

## 分布式 Alamouti 空时码的信道容量及最优资源分配方案

种稚萌 任品毅 朱世华 吕刚明  
(西安交通大学电子与信息工程学院 西安 710049)

**摘 要:** 该文针对基于译码转发协议的分布式 Alamouti 空时码(DF-DASTC)系统的信道容量以及最优资源分配策略问题。利用退化中继信道模型, 推导得到了 DF-DASTC 系统在衰落信道下的信道容量闭式解。以 DF-DASTC 信道容量最大化为目标, 对该系统在固定带宽分配时, 中继及信源节点的最优功率分配方案进行了研究, 推导得到了 DF-DASTC 系统的最优功率分配方案的闭式解。利用凸优化理论, 将以 DF-DASTC 信道容量最大化为目标函数的多目标优化问题转换为非线性不等式约束的单目标凸优化问题, 进一步得到了可变带宽分配时的 DF-DASTC 系统的最优带宽和功率分配策略。理论分析和系统仿真表明, 该文所提出的资源分配策略, 比平均分配的资源方案具有更大的信道容量。另外, 该文的最优资源分配策略适用于具有多个中继节点的无线中继网络, 具有普适性。

**关键词:** 分布式空时码; 信道容量; 凸优化; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0027-05

## The Channel Capacity and Resource Allocation Scheme for Distributed Alamouti Space-Time Code

Zhong Zhi-meng Ren Pin-yi Zhu Shi-hua Lü Gang-ming

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In this paper, the channel capacity and the optimal resource allocation scheme for Distributed Alamouti Space-Time Code based on Decode-and-Forward (DF-DASTC) protocol are investigated. Using the degraded relay channel model, the channel capacity of DF-DASTC under fading channels is derived. To maximize the capacity of DF-DASTC, the closed-formed analytical expression of the optimal power allocation scheme with fixed bandwidth allocation is derived for DF-DASTC. Based on the convex optimization theory, the multi-objective optimization issue to maximize the capacity of DF-DASTC is converted into the general single objective optimization problem, and the optimal resource allocation scheme with variable bandwidth allocation is derived. Both theoretical analysis and simulations show that the resource allocation scheme can significantly increase the channel capacity of DF-DASTC. Moreover, the resource allocation scheme is a generalized method, which can be used in wireless relay networks with multiple relay nodes.

**Key words:** Distributed Space-Time Code(DSTC); Channel capacity; Convex optimization; Resource allocation

### 1 引言

在无线通信系统中, 信道衰落是导致通信质量下降的重要因素, 利用时间、频率和空间上的分集可以抑制或减小信道衰落对接收信号的影响。文献[1]提出了一种新颖的分集方法, 即信源节点利用无线网络中其他节点作为中继节点协作发送数据。文献[2]称这种分集方法为协作分集。文献[3]则针对多个中继节点的场景, 提出了基于分布式空时码(DSTC)的协作分集协议。针对文献[1]中的译码转发协议, 文献[4]提出了基于译码转发协议的分布式 Alamouti 空时码 (DF-DASTC) 方案, 但并未对 DF-DASTC 的信道容量进行深入研究。文献[5-9], 对无线中继网络的功率以及带宽分配进行

了研究。其中, 文献[5]研究了仅有一个采用放大转发协议<sup>[1]</sup>的中继节点时, 信源节点和中继节点的功率分配问题。文献[6]研究了采用多个使用放大转发协议的中继节点时, 各个中继节点的功率分配问题。文献[7]研究了高斯正交中继信道下, 中继节点采用译码转发协议时的最优带宽分配, 但并未考虑带宽和功率的联合分配。文献[8,9]利用信号检测理论中的极小极大准则, 解决了仅有一个采用译码转发协议的中继节点的无线中继网络的带宽和功率联合分配的优化问题, 但该方法仅适用于采用一个中继节点的场景。

本文首先利用退化中继信道模型, 得到了 DF-DASTC 系统在衰落信道下的信道容量闭式解, 并利用凸优化理论, 将 DF-DASTC 信道容量最大化这一多目标优化问题转化为单目标凸优化问题, 从而求得了 DF-DASTC 系统的带宽和功率的最优联合分配策略。应用本文所提出的资源分配方案, 可以获得比平均分配带宽和功率的方案具有更大的信道

2007-06-18 收到, 2007-11-05 改回

国家自然科学基金(60372055), 博士点基金(20030698027)和国家高技术研究发展计划(2006AA01Z262) 资助课题

容量。与文献[8,9]相比,本文所设计的资源分配策略不仅可以应用于仅有一个中继节点的无线中继网络,还可以应用于具有多个中继节点的无线中继网络,具有普适性。

## 2 系统模型和 DF-DASTC 的信道容量

对于单中继节点的协作分集场景<sup>[4]</sup>,如图1中所示。

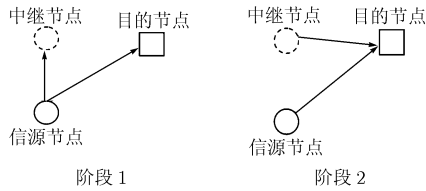


图1 TDD模式的DF-DASTC工作流程

在阶段1中,仅信源节点发送数据,此时目的节点在阶段1接收到的信号为

$$Y_3^{(1)} = h_{sd}\sqrt{P_s^{(1)}}X_1^{(1)} + z_1 \quad (1)$$

其中  $X_1^{(1)}$  为信源节点在阶段1发送的信号;  $P_s^{(1)}$  为信源节点在阶段1的发射功率;  $z_1$  是信源节点与目的节点之间的功率谱密度为  $N_0/2$  的加性复高斯白噪声;  $h_{sd}$  表示信源与目的节点之间的信道衰落系数。

中继节点在阶段1接收到的信号为

$$Y_{12}^{(1)} = h_{sr}\sqrt{P_s^{(1)}}X_1^{(1)} + z_2 \quad (2)$$

其中  $z_2$  是信源节点与中继节点之间的功率谱密度为  $N_0/2$  的加性复高斯白噪声;  $h_{sr}$  表示信源与中继节点之间的信道衰落系数。

在阶段2中,信源节点和中继节点同时发送数据,此时目的节点的接收信号为

$$Y_3^{(2)} = h_{sd}\sqrt{P_s^{(2)}}X_1^{(2)} + h_{rd}\sqrt{P_r^{(2)}}X_2^{(2)} + z_1 + z_3 \quad (3)$$

其中  $X_1^{(2)}$  和  $X_2^{(2)}$  分别为信源节点和中继节点在阶段2发送的信号;  $P_s^{(2)}$  和  $P_r^{(2)}$  分别为信源节点以及中继节点在阶段2的发射功率;  $z_3$  是中继节点与目的节点之间的功率谱密度为  $N_0/2$  的加性复高斯白噪声;  $h_{rd}$  表示中继与目的节点之间的信道衰落系数。  $h_{sr}$ ,  $h_{sd}$  和  $h_{rd}$  包含了信道的大尺度衰落和小尺度非频率选择性衰落<sup>[6]</sup>。根据文献[1],将  $h_{ij}$  建模为零均值方差为  $\sigma_{ij}^2$  的复高斯分布,且  $\sigma_{ij}^2 \propto d_{ij}^{-\alpha}$ ,其中  $d_{ij}$  为节点  $i$  和  $j$  的距离,  $\alpha$  为路径损耗指数<sup>[1]</sup>。本文假设发射机与接收机均已知信道状态信息,亦即已知  $h_{sr}$ ,  $h_{sd}$  和  $h_{rd}$ ,于是信源节点和中继节点可以根据信道状态信息对资源进行合理分配<sup>[6]</sup>。

若系统带宽为  $W(\text{Hz})$ ,则总信道资源为  $2W$  维数/秒<sup>[7]</sup>。设阶段1和阶段2所占的时间比例分别为  $\alpha$  和  $1-\alpha$ ,其中  $0 < \alpha < 1$ 。那么,阶段1和阶段2所占信道资源分别为  $2\alpha W$  维数/秒和  $2(1-\alpha)W$  维数/秒<sup>[7]</sup>。因此,阶段1和阶段2的信噪比可以表示为  $P/(\alpha N_0 W)$  和  $P/[(1-\alpha)N_0 W]$ <sup>[7]</sup>,其中  $P$  为发射功率。定义  $N_0 W = \tilde{N}$ 。由于  $\alpha$  的大小表征了传输协

议中阶段1和阶段2所占的信道带宽资源,因此本文称  $\alpha$  为带宽分配参数。

基于上述系统模型,并假设中继节点比目的节点距离信源节点要近,故其信道模型属于退化中继信道模型<sup>[10,11]</sup>。因此,DF-DASTC的信道容量闭式解即为退化“便宜”中继信道<sup>[11]</sup>信道容量表达式。根据条件互信息和条件熵的定义<sup>[12]</sup>,DF-DASTC信道容量闭式解为

$$C_{av}^{\text{DF}} = \min\{C^{(1)}, C^{(2)}\} \quad (4)$$

其中  $C^{(1)}, C^{(2)}$  分别为

$$C^{(1)} = \alpha \log_2 \left( 1 + |h_{sr}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right) + (1-\alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha)\tilde{N}} \right) \quad (5a)$$

$$C^{(2)} = \alpha \log_2 \left( 1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right) + (1-\alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)} + |h_{rd}|^2 P_r^{(2)}}{2(1-\alpha)\tilde{N}} \right) \quad (5b)$$

## 3 基于信道容量最大化的 DF-DASTC 资源分配策略

通过在信源节点和中继节点之间的最优功率和带宽资源的联合分配,使得DF-DASTC信道容量达到最大的最优化问题,属于多目标优化问题。本节将给出以DF-DASTC信道容量最大化为目标,两种情况下的DF-DASTC的资源分配策略。

### 3.1 固定带宽时的功率分配策略

若系统固定阶段1和阶段2所占带宽而仅进行节点间的功率分配,亦即  $\alpha$  固定,仅考虑阶段2中继及信源节点的功率分配。此时,中继节点与信源节点之间的最优功率分配策略,就是满足约束条件

$$P_s^{(2)} + P_r^{(2)} = P_T, (0 \leq P_r^{(2)}, P_s^{(2)} \leq P_T) \quad (6)$$

的优化问题

$$\min_{P_s^{(2)}, P_r^{(2)}} \left[ \max\{-C^{(1)}, -C^{(2)}\} \right] \quad (7)$$

其中  $P_T$  为总功率上限。

显然,  $\alpha$  固定时,  $C^{(1)}$  和  $C^{(2)}$  为以  $P_s^{(2)}$  为自变量的函数,利用  $C^{(1)}$  和  $C^{(2)}$  关于自变量  $P_s^{(2)}$  的增减性,求解式(7)可分为两种情况来进行分析。

①  $|h_{sd}|^2 - |h_{rd}|^2 \geq 0$ : 由式(5a)和式(5b)知,  $C^{(1)}$  和  $C^{(2)}$  均为  $P_s^{(2)}$  的单调增函数,此时式(7)的极小值在  $P_s^{(2)}$  最大时获得,亦即,当前信道采样时刻的最优功率分配策略为

$$\bar{P}_s^{(2)} = P_T, \bar{P}_r^{(2)} = 0 \quad (8)$$

②  $|h_{sd}|^2 - |h_{rd}|^2 < 0$ : 同理,  $C^{(1)}$  为  $P_s^{(2)}$  的单调增函数,而  $C^{(2)}$  为  $P_s^{(2)}$  的单调减函数,此时式(7)的极小值解在  $C^{(1)} = C^{(2)}$  时获得,亦即,当前信道采样时刻的最优功率分配策略满足

$$C^{(1)}(\bar{P}_s^{(2)}) = C^{(2)}(\bar{P}_s^{(2)}) \quad (9)$$

$$\bar{P}_r^{(2)} = P_T - \bar{P}_s^{(2)} \quad (10)$$

其中  $\bar{P}_r^{(2)}, \bar{P}_s^{(2)}$  应该满足  $0 \leq \bar{P}_r^{(2)}, \bar{P}_s^{(2)} \leq P_T$ ，如果式(9)和式(10)解得的解超出功率受限范围，则应取 0 或  $P_T$ 。

### 3.2 可变带宽时的资源分配策略

如果系统对阶段 1 和阶段 2 的带宽分配可变，亦即  $\alpha$  可变，那么，此时不仅需要考虑阶段 2 中的中继及信源节点的功率分配，还需要考虑阶段 1 与阶段 2 之间的带宽分配。在这种情况下，中继节点与信源节点之间的最优资源分配策略，就是满足约束条件

$$P_s^{(2)} + P_r^{(2)} = P_T, (0 \leq P_r^{(2)}, P_s^{(2)} \leq P_T), 0 < \alpha < 1 \quad (11)$$

的优化问题

$$\min_{P_s^{(2)}, P_r^{(2)}, \alpha} [\max\{-C^{(1)}, -C^{(2)}\}] \quad (12)$$

显然，在系统带宽可变时，目标函数的优化仍然属于多目标优化中的极大极小化问题。但是由于  $\alpha$  的可变，使得用普通的凸优化方法难以对此求解。为此，本文借助于多目标规划中的 min-max 法(极小-极大法)<sup>[13]</sup>，通过引入新变量  $t$  和 3 个新的约束条件，可以将式(12)这个多目标优化问题直接转化为通常的单目标凸优化问题，即

$$\min_{\alpha, P_s^{(2)}, P_r^{(2)}, t} (t) \quad (13)$$

约束条件为

$$\left. \begin{aligned} P_s^{(2)} + P_r^{(2)} &\leq P_T, (0 \leq P_r^{(2)}, P_s^{(2)} \leq P_T), \\ 0 < \alpha < 1, t &\leq 0, -C^{(1)} \leq t, -C^{(2)} \leq t \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

因为对式(12)的优化问题与式(13)的优化问题是等价的<sup>[13,14]</sup>，于是式(12)可解。根据凸优化的定义，不难证明式(13)属于凸优化问题<sup>[8,9]</sup>。本文采用非线性不等式约束下的 Lagrange 乘子法来求解式(13)。根据文献[13]，式(13)可以进一步转化为无约束优化问题

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{E}^1} (\bar{F}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}, M)) \quad (15)$$

其中

$$\bar{F}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}, M) = t + \sum_{j=1}^8 \left\{ \frac{M}{2} [h_j(\mathbf{x}) + z_j^2]^2 + \lambda_j [h_j(\mathbf{x}) + z_j^2] \right\} \quad (16)$$

自变量  $\mathbf{x} = (t, P_s^{(2)}, P_r^{(2)}, \alpha)$ ，松弛向量  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_8)$ ， $M$  为惩罚因子， $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8)$  为 Lagrange 乘子。 $h_1(\mathbf{x}) = \alpha - 1$ ， $h_2(\mathbf{x}) = -\alpha$ ， $h_3(\mathbf{x}) = -t$ ， $h_4(\mathbf{x}) = -t - C^{(1)}$ ， $h_5(\mathbf{x}) = -t - C^{(2)}$ ， $h_6(\mathbf{x}) = P_s^{(2)} + P_r^{(2)} - P_T$ ， $h_7(\mathbf{x}) = -P_s^{(2)}$ ， $h_8(\mathbf{x}) = -P_r^{(2)}$ 。

可变带宽时的资源分配策略是没有解析解的，但利用式(15)以及文献[13]的不等式约束下的 Lagrange 乘子法的迭代运算实现步骤，即可得到可变带宽时的最优资源分配方案。

上述的可变带宽分配时的资源分配策略同样也适用于含有多个节点的无线中继网络。假设系统中仅有一个信源节点，定义为节点 1，以及目的节点  $T$ ， $T-2$  个中继节点协助信源节点向目的节点传送数据。假设该无线中继网络采用的传输协议与图 1 相同。令信源节点和中继节点要发送数据为  $X_t, t = 1, 2, \dots, T-1$ ，各节点的发射功率为  $P_t, t = 1, 2,$

$\dots, T-1$ ，系统总功率为  $P$ ，中继节点和目的节点接收到的数据为  $Y_t, t = 2, 3, \dots, T$ ，根据文献[15,16]，中继网络信道容量的下界为

$$C \geq \max_{p(X_1, \dots, X_{T-1})} \min_{1 \leq m \leq T-1} I(X_{\pi(1:m)}; Y_{m+1} | X_{\pi(m+1:T-1)}) \quad (17)$$

其中  $\pi(\cdot)$  表示集合  $\Gamma$  的一个排列，且  $\pi(1) = 1$ ， $\pi(T) = T$ ， $\pi(i:j) = \{\pi(i), \pi(i+1), \dots, \pi(j)\}$ ，若  $i > j$ ，则  $\pi(i:j) = \emptyset$ ； $X_{\pi(i:j)}$  表示输出数据集合  $X_{\pi(i:j)} = \{X_i, X_{i+1}, \dots, X_j\}$ ； $p(X_1, \dots, X_{T-1})$  为  $X_1, \dots, X_{T-1}$  的联合概率密度。

因为在瑞利衰落信道下，各中继节点与信源节点输出的最优码簿应相互独立<sup>[15]</sup>，即联合概率密度  $p(X_1, \dots, X_{T-1}) = \prod_{i=1}^{T-1} p(X_i)$ 。因此各排列的  $\min_{1 \leq m \leq T-1} I(X_{\pi(1:m)}; Y_{m+1} | X_{\pi(m+1:T-1)})$  相等。故在瑞利衰落信道下，无线中继网络的信道容量下界可以写为

$$C \geq \min_{1 \leq m \leq T-1} I(X_{1:m}; Y_{m+1} | X_{m+1:T-1}) \quad (18)$$

其中  $X_{i:j} = X_i, \dots, X_j$ ， $1 \leq i \leq T-1$ ， $2 \leq j \leq T$ ，如果  $i = T-1$ ， $j = T$ ， $X_{i:j} = \emptyset$ 。

根据图 1 的 TDD 传输协议，无线中继网络的信道容量下界又可以写为

$$\begin{aligned} C \geq \min_{1 \leq m \leq T-1} & \alpha I(X_1^{(1)}; Y_{m+1}^{(1)}) \\ & + (1-\alpha) I(X_{1:m}^{(2)}; Y_{m+1}^{(2)} | X_{m+1:T-1}^{(2)}) \end{aligned} \quad (19)$$

文献[8,9]所提出的方法在具有多个中继的无线中继网络中是无法使用的，它仅适用于具有单个中继节点的情况，因为它仅能解决两个目标函数的极大极大值问题。利用本节所提出的资源分配策略并根据 TDD 传输协议，以无线中继网络的信道容量下界最大化为目标，对无线中继节点和信源节点的功率以及带宽的最优分配，可以转化成约束条件为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{T-1} P_i &\leq P, 0 < \alpha < 1, t \leq 0 \\ -\alpha I(X_1^{(1)}; Y_{m+1}^{(1)}) - (1-\alpha) I(X_{1:m}^{(2)}; Y_{m+1}^{(2)} | X_{m+1:T-1}^{(2)}) &\leq t \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

的单目标凸优化问题

$$\min_{\alpha, P_1, P_2, \dots, P_{T-1}, t} (t) \quad (21)$$

其中  $P_i, i = 1, \dots, T-1$  为信源节点与各中继节点的发射功率， $P$  为系统总功率， $1 \leq m \leq T-1$ 。

同理，式(21)的优化问题可以进一步转换为无约束问题

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{E}^{T+1}} (\bar{F}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}, M)) \quad (22)$$

其中

$$\bar{F}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\lambda}, M) = t + \sum_{j=1}^{T+3} \left\{ \frac{M}{2} [h_j(\mathbf{x}) + z_j^2]^2 + \lambda_j [h_j(\mathbf{x}) + z_j^2] \right\} \quad (23)$$

自变量  $\mathbf{x} = (t, P_1, \dots, P_{T-1}, \alpha)$ ，松弛向量  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_{T+3})$ ， $M$  为惩罚因子， $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{T+2})$  为 Lagrange 乘子。

$h_1(\mathbf{x}) = \alpha - 1$ ， $h_2(\mathbf{x}) = -\alpha$ ， $h_3(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{T-1} P_i - P$ ， $h_4(\mathbf{x}) = -t$ ， $h_{m+4}(\mathbf{x}) = -t - \alpha I(X_1^{(1)}; Y_{m+1}^{(1)}) - (1-\alpha) I(X_{1:m}^{(2)}; Y_{m+1}^{(2)})$

$[X_{m+1:T-1}^{(2)}]$ ,  $m = 1, \dots, T-1$ 。

同理, 利用式(22)以及文献[13]的不等式约束下的Lagrange 乘子法的迭代运算实现步骤, 即可得到可变带宽时的最优资源分配方案。

#### 4 仿真实验和结果

本节通过仿真实验来验证本文所提出的资源分配策略对 DF-DASTC 信道容量的影响。图 2 给出了 DF-DASTC 采用不同的 4 种资源分配策略时, DF-DASTC 的各态历经信道容量曲线, 该结果采用 100000 个信道样本作统计平均得到, 且信道衰落  $h_{sd}$  和  $h_{rd}$  的方差均为 1,  $h_{sr}$  的方差为 10 以表明中继节点距离信源节点较近<sup>[1,6]</sup>。图 2 中, 资源平均分配对应于  $\alpha=0.5$ , 中继节点与信源节点等功率分配所得的 DF-DASTC 的各态历经信道容量; 本文的最优功率分配对应于  $\alpha=0.5$ , 采用本文的最优功率分配的闭式解所得的 DF-DASTC 的各态历经信道容量。从图 2 可以看出, 若仅对中继节点和信源节点的功率进行最优分配, 在高信噪比情况下, 比平均分配资源时的信道容量提高约 0.1bps/Hz。若采用本文的带宽和功率最优联合分配时, DF-DASTC 的信道容量有显著提高, 在高信噪比情况下, 其比平均分配资源时的信道容量高约 1bps/Hz。另外, 由图 2 可知, 利用本文的带宽和功率分配优化方法与利用文献[8,9]的基于极小极大准则的功率和带宽联合分配方法所获得的增益是相同的。

图 3 给出了资源平均分配和利用本文的带宽和功率资源分配策略时, 具有 2 个中继节点的无线中继网络在两种场景下的信道容量下界。其中, 场景 1 为信源节点与中继节点 1, 2 间信道的方差分别为 10 和 5 的情况, 对应于中继与信源之间距离较近; 场景 2 为信源节点与中继节点 1、中继节点 2 间信道的方差分别为 5 和 2.5 的情况, 对应于中继与信源之间距离较远。由图 3 可以看出, 在不同场景下, 采用本文提出的资源分配优化方法相比资源平均分配方案, 均能使信道容量下界得到显著提高。而在该多节点无线中继网络场景下, 文献[8,9]的资源分配方法无法使用。从图 3 还可看出, 当中继节点与信源节点之间距离变远时, 无线中继网络的信道容量下界降低。

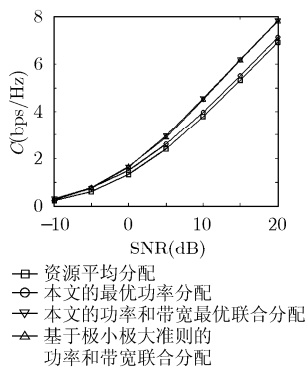


图 2 不同资源分配策略下 DF-DASTC 信道容量

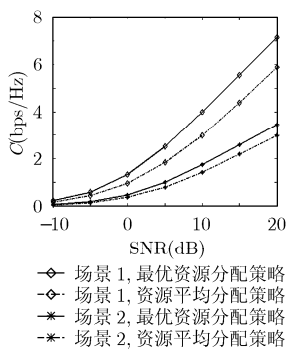


图 3 不同资源分配策略下无线中继网络的信道容量下界

#### 5 结束语

基于退化中继信道模型, 本文推导得到了单中继节点的 DF-DASTC 系统在衰落信道下的信道容量闭式解, 并对 DF-DASTC 系统在固定带宽分配时, 中继节点与信源节点最优功率分配策略进行了研究, 推导得到了 DF-DASTC 固定带宽分配时的最优功率分配方案的闭式解。利用凸优化理论, 本文进一步得到了可变带宽分配时的 DF-DASTC 系统的最优资源分配策略。将本文提出的资源分配策略应用至 DF-DASTC 系统中, 可以得到比平均资源分配方案更大的信道容量。更为重要的是, 本文得出的带宽和功率资源的联合分配策略可以应用到具有多中继节点的无线中继网络, 具有普适性。

#### 参考文献

- [1] Laneman J N, Tse D N C, and Wornell G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2004, 50 (12): 3062-3080.
- [2] 殷勤业, 张莹, 丁乐, 等. 协作分集: 一种新的空域分集技术. 西安交通大学学报[J], 2005, 39(6): 551-557.  
Yin Qinye, Zhang Ying, and Ding Le, et al. Cooperation diversity: a new spatial diversity technique [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(6): 551-557.
- [3] Laneman J N and Wornell G W. Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2003, 49(10): 2415-2425.
- [4] Scutari G and Barbarossa S. Distributed space-time coding for regenerative relay networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2005, 4(5): 2387-2399.
- [5] Deng Xinmin and Haimovich A M. Power allocation for cooperative relaying in wireless networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(11): 994-996.
- [6] Zhao Yi, Adve R, and Jim Teng Joon. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus Selection [C]. *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Seattle, USA, Jul 2006: 1234-1238.
- [7] Liang Yingbin and Veeravalli V V. Gaussian orthogonal relay channels: optimal resource allocation and capacity [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2005, 51(9): 3284-3289.
- [8] Liang Yingbin and Veeravalli V V. Resource allocation for wireless relay channels [C]. *Proceeding of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, USA, Nov. 2004: 1902-1906.
- [9] Liang Yingbin, Veeravalli V V, and Vincent P H. Resource allocation for wireless Relay channels: max-min solutions [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2007, 53(10): 3413-3431.

- [10] Cover T M and Gamal A A E. Capacity theorems for the relay channel [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1979, 25(5): 572-584.
- [11] Khojastepour M A, Sabharwal A, and Aazhang B. On capacity of Gaussian 'cheap' relay channel [C]. IEEE Globecom, San Francisco, USA, 2003: 1776-1780.
- [12] Cover T M, Thomas J A, 阮吉寿, 张华. 信息论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 348-354.
- [13] 张可村. 工程优化的算法与分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987: 235-380.
- [14] Boyd S and Vandenberghe L. Convex optimization [M]. London: Cambridge University Press, 2004: 128-135.
- [15] Kramer G, Gupta P, and Gastpar M. Information-theoretic multi-hopping for relay networks [C]. 2004 International Zurich Seminar on Communications, Zurich, Switzerland, 2004: 192-195.
- [16] Xie Liangliang and Kumar P R. An achievable rate for the multiple-level relay channel [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2005, 51(4): 1348-1358.
- 种稚萌: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为移动通信系统及其信号处理技术.
- 任品毅: 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为移动通信.
- 朱世华: 男, 1950 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 西安交通大学副校长, 长期从事数字通信系统、移动通信及个人通信系统的研究.
- 吕刚明: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为移动通信中的资源管理技术.