

文章编号: 0258-7025(2006)11-1532-05

基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统特性分析

陈俊^{1,2}, 黄德修^{1,2}, 元秀华^{1,2}

(¹ 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要 在自由空间光通信(FSO)系统中,大气信道的信噪比(SNR)特性对系统的通信性能影响很大,提出了双模 turbo 码的编码方案。从研究大气对自由空间光通信系统的影响出发,在分析了大气信道特性后建立了大气信道信噪比和能见度的关系,详细阐述了双模 turbo 码的编码、译码原理。应用建立的大气信道的信噪比关系,仿真分析了大气信道的信噪比和大气能见度的关系和两种编码条件下自由空间光通信系统的误码率(BER)。结果表明,对于一个实用的无线光通信系统,在要求系统的误码率低于 10^{-5} 时,基于双模 turbo 码的系统所要求的信道信噪比比基于普通 turbo 码的系统的要求低 1 dB。因此在相同的信噪比条件下,相对于普通 turbo 码,双模 turbo 码能有效降低系统的误码率。

关键词 光通信;无线通信技术;双模 turbo 码;仿真;大气衰减

中图分类号 TN 929.12 **文献标识码** A

Analysis of Free Space Optics System Based on Twofold Turbo Code

CHEN Jun^{1,2}, HUANG De-xiu^{1,2}, YUAN Xiu-hua^{1,2}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

²Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract For the free space optics (FSO) communication system, the atmospheric channel's signal-noise-rate (SNR) is a key factor, and the FSO system based on twofold turbo code is proposed. First, the atmospheric influence on FSO system and the character of atmospheric channel are analyzed, the SNR of atmospheric channel versus the weather visibility is deduced, and the coding and decoding principles of twofold turbo code are analyzed. Applied the function of atmospheric channel's SNR, the SNR of atmospheric channel versus the weather visibility and the bit error rate (BER) of FSO system based on twofold turbo code and common turbo code are simulated. The results show that, for an applied optical wireless communication system, under the condition of system's BER being below 10^{-5} , the channel's SNR of system based on twofold turbo code is 1dB lower than that based on common turbo code. So, for the same channel's SNR, the twofold turbo code is more efficient to degrade the system's BER than common turbo code.

Key words optical communication; wireless communication technique; twofold turbo code; simulation; atmospheric attenuation

1 引言

自由空间光通信(FSO)又称为光无线通信,为解决“最后一公里”的方案之一,正越来越受到人

们的重视^[1]。它综合了光纤通信和其他无线通信方式的特点,具有宽带大容量、低成本、安装快捷、机动灵活、无需频率申请等优点,因而在很多领域具有广

收稿日期:2006-01-17;收到修改稿日期:2006-05-25

基金项目:武汉市科技攻关重大专项(2002100513015)资助课题。

作者简介:陈俊(1976—),男,湖北鄂州人,讲师,武汉光电国家实验室博士研究生,主要从事自由空间光通信和 turbo 码方面的研究。E-mail:ch7j9@163.com

导师简介:黄德修(1937—),男,湖南人,武汉光电国家实验室教授,博士生导师,目前研究方向为光纤通信和光纤传感。E-mail:dxhuang@mail.hust.edu.cn

阔的应用前景。目前,自由空间光通信已成为发达国家宽带通信的关键技术之一,并且已成功应用于2000年悉尼奥运会的通信系统。自由空间光通信对我国也非常重要,我国的城市楼群和道路密集,铺设光纤造价太高,而电缆和无线电通信又无法满足高速宽带接入的要求,所以自由空间光通信是解决我国城市、办公区和住宅区高速宽带通信要求的最佳途径之一。

自由空间光通信利用大气空间来传送信号,而大气信道是不稳定的,这也就预示了自由空间光通信必然受信道环境的影响^[2]。尽管激光的方向性很好,但波束还是会随传输距离的增加而慢慢变宽,超过一定距离后就难以被正确接收。因此在自由空间光通信中必须采取新的技术方案,如差错编码技术。1993年C. Berrou和A. Gavieux首次提出一种新的信道编码方案——turbo码^[3]。目前turbo码已被美国空间数据系统顾问委员会作为深空通信的标准,同时它也被确定为第三代移动通信系统(IMT-2000)的信道编码方案之一。但是,turbo码在自由空间光通信中的应用很少,北京大学的谢伟良等研究了基于turbo码的大气无线光通信系统特性^[4],重庆大学的吴玉成等研究了卫星通信中多重turbo码技术的应用^[5]。本文将在研究大气光信道特性的基础上,分析基于双模turbo码的自由空间光通信系统的误码率(BER)性能。

2 自由空间光信道模型

由于turbo码的译码算法与系统信道模型密切相关,所以在讨论turbo码的译码算法之前,必须首先讨论自由空间光通信系统的信道模型,即大气光信道模型^[6,7]。

自由空间光传输路径中存在着大气衰减,其变化幅度很大,可以从0.1 dB/km到300 dB/km。光波在大气中传输时,会受到分子吸收、大气气体和气溶胶散射、折射以及光信号与介质的非线性相互作用;在恶劣天气条件下,诸如雨、雾和云等会通过分子吸收和散射严重削弱传输光束,甚至无法通信。通常情况下,这些不利的因素很难被量化,消除其影响更加困难,所以只能对它们近似估计。

对通信距离为 L (km)的自由空间光通信系统,大气传输损耗为 $\exp(-\beta L)$,其中 β 为大气衰减系数^[8]。在晴朗的天气条件下,大气传输损耗近似为 $\exp(-V\beta) = 0.01$,其中 V (km)为能见度,因此大

气衰减可由能见度近似计算。对于晴朗天气下的自由空间光通信系统,大气传输损耗近似为 $\exp[L(\ln 0.01)/V]$ 。

在晴朗的天气条件下,大气湍流引起的大气热运动起伏使得反射率变化,从而使接收光束起伏变化,对直接探测系统,这就是对数光强闪烁。对于一个强度调制的自由空间光通信系统,接收光功率 $P_r(t)$ 可以表示为^[8]

$$P_r(t) = X(t)P_s(t) + n(t), \quad (1)$$

其中 $P_s(t)$ 为在没有闪烁衰减情况下的接收光功率,可由大气传输损耗 $\exp(-\beta L)$ 和发射功率计算而得, $n(t)$ 为加性高斯白噪声, $X(t)$ 为一等可能概率过程引起的光强闪烁衰减指数,其概率密度分布函数(PDF)为^[8]

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

式中 X 为归一化的平均闪烁指数, σ_s^2 为 X 的对数方差。当 $\sigma_s^2 \ll 1$ 时,归一化的平均闪烁指数 X 的方差 σ_X^2 近似等于 σ_s^2 ($\sigma_X^2 = \exp(\sigma_s^2) - 1 \approx \sigma_s^2$), σ_s^2 的值由大气状态和传输路径长度决定,其一般范围为 $\sigma_s^2 < 0.2 \sim 0.5$ 。

对于模拟信道而言,其信噪比(SNR)可定义为接收端输出的信号平均功率与噪声平均功率之比,式(1)等式两边同时取平均,可得

$$\overline{P_r(t)} = \overline{X(t)P_s(t)} + \overline{n(t)}, \quad (3)$$

式(3)两边同时除以 $\overline{n(t)}$,可得

$$\frac{\overline{P_r(t)}}{\overline{n(t)}} = \frac{\overline{X(t)P_s(t)}}{\overline{n(t)}} + 1, \quad (4)$$

由于大气信道的参数和发射功率不相关,即 $X(t)$ 和 $P_s(t)$ 不相关,所以式(4)可以写成

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{\overline{P_r(t)}}{\overline{n(t)}} = \frac{\overline{X(t)P_s(t)}}{\overline{n(t)}} + 1 = \\ &= \frac{\overline{X(t)} \cdot \overline{P_s(t)}}{\overline{n(t)}} + 1 = \overline{X(t)} \cdot \frac{\overline{P_s(t)}}{\overline{n(t)}} + 1, \end{aligned} \quad (5)$$

对于特定的信道,加性噪声的平均功率可以认为是固定的,而 $\overline{X(t)}$ 的值可由式(2)计算得出, $\overline{P_s(t)}$ 即无衰减时接收光功率平均值可以由系统设计时得到,因此大气信道的信噪比可由式(5)计算得出。

3 双模 turbo 码的编译码原理

多模 turbo 码是 turbo 码的一种,它们是通过改变编码结构而在单个比特迭代期间获得多个外信

信息的值,从而提高编码效率,双模 turbo 码为多模 turbo 码中最简单的一种。双模 turbo 码的基本思想是增大传统 turbo 码的编码随机性,使得码的重量谱分布接近于随机码的二项式重量分布^[9]。

3.1 双模 turbo 码的编码原理

图 1 为双模 turbo 码的编码器框图,它主要由三个递归系统卷积(RSC)码编码器和两个随机交织器组成,三个递归系统卷积的结构通常相同。和传统的 turbo 码相比,双模 turbo 码主要是增加了一个系统卷积编码器和一个交织器。从图中可以看出,每一个长的信息序列 a 首先被分为三个长度相等的信息段 a_1, a_2, a_3 ,对于三个信息段的两两组合,共有 $C_3^2 = 3$ 种,即 $(a_1, a_2), (a_1, a_3), (a_2, a_3)$ 。这三个信息段的两两组合分别被三个递归系统卷积编码器编码,其中后两个信息段组合编码之前经过了不同的交织器交织。三个不同的信息段组合经过三个编码器的编码之后,产生了对应的三个不同校验序列,分别计为 $p_{1,2}, p_{1,3}, p_{2,3}$ 。信息序列 a 和新产生的三个校验序列组成了新的序列 $(a, p_{1,2}, p_{1,3}, p_{2,3})$,作为双模 turbo 码的全部传输序列。

如图 1 中的编码器结构,若三个递归系统卷积编码器的结构相同,且其码率为 $1/2$,则整个双模

turbo 码的码率为 $1/3$ 。如果要提高编码器的码率,除可以选用高码率的分量码外,还可以在校验序列后加上删余(puncturing)矩阵,从校验序列中周期性地删除一些校验位,然后再与信息序列 a 复用在一起。

由于信息序列 a 被等分成三部分,每一部分被不同的递归系统卷积编码器两次交织编码,这也是双模 turbo 码的名字得来的原因,多次的交织编码导致了信息序列最大限度地被打散,从而增加了信息序列的随机性,提高了双模 turbo 码的编码效率。

3.2 双模 turbo 码的译码原理

根据双模 turbo 码编码器的结构,每一个信息段都被编码两次,则在译码器端每一个信息段对应于两个对数似然比估计值,所以其译码结构也必然不同于传统的 turbo 码译码器,而必须做出修改。

图 2 为双模 turbo 码的一次迭代译码过程。从图中可以看出,每一个 MAP 译码器分别和其他两个译码器交换译码得到外信息值,而传统的 turbo 码译码器仅仅是两个译码器之间交换信息比特的的外信息值。在前 $1/2$ 次迭代过程中,三个独立的 MAP 译码器分别并行处理接收的三个信息段序列 $((a_1, a_2), p_{1,2}), (\pi_1(a_1, a_3), p_{1,3}), (\pi_2(a_2, a_3), p_{2,3})$,得到三个信息段组合的外信息值,经过解复用后,MAP1 译码器得到关于 a_1, a_2 的外信息值,MAP2 得到关于 a_1, a_3 的外信息值,MAP3 得到关于 a_2, a_3 的外信息值;接着 MAP1 和 MAP2 交换 a_1 部分的外信息值,MAP1 和 MAP3 交换 a_2 部分的外信息值,MAP2 和 MAP3 交换 a_3 部分的外信息值。在后 $1/2$ 迭代过程中,MAP1, MAP2 和 MAP3 以前 $1/2$ 次迭代过程的传递值作为译码的外信息值,重新进行译码,得到新的外信息值,从而完成了一次完整的迭代译码过程。一次迭代过程得到的外信息值送入下一次迭代过程,直到达到设定的迭代次数为

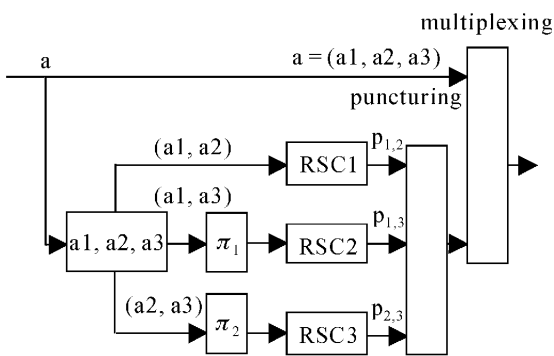


图 1 双模 turbo 码的编码器结构

Fig. 1 Coding structure of twofold turbo code

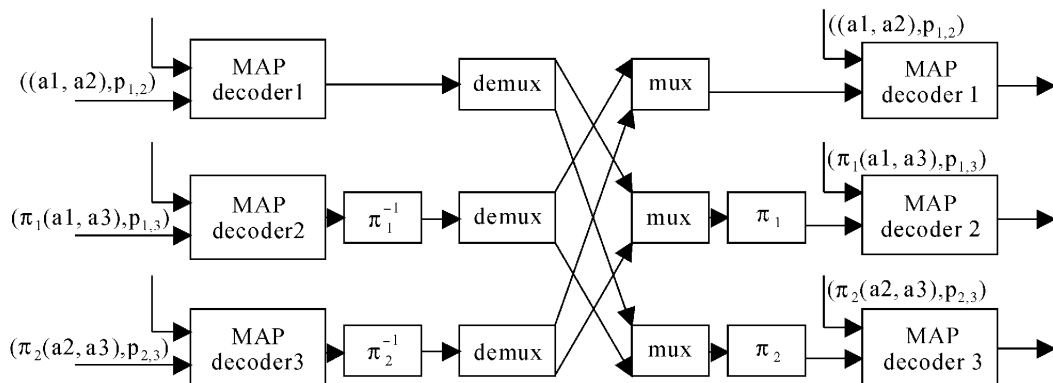


图 2 双模 turbo 码的一次迭代译码过程

Fig. 2 One iterated decoding of twofold turbo code

止。

图 3 为整个迭代中软信息的交换过程。在译码器的最后,由于每一个信息段的似然比值都有两个值,所以选择其中较大的作为最后译码的每一比特的似然比值,从而完成信息序列 a 的译码。

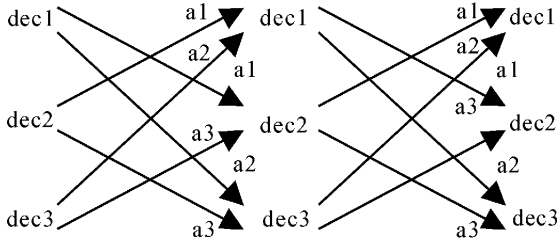


图 3 迭代中软信息的交换过程

Fig. 3 Transferred process of soft information

对于传统的 turbo 码,其 MAP 译码算法为^[3]

$$L(u_k) = L^a(u_k) + L_C y_k^S + L^e(u_k), \quad (6)$$

式中的第一项前一个译码器为第二个译码器提供关于 x_k^S 的先验信,第二项是信道参数值,第三项代表的是送给后续译码器的外部信息。从双模 turbo 码编译码原理可以看出,双模 turbo 码和普通 turbo 码的区别只是在于每一个信息段的编译码的次数不同,因此双模码的译码算法也可以使用普通的 MAP 算法。而式(6)中的第二项是信道参数值,和系统信道模型密切相关,由于大气光信道的噪声干扰和传输信号具有一定的相关性,所以无线光信道与传统的 AWGN 信道有所不同,为了进行系统仿真,必须对无线光信道下的 turbo 码译码算法进行修改,需要对无线电通信的信道参数值进行修正才能应用于无线光通信。在 turbo 码的译码算法中,最主要的参数是: $\gamma_i(R_k, m', m)$ 及外信息 W_k ,其中 m 表示编码器的状态, m' 表示 m 的前一状态, R_k 表示接收到的第 k 比特的信息^[4]。

利用 log-BCHR 算法对 MAP 译码器进行译码,则从 BCHR 算法可以得到

$$\begin{aligned} \gamma_i(R_k, m', m) = & P_r\{d_k = i, R_k, S_k = m \mid S_{k-1} = m'\} = \\ & P_r\{R_k \mid x_k\} \cdot P_r\{d_k = i, S_k = m \mid S_{k-1} = m'\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W_k = \log & \frac{\sum_{m'j=0}^1 \sum_{m'j=0}^1 \gamma_1(y_{k,p}, m', m) \alpha_{k-1}^j(m') \beta_k(m)}{\sum_{m'j=0}^1 \sum_{m'j=0}^1 \gamma_0(y_{k,p}, m', m) \alpha_{k-1}^j(m') \beta_k(m)} = \\ & \Lambda(d_k) - \log \frac{P_r(y_{k,i} \mid d_k = 1)}{P_r(y_{k,i} \mid d_k = 0)}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 d_k 表示 k 时刻的输入比特, x_k 表示 k 时刻编码

器的输出比特,式(8)中的 $\alpha_{k-1}^j(m'), \beta_k(m)$ 可以分别由 $\gamma_i(R_k, m', m)$ 通过前向递推和反向递推得到, $\Lambda(d_k)$ 表示 k 比特的对数似然值。(7) 式后一项与信道模型有关,按照无线光信道的信道模型,可以分别得到无线光信道下的 $\gamma_i(R_k, m', m)$ 及 W_k ^[4]。

4 仿真结果及分析

为了具体分析基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统的特性,在分析大气光信道信噪比的基础上,分析了系统的误码率性能。图 4 给出了大气光信道的信噪比和大气能见度的关系,其中 L 为系统的通信距离,我们分别仿真了 L 为 0.5 km, 1.0 km, 1.5 km 三种情况。因为自由空间光通信的发射功率一般可调,假定发射信号光平均功率为 30 mW, 闪烁指数方差为 $\sigma_s^2 = 0.1$, 加性噪声平均功率为 0.4 mW。

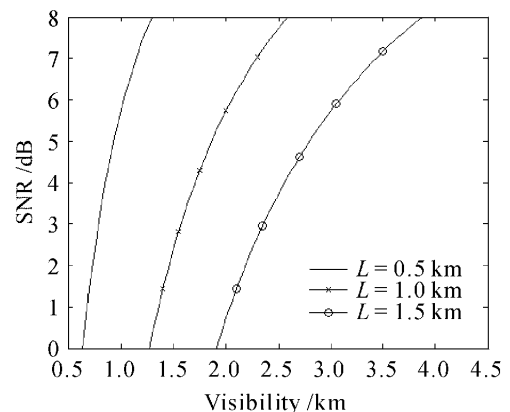


图 4 大气信道信噪比和能见度的关系

Fig. 4 Curves of atmospheric channel SNR versus visibility

非常明显,信道的信噪比随着系统通信距离的增加和能见度的减小而减小,但目前尚没有一个定量的计算来分析它们之间变化的相互关系,图 4 定量地计算出了三种通信距离下信道的信噪比和大气能见度的关系。若通信系统要求信噪比大于 3 dB, 由图中可以看出,通信距离为 0.5 km, 1.0 km, 1.5 km 的系统,大气的能见度必须分别达到 0.8 km, 1.6 km, 2.35 km。若大气的能见度为 1.5 km, 则系统通信距离必须小于 1.1 km。因此,能见度是设计无线光通信系统的通信距离的主要因素之一,这为不同的天气条件下设计无线光通信系统的通信距离提供了理论根据。

图 5 给出了基于双模 turbo 码和普通 turbo 码的自由空间光通信系统的误码率和大气光信道信噪

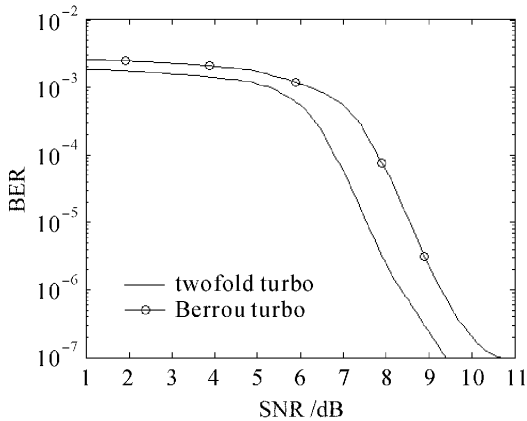


图5 两种不同编码的系统误码特性分析
Fig. 5 Analysis BER of system based on two different codes

比的关系。系统所用双模 turbo 码采用的递归系统卷积分量码多项式均为 $g = (7, 5)$, 交织器均采用伪随机交织器, 交织深度为 500 bit, 迭代次数为 6, 普通 turbo 码的码率为 $1/3$ 。从图 5 中可以看出, 对于无线光通信系统, 在相同的信道信噪比条件下, 双模 turbo 码的系统误码率比普通 turbo 码的误码率低。例如在信道信噪比为 3 dB 时, 采用双模 turbo 码的系统误码率为 9.6×10^{-2} , 采用普通 turbo 码的系统误码率为 8.3×10^{-2} ; 信道信噪比为 8 dB 时, 双模 turbo 码的系统误码率为 9.0×10^{-5} , 普通 turbo 码的系统误码率为 4.7×10^{-4} 。如果无线光通信系统要求一定的系统误码率, 从图中可以看出采用双模 turbo 的系统所要求的信道信噪比比普通 turbo 的信道信噪比低。例如, 若系统误码率要求为 1.0×10^{-3} , 则采用双模 turbo 码的系统要求的信噪比为 5 dB, 采用普通 turbo 码的系统要求的信噪比为 8 dB; 若系统误码率要求为 1.0×10^{-6} , 双模 turbo 码的系统的信噪比为 8 dB, 普通 turbo 码的系统的信噪比为 9.05 dB。从图中看出, 在一定的误码率下, 在信噪比低于 6 dB 时, 双模 turbo 码所要求的系统信道信噪比比普通 turbo 码的要求低 3 dB 左右; 在信噪比高于 6 dB 时, 双模 turbo 要求的信噪比比普通 turbo 码的要求低 1 dB 左右。而对于一个通信系统, 只有当系统的误码率低于 1.0×10^{-5} 时, 系统才具有实用价值, 此时对应的双模 turbo 码的信道信噪比为 7 dB。因此, 对于实用的无线光通信系统, 要

求系统误码率低于 1.0×10^{-5} , 此时采用双模 turbo 码的系统比普通 turbo 码系统所要求的信道信噪比低约 1 dB。

5 结 论

分析了大气光信道的信噪比特性, 将一种新的 turbo 码应用于自由空间光通信系统, 详细分析了其编译码原理。在此基础上, 分析了基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统误码率性能。分析表明, 在相同的信道信噪比条件下, 采用双模 turbo 码的无线光通信系统的误码率比普通 turbo 系统的误码率低, 因此基于双模 turbo 码的系统能很好地降低误码率, 提高系统通信性能。

参 考 文 献

- David J. T. Heatley, David R. Wisely, Lan Neild *et al.*. Optical wireless: The story so far [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1998, **36**(12):72~82
- D. Kedar, S. Arnon. Optical wireless communication through fog in the presence of pointing errors [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(24):4946~4954
- C. Berrou, A. Glavieux. Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1996, **44**(10):1261~1271
- Xie Weiliang, Tang Junxiong. Analysis on characterization of atmospheric optical wireless communication system based on turbo code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):835~838
谢伟良, 汤俊雄. 基于 Turbo 码的大气无线光通信系统特性分析 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(9):835~838
- Wu Yucheng, Fu Yiru, Huang Tiancong. Multiple turbo codes for satellite communications [J]. *Journal of Chongqing University*, 2004, **27**(9):49~51
吴玉成, 付驿如, 黄天聪. 卫星通信中多重 turbo 码技术的应用 [J]. *重庆大学学报*, 2004, **27**(9):49~51
- 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
- Wan Lingyu, Liu Liren, Zhang Mingli. On-ground simulation technology for free-space laser long-distance propagation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1367~1370
万玲玉, 刘立人, 张明丽. 自由空间激光远距离传输的地面模拟研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1367~1370
- W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka *et al.*. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [J]. *Trans. of IEICE*, 1993, **76**(9):1169~1176
- C. Tanriover, B. Honary, Jun Xu *et al.*. Improving turbo code error performance by multifold coding [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 2002, **6**(5):193~195