

低复杂度放大转发多中继选择及功率分配

郭潇瑶, 刘 超, 包建荣, 姜 斌

(杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江杭州 310018)

摘 要: 为了解决传统多中继选择协作通信网络算法复杂度高、资源利用率低等问题, 本文提出了低复杂度放大转发多中继选择及其功率分配方案. 它先利用修正的选择函数选择最优中继集合, 再采用改进的低复杂度功率分配方案, 对选择的中继集合功率分配. 所提方案考虑到等功率分配时, 分配功率应随中继数不同而改变, 添加修正因子以充分利用功率资源. 同时, 所提功率分配避免了超越方程求解, 极大降低了计算复杂度. 仿真表明: 当中断概率为 10^{-4} 时, 所提方案相对于现有预选择单中继放大转发(pre-select Single relay Amplify-and-Forward, SAF) 和全中继放大转发(All relay Amplify-and-Forward, AAF) 方案, 所需信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR) 分别降低约 2.5 dB 和 5.3 dB. 其性能与穷举法相当, 二者所需 SNR 仅相差约 0.01 dB.

关键词: 低算法复杂度; 放大转发; 多中继节点选择; 功率分配; 中断概率; 协作通信

中图分类号: TN911

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)11-2602-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220082

Multi-Relay Selection and Power Allocation of Low Complexity Amplify-and-Forward Cooperation

GUO Xiao-yao, LIU Chao, BAO Jian-rong, JIANG Bin

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: To solve high complexity and low resource utilization of traditional multi relay selection cooperative communication networks. A low complexity amplify-forward multi relay selection and its power allocation scheme are proposed. It uses a modified selection function to select the optimal relay set, and then uses an improved low-complexity power allocation scheme for power allocation to the selected set. The proposed scheme considers that the power allocation varies with the number of relays under equal power allocation conditions, and adds a correction factor to fully utilize the power resources. Simultaneously, it avoids solving the transcendence equation of power allocation to reduce the computational complexity. The simulation shows that when the bit error rate is 10^{-4} , compared with the pre-select single relay amplify-and-forward(SAF) and all relay amplify-and-forward(AAF) schemes, the proposed scheme reduces the required signal-to-noise ratio(SNR) by about 2.5 dB and 5.3 dB. Its performance is comparable to that of the exhaustive scheme, and the difference between the two required SNR is only about 0.01 dB.

Key words: low algorithm complexity; amplify-forward; multi-relay node selection; power allocation; outage probability; cooperative communication

1 引言

为提高数据传输速率和可靠性, 多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术利用多径信道对抗衰落和干扰, 减少了无线通信中的阴影和路径损耗影响, 推动了无线通信技术的高速发展^[1]. 然而, 因受尺寸、复杂性、成本等因素的限制, 移动终端难

以采用 MIMO 技术. 由此, 协作通信技术应运而生. 其在多用户环境下通过网络节点协作的方式, 有效共享传输资源, 形成虚拟 MIMO 系统, 获得空间分集增益, 无需在移动终端上安装多根天线^[2]. 最早提出的两种协作传输方案分别为: 放大转发(Amplify-and-Forward, AF) 和解码转发(Decode-and-Forward, DF) 方案^[3]. 其

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2022-07-01; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金(No.U1809201); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金(No.GK209907299001-003); 浙江省自然科学基金(No.LY20F010010); 浙江省教育厅一般科研项目(No.Y202146870); 浙江省大学生新苗人才计划(No.2022R407B064)

中,AF方案因其低复杂度而得到更广泛的关注。

中继节点选择及功率分配是协作通信技术的重要研究方向.在资源利用率方面,传统多中继网络采用全中继转发协作模式^[4],需消耗大量时隙,造成资源严重浪费.针对该问题,出现了根据两跳瞬时信道状态信息(Channel State Information, CSI)选择信道系数加和最大的单中继协作模式,在改善误码率的同时,提高频谱资源利用率^[5].在性能提升方面,单中继选择对系统性能带来的提升十分有限,基于此,产生了降低系统中断概率的多中继选择算法^[6],极大提高了协作通信系统性能.此外,从整体优化角度,联合分配源与中继功率可充分利用功率资源,使系统信道容量达到最优,提高传输有效性^[7].并且,经功率分配,利用理想瞬时CSI,按照均方误差最小化准则,设计中继预编码矩阵,可降低误码率,提高可靠性^[8].

然而,上述方案均基于瞬时CSI,要求系统自适应选择协作传输模式^[9],网络开销大.鉴于此,对缓慢信道变换网络,使用统计CSI有助于降低网络整体复杂度,节约部署成本和协作开销^[10].但因中继波束形成器的优化函数与链路CSI的状况有关,故需分别针对只有理想CSI、只有统计CSI以及理想和统计CSI并存的三种不同场景,通过最小均方误差准则来设计相应的波束形成器,提高整个系统的误码性能^[11].同时,基于统计CSI得到的分析结果较于理想瞬时CSI,在应用中存在些许偏差.针对该问题,在统计CSI的基础上,出现了一种多速率协作媒体访问控制协议来选择候选中继,减少选择偏差^[12].此外,为减少中继选择复杂度,出现了等功率分配条件下的最优中继选择方案^[13],但该选择方案未能充分利用功率资源,使系统性能受到限制.针对该问题,出现了经功率分配后再选择中继集合方案^[14].其保证选择的中继集合总是最优,极大提升了系统中断性能,然而,功率分配涉及的计算量十分庞大,先功率分配后选择中继集合涉及了大量功率分配步骤,极大增加了计算复杂度.

为降低复杂度,所提方案只利用统计CSI,采用先选择中继,后功率分配的流程.针对现有算法的不足,本文改进了等功率分配的多中继选择方案,通过增加修正因子弥补了传统等功率多中继选择方案分配功率固定的问题,提高中继选择的可靠性.同时,改进现有功率分配算法,避免超越方程的求解,极大降低了功率分配的计算复杂度.

2 系统模型

多中继放大转发协作网络模型如图1所示.该系统由一个源节点S,一个目的节点D和N个中继节点 R_i ($i=1, \dots, N$)组成.并且,设从N个中继节点中选择M个

中继参与协作,构成集合 B_M .各节点采用半双工模式进行传输,且传输信息时需消耗一个时隙.同时,设各信道链路都处在瑞利衰落场景下,信道增益在一次传输过程中保持不变,且各传输过程相互独立.另外,数据在传输过程中受加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)的影响.

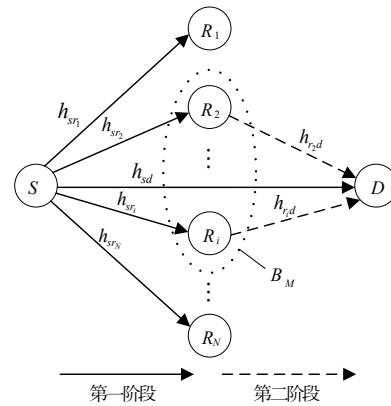


图1 多节点放大转发中继协作网络模型

协作过程分为两个阶段.第一阶段,源节点S在第1个时隙中广播所需传输的信号 x_s ,目的节点D和被选择的中继 R_i 接收源节点的信号,其接收到的信号分别为

$$y_{sd} = \sqrt{P_s} h_{sd} x_s + w_{sd} \quad (1)$$

$$y_{sr_i} = \sqrt{P_s} h_{sr_i} x_s + w_{sr_i}, \quad i \in B_M \quad (2)$$

其中, y_{sd} 和 y_{sr_i} 分别为目的节点D和中继节点 R_i 的接收信号; P_s 为源节点S的发射功率; x_s 为需传输的信号; h_{sd} 和 h_{sr_i} 分别为源节点S与目的节点D和中继节点 R_i 之间的信道系数,各信道系数相互独立且服从均值为0、方差分别为 η_{sd}^2 和 $\eta_{sr_i}^2$ 的复高斯分布; w_{sd} 和 w_{sr_i} 分别为相应信道上的AWGN,各噪声相互独立且均服从均值为0,方差为 N_0 的复高斯分布.

第二阶段,中继集合 B_M 中的中继节点 R_i 将接收到的信号 y_{sr_i} 放大后,在随后的M个时隙中依次转发给目的节点D,则目的节点D收到来自中继 R_i 的信号为

$$\begin{aligned} y_{r_i d} &= \sqrt{P_{r_i}} h_{r_i d} \beta_i y_{sr_i} + w_{r_i d} \\ &= \sqrt{P_{r_i}} h_{r_i d} \beta_i \left(\sqrt{P_s} h_{sr_i} x_s + w_{sr_i} \right) + w_{r_i d}, \quad i \in B_M \end{aligned} \quad (3)$$

其中, β_i 为缩放因子^[15]表示为

$$\beta_i = \frac{1}{\sqrt{P_s |h_{sr_i}|^2 + N_0}} \quad (4)$$

$y_{r_i d}$ 为目的节点D接收到来自中继节点 R_i 的转发信号; P_{r_i} 为中继节点 R_i 的发射功率; $h_{r_i d}$ 为中继节点 R_i 与目的节点D之间的信道系数,服从均值为0、方差为 $\eta_{r_i d}^2$ 的复

高斯分布; $w_{r,d}$ 为中继节点 R_i 与目的节点 D 之间信道上的 AWGN, 服从均值为 0, 方差为 N_0 的复高斯分布.

在放大转发协作网络中, 其信道容量 C 为^[16]

$$C = \frac{1}{M+1} \log_2 \left(1 + P_s |h_{sd}|^2 \gamma + \sum_{i \in B_M} f \left(P_s |h_{sr_i}|^2 \gamma, P_{r_i} |h_{r,d}|^2 \gamma \right) \right) \quad (5)$$

其中, $f(x, y) = xy/(x+y+1)$, $\gamma = 1/N_0$. 另外, 由于整个协作过程需 $M+1$ 个时隙来形成 $M+1$ 个相互正交的信道, 因此信道容量 C 有因子 $1/(M+1)$.

当信道容量 C 小于信息传输速率 R 时, 则会产生中断. 中断概率 P_{out} 则用来衡量系统发生中断的频率, 是系统可靠性的一项重要指标, 其表达式为 $P_{\text{out}} = \Pr(C < R)$. 在大信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 条件下, 该系统模型的中断概率为^[17]

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}(M) &= \Pr(C < R) \\ &= \Pr \left[P_s |h_{sd}|^2 \gamma + \sum_{i \in B_M} f \left(P_s |h_{sr_i}|^2 \gamma, P_{r_i} |h_{r,d}|^2 \gamma \right) < (2^{(M+1)R} - 1) \right] \\ &= C(M) \frac{1}{P_s \eta_{sd}^2 \gamma} \prod_{i \in B_M} \left(\frac{1}{P_s \eta_{sr_i}^2 \gamma} + \frac{1}{P_{r_i} \eta_{r,d}^2 \gamma} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $C(M) = (2^{(M+1)R} - 1) / (M+1)!$.

3 统计 CSI 的等功率分配多中继选择算法

在协作通信中, 如何在众多潜在的中继中选择合适的中继节点, 使得系统的增益能够得到更大的提升是本节研究的重点. 本节提出的算法从中断概率出发, 针对信道统计特性, 无需实时感知瞬时信道信息, 同时在等功率分配条件下对中继进行选择, 可极大简化选择过程的计算.

在等功率 $P_s = P_{r_i} = P/(M+1)$ 条件下, 可得到由 M 个中继节点构成的集合 B_M 所实现的中断概率为

$$P_{\text{out}}(M) = C(M) \frac{(M+1)^{(M+1)}}{(P\gamma)^{(M+1)}} \frac{1}{\eta_{sd}^2} \prod_{i \in B_M} \left(\frac{1}{\eta_{sr_i}^2} + \frac{1}{\eta_{r,d}^2} \right) \quad (7)$$

其中, P 表示系统总发射功率. 从式(7)得, 中断概率 P_{out} 中只有 $1/\eta_{sr_i}^2 + 1/\eta_{r,d}^2$ 与中继信道本身有关. 为方便起见, 先定义中继节点 R_i 的等效信道增益 (Equivalent Channel Gain, ECG) w_i ^[13] 为

$$w_i = \frac{1}{1/\eta_{sr_i}^2 + 1/\eta_{r,d}^2} = \frac{\eta_{sr_i}^2 \cdot \eta_{r,d}^2}{\eta_{sr_i}^2 + \eta_{r,d}^2} \quad (8)$$

中继节点 R_i 按其 w_i 的大小降序排列, 即有 $w_1 > w_2 > \dots > w_N$. 此时, 若需从 N 个中继节点中选择最优的

M 个中继进行协作, 则必有最优中继集合 $B_M^{\text{opt}} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$, 其中断概率为

$$P_{\text{out}, B_M^{\text{opt}}} = C(M) \frac{(M+1)^{(M+1)}}{(P\gamma)^{(M+1)}} \frac{1}{\eta_{sd}^2} \prod_{i=1}^M \frac{1}{w_i} \quad (9)$$

令系统信噪比为 γ_{th} , 有

$$\gamma_{\text{th}} = P\gamma = \frac{P}{N_0} \quad (10)$$

则在等效信道增益 w_i 降序排列的条件下, 选择中继节点数的最优值 M_{opt} 为

$$M_{\text{opt}} = \begin{cases} 0, & \gamma_{\text{eq},1} \geq \gamma_{\text{th}} \\ \arg \max_M \{ \gamma_{\text{eq},M} < \gamma_{\text{th}} \}, & \gamma_{\text{eq},1} < \gamma_{\text{th}} \end{cases} \quad (11)$$

其中,

$$\gamma_{\text{eq},M} = \frac{f(M) \cdot A(M)}{w_M} \quad (12)$$

$$f(M) = \frac{C(M)}{C(M-1)} = \frac{(2^{(M+1)R} - 1)^{M+1}}{(2^{MR} - 1)^M (M+1)} \quad (13)$$

$$A(M) = \frac{(M+1)^{M+1}}{M^M} \quad (14)$$

故最优中继集合 B_{opt} 为

$$B_{\text{opt}} = \{R_1, R_2, \dots, R_{M_{\text{opt}}}\} \quad (15)$$

以下给出式(11)的证明过程.

证明 当中继节点按 w_i 降序排列, 且当中继集合为 $B_M^{\text{opt}} = \{R_1, R_2, \dots, R_M\}$ 时, 可使系统的中断概率达到最小时, 则有以下不等式^[14]:

$$P_{\text{out}, B_M^{\text{opt}}} < P_{\text{out}, B_{M-1}^{\text{opt}}} < \dots < P_{\text{out}, B_0^{\text{opt}}} \quad (16)$$

$$P_{\text{out}, B_M^{\text{opt}}} < P_{\text{out}, B_{M+1}^{\text{opt}}} < \dots < P_{\text{out}, B_N^{\text{opt}}} \quad (17)$$

结合式(16)、式(17)以及式(9), 解得

$$w_j > \frac{f(j)A(j)}{\gamma_{\text{th}}}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (18)$$

$$w_j < \frac{f(j)A(j)}{\gamma_{\text{th}}}, \quad j = M+1, \dots, N \quad (19)$$

由于 $f(j)$ 和 $A(j)$ 是随着 j 单调递增的函数, 且 w_j 是随着 j 递减的序列, 则通过式(18)、式(19)有

$$w_M > \frac{f(M)A(M)}{\gamma_{\text{th}}} \quad (20)$$

$$w_{M+1} < \frac{f(M+1)A(M+1)}{\gamma_{\text{th}}} \quad (21)$$

进一步, 整理式(20)和式(21)得

$$\gamma_{\text{eq},M} = \frac{f(M)A(M)}{w_M} < \gamma_{\text{th}} < \frac{f(M+1)A(M+1)}{w_{M+1}} = \gamma_{\text{eq},M+1} \quad (22)$$

因 $\gamma_{\text{eq},M}$ 随着 M 单调递增, 故式(22)可表示为 $M_{\text{opt}} =$

$\arg \max_M \{ \gamma_{\text{eq},M} < \gamma_{\text{th}} \}$. 另外,存在两种特殊情况,即 $P_{\text{out},B_N^{\text{opt}}}$ 或 $P_{\text{out},B_0^{\text{opt}}}$ 最小. 若 $P_{\text{out},B_N^{\text{opt}}}$ 最小,得 $\gamma_{\text{eq},N} = f(N)A(N)/w_N < \gamma_{\text{th}}$,符合式(11)给定结果;若 $P_{\text{out},B_0^{\text{opt}}}$ 最小,有 $P_{\text{out},B_0^{\text{opt}}} < P_{\text{out},B_1^{\text{opt}}}$,得 $\gamma_{\text{th}} < \gamma_{\text{eq},1}$. 同时,当 $\gamma_{\text{th}} = \gamma_{\text{eq},1}$,表明 $P_{\text{out},B_0^{\text{opt}}} = P_{\text{out},B_1^{\text{opt}}}$,为节约资源,此时,最优值 M_{opt} 仍为 0. 综上可得式(11).

证毕

根据上述过程,可通过一个简单不等式来选择等功率分配下的最优中继节点集合 B_{opt} . 先将所有中继节点按照其 w_i 降序排列,再根据式(12)分别依次计算 $\gamma_{\text{eq},M}$. 之后,与系统信噪比 γ_{th} 比较,得最优的中继节点集合 $B_{\text{opt}} = \{R_1, R_2, \dots, R_{M_{\text{opt}}}\}$.

与现有等功率中继选择算法^[13]相比,所提选择算法在其基础上,增加了 $B_{\text{opt}} = \emptyset$ 情况,即当系统总信噪比或中继等效信道增益特别小时,不选择中继协作,可进一步降低中断概率并节约中继资源;另外,对于选择判决式(11),额外考虑在总功率一定情况下,不同中继数经等功率分配后所得的分配功率不同,为了充分利用功率资源,故存在修正因子 $A(M)$ 优化选择结果.

4 低复杂度的功率分配方案

在选择合适的中继节点之后,再对这些中继节点进行功率分配. 为便于计算,先对中断概率式(6)进行整理有

$$P_{\text{out}}(M) = C(M) \frac{1}{P_s \eta_{sd}^2 \gamma} \prod_{i \in B_u} \left(\frac{1}{P_s \eta_{sr_i}^2 \gamma} + \frac{1}{P_{r_i} \eta_{rd}^2 \gamma} \right) = C(M) \frac{1}{P_s \eta_{sd}^2 \cdot \gamma^{M+1} \cdot \prod_{i \in B_u} \eta_{sr_i}^2} \prod_{i \in B_u} \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_i}{P_{r_i}} \right) \tag{23}$$

其中, $\alpha_i = \eta_{sr_i}^2 / \eta_{rd}^2$. 当选择中继数目以及各链路的 CSI 确定且默认中继按 w_i 降序排列时, $C(M)$ 、 γ 、 η_{sd}^2 、 $\eta_{sr_i}^2$ 以及 η_{rd}^2 ($i = 1, \dots, M$) 均为常数. 由此,在总发射功率为 P 条件下,使中断概率最小化的功率分配问题,可由以下数学模型描述:

$$\begin{aligned} \text{(P1)} \quad & \min \frac{1}{P_s} \prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_i}{P_{r_i}} \right) \\ \text{s.t.} \quad & P_s + \sum_{i=1}^M P_{r_i} \leq P \end{aligned}$$

利用拉格朗日乘数法求解问题(P1),其拉格朗日代价函数 $L(\vec{P}, \lambda)$ 表示为

$$L(\vec{P}, \lambda) = \frac{1}{P_s} \prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_i}{P_{r_i}} \right) + \lambda \left(P_s + \sum_{i=1}^M P_{r_i} - P \right) \tag{24}$$

其中, λ 表示拉格朗日参数, $\vec{P} = [P_s, P_{r_1}, \dots, P_{r_M}]$ 表示发射功率向量. 随后, $L(\vec{P}, \lambda)$ 分别对 P_s 、 P_{r_i} 以及 λ 求偏导,并令其均等于 0,得方程组:

$$\begin{cases} -\frac{1}{P_s^2} \prod_{i=1}^M \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_i}{P_{r_i}} \right) + \sum_{k=1}^M \frac{1}{P_s} \left(\prod_{i=1, i \neq k}^M \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_i}{P_{r_i}} \right) \right) \left(-\frac{1}{P_s^2} \right) + \lambda = 0 \\ \frac{1}{P_s} \left(\prod_{k=1, k \neq i}^M \left(\frac{1}{P_s} + \frac{\alpha_k}{P_{r_k}} \right) \right) \left(-\frac{\alpha_i}{P_{r_i}^2} \right) + \lambda = 0, \quad i=1, \dots, M \\ P_s + \sum_{i=1}^M P_{r_i} - P = 0 \end{cases} \tag{25}$$

根据文献[17]所述变量代换方法,求解式(25),可得源节点和中继节点的分配功率为

$$\sum_{i=1}^M \sqrt{P_s^2 \alpha_i^2 + 4\alpha_i P_s P / (M+1)} = 2(P - P_s) + P_s \sum_{i=1}^M \alpha_i \tag{26}$$

$$P_{r_i} = \frac{-P_s \alpha_i + \sqrt{P_s^2 \alpha_i^2 + 4\alpha_i P_s P / (M+1)}}{2}, \quad i=1, \dots, M \tag{27}$$

据式(26)和式(27)知,为得到中继节点发射功率 P_{r_i} ,首先需解得源发射功率 P_s ,而式(26)为超越方程,求解困难. 为此,令 $\alpha_i = (1/M) \sum_{k=1}^M \alpha_k$,统一各中继链路比 α_i . 此时,将式(26)化简得 P_s 为

$$P_s = \frac{P}{1 - \sum_{k=1}^M \alpha_k} \left[1 - \frac{\sum_{k=1}^M \alpha_k}{2(M+1)} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4M(M+1)}{\sum_{k=1}^M \alpha_k}} \right) \right] \tag{28}$$

式(28)无需求解超越方程,极大简化了原式(26)求解 P_s 的复杂度. 得到 P_s 后,再利用式(27),可依次获得中继节点发射功率 P_{r_i} ,最终完成功率分配. 与现有功率分配方案^[7]类似,所提分配方案也采用了源-中继联合功率分配的思想. 但与其最大化系统信道容量的思路不同,本文从最小化中断概率的角度出发,利用统计 CSI 来实施功率分配,实现复杂度较低.

总之,所提方案的具体步骤如下:

(1) 根据式(8)计算各中继节点的等效信道增益 w_i ,并对所有中继按 w_i 降序排列.

(2) 根据式(12)计算 $\gamma_{\text{eq},M}$,再与系统信噪比 γ_{th} 比较,按式(11)得协作中继最优数 M_{opt} ,由此得到最优中

继集合 $B_{\text{opt}} = \{R_1, R_2, \dots, R_{M_{\text{opt}}}\}$.

(3) 对源节点和 B_{opt} 中的中继进行功率分配, 首先按式(28)求解源发射功率 P_s , 再按式(27)得到各中继节点发射功率 P_r , 实现功率分配.

5 复杂度分析

本节主要分析所提方案的计算复杂度.

从多中继选择角度分析, 设所有中继节点数为 N . 首先, 计算所有中继节点等效信道增益 w_i , 时间复杂度为 $O(N)$. 随后, 根据 w_i 对所有中继节点进行冒泡排序, 时间复杂度为 $O(N^2)$. 最后, 从排序好的中继节点中挑选最优的中继集合, 时间复杂度为 $O(N)$. 故选择中继集合所需的时间复杂度为 $O(N^2 + N + N) = O(N^2)$.

从功率分配角度分析, 设参与分配的中继数为 N .

统一各链路的 α_i 为其统计平均值 $(1/N) \sum_{k=1}^N \alpha_k$, 可将式

(26)化简成式(28), 从而避免超越方程的求解, 使得源发射功率 P_s 可用解析式表示, 极大减少计算复杂度. 此时, 因所提方案的功率分配表达式均为解析式, 无需求解方程, 故求解 1 个源节点和 N 个中继的分配功率所需时间复杂度为 $O(N+1) = O(N)$. 并且在统计信道信息不变的情况下, 所提方案只需 1 次功率分配.

据文献[13]可知, 由等功率条件选择得到的中继组通常已是最优组合, 无需在功率分配后根据所得分配因子进行再选择, 避免选择-分配-再选择-再分配的迭代过程, 复杂度低. 同时, 据式(11)、式(27)以及式(28)可知, 所提方案采用的两跳 CSI 均为统计值, 所需网络开销小, 实现简单. 另外, 对于穷举法, 其首先需得到所有可能的中继集合, 共有 $\sum_{M=0}^N C_N^M = 2^N$ 种情况. 之后, 执行 2^N 次功率分配. 最后, 从 2^N 次结果中选择中断概率最低的中继集合. 由此可见, 所提方案极大简化了中继选择和功率分配的复杂度.

6 仿真及结果分析

仿真参数如下: 各信道相互独立, 且均为瑞利衰落信道, 调制方式为二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK), 加性高斯白噪声的方差 N_0 均为 1, 中继总数 N 为 5. 其中, 中继按等效信道增益 w_i 降序排列, 各链路的信道统计特性分别为 $\eta_{sd}^2 = 1, \eta_{sr_1}^2 = 1.3, \eta_{r_1d}^2 = 1.75, \eta_{sr_2}^2 = 1.42, \eta_{r_2d}^2 = 1.31, \eta_{sr_3}^2 = 0.87, \eta_{r_3d}^2 = 0.68, \eta_{sr_4}^2 = 1.71, \eta_{r_4d}^2 = 0.35, \eta_{sr_5}^2 = 0.23, \eta_{r_5d}^2 = 0.58$. 信息传输速率 R 为 1 bit/s, 总功率 P 为 10 W. 另外, 仿真涉及的 SNR 为系统 SNR, 有 $\text{SNR} = 10 \cdot \log_{10}(P/N_0)$.

图 2 比较了不同中继节点数的中断概率 Monte-

Carlo 仿真值与理论值. 在大信噪比条件下 ($\text{SNR} > 20$ dB), 不同中继节点数的理论值与仿真值基本重合, 符合式(6)的理论预期, 表明从中断概率公式角度得到的基于统计信道状态信息的中继选择方案, 具有较好的可靠性.

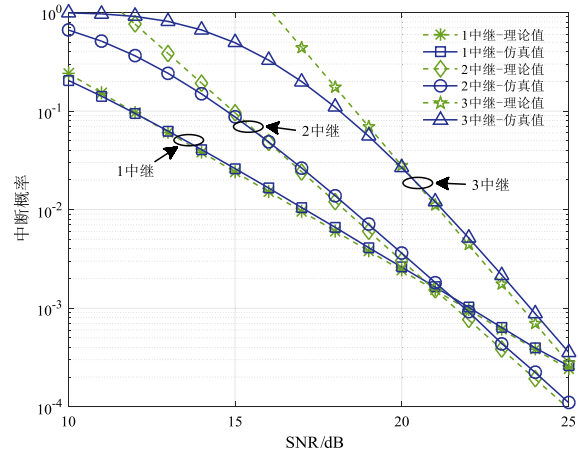


图 2 不同中继协作数的中断概率理论值与仿真值比较

为验证所提选择方案的有效性, 将各种不同数目的中继协作中断概率与经所提方案选择后得到的中断概率进行比较, 如图 3 所示.

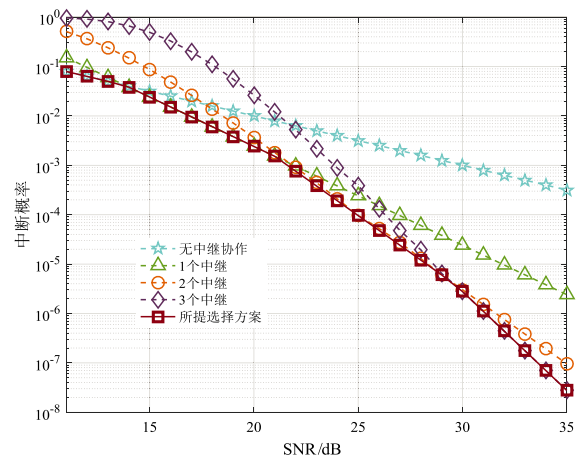


图 3 等功率分配下所提选择方案与不同中继协作数的中断概率比较

图 3 比较了所提选择算法与不同中继数在等功率分配条件下的中断概率. 如图可知, 所提方案的中断概率最低, 说明所提选择方案总是可以选择最优的中继组合进行协作. 同时, 据式(11)和式(15)可得, 当系统信噪比 $\gamma_{\text{th}} \leq 13.83$ dB 时, 无中继参与时中断概率最小; 当 13.83 dB $< \gamma_{\text{th}} \leq 20.99$ dB 时, 选择 1 个中继; 当 20.99 dB $< \gamma_{\text{th}} \leq 29.62$ dB, 选择 2 个中继; 当 29.62 dB $< \gamma_{\text{th}} \leq 36.77$ dB, 选择 3 个中继, 上述理论结果与仿真基本一致, 验证了其可靠性. 另外, 如图可得, 并非参与协作的

中继节点数越多,系统的中断性能越好.这是因为,当系统信噪比 P/N_0 较低时,信道链路较差的中继会对整体系统造成显著的不良影响,所以应当剔除.

图4比较了所提选择算法与SAF、AAF以及穷举法在等功率分配条件下的中断性能.其中,SAF是在多中继节点中选择最优的单中继进行协作;AAF是全中继参与协作;穷举法是在所有可能的中继集合中选择最优的集合进行协作.显然,在任意信噪比下,所提算法均优于SAF和AAF,且当中断概率为 10^{-4} 时,所提算法所需SNR相较于SAF和AAF,分别降低了2.3 dB和5.9 dB.另外,所提选择算法与穷举法中断曲线一致,说明在等功率分配条件下,所提选择算法不仅能降低穷举法复杂度,还具有相同中断性能.

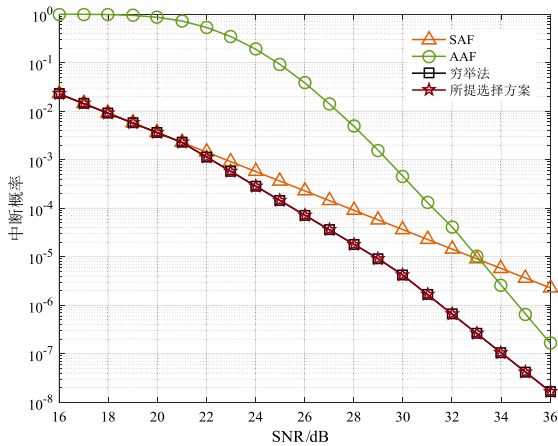
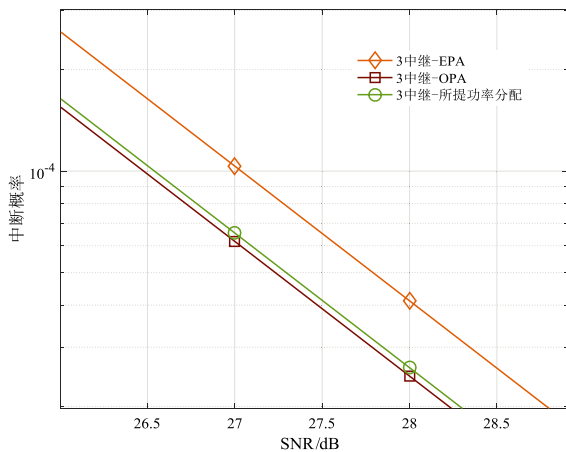
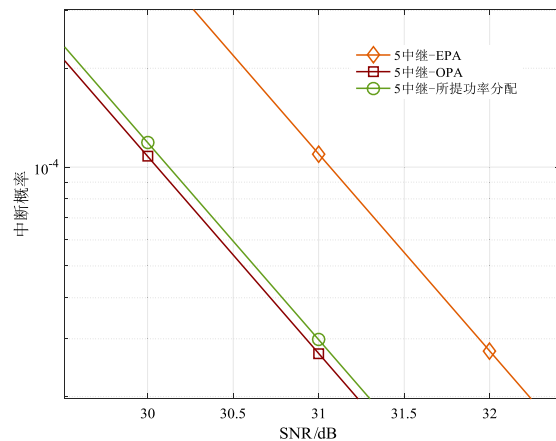


图4 等功率分配下不同选择方案的中断概率曲线

图5比较了3和5中继节点数经所提功率分配方案、等功率分配(Equal Power Allocation, EPA)方案以及最优功率分配(Optimal Power Allocation, OPA)方案



(a) 3 中继协作



(b) 5 中继协作

图5 不同中继协作数经三种功率分配方案后的中断概率

后的中断性能.其中,EPA各节点分配的功率一致;OPA采用式(26)、式(27)进行功率分配;所提方案在OPA上改良,即采用式(27)、式(28)进行功率分配.当中继数为3,中断概率为 10^{-4} 时,所提方案相较于EPA,所需SNR可降低0.5 dB,相较于OPA,所需SNR仅升高约0.05 dB.当中继数为5,中断概率为 10^{-4} 时,所提方案相较于EPA,所需SNR可降低1 dB,相较于OPA,所需SNR仅升高0.07 dB.由此可知,所提功率分配方案与OPA相比,具有类似的性能优势,且相较于EPA有较大提升.

图6比较了所提选择算法、SAF、AAF以及穷举法经所提功率分配方案或最优功率分配方案后的中断性能.其中,SAF-OPA表示分别对每一个中继采用式(26)、式(27)进行单中继最优功率分配,再选择中断性能最优的单中继进行协作;SAF-所提功率分配表示分别对每一个中继采用所提的式(27)、式(28)进行功率分配,再从中选择最优的单中继进行协作;AAF-OPA表示在所有中继最优功率分配后,全部协作;AAF-所提功率分配表示所有中继在所提功率分配后,全部协作;穷举法表示对所有可能的中继集合最优功率分配后,从中选择最优的情况进行协作;所提方案首先按式(11)、式(15)执行中继选择,最后经式(27)、式(28)功率分配后,再协作.在所提功率分配与最优功率分配应用于不同中继选择方案后,二者所得中断性能基本一致,最大差异仅约0.08 dB.另外,在任意信噪比下,所提方案相较于SAF-OPA和AAF-OPA方案,均有较大提升,当中断概率为 10^{-4} 时,所需SNR分别降低了约2.5 dB和5.3 dB.同时,与计算复杂度极大的穷举法相比,二者性能基本一致,在中断概率为 10^{-4} 时,二者仅差约0.01 dB.

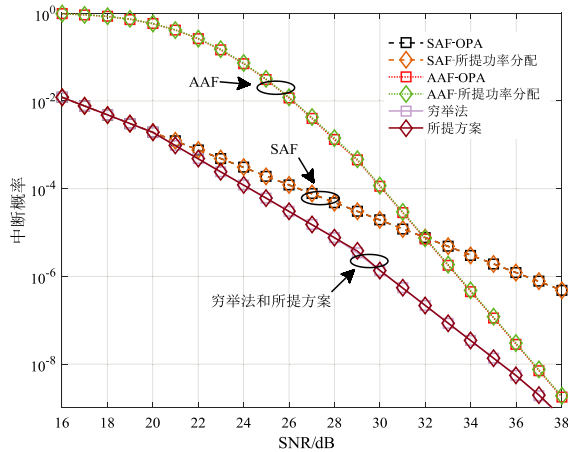


图6 不同选择方案功率分配后的中断概率曲线

7 总结

本文主要研究了采用统计信道特性的多中继 AF 的最优中继节点选择及优化功率分配方案. 相对于穷举方案, 其中继选择在等功率分配条件下进行, 且优化功率分配无需求解超越方程, 算法复杂度极大降低. 而且, 通过仿真比较所提方案与 SAF、AAF 及穷举法的中断性能: 所提方案中断性能基本与穷举法一致, 相对于 SAF 和 AAF 方案有较大的提升, 适用于高性能、低复杂度的下一代移动通信网络.

参考文献

- [1] PAULRAJ A J, GORE A, NABAR R U, et al. An overview of MIMO communications—a key to gigabit wireless [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92(2): 198-218.
- [2] COVER T M, GAMAL A. Capacity theorems for the relay channel[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1979, 25(5): 572-584.
- [3] LANEMAN J N, TSE D, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(12): 3062-3080.
- [4] HAMMERSTROM I, KUHN M, WITTNEBEN A. Impact of relay gain allocation on the performance of cooperative diversity networks[C]//*IEEE 60th Vehicular Technology Conference*. Los Angeles: IEEE, 2004: 1815-1819.
- [5] BLETSAS A, KHISTI A, REED D P, et al. A simple cooperative diversity method based on network path selection [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, 24(3): 659-672.
- [6] 惠隼, 朱世华, 李国兵. 一种基于放大转发的中继选择策略[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(4): 450-453.

scheme in cooperative networks with amplify-and-forward protocol[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(4): 450-453. (in Chinese)

- [7] LI C, WANG X, YANG L, ZHU P. A joint source and relay power allocation scheme for a class of MIMO relay systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(12): 4852-4860.
 - [8] LI C, YANG L, ZHU P. Two-way MIMO relay precoder design with channel state information[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2010, 58(12): 3358-3363.
 - [9] 邹玉龙, 郑宝玉. 基于分布式中继选择的自适应协作传输方案[J]. *电子学报*, 2009, 37(1): 13-20.
- ZOU Yu-long, ZHENG Bao-yu. Adaptive cooperative transmission scheme based on distributed relay selection [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2009, 37(1): 13-20. (in Chinese)
- [10] ZHU R, LI T, GUO J, et al. Relay selection scheme for AF system with partial CSI and optimal stopping theory [J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2020, 25(2): 302-312.
 - [11] LI C, YANG L, ZHU P. Minimum mean squared error design of single-antenna two-way distributed relays based on full or partial channel state information[J]. *IET Communications*, 2011, 5(5): 728-735.
 - [12] PI X, CAI Y, YANG W. A multirate cooperative MAC protocol employing statistic channel state information[C]//*2013 IEEE Third International Conference on Information Science and Technology(ICIST)*. Yangzhou: IEEE, 2013: 1131-1135.
 - [13] 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.
 - [14] WU Su-wen, LV Xing-zai, ZHU Jin-kang, et al. A statistic channel information-based relay selection scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1077-1081. (in Chinese)
 - [15] 孙立悦, 赵晓晖, 魏明. 基于中断概率的协作通信中继选择与功率分配算法[J]. *通信学报*, 2013, 34(10): 84-91.
 - [16] SUN Li-yue, ZHAO Xiao-hui, GUO Ming. Outage probability based power allocation and relay selection algorithm in cooperative communication[J]. *Journal on Communications*, 2013, 34(10): 84-91. (in Chinese)
 - [17] LANEMAN J N, WORNELL G W. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425.
 - [18] RIBEIRO A, CAI X, GIANNAKIS G B. Symbol error

probabilities for general cooperative links[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2005, 4(3): 1264-1273.

- [17] ANNAVAJJALA R, COSMAN P C, MILSTEIN L B. Statistical channel knowledge-based optimum power allocation for relaying protocols in the high SNR regime[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 292-305.

作者简介



郭潇瑶 男,1997年生于浙江宁波.现为杭州电子科技大学通信工程学院硕士研究生.主要研究方向为协作通信和极化编码等.

E-mail: 1040914334@qq.com



刘超 男,1977年生于湖北武汉.现为杭州电子科技大学副教授,硕士生导师.主要研究方向为无线通信和计算机通信网络等.

E-mail: liuchao@hdu.edu.cn



包建荣(通讯作者) 男,1978年生于浙江杭州.现为杭州电子科技大学教授,博士生导师.主要研究方向为空间通信、协同信息论与编码、无线AI等.

E-mail: baojr@hdu.edu.cn



姜斌 男,1980年生于浙江衢州.现为杭州电子科技大学高级实验师,硕士生导师.主要研究方向为空间无线通信和无线传感器网络等.

E-mail: jiangbin@hdu.edu.cn