

无线光通信中 PPM 软解调算法

张鼎臣, 周小林*, 杜建洪

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

摘要：为了在无线光通信中提高抗干扰能力和信道衰落的影响，本文提出一种采用脉冲位置调制(PPM - Pulse Position Modulation)基于光子计数的单数据流输入软出(SISO -Soft Input Soft Output)迭代解调算法。在受限散粒噪声 Poisson 信道模型下，推导了迭代解调算法，并基于该算法提出 4PPM 的简化方案。针对重复码和串行级联码分别进行了数值仿真并分析了性能。结果表明，该简化算法能以较低的计算复杂度，获得较理想的系统误码率，并易于硬件实现。

关键词：迭代解调；脉冲位置调制；光子计数；无线光通信；软解调；级联码

PPM and Iterative Soft Demapping Algorithm for Free Space Optics Communication

ZHANG Ding chen, ZHOU Xiao lin*, DU Jian hong

(Department of Communication and Engineering, FUDAN University, Shanghai 200433)

【Abstract】 To overcome the channel fading and to improve the anti-interference capability in free-space optical communication, a coded PPM photon-counting based iterative demapping scheme by utilizing soft-input soft-output (SISO) for single data stream is proposed. On the assumption of shot noise limited Poisson channels, the iterative demapping algorithm is derived and on the basis of it, a simplified scheme is proposed for 4-ary PPM. The numerical results under the conditions of repetition code (RC) and serial concatenated code (SCC) also with analysis of system performance are illustrated. The simulations show that the scheme can provide a relatively good system bit error rate (BER) performance with low computational complexity and is easy for hardware realization.

【Key words】 iterative demapping; pulse position modulation; photon-counting; free-space optics; soft demapping; concatenated code

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.00.000

1 概述

无线光通信作为一种新兴的高速率宽带接入技术，逐渐成为国内外研究的热点。其结合了无线微波通信和光纤通信的优点，具有频带宽、无需实体传输介质、建设周期短、移动机动性强的优势，从而决定了无线光通信拥有广阔的应用前景。

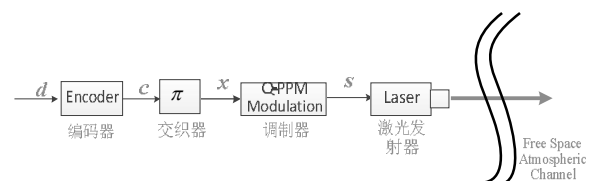
上世纪 60 年代开始，就有学者对无线光通信做了开拓性的研究。1970 年，学者推导出 M 元正交信号在光子计数信道下信道容量^[1]。经过大量的实验和研究，证明了自由空间中光信道与传统微波信道的区别在于量子效应的存在，基于光子计数的无线光通信系统必须将量子效应作为必要的影响因素加以考虑^[2]。由于大规模集成电路技术尚未成熟，以及相关硬件条件的限制，自由空间无线光通信系统在 90 年代前始终处于实验室验证状态，没有大规模投入实用。直到近几年麻省理工 Lincoln 实验室在超导固态检测器上的突破^[3]，使得光子计数接收装置在空间应用中得以实现。由于光通信中量子效应的存在，不同于传统微波通信中的加性高斯信道假设，大气中基于光子计数的信道往往采用 Poisson 信道模型。近年来，基于光子计数的 Poisson 信道模型逐渐成为光通信系统研究的热点，通过理论推导和仿真分析系统性能^[4-5]。利用软入软出(SISO)迭代译码技术，在降低接收端实现复杂度的同时，能获得理想的性能^[6]。文献[7]证明了在某些约束条件下，脉冲位置调制能获得接近香农极限的信道容量。随着迭代检测技术的发展及级联码的引入，使得系统实现了

逼近香农极限条件的系统误码率^[8-10]。

无线光通信亦有诸多制约系统性能的因素，诸如大气湍流导致的光强闪烁、量子效应等。大气湍流会造成无线光通信的信道衰落和传输突发错误。为了能以较高码率、较低的系统复杂度，在大气湍流衰落信道中获得理想系统性能，本文提出一种基于光子计数的 PPM 单数据流迭代软解调方案，在受限散粒噪声 Poisson 信道模型下，推导了采用软信息的迭代解调算法，并基于此提出对应 4PPM 的简化解调算法。

本文第 2 部分介绍了系统结构。第 3 部分推导了迭代软解调算法和用于 4PPM 的简化算法。第 4 部分为系统仿真和性能分析。

2 系统结构

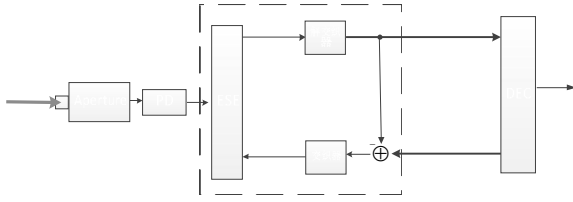


基金项目：国家自然科学基金资助项目(60802011)；国家“863”高科技研究与发展计划资助项目(2011AA100701)；国家科技重大专项项目(2012ZX03001013-004)(2011ZX03003)

作者简介：张鼎臣(1988-)，男，硕士研究生，主研方向：自由空间光通信、数字图像分析与处理；周小林，讲师、博士；杜建洪，副教授、博士

收稿日期：2011-0-0 E-mail: lzy_zdc@163.com

(a)



(b)

2.1 发射机结构

迭代软解调系统发射机结构如图 1(a)所示。比特序列 $d = \{d_j, j=1, 2, \dots, J\}$, J 是信源比特序列长度, d 经信道编码器编码, 得 $c = \{c_i, i=1, 2, \dots, J/R_c\}$ 。为了区分信源比特序列 d , 称 c 为码片序列。码片序列 c 通过交织器 π , 可减少码片之间的相关性^[11], 得到交织码片序列 x 。QPPM 调制装置对 x 进行码片-时隙映射, 得时隙序列 s 。

考虑到系统实现的复杂性, 通常自由空间光通信使用光强调制/直接检测(IM/DD)模式。激光发射器将经调制的二元时隙序列信号 s 发射到空间信道中。

2.2 信道模型

2.2.1 对数正态分布的光强衰落

假设激光发射器到接收端光电检测装置 PD(Photo-detector)的路径增益为 A , 大量的统计观测实验表明 A 满足对数正态分布^[4], 即 $X = \log(A)$ 是均值为 μ_x 、方差为 σ_x^2 的高斯随机变量, A 的概率分布如式(1)所示:

$$f_x[A] = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \cdot \sigma_x \cdot A} \exp\left[-\frac{(\ln A - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (1)$$

光强 I 与路径增益 A 的关系为:

$$I = A^2 = \exp(2X) \quad (2)$$

不是一般性, 将信道光强衰落归一化, $E[I] = 1$, 由式(1)(2)可推导得: $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。

2.2.2 Poisson 信道模型

由于光通信中量子效应^[1-2]的存在, 假设接收端光电检测装置引入的噪声为受限散粒噪声, 则每时隙接收到的光子数 r_i 与实际到达接收孔径(Aperture)的光子数存在 Poisson 分布关系, 即 r_i 的概率质量函数(pmf)为:

$$P(\lambda, r_i) = \frac{\lambda^{r_i}}{r_i!} \exp(-\lambda) \quad (3)$$

$$\lambda = c_i \cdot I \cdot s_i + n_b$$

c_i 是 PD 某个时隙接收到 '1' 对应的光子数。 n_b 是背景光辐射引入的平均时隙光子数, 是个常量, 并可表示为:

$n_b = \eta P_b T_{slot} / hf$, P_b, T_{slot}, v, h 分别是背景光平均功率、每个时隙的时长、光子频率以及普朗克常数, η 是光电检测装置的光电转换效率, 在仿真中取转换效率 $\eta = 0.5$ 。 c_i 可表示为:

$$c_i = \eta P_c T_{slot} / hf$$
, P_c 分别是编码后码片(chip) '1' 对应的光功率。

2.2.3 接收机结构

如图 1(b)所示, 接收机由接收孔径(Aperture)和光电检测装置(PD)、ESE(elementary signal estimator)模块、DEC(Decoder)译码装置、交织器和解交织器构成。系统采用软入软出(SISO)进行迭代解调和译码^[6,8]。ESE 模块和 DEC 模块间的信息交换为软信息——对数似然比 LLR(logarithm likelihood ratio)。ESE 模块的软输入为先验对数似然比 l_{ESE} , 软输出为外信息(extrinsic LLR) e_{ESE} , 两者的对应关系及迭代

算法会在本文第 3 部分详述。

3 迭代软解调算法

3.1 PPM 调制

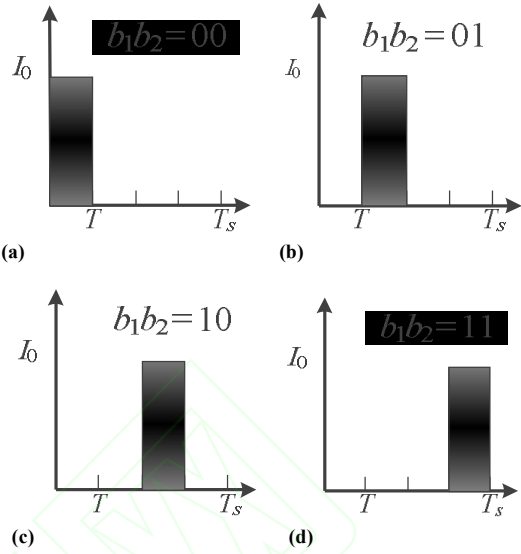


图 2 4PPM 时隙映射关系。(a)-(d)不同 $b_1 b_2$ 组合对应的脉冲位置

脉冲位置调制(PPM)是一种将脉冲的时隙位置随调制信号的变换而改变的调制方式。在空间光通信中, PPM 能以最小的平均光功率达到最高的数据传输率, 仅需根据符号控制脉冲的位置, 不需进行幅度和极性控制, 便于以较低的复杂度实现调制与解调。

图 2 所示, 为 4PPM 符号与脉冲位置的映射关系。

3.2 迭代解调算法

本节推导在散粒噪声受限 Poisson 信道下, 以 4PPM 调制基于光子计数的迭代软解调算法。本文中对数 \log 运算皆以 e 为底, 即 \ln 。

码片与时隙的映射关系参考图 2。码片 b_1 及 b_2 的先验软信息为对数似然比:

$$LLR_i = \ln \frac{P(b_i = 1)}{P(b_i = 0)}, LLR_i = \ln \frac{P(b_i = 1)}{P(b_i = 0)} \quad (4)$$

由贝叶斯准则, 码片 b_1 的后验软信息可表示为:

$$LLR_i^{post} = \ln \frac{P(b_i = 1|r)}{P(b_i = 0|r)} \quad (5)$$

$$= \ln \frac{P(r|b_i = 1)}{P(r|b_i = 0)} + LLR_i$$

等式(5)右边第一项为码片 b_i 的外信息 LLR_i^{ext} , 由全概率公式可推得:

$$LLR_i^{ext} = \ln \frac{P_0(b_i)P(r|b_i = 10) + P_1(b_i)P(r|b_i = 11)}{P_0(b_i)P(r|b_i = 00) + P_1(b_i)P(r|b_i = 01)} \quad (6)$$

$$= \ln \frac{P(r|b_i = 10) + P(r|b_i = 11)e^{LLR_i}}{P(r|b_i = 00) + P(r|b_i = 01)e^{LLR_i}}$$

$$= \ln \frac{P(r|s_i = 1) + P(r|s_i = 1)e^{LLR_i}}{P(r|s_i = 1) + P(r|s_i = 1)e^{LLR_i}}$$

其中 $r = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, 且有

$$\begin{cases} P(r|s_i = 1) = P(r|s_i = 1) \cdot \prod_{i' \neq i} P(r_{i'}|s_{i'} = 0) \\ P(r|s_i = 0) = \prod_{i=1}^4 P(r_i|s_i = 0) \end{cases} \quad (7)$$

由式(4)可推得:

$$\frac{P(r_i | s_i = 1)}{P(r_i | s_i = 0)} = \frac{P(r_i, \lambda_i^1)}{P(r_i, \lambda_i^0)} = \left(\frac{\lambda_i^1}{\lambda_i^0}\right)^{r_i} \cdot \exp(\lambda_i^0 - \lambda_i^1) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \lambda_i^1 = \zeta_i + c_i I \\ \lambda_i^0 = \zeta_i \end{cases}, \text{ 对单数据流 } \zeta_i = n_i, \text{ 可视作等价干扰。对于}$$

接收端 ζ_i 已知, 即每时隙背景光干扰对应的光子数 n_i 。

$$E[s_i] = 1 \cdot P(s_i = 1) + 0 \cdot P(s_i = 0) = P(s_i = 1) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P(s_i = 1) &= P(b_1 = 0, b_2 = 0) \\ &= P(b_1 = 0) \cdot P(b_2 = 0) = P_0(b_1) \cdot P_0(b_2) \end{aligned} \quad (10)$$

类似地, 可推得:

$$\begin{cases} P(s_i = 1) = P_i(b_1) P_i(b_2) \\ P(s_i = 0) = P_i(b_1) P_i(b_2) \\ P(s_i = 1) = P_i(b_1) P_i(b_2) \end{cases} \quad (11)$$

由式(7)-(11), 式(6)可表示为:

$$LLR_i^{ESE} = \ln \frac{\exp(\phi_i) + \exp(\phi_i + LLR_i)}{\exp(\phi_i) + \exp(\phi_i + LLR_i)} \quad (12)$$

$$\text{其中充分统计量 } \phi_i = r_i \cdot \ln(1 + c_i I / \zeta_i) \quad (13)$$

类似地, 可以推导出 LLR_i^{DEC} 。

LLR_i^{ESE}, LLR_i^{DEC} 即为 e_{ESE} , 而 LLR_i, LLR_i 为 I_{ESE} 。

迭代检测译码算法总结如下:

Step 1: 初始化先验软信息 LLR_i, LLR_i

Step 2: 计算 ESE 模块输出的外信息;

Step 3: 解交织外信息, 作为 DEC 的译码软输入;

Step 4: 由 DEC 输出的译码外信息, 经过交织, 反馈回

ESE 模块作为先验软信息。

在最后一次迭代结束后, DEC 模块对信息比特序列进行判决, 获得检测估计值 \hat{d} 。

3.3 4PPM 简化算法

针对 4PPM 调制, 提出简化方案。

去除式(12)中分子分母的先验信息项, 有:

$$LLR_i^{ESE} = \ln \frac{\exp(\phi_i) + \exp(\phi_i)}{\exp(\phi_i) + \exp(\phi_i)} \quad (14)$$

第一次迭代的结果与式(12)相同。由于在迭代的过程中, 去除 LLR_i, LLR_i 导致用于纠错译码的部分先验信息损失, 第二次迭代无法在第一次迭代基础上进一步纠错。简化方案获得的系统性能 (例如比特误码率 BER) 略逊于采用式(12)的原始算法。

对数域有近似数值计算: $\ln(e^x + e^y) \approx \max(m, n)$, 简化的方案可将式(12)表示为:

$$LLR_i^{ESE} \approx \max(\phi_i, \phi_i) - \max(\phi_i, \phi_i) \quad (15)$$

如(15)式, 将指数、对数域的运算转化为求解最大值及减法运算, 可极大提高运算速度, 降低系统接收端解调的复杂度。

采用简化的软解调方案, 只需一次迭代运算, 对接收终端的计算能力要求降低, 可应用于对系统误码率要求不高、接收端计算能力较弱的场合。

4 仿真结果

本节通过 MATLAB 平台进行数值运算的系统仿真, 对基于光子计数的 4PPM 简化软解调算法的性能进行验证和分析。仿真分别采用重复码(RC)和串行级联码(SCC)进行信道编码, 信道模型均采用光强对数正态衰落的 Poisson 信道, 对不同码率及不同大气湍流程度下的系统误码率进行比较分

析。

图3所示是单数据流简化 4PPM 软解调算法的仿真结果, 重复码(RC)码率 $R_c = 1/8$, 在弱湍流 ($\sigma \leq 0.3$) 假设下, 以极低的发射能量获得理想的系统误码率; 强湍流 ($\sigma \geq 0.4$) 假设下, 仍能以较高的码率、较低的发射能量获得可接受的误码率。

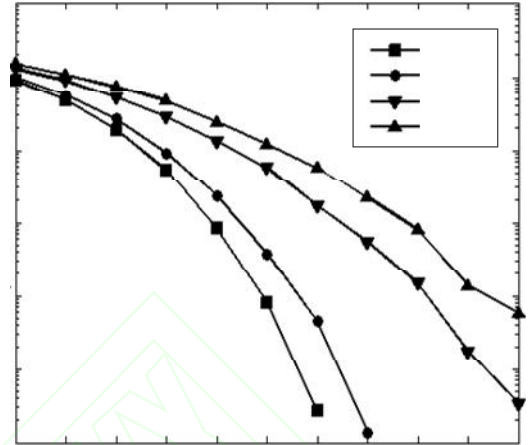


图3 4PPM 软解调在不同湍流程度下的误码率

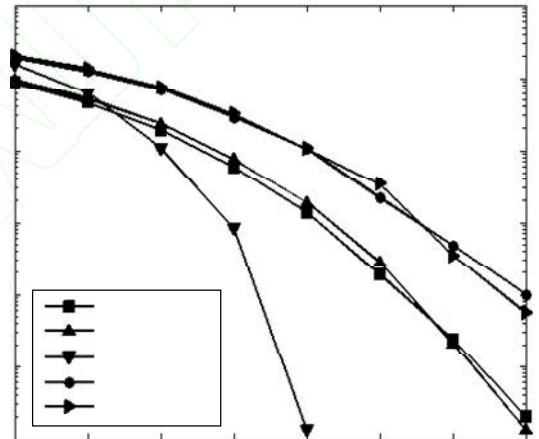


图4 4PPM 软解调在不同信道编码、湍流程度下的误码率

图4所示是 4PPM 简化软解调引入串行级联码的仿真情况。 $\sigma = 0.2$, 级联码以高码率 $R_c = 1/4$ 、极低的发射能量获得十分理想的误码率, 获得比采用相同码率重复码的方案更高的编码增益; 采用高码率 $R_c = 1/2$ 重复码, 以比特能量 $E_b = -171$ dB 亦能获得理想的系统性能。即使在强湍流情况下, 高码率级联码仍能以较低的发射能量获得可接受的误码率。

5 结束语

本文基于光子计数和脉冲位置调制, 假设无线光信道为 Poisson 信道并存在大气湍流, 以对数正态衰落分布对光强进行建模, 受迭代检测技术思想的启发, 提出采用软信息作为输入输出的单数据流迭代软解调算法。对 PPM 迭代软解调算法进行了理论推导, 并在此基础上提出对应 4PPM 的简化方案。通过对系统仿真结果的分析, 4PPM 简化软解调算法在采用重复码和串行级联码情况下, 都能以较低发射能量、较低的系统复杂度、较高码率, 获得理想的系统性能, 尤其是

级联码的引入能获得很高的编码增益。

本文提出的算法以及简化方案, 适合应用于对系统性能(如误码率)要求不高、接收端计算能力较弱的场合, 在系统性能和复杂度间进行折中, 以较低的系统复杂度获得较理想的系统性能, 易于硬件实现, 为今后无线光通信的应用提供了参考和借鉴。

除了串行级联码外, 还有其他性能优良的信道编码策略, 例如并行级联卷积码(Turbo 码)等, 这些不同的编码方案对系统性能的影响将在未来的研究工作中继续展开。

参考文献

- [1] C. W. Helstrom, J. W. S. Liu, and J. P. Gordon, "Quantum-mechanical communication theory[J]," *Proc. IEEE*, vol. 58, no. 10, pp. 1578-1598, Oct. 1970.
- [2] V. W. S. Chan, "Free-Space Optical Communications[J]," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4750-4762, Dec. 2006.
- [3] B. S. Robinson, A. J. Kerman, and E. A. Dauler et al, "781 Mbit/s photon-counting optical communication using a superconducting nanowire detector[C]," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 4, pp. 444-446, Feb. 2006.
- [4] X. M. Zhu and J. M. Kahn, "Free-Space Optical Communication Through Atmospheric Turbulence Channels[J]," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 50, No. 8, pp. 1283-1300, August 2002.
- [5] 杨彦东, 周小林. 一种基于光子计数的协作自由光通信技术[J]. *信息与电子工程*, 2012, 1(1): 32-36.
- [6] J. Hagenauer, E. Offer, and L. Papke, "Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes[J]," *IEEE Trans. on Infor. Theory*, vol. 42, no. 2, pp. 429-445, March 1996.
- [7] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications[M]*, 2nd ed., New York, NY: Wiley, 1995.
- [8] J. Hagenauer, "The turbo principle: Tutorial introduction and state of the art[C]," *Proc. 1st Internat. Symp. on Turbo Codes*, Brest, France, pp. 1-12, 1997.
- [9] C. Berrou and A. Glavieux, "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes[J]", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 44, no. 10, pp. 1261-1271, Oct. 1996.
- [10] 于修文, 葛万成. Turbo 码译码性能的研究[J]. *通信技术*, 2008, 41(7): 12-15.
- [11] S. ten Brink, "Convergence Behavior of Iteratively Decoded Parallel Concatenated Codes[J]", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 49, no. 10, pp. 1727-1737, Oct. 2001.

编辑