

# 几种空时码容量对比<sup>\*</sup>)

张碧军 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘要** 贝尔实验室提出的分层空时码(layered space-time code, LSTC)主要基于空分复用思想,它的主要目的是提高系统频谱效率;而其它空时码(space-time code, STC),如空时分组码(space-time block code, STBC)、空时格码(space-time trellis code, STTC)等主要基于发射分集。它们主要利用空间分集带来的增益,包括分集增益和编码增益来对抗无线信道的各种衰落。本文从信道容量角度评估各种空时编码的性能,同时将其和相同收发天线数下多输入输出(Multiple input multiple output, MIMO)系统的信道容量进行对比。

**关键词** 分层空时码,空时码,信道容量,多输入多输出

## Capacity Comparison of Several-time Codes

ZHANG Bi-Jun ZHU Guang-Xi

(Dept. of Electronics and Information, Huazhong Univ. of Sci. & Tech. Wuhan 430074)

**Abstract** Layered space-time code(LSTC)proposed by Bell labs is mostly based on spatial multiplexing,its main object is to improve the system frequency efficiency. Yet a variety of space-time codes(STC),such as space-time block code(STBC)and space-time trellis code(STTC),are mostly based on transmit diversity. They predominantly take advantage of the gain produced by spatial diversity,including diversity gain and coding gain, to combat various fading of radio channel. This paper evaluates performance of several STC from the view of channel capacity, and at the same time, compares it with channel capacity of MIMO with the same transmit and receive antenna number.

**Keywords** Layered space-time code(LSTC), Space-time code(STC), Channel capacity, MIMO

近年来,随着移动通信的发展,移动通信服务已从支持传统语音发展到支持移动多媒体业务。移动通信面临的信道条件十分恶劣,而且只能在有限频带内传输信号<sup>[1]</sup>。因此,在给定信道带宽和传输质量要求下,如何提高传输速率或频谱效率成为近年来研究的热门课题。

贝尔实验室的 G. J. Foschini 和 M. J. Gans 通过研究发现,当接收端信噪比(signal to noise, SNR)为 21dB,若收发天线数同为 2、4 或 16 时,信道容量以 99% 的概率达到 7、19 和 88bps/Hz<sup>[2]</sup>。由此可见,相对传统单发单收(Single input single output, SISO)系统,收发两端多天线阵配置大大提高了系统频谱效率。在这种背景下诞生的空时编码技术,它集编码、调制、信号处理等于一体,通过空间维度增加换来的自由度大大提高了系统对抗衰落的能力。空时编码主要优势集中体现在提高频谱效率和改善链路质量。前者以基于空分复用思想的 LSTC 为例,后者以基于发射分集提供分集和编码增益的 STBC、STTC 等为典型代表。

本文从容量角度对两类代表性空时码:正交空时分组码(Orthogonal STBC, O-STBC)、LSTC 进行研究,同时将其和相同收发天线数下 MIMO 系统信道容量进行对比。全文第 1 节首先建立常用 MIMO 系统信道模型;第 2 节对常见系统,包括 SISO、基于接收分集单发多收(Single input multiple output, SIMO)、基于发射分集多发单收(Multiple input single output, MISO)、发射接收分集 MIMO 系统信道容量进行介绍;第 3 节从信息论角度分析了 O-STBC、LSTC 编码系统所能达到的信道容量;第 4 节对相关结论进行仿真验证;最后

归纳总结得出结论。文中 $\oplus$ 表示共轭转置, $\Gamma$ 表示转置; $*$ 表示共轭。

## 1 系统模型

假定单小区、单用户的  $M \times N$  系统,即考虑下行基站  $M$  天线发,用户  $N$  根天线收。信道平坦衰落、准静态。则用户接收信号为:

$$y = \sqrt{\frac{\rho}{M}} xH + n \quad (1)$$

(1)式中, $y \in C^{N \times 1}$ , $x \in C^{M \times 1}$ , $H \in C^{N \times M}$ , $n \in C^{N \times 1}$ , $(C^{N \times 1}$ 表示 $N \times 1$ 维复空间), $x_{ij} \{i \in [1, L], j = 1 \dots M\}$ 为复循环对称独立高斯随机变量,表示某时隙 $i$ 同时沿 $M$ 根天线发射的基带符号,平均能量归一化为 1。 $H$ 表示收发天线阵之间信道增益矩阵。则在信道平坦衰落、准静态前提下,信道为瑞利衰落信道。则在收发天线阵天线间距远大于信号半波长时, $h_{ij} \{i \in [1, M], j \in [1, N]\}$ 可看成独立同分布(independent identity distribution, i. i. d.)复高斯随机变量 $CN(0, 1)$ ,即 $h_{ij}$ 实部虚部统计独立,两者均为 0 均值,方差 1/2 的实高斯随机变量。 $n_{ij} \in CN(0, 1) \{i \in [1, L], j \in [1, N], \text{且 } E[nm^*] = I_l\}$ ,即 $n_{ij}$ 沿时间和空间维均独立。 $y$ 为接收天线阵在 $l$ 个时隙接收信号矩阵。 $\rho$ 定义为每根接收天线平均 SNR。显然,若系统发射总功率为 $P$ ,则 $P = \rho$ 。式中 $\sqrt{\frac{\rho}{M}}$ 为归一化系数,确保 $\rho$ 独立于 $M$ 。定义发射信号矩阵 $x$ 协方差矩阵 $Q = E[xx^*]$ ,则有: $E[x^*x] = E(\text{tr}[xx^*]) = \text{tr}(E[xx^*]) = \text{tr}[Q] = lM$ 。

<sup>\*</sup>基金项目:“未来移动通信系统基础理论与技术研究”(No. 60496315),国家 863(No. 2003AA12331005)。张碧军 博士研究生。

对于发射码字矩阵  $x$ , 如在  $l$  个发射时隙内共发射  $K$  个基带符号, 则码率定义为  $R=K/l$ 。据准静态假设, 信道  $H$  在  $l$  个时隙, 即  $l$  次信道使用中保持不变。

## 2 常见系统信道容量

### 1) SISO 系统信道容量

对于一个无记忆  $1 \times 1$  系统, 经典仙农容量表达式<sup>[2,3]</sup>:

$$C_{SISO, SNR=\rho} = \log_2(1 + \rho \cdot |h|^2) \quad \text{b/s/Hz} \quad (2)$$

(2)式中  $\rho$  为接收端 SNR,  $h$  为固定无线信道或随机信道某次实现的复增益。显然, 由(2)式知:  $\rho$  较大时,  $\rho$  每 3dB 增加带来信道容量 1b/s/Hz 增加, 即信道容量  $C_{SISO, SNR=\rho}$  与  $\rho$  成对数增长关系。

### 2) SIMO 系统信道容量

对于一个接收分集  $1 \times N$  系统, 信道容量表达式<sup>[2]</sup>:

$$C_{SIMO, 1 \times N, SNR=\rho} = \log_2(1 + \rho \sum_{i=1}^N |h_i|^2) \quad \text{b/s/Hz} \quad (3)$$

(3)式中  $h_i$  为发射天线与接收天线  $i \{i \in [1, N]\}$  之间的信道增益。显然, 信道容量  $C_{SIMO, 1 \times N, SNR=\rho}$  与接收天线数  $N$  成对数增长关系。

### 3) MISO 系统信道容量

对于一个发射分集  $M \times 1$  系统, 信道容量表达式<sup>[2]</sup>:

$$C_{MISO, M \times 1, SNR=\rho} = \log_2(1 + \frac{\rho}{M} \sum_{j=1}^M |h_j|^2) \quad \text{b/s/Hz} \quad (4)$$

(4)式中  $h_j$  为发射天线  $j \{j \in [1, M]\}$  与接收天线之间的信道增益。同理, 信道容量  $C_{MISO, M \times 1, SNR=\rho}$  与发射天线数  $M$  成对数增长关系。

### 4) MIMO 系统信道容量

对于一个  $M \times N$  系统, 在发射端无信道状态信息(Channel state information, CSI), 而接收端有良好 CSI, 即通过估计可获取  $H$  情况下, 信道容量表达式<sup>[2,3]</sup>如下:

$$C_{MIMO, M \times N, SNR=\rho} = \log_2 \det |I_N + HQH^*| \quad \text{b/s/Hz} \quad (5)$$

(5)式中  $Q$  为发射信号矢量协方差矩阵。当  $Q = (\rho/M)I_M$ , 即发射天线上等功率分配时, 达最大信道容量:

$$C_{MIMO, M \times N, SNR=\rho} = \log_2 \det |I_N + \frac{\rho}{M} HH^*| \quad \text{b/s/Hz} \quad (6)$$

利用  $W \{W = HH^*, \text{如果 } N \leq M; \text{ 否则 } W = H^*H\}$  矩阵非 0 特征值  $\lambda_i \{i \in [1, m], m = \min(M, N)\}$ , (6)式展成:

$$C_{MIMO, M \times N, SNR=\rho} = \sum_{i=1}^m \log_2(1 + \frac{\rho}{M} \lambda_i) \quad \text{b/s/Hz} \quad (7)$$

由此可见, 信道容量  $C_{MIMO, M \times N, SNR=\rho}$  与天线数  $m = \min(M, N)$  成线性增长关系。

## 3 两类典型空时码 O-STBC/LSTC 系统信道容量

从信息论角度讲, 当信源速率小于信道容量时, 采用合适的编码可在信道上实现无差错的信号传输。因此, 研究各种空时编码系统所能达到的信道容量具有现实意义。本文从空时码矩阵构造角度首先给出 O-STBC 系统信道容量, 在此基础上推广至 LSTC 情形。

(1)式中发射码字矩阵  $x$ , 按基带符号  $x_{ij}$  到不同发射天线映射的不同规则, 即产生不同空时编码方案。以空分复用为基础的 LSTC 编码方案, 发射码字矩阵  $x$  中每时隙对应  $M$  个子层, 且各子层数据流相互独立。而基于发射分集的各种空时编码方案, 由于可获得分集增益和编码增益, 因而大大提高了链路通信质量。其中 O-STBC 编码方案, 由于发射码字矩阵  $x$  的正交设计, 大大简化解码复杂度, 获得了广泛应用。

### 3.1 一般 O-STBC 系统及信道容量描述

为降低空时码译码复杂度, S. M. Alamouti 首先提出  $2 \times N \{N \geq 1\}$  的 O-STBC 编码技术<sup>[4]</sup>, 它已成为众多无线标准的重要组成部分<sup>[9]</sup>。下面首先分析 Alamouti  $2 \times N \{N=1 \text{ 和 } N=2\}$  系统信道容量, 再推广至 Alamouti  $2 \times N \{N > 2\}$  和一般的 O-STBC 编码  $M \times N \{M > 2\}$  两种情形。

#### 1) Alamouti $2 \times N \{N=1\}$ O-STBC 编码<sup>[4,5]</sup> 方案

该  $2 \times 1$  Alamouti O-STBC 编码方案如(8)式所示。

$$\begin{matrix} \text{接收天线} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{matrix} \text{发射天线阵} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \cdot \begin{matrix} \text{接收天线} \\ \text{发射天线阵} \end{matrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{matrix} \text{接收天线} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

(8)式中,  $y \in C^{2 \times 1}$ ,  $x \in C^{2 \times 2}$ ,  $H \in C^{2 \times 1}$ ,  $n \in C^{2 \times 1}$ 。发射码字矩阵  $x$  为一列正交阵。显然, 时隙 1: 基带符号  $x_1$  和  $x_2$  ( $k$ -PSK 或  $k$ -QAM) 同时从发射天线 1 和 2 上发射出去。时隙 2:  $x_2$  共轭取反和  $x_1$  共轭同时从天线 1 和 2 上发射出去。码率  $R=1$  (符号/时隙)。

(8)式经简单变换即为:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2^* \end{pmatrix} \quad (9)$$

(9)式即  $y = Hx + n$ , 显然有  $HH^* = H^*H = (|h_1|^2 + |h_2|^2)I_2$ ,  $tr(Q) = \rho = 2$ 。故该  $2 \times 1$  Alamouti 正交空时编码方案容量求取即转化为: 寻求发射信号矢量  $x$  的协方差矩阵  $Q$ , 在满足发射总功率  $tr(Q) = 2$  前提条件下, 使(10)式最大<sup>[2,3]</sup>。

$$C = \max_{tr(Q)=2} \frac{1}{2} \log \det |I_2 + \frac{\rho}{2} HQH^*| \quad \text{b/s/Hz} \quad (10)$$

(10)式中系数  $1/2$  对两次信道使用归一化, 以同相同条件下 MIMO 系统信道容量对比。利用  $\det |I + AB| = \det |I + BA|$  及  $H^*H = (|h_1|^2 + |h_2|^2)I_2$ , (10)式即为:

$$C = \max_{tr(Q)=2} \frac{1}{2} \log \det |I_2 + \frac{\rho}{2} (|h_1|^2 + |h_2|^2) Q| \quad \text{b/s/Hz} \quad (11)$$

当  $Q = (\rho/M)I_2 = I_2$  即单位阵<sup>[2,3]</sup>时,  $C$  达最大值。如用  $C_{Alamouti, 2 \times N, N=1, SNR=\rho}$  表示信道容量, 有:

$$C_{Alamouti, 2 \times N, N=1, SNR=\rho} = \log [1 + \frac{\rho}{2} (|h_1|^2 + |h_2|^2)] \quad \text{b/s/Hz} \quad (12)$$

将(12)与(4)两式比较知:  $C_{Alamouti, 2 \times N, N=1, SNR=\rho} = C_{MISO, 2 \times 1, SNR=\rho}$ 。故此, 该  $2 \times 1$  Alamouti O-STBC 编码方案不损失信道容量。

#### 2) Alamouti $2 \times N \{N=2\}$ O-STBC 编码<sup>[4,5]</sup> 方案

该  $2 \times N \{N=2\}$  Alamouti O-STBC 编码方案如(13)式所示。

$$\begin{matrix} \text{接收天线阵} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} = \begin{matrix} \text{发射天线阵} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \cdot \begin{matrix} \text{接收天线阵} \\ \text{发射天线阵} \end{matrix} \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} + \begin{matrix} \text{接收天线阵} \\ \text{时隙} \end{matrix} \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix} \quad (13)$$

(13)式中,  $y \in C^{2 \times 2}$ ,  $x \in C^{2 \times 2}$ ,  $H \in C^{2 \times 2}$ ,  $n \in C^{2 \times 2}$ 。发射码字矩阵  $x$  为一列正交阵。基带符号  $x_1$  和  $x_2$  到天线 1 和 2 的映射方式同  $2 \times 1$  Alamouti O-STBC 编码方案。码率  $R=1$  (符号/时隙)。

(13)式经简单变换即为:

$$\begin{pmatrix} y_{11} \\ y_{21}^* \\ y_{12} \\ y_{22}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{21} \\ h_{21}^* & -h_{11}^* \\ h_{12} & h_{22} \\ h_{22}^* & -h_{12}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{11} \\ n_{21} \\ n_{12} \\ n_{22} \end{pmatrix} \quad (14)$$

(14)式即  $y=Hx+n$ 。此时,  $H^*H=(|h_{11}|^2+|h_{21}|^2+|h_{12}|^2+|h_{22}|^2)I_2$ ,  $tr(Q)=\rho=2$ 。该  $2 \times N(N=2)$  Alamouti O-STBC 编码方案容量求取等同(10)式。同理,将  $H^*H$  带入(10)即有:

$$C = \max_{\rho(Q)=2} \frac{1}{2} \log \det |I_2 + \frac{\rho}{2} (|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2)Q| \quad \text{b/s/Hz} \quad (15)$$

当  $Q=(\rho/M)I_2=I_2$  即单位阵<sup>[2,3]</sup>时,  $C$  达最大值。如用  $C_{\text{Alamouti}, 2 \times N, N=2, \text{SNR}=\rho}$  表示信道容量,有:

$$C_{\text{Alamouti}, 2 \times N, N=2, \text{SNR}=\rho} = \log [1 + \frac{\rho}{2} (|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2)] \quad \text{b/s/Hz} \quad (16)$$

比较(16)、(4)、(6)三式知:  $C_{\text{Alamouti}, 2 \times N, N=2, \text{SNR}=\rho} = C_{\text{MISO}, 4 \times 1, \text{SNR}=\rho} < C_{\text{MIMO}, 2 \times 2, \text{SNR}=\rho}$ 。故此,该  $2 \times N(N=2)$  Alamouti O-STBC 编码方案相对等条件 MIMO 系统有容量损失。

### 3) Alamouti $2 \times N(N > 2)$ O-STBC 编码<sup>[4,5]</sup> 方案

很容易将  $2 \times N(N=2)$  O-STBC 推广到  $2 \times N(N > 2)$  编码情形。即有结论<sup>[5]</sup>:

$$C_{\text{Alamouti}, 2 \times N, N > 2, \text{SNR}=\rho} = C_{\text{MISO}, 2N \times 1, \text{SNR}=\rho} < C_{\text{MIMO}, 2 \times N, \text{SNR}=\rho} \quad (17)$$

### 4) 一般 $M \times N(M > 2)$ O-STBC 编码方案

对于  $M > 2$  的发射码字  $x$  矩阵的复正交设计,由文<sup>[6]</sup>知:码率  $R < 1$ 。考虑  $M=3, N=1$  情形,能达到的最大码率  $R=3/4$ 。此时,发射码字矩阵  $x$  两种构造方式如图(1)所示。

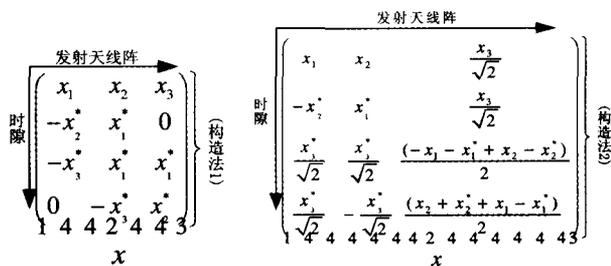


图 1 发射码字矩阵  $x$  两种构造方式

采用构造法 1 和 2 构造的发射码字矩阵  $x$  均为复正交阵。对于前者码字矩阵  $x$ ,某些时隙某些天线不发射信号。由构造法 1 构造的码字矩阵  $x$ ,采用 Alamouti  $2 \times N(N=1$  或  $N=2)$  O-STBC 编码方案中信道容量求取方法,如用  $C_{\text{O-STBC}, M \times N, M > 2, \text{SNR}=\rho}$  表示信道容量,有结论<sup>[5]</sup>:

$$C_{\text{O-STBC}, M \times N, M > 2, \text{SNR}=\rho} = RC_{\text{MISO}, MN \times 1, \text{SNR}=\rho} < C_{\text{MIMO}, M \times N, \text{SNR}=\rho} \quad (18)$$

## 3.2 一般 LSTC 系统及信道容量描述

Bell 实验室的 Foschini 首先提出对角分层空时码,通常被称为 D-BLAST(Diagonal Bell Laboratories Layered Space-time)<sup>[7]</sup>。随后, Wolniansky 和 Foschini 等人给出了 D-BLAST 的简化设计:垂直分层空时码 V-BLAST (Vertical Bell Laboratories Layered Space-time)<sup>[8]</sup>。LSTC 的设计目标主要是提高频谱效率。首先,信源产生的比特流经解复用后形成多个数据子层,每子层可独立编码和基带调制,并按一定映射规则将数据分配到不同天线上发射。V-BLAST 和 D-BLAST 两种 LSTC 编码方案如图 2 所示。前者,数据子层与发射天线具有固定对应关系;而后者,属于同层的数据子流将依次轮流在不同时隙不同天线上发射出去。

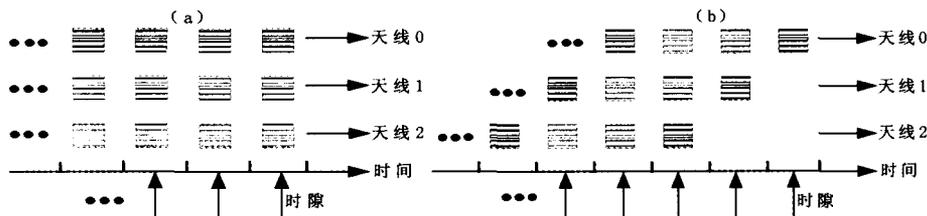


图 2 LSTC 两种结构 (a)为 V-BLAST (b)为 D-BLAST

在两种 LSTC 编码方案中,任一时刻,所有天线上发射的数据子流均相互独立。即该两种方案下对发射码字矩阵  $x$  无任何限制。显然,借鉴 MIMO 系统信道模型易知:LSTC 系统中,当接收天线数大于发射天线数时,系统容量与发射天线数具有近似正比关系,即可达 MIMO 系统信道容量  $C_{\text{MIMO}, M \times N, \text{SNR}=\rho}$ 。

## 4 仿真及结果分析

本文仿真了  $M=2$  时, MIMO 和 Alamouti 系统信道容量以及  $M=3$  时, MIMO 和一般 O-STBC 系统信道容量。  $M=3$  时, O-STBC 编码方案码率选择:  $R=3/4$ 。仿真结果如图 3 所示。由图 3 知:无论  $M=2$  或  $M=3$ , MIMO 系统一次信道使用所能达到的容量均大于 Alamouti 或者一般 O-STBC 编码所能达到的信道容量。且 STBC 编码(包括 Alamouti 和一般 O-STBC)方案下,信道容量随  $M$  增加改善不明显,这是由于

$M > 2$  时,码率  $R < 1$  带来信道容量的损失。

**结论** 本文首先从理论上引出各类系统,包括 SISO、MISO、SIMO、MIMO 信道容量表达式。接着从分组空时码矩阵构造角度给出 O-STBC 系统信道容量。在此基础上,推广至 LSTC 情形。最后对相关结论进行仿真,验证其正确性。本文工作是在假定信道 i. i. d. 情况下进行的,有必要将其推广至信道相关情况,这是下一步工作。

## 参考文献

- 1 Rappaport T S. Wireless communications principles and practice. Prentice Hall, Inc, 2001
- 2 Foschini G J, Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antenna. Wireless Personal Communications, 1998, 6: 311~335

(下转第 31 页)

权值,并保存该树权值的来源指向;如果当前的流量值与上次检测到的流量值之差的绝对值小于  $M$ ,那么就将  $M$  的值减去步长  $R$ 。这样,在客户流量比较平稳的情况下,Anycast 节点至少能每隔  $T/R$  的时间单位发送一次查询消息,反之,它至多每隔  $L$  时间单位发送一次查询消息。

#### 4 性能分析

本模型是建立在点对点应用的底层网络协议 Pastry 基础之上的,它从根本意义上解决了 Anycast 的扩展局限性问题,从而真正地实现了高质量、响应速度快的 Anycast 服务。

在本模型中,当一个节点发送一个 Anycast 服务请求时,此请求所到的第一个 Anycast 节点是整个 Anycast 树中距离源节点最近的节点,然后以此节点为子树根节点,再根据其子树成员的带宽、处理能力以及距离子树根节点的跳数等综合参数,按照一定的算法查找到最佳组节点。这样就可以保证该服务请求得到最高效的处理,提高服务质量,缩短响应时间。不难看出,本模型查找最优 Anycast 组节点的复杂度为  $O(\log(n))$ ,其中  $n$  为子树的节点个数。此外,由于本模型采用树状结构,允许 Anycast 节点可以动态地加入或离开,并不受物理位置的限制,从而真正意义上解决了 Anycast 扩展局限性。

在本模型中,Anycast 组节点的加入和离开都是分布式处理的,并不是集中在某个固定节点上,这就解决了由于瓶颈可能导致网络阻塞或者节点超负载而宕机的问题,此外,由于加入与离开消息的数据传输只需要跨越很小的物理网络并且此类消息的数据传输量也非常小,因此,对网络性能基本没有影响。本模型中的 Anycast 树状结构的信息是采用分布式管理与维护的,即每个节点只负责管理和维护其孩子节点的信息,这就实现了 Anycast 树中节点信息的分布式维护与管理,

从而实现了负载均衡的作用。此外,在本模型中不同主机发出的服务请求消息会被不同的最优 Anycast 组节点处理,这同样保证了 Anycast 服务请求可以均衡地分布在 Anycast 组成员之间从而得到高效的处理。

上述所有这些特点都充分地说明本模型可以很好地支持高效的、大规模的 Anycast 组的建立。

目前,该模型在 IPv6 的模拟环境下运行良好。

**结束语** Anycast 是 IPv6 的一个新特性,它可以支持许多服务。本文在 IPv6 的模拟环境下,提出了实现 Anycast 服务的一种新的通信模型,用以解决目前 Anycast 服务所存在的一些问题。Anycast 作为一种新型的通信模式,具有广泛的前景,但是它还存在许多问题,有待进一步探讨和研究。

#### 参考文献

- 1 Partridge C, Mendez T, Milliken W. Host anycasting service. RFC1546, 1993
- 2 Deering S, Hinden R. Internet Protocol Version 6 (Ipv6) specification, RFC 2460, 1998
- 3 Hinden R, Deering. IP version 6 addressing architecture. RFC 2373, 1998
- 4 Hagino J, Ettikan K. An analysis of Ipv6 anycast Internet Draft. Internet Engineering Task Force, 2001
- 5 Johnson D, Deering S. Reserved Ipv6 Subnet anycast addresses. RFC2526, 1999
- 6 Katabi D, Wroclawski J. A framework for scalable global IP-Anycast (GIA). In: Proc. of SIGCOMM, New York: ACM Press, 2000. 3~15
- 7 Narten T, Nordmark E, Simpson W. Neighbor discovery for IP version 6 (Ipv6), RFC1970, 1996
- 8 Huitema C. Routing in the internet. Prentice Hall, 1996
- 9 Castro M, Druschel P, Kermarrec A-M, et al. Scalable application-level anycast for highly dynamic groups, Prentice Hall, 2003

(上接第 24 页)

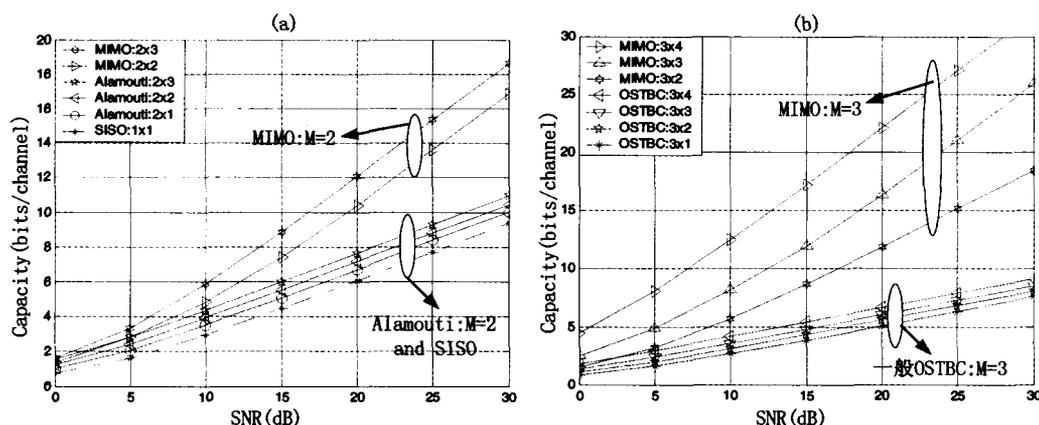


图 3 MIMO 同 STBC 容量对比 (a)为  $M=2$ , Alamouti 和 MIMO 容量比较 (b)为  $M=3$ , OSTBC 和 MIMO 容量比较

- 3 Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels. AT&T-Bell Labs Internal Tech. Memo June, 1995
- 4 Alamouti S M. A simple transmitter diversity scheme for wireless communications. IEEE J on Sel Areas In Comm, 1998, 16(8): 1451~1458
- 5 Hassibi B, Hochwald B M. High-rate codes that are linear in space and time. IEEE Trans. On Information Theory, 2002, 48(7): 1804~1824
- 6 Tarokh V, Jafarkhani H, Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs. IEEE Trans. On Information Theory,

- 1999, 45: 1456~1467
- 7 Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. Bell Labs Technical Journal, Autumn, 1996. 41~59
- 8 Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. 1998 URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, 1998. 295~300
- 9 3G TS 25. 221 V3. 3. 0(2000. 3). <http://www.3gpp.org/>