信噪比小于 10dB 时，等功率分配和最佳功率分配的性能相差不大，由此可见在对信噪比要求不高的通信系统中可以简单地使用等功率分配代替最优功率分配。

5 结论

协作通信为 MIMO 技术的实用化提供了一个新的思路。因而寻找一种有效地功率分配算法始终是研究的热点。本文在总发射功率一定的条件下,分析了固定放大转发中继协作通信系统的误码率性能,并以最小化系统误码率为目标,提出了一种采用 Lagrange 算法得到的系统最佳功率分配方案。根据数值仿真的结果,本文所提出的 Lagrange 算法相比其他算法具有一定的优势,能够有效地降低系统误码率。

本文是基于单中继协作通信系统进行研究的,而实际的通信系统往往是更为复杂的多中继协作通信网络。但是本文的结论在一定意义上可以为多中继协作通信网络的功率分配问题提供参考。

- [1] SANEMAN A, ERKIP E, AAZHANG B. User cooperative diversity, part I: system description [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003, 51 (11): 1927-1938.
- [2] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50 (12): 3062-3080.
- [3] J.Luo, R.S.Blum, L.J.Cimini,et.al. Decode-and-Forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks[C]. IEEE GLOBECOM 2005: 3048-3052.
- [4] 商敏红, 武贵路, 徐平平: 基于误码率的 DF 协作通信系统功率分配方法,现代电子技术, 2014, 37 (21): 9-11.
- [5] 隋海虹, 宋高俊, 蒋丽霞: 基于误码率的中继位置及功率分配联合优化, 计算机系统应用, 2012,21 (3), 96-100.