

基于极化码的无线光通信副载波误码性能分析

柯熙政,雷思琛,邵军虎,陈强

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:提出了一种基于极化码的无线光信道副载波调制方法,给出了极化编译码的具体算法过程,并将其应用于无线光通信系统。在不同大气湍流强度下,对系统的差错性能进行了仿真分析,其中着重对基于极化码的二相相移键控和四相相移键控两种调制方法的误码率进行了对比,结果表明,采用极化码的副载波二相相移键控调制系统的性能优于四相相移键控系统。最后,实验比较分析了极化编码前后副载波调制系统的误比特率,结果表明,在无线光通信大气湍流信道模型下,采用副载波极化码编码调制技术可使误码率性能改善一个量级。

关键词:无线光通信; 极化码; 副载波相移键控; 误比特率

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1849-05

Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation based on polar code

Ke Xizheng, Lei Sichen, Shao Junhu, Chen Qiang

(The Faculty of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A novel polar coded subcarrier phase shift keying modulation method suitable for wireless optical communication system was proposed in this paper. Then their encoding and decoding procedures were presented for polar coding schemes over the atmospheric turbulence channels. By simulating the system performance under various atmospheric turbulence conditions, the bit error rate(BER) performance were compared between binary phase shift keying modulation with polar code(BPSK-PC) and quaternary phase shift keying modulation with polar code (QPSK-PC). The results show that the error correction performance of BPSK-PC system is better than that of QPSK-PC system. Finally, the experimental BER performance of the subcarrier phase shift keying modulation with and without polar code were conducted and analyzed as well. The experimental results show that the proposed method can improve the BER performance with an order of magnitude, by using polar code in wireless communication system together with subcarrier phase shift keying modulation.

Key words: wireless optical communication; polar code; subcarrier phase shift keying; bit error rate

收稿日期:2014-10-15; 修订日期:2014-11-20

基金项目:国家自然科学基金(61377080);陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31);西安市科技成果转化基金(CX12165);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JQ8011);陕西省教育厅科研计划项目(2013JK1104);陕西省工业攻关科技计划项目(2013K06-08);江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目(BE2013088)

作者简介:柯熙政(1962-),男,教授,主要从事无线激光通信方面的研究。Email:xzke@263.net

0 引言

无线光通信是一种具有广泛应用前景的通信技术。但由于大气吸收、散射及湍流效应等,使系统误比特率增大,严重影响了整个系统的性能^[1]。选择合适的调制方法和信道编码方法成为大气激光通信面临的重要问题。

副载波强度调制是一种能够有效抑制大气湍流的调制技术,一般认为副载波调制性能优于 OOK^[2-3]。目前,差错控制编码技术主要集中在卷积码、Turbo 码以及 LDPC 码^[4-6]。极化码是近几年才发现的一种信道编码技术^[7]。它是至今唯一一类数学可证明能够逼近香农限的编码^[8]。极化码在编码和译码的复杂度上,几乎与码字的长度呈线性关系,而随着码长的增加,差错率迅速下降。

文中引入极化码作为大气激光通信的信道编码方式,针对大气弱湍流信道,讨论了副载波调制下应用极化码的系统误码性能。通过仿真对在弱湍流信道下,基于副载波 BPSK 以及 QPSK 调制的极化码系统误码性能进行了分析。最后在三种不同天气下,对采用副载波调制的极化码实测数据进行了误码率分析。

1 大气信道与系统模型

光信号在大气信道中传输时不可避免会受到大气衰减、大气湍流的影响^[9-10]。大气信道等效数学模型框图如图 1 所示^[11-12]。

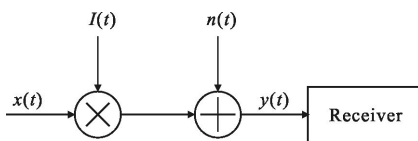


图 1 大气信道等效数学模型

Fig.1 Atmospheric channel effective mathematics model

图 1 中 $x(t)$ 表示发射信号, $y(t)$ 为接收机接收信号, $I(t)$ 和 $n(t)$ 分别表示大气信道的乘性噪声和加性噪声, $I(t)$ 与 $n(t)$ 互相独立。则, 大气湍流信道的数学模型可描述为:

$$y(t) = I(t) \cdot x(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: 乘性噪声 $I(t)$ 是信道状态信息, 表征大气湍流的强度。在弱湍流情况下, 湍流强度服从对数正态分

布, 其均值为 $\exp(2\sigma_0^2)$, 方差为 $2\sigma_0^2$, σ_0 为光强闪烁指数。

基于极化码的副载波强度调制/直接检测大气激光通信系统框图如图 2 所示^[13]。

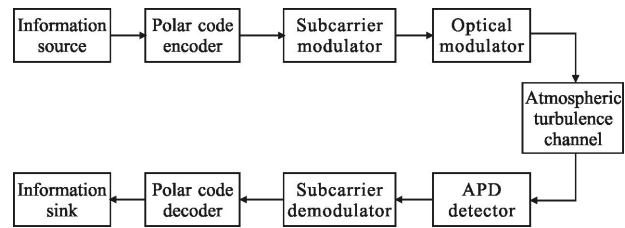


图 2 基于极化码的副载波无线光通信系统

Fig.2 Wireless optical communication system using subcarrier modulation based on polar code

信源产生的信息序列经过极化码编码后先进行副载波调制, 然后对光源进行强度调制, 通过发射天线进入大气信道。接收端通过 APD 光电探测器进行光电转换, 再经过相应的副载波解调与极化码译码还原出信息序列, 最后计算误码率。

2 极化码

极化码作为近些年信息编码领域一项新的重大进展, 是现今唯一一类数学可证明能够逼近 Shannon 容量限的编码。因其具有较低的编译码复杂度, 得到了国内外学者的广泛关注。极化码编码的思想是建立在信道极化现象基础上, 通过对 N 次独立使用物理信道的合并(Channel Combining)与拆分(Channel Splitting)操作来实现虚拟信道对称容量两极分化的过程。

极化码属于线性分组码, 假设信息位集合 A 为虚拟信道索引集合 $\{1, \dots, N\}$ 中的任一子集, 则极化码的编码过程为:

$$x_1^N = u_A G_N(A) \oplus u_{A^c} G_N(A^c) \quad (2)$$

式中: $G_N(A)$ 表示生成矩阵 G_N 中由索引集合 A 中元素对应行组成的矩阵; A^c 表示子集 A 在集合 $\{1, \dots, N\}$ 中的补集; u_A 为输入序列 u 中的信息位子集, 它是由集合 A 中元素所确定; u_{A^c} 为冻结比特; “ \oplus ”表示模 2 加运算。其中集合 A 通过信道的极化现象进行确定, 文中采用高斯近似的方法计算出大气弱湍流信道的巴氏(Bhattacharyya)参数, 实现了该信道上的极化现象, 从而确定集合 A , 选取合适的信道用于信息传输。极化码的生成矩阵 G_N 可以表示成:

$$G_N = B_N F^{\otimes n} \quad (3)$$

式中: $F = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$; “ \otimes ”表示克罗内克(Kronecker)积。

矩阵 B_N 是位反转(Bit-Reversal)操作, 即若 $v_1^N = B_N u_1^N$, 则对于全体 $b_1, \dots, b_n \in \{0, 1\}$ 有 $v_{b_1 \dots b_n} = u_{b_n \dots b_1}$ 。

2.1 极化码编码步骤

极化码编码的关键在于确定生成矩阵 G_N 以及信息位集合 A , 极化码编码的具体过程包含以下三个步骤:

- (1) 根据信道的极化现象确定信息位集合 A , 设定冻结比特的取值;
- (2) 确定生成矩阵 G_N , 依据信息位集合 A 确定编码矩阵 $G_M(A)$ 用于编码;
- (3) 根据公式(2)进行编码得到极化码的码字序列。

2.2 极化码译码步骤

极化码译码采用串行抵消(Successive Cancellation, SC)译码算法, 具体译码步骤如下:

- (1) 初始化。根据接收值, 计算信道的初始对数似然比信息 $L_1^{(1)}(y_i) = \frac{2y_i}{\sigma^2}, i=1, 2, \dots, N$ 。其中 y_i 表示经大气信道后直接解调的信号, σ^2 为高斯白噪声方差。

- (2) 递归计算。由信息位集合 A 与已译码序列, 根据公式(4)、(5)计算当前比特对数似然比。

$$L_N^{(2i-1)}(y_1, \hat{u}_1^{2i-2}) = L_{N/2}^{(i)}(y_1, \hat{u}_{1,o}^{2i-2} \oplus \hat{u}_{1,e}^{2i-2}) \boxplus L_{N/2}^{(i)}(y_{N/2+1}, \hat{u}_{1,e}^{2i-2}) \quad (4)$$

$$L_N^{(2i)}(y_1, \hat{u}_1^{2i-2}) = L_{N/2}^{(i)}(y_1, \hat{u}_{1,o}^{2i-2}) \boxplus (-1)^{\hat{u}_{2i-1}} L_{N/2}^{(i)}(y_1, \hat{u}_{1,o}^{2i-2} \oplus \hat{u}_{1,e}^{2i-2}) \quad (5)$$

式中: \hat{u}_1^{2i-2} 表示已译码序列; $\hat{u}_{1,o}^{2i-2}$ 和 $\hat{u}_{1,e}^{2i-2}$ 分别表示 \hat{u}_1^{2i-2} 中的奇数索引子向量和偶数索引子向量; \boxplus 为 box-plus 运算。

$$L_1 \boxplus L_2 \triangleq \log \left(\frac{1+e^{L_1+L_2}}{e^{L_1} + e^{L_2}} \right) \quad (6)$$

- (3) 译码判决。根据公式

$$\hat{u}_i = \begin{cases} 0 & L_N^{(i)}(y_1, \hat{u}_1^{i-1}) \geq 0 \\ 1 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

进行判决, 并给出译码序列。

极化码编码与译码具体过程如图3所示。

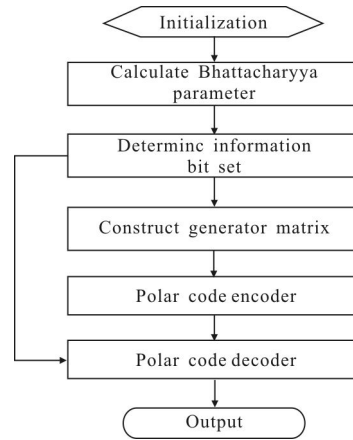


图3 极化码编码与译码过程

Fig.3 Encoding and decoding process of polar code

3 实验与仿真

图4是未编码的无线光通信副载波 BPSK 及 QPSK 调制系统, 在不同湍流强度 ($\sigma_0=0.1, \sigma_0=0.2, \sigma_0=0.3$) 信道及不同信噪比(SNR)下的误比特率仿真曲线。

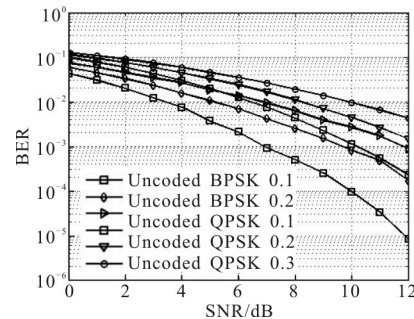


图4 未编码副载波系统误码率

Fig.4 Bit error rate of uncoded subcarrier system

图5和图6分别给出了基于极化码的无线光通

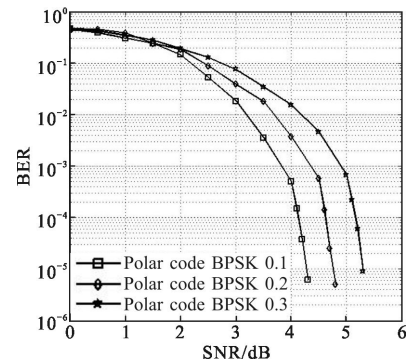


图5 基于极化码的 BPSK 副载波系统误码率

Fig.5 Bit error rate of polar code system with BPSK subcarrier

的 BPSK 以及 QPSK 副载波调制进行了仿真。结果表明,采用极化码编码的副载波系统性能优于未编码的副载波系统,并且采用极化码编码的 BPSK 系统优于 QPSK,可获得 4.8 dB 的编码增益。在三种不同天气条件下,采用极化码编码的实测数据表明,在引入极化码作为信道编码,可使误码率特性改善一个量级,能够有效地提升无线光系统的可靠性。

参考文献:

- [1] Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 8: 002.
- [2] Huang W, Takayanagi J, Sakanaka T, et al. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 1993, 76(9): 1169-1177.
- [3] Lu Q, Liu Q, Mitchell G S. Performance analysis for optical wireless communication systems using subcarrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel [C]//Global Telecommunications Conference, 2004. Globecom'04. IEEE, 2004, 3: 1872-1875.
- [4] Li J, Liu J Q, Taylor D P. Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *Communications, IEEE Transactions on*, 2007, 55(8): 1598-1606.
- [5] Ohtsuki T. Turbo-coded atmospheric optical communication systems[C]//IEEE International Conference on Communications, ICC, 2002, 5: 2938-2942.
- [6] Leng Jiaofeng, Hao Shiqi, Lv Xuguang, et al. Modified decoding algorithm of LDPC codes for wireless optical communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2130-2135. (in Chinese)
- 冷蛟锋, 郝士琦, 吕旭光, 等. 一种改进的无线光通信 LDPC 码译码算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2130-2135.
- [7] Kan E. Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(7): 3051-3073.
- [8] Sasoglu E, Telatar I, Arikan E. Polarization for arbitrary discrete memoryless channels [C]//IEEE Information Theory Workshop, Taormina, 2009: 144-148.
- [9] Yuan Xiuhua, Zhao Ming, Zhao Yanli. Analysis and resolution for wireless optic communication in turbulent atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 418-420. (in Chinese)
- 元秀华, 赵茗, 赵彦立. 湍流大气对无线光通信影响分析及解决方案[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 418-420.
- [10] Deng Daizhu, Rong Jian. Atmospheric effects on the link near the earth of optical wireless communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 243-247. (in Chinese)
- 邓代竹, 荣健. 大气对近地面无线激光通信链路的影响[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 243-247.
- [11] Chen J, Li X, Liu Y. Linear time encoding of low-density parity check codes and its performance in weak atmospheric turbulent channels [C]//International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, 2007: 2948-2951.
- [12] Zhu X, Kahn J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *Communications, IEEE Transactions on*, 2002, 50(8): 1293-1300.
- [13] Chen Dan, Ke Xizheng. Analysis on error rate of wireless optical communication using subcarrier modulation on turbo code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 33(10): 2859-2863. (in Chinese)
- 陈丹, 柯熙政. 基于 Turbo 码的无线光通信副载波误码性能分析[J]. *光学学报*, 2010, 33(10): 2859-2863.