

文章编号: 0253-2239(2010)10-2859-05

基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析

陈 丹 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 介绍了湍流信道条件下光强闪烁的对数正态分布模型,结合大气信道特点,在不同光强闪烁效应下,对比分析了几种未编码大气激光通信副载波系统的误码性能。采用 Turbo 码性能限分析了基于 Turbo 编码的无线光通信副载波调制系统误码性能,并对 Turbo 编码前后系统误比特性能进行了对比。仿真结果表明,二进制相移键控(BPSK)误码性能优于其它几种副载波调制,同时 Turbo 码技术在较强光强闪烁指数下能够获得较大的编码增益,可以有效地提高系统的抗干扰能力。

关键词 无线光通信;副载波;Turbo 码;误码性能

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2859

Analysis on Error Rate of Wireless Optical Communication Using Subcarrier Modulation on Turbo Code

Chen Dan Ke Xizheng

(School of Automation and Information, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract Optical wireless communication based on the log-normal model under the turbulence channel was introduced. Combining the characteristics of atmospheric channel, we analyzed the error rate of atmospheric laser communication using several kinds of subcarrier modulation system is analyzed. Under different scintillation distribution, the error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on turbo code was analyzed, and the bit error rate (BER) performance between Turbo coded and uncoded systems was compared. The simulation results showed that the error performance of binary phase shift keying (BPSK) was better than others, and turbo coded is efficient to improve jamming-rejection capability of system with the low signal-noise ratio (SNR) and strong scintillation index.

Key words wireless optical communication; subcarrier; Turbo code; bit error rate performance

1 引 言

无线激光通信作为一种新兴的通信方式,用激光或者光脉冲传输分组数据,其传输类似于光纤传输,又不需要无线电频率使用许可,另外具有无须铺设线路、移动性强、通信容量大、光束方向性好以及保密性高的特点,是一种具有广泛应用前景的通信技术^[1]。

但由于大气湍流、自然光背景噪声等,造成传输误码率的增大,严重影响了整个系统的性能^[2]。解决方案之一是差错控制编码技术的引入,它可以极大地改善地面无线光通信的误码性能。目前差错控制编码技术的研究主要集中在卷积码和 Turbo 码上^[3],其中北京大学的谢伟良等做了基于 Turbo 码的大气无线光

收稿日期: 2009-11-23; 收到修改稿日期: 2010-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、国防重点实验室基金(9140C3601010701)、军队 863 创新计划(2008AAJ159)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)、陕西省自然科学基金(2007F12)、广东省科技厅科技基金(2007-26)和青年科学研究计划(105-210816)资助课题。

作者简介: 陈 丹(1975—),女,博士研究生,讲师,主要从事大气激光通信及信号与信息处理等方面的研究。

E-mail: chdh@xaut.edu.cn

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

通信系统特性分析, Tomaki Ohtsuki 等研究了 Turbo 码在无线光通信中的应用。

无线光通信普遍采用强度调制/直接检测(IM/DD)系统。开关键控(OOK)作为无线光通信主要调制方案,受大气闪烁的影响较大。副载波强度调制是一种有效的战胜大气湍流的调制方法^[4,5], W. Huang 等^[6,7]已经证实了在大气湍流环境下,副载波相移键控(PSK)的性能优于 OOK。

本文以前期研究 4FSK、QAM 及 16PSK 高斯信道下仿真及其误码率性能分析为基础,在建立分析副载波调制模型和推导差错率的基础上,针对弱湍流大气信道仿真分析了几种副载波调制 Turbo 编码前后的系统差错性能。通过仿真结果给出了两种副载波调制在 Turbo 编码前后系统差错性能的对比。

2 大气传播信道及模型

无线光通信链路中激光传输将通过近地大气层,在传输过程中将与大气气体分子和大气气溶胶粒子相互作用,所受到的主要影响有:由于大气分子的吸收与散射及大气气溶胶的散射引起的大气衰减和大气湍流引起的湍流效应等。大气衰减主要影响无线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,影响系统的通信质量。因此,在分析无线光通信大气信道模型时,主要考虑湍流效应带来的影响。

大气湍流引起的湍流效应主要体现在接收端光强闪烁,针对湍流信道条件下光强闪烁的数学模型进行了研究,其中 Rytov 提出的弱湍流下光强的对数正态分布模型受到了学术界的普遍认可^[8],这里仅考虑大气弱湍流对光通信的影响。

弱湍流信道下,对于光强度调制(IM/DD)通信系统,接收光功率 $P(t)$ 为

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

式中 $P_s(t)$ 为无湍流下的接收光功率, $n(t)$ 为高斯白噪声, $X(t)$ 为等可能概率过程引起的光强闪烁,其概率密度函数^[9]

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

式中平均闪烁指数 X 已经归一化, σ_s^2 为 X 的对数方差, σ_s 也称为光强闪烁指数。当 $\sigma_s^2 \ll 1$ 时, $\sigma_s^2 = \sigma_X^2[\sigma_X^2 = \exp \sigma_s^2 - 1 \approx \sigma_s^2]$ 。 σ_s^2 由大气状态及传输路径长度决定,数值越大表示闪烁越严重,一般 $\sigma_s^2 < 0.2 \sim 0.5$ ^[9]。

Turbo 码副载波强度调制/直接检测大气激光通信系统框图如图 1 所示。

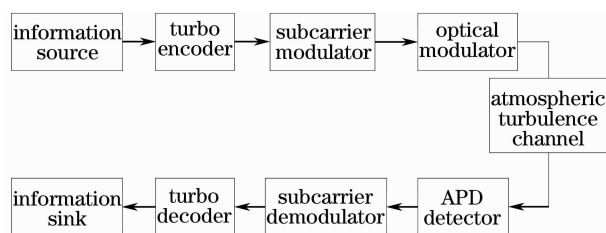


图 1 Turbo 码副载波无线激光通信系统

Fig. 1 Wireless optical communication system on turbo code subcarrier

3 无线信道编码的数字副载波差错率分析

3.1 M-PSK 副载波差错率

对于副载波二进制相移键控(BPSK)调制,由(1)式可知,若接收端光功率设为 $P(t)$, 则

$$P(t) = X(t) \frac{P_{\max}}{2} [1 + m \cos(2\pi f_c t + a_i \pi)] + n(t), \quad (3)$$

式中 P_{\max} 为接收峰值光功率, m 为调制指数, $a_i = 0, 1$ 为二进制符号, f_c 载波频率。

假定光强闪烁足够慢,在光电探测器输出端电流信号的直流成分 $X(t)P_{\max}/2$ 可消除,由(3)式可知光电探测器输出端电流信号 $I(t)$ 为

$$I(t) = X(t) \frac{P_{\max}(RG)}{2} m \cos(2f_c t + a_i \pi) + n(t), \quad (4)$$

式中 RG 为光电转换常数, R 是光电探测器响应度, G 为光电探测器增益均值。

对 BPSK 的解调是通过参考量 $\cos(2\pi f_c t)$ 进行的相干解调,则输出信号 $o(t)$

$$o(t) = \overline{I(t) \cos(2\pi f_c t)} = \frac{1}{2} \left[\pm X(t) \frac{P_{\max}(RG)}{2} m + \xi(t) \right], \quad (5)$$

$\xi(t)$ 为零均值且方差为 $2\sigma_o^2$ 的高斯噪声。

没有进行信道编码的弱湍流信道下系统误比特率可表示为解调后输出信号 $o(t)$ 小于零的概率^[10]

$$P_{\text{BER}} = P[o(t) < 0] = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f[\sqrt{\gamma} \exp(\sqrt{2}\sigma_s x - \sigma_s^2/2)] \exp(-x^2) dx, \quad (6)$$

式中 $f(\cdot)$ 为高斯函数, $f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}u} \int_u^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$, γ 为未受光强闪烁的信噪比,且

$$\gamma = \frac{(P_{\max}/2)^2 (RG)^2 m^2}{2\sigma_G^2}$$

对于副载波多进制相移键控(M-PSK)调制,若光强闪烁存在,则系统接收光功率可表示为

$$P(t) = X(t) \frac{P_{\max}}{2} [1 + m \cos(2\pi f_c t + \phi_j)] + n(t), \tag{7}$$

式中相位 $\phi_j = 2(j-1)\pi/M, j = 1, 2, \dots, M$ 。

根据文献[11]所给出的 M-PSK 误比特率,可知光强闪烁存在条件下,M-PSK 调制系统误比特率可表示为

$$P_{\text{BER}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f[\sin \frac{\pi}{M} \sqrt{\gamma} \exp(\sqrt{2}\sigma_s x - \sigma_s^2/2)] \exp(-x^2) dx. \tag{8}$$

3.2 正交幅度调制(QAM)副载波及 OOK 差错率

无光强闪烁条件下,方形 QAM($M \geq 8$)采用相干解调的系统误码率为

$$P_{\text{BER}} = k_1 f(\sqrt{k_2 \gamma}). \tag{9}$$

因此光强闪烁条件下,由(6)、(9)式,可知弱湍流信道 QAM($M \geq 8$)调制光通信系统误码率^[10]:

$$P_{\text{BER}} = \frac{k_1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f[\sqrt{k_2 \gamma}/4 \exp(\sqrt{2}\sigma_s x - \sigma_s^2/2)] \exp(-x^2) dx, \tag{10}$$

式中 $k_1 = 2(1 - 1/\sqrt{M}), k_2 = 3/(M - 1)$ 。

根据文献[12],对 OOK 调制的分析,可知弱湍

流信道下的 OOK 系统误比特率为

$$P_{\text{BER}} = \frac{1}{2} f(Q) + \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f[\sqrt{\gamma} \exp(\sqrt{2}\sigma_s x - \sigma_s^2/2) - Q] \exp(-x^2) dx, \tag{11}$$

式中 Q 为 OOK 解调判决阈值。 γ 为未受光强闪烁的信噪比, $\gamma = (P_{\max})^2 (RG)^2 m^2 / (2\sigma_G^2)$ 。

3.3 无信道编码的副载波及 OOK 差错率仿真

根据(6)式、(8)式、(9)式,在光强闪烁方差 $\sigma_s^2 = 0.01, \sigma_s^2 = 0.2$ 分别对 OOK 调制及 BPSK, QPSK, 8PSK 及 16QAM 数字副载波调制系统进行了误码率性能仿真,其中 OOK 阈值检测采取固定阈值方法,仿真中经过多次实验,取阈值 $Q = 3.6, f(Q) = 2 \times 10^{-4}$ 时取得很好的误码率特性,如图 2 所示。

仿真图 2 中,横坐标 γ 为无光强闪烁的信噪比,其中 $\gamma_{\text{OOK}} = 4\gamma$ 。图 2(a)和图 2(b)为不同光强闪烁指数下误比特性能仿真,由图 2 可以看出随着 σ_s^2 的增大,几种副载波调制误比特率性能都有劣化现象。当 $\sigma_s^2 = 0.2, P_{\text{BER}} = 10^{-4}$ 时, BPSK 与 OOK 相比具有 3 dB 的编码增益,OOK 调制误比特率性能明显劣于 BPSK 调制。仿真中 OOK 解调采用固定阈值判别,其中阈值的选取对 OOK 调制误比特率性能有很大的影响。当 $P_{\text{BER}} = 10^{-3}$ 时, BPSK 相对于 8PSK 和 QPSK 有 8 dB 和 3 dB 的编码增益。由图 2 可知几种数字副载波调制系统中, BPSK 差错性能最好,其次为 QPSK, 8PSK, 误码性能最差为 16QAM。

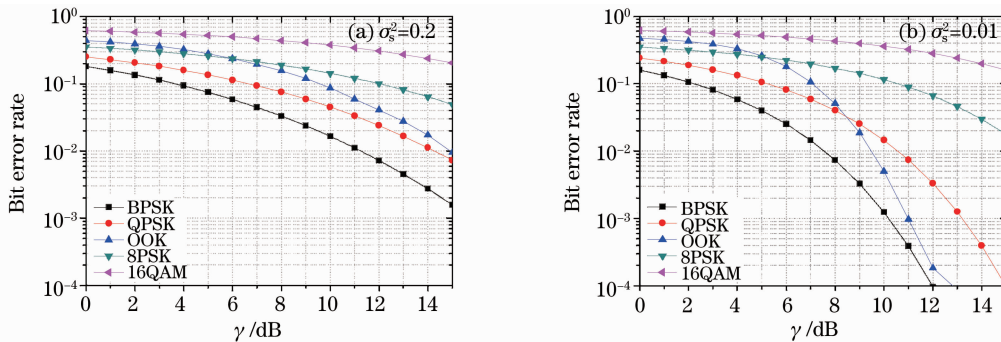


图 2 OOK 与数字副载波系统误码性能仿真

Fig. 2 BER performance of OOK and subcarrier system

4 基于 Turbo 码的数字副载波差错率

4.1 Turbo 码的性能限分析

Turbo 码在编码过程中首先将输入信息数据分成长度与交织长度相同的数据序列,然后对每个数据序列进行编码。如果 Turbo 码的分量码在数据序列编码结束时利用结尾码元使个图归零,则

Turbo 码可等效为一个分组码^[13]。可利用分析分组码性能限的方法来分析 Turbo 码,即通过码的重量分布特性来计算码字误比特率性能。

令 $T^{(k)}(l, i, d)$ 码字重量枚举函数

$$T^{(k)}(l, i, d) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{d=0}^{\infty} t^{(k)}(l, i, d) L^l I^i D^d, \tag{12}$$

式中 $t^{(k)}(l, i, d)$ 表示第 k 个分量码长度为 l , 输入汉明重量为 i , 输出汉明重量为 d 的码字个数。令 $l = N$, 则条件重量枚举函数可定义为

$$T_{N,C}^{(k)}(i, D) = \sum_{d=0}^N t^{(k)}(N, i, d) I^i D^d, \quad (13)$$

使用均匀交织器, 对于 1/3 码率的 PCCC 系统的条件重量枚举函数为

$$T_{N,C}^{\text{PCCC}}(i, d) = \frac{\sum_{d_1=0}^N \sum_{d_2=0}^N t^{(1)}(N, i, d_1) t^{(2)}(N, i, d_2) D^{d_1} D^{d_2}}{\binom{N}{i}} = \sum_{d=0}^{2N} B(i, d) D^d, \quad (14)$$

式中 $\binom{N}{i} = \frac{N!}{i!(N-i)!}$, 令 $C(i, d_1, d_2) =$

$$\sum_{d_1=0}^N \sum_{d_2=0}^N t^{(1)}(N, i, d_1) t^{(2)}(N, i, d_2), \text{ 则}$$

$$T_{N,C}^{\text{PCCC}}(i, d) = \sum_{d_1=0}^N \sum_{d_2=0}^N C(i, d_1, d_2) D^{d_1+d_2} = \sum_{d=0}^{2N} B(i, d) D^d, \quad (15)$$

$B(i, d)$ 可看作输入重量为 i 的信息序列, 输出冗余重量为 d_1, d_2 的码字个数, 可以通过转移函数限的方法获得^[14]。

码率为 1/3 的 Turbo 码比特错误概率上限可以表示为^[13]

$$P_e \leq \sum_{i=d}^N \sum_{d=0}^{2N} \frac{i}{N} B(i, d) P(d). \quad (16)$$

式中 $P(d)$ 为码字发生错误的条件概率, 因为最大似然 (ML) 译码器选择了权重为 $d = i + d_1 + d_2$ 的码字代替了全零码字, 对于 Turbo 编码的受光强闪烁影响数字副载波 BPSK 系统条件概率 $P(d)$ 为^[11]

$$P(d) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f[\sqrt{d}\gamma \exp(\sqrt{2}\sigma_s^2 x - \sigma_s^2/2)] \exp(-x^2) dx, \quad (17)$$

将(16)式代入(15)式中, 可得到 Turbo 编码的数字副载 BPSK 调制系统差错率。同理由(15)式和(8)式可得到 Turbo 码的 8PSK 和 QPSK 的差错率。

4.2 Turbo 码数字副载波调制系统差错率仿真

采用 Turbo 码性能限方法进行了弱湍流信道数字副载波调制系统差错率仿真, 其中分量编码器生成矩阵采用 $g(7, 5)$, 码率为 1/3, 交织器为均匀交

织器, 交织长度 $N = 100$ 。图 3 给出了 Turbo 编码前后 BPSK 和 QPSK 系统的误比特率。

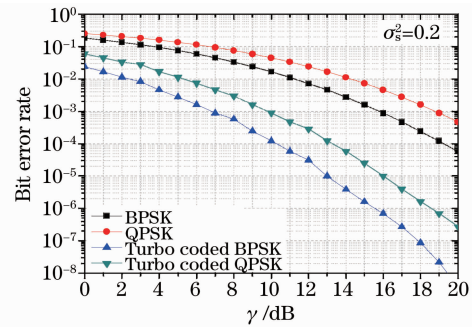


图 3 Turbo 码数字副载波系统误码性能仿真

Fig. 3 BER performance of turbo code subcarrier system

可以看出, 在光强闪烁强烈时 ($\sigma_s^2 = 0.2$), 相同误比特率条件下, 采用 Turbo 编码 BPSK 和 QPSK 均可获得比未编码系统好的误码性能, 采用未编码 BPSK 调制系统要达到 $P_{\text{BER}} = 10^{-3}$, 信噪比约为 16 dB, 而采用 Turbo 编码的 BPSK 系统则需要信噪比约 7 dB。在相同交织长度和码率下, 采用 Turbo 编码的 BPSK 和 QPSK 系统都具有约 9 dB 的编码增益。由图 2 和图 3, 仿真结果表明在湍流效应下, 基于 Turbo 码的副载波 BPSK 系统性能优于 QPSK 系统, 且 BPSK 和 QPSK 均可获得比未编码时好的系统误码性能。

5 结 论

在弱湍流信道下, 给出了不同闪烁强度指数下的几种副载波调制系统误码率分析。通过对 Turbo 编码和未编码的副载波调制系统误比特率仿真可知, 未进行 Turbo 编码的 BPSK 可获得比 QPSK, 8PSK, 16QAM 及 OOK 高的编码增益, 其中几种副载波调制中, BPSK 系统误码性能最好, 16QAM 系统差错性能最差, 而 OOK 系统中检测阈值的选取对系统误码性能有很大的影响。此外, 基于 Turbo 码的无线光通信系统对光强闪烁有很好的抗干扰作用, 可获得与未编码系统相比较高的编码增益。

参 考 文 献

- Ke Xizheng, Xi Xiaoli. Introduction to Wireless Laser Communication[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003
- 柯熙政, 席小莉. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003
- Ma Dongtang, We 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. 大气激光通信中的一多光束传输性能分

- 析和信道建模[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1020~1024
- 3 Wang Xinmei, Xiao Guozhen. Principles and Methods of Error Correcting Code[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2001
- 王新梅,肖国镇. 纠错码-原理与方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001
- 4 Ma Xiaoshan, Zhu Wenyue, Rao Ruizhong. Annular-aperture averaging factor of optical scintillations in turbulent atmosphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 马晓珊,朱文越,饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平均因子[J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1543~1547
- 5 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
- 6 W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka *et al.*. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 1993, **76B**(9): 1169~1177
- 刘东华. Turbo 码的原理与应用技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2004, 126~129
- 7 Q. Lu, Q. Liu, G. S. Mitchell. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel [C]. *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.*, 2004, 1872~1875
- 8 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
- 9 M. Hata, N. Morinaga, T. Namekawa. Receiver performance of optical analog communication systems through the atmosphere [J]. *Trans of IEICE*, 1983, **66**(1): 79~83
- 10 W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka *et al.*. Atmospheric optical communication sytem using subcarrier PSK modulation [C]. *Proc. of IEEE ICC*, 1993, 1597~1601
- 11 Tomaki Ohtsuki. Turbo-coded atmospheric optical communication system[C]. *IEEE Internat. Conf. on Commun.*, 2002, **5**: 2938~2942
- 12 J. H. Shapiro, R. C. Harney. Burst-mode atmospheric optical communication[C]. *Proc. National Telecommun. Conf.*, 1980, 27.5.1~27.5.7
- 13 Liu Donghua. Turbo Code Principle and Application Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004, 126~129
- 14 D. Divsalar, S. Dolinar, F. Pollara *et al.*. Transfer function bounds on the performance of turbo codes [J]. *Telecom. and Data Acquisition*, 1995, 44~54