

文章编号: 0258-7025(2004)05-0575-04

# 无线光通信差错控制系统的时间参数特性

谢伟良, 刘 璐, 汤俊雄

(北京大学信息科学技术学院 量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871)

**摘要** 在无线光通信系统中, 光强闪烁和大气衰减等因素将使通信系统产生突发误码, 结合 Turbo 码, 建议并分析了两种差错控制方案中时间参数的特性。对于 Turbo 码+信道交织的差错控制方案, 仿真分析了不同信道交织深度下的无线光通信系统性能, 给出了特性曲线。对于 Turbo 码+反馈重发(ARQ)的方案, 仿真结果表明反馈环路延迟时间的变化不影响系统的平均吞吐量, 但是将影响平均数据传输延迟和重发次数的概率分布。

**关键词** 通信技术; 时间参数; 无线光通信; 差错控制; Turbo 码

中图分类号 TN 929.1 文献标识码 A

## Characterization of Time Parameter of Error Control Scheme in Optical Wireless Communication

XIE Wei-liang, LIU Lu, TANG Jun-xiong

(Key Laboratory for Quantum Information and Measurements, School of Electronics Engineering and Computer Science, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** The paper proposes and analyzes two turbo-coded error control schemes to improve performance of optical wireless communication with long burst error by scintillation and attenuation. Characterization of time parameter of two error control schemes was provided to design. For turbo code + channel interleaving scheme, the paper shows performance of optical wireless communication under various channel interleaving depth. For turbo code + ARQ scheme, simulations show that the feedback delay don't influence average link throughput, but the feedback delay changes average link delay and probability distribution of transmitting times.

**Key words** communication technique; time parameter; optical wireless communication; error control; turbo code

### 1 引 言

无线光通信作为一种新型的通信技术, 拥有许多明显的优点而备受关注<sup>[1]</sup>。无线光通信与光纤通信相比, 无需铺设光缆, 价格便宜, 建设周期短, 且频带可以达到光纤通信的水平; 与微波通信比, 它同样有优势, 频带比微波高 3~4 个数量级, 而且不受频率管理部门的限制, 无需进行频率申请。目前, 无线光通信已成为发达国家宽带通信的关键技术, 也是我国急需的关键技术。

由于无线光信道的不稳定性, 有必要在无线光通信中引入差错控制技术, 文献[2]分析了交织卷积

码对无线光通信的性能改善作用, 文献[3]将 Turbo 码应用于无线光通信系统, 分析了基于 Turbo 码的无线光通信系统性能, 结果表明 Turbo 码可以有效地提高无线光通信系统的性能。本文在 Turbo 码应用于无线光通信系统的基础上, 结合 Turbo 码进一步提出两种差错控制方案: Turbo 码+信道交织和 Turbo 码+反馈重发(ARQ), 分别采用信道交织和反馈重发技术来克服无线光信道中存在的光信号衰落效应, 主要针对两种差错控制方案设计中的重要时间参数进行分析, 获得时间参数对无线光通信系统性能的影响, 从而优化差错控制系统的设计, 提

收稿日期: 2003-01-23; 收到修改稿日期: 2003-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60077019-60240420237)资助项目。

作者简介: 谢伟良(1974—), 男, 福建人, 北京大学信息科学技术学院电子学系博士研究生, 主要从事 Turbo 码、差错控制和无线光通信的研究。E-mail: nk\_xiewl@sina.com

高无线光通信链路的性能。

## 2 无线光通信的信道模型

大气无线光通信是激光穿过大气进行通信,激光空间传输所带来的空间几何损耗、瞄准偏差损耗、大气衰减和光强闪烁都将引起接收光功率的衰落,从而使系统的性能降低。同时,无线光通信一般采用光强度调制方式进行通信,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。为了分析和设计无线光通信的差错控制系统,将首先分析无线光通信的信道模型。

假设系统采用雪崩光电二极管(APD)作为探测器并且接收机具有不可忽略的热噪声,则接收机的电子计数近似服从高斯概率分布,用  $M_0, \sigma_0, M_1, \sigma_1$  分别表示“0”信号和“1”信号的均值和均方差<sup>[3]</sup>,则

$$M_1 = g \cdot e \cdot (K_s + K_b) \quad (1)$$

$$M_0 = g \cdot e \cdot K_b \quad (2)$$

$$\sigma_1^2 = g^2 F \cdot e^2 \cdot (K_s + K_b) + \sigma_n^2 \quad (3)$$

$$\sigma_0^2 = (g \cdot e)^2 F \cdot K_b + \sigma_n^2 \quad (4)$$

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,  $e$  为电子电荷,接收机光子计数均值  $K_s, K_b$  分别为

$$K_s = \frac{2\eta}{h\nu} \cdot P_r \cdot T_b \quad (5)$$

$$K_b = \frac{\eta}{h\nu} \cdot P_b \cdot T_b \quad (6)$$

其中  $\eta$  为量子效率,  $T_b$  为码周期,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光波频率,  $P_r$  和  $P_b$  分别为接收机接收光功率和背景光功率。对于无线光通信系统中的光强闪烁效应,其光强闪烁近似服从对数正态分布<sup>[4]</sup>

$$P_I(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma_x}I} \exp\left[-\frac{\left(\ln\frac{I}{I_0} + 2\sigma_x^2\right)^2}{8\sigma_x^2}\right] \quad (7)$$

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

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

其中  $P_e$  是光强为某一定值时的误码率,可以根据公

式(1)~(4)计算得到。

## 3 差错控制系统设计

因为无线光信道的不稳定性和各种衰落因素,影响了无线光通信系统的应用,为了保证链路系统的稳定传输和可接通率,可在系统中引入差错控制技术。采用 Turbo 码作为差错控制方案中的前向纠错码,因为 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 Turbo 码的译码算法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<sup>[5]</sup>,则可以得到

$$\gamma_i(R_k, m', m) = P_r\{R_k | x_k\} \cdot$$

$$P_r\{d_k = i, S_k = m | S_{k-1} = m'\} \quad (9)$$

后一项与编码器的编码方式有关,前一项为信道的转移概率,与信道模型有关,在高斯光信道下,可以在对数域得到前一项为<sup>[3]</sup>

$$\ln\{P_r(R_k | x_k)\} = -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{k,i}) - \frac{(y_{k,i} - x_{k,i})^2}{2\sigma_{k,i}^2} - \ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{k,p}) - \frac{(y_{k,p} - x_{k,p})^2}{2\sigma_{k,p}^2} \quad (10)$$

其中  $d_k$  表示  $k$  时刻编码器的输入比特,  $x_k$  表示  $k$  时刻编码器的输出比特,  $x_{k,i}, y_{k,i}$  分别为发送和接收的信息比特,  $x_{k,p}, y_{k,p}$  分别为发送和接收的校验比特。用同样的方法修正外信息量  $W_k$ 。值得注意的是,在高斯光信道下的  $\gamma_i(R_k, m', m)$  及  $W_k$  计算中,因为噪声与信号不独立,所以  $\sigma_{k,i}$  和  $\sigma_{k,p}$  并不相等,同时由于光强闪烁效应,信道是时变信道,所以还必须对信道的参数进行估计才能进行正确的译码计算。

对于具有突发误码的衰落信道,除了采用前向纠错码外,一般还要采用交织编码或者反馈重发技术<sup>[6]</sup>来克服突发误码。基于 Turbo 码技术,分析了两种无线光通信差错控制方案: Turbo 码+信道交织和 Turbo 码+反馈重发。系统的框图如图 1 所示。

在方案 1 中,采用信道交织技术来克服无线光信道的衰落,因为衰落的频谱较低,所以很难达到完全交织<sup>[2]</sup>,但是信道交织对于长突发误码可以起到一定的分散误码作用,再配合以 Turbo 码的强纠错能力来共同改善系统性能。在方案 2 中,采用反馈重发技术来进行差错控制,通过循环检验码(CRC)

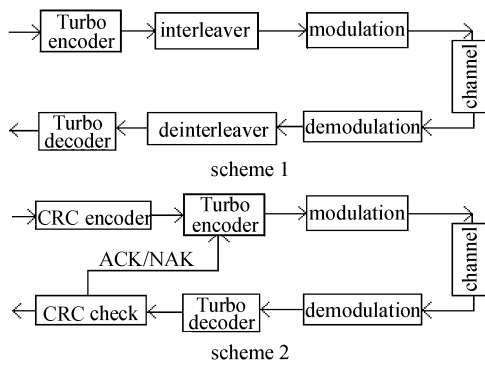


图 1 两种无线光通信差错控制方案框图  
Fig. 1 Two error control schemes for optical wireless communication

编码和校验来判别 Turbo 译码是否成功,如果不成功则重发数据,通过反馈重发机制来保证系统性能,但是无线光信道的信号衰落相关时间较长,所以很难实现重发数据与原有数据的完全独立。以下将分别分析两种差错控制方案中交织深度和反馈环路延迟等时间参数对系统性能的影响,来优化无线光通信系统的差错控制设计。

### 4 仿真结果及分析

为了具体分析基于 Turbo 码的无线光通信差错控制系统的时间参数,采用蒙特卡罗方法进行了系统仿真。系统采用开关键控(OOK)的调制方式,光强闪烁频谱取在 100 Hz 内,闪烁指数  $\sigma_x = 0.25$ ,背景光噪声计数  $K_b = 50$ 。采用 1/2 码率的 Turbo 码,生成多项式为  $g(31,33)_8$ , Turbo 码的码内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。方案 1 中使用的信道交织器采用行列式交织器,方案 2 采用的反馈重发协议为选择重发协议。

图 2 给出了不同信道交织深度下的无线光通信系统误码率,可以看出,虽然信道交织不能使误码完全独立,但是交织技术所产生的误码离散作用还是提高了系统的性能。随着交织深度的加大,系统误码率逐步降低。相对于最佳阈值未编码系统,在系统误码率为  $10^{-5}$  的情况下, Turbo 码可以为系统提供约 5 dB 的编码增益,如果在差错控制系统加入 3 ms 的信道交织,则将为系统带来约 2 dB 的附加编码增益,如果继续加大交织深度为 6 ms 的情况下,则差错控制系统可以提供 8.5 dB 的总编码增益。所以,仿真结果表明 Turbo 码+信道交织的差错控

制方案可以有效地提高系统的性能,并且随着交织深度的加大,系统性能不断提高。在设计差错控制系统时,可以根据需要进行系统设计。

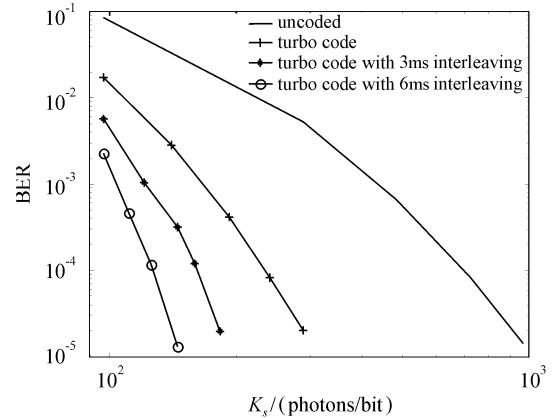


图 2 不同信道交织深度下的无线光通信误码率  
Fig. 2 BER performance of optical wireless communication under various channel interleaving depth

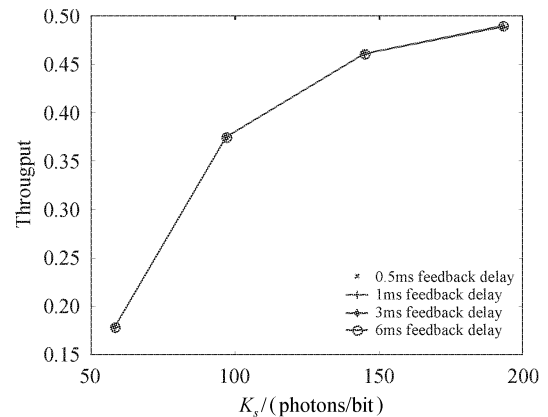


图 3 不同反馈环路延迟下的系统平均吞吐量  
Fig. 3 Average link throughput efficiency of optical wireless communication under various feedback delay

对于方案 2,反馈环路延迟时间的设计是一个重要参数。图 3 和图 4 分别给出了不同反馈环路延迟时间下的系统平均吞吐量和平均传输延迟。图 3 表明不同的反馈环路延迟并没有改变系统的平均吞吐量,系统的平均吞吐量不随环路延迟时间的大小而改变,同时系统平均吞吐量随着  $K_s$  的增大而增大。图 4 则显示了平均数据传输延迟时间与反馈环路延迟时间的关系,可以看出数据传输平均延迟随着反馈环路延迟的增长而增长,反馈环路延迟越大则平均传输延迟就越大,所以从系统的吞吐量和传输延迟角度,差错控制设计应该尽量减小反馈环路延迟。

系统平均吞吐量表示数据帧重发次数的平均

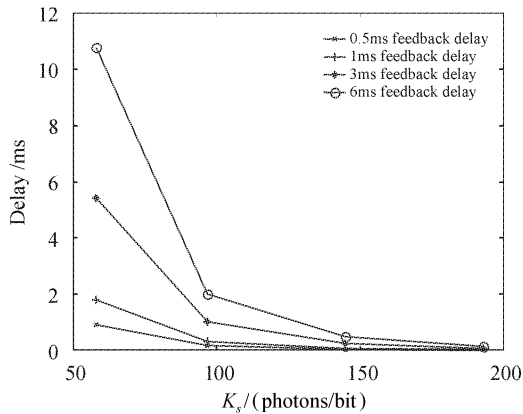


图4 不同反馈环路延迟下的系统平均传输延迟  
Fig. 4 Average link delay of optical wireless communication under various feedback delay

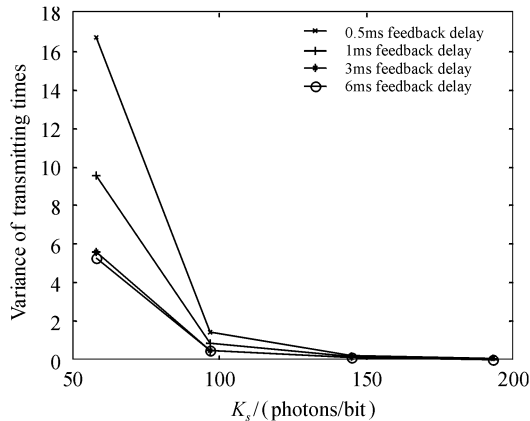


图5 不同反馈环路延迟下帧重发次数的方差  
Fig. 5 Variance of transmitting times in optical wireless communication under various feedback delay

值,虽然反馈环路延迟时间对系统的平均吞吐量没有影响,但是从仿真的结果中发现,增大反馈环路延迟对于数据帧重发次数的分布产生一定的影响,所以我们给出了不同环路延迟下数据帧重发次数的方差,如图5所示。可以看出,随着环路延迟的增

大,帧重发次数的方差减小了,这说明环路延迟时间虽然不能改变帧重发次数的平均值,但是使帧重发次数在分布上更靠近其平均值,减少了重发次数较大和重发次数较小情况的出现概率,这说明系统更加收敛,有利于差错控制系统的硬件设计。

## 5 结 论

对于无线光信道中衰落引起的长突发误码,提出并分析了两种差错控制方案,对于采用 Turbo 码+信道交织的差错控制方案,信道交织可以有效地提高无线光通信系统的性能,并且信道交织时间越大,性能改善的作用越大,如果采用反馈重发的方案,反馈环路延迟时间的变化将不影响系统的平均吞吐量,但是随着反馈环路延迟的增大,数据的平均传输延迟将增大,同时反馈环路延迟对重发次数的统计分布有影响。

## 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
- Frederic M. Davidson, Yutai T. Koh. Interleaved convolutional coding for the turbulent atmospheric optical communication channel [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, **36**(9):993~1003
- 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
- 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
- P. Robertson, E. Villebrun, P. Hoeher. A Comparison of Optimal and Sub-optimal MAP Decoding Algorithms Operating in the Log Domain [C]. ICC'95, 1009~1013
- Shu Lin, Daniel J. Costello, Jr., Michael J. Miller. Automatic-repeat-request error-control schemes [J]. *IEEE Communications Magazine*, 1984, **22**(12):5~17