

自由空间光多输入多输出系统中的差分空时码

谌娟 柯熙政 程婷

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 激光在大气中传播时会受大气湍流的影响,而恶劣的大气环境条件会使信道估计的难度增加。根据 Chadi Abou-Rjeily 的编码思想,通过引入置换矩阵代替了实数域 Alamouti 码中符号的负数形式,采用二进制脉冲位置调制,提出一种无需信道估计且适合自由空间光通信的差分空时码方案。仿真结果表明,该方法和需要信道估计的 Alamouti 码相比,可以获得相同的分集增益,比较简单而且切实可行。

关键词 光通信;差分空时码;大气湍流;二进制脉冲位置调制

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0206004

Differential Space Time Code for Free Space Optical Multiple Input Multiple Output System

Chen Juan Ke Xizheng Cheng Ting

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract Laser is always affected by atmospheric turbulence in atmosphere transmission, and channel estimation will become more difficult at poor atmospheric condition. According to Chadi Abou-Rjeily's coding idea, introducing permutation matrix instead of negative form of symbols in the real area Alamouti method, utilizing binary pulse position modulation, a differential space-time code scheme that does not require channel estimates for free space optical communication is proposed. The simulation results show that, compared with Alamouti coding which requires channel estimates, this method can obtain the same diversity gain. At the same time, it is relatively simple and more feasible in practice.

Key words optical communications; differential space-time code; atmospheric turbulence; binary pulse position modulations

OCIS codes 200.2605; 010.1330; 060.4080

1 引 言

无线光通信结合了光纤通信和微波通信的优点:传输速率高、通信容量大、保密性强并且无需频谱许可,因此成为光通信的研究热点。激光在大气中传输时易受大气湍流的影响,大气湍流所引起的大气闪烁是影响无线光通信链路传输性能的最主要因素。提高通信链路性能的一种有效手段就是为接收端信号提供冗余备份。分集可以提供时域、频域或空域的冗余,将分集和空时编码的思想引入到自由空间光通信系统中,可抑制大气湍流对通信系统

的影响^[1~3]。基于多输入多输出(MIMO)系统的空时编码是一种在空间域和时间域上联合编码的技术。自由空间光通信中的空时编码技术包括空时分组码(STBC)^[4~7]、空时格型码(STTC)^[8]和分层空时码(BLAST)^[9,10]。这些空时码在接收端都需要信道状态信息,然而恶劣的大气环境使得估计信道信息很困难,因此差分空时编码(DSTC)技术的提出有望解决这一问题。射频通信中常用的 DSTC 技术有 3 种:Tarokh 等^[11]提出的基于正交设计的差分空时技术,基于群码的差分空时调制技术^[12]和

收稿日期: 2012-07-03; **收到修改稿日期**: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、教育厅产业化培育项目(2010JC17)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(2011KTCQ01-31)资助课题。

作者简介: 谌娟(1987—),女,博士研究生,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: juan0110@126.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net

差分酉空时调制技术^[13]。这些编码技术都是基于相移键控调制(PSK)或者正交幅度调制(QAM),调制信号是信号本身和信号的负数和复数的形式,然而这并不适合于强度调制/直接检测式(IM/DD)的自由空间光通信系统。

本文参考 Chadi Abou-Rjeily^[14]提出的基于二进制脉冲位置调制(BPPM)的正交空时分组码的思想,通过引入置换矩阵代替了实数域 Alamouti 码中符号的负数形式。结合 Chadi Abou-Rjeily^[15]发明的专利的思想,提出了一种适合自由空间光通信中的 OSTC 方案,该方案编译码简单且在接收端不需要进行信道估计。通过 Matlab 软件仿真,表明差分方案和由 Simon 等^[4]提出的改进的 Alamouti 码相比有相同的分集增益,虽然性能上差一些,但是和未编码的系统相比也能有效地降低系统的误码性能,同时由于不需要进行信道估计,降低了系统的复杂性。

2 光 MIMO 的信道模型

2.1 PPM 调制时 MIMO 的信道模型

作如下假设:1)假设系统为平均功率受限系统,总功率 E_s 不变,每个激光器上的平均功率为 E_s/M ,其中 M 表示激光器的数量;2)根据 Taylor 冻结湍流大气理论,即在短间隙内湍流结构保持不变,随时间的变化仅是整个湍流模式的平移,因此可假设信道系数 h_{ji} 在连续的几个符号周期内可近似为一个常数;3)设各路信号相互独立;4)检测器采用高斯机制模型^[16],即接收端忽略背景光的影响,只考虑来自器件上热噪声的影响。

对于一个 $M \times N$ 的 MIMO 系统,即采用 M 个激光器和 N 个探测器,第 n 个探测器上接收的信号可以表示为

$$r^n = \frac{\eta I_s}{M} \sum_{i=1}^M h_{ji} x_i + v_n, \quad (1)$$

式中 x_i 表示为第 m 个激光器上发送的信号, η 为光电转换效率, I_s 为无衰落时的最大接收光强, v_n 是均值为 0、方差为 $N_0/2$ 的高斯白噪声 N_0 为噪声的平均功率谱密度, h_{ji} 表示从第 i 个激光器到第 j 个探测器的光强衰落系数,它的统计模型等于射频通信中信道增益的平方。

定义无湍流存在时任意探测器每个符号的接收电能量为

$$E_s = \frac{(\eta I_s)^2 T_s}{Q}, \quad (2)$$

式中 T_s 为字符的周期, Q 为 PPM 的调制阶数。定

义无湍流存在时每个符号的电信噪比为

$$\gamma = \frac{E_s}{N_0} = \frac{(\eta I_s)^2 T_s}{QN_0}. \quad (3)$$

2.2 大气湍流模型

光波在大气湍流中传输时由于折射率的起伏使其强度会发生起伏;在弱湍流下,应用最多的是标准对数正态分布模型^[3];而 Gamma-Gamma 分布则是能表示从弱到强湍流下的接收光强起伏特性的分布模型^[17]。Gamma-Gamma 分布的概率密度函数

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad I > 0, \quad (4)$$

式中 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为第二类修正贝塞尔函数, α 和 β 是表征闪烁指数强度大小的两个参数,定义为

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

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

式中 σ_R^2 为 Rytov 方差,即 $\sigma_R^2 = 1.23C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 。这里的 $k = 2\pi/\lambda$ 为光波数, λ 为波长, L 为传输距离,单位是 m。 C_n^2 表示的是折射结构常数。

定义闪烁指数 f_{SI} 来表示光强衰落的大小,它与 α 和 β 的关系为 $f_{SI} = 1/\alpha + 1/\beta + 1/(\alpha\beta)$ 。

Gamma-Gamma 信道模型可以描述从弱湍流到强湍流的情况,当 $\sigma_R^2 < 1$ 时,是弱湍流情况; $\sigma_R^2 \cong 1$ 时,是中度湍流情况;当 $\sigma_R^2 > 1$ 时,是强湍流情况^[18]。表 1 为不同程度的湍流下的各参数值。

表 1 不同湍流程度下的各参数值

Table 1 Parameter values under different degrees of turbulence

| Parameter | Degree of turbulence | | |
|--------------|----------------------|--------|--------|
| | Weak | Medium | Strong |
| σ_R^2 | 0.2 | 1.6 | 3.5 |
| α | 11.6 | 4.0 | 4.2 |
| β | 10.1 | 1.9 | 1.4 |
| f_{SI} | 0.19 | 0.9 | 1.12 |

3 射频中具有群结构的差分空时编码

2000 年,Huges^[12]提出了具有群结构的差分空时码:对于发射天线数为 l ,且调制星座集为 C 的系统,对于任意的 $n \geq l$,令 \mathbf{g} 为一群 $n \times n$ 的酉矩阵,对于任意的 $\mathbf{G} \in \mathbf{g}$,有 $\mathbf{G}^H \mathbf{G} = \mathbf{G} \mathbf{G}^H = \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位矩阵。假设存在一个 $l \times n$ 的矩阵 \mathbf{D} ,使得对于群中的任何一个酉矩阵 \mathbf{G} 来说, $\mathbf{D} \mathbf{G}$ 产生了一个 $l \times n$ 矩阵,且这

个矩阵的非零项是信号星座集 C 的元素。(对于所有 $G \in \mathbf{g}$) 有: $DG \in C^{l \times n}$, 则矩阵集 $D_{\mathbf{g}} = \{DG : G \in \mathbf{g}\}$ 就构成了空时群码。

集合中的每个矩阵在信号星座 C 上都为 l 根发射天线指定了长为 n 的空时传输码字。在第 k 个编码分组中, 将 $\text{lb}|\mathbf{g}|$ 个信息比特映射到群码 \mathbf{g} 中, $|\mathbf{g}|$ 表示群码 \mathbf{g} 中矩阵的数目, 并选择矩阵 G_k , $G_k \in \mathbf{g}$ 。为了初始化差分传输, 最初发送 $X_0 = D_0$ 。差分编码准则为: $X_k = X_{k-1}G_k$, $k = 1, \dots, K$ 。群结构确保了当 $X_{k-1} \in C^{l \times n}$ 时, $X_k \in C^{l \times n}$ 。

例如发射天线 $l = 2$ 用来发送两个符号 $x_1, x_2 \in C$, 则发送码矩阵形式为

$$X_k = \begin{bmatrix} x_1 & -x_2^* \\ x_2 & x_1^* \end{bmatrix}, \quad (6)$$

该码矩阵的发送信号的过程如下: 在某一时刻 t , 天线 1 发送符号 x_1 , 天线 2 发送符号 x_2 ; 在下一时刻 $t + T$, 天线 1 发送符号 $-x_2^*$, 天线 2 发送符号 x_1^* 。如选用二进制相移键控(BPSK)星座映射 $C = \{1, -1\}$, 则群码 $\mathbf{g} = \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \right\}$, 最初发送的参

考矩阵为 $D = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 。

4 自由空间光通信中的差分编译码方法

4.1 发射天线数为 2 的 DSTC 方法

在射频中的差分空时编码方案中若采用 BPSK

调制, 则(6)式中只存在对字符取负数的情况, 而在强度调制/直接检测式的自由空间光通信中, 由于处理的都是实信号, 即信道传输的光信号只有“on”和“off”两种状态, 不存在对符号取负的可能。

引用 Chadi Abou-Rjeily^[14] 提出的空时分组编码中的发送码矩阵形式为

$$C_k = \begin{bmatrix} x_{k,1} & x_{k,2}\Omega \\ x_{k,2} & x_{k,1} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $x_{k,1}$ 和 $x_{k,2}$ 为已调制信号, $\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 为置换矩阵。

采用二进制脉冲位置调制, 信号可以表示为

$$p_0 = \begin{cases} Aj, & 0 \leq t \leq T/2 \\ 0, & T/2 < t \leq T \end{cases}, \quad (8)$$

$$p_1 = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq T/2 \\ Aj, & T/2 < t \leq T \end{cases},$$

式中 A 是与发射光强相关的正实数, j 为 1×2 的单位向量, T 表示字符周期。如, 令 $x_{k,i} = p_0$, 则 $x_{k,i}\Omega = p_0\Omega = p_1 = Aj - x_{k,i}$; 相反, 令 $x_{k,i} = p_1$, 则 $x_{k,i}\Omega = p_1\Omega = p_0 = Aj - x_{k,i}$ 。因此, $x_{k,i}\Omega$ 意味着发射光信号“on”和“off”状态的反转, 这样就可以在强度调制/直接检测式的自由空间光通信中进行传输了。

在 Chadi Abou-Rjeily 提出的正交设计的空时编码方案结合文献[15]的差分思想, 得到基于 BPPM 调制的激光通信中的 DSTC 方案, 如图 1 所示。

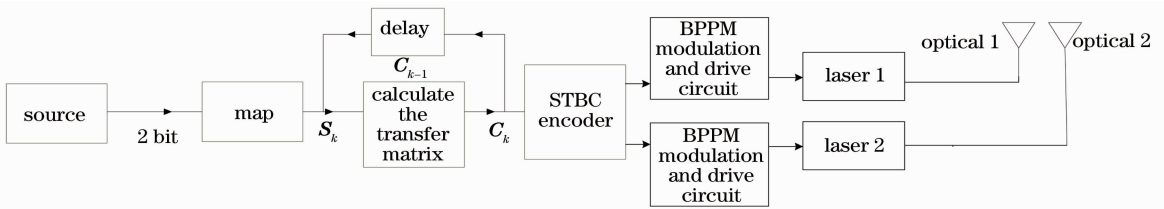


图 1 DSTC 框图

Fig. 1 DSTC diagram

差分编码过程: 发射端在最初发射一个参考调制矩阵 C_0 , 它的形式与(7)式一样, 即在最初时刻 t_0 , 天线 1 发送已调制信号 $x_{k,1}$, 天线 2 发送已调制信号 $x_{k,2}$; 在下一时刻 $t_0 + T$, 天线 1 发送已调制信号 $x_{k,2}\Omega$, 天线 2 发送已调制信号 $x_{k,1}$, 这两次发送不携带任何数据信息。当 b_1 和 b_2 两个比特信息到达编码器时, 根据映射关系 $b_1 \rightarrow s_1, b_2 \rightarrow s_2$, 其中 s_1 和 $s_2 \in \zeta$, 其中 BPPM 星座映射集合 $\zeta = \{[1 \ 0], [0 \ 1]\}$, 这两个星座映射后的符号用于构造一个矩阵:

$$S_k = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ s_1\Omega & s_2\Omega \\ s_2\Omega & s_1 \\ s_2 & s_1\Omega \end{bmatrix}, \quad (9)$$

矩阵 S_k 联合前一个发送的参考矩阵 C_{k-1} 计算下一个时间发送的码矩阵 C_k , 同时将该矩阵存储起来再作为计算后一次发送矩阵的前一个参考矩阵。差分编码准则式为

$$C_k^0 = C_{k-1}S_k,$$

$$C_k = \text{sgn}\{C_k^0 - [\min(C_k^0) \otimes \mathbf{u}_1]\}, \quad (10)$$

式中 $\mathbf{u}_1 = [1 \ 1]$; \otimes 为 Kronecker 乘积; $\text{sgn}(\mathbf{X})$ 表示给出 \mathbf{X} 的各元素的符号值的矩阵, 如果元素为零和正数, 则符号值分别等于 0 和 1, 如果元素为负数, 则符号值为 -1; $\min(\mathbf{X})$ 是矩阵, 该矩阵给出了矩阵 \mathbf{X} 的一行中连续两个元素的较小值。由于 $\min(\mathbf{C}_k^0) \otimes \mathbf{u}$ 的操作使得它与矩阵 \mathbf{C}_k^0 是同样大小的矩阵, 且该矩阵里的每一个元素总是小于等于矩阵 \mathbf{C}_k^0 中对应位置上的元素, 即 $\mathbf{C}_k^0 - [\min(\mathbf{C}_k^0) \otimes \mathbf{u}]$ 里的元素总是大于或者等于零。因此通过运用 sgn 函数使得发送的码矩阵 \mathbf{C}_k 中只有 0 和 1, 其中 1 表示对应的位置上有幅度为 A 的光脉冲。每一次分组来的两个比特的信息都映射成矩阵 \mathbf{S}_k 联合前一个矩阵 \mathbf{C}_{k-1} , 根据(10)式计算出下一个发送的码矩阵 \mathbf{C}_k , 它的发送信号的过程同 \mathbf{C}_0 是一样的, 重复上述过程直到数据帧的结尾。该编码方式保证了每次发送的码矩阵 \mathbf{C}_k 在任意一个字符周期 T 内至少有一个天线是发送光脉冲信号的, 即任意时刻至少有一个天线是发送信息的。

4.2 单个探测器接收的译码

从编码方法可以看出, 矩阵 \mathbf{S}_k 代表发射的数据信息, 译码时将 \mathbf{S}_k 译出来, 再将该矩阵逆映射得信息比特。

假定接收端探测器数目为 1, 则在时刻 t 与 $t+T$ 的接收信号由(1)式可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{k,1} &= \frac{\eta I_s}{2} (h_{11} \mathbf{x}_{k,1} + h_{12} \mathbf{x}_{k,2}) + \mathbf{v}_{k,1}, \\ \mathbf{r}_{k,2} &= \frac{\eta I_s}{2} (h_{11} \mathbf{x}_{k,2} \boldsymbol{\Omega} + h_{12} \mathbf{x}_{k,1}) + \mathbf{v}_{k,2}, \end{aligned} \quad (11)$$

将(11)式改写成矩阵形式为

$$\mathbf{R}_k = \frac{\eta I_s}{2} \mathbf{H} \mathbf{C}_k + \mathbf{V}_k, \quad (12)$$

式中 $\mathbf{R}_k = [\mathbf{r}_{k+1} \ \mathbf{r}_{k+2}]$, $\mathbf{C}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{k,1} & \mathbf{x}_{k,2} \boldsymbol{\Omega} \\ \mathbf{x}_{k,2} & \mathbf{x}_{k,1} \end{bmatrix}$, $\mathbf{H} = [h_{11} \ h_{12}]$ 。因此全部的接收序列可以表示为

$$\mathbf{R} = [\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \dots, \mathbf{R}_K], \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (13)$$

对 \mathbf{S}_k 译码时, 需知当前接收的信息块 \mathbf{R}_k 和前一接收信息块 \mathbf{R}_{k-1} 联合译码, 由假设条件 2) 可假设光强衰落系数矩阵 \mathbf{H} 在连续的两个发送码矩阵 (4 个符号周期) 内保持不变。

前一块时间内接收的信息矩阵 \mathbf{R}_{k-1} 为

$$\mathbf{R}_{k-1} = \frac{\eta I_s}{2} \mathbf{H} \mathbf{C}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1}, \quad (14)$$

基于当前接收信号矩阵 \mathbf{R}_k 和前一接收信号矩阵

\mathbf{R}_{k-1} 的译码式为

$$\begin{aligned} \{\mathfrak{s}_1, \mathfrak{s}_2\} &= \arg \min_{s_1, s_2 \in \zeta} \|\mathbf{R}_k - \mathbf{R}_{k-1} \mathbf{S}_k\|_{\text{F}}^2, \\ \zeta &= \{[1 \ 0], [0 \ 1]\}, \end{aligned} \quad (15)$$

式中 \mathbf{S}_k 即为前面的 (9) 式。 $\|\cdot\|_{\text{F}}^2$ 为矩阵的 Frobenius 范数 (也叫 Euclid 范数)。

将(15)式依据 Frobenius 范数的性质 $\|\mathbf{X}\|_{\text{F}}^2 = \text{tr}(\mathbf{X}^H \mathbf{X}) = \text{tr}(\mathbf{X} \mathbf{X}^H)$ 展开, 其中 tr 表示对 N 阶矩阵取迹操作。因为 \mathbf{S}_k 代表发射的数据信息, 因此删除与 \mathbf{S}_k 无关的项, 则最终译码式为

$$\begin{aligned} \{\mathfrak{s}_1, \mathfrak{s}_2\} &= \arg \max_{s_1, s_2 \in \zeta} \text{tr}(\mathbf{R}_{k-1} \mathbf{S}_k \mathbf{R}_k^H), \\ \zeta &= \{[1 \ 0], [0 \ 1]\}, \end{aligned} \quad (16)$$

将估计出的 $\mathfrak{s}_1, \mathfrak{s}_2$ 逆映射得发送的信息比特。

4.3 多个探测器接收的译码

假定接收端探测器数目为 N , 则在接收端的第 k 个块时间的第一个符号时间和第二个符号时间通过等增益合并来自 n 个接收孔径的信号, 将(11)式代入得

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_{k,1} &= \sum_{n=1}^N \mathbf{r}_{k,1}^n = \frac{\eta I_s}{2} \left(\sum_{n=1}^N h_{n1} \mathbf{x}_{k,1} + \sum_{n=1}^N h_{n2} \mathbf{x}_{k,2} \right) + \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{k,1}^n, \\ \tilde{\mathbf{r}}_{k,2} &= \sum_{n=1}^N \mathbf{r}_{k,2}^n = \frac{\eta I_s}{2} \left(\sum_{n=1}^N h_{n1} \mathbf{x}_{k,2} \boldsymbol{\Omega} + \sum_{n=1}^N h_{n2} \mathbf{x}_{k,1} \right) + \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{k,2}^n, \end{aligned} \quad (17)$$

式中 h_{n1} 和 h_{n2} 分别表示从激光器 1 和 2 到第 n 个探测器的路径增益。

将(17)式改写成矩阵形式为

$$\tilde{\mathbf{R}}_k = \frac{\eta I_s}{2} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{C}_k + \mathbf{V}_k, \quad (18)$$

式中 $\tilde{\mathbf{R}}_k = [\tilde{\mathbf{r}}_{k+1} \ \tilde{\mathbf{r}}_{k+2}]$, $\tilde{\mathbf{H}}$ 为信道增益矩阵, $\tilde{\mathbf{H}} = \sum_{n=1}^N \mathbf{H}_n$, $\mathbf{H}_n = [h_{n1} \ h_{n2}]$, \mathbf{C}_k 见 (7) 式, $\mathbf{V}_k = \left[\sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{k,1}^n \ \sum_{n=1}^N \mathbf{v}_{k,2}^n \right]$ 。

同样假定路径增益系数 $\tilde{\mathbf{H}}$ 在连续的两个发送码矩阵内保持不变。则第 k 个接收信号矩阵的前一个接收信号矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_{k-1}$ 为

$$\tilde{\mathbf{R}}_{k-1} = \frac{\eta I_s}{2} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{C}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1}. \quad (19)$$

采用和接收端探测器数目为 1 的译码方法原理相同, 即(16)式中将 $\mathbf{R}_k, \mathbf{R}_{k-1}$ 分别换成 $\tilde{\mathbf{R}}_k, \tilde{\mathbf{R}}_{k-1}$ 即可。

5 Matlab 软件仿真分析

为了满足前面分析的假设条件,即各路信号相互独立。当激光波长 $\lambda=1550\text{ nm}$,传输距离为 $Z=10\text{ km}$,光束的发散角 $\theta=50\text{ }\mu\text{rad}$ 时,接收机之间的距离满足 $12.45\sim 50\text{ cm}$,可认为各接收孔径上的接收信号是相互独立的。

假设系统总功率 E_s 归一化为 1,信道参数在连续的两个发送码矩阵块内保持不变,在接收端未知信道参数的情况下,利用 Monte-Carlo 方法进行了仿真。仿真参数 $\eta=0.5$,采用 BPPM 调制方式。其中表示湍流的强弱是由闪烁因子的大小所决定的,如表 1 所示。图 2 为 Gamma-Gamma 分布模型下 $f_{\text{SI}}=0.9$ 时, $2\times 1, 2\times 2, 2\times 3$ 系统下的 DSTC 的误码率(BER)。图 3 为 Gamma-Gamma 分布模型下 $f_{\text{SI}}=1.12$ 时, $2\times 1, 2\times 2, 2\times 3$ 系统下的差分空时编码的误码率。在闪烁因子为 $f_{\text{SI}}=0.9$ 时通过和未编码的 $1\times 1, 1\times 2$ 系统及改进的 Alamouti 码(假定接收端已知理想的信道状态信息)在 $2\times 1, 2\times 2$ 系统下的误码率进行比较,仿真结果如图 4 所示。

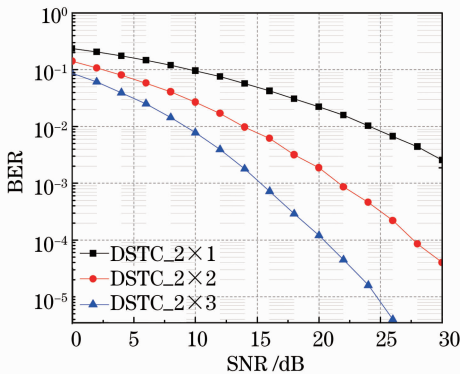


图 2 $f_{\text{SI}}=0.9$ DSTC 的误码率

Fig. 2 $f_{\text{SI}}=0.9$ BER with DSTC

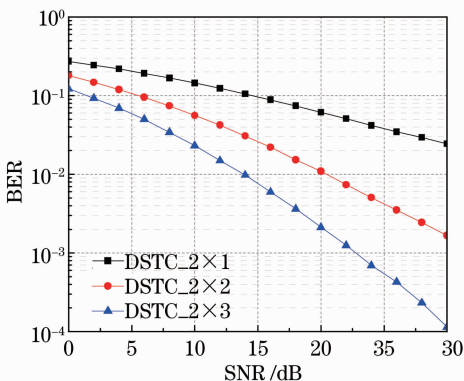


图 3 $f_{\text{SI}}=1.12$ DSTC 的误码率

Fig. 3 $f_{\text{SI}}=1.12$ BER with DSTC

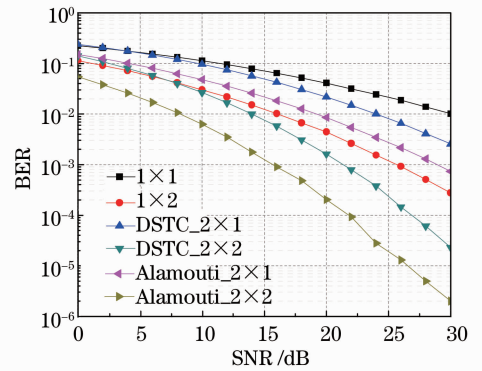


图 4 $f_{\text{SI}}=0.9$ DSTC 和改进的 Alamouti 码的误码率

Fig. 4 $f_{\text{SI}}=0.9$ BER with DSTC and Alamouti coding

从图 2 可以看出,随着接收孔径数目的增加,提出的 DSTC 方案的性能有很大的改善。图 3 所呈现的规律与图 2 相同,区别在于在不同的闪烁因子下,系统误码性能的改善量有所差异。图 4 可以看出 DSTC 方法和改进的 Alamouti 编码方法的性能曲线平行,这说明差分方案可以实现和改进的 Alamouti 编码完全的发射分集,由于差分方案没有进行信道估计,因此和改进的 Alamouti 编码相比性能上要差一些,在误码率为 10^{-4} 下, 2×2 系统的差分编码和改进的 Alamouti 编码相比约差 5 dB,但是提出的差分编码方案的 $2\times 1, 2\times 2$ 系统明显优于未使用编码的 $1\times 1, 1\times 2$ 系统。

6 结 论

采用一种置换矩阵的思想替换了改进的 Alamouti 码中对符号求补码的过程,提出一种适合自由空间光通信的 BPPM 的 DSTC 方法,利用仿真实验进一步验证了该方法的可行性。从译码方法可以看出,该方法避免了在接收端进行信道估计运算。仿真结果表明:在系统总功率不变的情况下,该编码方法和改进的 Alamouti 方案相比,有相同的分集增益,由于没有进行信道估计,降低了系统的复杂性,虽然性能上要差一些,但是和未使用编码的系统相比还是能有效地降低系统的误码率,克服大气湍流所产生的闪烁效应。

参 考 文 献

- 1 S. M. Haas, J. H. Shapiro, V. Tarokh. Space-time codes for wireless optical communications[J]. *EURASIP J. Appl. Signal Process.*, 2002, **3**(18): 1~11
- 2 S. M. Navidpour, M. Uysal, M. Kavehrad. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2007, **6**(8): 2813~2819
- 3 S. G. Wilson, M. Brandt-Pearce, Q. Cao *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM[J]. *IEEE Trans.*

- Commun., 2005, **53**(8): 1402~1412
- 4 M. K. Simon, V. Vlnrotter. Alamouti-type space-time coding for free-space optical communication with direct detection [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2005, **4**(1): 35~39
- 5 Wang Huiqin, Ke Xizheng, Zhao Li. Based on orthogonal space-time block coding MIMO free space optical communication [J]. *Scientia Sinica Informations*, 2009, **39**(8): 896~902
王惠琴, 柯熙政, 赵黎. 基于正交空时块编码的MIMO自由空间光通信[J]. *中国科学 信息科学*, 2009, **39**(8): 896~902
- 6 Xu Jianwu, Wang Hongxing, Hu Hao *et al.*. Encoding and decoding method of orthogonal space time block code in free space optical communication systems [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0105004
徐建武, 王红星, 胡昊等. 大气无线光通信系统中一种正交空时分组码编译码方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0105004
- 7 Wu Pengfei, Ke Xizheng, Liang Wei. A modified blind multi-user detection algorithm for wireless optical code division multiple access systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206005
吴鹏飞, 柯熙政, 梁薇. 无线光码分多址中一种改进的盲多用户检测算法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0206005
- 8 Ke Xizheng, Xie Mengqi, Gao Haitao *et al.*. Free space optical communication based on space-time trellis coding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(4): 1022~1027
柯熙政, 解孟其, 高海涛等. 自由空间光通信中的空时网格码[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(4): 1022~1027
- 9 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space-time [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878
王惠琴, 柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 874~878
- 10 Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Li Yongjun *et al.*. Free space optical multiple-input multiple-output communication based on intensity superposition code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706002
赵顾颢, 赵尚弘, 李勇军等. 基于强度叠加编码的空间光多输入多输出通信[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706002
- 11 V. Tarokh, H. Jafarkhani. A differential detection scheme for transmit diversity [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2000, **18**(7): 1169~1174
- 12 B. L. Huges. Differential space-time modulation [J]. *IEEE. Trans. Inform. Theory*, 2000, **46**(7): 2567~2578
- 13 B. M. Hochwald, W. Sweldens. Differential unitary space-time modulation [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2000, **48**(12): 2041~2052
- 14 Chadi Abou-Rjeily. Orthogonal space-time block codes for binary pulse position modulation [J]. *IEEE. Trans. Commun.*, 2009, **57**(3): 602~605
- 15 Atomic Energy Council. Difference Space-Time Coding Method [P]. China Patent: ; 200910134688.1, [2009-9-9]
原子能委员会. 差分空时编码方法[P]. 中国专利: 200910134688.1, [2009-9-9]
- 16 N. Letzepis, I. Holl, W. Cowley. The Gaussian free space optical MIMO channel with Q-ary pulse position modulation [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2008, **7**(5): 1744~1753
- 17 Murat Uysal, Meng Yu. Error rate performance analysis of coded free-space optical links over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channels [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2006, **5**(6): 1229~1233
- 18 Zixiong Wang, Wende Zhong, Chinlon Lin. Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique [J]. *IEEE Photon. Journal*, 2009, **1**(6): 277~285

栏目编辑: 王晓琰