

# 最佳中继协作通信系统的功率分配算法

李国兵<sup>1</sup>, 朱世华<sup>1</sup>, 惠 1,2

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048)

摘 要: 为提高基于最佳中继选择的协作通信系统的性能, 提出了以最小化系统中断概率为目标的功率分配算法. 首先建立了系统的优化模型并证明了待解的优化问题实质是凸优化问题, 由此提出了最优功率分配算法并给出了算法步骤. 其次, 在此基础上提出了一种有效的次最优功率分配算法, 该算法计算简单且仅需已知各个中继节点的平均信道状态信息, 无需在传输中实时更新, 因而不增加系统的额外开销. 仿真结果表明, 本文提出的最优算法和次最优算法所得到的功率分配方案与穷举搜索方法的结果非常接近; 与等功率分配方案相比, 这两种算法均能显著提高系统的中断概率性能.

关键词: 协作通信; 无线中继; 功率分配; 凸优化

中图分类号: TN925 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 10-1944-05

## Power Allocation in Opportunistic Cooperative Relaying Systems

LI Guo-bing<sup>1</sup>, ZHU Shi-hua<sup>1</sup>, HUI Hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

2. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: To enhance the performance of opportunistic cooperative relaying systems, this paper proposes the power allocation algorithms aiming at minimizing the outage probability. The optimization model of the system is constructed and proved to be a convex optimization problem. Then the optimal power allocation algorithm and its operation steps are presented. Furthermore a simple and effective near optimal power allocation strategy is developed, which only depends on the average channel gains of the relays and thus incurs little overhead. Simulation and numerical results show that significant performance gains can be achieved by the two proposed power allocation algorithms.

Key words: cooperative communications; wireless relaying; power allocation; Convex optimization

### 1 引言

协作通信技术通过用户之间彼此共享天线而引入空间分集, 从而有效对抗无线信道的多径衰落, 成为近年来无线通信领域的研究热点<sup>[1-3]</sup>. 针对存在多个中继节点的无线网络, 分布式空时码受到了广泛关注, 精心设计的分布式空时码可以带来显著的性能增益<sup>[4]</sup>. 但是随着参与协作的节点数增多, 同步、节点间协调等问题成为分布式空时码的设计难点. 合理地取舍协作节点是解决这一难题的方法之一. 文献[5~8]提出了基于最佳中继选择的协作通信策略, 即每次传输只选择一个最佳的中继参与协作, 使协作过程得以简化. 文献[5~11]分析并证明了在中继已知信道状态信息的情况下, 该策略性能甚至优于所有中继参与的协作. 针对上述文献中尚未完全解决的功率分配问题<sup>[10]</sup>, 本文将针对解码转发

型的最佳中继选择协作通信系统, 提出以最小化系统中断概率为目标的最优和次最优功率分配算法.

### 2 系统模型

考虑一个通用的包含  $K+2$  个节点的半双工两跳无线中继网络, 源节点  $S$  通过中继向目的节点  $D$  发送信息, 信息传输过程存在  $K$  个潜在的中继节点  $\mathcal{R} = \{1, 2, \dots, K\}$ . 一次传输过程包括两个阶段: 第一阶段, 源节点向所有中继广播信息, 中继进行监听; 第二阶段, 从所有中继中挑选出最佳中继, 仅由该中继向目的节点转发信息. 由于第二个阶段中只有一个节点在发送信号, 因此目的端不存在接收信号不同步的问题. 假设信道服从准静态瑞利平坦衰落, 并且在一次传输中保持不变, 而在各次传输中相互独立. 任意节点  $i$  和节点  $j$  之间的信道增益  $h_{ij}$  是均值为 0, 方差为  $\Omega_{ij}$  的复高斯随机变量, 因此信道的功率增益  $|h_{ij}|^2$  服从均值为  $\Omega_{ij}^{-1}$  的负

指数分布. 信道中的噪声是均值为 0, 单边功率谱密度为  $N_0$  的加性复高斯白噪声. 另外, 为了在传输的第二阶段确定最佳中继, 假设中继已知自身瞬时信道状态信息. 进一步地, 我们假设一次传输过程中的总功率受限, 即有  $P_s = \zeta P_{\text{tot}}, P_r = (1 - \zeta) P_{\text{tot}}$ . 其中,  $P_{\text{tot}}$  表示一次传输的总功率,  $\zeta \in (0, 1]$  是功率分配的比例因子,  $P_s, P_r$  分别表示源和中继节点的发射功率.

对于最佳中继的选择, 目前有两种方式<sup>[10, 11]</sup>, 一种称为“Reactive”方式, 即传输时在所有能够正确解码的节点中选择与目的端信道条件最好的中继进行传输; 另一种称为“Proactive”方式, 即在每次传输之前首先根据信道条件选择最好的中继, 然后在传输的第二阶段使用该中继进行合作. 现有文献的分析和仿真都表明, 这两种合作策略具有完全相同的中断概率性能. 其中断概率为<sup>[10, 11]</sup>

$$P_{\text{outage}} = \prod_{k=1}^K \left[ 1 - e^{-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}} \left( \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right)} \right] \quad (1)$$

其中,  $R$  表示系统端到端的频谱效率, 单位是 bps/Hz;  $\text{SNR} \triangleq P_{\text{tot}}/N_0$ ,  $\Omega_{Sk}$  和  $\Omega_{kD}$  分别表示源节点  $S$  到第  $k$  个中继、第  $k$  个中继到目的节点  $D$  的平均信道功率增益.

### 3 最优功率分配算法

由式(1)可知, 基于最小中断概率的最优功率分配问题等效为求解

$$\zeta^* = \arg \min_{0 < \zeta \leq 1} \prod_{k=1}^K \left[ 1 - e^{-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}} \left( \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right)} \right] \quad (2)$$

当信噪比较高时, 式(2)可近似为

$$\zeta^* = \arg \min_{0 < \zeta < 1} \prod_{k=1}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right] \quad (3)$$

由于式(2)中的变量  $R$  和  $\text{SNR}$  对最终结果没有影响, 为简化表达式, 它们在式(3)中没有出现. 因此最优化问题可以表示为

$$\begin{cases} \min \prod_{k=1}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right] \\ \text{s. t. } 0 < \zeta < 1 \end{cases} \quad (4)$$

这是一个有约束非线性规划问题. 为求最优功率分配方案, 令  $f(\zeta) \triangleq \prod_{k=1}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right]$ , 其驻点满足

$$f'(\zeta) = \sum_{k=1}^K \left[ \left( -\frac{1}{\zeta^2 \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta)^2 \Omega_{kD}} \right) \cdot \prod_{j=1, j \neq k}^K \left( \frac{1}{\zeta \Omega_{Sj}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{jD}} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 尽管目标函数的导数形式不难得到, 但是试图通过解式(5)这样的方程直接得到驻点的解析表达式却非常困难. 为此, 我们考虑使用数值计算方法得到最优解.

**定理 1.** 最优化问题(4)是一个凸优化问题, 且目

标函数  $f(\zeta) \triangleq \prod_{k=1}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right]$  是严格下凸函数.

证明: 由于约束条件  $0 < \zeta < 1$  显然是一个凸集, 因此只需证明目标函数  $f(\zeta) \triangleq \prod_{k=1}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{kD}} \right]$  是定义在凸集  $0 < \zeta < 1$  上的严格下凸函数. 这一问题可以转化为证明如下两个结论: (1)  $\ln f(\zeta)$  在  $0 < \zeta < 1$  上是严格下凸函数(见附录 A); (2)  $\ln f(\zeta)$  在  $0 < \zeta < 1$  上严格下凸是  $f(\zeta)$  在  $0 < \zeta < 1$  上严格下凸的充分条件(见附录 B). 证毕.

根据定理 1 可知, 凸优化问题具有唯一的全局最优解, 且该最优解是目标函数  $f(\zeta)$  在  $\zeta \in (0, 1)$  上的极小点<sup>[12]</sup>. 由此我们提出计算最优功率分配因子  $\zeta^*$  以及最小中断概率的迭代算法:

**步骤 1** 定义初始值  $\zeta^{(n)} = \zeta_0 = 0.5$ ,  $\varepsilon = 10^{-4}$ . 若  $f'(\zeta_0) < \varepsilon$  则迭代过程结束, 输出  $\zeta^* = \zeta_0$ , 否则转步骤 2;

**步骤 2**  $\zeta^{(n+1)} = \zeta^{(n)} + \Delta \zeta^{(n)}$ ,  $\Delta \zeta^{(n)} = -f'(\zeta^{(n)}) \cdot \chi^n$ , 其中  $-f'(\zeta^{(n)})$  为下降方向,  $\chi^n = 2^{-m}$  表示步长,  $m$  取使  $0 < \zeta^{(n+1)} < 1$  且  $f(\zeta^{(n+1)}) - f(\zeta^{(n)}) < 0$  的最小非负整数;

**步骤 3** 若  $|f(\zeta^{(n+1)}) - f(\zeta^{(n)})| < \varepsilon$  或  $|\Delta \zeta^{(n)}| < \varepsilon$  或  $|f'(\zeta^{(n+1)})| < \varepsilon$ , 则迭代过程结束, 输出  $\zeta^* = \zeta^{(n+1)}$ , 否则令  $n = n + 1$ , 转步骤 2.

因此, 我们得到采用最优功率分配时的系统中断概率:

$$P_{\text{out}}^{\min} = \prod_{k=1}^K \left[ 1 - e^{-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}} \left( \frac{1}{\zeta^* \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta^*) \Omega_{kD}} \right)} \right] \quad (6)$$

尽管不能得到最佳功率分配因子  $\zeta^*$  的闭式表达, 我们从式(5)仍然可以看出: 最终的功率分配方案只与平均信道增益有关, 而与信息速率、发射功率等因素无关. 因此在平均信道增益变化较慢的场合, 完全可以在传输开始前事先计算功率分配因子并通知所有协作节点, 并不需要过多的系统开销.

### 4 次最优功率分配算法

根据定理 1 可知,  $f(\zeta)$  在  $\zeta \in (0, 1)$  上存在极小值点, 那么  $f'(\zeta) = 0$  在  $\zeta \in (0, 1)$  上必有解, 因此考虑从式(5)出发寻找进一步简化功率分配的算法. 考虑到在一般情况下, 式(5)中  $\prod_{j=1, j \neq k}^K \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{Sj}} + \frac{1}{(1 - \zeta) \Omega_{jD}} \right]$  的值对所有节点  $k$  相差不大且不为 0, 因此我们将式(5)近似为

$$\sum_{k=1}^K \left[ -\frac{1}{\zeta^2 \Omega_{Sk}} + \frac{1}{(1 - \zeta)^2 \Omega_{kD}} \right] \triangleq 0 \quad (7)$$

由此, 我们得到功率分配的一种次最优方案:

$$\zeta^* = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{Sk}^{-1}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{Sk}^{-1}} + \sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{kD}^{-1}}} \quad (8)$$

可见, 次最优功率分配方案只与  $\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{Sk}^{-1}}$  和

$\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{kD}^{-1}}$  的比值有关, 在二者相差不大时, 等功率分配接近或等于最优功率分配; 而当二者相差较大时, 次最优功率分配方案将比等功率分配带来更大的性能增益。

### 5 仿真实验结果

本文在准静态瑞利平坦衰落信道下对功率分配算法的效果进行了仿真。在下面的仿真中, 取  $R = 1\text{bps/Hz}$ , 节点  $i$  和  $j$  节点之间信道的平均功率增益与距离  $d_{ij}$  的  $\alpha$  次方成反比, 即  $\Omega_{ij} = cd_{ij}^{-\alpha}$ , 其中  $c$  是与传播环境有关的常数,  $\alpha$  是路径损耗指数, 取值一般在  $2 \sim 5$  之间。不失一般性, 在仿真中我们取  $\alpha = 3, c = 1$ 。

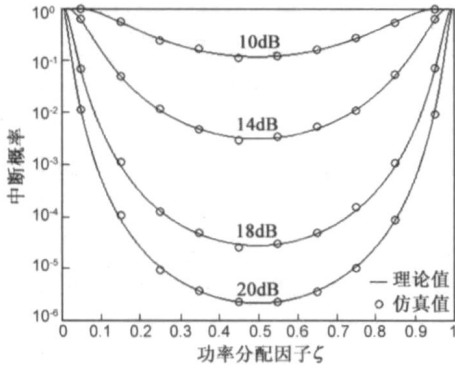


图1 功率分配对性能的影响( $K=6, \{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = 1$ )

图1和图2给出了系统中存在6个中继节点且源与中继、中继与目的之间的距离都相等时的仿真结果, 此时取信道的平均信道增益  $\{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = 1$ 。图1对不同功率分配因子时的系统中断概率进行了数值计算和蒙特卡罗仿真。通过图1我们可以看到, 在这种情况下, 等功率分配是最佳的功率分配方案。而观察式

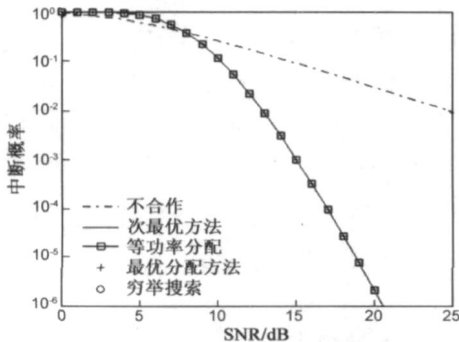


图2 中断概率性能比较( $K=6, \{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = 1$ )

(8) 可以发现, 由于此时  $\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{Sk}^{-1}}$  和  $\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{kD}^{-1}}$  相等, 因此根据次最优算法得到的功率分配方案就是等功率分配。进一步地, 从图2中的数值仿真结果也可以看出, 本文的最优功率分配、次最优功率分配算法得到的分配方案与等功率分配的中断概率性能相吻合。

采用文献[10]中使用的非对称网络拓扑, 取信道的平均信道功率增益  $\{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K$  和  $\{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K$  为  $\{4.5, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$ 。也可以看到, 尽管此时6个中继节点的信道增益各不相同, 但由于  $\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{Sk}^{-1}}$  和  $\sqrt{\sum_{k=1}^K \Omega_{kD}^{-1}}$  相等, 因此根据式(8)可知, 与  $\{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = 1$  类似, 等功率分配是最佳的功率分配方案。如图3、图4所示:

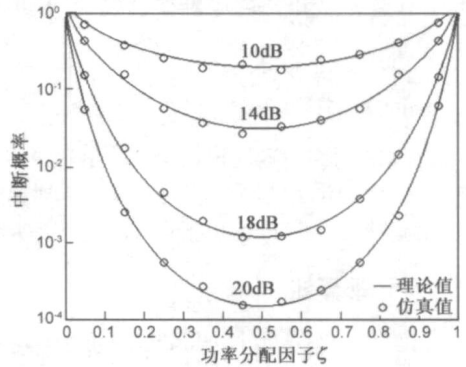


图3 功率分配对性能的影响( $K=6, \{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = \{4.5, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$ )

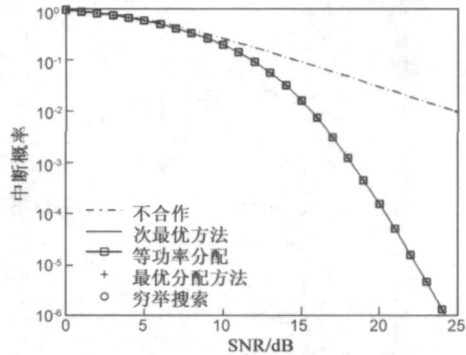


图4 中断概率性能比较( $K=6, \{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K = \{\Omega_{kD}\}_{k=1}^K = \{4.5, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1\}$ )

上述仿真表明, 本文提出最优功率分配和次最优功率分配算法能够准确获得最优的功率分配方案。

为了进一步说明本文算法的性能, 图5和图6给出了一种源与中继、中继与目的之间的距离不相等时的仿真结果。为使结果具有一般意义, 我们将源与目的之间的距离归一化, 并选取了6个与源节点相对接近的点作为中继。在本次仿真中, 取  $\{d_{Sk}\}_{k=1}^K$  为  $\{0.0962, 0.1556, 0.2279, 0.2460, 0.2747, 0.3213\}$ , 取  $\{d_{kD}\}_{k=1}^K$  为  $\{0.9055, 0.8508, 0.8004, 0.8004, 0.7379, 0.6791\}$ 。相应地,  $\{\Omega_{Sk}\}_{k=1}^K$  为  $\{1123.6, 265.6, 84.4, 67.2, 48.3, 30.2\}$ ,

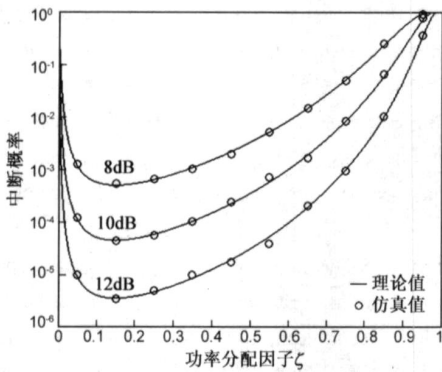


图5 功率分配对性能的影响( $k=6, \{\Omega_{sk}\}_{k=1}^K = \{1123.6, 265.6, 84.4, 67.2, 48.3, 30.2\}, \{\Omega_{kd}\}_{k=1}^K = \{1.3469, 1.6238, 1.9505, 1.9505, 2.4890, 3.1927\}$ )

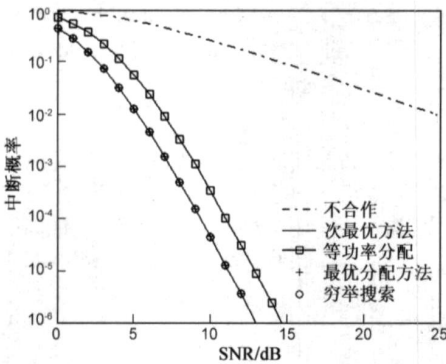


图6 中断概率性能比较( $k=6, \{\Omega_{sk}\}_{k=1}^K = \{1123.6, 265.6, 84.4, 67.2, 48.3, 30.2\}, \{\Omega_{kd}\}_{k=1}^K = \{1.3469, 1.6238, 1.9505, 1.9505, 2.4890, 3.1927\}$ )

$\{\Omega_{kd}\}_{k=1}^K$  为  $\{1.3469, 1.6238, 1.9505, 1.9505, 2.4890, 3.1927\}$ . 从图 5 的仿真结果可以看到, 最优的功率分配因子的值在 0.15 左右, 这可由穷举搜索所有的功率分配可能性而得到准确结果. 仿真中由最优和次最优功率分配算法得到的结果见表 1:

表 1 几种方法获得的功率分配因子

所用算法	最优功率分配算法	次最优功率分配算法	穷举搜索
功率分配因子	0.1473	0.1423	0.1501

如表 1 所示, 本文所提出的两种功率分配算法都与穷举搜索方法得到的功率分配因子非常接近, 其误差小于  $10^{-2}$ . 事实上, 通过调整精度  $\epsilon$ , 最优功率分配算法还可以进一步逼近穷举搜索. 另外, 从图 6 可以进一步看到, 本文提出的这两种方法具有几乎相同的中断概率性能, 同时二者与等功率分配方案相比, 都可获得 2dB 左右的性能增益.

此外, 由于本文的两种算法是在中断概率的近似式 (3) 提出的, 因此精度略低于穷举搜索方法. 但是从计算复杂度来看, 本文的两种算法远低于穷举搜索方法. 首先, 为了获得不同信噪比下的功率分配因子, 穷举搜索对每一个给定的信噪比都需要重新计算, 而本文的两种

算法都与信噪比无关, 计算一次即可获得; 其次, 在信噪比给定的情况下, 本文的算法复杂度也低于穷举搜索. 以本文仿真为例, 为了获得如表 1 所示的功率分配方案, 使用穷举搜索方法需要进行 10000 次搜索和比较, 而本文提出的最优功率分配算法只需 4 次迭代即可完成. 次最优算法则可根据式直接计算出结果, 其计算复杂度更低.

## 6 结论

本文研究了在基于最佳中继选择的协作通信系统中的功率分配策略, 给出了以最小化系统中断概率为目标的非线性规划模型并证明待解的优化问题是一个凸优化问题, 提出了针对凸优化问题求解的功率分配算法并给出了算法步骤. 在此基础上提出了一种次最优的功率分配算法. 该算法简化了计算过程, 同时其性能与最优功率分配算法以及穷举搜索得到的结果非常接近. 本文提出的算法复杂度低, 且只需已知平均信道增益信息, 因而对系统负担小, 有助于协作通信技术的实用.

## 附录 A

证明  $\ln f(\zeta)$  在  $\zeta \in (0, 1)$  是下凸函数:

$\ln f(\zeta) = \sum_{k=1}^K \ln \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right]$  是多个对数函数之和, 对  $\ln \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right]$  的二阶导数进行整理, 可得

$$\begin{aligned} & \left[ \ln \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right] \right]'' \\ &= \left[ \left\{ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right\}^{-1} \left[ -\frac{1}{\zeta^2 \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta)^2 \Omega_{kd}} \right] \right]' \\ &= - \left\{ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right\}^{-2} \left[ -\frac{1}{\zeta^2 \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta)^2 \Omega_{kd}} \right]^2 \\ &+ \left\{ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right\}^{-1} \left[ \frac{2}{\zeta^3 \Omega_{sk}} + \frac{2}{(1-\zeta)^3 \Omega_{kd}} \right] \\ &= \left\{ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right\}^{-2} \cdot \left[ \left( \frac{1}{\zeta^2 \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta)^2 \Omega_{kd}} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{2}{\zeta^3 (1-\zeta) \Omega_{sk} \Omega_{kd}} + \frac{2}{\zeta (1-\zeta)^3 \Omega_{sk} \Omega_{kd}} \right] \end{aligned}$$

由上式不难看出, 任取  $\zeta \in (0, 1)$ , 对所有  $k = 1, \dots, K$ ,

有  $\left[ \ln \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right] \right]'' > 0$ , 显然有  $[\ln f(\zeta)]'' = \sum_{k=1}^K \left[ \ln \left[ \frac{1}{\zeta \Omega_{sk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right] \right]'' > 0$ , 即  $\ln f(\zeta)$  的二阶导数严格大于 0, 因此  $\ln f(\zeta)$  是严格下凸函数. 证毕.

## 附录 B

证明  $f(\zeta)$  是严格下凸函数:

因为  $\ln f(\zeta)$  是严格下凸函数, 因此对于任意  $\zeta_1, \zeta_2 \in (0, 1)$ ,  $\lambda_1, \lambda_2 \in (0, 1)$  且  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ , 有

$$\lambda_1 \ln f(\zeta_1) + \lambda_2 \ln f(\zeta_2) > \ln f(\lambda_1 \zeta_1 + \lambda_2 \zeta_2) \quad (9)$$

另一方面, 将  $f(\zeta)$  视为  $\ln f(\zeta)$  的自变量, 那么由于自然对数函数在实数范围内都是严格上凸函数, 所以  $\ln f(\zeta)$  是关于  $f(\zeta)$  的下凸函数. 因此有

$$\lambda_1 \ln f(\zeta_1) + \lambda_2 \ln f(\zeta_2) < \ln [ \lambda_1 f(\zeta_1) + \lambda_2 f(\zeta_2) ] \quad (10)$$

综合式(9)、(10), 并由对数函数的单调性可得, 对于任意  $\zeta_1, \zeta_2 \in (0, 1)$ ,  $\lambda_1, \lambda_2 \in (0, 1)$  且  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ , 有

$$\lambda_1 f(\zeta_1) + \lambda_2 f(\zeta_2) > f(\lambda_1 \zeta_1 + \lambda_2 \zeta_2) \quad (11)$$

亦即  $f(\zeta)$  是严格下凸函数. 证毕.

#### 参考文献:

- [1] 殷勤业, 张莹, 丁乐等. 协作分集: 一种新的空域分集技术 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 551-557.  
Yin Qinye, Zhang Ying, Ding Le, et al. Cooperation diversity: a new spatial diversity technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 551-557. (in Chinese)
- [2] A Sendonaris, E Erkip, B Aazhang. User cooperation diversity Part 1: system description [J]. IEEE Transactions on Communication, 2003, 51(11): 1927-1938.
- [3] A Nosratinia, T E Hunter, A Hedayat. Cooperative communication in wireless networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(10): 74-80.
- [4] J N Laneman, G W Wornell. Distributed space time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [5] A Bletsas, A Khisti, D P Reed, A Lippman. A simple Cooperative diversity method based on network path selection [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(3): 659-672.
- [6] Z Yi, R Adve, L Teng Joon. Symbol error rate of selection amplify and forward relay systems [J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(11): 757-759.
- [7] Y Zhao, R S Adve, T J Lim. Improving amplify and forward relay networks: optimal power allocation versus selection [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3114-3123.
- [8] J Luo, R S Blum, L J Cimini, L J Greenstein, A M Haimovich. Link failure probabilities for practical cooperative relay networks [A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology [C]. 2005, Vol. 3, 1489-1493.

- [9] C K Lo, R W Heath Jr, S Vishwanath. Opportunistic relay selection with limited feedback [A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology [C]. Dublin: IEEE, 2007, 135-139.
- [10] A Bletsas, H Shin, M Z Win. Outage optimal cooperative communications with regenerative relays [A]. Proceedings of Conference on Information Sciences and Systems (CISS) [C]. Princeton: IEEE, 2006, 632-637.
- [11] A Bletsas, S Hyundong, M Z Win, A Lippman. Cooperative diversity with opportunistic relaying [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference [C]. Las Vegas: IEEE, 2006, 1034-1039.
- [12] 张可村, 赵英良. 数值计算的算法与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
ZHANG Kecun, ZHAO Yingliang. Algorithm and Analysis of Numerical Calculate [M]. Beijing: Publish House of Science Press, 2003. (in Chinese)

#### 作者简介:



李国兵 男, 1979年1月生于江苏省仪征市, 西安交通大学在读博士生, 主要研究方向为无线通信中的协作通信、网络编码等。  
E-mail: gbli@mail.xjtu.edu.cn



朱世华 男, 1950年1月生于上海市, 西安交通大学教授, 博士生导师, 长期从事移动通信、数字传输和程控交换等方面的研究。



惠 女, 1979年1月生于陕西省西安市, 西安交通大学在读博士生, 西安理工大学讲师, 主要研究方向为无线通信中的资源分配、协作通信等。