

分布式 Alamouti 空时码的信道容量分析

种稚萌, 朱世华, 吕刚明

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对分布式 Alamouti 空时码(DASTC)系统的信道容量求解问题,提出了一种求解 DASTC 系统的信道容量闭式解及其上界的方法. 该方法根据 DASTC 系统利用多节点联合发送信息的特点,选择距离信源节点最近的空闲节点作为中继节点构建了 DASTC 系统的无线中继信道模型,采用网络信息论中的最大流最小割定理,将 DASTC 信道模型分为广播信道模型和多接入信道模型,通过计算得到基于译码转发协议和基于放大转发协议的 DASTC 系统在固定衰落信道以及随机衰落信道下的信道容量闭式解及其上界. 该方法可有效分析采用不同协议时的 DASTC 系统的信道容量变化. 仿真结果表明,与采用香农定理的直接传输系统的信道容量相比,在高信噪比时,利用该方法所得的基于译码转发协议的 DASTC 系统和基于放大转发协议的 DASTC 系统的信道容量分别提高了 $1 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 和 $0.4 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$.

关键词: 信道容量; 分布式空时码; 中继

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)08-0969-05

Channel Capacity Analysis of Distributed Alamouti Space-Time Code

Zhong Zhimeng, Zhu Shihua, Lü Gangming

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

Abstract: Focusing on the solution of the channel capacity for distributed Alamouti space-time code (DASTC) system, a novel method to derive the upper bound and the closed-form solution of the channel capacity for DASTC is proposed. Choosing the idle node closest to source node as relay node and utilizing the characteristic of DASTC that multiple nodes transmit information cooperatively, the wireless relay channel model is established for DASTC system. Using the max-flow min-cut theorem in network information theory, this method divides the channel model of DASTC into broadcast channel model and multiple access channel model. Sequentially, the upper bound of channel capacity and the achievable channel capacity of DASTC under fixed fading channels and random fading channels are derived. The channel capacity of DASTC based on different protocols can be effectively analyzed. The simulation results show that the channel capacity of DASTC based on decode-and-forward protocol and the channel capacity of DASTC based on amplify-and-forward protocol, which are obtained by the proposed method, are superior to Shannon channel capacity of the direct transmission, and are increased by $1 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ and $0.4 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ at high SNR, respectively.

Keywords: channel capacity; distributed space-time code; relay

在无线通信网络中,利用在时间、频率、空间上的分集方法可以减轻信道衰落给接收信号带来的影

响. 文献[1-2]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[3]称这种分集方法为协作分集.针对文献[1]中的译码转发协议,文献[4-5]利用 Alamouti 满速率正交空时分组码,分别提出了基于译码转发的分布式 Alamouti 空时码(DF-DASTC)方案和基于放大转发的 Alamouti 分布式空时码(AF-DASTC)方案,但均未对 DF-DASTC 和 AF-DASTC 的信道容量进行深入研究.文献[6-9]等对无线中继信道以及协作分集的信道容量进行了研究,但并未对 DF-DASTC 和 AF-DASTC 的信道容量进行研究.

本文利用网络信息论中的最大流最小割原理^[9-10]以及分布式空时码系统的特点,分别推导得到了单中继节点场景下 DF-DASTC 和 AF-DASTC 在固定衰落信道和随机衰落信道下的信道容量及其上界的闭式解.并通过对 DF-DASTC 和 AF-DASTC 的各态历经信道容量进行数值仿真,对 DF-DASTC 和 AF-DASTC 的特点以及最优中继节点的选择进行了分析.理论分析和数值仿真结果表明,相比信源与目的节点之间的直接传输,分布式 Alamouti 空时编码可以大大提高信道容量.

1 系统模型

单中继节点分布式空时码的工作流程^[4]如图1所示.

在图1a所示的阶段1中,仅信源节点发送数据,目的节点在阶段1接收到的信号为

$$Y_3^{(1)} = h_{sd}(P_s^{(1)})^{1/2} X_1^{(1)} + z_1 \quad (1)$$

式中: $X_1^{(1)}$ 为信源节点在阶段1发送的信号,且 $X_1^{(1)} \sim N(0, 1)^{[9]}$; $P_s^{(1)}$ 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,本文将信道衰落系数分为两种情况,即固定衰落信道和随机衰落信道.

中继节点在阶段1接收到的信号为

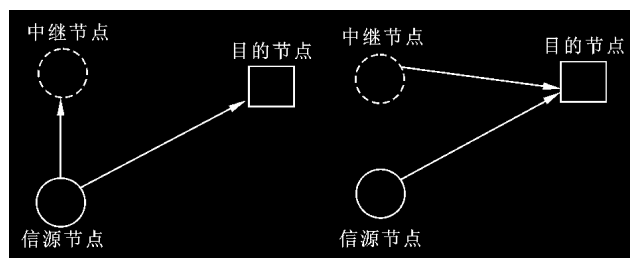
$$Y_{12}^{(1)} = h_{sr}(P_s^{(1)})^{1/2} X_1^{(1)} + z_2 \quad (2)$$

式中: 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.

在图1b所示的阶段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

$$Y_3^{(2)} = h_{sd}(P_s^{(2)})^{1/2} X_1^{(2)} + h_{rd}(P_r^{(2)})^{1/2} X_2^{(2)} + z_1 + z_3 \quad (3)$$

式中: $X_1^{(2)}$ 和 $X_2^{(2)}$ 分别为信源节点和中继节点在阶



(a)阶段1

(b)阶段2

图1 TDD模式的DASTC工作流程

段2发送的信号,且 $X_1^{(2)}, X_2^{(2)} \sim N(0, 1)^{[9]}$; $P_s^{(2)}$ 和 $P_r^{(2)}$ 分别为信源节点以及中继节点在阶段2时的发射功率; 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.

设系统带宽为 W ,则总信道资源为 $2W^{[11]}$.设阶段1和阶段2所占的时间比例分别为 α 和 $1-\alpha$,且 $0 < \alpha < 1$.那么,阶段1和阶段2所占信道资源分别为 2α 和 $2(1-\alpha)W^{[11]}$.因此,阶段1和阶段2的信噪比可以表示为 $P/(\alpha N_0 W)$ 和 $P/[(1-\alpha) \cdot N_0 W]^{[11]}$, P 为发射功率.定义 $N_0 W = \tilde{N}$.本文选择距离信源节点比目的节点近的无线节点作为中继节点,且仅接收机已知信道状态信息.

2 固定衰落信道下 DASTC 的信道容量及其上界

2.1 DF-DASTC 的信道容量及其上界

根据文献[9-10]给出的最大流最小割定理,DF-DASTC的信道容量上界由图2中的广播信道和多接入信道两部分组成,可以表示为^[9]

$$C_{up}^{DF} = \sup_{p(x_1, x_2)} \min\{I(X_1, Y_3, Y_{12} | X_2), I(X_1, X_2, Y_3)\} \quad (4)$$

式中: X_1, X_2 分别为信源节点和中继节点所发送的信号; Y_{12} 为中继节点所接收的信号; Y_3 为目的节点所接收的信号.

根据图1的分布式空时码的工作流程,DF-DASTC的信道容量上界(即公式(4))可表示为^[6]

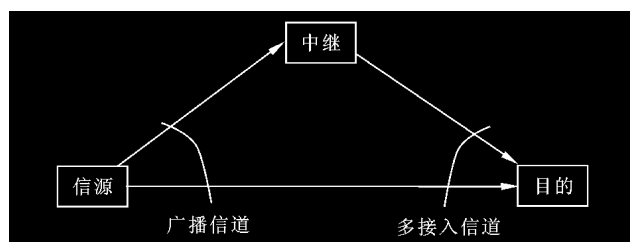


图2 中继信道模型

$$C_{\text{up}}^{\text{DF}} = \sup_{p(x_1, x_2)} \min \{ \alpha I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}, Y_{12}^{(1)}) + (1-\alpha) I(X_1^{(2)}; Y_3^{(2)} | X_2^{(2)}), \alpha I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}) + (1-\alpha) I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)}) \} \quad (5)$$

式中

$$I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}, Y_{12}^{(1)}) = \text{lb} \left[1 + (|h_{\text{sr}}|^2 + |h_{\text{sd}}|^2) \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] \quad (6)$$

$$I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}) = \text{lb} \left[1 + |h_{\text{sd}}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] \quad (7)$$

由条件互信息和条件熵的定义^[10]及二维正态分布的条件期望表达式,式(5)中的 $I(X_1^{(2)}; Y_3^{(2)} | X_2^{(2)})$ 为

$$I(X_1^{(2)}; Y_3^{(2)} | X_2^{(2)}) = \text{lb} \left[1 + \frac{(1-\rho^2) |h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha)\tilde{N}} \right] \quad (8)$$

式中: $\rho = E(X_1^{(1)} X_2^{(2)})$, $0 \leq \rho \leq 1$.

由文献^[10]中的定理以及 Cauchy-Schwartz 不等式,式(5)中的 $I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)})$ 可以写为

$$I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)}) = \text{lb} \{ 1 + [|h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)} + |h_{\text{rd}}|^2 P_r^{(2)} + 2|h_{\text{sd}}||h_{\text{rd}}|\rho(P_s^{(2)} P_r^{(2)})^{1/2}] / [2(1-\alpha)\tilde{N}] \} \quad (9)$$

将式(6)~式(9)代入式(5),可得

$$C_{\text{up}}^{\text{DF}} = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \min \{ C_{\text{up}}^{(1)}(\rho), C_{\text{up}}^{(2)}(\rho) \} \quad (10)$$

式中

$$C_{\text{up}}^{(1)}(\rho) = \alpha \text{lb} \left[1 + (|h_{\text{sr}}|^2 + |h_{\text{sd}}|^2) \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{(1-\rho^2) |h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha)\tilde{N}} \right] \quad (11)$$

$$C_{\text{up}}^{(2)}(\rho) = \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{\text{sd}}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + (1-\alpha) \text{lb} \{ 1 + [|h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)} + |h_{\text{rd}}|^2 P_r^{(2)} + 2|h_{\text{sd}}||h_{\text{rd}}|\rho(P_s^{(2)} P_r^{(2)})^{1/2}] / [2(1-\alpha)\tilde{N}] \} \quad (12)$$

因为 $C_{\text{up}}^{(1)}(\rho)$ 为 ρ 的减函数, $C_{\text{up}}^{(2)}(\rho)$ 为 ρ 的增函数,所以:若 $C_{\text{up}}^{(1)}(0) \leq C_{\text{up}}^{(2)}(0)$, 则 $C_{\text{up}}^{\text{DF}} = C_{\text{up}}^{(1)}(0)$; 若 $C_{\text{up}}^{(1)}(0) > C_{\text{up}}^{(2)}(0)$, 则 $C_{\text{up}}^{\text{DF}} = C_{\text{up}}^{(1)}(\bar{\rho})$, 其中 $\bar{\rho}$ 可以通过 $C_{\text{up}}^{(1)}(\bar{\rho}) = C_{\text{up}}^{(2)}(\bar{\rho})$ 解得.

分布式空时编码技术是利用多个节点联合编码发送信息^[2], 而且本文假设中继节点比目的节点距离信源节点要近, 其信道模型属于退化中继信道模

型^[9]. 因此, DF-DASTC 的信道容量闭式解为退化“便宜”中继信道^[12]的信道容量表达式

$$C_{\text{av}}^{\text{DF}} = \sup_{p(x_1, x_2)} \min \{ \alpha I(X_1^{(1)}; Y_{12}^{(1)}) + (1-\alpha) I(X_1^{(2)}; Y_3^{(2)} | X_2^{(2)}), \alpha I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}) + (1-\alpha) I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)}) \} \quad (13)$$

由式(8)、式(9)即得 DF-DASTC 的信道容量闭式解为

$$C_{\text{av}}^{\text{DF}} = \max_{0 \leq \rho \leq 1} \min \{ C_{\text{av}}^{(1)}(\rho), C_{\text{av}}^{(2)}(\rho) \} \quad (14)$$

式中

$$C_{\text{av}}^{(1)}(\rho) = \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{\text{sr}}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{(1-\rho^2) |h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha)\tilde{N}} \right] \quad (15)$$

$$C_{\text{av}}^{(2)}(\rho) = \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{\text{sd}}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + (1-\alpha) \text{lb} \{ 1 + [|h_{\text{sd}}|^2 P_s^{(2)} + |h_{\text{rd}}|^2 P_r^{(2)} + 2|h_{\text{sd}}||h_{\text{rd}}|\rho(P_s^{(2)} P_r^{(2)})^{1/2}] / [2(1-\alpha)\tilde{N}] \} \quad (16)$$

因为 $C_{\text{av}}^{(1)}(\rho)$ 为 ρ 的减函数, $C_{\text{av}}^{(2)}(\rho)$ 为 ρ 的增函数, 所以:若 $C_{\text{av}}^{(1)}(0) \leq C_{\text{av}}^{(2)}(0)$, 则 $C_{\text{av}}^{\text{DF}} = C_{\text{av}}^{(1)}(0)$; 若 $C_{\text{av}}^{(1)}(0) > C_{\text{av}}^{(2)}(0)$, 则 $C_{\text{av}}^{\text{DF}} = C_{\text{av}}^{(1)}(\bar{\rho})$, 其中 $\bar{\rho}$ 可以通过 $C_{\text{av}}^{(1)}(\bar{\rho}) = C_{\text{av}}^{(2)}(\bar{\rho})$ 解得.

2.2 AF-DASTC 的信道容量及其上界

在 AF-DASTC 系统中, 中继节点不需要对接收数据进行译码以及再编码. 因此, AF-DASTC 的信道容量上界仅由图 2 中的多接入信道决定. 根据图 1 中 DASTC 的工作流程, AF-DASTC 的信道容量上界为

$$C_{\text{up}}^{\text{AF}} = \sup_{p(x_1, x_2)} (\alpha I(X_1^{(1)}; Y_3^{(1)}) + (1-\alpha) I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)})) \quad (17)$$

式中: $X_2^{(2)}$ 为中继节点将接收到的数据进行功率放大后再发送的数据, 可以写为

$$X_2^{(2)} = \beta Y_{12}^{(1)} = \beta (h_{\text{sr}} (P_s^{(1)})^{1/2} X_1^{(1)} + z_2) \quad (18)$$

中继放大系数 β 满足 $\beta \leq \left[\frac{P_r^{(2)}}{|h_{\text{sr}}|^2 P_s^{(1)} + \alpha \tilde{N}} \right]^{1/2}$.

将式(16)代入 $I(X_1^{(2)}, X_2^{(2)}; Y_3^{(2)})$, 根据文献^[13]中的定理以及 Cauchy-Schwartz 不等式, AF-DASTC 的信道容量为

$$C_{\text{av}}^{\text{AF}} = \alpha \text{lb} \left(1 + |h_{\text{sd}}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right) + (1-\alpha) \text{lb} \{ 1 + \dots \}$$

$$\begin{aligned} & [|h_{sd}|^2 P_s^{(2)} + \beta^2 |h_{rd}|^2 |h_{sr}|^2 P_s^{(1)} + \\ & 2\rho_{AF}\beta |h_{sd}| |h_{rd}| |h_{sr}| (P_s^{(2)} P_s^{(1)})^{1/2}] / \\ & [2(1-\alpha) \tilde{N} + \beta^2 |h_{rd}|^2 \alpha \tilde{N}] \} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\rho_{AF} = E(X_1^{(2)} X_1^{(1)})$, $0 \leq \rho_{AF} \leq 1$.

当 $\rho_{AF} = 1$ 时, AF-DASTC 信道容量上界为

$$\begin{aligned} C_{up}^{AF} &= \alpha \text{lb} \left(1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right) + (1-\alpha) \text{lb} \{ 1 + \\ & [|h_{sd}| (P_s^{(2)})^{1/2} + \beta |h_{rd}| |h_{sr}| (P_s^{(1)})^{1/2}]^2 / \\ & [2(1-\alpha) \tilde{N} + \beta^2 |h_{rd}|^2 \alpha \tilde{N}] \} \end{aligned} \quad (20)$$

3 随机衰落信道下 DASTC 的各态历经信道容量及其上界

在随机衰落信道下, 令 h_{sd} 、 h_{sr} 、 h_{rd} 服从均值为 0、方差分别为 σ_{sd}^2 、 σ_{sr}^2 、 σ_{rd}^2 的复高斯分布. 根据文献 [12], 在发射机未知信道状态信息的情况下, 最优的中继输出码薄 X_2 应当与信源输出的码薄 X_1 相互独立^[12], 即式(10)、式(15)和式(20)中的 ρ 和 ρ_{AF} 等于 0. 因此, 随机衰落信道下 DF-DASTC 的各态历经信道容量上界为

$$\bar{C}_{up}^{DF} = E_H \{ \min \{ C_{up}^{(3)}, C_{up}^{(4)} \} \} \quad (21)$$

式中: $E_H \{ \}$ 表示求期望;

$$\begin{aligned} C_{up}^{(3)} &= \alpha \text{lb} \left[1 + (|h_{sr}|^2 + |h_{sd}|^2) \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + \\ & (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha) \tilde{N}} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} C_{up}^{(4)} &= \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + \\ & (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)} + |h_{rd}|^2 P_r^{(2)}}{2(1-\alpha) \tilde{N}} \right] \end{aligned} \quad (23)$$

DF-DASTC 的各态历经信道容量为

$$\bar{C}_{av}^{DF} = E_H \{ \min \{ C_{av}^{(3)}, C_{av}^{(4)} \} \} \quad (24)$$

式中

$$\begin{aligned} C_{av}^{(3)} &= \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{sr}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + \\ & (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)}}{2(1-\alpha) \tilde{N}} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} C_{av}^{(4)} &= \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + \\ & (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)} + |h_{rd}|^2 P_r^{(2)}}{2(1-\alpha) \tilde{N}} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

同理, 随机衰落信道下 AF-DASTC 的各态历经信道容量为

$$\begin{aligned} \bar{C}_{av}^{AF} &= E_H \left\{ \alpha \text{lb} \left[1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right] + (1-\alpha) \cdot \right. \\ & \left. \text{lb} \left[1 + \frac{|h_{sd}|^2 P_s^{(2)} + \beta^2 |h_{rd}|^2 |h_{sr}|^2 P_s^{(1)}}{2(1-\alpha) \tilde{N} + \beta^2 |h_{rd}|^2 \alpha \tilde{N}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

AF-DASTC 的各态历经信道容量上界为

$$\begin{aligned} \bar{C}_{up}^{AF} &= E_H \left\{ \alpha \text{lb} \left(1 + |h_{sd}|^2 \frac{P_s^{(1)}}{\alpha \tilde{N}} \right) + (1-\alpha) \text{lb} \left[1 + \right. \right. \\ & \left. \left. (|h_{sd}| (P_s^{(2)})^{1/2} + \beta |h_{rd}| |h_{sr}| (P_s^{(1)})^{1/2})^2 / \right. \right. \\ & \left. \left. (2(1-\alpha) \tilde{N} + \beta^2 |h_{rd}|^2 \alpha \tilde{N}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

4 数值仿真与讨论

对 DF-DASTC 和 AF-DASTC 的各态历经信道容量及其上界进行数值仿真计算, 采用 100 000 个信道样本作统计平均得到 DF-DASTC 和 AF-DASTC 在随机衰落信道下的各态历经信道容量及其上界. 令 $\alpha = 0.5$, 随机信道衰落 h_{sd} 、 h_{sr} 、 h_{rd} 分别为服从均值为 0 的复高斯分布, h_{sd} 和 h_{rd} 的方差均为 1, 而 h_{sr} 的方差大于 1, 以表明中继节点比目的节点距离信源节点更近^[14].

图 3 给出了 h_{sr} 的方差 σ_{sr}^2 分别取 100 和 5 时, DF-DASTC 和 AF-DASTC 的各态历经信道容量及其上界. 图 3 中的直接传输表示信源节点不借助中继节点而直接向目的节点传输数据的情况. 从图 3 可以看出, 采用分布式空时码可以获得比直接传输更高的信道容量, AF-DASTC 的信道容量以及上界均分别低于 DF-DASTC 的信道容量及其上界. 对比图 3a 和图 3b 可以发现, h_{sr} 的方差降低, 即中继节点与信源节点的距离变远时, DF-DASTC 和 AF-DASTC 的信道容量均有所下降, 但 DF-DASTC 的信道容量下降幅度比 AF-DASTC 更大.

5 结 论

本文对单中继节点的 DF-DASTC 和 AF-DASTC 系统的信道容量进行了研究, 推导得到了单中继节点场景下, DF-DASTC 和 AF-DASTC 系统在固定衰落信道以及随机衰落信道下的信道容量及其上界. 理论分析和数值仿真表明, 采用分布式空时码可以大大提高系统的信道容量, 并且 DF-DASTC 的信道容量高于 AF-DASTC, 但 DF-DASTC

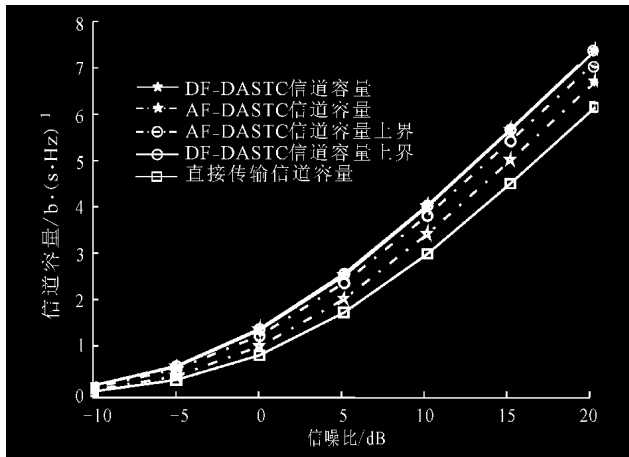
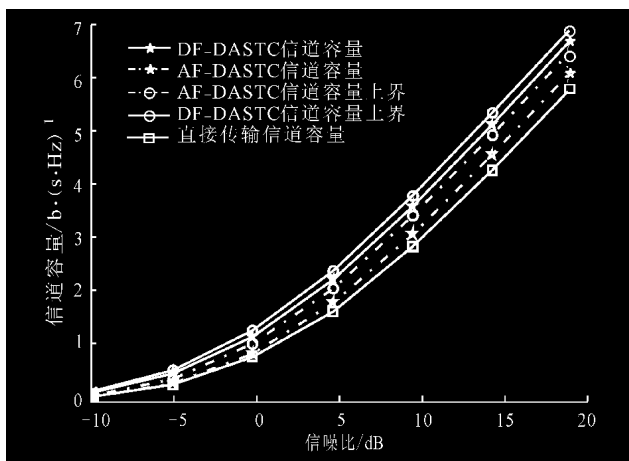
(a) $\sigma_{sr}^2=100$ (b) $\sigma_{sr}^2=5$

图3 2种传输模式的各态历经信道容量及其上界

对中继节点的选择要比 AF-DASTC 挑剔. 另外, 为了提高分布式空时码系统的信道容量, 应该尽量选择靠近信源节点的空闲节点作为中继节点. 利用本文得到的 DF-DASTC 和 AF-DASTC 信道容量及其上界, 以及两者在不同信道环境下的信道容量的分析与比较, 可以帮助系统结合信道环境选择最优的协作模式.

参考文献:

- [1] Laneman J N, Tse D N C, 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] Laneman J N, 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.

- [3] 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.
- [4] Scutari G, Barbarossa S. Distributed space-time coding for regenerative relay networks [J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2005, 4(5): 2387-2399.
- [5] Anghel P A, Kaveh M. On the performance of distributed space-time coding systems with one and two non-regenerative relays [J]. IEEE Trans on Commun, 2006, 5(3): 682-692.
- [6] Host-Madsen A, Zhang J. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(6): 2020-2040.
- [7] Host-Madsen A, Zhang J. Capacity bounds for cooperative diversity [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 1522-1544.
- [8] Xie Liangliang, Kumar P R. An achievable rate for the multiple-level relay channel [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(4): 1348-1358.
- [9] Cover T M, Gamal A A E. Capacity theorems for the relay channel [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1979, 25(5): 572-584.
- [10] Cover T M, Thomas J A, 阮吉寿, 等. 信息论基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 348-354.
- [11] Liang Yingbin, Veeravalli V V. Gaussian orthogonal relay channels: optimal resource allocation and capacity [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(9): 3284-3289.
- [12] Khojastepour M A, Sabharwal A, Aazhang B. On capacity of Gaussian 'cheap' relay channels [C]//Proc IEEE Globecom'03. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 1776-1780.
- [13] Wang Bo, Zhang Junshan, Host-Madsen A. On the capacity of MIMO relay channels [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2005, 51(1): 29-43.
- [14] Zhao Yi, Raviraj A, Jim T J. Improving amplify-and-forward relay networks: optimal power allocation versus selection [C]//Proc IEEE ISIT. Piscataway, USA: IEEE, 2006: 1234-1238.

(编辑 刘杨)