

# 自由空间光通信中的混合空时编码

王惠琴 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院电子工程系, 陕西 西安 710048)

**摘要** 在分析了大气对光信号的影响之后,利用脉冲位置调制(PPM)的正交性构造了一种适合于强度调制/直接检测式光通信的正交空时编码,并将其引入分层空时编码的首层以增加第一层信息符号的分集度;其次采用分组干扰抑制的方法消除其它层对信号的干扰,利用空时分组码(STBC)和分层空时编码的译码方法并结合最大似然判决准则恢复出原始信号。最后,利用仿真实验进一步验证了该方法的可行性。结果表明:在自由空间光通信中,混合空时编码方案的性能明显优于传统 BLAST 码方案的性能。

**关键词** 光通信;多输入多输出;空时编码;脉冲位置调制;分组干扰抑制

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092901.0132

## Hybrid Space-Time Code for Free Space Optical Communication

Wang Huiqin Ke Xizheng

(School of Automation & Information, Xian University of Technology, Xian, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** An orthogonal space-time block code suitable for intensity modulation/direct detection optical communication system is constructed by using orthogonality of pulse position modulation (PPM) after analyzing the effect of atmosphere on the optical signal. The technique is applied to the first layer of the layered space-time code (LST) to increase the diversity of the information symbol. The effect of other layers on the symbol is eliminated by using group interference suppression (GIS). The signal is recovered by combining the decoding method of space-time block code (STBC) and Bell Labs Layered Space-Time (BLAST) and maximum likelihood decision rule. The feasibility of the technique is proved by the simulation experiment. It shows that in free space optical communication the error rate performance of hybrid space-time code is better than BLAST.

**Key words** optical communication; multiple input multiple output; space-time code; pulse position modulation; group interference suppression

## 1 引 言

随着半导体激光器<sup>[1]</sup>和光电探测器件的日益完善,无线光通信技术得到了迅速的发展,它由于结合了光纤通信以及微波等传统无线通信的优势,因而成为一种新兴的宽带无线接入方式而受到人们的广泛关注。但随着通信信息量的增大,扩充网络带宽资源,提高通信流量已成为当前面对的重要课题。而多输入多输出(MIMO)技术的提出为提高通信传输速率提供了一种新手段。

MIMO 技术在不增加频谱带宽的条件下,可以成倍地提高无线通信系统的传输容量,它在无线光通信领域已得到人们的重视<sup>[2~6]</sup>。为了充分利用 MIMO 系统的信道容量,文献[7]提出了一种适合于强度调制式自由空间光通信的分层空时编码方案,它通过干扰抵消算法(Interference cancellation, IC)来实现译码。在其译码过程中,由于第一层译出的信息符号没有获得分集增益,即最先译出的码字可能会出错,致使连续干扰抵消(Successive

**收稿日期**: 2008-04-23; **收到修改稿日期**: 2008-07-01

**基金项目**: 国防重点实验室基金(9140C3601010701)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)、陕西省自然科学基金(2007F12)、广东省交通厅科技基金(2007-26)和西安理工大学优秀博士基金(602-210808)资助课题。

**作者简介**: 王惠琴(1972-),女,副教授,主要从事大气激光通信方面的研究。E-mail: whq1222@lut.cn

**导师简介**: 柯熙政(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

interference cancellation, SIC) 过程中存在错误传播, 将会严重影响系统的误码性能。本文在复用增益和分集增益之间进行合理的折衷, 提出了一种适合于强度调制/直接检测式光通信的混合空时编码方案。该方案就是利用空时分组码来为最先译出的信息符号提供分集增益, 通过保证第一层检测的准确度来提高系统的可靠性。

## 2 光 MIMO 信道模型

### 2.1 自由空间光通信的性能分析

光信号在大气信道中传输时, 会受到自由空间损耗、大气衰减、背景辐射和大气湍流等各种因素的影响, 致使无线光通信的稳定性和可靠性受到影响。当光信号在大气中传输时, 由于激光光束在接收端会形成一个较大半径的光斑, 带来一定的自由空间损耗, 其一般在 10~30 dB。大气衰减主要导致光束能量损失, 接收信号减弱, 其变化幅度很大, 可以从 0.1 dB/km 到 300 dB/km。在强度调制方式的无线光通信中, 太阳光和其它光辐射源产生的背景光会对激光信号造成干扰, 这种干扰的大小直接与各种背景辐射的大小有关。大气湍流运动会引起光束的强度闪烁、光束漂移、扩展与抖动等现象, 其中大气闪烁和光束漂移对自由空间光通信的影响最大。它使得信号强度随机起伏变化, 当闪烁较大时可以达到大于 30 dB 的衰落幅度。

在以上影响因素中, 最突出的是大气湍流的影响。产生湍流效应的原因是温度、气压和水汽压等不均匀分布导致的空气折射率起伏。工程上湍流对光波传输的影响程度通常用 Rytov 变量来度量<sup>[8]</sup>:

$$\sigma_i^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (1)$$

式中  $C_n^2$  表示折射率结构常数;  $k = 2\pi/\lambda$  表示空间波数矢量;  $L$  表示光波的传输距离。当  $\sigma_i^2 < 1$  为弱湍流,  $\sigma_i^2 \approx 1$  为中湍流,  $\sigma_i^2 \gg 1$  为强湍流。

大气湍流会造成局部大气温度和折射率的随机变化, 从而使接收端的光强产生随机起伏, 其大小通常采用统计平均值来描述。对强度调制直接检测系统而言, 其接收光功率  $P_r(t)$  可以表示为<sup>[9]</sup>

$$P_r(t) = a(t)P_s(t) + P_n(t), \quad (2)$$

式中  $P_s(t)$  为在没有闪烁衰减情况下的接收光功率, 由大气传输损耗和发射功率的大小决定;  $P_n(t)$  为高斯白噪声;  $a(t)$  为光强闪烁衰减系数。当单个激光光束通过弱湍流大气后, 其光强闪烁的概率分布密度服从对数正态分布<sup>[10,11]</sup>, 即

$$f_A(a) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad (3)$$

$$a > 0$$

式中  $\mu_x$  为均值,  $\sigma_x^2$  为方差, 且  $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。当单光束通过强湍流大气后, 其光强闪烁服从负指数分布。在强起伏湍流大气中, 若传输距离、接收孔径和发射镜之间距离满足一定条件, 随着光束数目的增加, 大气闪烁也将趋于对数正态分布<sup>[12]</sup>。然而, 在对数正态分布中, 若光强的均值为 1 时, 可采用闪烁指数  $S. I. = e^{4\sigma_x^2} - 1$  来表示衰落的大小, 其典型值  $S. I. \in [0.4 \sim 1.0]$ <sup>[3]</sup>。

### 2.2 光 MIMO 信道的模型

在一个  $M \times N$  的 MIMO 系统中, 接收端的  $N$  个探测器在同一频带内接收信号, 每个探测器都将接收来自  $M$  个激光器的信号。若 1) 系统总功率不变, 而且接收端已知信道状态信息; 2) 在该系统中采用 QPPM 调制方式, 设字符周期为  $T_s$ , 它被分为  $Q$  个时隙, 时隙长度  $T = T_s/Q$ ; 3) 假设在两个字符周期内信道特性保持不变, 而且各信号之间是相互独立的。设输入信号矩阵为  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ ,  $\mathbf{x}(t)$  中  $x_i$  为第  $i$  个激光器发送的信号。探测器的输出信号矩阵为  $\mathbf{r}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)]^T$ , 其中  $r_j$  为第  $j$  个探测器上收到的信号。则系统满足

$$\mathbf{r}(t) = \eta \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (4)$$

式中  $\eta$  为光电转换效率, 是一常数。噪声矩阵为  $\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ , 其各分量之间互相统计独立, 且均为零均值、方差是  $N_0$  的白高斯噪声。

$$\mathbf{A} \text{ 为信道增益矩阵, 即 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & \cdots & a_{1M}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & \cdots & a_{2M}^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{N1}^2 & a_{N2}^2 & \cdots & a_{NM}^2 \end{bmatrix}.$$

$a_{ji}$  表示从第  $i$  个激光器到第  $j$  个探测器的光强闪烁衰减系数, 近似服从对数正态分布<sup>[13]</sup>。

## 3 自由空间光通信中的混合空时编码

### 3.1 光信道中的混合空时编码

混合空时编码的思想是在分层空时编码的低层引入空时分组码 (STBC), 以提高最先译出码的分集度。图 1 为自由空间光通信的混合空时编码原理图。对于一个  $M \times N$  ( $M$  表示激光器的数目,  $N$  表示探测器的数目) 的混合空时编码系统而言, 其基本原理是将串并变换后的数据分解成  $G$  层分组数据流和  $M_L$  层直发数据流。各直发数据流分别由对应

的激光器直接发送出去。各层的分组数据流经过  $m \times n$  的正交空时编码后,分别由对应的  $m$  个激光器发送出去,激光器的数量之间满足  $Gm + M_L = M$ 。如果直接将 STBC 码引入分层空时编码的首层,在混合空时编码中会因含有 STBC 编码而存在字符的复共轭和负数。然而在强度调制/直接检测式的自

由空间光通信中,光信号只有“on”和“off”两种状态,用这两种状态不可能表示出符号的复共轭和负数。本文利用 QPPM 调制技术的正交性来构造空时分组码,即采用不同的脉冲位置来表示符号的复共轭和负数。编码矩阵被转化为一个实数矩阵,能够在强度调制/直接检测式的光通信中传输了。

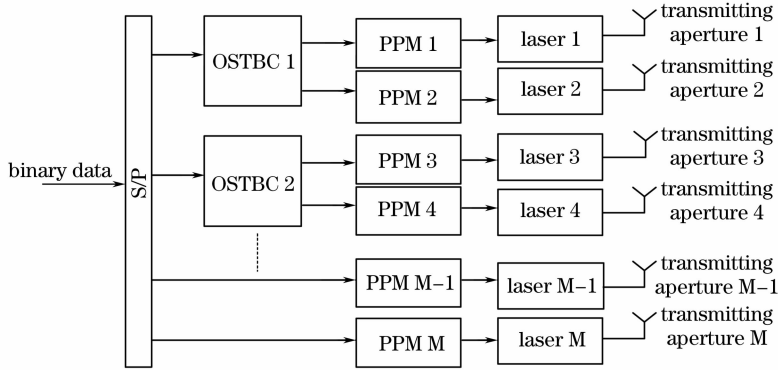


图 1 自由空间光通信中的混合空时编码原理

Fig. 1 Principle of hybrid space-time code for free space optical communication

### 3.2 光信道中的混合空时译码

在混合空时编码中,由于采用了特殊的编码结构,接收端接收到的信号中除了含有 STBC 层的分组数据外,还含有 BLAST 层的直发数据,所以不能直接对接收到的信号进行 STBC 译码,必须首先消

除其它层的干扰。本文采用分组干扰抑制的方法消除其它层的干扰,再利用合并准则检测出 STBC 码,经分层空时译码后即可恢复原始信号。混合空时编码的译码原理如图 2 所示。其译码过程,分为以下 3 点来说明。

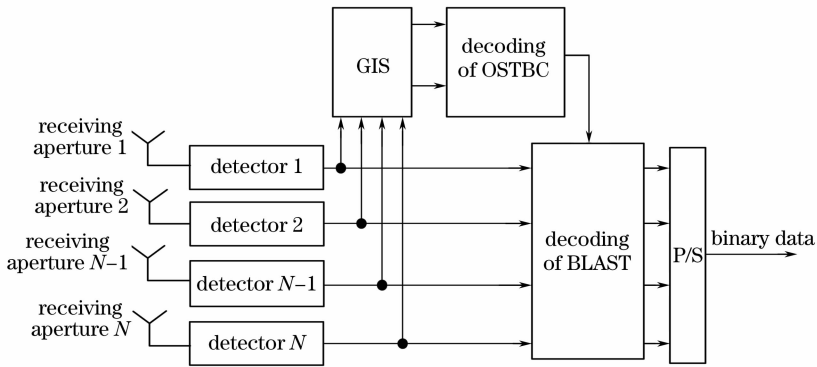


图 2 自由空间光通信中的混合空时编码的译码原理

Fig. 2 Decoding principle of hybrid space-time code for free space optical communication

#### 3.2.1 分组干扰抑制

假设接收端已准确的获得信道增益  $\mathbf{A}$ 。对于仅在首层采用了一个 STBC 层的混合空时编码来说,信道增益  $\mathbf{A}$  可以表示为  $\mathbf{A} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2$ 。其中  $\mathbf{A}_1 =$

$$\begin{bmatrix} a_{11}^2 & \cdots & a_{1m}^2 \\ a_{21}^2 & \cdots & a_{2m}^2 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{N1}^2 & \cdots & a_{Nm}^2 \end{bmatrix}, \text{表示来自发端 STBC 层的信}$$

道增益矩阵;  $\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} a_{1\ m+1}^2 & \cdots & a_{1M}^2 \\ a_{2\ m+1}^2 & \cdots & a_{2M}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N\ m+1}^2 & \cdots & a_{NM}^2 \end{bmatrix}$ , 表示干扰

信号的信道增益矩阵。由于  $\mathbf{A}_2$  是一个  $N \times (M - m)$  的矩阵,则  $\mathbf{A}_2$  的秩小于或等于矩阵的列数,即  $\text{rank}[\mathbf{A}_2] \leq M - m$ 。对  $\mathbf{A}_2$  的零空间  $\Omega$  而言,存在  $\text{dim}(\Omega) \geq N - M + m$ ,所以可以在  $\mathbf{A}_2$  的零空间  $\Omega$  中

得到一组不唯一的正交归一化向量  $\{h_1, h_2, \dots, h_{N-M+m}\}$ 。记  $\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_{N-M+m}]^T$ ，且  $\mathbf{H}\mathbf{H}^T = \mathbf{I}_{N-M+m}$ ，其中  $\mathbf{I}$  表示单位阵， $(\cdot)^T$  表示矩阵的转置。

对(4)式左乘  $\mathbf{H}$ ，可得

$$\mathbf{H}\mathbf{r}(t) = \eta\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{H}\mathbf{n}(t), \quad (5)$$

令  $\mathbf{r}(t) = \mathbf{H}\mathbf{r}(t)$ ， $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{H}\mathbf{A}$ ， $\tilde{\mathbf{n}}(t) = \mathbf{H}\mathbf{n}(t)$ ，(5)式可简化为

$$\tilde{\mathbf{r}}(t) = \eta\tilde{\mathbf{A}}\mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{n}}(t), \quad (6)$$

从(6)式可得，来自  $M_i$  组激光器上的信号被保留，而来自其它激光器上的信号被抑制掉了。

### 3.2.2 光信道中的 STBC 的译码

对比(6)式和(4)式，可以看出它们的结构形式是相同的，所以可以采用最大比合并的方式来检测

信号。就无线光通信而言，在一个  $2 \times 2$  正交空时分组的编码方案中，设  $\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} \end{bmatrix}$ ，记  $\tilde{r}_1^j, \tilde{r}_2^j$  分别表示第  $j$  个探测器在时刻  $t$  与  $t+T_s$  接收到的光信号，有

$$\begin{cases} \tilde{r}_1^j = \tilde{a}_{j1}x_1 + \tilde{a}_{j2}x_2 + \tilde{n}_1^j, \\ \tilde{r}_2^j = \tilde{a}_{j2}(x_1^*) + \tilde{a}_{j1}(-x_2^*) + \tilde{n}_2^j, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $j = 1, 2$ 。凡在本文中出现的  $(\cdot)^*$ 、 $[-(\cdot)^*]$  和  $[-(\cdot)]$  形式均为一个整体，是  $1 \times Q$  的行向量，以后再不做单独说明。

由于本方案中传输的是实信号，在信号的合并过程中，为了保证接收到的信号能够获得最大分集增益，对接收到的信号进行位置映射后再合并，故可得估计的信号为

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = \tilde{a}_{11}\tilde{r}_1^1 + \tilde{a}_{12}(\tilde{r}_2^1)^* + \tilde{a}_{21}\tilde{r}_1^2 + \tilde{a}_{22}(\tilde{r}_2^2)^*, \\ \tilde{x}_2 = \tilde{a}_{12}\tilde{r}_1^1 + \tilde{a}_{11}[-(\tilde{r}_2^1)^*] + \tilde{a}_{22}\tilde{r}_1^2 + \tilde{a}_{21}[-(\tilde{r}_2^2)^*], \end{cases} \quad (8)$$

将(7)式代入，得到合并后的信号为

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \tilde{a}_{ji}^2 x_1 + \sum_{j=1}^2 \prod_{i=1}^M \tilde{a}_{ji} x_2 + \sum_{j=1}^2 \prod_{i=1}^2 \tilde{a}_{ji} (-x_2) + \sum_{j=1}^2 [\tilde{a}_{j1} n_1^j + \tilde{a}_{j2} (n_2^j)^*], \\ \tilde{x}_2 = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \tilde{a}_{ji}^2 x_2 + \sum_{j=1}^2 \prod_{i=1}^2 \tilde{a}_{ji} x_1 + \sum_{j=1}^2 \prod_{i=1}^2 \tilde{a}_{ji} (-x_1) + \sum_{j=1}^2 [\tilde{a}_{j2} n_1^j + \tilde{a}_{j1} (n_2^j)^*]. \end{cases} \quad (9)$$

对(9)式利用最大似然判决准则即可恢复出 STBC 层的信号  $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ 。也可从(9)式看出，经 STBC 层的编码获得了 4 的分集增益，从而提高了 BLAST 低层的可靠性。

另外，在传统的分层空时编码中，每个激光器是按等功率发射的，即每个激光器的功率等于发射机总功率的  $1/M$ 。在其译码过程中，由于前一层译出码所获得的分集增益低于后一层译出码的分集增益，所以在混合空时编码系统中，按照获得分集增益的大小来分配发射功率，可进一步保证最先译出码的正确性。

### 3.2.3 分层空时编码中的译码算法

在完成了 STBC 层的译码后，从原系统中消除 STBC 码对其它符号的影响，即

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r} - \eta \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

对消除 STBC 码后的符号再进行分层空时译码。在分层空时编码的译码中，常采用的线性译码方法主要有最小均方检测算法 (MMSE) 和迫零算法 (ZF)。它们就是根据接收端的接收信号  $\mathbf{r}_0$  和已知的信道矩阵响应  $\mathbf{A}_2$  来找到一个具体的加权矩阵

$\mathbf{W}$ ，从而利用加权矩阵和接收信号得到发送信号的估计值  $\hat{x}$ 。ZF 和 MMSE 算法分别为

ZF 算法

$$\mathbf{W} = (\mathbf{A}_2^H \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^H, \quad (11)$$

MMSE 算法

$$\mathbf{W} = (\mathbf{A}_2^H \mathbf{A}_2 + N_0 \mathbf{I}_n)^{-1} \mathbf{A}_2^H,$$

式中  $(\cdot)^H$  表示矩阵  $\mathbf{A}_2$  的厄密特矩阵。考虑光电转换效率的影响，对 MMSE 算法进行修正，可得

$$\mathbf{W} = \left( \mathbf{A}_2^H \mathbf{A}_2 + \frac{N_0}{\eta^2} \mathbf{I}_n \right)^{-1} \mathbf{A}_2^H, \quad (12)$$

利用加权矩阵  $\mathbf{W}$  和接收到的信号  $\mathbf{r}_0$  可得发送信号的估计值，即

$$\hat{x} = \mathbf{W}\mathbf{r}_0, \quad (13)$$

对(13)式的结果再利用最大似然判决即可恢复出原始信号。

### 3.3 两种编码方式下分集度和频谱效率的对比

对于一个未编码的 BLAST 系统而言，其最先检出层的分集度为  $N-M+1$ ，最后检出层的分集度为  $N$ ，其频谱效率为  $\eta = KM \text{ bit/s/Hz}$ 。其中， $K$  表示每个调制符号的比特数。对本文提出的混合空时编码系统而言，假设它含有  $G$  个  $m \times n$  STBC 编码

块,则其最先译出层的分集度为  $\min[m(N-M) + m^2, N-M+Gm+1]$ ,最后检出层的分集度为  $N$ ,其频谱效率为  $\eta = K(M - mG + Gr_{\text{stbc}})$  bit/s/Hz。其中,  $r_{\text{stbc}}$  表示 STBC 编码的码速率。相对于未编码的 BLAST 系统而言,混合空时编码系统所获得的最小分集增益是以频谱效率下降了  $G(m - r_{\text{stbc}})/M$  倍为代价换取的。当  $M$  比较大时,  $G(m - r_{\text{stbc}})/M$  的值较小。

## 4 仿真实验

在总发送功率不变,信道衰减系数确定的条件下,利用 Monte Carlo 方法对  $4 \times 4$  系统的误码性能进行了仿真。仿真参数为:  $Q=4$ ,  $S.I.=0.6$ ,  $\eta=0.5$ ,混合编码方案中采用一个  $2 \times 2$  的 STBC 编码块。仿真结果如图 3、图 4 所示。

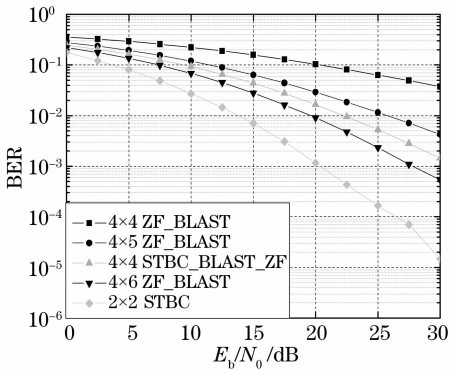


图 3 不同系统采用不同编码方式时的误码率

Fig. 3 BER of different systems using different codings

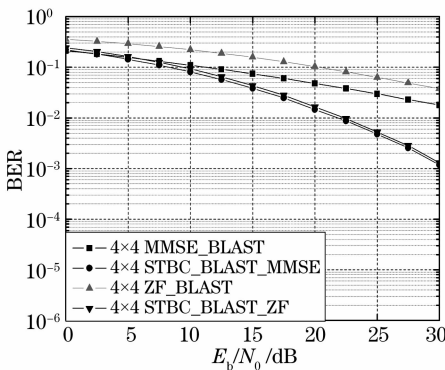


图 4 两种系统采用不同译码算法时的误码率

Fig. 4 BER of two systems using different decoding algorithms

图 3 为不同系统采用不同编码方式时的误码性能。由图 3 可见:1) 对比  $2 \times 2$  的 STBC 系统和  $4 \times 4$  的 ZF\_BLAST 系统,可看出在 STBC 和 BLAST 的误码率之间存在一个很宽的范围,而且 STBC 系统的误码率曲线比 BLAST 系统的误码率更陡峭。说明

STBC 系统在损失了部分复用增益的情况下能获得较大的分集增益,即表现为 STBC 系统的性能明显优于 BLAST 系统的性能。2)  $4 \times 4$  混合空时编码系统的误码性能介于  $2 \times 2$  STBC 系统和  $4 \times 4$  ZF\_BLAST 系统之间,可见混合空时编码的误码性能明显优于传统的 BLAST 码的性能。当误码率为  $4 \times 10^{-2}$  时,相对于  $4 \times 4$  ZF\_BLAST 系统而言,  $4 \times 4$  混合空时编码系统的性能改善了约 14 dB。说明在分层空时编码中引入 STBC 码后增加了最先译出层的分集度,保证了首层的正确性,减小了错误传播。3) 和  $4 \times 5$  ZF\_BLAST、 $4 \times 6$  ZF\_BLAST 的系统相比较,  $4 \times 4$  混合空时编码系统的误码性能介于二者之间。说明  $4 \times 4$  混合空时编码系统既获得了接收分集增益又获得了发送分集增益。

为了进一步说明混合空时编码系统具有良好的误码性能,对传统 BLAST 系统和混合空时编码系统分别采用 MMSE 和 ZF 检测算法进行分析,其误码性能如图 4。由图 4 可得:1) 在混合空时编码系统中采用 MMSE 译码算法时,也体现出本方案的误码性能明显优于传统 BLAST 系统的误码性能。2) 在传统的 BLAST 系统中,MMSE 算法由于考虑了噪声对信号的影响,采用 MMSE 算法时的性能明显优于采用 ZF 算法时的性能。但是在混合空时编码系统中,采用两种算法时的误码性能非常接近。当误码率为  $2 \times 10^{-3}$  时,两种算法的误码性能相差不到 0.5 dB。说明在保证 BLAST 首层译码的正确性之后,噪声对信号的影响非常小,更进一步体现了 BLAST 系统中的误码主要是由首层的错误所引起。同时也反映出在混合空时编码系统中从降低接收机复杂度的角度出发,ZF 检测算法更适合于工程应用。

## 5 结 论

本文将 OSTBC 码引入分层空时编码中,提出了一种混合空时编码方案来提高光通信的可靠性,并利用仿真实验进一步验证了该方法的有效性。结果表明:在自由空间光通信中,混合空时编码系统的性能明显优于 BLAST 系统的性能,而且还可以降低接收机的复杂度,为实际工程应用提供了理论依据。另外,本文的编译码是在接收端已知信道状态信息的条件下进行的,但在实际系统需要对其值进行估计。为此在今后的工作中,将研究信道估计进一步实现基于混合空时编码的自由空间光通信。

## 参 考 文 献

- 1 Yunfang Wan, Kezhen Han, Yun Wang *et al.*. High power CW and Q-switched operation of a diode-side pumped Nd:YAG 1319-nm laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 124~126
- 2 Xiang Jingsong, Hu Yu. Study on characteristics of distributed array receiver for satellite to ground laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1297~1302  
向劲松, 胡渝. 星地激光通信中分布式接收阵列的特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1297~1302
- 3 Stephen G. Wilson, Maité Brandt-Pearce, Qianling Cao *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Transactions Communications*, 2005, **53**(8): 1402~1411
- 4 Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024  
马东堂, 魏急波, 庄钊文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 5 Maité Brandt-Pearce, Stephen Wilson, Qianling Cao *et al.*. Code design for optical MIMO systems over fading channels [C]. *Proceedings of the 38<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, Monterey, CA*, 7~10 November 2004. 871~875
- 6 M. K. Simon, V. A. Vilnrotter. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, **4**(1): 35~39
- 7 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical Bell labs layered space-time code[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878  
王惠琴, 柯熙政. 基于垂直分层空时码的自由空间光通信[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 874~878
- 8 Song Xiaozheng, Liu Lu, Tang Junxiong. Experimental and simulation study on convolutional interleaving with coding for optical wireless communication system[J]. *J. Communications*, 2007, **28**(4): 13~17  
宋效正, 刘璐, 汤俊雄. 无线光通信卷积交织与编码的实验及仿真研究[J]. *通信学报*, 2007, **28**(4): 13~17
- 9 Chen Jun, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Analysis of free space system based on twofold turbo code [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1532~1536  
陈俊, 黄德修, 元秀华. 基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1532~1536
- 10 Yang Changqi, Jiang Wenhan, Rao Changhui. Impact of aperture averaging on bit-error rate for free space optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 212~218  
杨昌旗, 姜文汉, 饶长辉. 孔径平均对自由空间光通信误码率的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 212~218
- 11 Wang Jin, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Performance analysis of the reception based on least-mean-square adaptive algorithm in optical wireless communication system [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1379~1383  
王瑾, 黄德修, 元秀华. 基于最小均方自适应滤波器的无线光通信接收性能分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1379~1383
- 12 Kim I I, Hakakha H, Adhikari P. Scintillation reduction using multiple transmitters[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2990**: 102~113