

基于 TPC 的大气无线光通信差错性能分析

胡昊^{1,2} 王红星^{1,2} 刘敏^{1,2} 徐建武² 张铁英²

(¹海军航空工程学院电子信息工程系, 山东 烟台 264001; ²山东省信号与信息处理重点实验室, 山东 烟台 264001)

摘要 为克服大气湍流引起的随机和深度衰落影响,将 Turbo 乘积码(TPC)引入无线光通信系统中。在构建大气无线光系统模型基础上,分析了 TPC 的抗突发错误能力,推导了弱湍流和高斯级联信道下接收信号的置信度量计算方法,并对 TPC 编码前后大气无线光通信系统差错性能及不同参数的影响进行分析。结果表明,TPC 可以有效补偿大气信道中的随机和深度衰落影响,使系统具有较强适应湍流变化的能力。为获得较高编码增益,TPC 应首选高码率码型作为子码,同时兼顾纠错能力,迭代取 3~4 次时可较好平衡译码性能与复杂度。

关键词 光通信; 弱湍流; Turbo 乘积(TPC)码; 软输入输出; 误比特率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP48.010601

Analysis on Error Performance of Free Space Optical Communication Based on Turbo Product Code

Hu Hao^{1,2} Wang Hongxing^{1,2} Liu Min^{1,2} Xu Jianwu² Zhang Tieying²

¹Department of Electronic Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China

²Key Laboratory of Shandong Province on Signal and Information Processing, Yantai, Shandong 264001, China

Abstract Turbo product code (TPC) is introduced into free space optical communication (FSO) system to mitigate impact of random and long deep fade caused by atmospheric turbulence. After FSO system model is set up, the anti-burst error ability of TPC is studied. Also the algorithm of bit confidence measurement under weak turbulence and Gaussian cascaded channel is derived. The performances of TPC under weak turbulence and influential factors are analyzed. Simulations show that, TPC compensates the losses of random and deep fade effectively and makes coded FSO adapted to different turbulence conditions. To obtain more coding gain, the subcode of TPC should be insured high code rate as a priority, meanwhile its error correction ability should be considered. The number of iteration being 3~4 can achieve good balance between the performance and complexity.

Key words optical communications; weak turbulence; turbo product code; soft input soft output; bit error rate

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 010.1330

1 引言

大气无线光通信(FSO)结合了微波和光纤通信的优势,可以提供高速、安全的无线接入。但光信号在大气中传输时,易受湍流扰动影响,对于强度调制/直接检测(IM/DD)系统,大气湍流效应主要表现为接收光强的起伏变化,并伴有随机的深衰落^[1]。考虑到无线光通信为功率受限系统,因此引入差错控制技术的研究得到了重视。人们对一些纠错编码应用于无线光系统进行了广泛研究,Zhu等^[2]对线性分组码、卷积码及 Turbo 码在弱湍流下的性能限进行推导和仿真,文献[3,4]分别研究了非二进制 BCH 码和 RS 码在脉冲相位调制(PPM)下的纠错性能。由于大气无线光信道是一种结合了随机错误和突发错误的衰落信道,普通编码的有效性较差,为此,宋效正等^[1]在比较分析数值仿真与理论值的基础上,研究采用交织技术离散弱湍流信道突发错误,并在文

收稿日期: 2010-08-09; 收到修改稿日期: 2010-09-03

作者简介: 胡昊(1978-),男,博士研究生,主要从事大气无线光通信信道评估、调制和信道编码技术等方面的研究。

E-mail: daqi_hh@163.com

导师简介: 王红星(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光通信技术、现代通信新技术等方面研究。

E-mail: buaawhx@163.com

献[5]中将字节组合与互质型分段字节交织相结合,设计了一种带三重交织方式的高速卷积码无线光通信方案。1993年提出的 Turbo 码将交织技术和软迭代译码思想结合在一起,可有效对抗信道的随机错误和突发错误,使得 Turbo 码的大气无线光通信系统研究得到重视^[6-8]。但经典 Turbo 码(TCC)接近香农限的性能是在码率较低条件下获得,其迭代算法延迟较大,且当误码降到一定程度会出现错误平台,使得 TCC 的应用受到限制。基于同样的“Turbo”译码思想,Pyndiah 于 1994 年提出了乘积码的迭代译码方法,称为 Turbo 乘积码(TPC)^[9]。TPC 以线性码作为子码进行行列编码,其译码过程同样为软输入软输出(SISO)迭代方式,译码算法简洁,便于实时实现,无线电通信领域内的研究表明,在低码率条件下,采用三维构造的 TPC 获得了接近 TCC 的性能,在高码率下性能优于 TCC,且不存在误码平台^[10,11]。IEEE 802.16 协议(固定宽带无线接入系统的空中接口)采纳 TPC 为标准编码方式之一,基于该技术的高速芯片也已经得到了商业开发。但到目前为止,有关 TPC 的研究集中于移动、卫星通信和光纤通信领域。

本文将 TPC 应用于大气无线光通信系统以克服湍流引起的衰落影响。在构建弱湍流大气无线光通信系统模型的基础上,分析了 TPC 的抗突发错误能力,基于 SISO 迭代译码算法原理导出了弱湍流和高斯级联条件下接收信号对数似然比的计算方法,并通过蒙特卡罗仿真,分析了 TPC 大气无线光通信的抗湍流影响能力和编码有关参数的基本选取方法。

2 系统模型

TPC 大气无线光系统模型如图 1 所示。输入比特首先送入 TPC 编码器进行乘积编码,已编码信号输入脉冲信号调制器调制为脉冲信号,经大气到达接收端。在接收端,受大气扰动的传输信号经光电转换后,与电路的噪声电流一起构成接收电流,经预处理后送入 TPC 译码器。可以看出,信号在传输中主要受湍流和电路噪声影响。假设光强在每个照射间隔内为常数且时隙信号不存在码间干扰,光电转换过程以及接收机电路引入噪声服从高斯分布,则大气无线光通信系统信道为大气信道和高斯信道的级联^[12]。

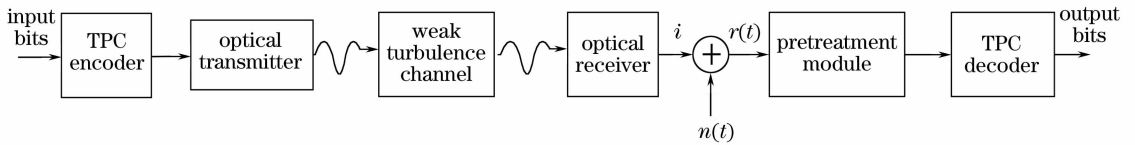


图 1 TPC 大气无线光通信系统模型

Fig. 1 TPC coded FSO system model

大气湍流对激光信号存在随机衰落和深度衰落影响,强湍流可用副指数分布来描述,弱湍流用对数正态分布描述^[13]。对于距离在几千米以内的室外无线光通信系统,考虑孔径平均效应,接收光强闪烁服从对数正态分布,表示成光功率的形式为

$$f(P) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x P} \exp\left\{-\frac{[\ln(P/P_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\}, \quad (1)$$

式中 P 为接收到的光功率, P_0 为其平均值, σ_x 为闪烁指数,一般不大于 0.3。考虑调制信号为单极性不归零(NRZ)形式,接收电流可写为

$$r(t) = \begin{cases} i + n(t), & \text{when sending "1"} \\ n(t), & \text{when sending "0"} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $i = \eta P$ 为光电转换电流,服从对数正态分布, $\eta = \gamma_e T e g \lambda / h c$ 为转换效率, γ_e 为探测器量子效率, T 为每个传输时隙的持续时间, e 为量子电荷, g 为光电倍增增益, λ 为波长, h 为布朗克常数, c 是光速, $n(t)$ 是零均值、方差为 σ^2 的高斯噪声。

3 大气无线光通信系统中的 TPC

3.1 抗突发错误分析

TPC 是在乘积编码基础上,对接收码字采用极大似然序列判决(MLSD)和软输入软输出迭代译码。乘

积码通过在不同维空间上进行编码,实现了短码构成长码,编码器由两个或多个子码串行级联起来,并通过行/列编码方式分隔开,其实质是在编/译码中引入了行列交织/解交织,从而获得了一定抗突发错误能力。以纠正一个错误的子码构造二维乘积码为例,硬判决下只要传输连续错误在行或列上不重叠成“井”形,错误就可以被全部纠正。如图 2 所示的两种错误图样中,对于乘积编码,(a)为可纠正图样,(b)为无法纠正图样,而对一维编码,由于连续错误超出码字纠错能力,因此两种图样都无法纠正。TPC 由于在乘积编码基础上采用了软判决 SISO 迭代译码,对错误图样(b)也具有纠正的可能性,因此抗突发错误能力更强。在 FSO 系统中,湍流效应使得接收信号呈现出随机和深度衰落的特点,利用 TPC 的具有较强纠正连续错误的特性,就可以有效改善系统的差错性能。

3.2 基于改进 Chase 算法的 TPC 迭代译码

假设信息通过分组码 (n, k, d) 编码后为 $\mathbf{S}_j = [s_0^j, s_1^j, \dots, s_{n-1}^j]$, $j \in \{0, \dots, 2^k - 1\}$,经高斯信道传输,接收机输出矢量为 $\mathbf{R} = [r_0, r_1, \dots, r_{n-1}]$,对接收信号硬判决得到 $\mathbf{Y} = [y_0, y_1, \dots, y_{n-1}]$ 。极大似然序列判决准则需要逐个比较合法码字与 \mathbf{R} 的欧式距离,从中找出距离最小的码字作为接收码字。这种穷举方法在 k 较大时效率较低,因此一般采用次优的 Chase 搜索算法寻找极大似然码字。Chase 算法输出为硬译码结果,为实现软输入软输出译码,Pyndiah 对算法进行了改进。改进的算法为^[9]:1)通过考察接收信号 \mathbf{R} 中每个 r_j ,确定 \mathbf{Y} 中 $p = \lfloor d/2 \rfloor$ 个具有最低可信度的码元位置;2)由这 p 个最不可靠位产生 2^p 个探测图案,并通过 $z_j^q = y_j \oplus t_j^q$ 生成搜索子集 Ω ;3)从 Ω 中找出 \mathbf{R} 的极大似然码字 $\mathbf{D} = [d_0, \dots, d_{n-1}]$,并对于每一个 d_j ,从 Ω 中找出竞争码字 \mathbf{C} 。 \mathbf{D} 中 d_j 的可信度表示为

$$r'_j = r_j + \omega_j = r_j + \frac{|\mathbf{R} - \mathbf{C}|^2 - |\mathbf{R} - \mathbf{D}|^2}{4} (2d_j - 1), \quad (3)$$

\mathbf{C} 是与 \mathbf{R} 具有最小欧式距离且 $c_j \neq d_j$ 的竞争码字, ω_j 为外信息或非本征信息。当合法码字 \mathbf{C} 可能不存在于 Ω 内时, ω_j 通过 $\beta(2d_j - 1)$ 获得, β 为加权因子,用于调节输出的非本征信息值。

基于改进 Chase 算法的 TPC 迭代译码器结构如图 3 所示,将上一次的非本征信息作为下一次迭代的修正项反馈到输入端,就能实现 TPC 迭代译码。如果以完成一次行或列译码为半次迭代,则二进制相移键控(BPSK)调制下译码器第 m 次半迭代输入的矩阵表示为:

$$[\mathbf{R}(m)] = [\mathbf{R}] + \alpha(m)[\mathbf{W}(m)], \quad (4)$$

$\mathbf{R}(m)$ 表示译码器的第 m 次输入, \mathbf{R} 为接收信号, $\alpha(m)$ 为定标因子,表征非本征信息的反馈权重, $\mathbf{W}(m)$ 为第 m 次半迭代的输入非本征信息。

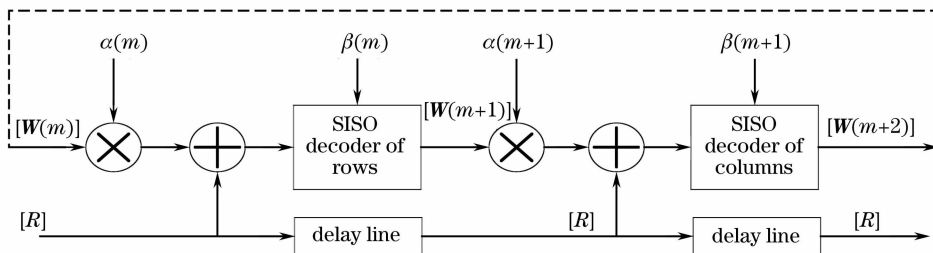


图 3 TPC 迭代译码结构

Fig. 3 Iterative decoding structure of TPC

3.3 接收信号的置信度量计算

从以上分析可知,Chase 算法的基本思想是通过选取若干个最不可靠位来缩小 MLSD 的码字搜索空间,其中最不可靠位的选取依据来自于该传输比特的置信度;SISO 迭代译码的本质是通过迭代方法,使得接

收信号判为“0”，“1”的可靠性趋于最大化，从而获得译码性能的提高。对于高斯信道和 BPSK 调制方式，接收信号直接反映接收比特的置信度度量，而在大气无线光通信数字脉冲调制 (DPM) 系统中，接收信号与置信度没有线性关系。因此，高斯信道中推导得出的 TPC 的 SISO 迭代算法在大气无线光通信系统中无法适用。为此，本文在 TPC 译码前增加一个预处理模块，将接收信号转换为置信度度量值，如图 1 所示。

由本文模型可知，发送“1”信号时，光脉冲在传输中会受到弱湍流影响，在电路中还存在加性噪声，而“0”信号则只受到电路噪声影响，为便于分析，可假设发送“1”脉冲时隙的接收电流近似为高斯型，根据弱湍流模型，可得其均值和方差为 $E[r_{j,s_j=1}] = \eta P_0 = i_0$ 和 $\sigma_1^2 = i_0^2 [\exp(4\sigma_\chi^2) - 1] + \sigma^2$ ；当发送“0”脉冲时， $E[r_{j,s_j=0}] = 0$ 和 $\sigma_0^2 = \sigma^2$ 。因此可得到“1”和“0”信号在接收端所产生的接收电流概率密度分别为

$$p(r_j/y_i = 1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \exp\left[-\frac{(r_j - i_0)^2}{2\sigma_1^2}\right], \quad (5)$$

$$p(r_j/y_i = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left[-\frac{r_j^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (6)$$

接收信号判决为 1 或 0 的置信度用对数似然比 (LLR) 表示。假设接收端可以获得信道状态，对于任意的接收 r_j ，比特 y_j 的 LLR 为

$$\Lambda(y_j) = \ln \left\{ \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \exp\left[-\frac{(r_j - i_0)^2}{2\sigma_1^2}\right]}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0}} \exp\left[-\frac{r_j^2}{2\sigma_0^2}\right]} \right\} = \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right) + \left[\frac{r_j^2}{2\sigma_0^2} - \frac{(r_j - i_0)^2}{2\sigma_1^2} \right]. \quad (7)$$

湍流对系统影响较大时 $\sigma_1 \gg \sigma_0$ ，则(7)式近似为

$$\Lambda(y_j) \approx \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma_1}\right) + \frac{1}{2} \left(\frac{r_j^2}{\sigma_0^2} - \frac{i_0^2}{\sigma_1^2} \right), \quad (8)$$

将 $\sigma_0^2 = \sigma^2$ ， $\sigma_1^2 = i_0^2 [\exp(4\sigma_\chi^2) - 1] + \sigma^2$ 代入得

$$\Lambda(y_j) \approx \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ r_j^2 - \frac{\sigma^2}{\exp(4\sigma_\chi^2) - 1} + 4\sigma^2 \ln \left[\frac{\sigma}{i_0 \sqrt{\exp(4\sigma_\chi^2) - 1}} \right] \right\}, \quad (9)$$

其中 $1/(2\sigma^2)$ 对于平稳高斯信道为定值，可通过归一化略去：

$$\Lambda(y_j) \approx r_j^2 - \frac{\sigma^2}{\exp(4\sigma_\chi^2) - 1} + 4\sigma^2 \ln \left[\frac{\sigma}{i_0 \sqrt{\exp(4\sigma_\chi^2) - 1}} \right]. \quad (10)$$

根据(10)式可对每个接收比特作软信息化变换，然后送入 SISO 译码器进行迭代译码。第 m 次半迭代输入可以表示为 $[\mathbf{A}(m)] = [\mathbf{A}] + \alpha(m)[\mathbf{W}(m)]$ ， $\mathbf{W}(m)$ 的更新方法为：

$$w_j(m) = \begin{cases} \frac{[|\mathbf{A}(m) - \mathbf{C}|^2] - |\mathbf{A}(m) - \mathbf{D}|^2}{4} (2d_j - 1) - \Lambda_j(m), & \mathbf{C} \text{ exist} \\ \beta(m)[2d_j(m) - 1], & \mathbf{C} \text{ not exist} \end{cases} \quad (11)$$

为防止计算溢出并便于迭代， \mathbf{A} 需作归一化。

4 仿真分析

TPC 以线性码作为子码，码型选取非常灵活。为具体分析编码 FSO 系统的差错性能，本文以二进制 BCH 码作为 TPC 的行和列子码，在弱湍流和高斯级联信道条件下进行仿真分析， α, β 因子采用文献[9]推荐参数。仿真涉及的器件特性参数考虑了较高大气透射率的激光频段及具有较高光电转换效率的雪崩光电二极管 (APD) 的实际性能，具体设置如表 1 所示。

表 1 仿真参量

Table1 Simulation parameter

Parameter	Value
$\lambda / \mu\text{m}$	1.55
γ_e	0.5
g	100
α^2	2×10^{-30}
T / s	1×10^{-9}

本文首先对不同参数下 TPC 的性能进行仿真。图 4(a) 是在 $\sigma_\chi = 0.1$ 条件下，不同迭代次数 BCH(31,21)² TPC 的仿真实验。其中，迭代 1 次可以看做是直接用次优的 Chase 算法进行判决译码情况。

从图中可以看出,在平均功率较小时编码不提供增益,误码率较未编码系统高,这是由于过多错误使得编码失效,同时编码冗余需要消耗额外功率所致。随功率增加,编码系统的误码性能呈现明显的瀑布式下降趋势,其中迭代 2 次以上在误码率 10^{-2} 下获得了编码增益,迭代 1 次在 10^{-3} 量级下获得了编码增益。在误码率为 10^{-5} 进行比较可知,迭代 2 次以上与直接软判决译码相比存在较明显编码增益,而迭代 3 次以上后增加较小。

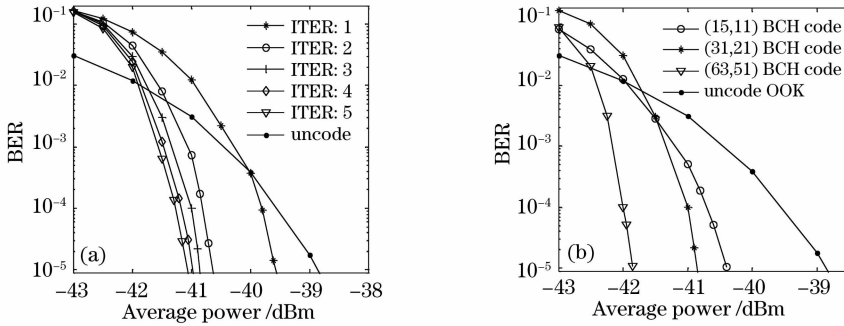


图 4 不同参数 TPC 性能。(a)不同迭代次数,(b)不同子码

Fig. 4 Performance of TPC with different code parameters. (a) different iterative number, (b) different subcode

码率和纠错能力是子码的两个重要参数,为分析其影响,以 BCH(15,11)码、(31,21)码和(63,51)码为 TPC 的子码,分别用 A,B,C 来表示,在闪烁指数为 0.1 下进行仿真,结果如图 4(b)所示。三种子码的纠错能力分别为 1,2,2,对应 TPC 的码率分别为 0.538,0.459 和 0.655。由图 4(b)可见,最先获得编码增益的是 C,其次为 A 和 B。误码率为 10^{-5} 时编码增益大小依次是 C,B 和 A。结合纠错能力和 TPC 率可以看出,高码率可以较早获得编码增益,而纠错能力较强的子码则可以获得大的编码增益;对比 B 和 C 可知,对于同样的纠错能力,高码率子码的性能更好。基于以上分析可以知道,为提高编码增益,TPC 应首先考虑码率较高的子码,在此基础上兼顾纠错能力。但对于高码率和强纠错能力,同时也要求子码码长较长,其迭代译码复杂度也将增加,故在工程实现中需要使其控制在可接受范围内。

图 5 是不同湍流下 BCH(63,51)² TPC 大气无线光通信的差错性能曲线。从图 5 可以看出,随着闪烁指数的增大,TPC 系统可在较高误码下即获得编码增益。在误码率为 10^{-5} 时衡量,采用 TPC 在 $\sigma_\chi=0.1$ 时有 3 dB 的编码增益,在 $\sigma_\chi=0.3$ 时增大为 3.3 dB,编码增益随湍流增大而增加。其原因在于 TPC 特有的编码方式相当于在编码中引入了行列交织,对湍流引起的连续错误起到了离散作用。当湍流增大时,闪烁增强使得解调连续错误情况增加,对未编码系统影响较大,TPC 由于具有抗突发能力,因此对湍流的补偿效果明显。

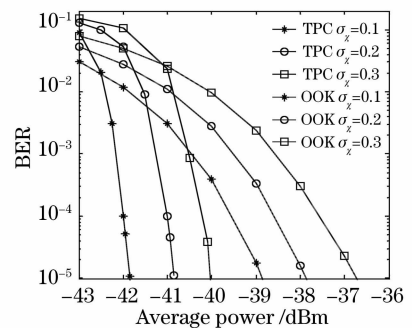


图 5 TPC 在不同闪烁指数下的差错性能

Fig. 5 BER Performance of TPC with different turbulence index

5 结 论

本文针对大气湍流引起接收信号随机和深度衰落,将 TPC 应用于大气无线光通信系统,分析了其抗突发错误能力,给出了接收信号的软信息度量值计算方法,并对弱湍流高斯级联信道下 TPC 的性能及参数影响进行了仿真。结果表明, 10^{-5} BER 下 BCH(63,51)² TPC 获得了 3 dB 以上的编码增益,且增益随闪烁指数变大而增加,这表明 TPC 可有效改善湍流引起的系统性能下降,且具有较强适应湍流变化的能力,是一种非常适合于无线光通信的纠错编码技术。为获得较高编码增益,TPC 应首选具有较高码率子码,同时兼顾纠错能力,并可通过不同迭代次数获得可靠系统性能。本文研究及结论为大气无线光通信系统的 TPC 工程应用提供了有价值的参考。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Xiaoming Zhu, Joseph M. Kahn. Performance bounds for coded free-space optical communications through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2003, **51**(8): 1233~1239
- 3 Yin Zhiyun, Ke Xizheng, Zhang Bo. Research on error-correcting code in wireless laser communications over GF(3)[J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2009, **23**(7): 23~28
殷致云,柯熙政,张波. 无线激光通信中 GF(3)域上的纠错编码研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, **23**(7): 23~28
- 4 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Xing Yongqiang *et al.*. PPM-based error control code modulation in optical wireless communications[J]. *Study on Optical Communication*, 2009, **8**(154): 67~70
张铁英,王红星,邢永强等. 无线光通信中 PPM 的差错编码调制研究[J]. 光通信研究, 2009, **8**(154): 67~70
- 5 Song Xiaozheng, Liu Lu, Dang Anhong *et al.*. Study on new scheme of byte-wise interleaving and convolutional coding for high-data-rate optical wireless communication system[J]. *J. Communications*, 2007, **28**(10): 38~47
宋效正,刘璐,党安红等. 高码率无线光通信交织卷积编码新方案研究[J]. 通信学报, 2007, **28**(10): 38~47
- 6 Kamran Kiasaleh. Turbo-coded optical PPM communication systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1): 18~26
- 7 Zhu Yinbing, Wang Hongxing, Zhang Tieying *et al.*. Analysis of error performance for turbo coded FDPIM[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2008, **19**(11): 1478~1481
朱银兵,王红星,张铁英. Turbo 码编码 FDPIM 在弱湍流下的差错性能分析[J]. 光电子激光, 2008, **19**(11): 1478~1481
- 8 Xie Weiliang, Liu Lu, Tang Junxiong. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 575~578
谢伟良,刘璐,汤俊雄. 无线光通信差错控制系统的时间参数特性[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 575~578
- 9 Ramesh Pyndiah. Near-optimum decoding of product codes: block turbo codes[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1998, **46**(8): 1003~1010
- 10 Li Xuan, Song Wentao, Luo Hanwen. Performance analysis of turbo product coded modulation based on bit interleaving and modulation diversity[J]. *J. Shanghai Jiao Tong University*, 2003, **37**(3): 327~331
李焯,宋文涛,罗汉文. 基于比特交织和调制分集的 Turbo 乘积码编码调制系统性能[J]. 上海交通大学学报, 2003, **37**(3): 327~331
- 11 Zhang Shenru, Deng Xiaoyan. Performance of 3 dimension Turbo product code near Turbo convoluted code[J]. *Chinese J. Radio Science*, 2002, **17**(6): 666~669
张申如,邓晓燕. 性能接近 Turbo 卷积码的 Turbo 三维乘积码[J]. 电波科学学报, 2002, **17**(6): 666~669
- 12 Hu Hao, Wang Hongxing, Zhou Min *et al.*. Modeling and analyzing of error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1269~1274
胡昊,王红星,周旻等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能的建模与分析[J]. 中国激光, 2010, **37**(5): 1269~1274
- 13 Zhang Yixin, Chi Zeyang. *Laser Wave Propagation and Imaging Through Atmosphere* [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2001
张逸新,迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001