

# 基于 LDPC 码的分集接收系统性能研究

刘加林<sup>1,2</sup> 郝士琦<sup>1,2</sup> 周建国<sup>1,2</sup> 王勇<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 电子工程学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)  
(<sup>2</sup> 电子工程学院 安徽省电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要** 为了抑制大气湍流对大气光通信系统性能的影响,将低密度奇偶校验(LDPC)码与多输入多输出技术结合,推导了最大比合并、等增益合并和选择合并三种合并方式下单输入多输出(SIMO)系统译码初始化计算公式,并比较了系统误码性能。仿真结果表明,基于 LDPC 编码的大气光通信 SIMO 系统误码性能优于 SISO 系统;不同的方式下 SIMO 系统的误码性能不同,信噪比一定时,最大比合并方式的系统误码率最低,等增益合并方式次之;在发射天线数一定时,随着接收天线数增加,系统误码率降低,对大气光通信的系统设计与理论研究具有一定的指导意义。

**关键词** 光通信;分集接收;低密度奇偶校验码;译码初始化;误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.100604

## Performance Study of the Diversity Reception System Based on LDPC Codes

Liu Jialin<sup>1,2</sup> Hao Shiqi<sup>1,2</sup> Zhou Jianguo<sup>1,2</sup> Wang Yong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute,  
Hefei, Anhui 230037, China  
<sup>2</sup> Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Electronic Engineering Institute,  
Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract** In order to reduce the influence of atmospheric turbulence on the performance of atmospheric optical communication system, low-density parity-check (LDPC) codes combined with multiple-input multiple-output technologies is applied. Decoding initialization formulas of single-input multiple-output (SIMO) system are derived in the forms of maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC) and selection combining, the system bit-error-rate (BER) performances are compared. The simulation results show that the atmospheric optical communication SIMO system of LDPC coding has better BER performance than that in SISO system; error performance of SIMO system differs with different combining schemes; the system in MRC has the lowest bit error rate followed by system in EGC with the same signal-to-noise ratio; with the increasing number of receiving antennas in a certain number of transmitting antennas, the BER will be decreased. So, it has some significance in the design of atmospheric optical communication system and theoretical research.

**Key words** optical communications; diversity receiving; low-density parity-check codes; decoding initialization; bit error rate

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 010.1330

## 1 引言

大气光通信(FSO)因具有不需要申请频谱、安全保密、信息容量大、设备尺寸小和功耗低等优点而备受关注。然而,大气湍流造成的光强起伏造成接收机误码率的增加,降低了整个通信系统的性能,限制了大气

收稿日期: 2013-05-28; 收到修改稿日期: 2013-06-05; 网络出版日期: 2013-08-19

基金项目: 青年科学基金(60902017)、安徽省自然科学基金(1308085MF83)

作者简介: 刘加林(1988—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: liujialin909@126.com

导师简介: 郝士琦(1963—),女,硕士,教授,主要从事卫星通信、无线光通信方面的研究。E-mail: liu\_hsq@126.com

(通信联系人)

激光通信技术的广泛应用。

多输入多输出(MIMO)系统因其能抑制大气湍流带来的影响而得到广泛关注<sup>[1-2]</sup>,为了充分发挥MIMO系统性能,接收端的检测技术至关重要。文献[3-4]对FSO-MIMO系统的检测算法进行了研究,其中文献[3]提出了一种基于Turbo码的分层空时码(BLAST)系统,接收端采用软输入软输出迭代检测译码方案,获得了很好的性能。低密度奇偶校验(LDPC)码是一种基于稀疏校验矩阵的线性分组码,与RS码、Turbo码相比,具有可进行完全并行操作、吞吐量大、高速译码潜力、实用灵活和较低的错误平底等优点<sup>[2,5]</sup>,王惠琴等<sup>[2,6]</sup>的研究表明LDPC码在大气激光通信中具有良好的纠错性能。然而,将LDPC码与MIMO系统结合运用到大气光通信中的研究鲜见报道。文献[7]研究了基于OOK调制与LDPC编码的发射分集无线光通信系统性能,发射端分别采用重复编码与空时编码。在收发天线数乘积相同的条件下,接收分集系统性能优于发射分集,而接收分集可以通过合并技术来实现,文献[8-9]比较了无线光通信分集接收常用的三种合并技术。

采用脉冲位置调制(PPM)调制方式,建立了LDPC+PPM+MIMO系统模型,对系统译码初始化问题进行研究,并对最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)和选择合并(SC)三种合并技术下系统的误码性能进行了比较。

## 2 FSO-MIMO 系统模型

图1给出了基于LDPC码的大气激光通信MIMO系统结构框图。系统方案的工作过程可描述为:输入信息比特经LDPC编码与调制器调制后,通过发射机将信号发送至大气信道;在接收端,接收机根据调制与编码方式进行相应的解调与译码得到输出信息比特。其中解调器实现软解调,即计算译码初始化信息。

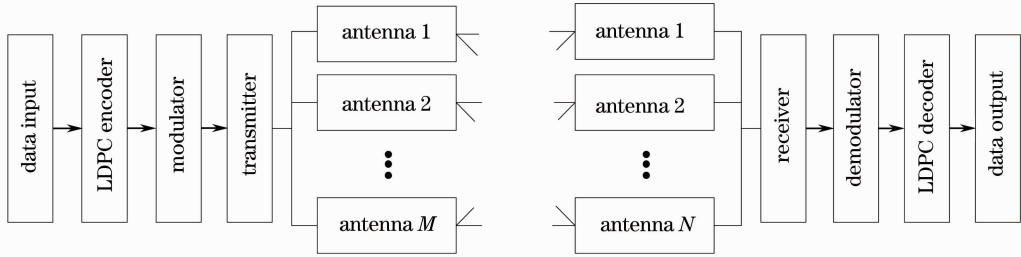


图1 基于LDPC码的大气光通信MIMO系统框图

Fig. 1 MIMO system block diagram of atmospheric optical communication based on LDPC codes

设发送端天线数为 $M$ ,接收端天线数为 $N$ ,发送信号为 $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_M(t)]^T$ , $X_m(t)$ 是第 $m$ 个激光器发送的信号;接收信号为 $Y(t) = [Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_N(t)]^T$ , $Y_n(t)$ 是第 $n$ 个探测器接收的信号。大气激光通信主要受到大气衰减和大气湍流的影响,其中大气衰减主要影响光通信系统的通信距离,而湍流效应会使光波参量在传输过程中随机改变,影响通信质量。因此,主要考虑湍流效应带来的影响,而湍流大气的相干长度在厘米量级,发射天线和接收天线之间的距离只需在厘米量级即可使不同传输信道之间的衰落特性相互独立。则MIMO系统的信道模型可表示为

$$Y(t) = \mathbf{R}\mathbf{H}(t)X(t) + N(t), \quad (1)$$

式中 $R$ 为探测器光电转换效率; $N(t) = [N_1(t), N_2(t), \dots, N_N(t)]^T$ ,为背景噪声、光电转换过程以及接收机电路引入的噪声,可认为是独立同分布加性高斯白噪声,均值为零,噪声方差为 $N_0/2$ ; $\mathbf{H}(t)$ 为 $N \times M$ 的信道矩阵,即

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1M} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N1} & h_{N2} & \cdots & h_{NM} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

矩阵元素 $h_{mn}$ 表示第 $m$ 个激光器到第 $n$ 个探测器之间的信道增益,在大气弱湍流信道中满足对数正态分布

$$p(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi h\sigma_R}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_R^2} \left(\ln h + \frac{\sigma_R^2}{2}\right)^2\right], \quad (3)$$

在平面波条件下,对数强度方差  $\sigma_R$  满足

$$\sigma_R^2 = 1.23(2\pi/\lambda)^{7/6} C_n^2 d^{11/6}, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为波长,  $C_n$  为大气折射率结构常数,  $d$  为通信距离。

### 3 基于 LDPC 码的分集接收系统译码初始化

LDPC 编码系统一般采用置信传播(BP)译码算法,需要在接收端计算译码初始化信息,不同的调制方式对应的译码初始化信息不同,而结合 MIMO 技术初始化信息计算将更加复杂。MIMO 技术分为发射分集与接收分集,发射分集涉及到空时编码技术(本文暂不考虑),接收分集可通过不同的合并方式来实现。相对于 OOK 调制,PPM 调制应用在无线激光通信中具有更好的误比特性能。因此,采用 PPM 调制方式,推导了单输入单输出(SISO)系统中 LDPC 码 BP 译码初始化公式,进而分析了单输入多输出(SIMO)系统初始化问题。

#### 3.1 SISO 系统译码初始化

PPM 是利用脉冲的相对位置来传递信息的一种调制方式,其原理是将  $n$  个信息比特时间分成  $L(L = 2^n)$  等份,每等份称为一个时隙,在一个符号时间内(称为一帧)的某个时隙发出一个脉冲。定义  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  是 PPM 一帧对应的输入二进制比特信息,则相应的脉冲位置记为

$$d = 1 + \sum_{i=1}^n s_i \cdot 2^{n-i}, \quad (1 \leq d \leq L) \quad (5)$$

式中  $S_c$  表示所有可能的  $S$  中  $s_i = c$  的集合,  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_L\}$  是经 PPM 调制后发送的一帧信息,与发送端每个 PPM 帧有  $L$  个时隙相对应,接收端每帧是一个  $L$  维向量,定义为  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_L\}$ ,  $L_0(s_i)$  是第  $i$  个比特的软信息,即第  $i$  个比特的译码初始化信息,则

$$L_0(s_i) = \ln \frac{p(s_i = 0 | Y)}{p(s_i = 1 | Y)}, \quad (6)$$

其中

$$p(s_i = c | Y) = \sum_{S_f \in S_{ic}} p(S_f | Y), \quad (7)$$

对于任意的二进制比特序列  $S_w, 1 \leq w \leq L$ ,其后验概率为

$$p(S_w | Y) = \frac{p(Y | S_w) p(S_w)}{p(Y)} = \frac{p(Y | S_w) p(S_w)}{\sum_{j=1}^L p(Y | S_j) p(S_j)}, \quad (8)$$

而  $p(S_w) = p(S_j) = 1/L$ ,所以

$$p(S_w | Y) = \frac{p(Y | S_w)}{\sum_{j=1}^L p(Y | S_j)}, \quad (9)$$

由信道模型可知,PPM 帧第  $i(i=1, 2, \dots, L)$  个时隙接收的软输出信号  $y_i$  的概率密度函数满足

$$p(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(y_i - Rh_i x_i)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (10)$$

针对有脉冲与无脉冲的情况,(10)式的具体形式是不同的,记有脉冲时的概率密度函数为  $p_s(y)$ ,无脉冲时的概率密度函数为  $p_n(y)$ ,则

$$\begin{cases} p_s(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{y^2}{N_0}\right) \\ p_n(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(y - Rh)^2}{N_0}\right] \end{cases}, \quad (11)$$

定义 PPM 帧第  $i$  个时隙的似然函数为

$$L_i = p_s(y_i)/p_n(y_i) = \exp\left[\frac{2y_iRh_i - (Rh_i)^2}{N_0}\right], \quad (12)$$

每个  $L$  时隙的 PPM 帧由一个有脉冲的时隙和  $L-1$  个没有脉冲的时隙组成,假设每个软输出是相互独立的,可以把  $p(Y|S_w)$  分为一个有脉冲的概率密度函数和  $L-1$  个没有脉冲的概率密度函数

$$p(Y | S_w) = p_s(y_d) \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq d}}^L p_n(y_i) = \frac{p_s(y_d)}{p_n(y_d)} \prod_{i=1}^L p_n(y_i), \quad (13)$$

将(12)式、(13)式代入(9)式得到

$$p(S_w | Y) = \frac{p(Y | S_w)}{\sum_{j=1}^L p(Y | S_j)} = \frac{L_d \prod_{i=1}^L p_n(y_i)}{\sum_{j=1}^L [L_j \prod_{i=1}^L p_n(y_i)]} = \frac{L_d}{\sum_{j=1}^L L_j}, \quad (14)$$

将(14)式代入(6)式得到

$$L_0(s_i) = \ln \frac{p(s_i = 0 | Y)}{p(s_i = 1 | Y)} = \ln \frac{\sum_{S_{w1} \in S_{i0}} p(S_{w1} | Y)}{\sum_{S_{w2} \in S_{i1}} p(S_{w2} | Y)} = \ln \sum_{S_{w1} \in S_{i0}} L_d - \ln \sum_{S_{w2} \in S_{i1}} L_d, \quad (15)$$

以 2-PPM 为例,得到译码初始化信息为

$$L_0(s) = \ln \sum_{S_{w1} \in S_{i0}} L_d - \ln \sum_{S_{w2} \in S_{i1}} L_d = \ln L_1 - \ln L_2. \quad (16)$$

### 3.2 SIMO 系统译码初始化

对于 SIMO 系统:令  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)^T$  表示某一帧时间内的  $N$  个接收机的软输出序列,其中  $Y_n$  是第  $n$  个探测器接收的信号:

$$Y_n = Rh_{nm}X_m + N_n,$$

对  $N$  路信号采取不同的接收合并方式,得到的接收信号  $Y$  不同,相应的译码后系统误码性能不同。下面分别讨论 MRC、EGC、SC 三种合并方式下 LDPC 译码初始化信息计算。

#### 1) 选择合并

选择合并是指检测所有分集支路的信号,选择其中信噪比最高的那个支路作为合并器的输出。在选择合并器中,加权系数只有一项为 1,其余为 0。选择合并后的接收信号为

$$Y = Y_n, h_{mm} = \max(h_{n1}, h_{n2}, \dots, h_{nM}), \quad (17)$$

当发送信息比特为 0 时,  $y = N$ ; 发送信息比特为 1 时,  $y = Rh_{mm} + N$ , 对应的概率密度函数为

$$\begin{cases} p_s^{\text{sc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left(-\frac{y^2}{N_0}\right) \\ p_n^{\text{sc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} \exp\left[-\frac{(y - Rh_{mm})^2}{N_0}\right] \end{cases}, \quad (18)$$

则时隙  $i$  处的似然函数为

$$L_i^{\text{sc}} = p_s^{\text{sc}}(y)/p_n^{\text{sc}}(y) = \exp\left[\frac{2y_nRh_{mm} - (Rh_{mm})^2}{N_0}\right], \quad (19)$$

将(19)式代入(15)式得到基于选择合并法的 SIMO 系统的译码初始化信息为

$$L_0^{\text{sc}}(s_i) = \ln \sum_{S_{w1} \in S_{i0}} L_d^{\text{sc}} - \ln \sum_{S_{w2} \in S_{i1}} L_d^{\text{sc}}. \quad (20)$$

#### 2) 等增益合并

等增益合并无需对信号加权,各支路的信号是等增益相加的,等增益合并后的接收信号为

$$Y = \sum_{n=1}^N Y_n = \sum_{n=1}^N (Rh_{nm}X_m + N_n), \quad (21)$$

当发送信息比特为 0 时,  $y = \sum_{n=1}^N N_n$ ; 发送信息比特 1 时,  $y = \sum_{m=1}^N (Rh_{mm} + N_n)$ , 对应的概率密度函数为

$$\begin{cases} p_s^{\text{egc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi NN_0}} \exp\left(-\frac{y^2}{NN_0}\right) \\ p_n^{\text{egc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi NN_0}} \exp\left[-\frac{\left(y - \sum_{n=1}^N Rh_{nm}\right)^2}{NN_0}\right] \end{cases}, \quad (22)$$

则时隙  $i$  处的似然函数为

$$L_i^{\text{egc}} = p_s^{\text{egc}}(y)/p_n^{\text{egc}}(y) = \exp\left[\frac{2y_n R \sum_{n=1}^N h_{nm} - \left(R \sum_{n=1}^N h_{nm}\right)^2}{NN_0}\right], \quad (23)$$

将(23)式代入(15)式得到基于等增益合并法的 SIMO 系统的译码初始化信息为

$$L_0^{\text{egc}}(s_i) = \ln \sum_{S_{w1} \in S_{i0}} L_d^{\text{egc}} - \ln \sum_{S_{w2} \in S_{i1}} L_d^{\text{egc}}. \quad (24)$$

### 3) 最大比合并

最大比合并方式对多路信号进行加权合并,合并信号为

$$Y = \sum_{n=1}^N \omega_n Y_n, \quad (25)$$

利用施瓦茨不等式,可以证明当加权系数  $\omega_n = A_n/N_n$  时,分集增益后的信噪比达到最大值<sup>[10]</sup>。其中,  $A_n$ 、 $N_n$  分别表示第  $n$  个分集支路的信号幅度与噪声功率。在噪声功率一定时,加权系数与信号幅度成正比,最大比合并后的接收信号表示为

$$Y = \sum_{n=1}^N Rh_{nm} Y_n = \sum_{n=1}^M Rh_{nm} (Rh_{nm} X_n + N_n), \quad (26)$$

当发送信息比特为 0 时,  $y = \sum_{n=1}^N N_n$ ; 发送信息比特 1 时,  $y = \sum_{n=1}^N Rh_{nm} (Rh_{nm} + N_n)$ , 对应的概率密度函数为

$$\begin{cases} p_s^{\text{mrc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi NN_0}} \exp\left(-\frac{y^2}{NN_0}\right) \\ p_n^{\text{mrc}}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi NN_0}} \exp\left\{-\frac{\left[y - \sum_{m=1}^M (Rh_{nm})\right]^2}{\sum_{n=1}^N (Rh_{nm})^2 N_0}\right\} \end{cases}, \quad (27)$$

则时隙  $i$  处的似然函数为

$$L_i^{\text{mrc}} = p_s^{\text{mrc}}(y)/p_n^{\text{mrc}}(y) = \exp\left\{\frac{2y_n \sum_{m=1}^M (Rh_{nm}) - \left[\sum_{m=1}^M (Rh_{nm})\right]^2}{\sum_{n=1}^N (Rh_{nm})^2 N_0}\right\}, \quad (28)$$

将(28)式代入(15)式得到基于最大比合并法的 SIMO 系统的译码初始化信息

$$L_0^{\text{mrc}}(s_i) = \ln \sum_{S_{w1} \in S_{i0}} L_d^{\text{mrc}} - \ln \sum_{S_{w2} \in S_{i1}} L_d^{\text{mrc}}. \quad (29)$$

## 4 仿真与分析

在信道状态信息已知的条件下,利用 Monte Carlo 方法分析弱湍流环境下基于 LDPC 编码的 SIMO 系统的误码性能,其中 LDPC 码采用 MacKay 随机构造方法构造,码率:0.5,码长:1008,译码采用对数域比特置信度译码。湍流结构常数取  $C_n^2 = 5 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$  的弱湍流区域附近,通信距离  $d = 1.5 \text{ km}$ ,波长  $\lambda = 1.55 \text{ }\mu\text{m}$ ,相应对数强度方差  $\sigma_R^2 = 0.21$ 。

图 2 为弱湍流条件下 2-PPM 调制系统误码率(BER)性能,仿真参数  $R = 0.8$ 。由图可见:三种合并方式都能有效改善系统误码性能,具有较好的湍流抑制作用。在接收端探测器数目和湍流参数一定时,三种接收分集合并技术中,MRC 合并方式获得的系统误码性能最优;当误码率为  $10^{-4}$  时,在单发双收系统中,采用

MRC、EGC、SC 合并方式的 SIMO 系统相对 SISO 系统误码性能分别有 3.2, 3, 2.8 dB 的优势。从三种合并技术的模型中也能看出, MRC 工作方式下的解调器输入端的信噪比最大, 最利于译码输出。

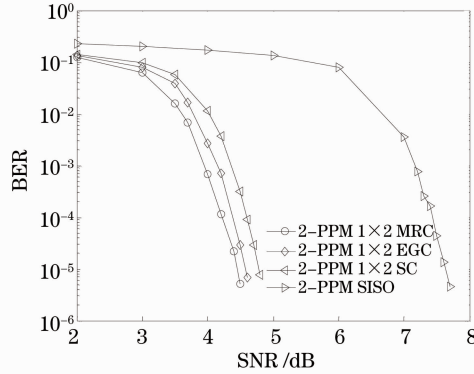


图 2 合并方式对大气光通信误码性能的影响

Fig. 2 Influence of combining schemes on atmospheric optical communication BER performance

为了比较接收天线数目对系统误码性能的影响, 图 3 给出了弱湍流条件下 2-PPM 调制系统误码率性能, 仿真参数  $R=0.6$ 。从图 2 可以看出: 在发射天线数目一定时, 接收天线数目的增加降低了系统误码率; 当误码率为  $10^{-4}$  时, 采用 MRC 合并方式的  $1 \times 4$  系统、 $1 \times 3$  系统相对  $1 \times 2$  系统分别有 4.4 dB、1.9 dB 的性能改善。在发射天线数不变时, 接收天线数的增加实际上提高了系统的分集增益, 提高了接收端的信噪比, 从而改善了系统的误码性能, 这也从一个方面验证了译码方案的正确性。

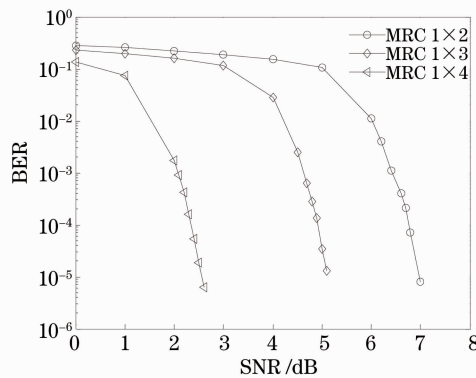


图 3 接收分集对大气光通信系统误码性能的影响

Fig. 3 Influence of reception diversity on atmospheric optical communication BER performance

## 5 结 论

MIMO 技术是抑制湍流影响的有效方法之一, 而 PPM 调制应用在无线激光通信中具有良好的误比特性能。采用 PPM 调制, 将性能优异的 LDPC 码与 MIMO 技术结合, 推导了最大比合并、等增益合并和选择合并三种合并方式下单输入多输出系统译码初始化计算公式, 在弱湍流条件下, 仿真分析了基于 LDPC 编码与 PPM 调制的大气光通信 SIMO 系统的误码性能。结果表明, 将 LDPC 编码与 MIMO 技术结合是一种可行的、有效的大气光通信方式, 在大气光通信中具有一定的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 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. 大气激光通信中的多光束传输性能分析和信道建模[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1020-1024.
- 2 Wang Huiqing, Ke Xizheng. Hybrid space-time code for free space optical communication [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 132-136.  
王惠琴, 柯熙政. 自由空间光通信中的混合时空编码 [J]. 光学学报, 2009, 29(1): 132-136.

- 3 Chen Dan, Ke Xizheng, Li Tie. FSO MIMO system in layered detection algorithm of space-time code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1550–1555.  
陈丹, 柯熙政, 李铁. FSO MIMO 系统中分层空时码检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1550–1555.
- 4 Cao Minghua, Wang Huiqin, Huang Rui, *et al.*. BER performance of layered spacetime code in FSO [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1842–1847.  
曹明华, 王慧琴, 黄瑞, 等. FSO 中分层空时编码的误码性能[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1842–1847.
- 5 Yuan Dongfeng, Zhang Haigang. *Theory and Applications of LDPC Codes* [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2008. 1–15, 73.  
袁东风, 张海刚. LDPC 码理论与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 1–15, 73.
- 6 Wang Yong, Yu Lei, Cao Jianian. Performance of optical wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3295–3298.  
王勇, 于蕾, 曹家年. 基于副载波相移键控强度调制和低密度奇偶校验码的光无线通信系统性能[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3295–3298.
- 7 Hao Shiqi, Leng Jiaofeng. Performance analysis of optical wireless communication based on LDPC codes and MIMO [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s105006.  
郝士琦, 冷蛟锋. 基于 LDPC 码和 MIMO 的无线光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s105006.
- 8 Chen Dan, Ke Xizheng. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation [J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(8): 128–133.  
陈丹, 柯熙政. 副载波调制无线光通信分集接收技术研究[J]. *通信学报*, 2012, 33(8): 128–133.
- 9 Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Qu 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, 瞿福琪, 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.
- 10 Jin Feng, Li Wenyuan, Zhang Yulin, *et al.*. Performance analysis of diversity combining technique in SIMO system [J]. *Modern Electronic Technique*, 2007, 5: 32–34.  
金凤, 李文元, 张玉林, 等. SIMO 系统分集合并技术的性能分析[J]. *现代电子技术*, 2007, 5: 32–34.