

# 基于准正交空时分组编码的空间激光通信

邢雪峰 李洪祚

(长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 准正交空时分组编码(QOSTBC)是一种正交空时编码的变换编码结构,将时间分集和空间分集相结合,具有高效的分集利用率和编码效率。QOSTBC 是解决大气湍流对光通信影响的有效手段之一。在研究了大气信道特性的基础上,提出一种基于 QOSTBC 结构和空间分集光通信系统的信道模型;介绍了 QOSTBC 原理,分析了系统的信道容量和误码率(BER);利用蒙特卡罗仿真比较了采用空时分集编码与未使用分集编码系统的容量及 BER 的情况。结果表明,使用 QOSTBC 系统的信道容量随发射天线数增加而递增,误码性能得到有效改善。QOSTBC 与 Alamouti 编码系统相比系统信噪比节省约 9 dB,说明该系统具有编码所提供的良好信道容量和误码性能,能够有效地抑制大气湍流对光通信所产生的光强起伏影响。

**关键词** 光通信;空时分组编码;多发多收;大气信道;蒙特卡罗仿真

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0505004

## Space Laser Communications Based on Quasi-Orthogonal Space-Time Block Coding

Xing Xuefeng Li Hongzuo

(Changchun University of Science and Technology, School of electronic information & engineering, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** Quasi-orthogonal space-time block coding (QOSTBC) is a transformational structure of orthogonal space-time coding. It is a time and space diversity technique. It has a highly efficient diversity utilization and coding efficiency. Over atmospheric turbulence channels, QOSTBC is an optical communication solution. By the study of the atmospheric channel characteristics, a QOSTBC model based on spatial diversity optical communication is proposed. The principle of QOSTBC is introduced. The channel capacity and bit error rate (BER) are analyzed. Using Monte Carlo simulation method, the channel capacity and the BER between diversity and no diversity coding system are compared. The results show that by using of QOSTBC the system's channel capacity increases with the number of transmit antennas. The error performance is improved effectively. The system signal noise ratio (SNR) reduces 9 dB comparing QOSTBC and Alamouti coding system, which indicates that the coding system has provided a well channel capacity and error performance. The coding system can effectively inhibit optical intensity fluctuation of optical communication affected by atmospheric turbulence.

**Key words** optical communications; space-time block coding; multi-input multi-output; atmospheric channel; Monte Carlo simulation

**OCIS codes** 060.4510; 200.2606; 130.6750

## 1 引言

空间激光通信作为一种新型的通信手段,具有高速率、抗干扰和保密性强等特点,世界各国都将其作为未来空间通信发展的一个重要研究方向<sup>[1~4]</sup>。

近 10 年来,空间激光通信在光纤通信和微波通信的基础上得到了快速的发展,但空间光通信受到大气湍流和散射影响严重,甚至会导致通信链路中断<sup>[5,6]</sup>。为了有效抑制大气信道对空间光通信的影

收稿日期: 2011-11-23; 收到修改稿日期: 2012-01-13

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z225)和吉林省自然科学基金(20092DGG007)资助课题。

作者简介: 邢雪峰(1982—),男,博士研究生,主要从事分集激光通信方面的研究。E-mail: xing.xf@163.com

导师简介: 李洪祚(1953—),男,教授,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: lihongzuo@sohu.com

响,可使用大口径接收、自适应光学和分集技术等技术,其中分集技术凭借其低成本和低复杂度的优势成为近年来的研究热点<sup>[7~16]</sup>。空时编码是分集通信的核心技术之一,其概念由 Foschini<sup>[17]</sup>在1996年提出,之后被广泛应用于无线移动通信中,1998年 Alamouti 提<sup>[18]</sup>出一种双发单收空时分组编码(STBC),并以自己的名字为其命名。Simon<sup>[19]</sup>中讨论了激光直接调制系统 Alamouti 空时编码方案。García Zambrana<sup>[20]</sup>分析了采用开关键控(OOK)调制方式 STBC 结构的误码率(BER)。Abou-Rjeily<sup>[21]</sup>研究了正交空时编码的自由空间通信性能,得出正交空时编码可以有效提高自由空间光通信(FSO)系统性能,并且适用于 OOK 调试方式的结论。Gore 等<sup>[22]</sup>提出在接收端已知详细信道增益的情况下,使系统获得最大化编码增益和分集增益的方法,并对多发多收(MIMO)通信系统的正交空时编码算法进行了性能分析。Choqueuse 等<sup>[23]</sup>和 Via 等<sup>[24]</sup>分别对盲信道进行了编码分析和研究,其中2011年 Choqueuse 等<sup>[23]</sup>提出了一种无需信道信息的空时编码信道统计方案。2011年 Zhu 等<sup>[25]</sup>提出一种快速递归 G-STBC 方案,其通过等概率信道矩阵对 Alamouti 编码结构进行了优化,降低了运算的复杂度;Carfield 等<sup>[26]</sup>对单发单收(SISO)、多发单收(MISO)与 MIMO 空时编码光通信系统性能进行了比较,并提出  $2 \times 2$  系统可以有效降低 BER,提高可用码速率。

本文提出一种适合空间光通信的准正交空时分组编码(QOSTBC)方案,该方案具有空时编码结构所具有的较高的信道容量和较强的抗衰落特性,通过使用 QOSTBC 抑制大气信道对空间激光通信的影响,有效地降低了系统的 BER 并提高了通信系统的稳定性。

## 2 信道模型

在空间激光通信中,激光束经过大气信道会受到云、雨、雾和湍流的影响,发生散射、折射、吸收、光束漂移、光强闪烁和到达角起伏等现象,引起一定的空间损耗,损耗范围一般在  $10 \sim 40$  dB,光强分布被严重改变时,通信链路将会发生中断,中断时间最长,可达数毫秒<sup>[3]</sup>。目前国际上应用最为广泛的大气湍流模型主要有 Lognormal 模型和 Gamma-gamma 模型,这两种模型都被广泛地应用于大气建模与仿真,其中 Lognormal 模型主要用于描述弱湍

流的情形<sup>[6]</sup>; Andrews 等<sup>[27]</sup>提出 Gamma-gamma 模型可以有效地用于描述强湍流和弱湍流光强闪烁。Gamma-gamma 模型所使用的建模参数与系统实际参数更为接近,例如通信距离、通信波长和海拔高度等<sup>[28]</sup>,因此本文选用 Gamma-gamma 进行信道建模。Gamma-gamma 模型的光束强度起伏概率密度函数可以表示为

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad (1)$$

式中  $I$  表示信号光强度,  $\Gamma(\cdot)$  表示 gamma 函数,  $K$  表示贝叶斯方程解,其中参数  $\alpha$  和  $\beta$  可以表示为

$$\begin{cases} \alpha = \left\{ \exp \left[ \frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \\ \beta = \left\{ \exp \left[ \frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $\sigma_R^2$  表示闪烁方差,其数学模型为<sup>[29]</sup>

$$\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, \quad (3)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $L$  为通信距离,  $C_n^2$  为大气结构参数,其表达式为<sup>[29,30]</sup>

$$C_n^2 = 8.2 \times 10^{-16} W^2 (h/10)^{10} \exp(-h) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(h/10) + A \exp(h/0, 1), \quad (4)$$

式中  $A$  表示地面水平结构常数,  $W$  表示均方根风速,  $h$  表示海拔高度。

## 3 系统模型

基于空时编码的 MIMO 空间光通信系统,主要由信道编码、串并转换器、分集编码器、激光器及调制器、掺铒光纤放大器(EDFA)、探测器、空时译码器、并串转换器和信道译码器组成。高速串行数据被信道编码,编码后的数据经过串并转换,输出多路并行数据,对并行数据进行空时编码,将编码信号加载到调制器调制成为激光信号,调制后的光信号经过 EDFA 进行放大,放大后的光信号分别由  $M$  副发射天线同时发送。接收端使用  $N$  副接收天线分集接收,将  $N$  路分集信号分集译码,译码后信号经并串变换合并为单路高速信号,最后由信道解码还原为原始高速数据流。由于分组空时译码需要使用信道特性(CSI),因此接收端需要进行信道估计。其系统模型如图 1 所示。

对于一个有  $M$  副发射天线(激光器及光学天线)和  $N$  副接收天线(光电探测器及光学天线)的多输入多输出系统,假设系统总的发射功率为  $E$ ,每副发射天线上的发射功率等于  $M$  等分发射功率。在发射端,所有发射天线发射的信号矩阵表示为

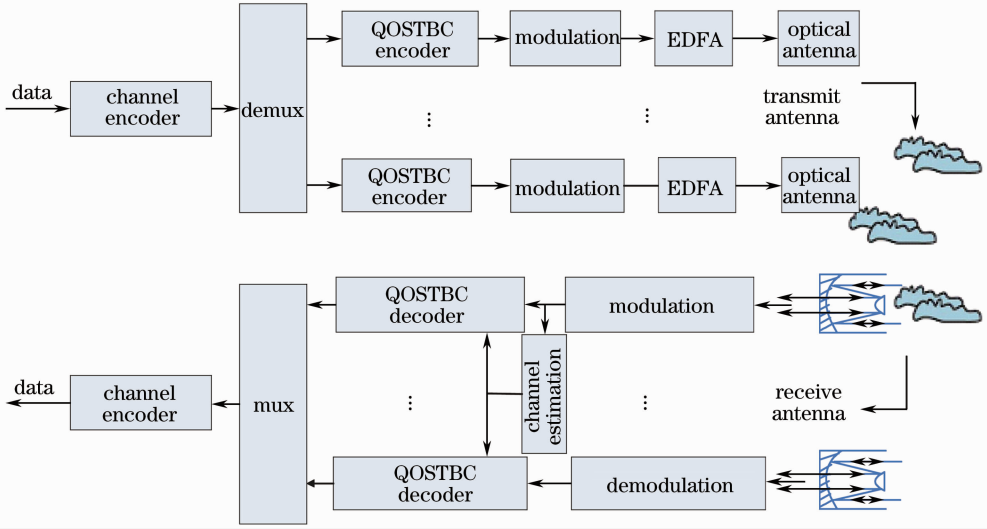


图 1 基于 QOSTBC 系统模型

Fig. 1 QOSTBC coding system model

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_2(1) & \cdots & x_M(1) \\ x_1(2) & x_2(2) & \cdots & x_M(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1(L) & x_2(L) & \cdots & x_M(L) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $x_1(1)$  表示第一副发射天线在第一个时隙发射的信号,  $L$  表示发射信号序列的长度。在接收端, 接收信号表示为

$$\mathbf{Y} = \tau \mathbf{H} \tilde{\mathbf{X}} + \mathbf{n}, \quad (6)$$

式中  $\tilde{\mathbf{X}}$  表示探测器接收符号矩阵,  $\mathbf{H}$  表示衰落系数矩阵,  $\mathbf{n}$  表示噪声矩阵,  $\tau$  表示光电探测器转换效率,  $\tau$  被定义为

$$\tau = \eta T_0 \frac{e\lambda}{hc}, \quad (7)$$

式中  $h$  表示普朗克常数,  $c$  表示光速,  $T_0$  表示探测器积分区间,  $e$  为电子电荷,  $\eta$  为光电转换量子效率。假定信道是静态衰落信道, 接收信号  $\mathbf{Y}$  可用

$$Y_i(k) = \sum_{j=1}^M \tau_{j,i} h_{i,j} x_j(k) + n_i(k) \quad (8)$$

表示, 式中  $Y_i(k)$  表示第  $k$  个时隙在第  $i$  个探测器上检测到的信号,  $x_j(k)$  表示第  $j$  个激光器发射的信号,  $h_{i,j}$  表示第  $j$  个激光器到第  $i$  个探测器间的信道衰落系数,  $n_i(k)$  表示第  $i$  个探测器所接收到的噪声。

### 3.1 空时编码方案

传统的 Alamouti 方案是为双发单收无线通信而设计<sup>[15]</sup>, 将两个发射符号  $x_1$  和  $x_2$  进行正交编码, 即在第一个时隙  $x_1$  从第一副发射天线发射,  $x_2$  从第二副发射天线发射; 在第二个时隙  $-x_2^*$  从第一副发射天线发射,  $x_1^*$  从第二副发射天线发射, 该方案系统

的码速率为 1 单位符号。发射矢量符号可以表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{bmatrix}. \quad (9)$$

接收信号用  $y_n$  表示, 第一个时隙和第二个时隙的接收信号分别用  $y_i(1)$  和  $y_i(2)$  表示:

$$\begin{cases} y_1(1) = (h_{1,1}x_1 + h_{2,1}x_2) + n_j \\ y_i(2) = (-h_{1,1}x_2^* + h_{2,1}x_1^*) + n_j \end{cases}, \quad (10)$$

$\mathbf{h}$  表示信道矩阵, 表示为

$$\mathbf{h}_{i,j} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{2,1}^* & -h_{1,1}^* \end{bmatrix}. \quad (11)$$

此时接收信号矢量为

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{2,1}^* & -h_{1,1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n}_j. \quad (12)$$

对于最佳判决条件下, 接收端译码符号为

$$(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \operatorname{argmax}_{(x_1, x_2)} P(x_1, x_2 | \mathbf{H}^H \mathbf{y}, h_{1,1}, h_{2,1}), \quad (13)$$

式中

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{2,1}^* & -h_{1,1}^* \end{bmatrix}. \quad (14)$$

假设所有输入符号是等概率的, 应用贝叶斯准则接收符号表示为

$$(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2) = \operatorname{argmax}_{(x_1, x_2)} P(\mathbf{H}^H \mathbf{y} | x_1, x_2, h_{1,1}, h_{2,1}), \quad (15)$$

式中

$$\mathbf{H}^H \mathbf{y} = \begin{bmatrix} |h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2 & 0 \\ 0 & |h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n(1) \\ n(2) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

求解接收符号与适量  $\mathbf{H}^H \mathbf{y}$  的欧式最小距离可以得到

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = \operatorname{argmin} |h_{1,1}^* y_1(1) + h_{2,1}^* y_1^*(2) - \\ \quad (|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2)x_1| \\ \tilde{x}_2 = \operatorname{argmin} |h_{2,1}^* y_1(1) - h_{1,1}^* y_1^*(2) - \\ \quad (|h_{1,1}|^2 + |h_{2,1}|^2)x_2| \end{cases} \quad (17)$$

考虑到大于两根发射天线的情况,假设通信系统使用 4 副发射天线,按照 Alamouti 编码方式,构建一种 QOSTBC 编码结构,将 4 个发射符号  $(x_1, x_2, x_3, x_4)$  进行编码构造编码矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ -x_2^* & x_1^* & -x_4^* & x_3^* \\ -x_3^* & -x_4^* & x_1^* & x_2^* \\ -x_4 & -x_3 & x_2 & x_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

由(18)式可见这是一种码速率最大分组编码,这种编码方案并不是完全正交,码矩阵的第一列和第四列分别与第二列和第三列正交,采用 4 根接收天线的接收码字可以表示为

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = \sum_{j=1}^{N_r} h_{1,j}^* y_j(1) + h_{2,j}^* y_j(2) + \\ \quad h_{3,j}^* y_j(3) + h_{4,j}^* y_j(4) \\ \tilde{x}_2 = \sum_{j=1}^{N_r} h_{2,j}^* y_j(1) - h_{1,j}^* y_j(2) + \\ \quad h_{3,j}^* y_j(3) - h_{4,j}^* y_j(4) \\ \tilde{x}_3 = \sum_{j=1}^{N_r} h_{3,j}^* y_j(1) + h_{4,j}^* y_j(2) - \\ \quad h_{1,j}^* y_j(3) - h_{2,j}^* y_j(4) \\ \tilde{x}_4 = \sum_{j=1}^{N_r} h_{4,j}^* y_j(1) - h_{3,j}^* y_j(2) - \\ \quad h_{2,j}^* y_j(3) + h_{1,j}^* y_j(4) \end{cases}, \quad (19)$$

式中的  $h_{i,j}$  表示信道衰落矩阵中的对应于第  $i$  个发射天线和第  $j$  个接收天线的元素。

### 3.2 信道容量

信道容量是指在通信系统中能够可靠传输信息时可达到的速率上限,所谓可靠传输是指可以以任意小的错误率传输信息。根据香农定理,信道容量可以定义为<sup>[20,21]</sup>

$$C = \max_{p(\mathbf{x})} \mathbf{I}(\mathbf{x}; \mathbf{y}), \quad (20)$$

式中  $\mathbf{I}(\mathbf{x}; \mathbf{y})$  是矢量  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$  之间的互信息量。分集激光通信发射系统的功率通常是平均分配的,因此在等功率分配 MIMO 激光通信系统中,假设在传输相邻码字时信道状态为静态的,在接收端存在不确定因素仅有噪声的熵,因此,信道容量可以写成<sup>[31]</sup>

$$C = \max_{p(\mathbf{x})} \mathbf{H}(\mathbf{Y}) - \mathbf{H}(\mathbf{N}). \quad (21)$$

根据系统模型,  $N$  的熵近似地表示为  $\mathbf{H}(N) = N_r \lg(\pi e)$ , 考虑到信道容量不大于熵的最大化,信道的输出熵可以表示为

$$C = \max_{\mathbf{R}_X} \lg \det(\rho \mathbf{H}^H \mathbf{R}_X \mathbf{H} + \mathbf{I}_{N_r}), \quad (22)$$

式中  $\mathbf{R}_X$  表示输入矢量的协方差矩阵,  $\mathbf{H}$  表示大气信道衰落系数矩阵,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & \cdots & h_{1,n_t} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,n_t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{n_r,1} & h_{n_r,2} & \cdots & h_{n_r,n_t} \end{bmatrix} \quad (23)$$

对于信道增益矩阵  $\mathbf{H}$  可以采用奇异分解

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^H, \quad (24)$$

式中  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  分别表示  $N_t \times N_r$  和  $N_r \times N_t$  酉矩阵,  $\mathbf{S}$  表示正对角阵,其对角元素为矩阵  $\mathbf{H}$  的奇异解。对于 MIMO 系统接收信号模型可写为

$$\mathbf{y} = \sqrt{\rho} \mathbf{x} \mathbf{S} + \mathbf{n}, \quad (25)$$

式中  $\mathbf{x} = \mathbf{x} \mathbf{U}$ ,  $\mathbf{y} = \mathbf{y} \mathbf{V}$ ,  $\mathbf{n} = \mathbf{n} \mathbf{V}$ , 由于  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  是不可逆矩阵,因此知道  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$  等同于  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}$ 。令  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$  表示矩阵  $\mathbf{H}$  的非零奇异解,其中  $m \leq \min[N_t, N_r]$ , MIMO 系统接收信号可以写成

$$\begin{cases} \tilde{y}_1 = \sqrt{\rho} \sigma_1 \tilde{x}_1 + \tilde{n}_1 \\ \tilde{y}_2 = \sqrt{\rho} \sigma_2 \tilde{x}_2 + \tilde{n}_2 \\ \vdots \\ \tilde{y}_m = \sqrt{\rho} \sigma_m \tilde{x}_m + \tilde{n}_m \end{cases} \quad (26)$$

对于采用二进制相移键控(BPSK)调制码型的大气激光通信而言,信道输入只有两个状态,即  $-1$  和  $1$ ,因此接收信号  $\mathbf{I}_{N_r}$  可以表示为

$$\mathbf{I}_{N_r} = \frac{1}{2} \sum_{x=0,1} \int p(\mathbf{y} | \mathbf{x} = \mathbf{x}) \times \lg \frac{2p(\mathbf{y} | \mathbf{x} = \mathbf{x})}{p(\mathbf{y} | \mathbf{x} = -1) + p(\mathbf{y} | \mathbf{x} = 1)} d\mathbf{y}. \quad (27)$$

MIMO 大气信道信道容量可以写成

$$C = E \left[ \lg \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right]. \quad (28)$$

令  $\mathbf{H}^H \mathbf{H} = \mathbf{W} \mathbf{\Lambda} \mathbf{W}^H$ ,  $\mathbf{W}$  表示对角酉矩阵,  $\mathbf{\Lambda}$  表示特征值对角矩阵。信道容量可以表示为

$$\begin{aligned} C &= E \left[ \lg \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right] = \\ &= E \left[ \lg \det \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{W} \mathbf{\Lambda} \mathbf{W}^H \right) \right] = \\ &= E \left\{ \lg \det \left[ \mathbf{W} \left( \mathbf{I}_{N_r} + \frac{\rho}{N_t} \mathbf{\Lambda} \right) \mathbf{W}^H \right] \right\}, \quad (29) \end{aligned}$$

式中  $I_{N_r}$  接收信号强度,  $\mathbf{H}$  为大气衰落信道矩阵,  $N_t$  为发射天线数目,  $\rho$  为信噪比(SNR)。

## 4 仿真结果

通过采用蒙特卡罗方法对正交和 QOSTBC 的空间通信系统进行仿真,采用最大似然检测,分析了信道噪声、光学效率、通信距离以及大气闪烁对信道容量和 BER 的影响。系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数列表

Table 1 Simulation parameters

Wavelength $\lambda$ /nm	1550
Modulation mode	Bpsk
Range $L$ /km	1
Altitude $h$ /m	200
Efficiency $\eta$	0.8
Receiver diameter $d$ /cm	30
Transmitter divergence angle $\theta$ / $\mu$ rad	200
Scintillation factor $A$	$1.7 \times 10^{-14}$
Wind speed $v$ /(m/s)	5
Detection sensitivity /dBm	-37
Optical coupling efficiency	0.75

系统信道容量如图 2 所示,分析了  $1 \times 1$ 、 $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$ 、 $3 \times 2$  和  $4 \times 4$  不同数目收发天线和 SNR 对系统信道容量的影响。

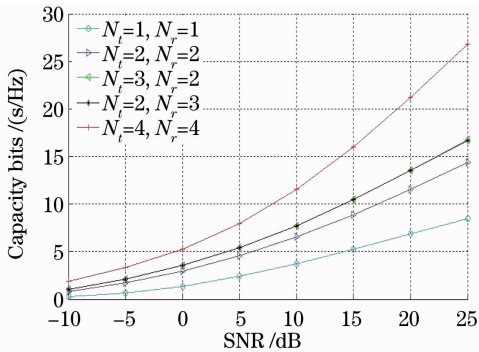


图 2 信道容量与 SNR 关系曲线

Fig. 2 Curves of channel capacity and SNR

从图 2 中可以看出,未使用分集技术的通信系统信道容量随 SNR 增加而增加,但其信道容量在所有仿真结果中性能最低;  $2 \times 2$  分集通信系统的信道容量与  $1 \times 1$  系统相比,信道容量得到了明显的增加;  $2 \times 3$  和  $3 \times 2$  系统信道容量几乎相同;  $4 \times 4$  系统信道容量最高,其信道容量与 BER 在 SNR 大于 10 时近似线性增加。说明使用分集技术可以有效地提高系统的信道容量,尤其当发射接收为  $2 \times 2$  和  $4 \times 4$  时,信道容量较不采用分集技术得到了较大的提高。

图 3 为大气衰落信道正交 Alamouti 空时编码和准正交  $4 \times 2$  空时编码性能分析,分别对  $2 \times 2$ 、 $2 \times 3$ 、 $2 \times 4$ 、 $4 \times 2$  系统进行仿真,仿真条件如表 1 所示。从图中可以看到当接收天线数目增加时,系统的 BER 得到有效改善;  $2 \times 3$  通信系统与  $2 \times 2$  通信系统相比,系统性能平均提高 4 dB;  $2 \times 4$  通信系统与  $2 \times 3$  通信系统相比,系统平均性能提升 3 dB,说明该系统有效地抑制了由于大气信道对接收信号的衰落;  $4 \times 2$  通信系统性能较  $2 \times 2$  有了大幅的提升,在相同 SNR 的情况下,性能提高了 10 dB,说明  $4 \times 2$  准正交编码方式对比正交 Alamouti 编码,可以有效地抑制大气湍流对光通信的影响。

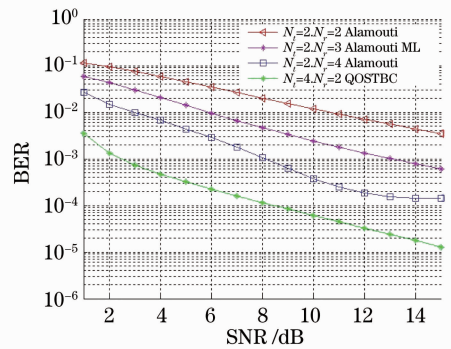


图 3 STBC 的 SNR 与 BER 曲线

Fig. 3 Curves of STBC system SNR and BER

图 4 分别对  $2 \times 2$ 、 $2 \times 4$ 、 $2 \times 6$ 、 $2 \times 8$  Alamouti 编码系统进行仿真,其中仿真条件  $A = 1.7 \times 10^{-13}$ ,  $L = 1000$  m,  $\theta = 700$   $\mu$ rad,  $d = 30$  cm,  $\lambda = 1550$ ,  $\eta = 0.8$ 。从图 4 可以看出,由于束散角和大气结构常数的变化使通信系统的 BER 发生了变化,其中  $2 \times 2$  通信系统与图 3 所示的曲线近似相同,但性能恶化了 8 dB;  $2 \times 4$  通信系统与图 3 中的曲线相比,性能下降了 2 dB,说明当接收天线数目增加时,系统抗衰落能力得到提升;  $2 \times 6$  和  $2 \times 8$  通信系统与  $2 \times 4$  通信系统相比,由于接收天线的增加,系统的 BER 也得到了改善。图 5 分别对  $4 \times 2$ 、 $4 \times 3$ 、 $4 \times 4$  QOSTBC 系统进行仿真,与图 4 中的 Alamouti 编码系统相比,采用 QOSTBC 编码方式性能更优于 Alamouti 编码系统,其中  $4 \times 2$  编码系统与图 4 所示的  $2 \times 6$  编码系统性能相近,在 SNR 为 6 dB 时,BER 平均为  $0.5 \times 10^{-2}$ ;  $4 \times 3$  系统与  $4 \times 2$  系统相比系统性能等比例提高约 5 dB; 其中  $4 \times 4$  系统性能最佳,当 SNR 大于 8 dB 时,系统 BER 小于  $10^{-5}$ 。说明使用 QOSTBC 能够有效地提高通信系统的性能,与 Alamouti 编码系统相比系统性能提高约 9 dB。



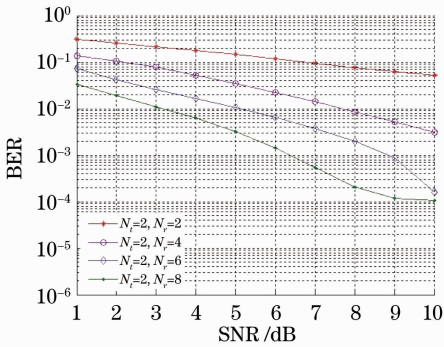


图 4 Alamouti 空时编码 SNR 与 BER 曲线

Fig. 4 Curves of Alamouti STBC coding SNR and BER

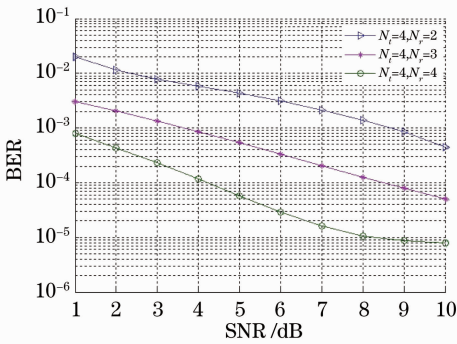


图 5 QOSTBC 的 SNR 与 BER 曲线

Fig. 5 Curves of QOSTBC's SNR and BER

## 5 结 论

提出了一种基于 QOSTBC 编码结构的空时激光通信系统,分析了该系统的信道容量及性能,讨论了 Alamouti 空时编码系统与 QOSTBC 系统 BER 性能的差异。仿真结果表明, QOSTBC 性能优于 Alamouti 空时分组编码性能,随着接收天线数目的增加,系统的信道容量随之增加, BER 近似等比例下降。与 Alamouti 编码结构相比, QOSTBC 系统性能有了明显的提高,系统性能提高约 9 dB,但编码和译码的复杂度有所提高。在今后的工作中,需要对 Alamouti 编码结构进行进一步优化,寻找一种性能更优,结构更简单的编码形式。

## 参 考 文 献

- 1 T. A. Tsiftsis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis *et al.*. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2009, **8**(2): 951~957
- 2 S. Hranilovic, F. R. Kschischang. Optical intensity-modulated direct detection channels: signal space and lattice codes[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2003, **9**(6): 1385~1399
- 3 W. O. Popoola, Z. Ghassemlooy, J. I. H. Allen *et al.*. Free-space optical communication employing subcarrier modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel [J]. *IET*

*Optoelectron*, 2008, **2**(1): 16~23

- 4 Y. Chen, L. Schmalen, H. Bülow *et al.*. Space-time coding schemes for optical MIMO[C]. 37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011, Tu. 6. A. 1
- 5 W. Lim, C. Yun, K. Kim. BER performance analysis of radio over free-space optical systems considering laser phase noise under Gamma-Gamma turbulence channels [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4479~4484
- 6 X. Zhu, J. M. Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Communications*, 2002, **50**(8): 1293~1300
- 7 X. Zhu, J. M. Kahn. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Communications*, 2003, **51**(8): 1233~1239
- 8 Yang Shiji, He Zhiping, Jia Jianjun *et al.*. Research of the transmittance of atmospheric turbulent channels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 杨世骥, 何志平, 贾建军 等. 湍流大气信道激光透射率的研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2860~2863
- 9 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Hu Hao *et al.*. Modified adaptive SVD estimating algorithm about MIMO-FSO channels [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1105001
- 徐建武, 王红星, 胡昊 等. 修正的 MIMO-FSO 信道自适应 SVD 估计算法 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1105001
- 10 Wang Yuanquan, Fang Wuliang, Tao Li *et al.*. Research of multiple-input multiple-output (MIMO) technique in multimode fiber links [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 100601
- 王源泉, 方武良, 陶理 等. 多模光纤链路中多输入多输出技术的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 100601
- 11 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Zhai Fuqi *et al.*. Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 010602
- 冷蛟锋, 郝士琦, 翟福琪 等. 无线相干光通信空间分集接收合并技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 010602
- 12 E. J. Shin, V. W. S. Chan. Optical communication over the turbulent atmospheric channel using spatial diversity [C]. Global Telecommunication Conference, IEEE, 2002, **17 - 21** (3): 2055~2060
- 13 B. Castillo-Vazquez, A. Garcia-Zambrana, C. Castillo-Vazquez. Closed-form BER expression for FSO links with transmit laser selection over exponential atmospheric turbulence channels [J]. *Electron. Letter*, 2009, **45**(23): 1185~1187
- 14 M. Uysal, J. Li, M. Yu. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over gamma gamma atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 2006, **5**(6): 1229~1233
- 15 S. Schöllmann, N. Schrammar, W. Rosenkranz. Experimental realization of  $3 \times 3$  MIMO system with mode group diversity multiplexing limited by modal noise [C]. Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, 2008, JWA68
- 16 E. Bayaki, R. Schober. On space-time coding for free-space optical systems [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2010, **58**(1): 58~62
- 17 G. J. Foschini. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas [J]. *Bell Labs Technical Journal*, 1996, **1**: 41~49
- 18 S. M. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, 1998, **16**(8): 1451~1458
- 19 M. K. Simon, V. Vilirotter. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *Wireless Communications*, 2005, **4**(1): 35~39

- 20 A. Garcia-Zambrana. Error rate performance for STBC in free-space optical communications through strong atmospheric turbulence[J]. *IEEE Communications Letters*, 2007, **11**(5): 390~392
- 21 C. Abou-Rjeily. Orthogonal space-time block codes for binary pulse position modulation[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2009, **57**(3): 602~605
- 22 D. A. Gore, A. J. Paulraj. MIMO antenna subset selection with space-time coding[J]. *IEEE Trans Sig. Process.*, 2002, **50**(10): 2580~2588
- 23 V. Choqueuse, A. Mansour, G. Burel. *et al.*. Blind channel estimation for STBC systems using higher-order statistics[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, **10**(2): 495~505
- 24 J. Via, I. Santamaria, J. Perez. Code combination for blind channel estimation in general MIMO-STBC systems [J]. *EURASIP J. Advances Signal Process.*, 2009, **2009**: 3~15
- 25 Hufei Zhu, Wen Chen, Bin Li *et al.*. A fast recursive algorithm for G-STBC[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, **59**(8): 2084~2089
- 26 M. Garfield, C. Liang, T. P. Kurzweg *et al.*. MIMO space-time coding for diffuse optical communications[J]. *Microwave and Optical Tech. Letters*, 2006, **48**(6): 1108~1110
- 27 L. C. Andrews, R. Phillips, C. Y. Hopen. Laser Beam Scitillation with Applications[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001
- 28 J. A. Anguita, I. B. Djordjevic, A. Neifela *et al.*. High-rate error-correction codes for optical atmospheric channel[C]. Free-Space Laser Communications V, 2005, **5892**: 58920v
- 29 C. Kamacioglu, Arpali, S. A. Baykal. Propagation of optical flat-topped Gaussian beam in satellite link[C]. *Electromagneites in Advanced Applications*, 2009, (14-18): 505~508
- 30 J. Anguita, I. Djordjevic, M. Neifeld. Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels [J]. *Opt. New.*, 2005, **4**(9): 586~601
- 31 T. M. Duman, A. Ghrayeb. Coding for MIMO Communication Systems[M]. New York: Joho Wiley & Sons, 2007. 52~60

栏目编辑:谢婧