

Two-way 中继系统协作节点选择及功率分配策略

唐伦^{①②} 刘通^① 陈前斌^① 曾孝平^②

^①(重庆邮电大学移动通信技术重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆大学通信工程学院 重庆 400044)

摘要: 为了提高 Two-way 中继系统总速率, 该文提出了一种 Two-way AF 中继系统的双向中继选择(BRS)策略, 该策略通过联合考虑中继节点处的接收信噪比和中继节点到目的节点间的信道增益, 实现了最优中继选择。进一步, 在最优中继基础上提出了 Two-way 中继系统两种优化功率分配策略: (1)基于凸优化的功率分配策略(OPA-CO); (2)基于信道增益差异的优化功率分配策略(OPA-DCG)。方案(1)提出了总功率受限的条件下最大化 Two-way 中继系统总速率的优化模型; 方案(2)通过考虑链路之间信道增益的不同, 提出了一种速率增量最大化的数学优化模型, 为降低求解凸优化模型的复杂度, 采用一种迭代功率分配算法求解上述优化模型。仿真结果证明两种策略均能提高系统总速率。

关键词: 双向中继通信; 中继选择; 功率分配; 放大转发

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2077-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00004

Cooperative Node Selection and Power Allocation Strategy in Two-way Relay System

Tang Lun^{①②} Liu Tong^① Chen Qian-bin^① Zeng Xiao-ping^②

^①(Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(The Communication Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to improve the sum-rate of Two-way relay system, this paper proposes a Bi-directional Relay Selection (BRS) scheme in Two-way AF relay system. This scheme selects the optimal relay through joint considering the receive SNR (Signal Noise Rate) at the relay node and the channel gain between relay and destination node; Furthermore, this paper proposes two optimal power allocation scheme in Two-way relay system: (1) Optimal Power Allocation scheme based on Convex Optimization (OPA-CO), (2) Optimal Power Allocation scheme based on the Differences of Channel Gains (OPA-DCG); Scheme (1) establishes the optimal issue that how to maximize the sum-rate of Two-way relay system when total power is limited; Scheme (2) establishes a mathematical optimal model that how to maximize the increment of sum-rate based on the differences of channels gains. This paper uses an iterative power allocation algorithm to solve the optimal model mentioned above for the purpose of reducing the complexity of solving convex optimal mode. Simulation result shows that all the schemes mentioned above can improve the sum-rate.

Key words: Two-way relay communication; Relay selection; Power allocation; Amplify-and-forward

1 引言

中继协作通信技术在提高边缘小区的频谱效率的同时, 还可以增大小区的覆盖范围和实现盲区覆盖, 已成为目前研究热点之一, 相关研究主要集中在 One-way 中继系统^[1,2]。然而, One-way 中继系统

因其半双工的工作模式会导致频谱效率的降低。针对这一问题, Shannon 在文献[3]中首先分析了全双工的 Two-way 系统。文献[4,5]则在 Two-way 中继系统中, 对 AF 模式和 DF 模式下的系统容量进行了详细的分析, 推导了 Two-way 中继系统的容量取值界限, 研究表明 Two-way 中继能够在 One-way 中继系统基础上进一步提高频谱效率, 目前受到广泛的关注。

中继选择和功率分配是提升 Two-way 中继系统性能的重要研究内容^[1,2,6-8]。在协作中继系统中, 合

2010-01-04 收到, 2010-05-31 改回

国家自然科学基金(60972070), 国家科技重大专项(2008ZX03003-005)和重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2009BA2090)资助课题
通信作者: 唐伦 tangl@cqupt.edu.cn

理地选择最佳转发中继对提升系统的整体性能具有十分重要的影响。文献[1]在 One-way 中继系统中, 将拥有最小中断概率的节点选为最佳中继节点。文献[2]在 One-way 中继系统中通过在中继节点处设置接收信噪比阈值, 并通过在中继节点到目的节点之间链路上设置信道增益阈值来实现中继节点的选择。文献[8]在等功率条件下, 对 One-way 中继非再生系统提出了一种基于信道统计特性的最优中继选择方法。然而, 以上中继选择策略均是基于 One-way 中继系统的。文献[6]在使用网络编码(Physical-layer network coding)的前提下, 提出了 Two-way DF 中继模式下的优化功率分配策略以提高系统的容量。文献[7]则在 Two-way 系统中, 通过考虑中继节点处的最大似然信道估测来获得最佳分配因子, 实现功率的优化分配。

本文在文献[2]的基础上, 提出了 Two-way 中继系统中的双向中继选择(Bidirectional Relay Selection, BRS)策略; 为进一步提高 Two-way 中继系统容量, 在 Two-way AF 中继系统中提出两种功率分配策略: (1)基于凸优化的功率分配(OPA-OC)策略; (2)基于速率增量最大化为目标优化功率分配策略(OPA-DCG)。

2 系统模型

Two-way 多中继的模型如图 1 所示, 包括了 T_1 , T_2 两个终端节点以及 n 个 T_3 候选中继节点。 h_i , g_i 分别代表从 T_1 , T_2 到第 i 个中继节点间的信道系数。

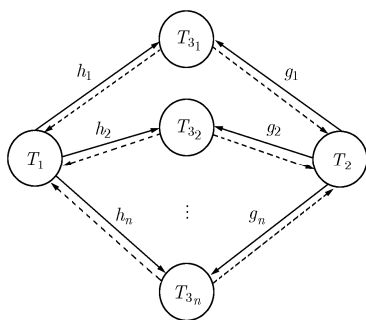


图 1 Two-way 多中继模型

Two-way 中继双工工作模型如图 2 所示。在第 1 时隙, T_1 和 T_2 同时将信息发送给 T_3 , T_3 在接收到信号之后对其进行编码放大; 第 2 时隙, T_3 将编码并放大后的信号进行广播, T_1 和 T_2 在接收到信号后对其进行解码。在后面的分析中, 假设不存在直传链路情况, 每个节点具有完全信道状态信息(Channel State Information, CSI)。

设 T_1 发送的信号为 x_1 , T_2 发送的信号为 x_2 , 则

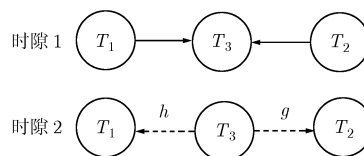


图 2 Two-way 中继传输模型

T_3 接收到的信号为

$$y_3 = hx_1 + gx_2 + n_3 \quad (1)$$

式中 h , g 分别表示 $T_1 \rightarrow T_3$ 以及 $T_2 \rightarrow T_3$ 的信道系数; n_3 为相应的加性白噪声, 假设白噪声功率谱密度为 N_0 。

T_3 将接收到的信号进行编码并放大, 设经 T_3 编码放大后的信号为 z_3 , 则两个目的节点接收到的信号分别为

$$y_1 = hz_3 + n_1 \quad (2)$$

$$y_2 = gz_3 + n_2 \quad (3)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为相应的加性白噪声, 同样假设所有的白噪声功率谱密度为 N_0 。

根据文献[4,5]中的推论, Two-way AF 模式下的系统总速率公式由式(4)给出:

$$R_{\text{sum}} = R_{12} + R_{21} \quad (4)$$

R_{12} 表示从 $T_1 \rightarrow T_2$ 链路的可达速率, 根据文献[4]所述, 其表达式为

$$R_{12} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(p_1 |h|^2 / \sigma_1^2)(p_3 |g|^2 / \sigma_3^2)}{1 + \frac{p_1 |h|^2}{\sigma_1^2} + \frac{p_2 |g|^2}{\sigma_2^2} + \frac{p_3 |g|^2}{\sigma_3^2}} \right) \quad (5)$$

R_{21} 则表示 $T_2 \rightarrow T_1$ 链路的可达速率, 其表达式为

$$R_{21} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{(p_2 |g|^2 / \sigma_2^2)(p_3 |h|^2 / \sigma_3^2)}{1 + \frac{p_1 |h|^2}{\sigma_1^2} + \frac{p_2 |g|^2}{\sigma_2^2} + \frac{p_3 |h|^2}{\sigma_3^2}} \right) \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, p_1 , p_2 , p_3 分别代表 T_1 , T_2 , T_3 的发射功率, 为简化讨论, 假设 σ_1^2 , σ_2^2 和 σ_3^2 的值为 1。

3 联合中继选择及功率分配策略

3.1 双向中继选择策略(BRS)

文献[9]提出一种 Two-way 中继系统的中继选择方法。假设网络中有 j 个中继节点, 设选择的传输中继为 i , 则中继选择算法表述为: $i = \arg \max_j \min\{g_{1,j}, g_{2,j}\}$ 式中 $\gamma_{1,j}$ 和 $\gamma_{2,j}$ 分别代表目的节点 T_1 和 T_2 到中继节点的信噪比。这种选择方法最大化了 Two-way 中继系统中的最小信噪比, 但却不能同时保证两条链路的链路质量。

根据文献[6]的假设, Two-way 中继系统中 $T_1 \rightarrow T_3$ 和 $T_3 \rightarrow T_1$ 的信道系数相同。 $T_2 \rightarrow T_3$ 和 $T_3 \rightarrow T_2$ 上的信道系数也相等。在此基础上, 本文基于 $T_1 \rightarrow T_2$ 链路上中继节点 T_3 处的接收信噪比及 $T_1 \rightarrow T_2$ 链路上中继节点 T_3 到终端节点 T_2 间的信道增益提出了一种双向中继选择策略。

设整个网络中有 n 个中继节点, 设置中继节点处的接收信噪比阈值 r_{th} 。在 $T_1 \rightarrow T_3$ 链路上, 若某个中继的接收信噪比满足

$$p_1 |h_i|^2 \geq r_{th} \quad (7)$$

则此中继就被选为候选可靠传输中继。 h_i 表示从 T_1 到第 i 个中继链路间的信道系数, 由于假设 $\sigma_1^2 = 1$, 所以 h_i 也表示从 T_1 到第 i 个中继间的信道增益, 设候选可靠传输中继的集合为 $\mathfrak{M}(R)$, 则

$$\mathfrak{M}(R) = \{i \mid p_1 |h_i|^2 \geq r_{th}, i=1,2,\dots,n\} \quad (8)$$

在 BRS 策略的第(2)步选择中, 首先建立从候选可靠传输中继集合 $\mathfrak{M}(R)$ 中选择具有最大信道增益的一条作为传输信道, 作为中继到 T_2 的传输信道, 相应的中继被选为最佳传输中继。最佳传输中继为 $\mathfrak{A}(R)$, 满足

$$\mathfrak{A}(R) = \{i \mid \max\{g_i\}, i=1,2,\dots,n\} \quad (9)$$

根据 $\mathfrak{A}(R)$ 中选择出的中继, 用于连接 T_1, T_2 的最佳传输中继。通过使用 BRS 策略选择出来的中继节点保证了链路间的信道质量, 可以有效的提高系统性能。

3.2 双向中继系统两种优化功率分配策略

文献[6]研究了 Two-way DF 中继系统中的优化功率分配问题。通过对原始问题进行建模, 求出优化解, 最终论证其功率分配算法能够有效的提高系统总速率, 但文献[6]只研究了 Two-way DF 系统中的资源优化分配, 没有涉及到使用 AF 模式时的功率分配问题。本文在使用 AF 模式的 Two-way 中继系统中提出了两种功率分配策略。

3.2.1 一种基于凸优化的功率分配策略(OPA-CO)

在功率资源有限的前提条件下, 联合最优中继, 通过有效的功率分配算法来提高 Two-way 中继系统的整体性能是一个重要的问题。在系统总功率有限的条件下, 首先提出了一种基于凸优化的功率分配策略(Optimal Power Allocation scheme based on Convex Optimization, OPA-CO)。

设系统总功率为 p_t , 则有式(10)成立:

$$p_1 + p_2 + p_3 \leq p_t \quad (10)$$

功率分配策略即是在式(10)成立的条件下, 通过在各节点之间进行功率的合理分配, 使得系统总速率达到最大, 故优化模型可表述为

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & R_{\text{sum}} \\ \text{s.t.} \quad & p_1 + p_2 + p_3 \leq p_t \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

为简单求解复杂性, 将 Two-way 系统理解为由两条 One-way 系统构成, 即由 $T_1 \rightarrow T_2$ 和 $T_2 \rightarrow T_1$ 两条链路构成, 其限制条件为两条链路上的中继节点功率始终保持一致。松弛约束条件, 将式(11)分解为两个子优化模型。

子优化模型 1:

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & R'_{12} \\ \text{s.t.} \quad & p_1 + p_3 \leq p_{t_1} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

子优化模型 2:

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & R'_{21} \\ \text{s.t.} \quad & p_2 + p_3 \leq p_{t_2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

对于子优化模型 1, p_{t_1} 表示分配到 $T_1 \rightarrow T_2$ 链路的总功率。引入拉格朗日乘子, 求出其优化解为

$$\begin{cases} p_1 = \frac{\sqrt{h^2 g^2 - g^2}}{h^2 - g^2} p_{t_1}, & h^2 \neq g^2 \\ p_3 = \frac{h^2 - \sqrt{h^2 g^2}}{h^2 - g^2} p_{t_1}, & h^2 \neq g^2 \\ p_1 = \frac{p_{t_1}}{2}, & h^2 = g^2 \\ p_3 = \frac{p_{t_1}}{2}, & h^2 = g^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_1 = \frac{\sqrt{h^2 g^2 - g^2}}{h^2 - \sqrt{h^2 g^2}}, & h^2 \neq g^2 \\ p_3 = \frac{p_{t_1}}{2}, & h^2 = g^2 \end{cases} \quad (14)$$

对于子优化模型 2, p_{t_2} 代表分配到 $T_2 \rightarrow T_1$ 链路的总功率, 同样引入拉格朗日乘子, 得到子优化模型 2 的优化解:

$$\begin{cases} p_2 = \frac{\sqrt{h^2 g^2 - h^2}}{g^2 - h^2} p_{t_2}, & g^2 \neq h^2 \\ p_3 = \frac{g^2 - \sqrt{h^2 g^2}}{g^2 - h^2} p_{t_2}, & g^2 \neq h^2 \\ p_2 = \frac{p_{t_2}}{2}, & g^2 = h^2 \\ p_3 = \frac{p_{t_2}}{2}, & g^2 = h^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p_2 = \frac{\sqrt{h^2 g^2 - h^2}}{g^2 - \sqrt{h^2 g^2}}, & g^2 \neq h^2 \\ p_3 = \frac{p_{t_2}}{2}, & g^2 = h^2 \end{cases} \quad (15)$$

令 $p_1/p_3 = \alpha$, $p_2/p_3 = \beta$, 有 $\alpha\beta = 1$ 。

将式(14)及式(15)代入式(10), 求出优化解为

$$\left. \begin{aligned} p'_1 &\leq \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \alpha + 1} p_t \\ p'_2 &\leq \frac{1}{\alpha^2 + \alpha + 1} p_t \\ p'_3 &\leq \frac{\alpha}{\alpha^2 + \alpha + 1} p_t \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据式(14), 式(15)的比例关系, 可以得到

$$\left. \begin{aligned} \alpha > 1, \quad |g|^2 > |h|^2 \\ \alpha = 1, \quad |g|^2 = |h|^2 \\ \alpha < 1, \quad |g|^2 < |h|^2 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

根据式(17)可以看出, 当 $T_1 \rightarrow T_3$ 间的信道增益要优于 $T_2 \rightarrow T_3$ 时, 即 $|g|^2 < |h|^2$ 时, $\alpha < 1$ 成立。当 $\alpha < 1$ 时, 从式(16)中可知 $p'_2 > p'_1$, 即分配到 T_2 的功率大于 T_1 所得到的功率; 对于 $|g|^2 = |h|^2$ 时, 两者分配到的功率一样多; $|g|^2 > |h|^2$ 时, $p'_1 > p'_2$, 表明分配到 T_1 的功率多于 T_2 的功率。上述分析说明此优化解会根据信道增益的不同, 对信道增益较差的链路分配更多的功率, 因而其具有自适应性。

3.2.2 基于信道增益差异的优化功率分配策略 (OPA-DCG) 令 $L_{i \rightarrow 3}^{\text{better}}$ 代表从节点 i 到中继节点 T_3 信道增益较好的链路, $L_{j \rightarrow 3}^{\text{worst}}$ 代表信道增益较差的链路。使用上述 OPA-CO 进行功率分配, $L_{i \rightarrow 3}^{\text{better}}$ 上的终端节点 i 获得较少的功率, 由于总功率受限, 存在式(16)中优化分配之间的关系, $L_{j \rightarrow 3}^{\text{worst}}$ 上的节点 j 将会获得较多的功率, 这样的功率分配方法实现了功率分配的公平性。

OPA-CO 策略照顾到了两个目的节点之间的公平性, 但却牺牲了系统的总速率。为进一步提高系统性能, 本文提出基于信道增益差异的优化功率分配策略 (Optimal Power Allocation scheme based on the Differences of Channel Gains, OPA-DCG), 在已经获得式(16)优化解的基础上, 通过检测信道增益的差异, 将 $L_{j \rightarrow 3}^{\text{worst}}$ 上终端节点 i 的功率提取一部分, 分配到 $L_{i \rightarrow 3}^{\text{better}}$ 上的 i 节点及中继节点 T_3 。

下面分别讨论不同信道增益时的功率分配策略。

情形 1 $|h|^2 > |g|^2$

按照 OPA-DCG 策略的思想, T_2 节点应将自己的一部分功率 Δp_2 分配到 T_1 节点和中继节点 T_3 上。设分配到节点 T_1 和节点 T_3 的功率分别为 Δp_1 和 Δp_3 , 则

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 + \Delta p_3 \quad (18)$$

设经过最优分配后各节点的功率为

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p'_1 + \Delta p_1 \\ p_2 &= p'_2 - \Delta p_2 \\ p_3 &= p'_3 + \Delta p_3 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中 p'_1 , p'_2 和 p'_3 分别代表使用 OPA-CO 所获得的功率。

将 Δp_2 提取出来之后, 需要让 Δp_2 给 $T_1 \rightarrow T_3$ 链路带来的速率增量达到最大, Δp_2 分配到 T_1 和 T_3 节点上的功率 Δp_1 和 Δp_3 必须以最优化的方式来进行分配, 即 Δp_1 和 Δp_3 的需要满足子优化模型 1, 由式(14)知

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_3} = \frac{\sqrt{h^2 g^2} - g^2}{h^2 - \sqrt{h^2 g^2}} \quad (20)$$

将式(20)代入式(18), 可得

$$\Delta p_1 = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \Delta p_2, \quad \Delta p_3 = \frac{1}{1 + \alpha} \Delta p_2 \quad (21)$$

令 R'_{12} , R'_{21} 分别表示使用式(16)进行功率分配后 $T_1 \rightarrow T_2$ 和 $T_2 \rightarrow T_1$ 上的速率。 R_{12} 和 R_{21} 表示使用本策略调整后两条链路的速率, 定义两条链路的速率改变量:

$$\Delta R_{12} = R_{12} - R'_{12}, \quad \Delta R_{21} = R'_{21} - R_{21} \quad (22)$$

ΔR_{12} 和 ΔR_{21} 分别表示为

$$\Delta R_{12} = \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{|h|^2 (p'_1 + \Delta p_1) |g|^2 (p'_3 + \Delta p_3)}{1 + |h|^2 (p'_1 + \Delta p_1) + |g|^2 (p'_3 + \Delta p_3)} \right] - \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{|h|^2 p'_1 |g|^2 p'_3}{1 + |h|^2 p'_1 + |g|^2 p'_3} \right] \right\} \quad (23)$$

$$\Delta R_{21} = \left\{ \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{|g|^2 p'_2 |h|^2 p'_3}{1 + |g|^2 p'_2 + |h|^2 p'_3} \right] - \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{|g|^2 (p'_2 - \Delta p_2) |h|^2 (p'_3 + \Delta p_3)}{1 + |g|^2 (p'_2 - \Delta p_2) + |h|^2 (p'_3 + \Delta p_3)} \right] \right\} \quad (24)$$

定义系统总速率增量:

$$\Delta R_{\text{sum}} = \Delta R_{12} - \Delta R_{21} \quad (25)$$

在这种情况下, OPA-DCG 策略下的优化模型可表示为

$$\max \quad \Delta R_{\text{sum}} \quad (26a)$$

$$\text{s.t.} \quad p'_1 + p'_2 + p'_3 \leq p_t \quad (26a)$$

$$\Delta p_1 + \Delta p_3 \leq \Delta p_2 \quad (26b)$$

$$\Delta p_1 \leq \frac{\alpha}{1 + \alpha} \Delta p_2 \quad (26c)$$

$$\Delta p_3 \leq \frac{1}{1 + \alpha} \Delta p_2 \quad (26d)$$

式(26a)代表 T_1 , T_2 以及 T_3 上的功率相加要小于系统总功率约束; 式(26b)表示使用 OPA-DCG 策略后分配到 T_1 和 T_3 上的功率不能大于从 T_2 节点上提取出来的功率; 式(26c)及式(26d)则表明了从 T_2 节点提取出来的功率与分配给 T_1 和 T_3 的功率间的关系。

ΔR_{sum} 的表达式比较复杂, 本文提出一种迭代功率分配求解算法, 算法描述如下:

- (1)初始化: 初始化 h 和 g 以及各节点的功率 p_1 , p_2 , p_3 ; 令 $t = 1$; 迭代总次数 $N = 1000$;
- (2)根据式(7)–式(9)选择最优中继 $\mathfrak{A}(R)$;
- (3)在最优中继 $\mathfrak{A}(R)$ 基础上, 根据式(16)计算 OPA-CO 的功率分配 p'_1 , p'_2 和 p'_3 的值;
- (4)提取 T_2 节点部分功率 $\Delta p_{2t} = p'_2 * (t/N)$;
- (5)根据式(21)计算分配到 T_1 和 T_3 上的功率 Δp_{1t} 和 Δp_{3t} ;
- (6)利用式(23)–式(25)得到经过本次调整后的系统总速率增量 $\Delta R_{\text{sum } t}$;
- (7) $t = t + 1$, 判断迭代次数 t 是否等于总次数 N ? $t \neq N$ 返回到(2); $t = N$ 结束。
- (8)求出最大的总速率增量 $\Delta R_{\text{sum max}}$, 计算对应 OPA-DCG 功率分配 p_1 , p_2 和 p_3 的值。

情形 2 $|h|^2 < |g|^2$

此情况下的最优功率分配算法和前面所述 $|h|^2 > |g|^2$ 时一样。由于 $T_2 \rightarrow T_3$ 链路的增益好于 $T_1 \rightarrow T_3$ 链路, 所以应将 p'_1 提出 Δp_1 分配给 Δp_2 和 Δp_3 , 在分配时满足 $T_2 \rightarrow T_1$ 链路上的功率达到最优分配即可, 此处不再赘述。

情形 3 $|h|^2 = |g|^2$

若 $|h|^2 = |g|^2$, 根据式(16), 此种情况下只须将功率平均分配到各个节点即可。

4 仿真结果

在仿真中, 将噪声 σ_1^2 , σ_2^2 和 σ_3^2 均设置为 1。衰落信道的模型为 $h = v_1/d^{\alpha/2}$, $g = v_2/(1-d)^{\alpha/2}$ 。式中 $v_i \sim \mathcal{CN}(0,1)$ $i = 1, 2$ 。 $\mathcal{CN}(m_v, \sigma_v^2)$ 是均值为 m_v 方差为 σ_v^2 的循环对称复高斯分布。 α 是路径损耗因子, 仿真中将其设置为 3。

仿真图中, RRS(Random Relay Selection)代表随机中继选择; BRS 表示双向中继选择策略; OPA-CO 表示基于凸优化的功率分配策略, OPA-

DCG 表示基于信道增益差异的优化功率分配策略; “&” 则表示同时使用上述策略中的某些策略。如图 3 所示, 与传统的 One-way 中继摆放最佳距离在距离源节点 0.7 km 不同。Two-way 中继系统中, 摆放中继的最佳位置是将中继置于两个目的节点的中间, 即距离 T_1 和 T_2 均为 0.5 km 时, 系统速率达到最大。在图 4 和图 5 的仿真中, 中继均放置于此最佳位置。

从图 4 可以看出, 在总功率相等的情况下, Two-way 中继系统相对于 One-way 中继系统在系统总速率上有很大的提高。在 Two-way 系统中若要获得相同的系统总速率, 相对于只使用 BRS 策略来说, 同时使用 BRS 和 OPA-DCG 策略能够节约一定量的功率。如当总功率等于 40 W 时, 在 One-way 中继系统中, 使用优化功率分配相对于不使用优化功率分配时的总速率来说有 0.3 bit/(s·Hz) 左右的提升; 总功率同样等于 40 W 时, 不使用优化功率分配的 Two-way 系统的系统总速率可达 3.9 bit/(s·Hz), 相对于 One-way 系统, 系统总速率提升了 77.3%, 而分别使用 OPA-CO 和 OPA-DCG 策略则能达到更高的 5.2 bit/(s·Hz) 和 5.3 bit/(s·Hz), 相对于 One-way 系统来说, 系统总速率的提高 137.4% 和 140.9%。

从图 5 中可以看到, OPA-DCG 策略所获得的性能增益要好于 OPA-CO 策略, 而 OPA-CO 策略的使用优于 BRS 策略。当总功率等于 40 W 时, 仅使用 BRS 策略系统总速率的提升率仅为 2.3%; 使用 OPA-CO 策略之后, 系统总速率的提升率可达 18.6%; 使用 OPA-DCG 策略所获得的总速率略高于同时使用 BRS 和 OPA-CO 策略。当同时使用 BRS 和 OPA-DCG 策略时, 系统速率可达到 5.35 bit/(s·Hz)。在迭代功率分配算法中, 总迭代次数设为 n 次, 由于循环内部没有嵌套循环, 故算法的时间复杂度为线性阶 $O(n)$ 。

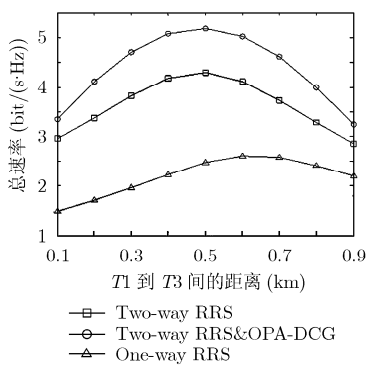


图 3 中继摆放位置与系统总速率的关系

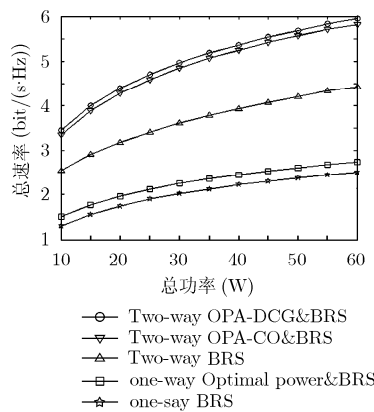


图 4 One-way 和 Two-way 在使用不同策略时对应的总速率

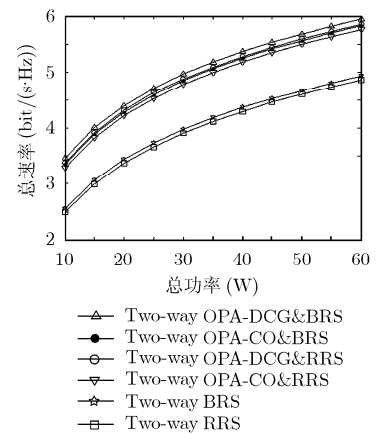


图 5 Two-way 中继系统中使用不同策略时的总速率

5 结束语

本文主要考察了 Two-way AF 中继系统中联合中继选择和功率分配两个方面的问题。首先通过联合考虑中继节点处的接收信噪比和中继节点到目的节点间的信道增益, 实现了最优中继选择; 在最优中继基础上, 提出了总功率受限的条件下最大化 Two-way 中继系统总速率的优化模型 (OPACO), 该功率分配策略考虑两个目的节点之间的公平性, 却牺牲了系统的总速率; 进一步, 提出了一种速率增量最大化的数学优化模型, 为降低求解凸优化模型的复杂度, 采用一种迭代功率分配算法求解上述优化模型。仿真结果证明两种策略均可改进系统的性能, 提高系统的总速率。

参考文献

- [1] Huang W, Hong Y, and Kuo Discrete C J. Power allocation for lifetime maximization in cooperative networks[C]. IEEE Vehicular Technology Conference, MD, 2007: 581-585.
 - [2] Hui Hui, Zhu Shi-hua, and Li Guo-bing. Distributed power allocation schemes for amplify-and-forward networks[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest Hungary, 2009: 1-6.
 - [3] Shannon C E. Two-way communication channels[C]. Proc. 4th Berkeley Symp. Math. Statist. Stat. Prob. California, America, 1961: 611-644.
 - [4] Rankov B and Wittneben A. Spectral efficient protocols for halfduplex fading relay channels[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, 25(2): 379-389.
 - [5] Nam Wooseok, Chung Sae-young, and Lee Y H. Capacity bounds for two-way relay channels[C]. IEEE International Zurich Seminar on Digital Object Identifier. Zurich, Switzerland, 2008: 144-147.
 - [6] Shin Wonjae, Lee Namyoon, and Lim Jong-bu, *et al.* An optimal transmit power allocation for the two-way relay channel using physical-layer network coding[C]. IEEE International Conference on Communications Workshops, Dresden, Germany, 2009: 1-6.
 - [7] Jiang Bin, Gao Fei-fei, and Gao Xi-qi, *et al.* Channel estimation for amplify-and-forward two-way relay network with power allocation[C]. IEEE International Conference on Communications. Dresden, Germany, 2009: 1-5.
 - [8] 吴素文, 吕星哉, 朱近康等. 基于信道统计特性的中继选择算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1077-1081.
Wu S W, Lü X Z, and Zhu J K, *et al.* A statistic channel information-based relay selection scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1077-1081.
 - [9] Jing Yin-di. A relay selection scheme for two-way amplify-and-forward relay networks[C]. IEEE wireless communication&signal processing. Nanjing, China, 2009: 1-5.
- 唐 伦: 男, 1973 年生, 博士生, 研究方向为新一代无线通信系统资源管理、包括动态频谱分配、中继系统资源分配.
- 刘 通: 男, 1985 年生, 硕士生, 研究方向为中继系统的资源分配.
- 陈前斌: 男, 1967 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为下一代网络、个人通信、多媒体信息处理与传输.
- 曾孝平: 男, 1956 年生, 博士(后), 博士生导师, 研究方向为通信信号处理.