

文章编号: 0258-7025(2003)09-0835-04

# 基于 Turbo 码的大气无线光通信系统特性分析

谢伟良, 汤俊雄

(北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘要** 提出并分析了基于 Turbo 码的大气无线光通信系统, 针对大气无线光通信中的各种衰减和噪声分别进行了分析, 通过仿真得出了特性曲线。比较了基于 Turbo 码的大气无线光通信系统与未编码大气无线光通信系统, 发现 Turbo 码技术能够很好地补偿和克服各种衰减和噪声, 提高了系统的抗干扰能力, 使系统的性能得到了很大的提高。

**关键词** 无线通信技术; Turbo 码; 瞄准偏差; 大气衰减

**中图分类号** TN 929.12 **文献标识码** A

## Analysis on Characterization of Atmospheric Optical Wireless Communication System Based on Turbo Code

XIE Wei-liang, TANG Jun-xiong

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** In this paper, an atmospheric optical wireless communication system based on Turbo code is introduced and investigated. Based on analysis on losses and noises of optical wireless system, characterizations of the optical wireless communication system based on Turbo code are presented with simulations. Compared with uncoded system, the Turbo-coded optical wireless system improves the performance of optical wireless link because Turbo code compensates losses and noises of link and improves jamming-rejection capability of system.

**Key words** wireless communication technique; Turbo code; pointing error; attenuation

### 1 引 言

随着数据通信的发展, 用户对通信服务的宽带和移动性的需求不断增加, 光纤通信可以实现宽带传输, 但是无法满足移动的要求, 而无线通信虽然可以移动, 但是就目前的技术很难满足宽带通信的要求。无线光通信可以在方便的同时满足通信服务的宽带和可移动性的要求, 系统可以在数小时内安装调试, 实现快捷的通信建设, 并且系统没有频率的限制, 无需频率申请, 同时由于采用激光进行通信, 很容易实现宽带传输, 因而有着广阔的应用前景。

室外大气无线光通信系统必须要有很好的功率预算, 以保证无错误的传输, 在无线光信道中有各种的链路功率损耗, 包括: 自由空间损耗、大气衰减、光

强闪烁和背景辐射等<sup>[1]</sup>。由于无线光信道的不稳定, 为了保证系统的可靠性, 必须设计一定的功率裕量, 但是无线光通信是功率受限的系统, 有必要在系统中加入新的技术, 如: 信道编码等技术。1988 年 Frederic M. Davidson 和 Yutai T. Kon 做了采用卷积码的无线光通信系统性能分析<sup>[2]</sup>。1993 年 C. Berrou 和 A. Glavieux 等首次提出了一种优异的信道编码方案——Turbo 码<sup>[3]</sup>。目前 Turbo 码在无线通信领域的研究较多, 但是 Turbo 码在光通信领域的研究较少, 1998 年 Kamran Kiasaleh 研究了 Turbo 码在卫星光通信中的特性<sup>[4]</sup>, Jin Young Kim 等对 Turbo 码在光纤 CDMA 系统中的应用作了研究<sup>[5]</sup>。但是对于 Turbo 码在大气无线光通信中的研究还报道较少。本文将在分析大气无线光通

收稿日期: 2002-05-17; 收到修改稿日期: 2002-06-24

基金项目: 北京市自然科学基金(4002007)资助项目。

作者简介: 谢伟良(1974—), 男, 北京大学电子学系, 博士生, 主要从事 Turbo 码、差错控制和无线光通信的研究。Email: nk\_xiewl@sina.com

信理论的基础上,提出并分析基于 Turbo 码的大气无线光通信系统,对大气无线光通信系统中的空间损耗、大气衰减、光强闪烁和背景噪声与系统性能的关系分别进行分析,并且与未编码系统进行了比较。

## 2 无线光通信系统分析

由于雨、雾等天气因素,无线光传输路径中存在着大气衰减,其变化幅度很大,可以从 0.1dB/km 到 300dB/km,所以无线光通信系统的稳定程度与系统的功率裕量密切相关。克服大气衰减,一般可以通过及时地调节系统设计参数(如:发射功率,接收方式,传输路径等)来适应不同的大气衰减环境,而无线光信道中还存在着光强闪烁效应,它就是一个快速变化的信号强度起伏过程<sup>[1]</sup>。光强闪烁的原因是大气湍流运动使大气折射率产生随机的时空分布,折射率的随机性导致光波的随机干涉效应,从而引起接收光信号的快速起伏,在闪烁较大的时候可以达到大于 30 dB 的衰落幅度。目前无线光通信一般采用光强度调制方式进行,所以太阳光和其他光辐射源产生的背景光成为系统的噪声光源,在系统设计时要注意避开背景光较强的传输方向。大气无线光通信是激光穿过大气进行通信,由于激光光束在接收端会形成一个较大半径的光斑,所以带来了一定的自由空间损耗,它是由光束的空间几何传输造成的,一般在 10~30 dB。而且在发射和接收望远镜之间要加入瞄准装置,发射机和接收机之间的瞄准偏差也将带来系统的进一步功率损耗。无线光通信系统在设计时还要有一些附属的装置,例如驱鸟装置,以避免光路的中断。本文将在分析无线光通信链路模型的基础上,进一步分析基于 Turbo 码的无线光通信系统的性能。

### 2.1 无线光通信的链路传输模型

首先必须推导出高斯光束条件下存在瞄准偏差的无线光链路传输方程,假设激光器发射的光束为高斯光束,接收机和发射机距离为  $R$ ,发射功率为  $P_t$ ,发散角为  $\alpha$ ,则其电矢量的振幅分布为

$$E(x, y, R) = \frac{A_0}{w(R)} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{w^2(R)}\right] \quad (1)$$

$$w(R) = w_0 \left[1 + \left(\frac{R\lambda}{\pi w_0^2}\right)^2\right]^{1/2}, \quad w_0 = \frac{2\lambda}{\pi\alpha} \quad (2)$$

其中  $A_0$  为振幅常数, $w(R)$  是链路传输距离为  $R$  处的光斑尺寸, $w_0$  是  $R = 0$  处的  $w(R)$  值。用  $I(x, y, R)$  表示传输距离为  $R$  的接收平面上  $(x, y)$  坐标点的光强,则

$$I(x, y, R) = kE(x, y, R)^2 =$$

$$I(0, 0, R) \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(R)}\right] \quad (3)$$

同时根据光能守恒的原则

$$P_t = \iint I(x, y, R) dx dy = \iint kE(x, y, R)^2 dx dy \quad (4)$$

可推出光斑中心处光强的表达式,如果再考虑大气衰减的损耗和光学系统的损耗,则还要加上大气衰减因子和发射、接受光学效率因子  $\eta_t, \eta_r$ ,得到接收平面光斑中心的光强为

$$I(0, 0, R) = \frac{2P_t \cdot \eta_t \cdot \eta_r}{\pi w^2(R)} \times 10^{-\text{Atten} \cdot R/10} \quad (5)$$

式中的 Atten 是大气衰减因子(单位 dB/km)。由于距离比较远时,通常有  $w(R)$  远大于接收机的接收孔径  $D_r$ ,所以可以把接收孔径内的光强近似为均匀分布,这样,接收功率  $P_r$  为

$$P_r = I(x, y, R) \cdot \pi \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 = I(0, 0, R) \cdot L_p \cdot \pi \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 \quad (6)$$

其中  $L_p$  为瞄准偏差引起的损耗因子,由于距离较远,接收机与接收光斑中心的距离  $r \approx R\theta$ ,  $\theta$  为瞄准偏角,所以  $L_p$  可以表示为

$$L_p = \frac{I(x, y, R)}{I(0, 0, R)} = \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{w^2(R)}\right] = \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(R)}\right] = \exp\left[-\frac{2(R\theta)^2}{w^2(R)}\right] \quad (7)$$

无线光链路中进入接收机视场角的背景光噪声  $P_b$  为

$$P_b = L \cdot \pi \left(\frac{D_r}{2}\right)^2 \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\pi}{4} \beta^2 \quad (8)$$

其中,  $L$  为辐射强度谱函数,  $\Delta\lambda$  为滤光器带宽,  $\beta$  为接收机视场角。在设计系统时,应该尽量减小接收机的背景噪声强度,以提高系统的性能。

### 2.2 无线光通信的信道模型

假设系统采用 APD 作为探测器并且接收机包含热噪声,接收机的电子计数近似服从高斯概率分布<sup>[6]</sup>,用  $M_0, \sigma_0, M_1, \sigma_1$  分别表示“0”信号和“1”信号电子计数均值和均方差,则

$$M_1(I) = g \cdot e \cdot [K_s(I) + K_b] \quad (9)$$

$$M_0 = g \cdot e \cdot K_b \quad (10)$$

$$\sigma_1^2(I) = g^2 F \cdot e^2 \cdot [K_s(I) + K_b] + \sigma_n^2 \quad (11)$$

$$\sigma_0^2 = (g \cdot e)^2 F \cdot K_b + \sigma_n^2 \quad (12)$$

其中  $F$  为附加噪声因子,  $\sigma_n^2$  为热噪声计数方差,  $g$  为

光电倍增增益,对于接收机光子计数  $K_s, K_b$  分别为

$$K_s(I) = \frac{2\eta}{h\nu} \cdot P_r(I) \cdot T_b \quad (13)$$

$$K_b = \frac{\eta}{h\nu} \cdot P_b \cdot T_b \quad (14)$$

其中  $\eta$  为量子效率,  $T_b$  为码周期。对于无线光通信系统中的光强闪烁效应,由于接收孔径较大,一般为几十厘米,如果考虑孔径平均效应,闪烁值是  $D_r$  内的一个统计平均值,因而是一个下降了闪烁值,所以对于距离在几千米以内的系统光强闪烁一般为弱闪烁,其光强闪烁近似服从对数正态分布<sup>[7,8]</sup>

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\} \quad (15)$$

其中  $I_0$  表示光强均值,  $\sigma_x$  表示闪烁指数(光信号的对数振幅标准偏差),则系统的平均误码率为

$$\text{BER} = \int_0^\infty P_e(I) \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_x I} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\} dI \quad (16)$$

### 2.3 Turbo 码译码算法

由于 Turbo 码的译码算法与系统信道模型密切相关,而无线光通信与无线电通信的信道模型存在着差别,所以无线光通信 Turbo 码的译码算法不能从无线电通信中直接移植过来,要进行算法的修正才可以用于无线光通信系统。在 Turbo 码的译码算法中,最根本的参数是:  $\gamma_i(R_k, m', m)$  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。

如果采用 log-BCJR 算法,则从 log-BCJR 算法<sup>[9]</sup>可以得到

$$\begin{aligned} \gamma_i(R_k, m', m) &= \\ P_r\{d_k = i, R_k, S_k = m \mid S_{k-1} = m'\} &= \\ P_r\{R_k \mid x_k\} \cdot P_r\{d_k = i, S_k = m \mid S_{k-1} = m'\} & \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} W_k &= \log \frac{\sum_{m'j=0}^1 \sum_{m'j=0}^1 \gamma_1(y_{k,p}, m', m) \alpha_{k-1}^j(m') \beta_k(m)}{\sum_{m'j=0}^1 \sum_{m'j=0}^1 \gamma_0(y_{k,p}, m', m) \alpha_{k-1}^j(m') \beta_k(m)} = \\ \Lambda(d_k) &= \log \frac{P_r(y_{k,i} \mid d_k = 1)}{P_r(y_{k,i} \mid d_k = 0)} \end{aligned} \quad (18)$$

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,(18) 式中的  $\alpha_{k-1}^j(m'), \beta_k(m)$  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  $k$  比特的对数似然比值。(17) 式前一项

$P_r\{R_k \mid x_k\}$  和 (18) 式后一项  $\log[P_r(y_{k,i} \mid d_k = 1)/P_r(y_{k,i} \mid d_k = 0)]$  都与信道模型有关,按照无线光通信的信道模型,可以分别得到无线光信道下的  $\gamma_i(R_k, m', m)$  及  $W_k$ 。

同时由于光强闪烁效应,信道是时变信道,所以必须对信道的参数进行估计才能进行正确的译码计算。光强闪烁的功率谱密度一般在 200 Hz 频带内,闪烁频率相对于通信码率(一般大于 10 Mb/s,甚至达到 1 Gb/s)很低,可以采用对接收到的码序列进行信号处理来获得信道参数,最终进行译码计算。

### 3 仿真结果及分析

为了具体分析基于 Turbo 码的无线光通信系统特性,采用蒙特卡罗法进行了系统仿真,分别分析了瞄准偏差、大气衰减、大气闪烁和背景噪声对基于 Turbo 码的无线光通信系统的影响,同时和未编码无线光通信系统进行了比较。系统采用 OOK 的调制方式,光强闪烁频谱取在 100 Hz 内。采用 1/3 码率的 Turbo 码,生成多项式为  $g(31,33)_{\text{octal}}$ ,交织器使用伪随机交织器,交织深度为 500 bit,译码算法采用 log-BCJR 译码算法,最大迭代次数为 6 次。

为了分析瞄准偏差所带来的链路功率损耗,作了瞄准偏差与系统补偿功率的特性曲线,如图 1 所示,发射机的光束发散角为 2 mrad。由图 1 可见,随着光路的瞄准偏角的增大,系统的补偿功率将快速增大,所以瞄准偏角是设计系统功率预算的主要因素之一。同时还给出了未编码系统的特性曲线,从图中还可以看出,未编码系统所要求补偿功率比基于 Turbo 码的系统补偿功率要大得多,例如在补

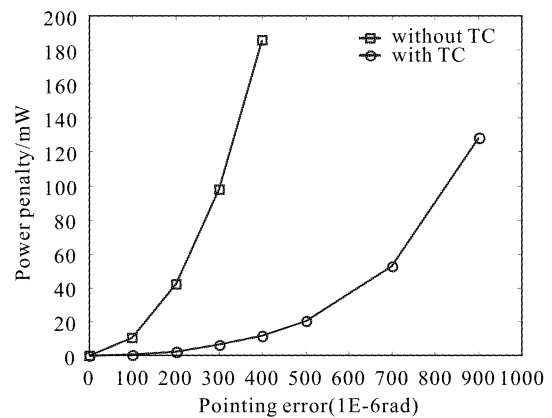


图 1 BER=10<sup>-5</sup> 和  $\sigma_x = 0.25$  下瞄准偏差与系统补偿功率之间的特性曲线

Fig. 1 Characterization of power penalty versus pointing error at BER=10<sup>-5</sup> and  $\sigma_x = 0.25$

偿功率为 100 mW 时,未编码系统只能允许 300  $\mu\text{rad}$  的瞄准偏角,而对于基于 Turbo 码的系统则可以允许 800  $\mu\text{rad}$  的瞄准偏角,这说明 Turbo 码对于系统的空间损耗有较好的补偿和抑制作用。

为了分析大气衰减强度与有效通信距离的关系,图 2 给出了发散角为 2 mrad 的大气衰减强度与通信距离特性曲线。从图 2 可知,随着大气衰减强度的增大,链路的通信距离将大大减小,要注意的是在通信距离增大时,不仅大气衰减引起的功率衰减增加,同时光束扩散引起的空间损耗也在增加,这是因为通信距离增大,光束在接收平面形成的光斑也将变大,而接收孔径如果保持不变,那么系统的空间损耗也将增大。所以为了保证系统的稳定性,一般在设计系统时要有功率裕量,以使系统有一定的天气适应能力。为了分析 Turbo 码在系统中的作用,图 2 还给出了未编码系统的特性曲线,相比之下基于 Turbo 码的链路系统有了更强的天气适应能力和更大的设计空间。例如在大气衰减为 10 dB/km 时,基于 Turbo 码系统可以使通信距离从 3.0 km 扩展到 4.0 km,在大气衰减为 40 dB/km 时,基于 Turbo 码系统也可以将通信距离从 1.0 km 扩展到 1.25 km。在同一通信距离 1.5 km 时,基于 Turbo 码系统可以承受 32 dB/km 的大气衰减,而未编码系统只能承受 24 dB/km 的大气衰减。

在无线光通信系统中还存在着光强闪烁和背景噪声,并且无线光信道的噪声和信号是相关的,系统的误码特性同时依赖于信号和噪声计数  $K_s$  和  $K_b$ ,而不仅是它们的比值  $K_s/K_b$ ,本文仿真了在较强闪烁和较强背景噪声条件下的系统误码特性,如图 3 所示。图 3 的特性曲线说明基于 Turbo 码的无线

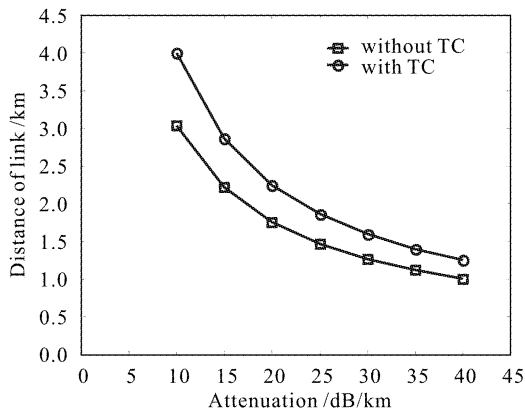


图 2 大气衰减强度与通信距离的特性曲线  
Fig. 2 Characterization of atmospheric attenuation versus link distance at  $P_t = 500 \text{ mW}$ ,  $\text{BER} = 10^{-5}$ ,  $\sigma_x = 0.25$

光通信系统比未编码系统有更好的系统性能,在未编码系统的误码率为  $10^{-2}$  的情况下,基于 Turbo 码的无线光通信系统则可以使系统误码率达到  $10^{-5}$ ,这也说明 Turbo 码对于系统中的光强闪烁和背景噪声有很好的抗干扰作用。

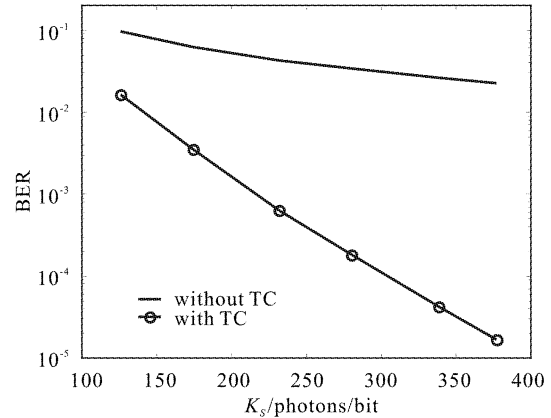


图 3  $\sigma_x = 0.25$ ,  $K_b = 100$  无线光信道条件下的系统误码特性曲线

Fig. 3 Performance of BER for optical wireless channel at  $\sigma_x = 0.25$  and  $K_b = 100$

#### 参 考 文 献

- Zhang Yixin, Chi Zeyang. Propagation and Imaging of Lightwave in Atmosphere [M]. Beijing: National Defence Press, 1997 (in Chinese)
- Frederic M. Davidson, Yutai T. Kon. Interleaved convolutional coding for the turbulent atmospheric optical communication channel [J]. *IEEE Trans. Comm.*, 1988, **36**(9):993~1003
- C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima. Near Shannon Limit Error-correcting Coding and Decoding: Turbo-codes [C], ICC'93. 1064~1070
- Kamran Kiasaleh. Turbo-coded optical PPM communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(1):18~26
- Jin Young Kim, H. Vincent Poor. Turbo-coded optical direct-detection CDMA system with PPM modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3):312~323
- Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. Optical Telecommunications and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998 (in Chinese); Robert M. Gagliardi, Sherman Karp. Optical Telecommunications [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995
- J. H. Churnside, R. J. Hill. Probability density of irradiance scintillations for strong path-integrated refractive turbulence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4):727~733
- Isaac I. Kim, Harel Hakakha, Prasanna Adhikari. Scintillation reduction using multiple transmitters [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:102~113
- P. Robertson, E. Villebrun, P. A. Hoeher. Comparison of Optimal and Sub-optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain [C], ICC'95. 1009~1013