文章编号: 0253-2239(2009)12-3295-04

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

王勇于蕾曹家年

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,黑龙江哈尔滨 150001)

摘要 研究了采用副载波相移键控(PSK)强度调制的光无线通信系统在大气湍流信道下的性能,并对副载波相移 键控强度调制和开关键控(OOK)两种调制方案在大气湍流信道下进行了性能比较。仿真结果显示副载波相移键 控强度调制优于开关键控。在此基础上,将低密度奇偶校验(LDPC)码和置信传播迭代译码算法应用到光无线通 信系统中,并结合副载波相移键控强度调制方案,在大气湍流信道中进行了仿真。仿真结果表明,低密度奇偶校验 码具有优越的纠错能力并获得了较大的编码增益,上述方案满足光无线通信系统的需要。 关键词 光通信;光无线通信;副载波相移键控;大气湍流;低密度校验码

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092912.3295

Performance of Optical Wireless Communication System Basing on the Sub-Carrier PSK Intensity Modulation and LDPC Code

Wang Yong Yu Lei Cao Jianian

(College of Information & Communication Engineering , Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Optical wireless communications using sub-carrier phase shift keying (PSK) intensity modulation through atmospheric turbulence channel is investigated. Sub-carrier PSK intensity modulation is compared against on/off key (OOK) modulation in the atmospheric turbulence channel. The simulation results show that sub-carrier PSK intensity modulation is superior to OOK in the presence of atmospheric turbulence. On this basis, the low density parity check (LDPC) codes and BP iterative decoding algorithm are applied into the optical wireless communication system, and it is simulated in the atmospheric turbulence channel with combination of sub-carrier PSK intensity modulation. The simulation results show that LDPC codes have excellent error correction capabilities and access to a larger coding gain, and the above scheme can satisfy the need of optical wireless communication system.

Key words optical communication; optical wireless communication; sub-carrier phase shift keying; atmospheric turbulence; low density parity check codes

容量大、发射光束窄、抗电磁干扰能力强、不占用频

率资源,具有良好的发展前景。强度调制/直接检测

方案^[2]已广泛应用于光无线通信系统。脉冲幅度调

制(PAM),特别是开关键控(OOK)已经是光无线

通信系统主要的调制方案,传输的光束强度直接被

1 引 言

光无线通信技术对于高容量的通信网络是一种 非常好的互联技术。它是利用激光束作为信息载体 在大气中进行语音、数据、图像信息双向传输的一种 技术^[1]。它结合了光通信与无线通信的优点,信息

作者简介:王 勇(1974—),男,博士研究生,讲师,主要从事光通信、光纤传感器等方面的研究。

E-mail: wangyong@hrbeu. edu.cn

导师简介:曹家年(1948—),男,研究员,博士生导师,主要从事光通信、光纤传感器等方面的研究。 E-mail: caojianian@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2009-02-09; 收到修改稿日期: 2009-03-23

基金项目:国家自然科学基金(60602007)资助课题。

光

报

传送的数据序列所调制。采用开关键控的光无线通 信系统所要克服的最大障碍是大气闪烁^[3~5],它对 系统的影响很难去除。副载波相移键控(PSK)强度 调制是一种非常有效的战胜大气湍流的调制方法, 文献[6,7]已经证实了在大气湍流环境下,副载波 PSK 的性能要优于 OOK。

低密度奇偶校验(LDPC)码是一种基于稀疏矩 阵的线性码,也是目前距离香浓(Shannon)限最近 的码。由于 LDPC 码的研究主要集中在电子通信 领域,对于 LDPC 码在光无线通信中的研究报道较 少。本文将 LDPC 码作为信道编码技术应用到光 无线通信系统中,并提出了将副载波 PSK 强度调制 和 LDPC 码相结合的系统方案,对采用 LDPC 纠错 码前后的系统性能进行了比较分析。

2 系统模型

图1给出了采用副载波 PSK 强度调制的光无 线通信系统方框图。信源产生的信息序列经信道编 码后首先进行电调制,然后对光源进行强度调制,通 过发射天线送入大气信道。接收端通过光电探测器 把光信号变成电信号,再通过电解调器和信道解码 还原出信息比特,最后计算误码率。



图 1 光无线通信系统方框图

Fig. 1 Block diagram of optical wireless communication system

在光无线通信系统中,由于大气信道中存在湍流,所以接收机接收到的光强 P(u,t) 可以表示为

$$P(u,t) = A(u,t)P_s(t), \qquad (1)$$

式中 A(u,t) 是一个由大气湍流引起的平稳随机过程, $P_s(t)$ 是没有大气湍流情况下接收机接收的光强。众所周知,湍流的主要影响 A(u,t) 是一个对数 正态随机过程。设 x(u,t) 是一个高斯随机过程,它的自相关函数为 $R_x(\tau)$,且 $R_x(0) = \sigma^2$,则随机过程 A(u,t) 可以表示为

$$A(u,t) = k \exp[x(u,t)], \qquad (2)$$

在任意 $t = t_0$ 时刻,随机变量 $A(u, t = t_0)$ 都服从概 率密度分布

$$f(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}A} \exp\left[-\frac{(\lg A - m')^2}{2\sigma^2}\right]$$
(3)
$$m' = \lg k, A \ge 0.$$

随机变量 $A(u,t = t_0)$ 的 n 阶原点矩为 $E(A^n) = k^n \exp(n^2 \sigma^2/2)$ 。通过对 $E(A^2)$ 归一化,可 以得到 $k = \exp(-\sigma^2)$ 。则随机变量 $A(u,t = t_0)$ 概 率密度函数又可以表示为

$$f(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(\lg A + \sigma^2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (4)$$

随机变量 $A(u,t = t_0)$ 的均值为 $E(A) = \exp(-\sigma^2/2)$ 。

在副载波 PSK 强度调制系统中,光发射机发出的光强为

$$s(t) = 1 + \alpha [s_i(t)\cos(2\pi f_c t) + s_q(t)\sin(2\pi f_c t)],$$
(5)

式中 $s_i(t)$ 和 $s_q(t)$ 分别表示为同相信号和正交信 号, α 为调制指数且 $\alpha \in [0,1]$, f_c 是载波频率。接 收机接收的光强为

$$P(t) = PA(t) \{1 + \alpha [s_i(t)\cos(2\pi f_c t) + s_q(t)\sin(2\pi f_c t)]\}, \qquad (6)$$

经过光电探测器后,输出的电信号为

$$I(t) = A(t) + \alpha A(t) [s_i(t) \cos(2\pi f_c t) + s_q(t) \sin(2\pi f_c t)] + n_i(t) \cos(2\pi f_c t) + n_q(t) \sin(2\pi f_c t),$$
(7)

式中 $n_i(t)$ 和 $n_q(t)$ 都是具有功率 σ_g^2 的窄带高斯白噪声过程。

(7)式中的第一项可以通过接收机的带通滤波 器滤除掉。把(7)式中的第二项转变为基带信号,这 样就可以得到基带 PSK 同相信号

 $r_{i}(t) = \alpha A(u,t)s_{i}(t) + n_{i}(t),$ (8) 和基带 PSK 正交信号

$$r_{q}(t) = \alpha A(u,t)s_{q}(t) + n_{q}(t).$$
(9)

在大气湍流信道环境下,采用二相相移键控 (BPSK)强度调制的光无线通信系统的误码率为

$$f_{\rm BER} = \frac{\exp\left(-\sigma^2/2\right)}{2\pi\sigma\sigma_{\rm g}} \int_{0}^{+\infty} x^{-2} \exp\left(-\frac{\ln^2 x}{2\sigma^2}\right) Q\left(\frac{\alpha x}{\sigma_{\rm g}}\right) \mathrm{d}x.$$
(10)

对于采用四相相移键控(QPSK)强度调制的光 无线通信系统的误码率为

$$f_{\rm BER} = \frac{\exp\left(-\sigma^2/2\right)}{2\sqrt{2}\pi\,\sigma\,\sigma_{\rm g}} \int_{0}^{\infty} x^{-2} \exp\left(-\frac{\ln^2 x}{2\sigma^2}\right) Q\left(\frac{\alpha x}{\sqrt{2}\sigma_{\rm g}}\right) \mathrm{d}x.$$
(11)

当光无线通信系统采用多进制相移键控 (MPSK)(M > 4)时,设接收信号向量 $\mathbf{r} = [r_i r_q]$, $\theta = \arctan(r_q/r_i)$,则系统的符号误码率为

$$f_{\rm BER} = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} \int_{0}^{+\infty} \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_{\rm g}^2} - \frac{(\ln r + \sigma^2)^2}{2\sigma^2}\right] \times \left\{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} + \frac{r\cos\theta}{\sigma_{\rm g}} \left[1 - Q\left(\frac{r\cos\theta}{\sigma_{\rm g}}\right)\right] \times \exp\left(\frac{r^2\cos^2\theta}{2\sigma_{\rm g}^2}\right)\right\} drd\theta, \qquad (12)$$

式中 r 为系统不存在高斯白噪声时接收信号的包络。

3 信道编码

LDPC 码^[8,9]在加性高斯白噪声(AWGN)信道 下是接近 Shannon 限的好码,其性能甚至可以超过 Turbo 码^[10],且因为其校验矩阵是稀疏的,LDPC 码的译码复杂度低,还能实现完全的并行操作,适合 硬件实现,具有高速译码的潜力,所以采用 LDPC 码作为信道编码。

LDPC码的译码可以使用置信传播迭代译码算法^[6],为此定义两个大小与奇偶校验矩阵相同的置信信息矩阵,一个是变量节点置信信息矩阵Q,另一个是校验节点置信信息矩阵R。置信传播译码算法的具体步骤为:

1)初始化:从接收信号序列计算出对应每一个 变量节点的置信信息 *L*(*c*_n),同时对变量节点置信 信息矩阵 *Q* 按照

$$Q_{j,n} = L(c_n) = \lg \left[\frac{Pr(c_n = 0)}{Pr(c_n = 1)} \right] = 2y(n)/\sigma_n^2$$

(j = 1, 2, 3, ..., k), (13)

进行初始化,式中 y(n) 是经干扰后直接解调的信号, σ_n^2 是高斯白噪声方差。

2) 校验节点置信信息矩阵 R 的更新:按照

$$\mathbf{R}_{j,n} = 2 \operatorname{artanh} \left[\prod_{n' \in V_j \setminus n} \operatorname{tanh} \left(\frac{\mathbf{Q}_{j,n'}}{2} \right) \right], \quad (14)$$

利用变量节点置信信息矩阵 Q 的内容对校验节点 置信信息矩阵 R 进行更新。

3) 变量节点置信信息矩阵 Q 的更新:按照

$$\boldsymbol{Q}_{j,n} = L(c_n) + \sum_{j' \in C_n \setminus j} \boldsymbol{R}_{j',n}, \qquad (15)$$

利用校验节点置信信息矩阵 R 的内容对变量节点 置信信息矩阵 Q 进行更新。

4)译码判决:对所有变量节点计算硬判决消息 $D_n = L(c_n) + \sum_{j' \in C(n)} \mathbf{R}_{j',n}$,得到临时判决值 \hat{c}_n ,并检验临时判决值是否满足校验矩阵的要求,即是否满足 等式 $cH^{T} = 0$ 。如果满足则停止迭代,返回有效的译码结果;否则回到步骤 2)继续迭代,直到迭代次数超过规定的最大次数。

4 系统仿真

图 2 给出了光无线通信系统采用副载波 BPSK 强度调制和 OOK 的系统误码率。可以把 OOK 解 调 的 阈 值 设 为 随 机 过 程 A(u,t) 的 均 值,即 exp($-\sigma^2/2$)。当 $\sigma = 0.1$ 时,采用副载波 BPSK 的 光无线通信系统要达到误码率 $f_{BER} = 10^{-6}$,信噪比 $E_b/N_o = 11.7$ dB。而采用 OOK 的光无线通信系统 在相同误码率下,则需要信噪比 $E_b/N_o = 14.5$ dB。 当 $\sigma = 0.2$ 时,采用副载波 BPSK 的光无线通信系统 在 $E_b/N_o = 13$ dB 时,误码率就达到了 10^{-5} 。而采 用 OOK 的光无线通信系统在相同信噪比下,误码 率大于 10^{-3} 。因此,副载波 BPSK 强度调制系统性 能要优于 OOK。



图 2 采用副载波 BPSK 和 OOK 光无线通信系统的误码率 Fig. 2 Bit error rate of optical wireless communication systems employing subcarrier BPSK and OOK

图 3 给出了在 σ =0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 时,采 用副载波 BPSK 强度调制的光无线通信系统误码 率。图 4 给出了采用副载波 BPSK 强度调制和 1/2 码率的 LDPC 码的光无线通信系统误码率。从两



图 3 采用副载波 BPSK 强度调制光无线通信系统的误码率 Fig. 3 Bit error rate of optical wireless communication systems employing subcarrier BPSK intensity modulation

报

幅图中可以发现,当 σ =0.5时,采用副载波 BPSK 的光无线通信系统要达到误码率 f_{BER} =10⁻⁵,信噪 比 E_b/N_o =24.5dB。而采用 LDPC 编码的副载波 BPSK 强度调制光通信系统在相同误码率下,则需 要信噪比 E_b/N_o =13.5 dB,可以获得 11 dB 的编码 增益。



图 4 采用副载波 BPSK 和 LDPC 码的光无线通信 系统误码率

- Fig. 4 Bit error rate of optical wireless communication systems employing subcarrier BPSK intensity modulation and LDPC code
- 5 结 论

分析了副载波 PSK 强度调制在光无线通信系统中的应用,将 LDPC 码作为信道编码技术应用到 光无线通信系统中,并且提出了将副载波 PSK 强度 调制和 LDPC 码相结合的系统方案。仿真结果表 明 LDPC 码具有优越的纠错能力,对于系统中的光 强闪烁有很好的抗干扰作用,可以满足光无线通信 系统的需要。

- 参考文献
- 1 Zhao Li, Ke Xizheng, Liu Jian. Study on model and key technique of atmosphere laser communication system[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, **36**(6): 27~30
- 赵 黎, 柯熙政, 刘 健. 大气激光通信系统建模及关键技术研 究[J]. 光子学报, 2007, **36**(6): 27~30
- 2 S. Harnilovic, F. R. Kschischang. Optical intensity-modulated direct detection channels: signal space and lattice codes[J]. *IEEE Transcation on Information Theory*, 2003, **49**: 1385~1399
- 3 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
- 4 Huang Honghua, Yao Yongbang, Rao Ruizhong. Atmospheric turbulence outer scale measurement based on angle-of-arrival covariance[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(8): 1361~1365 黄宏华,姚永帮,饶瑞中. 根据到达角协方差测量大气湍流外尺 度.[J]. 光学学报, 2007, 27(8): 1361~1365
- 5 S. Sheikh Muhammad, E. Leitgeb, P. Kohldorfer. Channel modeling for terrestrial free space optical links[C]. Proc. IEEE ICTON, 2005, 407~410
- 6 W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka *et al.*. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [C]. *IEICE Ttrans. Commun.*, 1993, 1169~1177
- 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 T. J. Richardson, M. A. Shokrollahi, R. L. Urbanke. Design of capacity-approaching irregular low-density parity-check codes [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2001, 47(2): 619~639
- 9 S. Ten Brink, G. Kramer, A. Ashikhmin. Design of lowdensity parity-check codes for modulation and detection[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2004, **52**(4): 670~678
- 10 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