

doi:10.13756/j.gtxyj.2017.02.008

光通信系统与网络技术

基于光子探测阵列的 PPM 系统误码性能分析

向劲松,邓晨辉,蒋 豪,王 举

(重庆邮电大学 光纤通信技术重点实验室,重庆 400065)

摘要:现有的 PPM(脉冲位置调制)误码率表达式无法准确分析光子探测器阵列接收的 PPM 通信系统误码性能。文章基于泊松信道模型,考虑各光子探测器单元在一个 PPM 时隙内探测到一个光子产生一个电脉冲后不再响应该时隙内其余到达光子的情况,对探测器阵列合成输出信号作最大似然判决,得出了修正后的误码率表达式,并通过蒙特卡洛仿真验证其正确性。结果表明:修正的误码率表达式可准确体现光子探测器阵列接收 PPM 信号系统误码性能。利用该式可对探测器阵元数目进行优化。

关键词:空间光通信;脉冲位置调制;光子探测器阵列;泊松信道

中图分类号: TN911.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2017)02-0027-03

The Performance Analysis for PPM System based on Photon-Counting Detector Arrays

XIANG Jin-song, DENG Chen-hui, JIANG Hao, WANG Ju

(Key Lab of Optical Fiber Communications Technology, Chongqing University
of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: So far the formula for bit error rate of PPM cannot accurately analyze the performance of the PPM communication system when photon-counting detector arrays are used as receivers. In this paper, a revised representation formulation is derived based on Poisson channel. Firstly, we consider the situation when a photon is incident on a single photon-counting detector and an electrical is produced in response to that photon, and this detector can no long continue to probe the other photons in this time slot. Then according to the maximum likelihood detection, the synthetic signal of detector arrays output is manipulated into the formula. Finally, the MonteCarlo method is used to support our model and the results indicate that the modified expression is an accurate computation for the bit-error probability of M -ary PPM when the detector arrays are used. Furthermore, this equation can be used to optimize the number of detector arrays.

Key words: space optical communication; PPM; photon counting detector array; Poisson channel

0 引 言

PPM(脉冲位置调制)^[1-2]技术结合光子探测器阵列^[3-4]直接检测的激光通信系统具有能量调制效率高、抗干扰能力强和探测灵敏度极佳等诸多优点,在深空光通信研究中备受关注。NASA(美国国家航空航天局)针对深空激光通信应用专门设计了两种光子探测器阵列器件,一种是盖革模式雪崩光电二极管焦平面阵列^[5];另一种是超导纳米线光子探测器线阵^[6]。后者在月球到地球间的 LLCD(激光通信演示验证)系统^[7]中表现出了优异的性能。

针对光 PPM 通信系统的误码性能,文献[8]基于最大似然准则,给出了离散无记忆信道下 PPM 信号误码率的表达式。文献[9]在该式的基础上进行推导和化简,得到一个更加稳健精确的计算公式。然而这些表达式都是在理想泊松信道下分析得出的,给出的是理论极限值。在一个 PPM 时隙内,当

光子探测器探测到一个光子后就输出一个电脉冲,对于该时隙内的其他到达光子,探测器不再响应,即一个光子探测器在一个时隙内最多可探测一个光子,因此上述误码率表达式均不能准确分析光子探测器阵列接收系统的性能。结合探测器阵列可能的输出结果,本文给出一个修正后的误码率计算表达式,该表达式可准确体现一个 PPM 时隙内每个探测单元不能探测到两个及以上光子情况下的系统误码性能,并通过蒙特卡洛仿真验证其正确性与可行性,利用该式可为接收机的探测器阵列参数优化提供理论依据。

1 理想光子探测 PPM 信号系统误码性能

在一个 PPM 符号内,根据最大似然准则,接收到光子数最多的时隙将被判决为信号时隙位置,对于连续输出的 M 进制 PPM 信号,其符号错误概率

收稿日期:2016-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61571072)

作者简介:向劲松(1975—),男,四川达州人。副教授,博士,主要从事空间光通信方面的研究。

通信作者:邓晨辉,硕士。E-mail: strchenxi@163.com

函数表示如下^[8]：

$$P_s = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f_{Y|X}(y|1) \left[\int_{-\infty}^y f_{Y|X}(y'|0) dy' \right]^{M-1} dy, \quad (1)$$

式中, $f_{Y|X}(y|1)$ 和 $f_{Y|X}(y'|0)$ 分别为发送端发送‘1’和‘0’时,接收端接收到信号的概率密度函数。通常探测器是以离散值对到达的光子进行计数,则式(1)转换到离散域的表达式为^[9]

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{\infty} L(k) [M f_{Y|X}(k|0) - F_{Y|X}(k|0)^M + F_{Y|X}(k-1|0)^M], \quad (2)$$

式中, $f_{Y|X}(k|0) = \frac{n_b^k}{k!} \exp(-n_b)$, $f_{Y|X}(k-1|0) = \frac{(n_s + n_b)^k}{k!} \exp[-(n_s + n_b)]$, $F_{Y|X}(k|0) = \sum_{m=0}^k f_{Y|X}(m|0)$, k 为一个 PPM 时隙内到达的光子数, n_s 和 n_b 分别为一个 PPM 时隙内信号光子和噪声光子的平均计数, $L(k) = \frac{f_{Y|X}(k|1)}{f_{Y|X}(k|0)}$, PPM 符号错误概率转换成误码率为^[10]

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_s = \frac{1}{2(M-1)} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} L(k) [M f_{Y|X}(k|0) - F_{Y|X}(k|0)^M + F_{Y|X}(k-1|0)^M]. \quad (3)$$

从误码率计算过程可以看出,式(3)包含光子探测器在一个 PPM 时隙内所有可能的探测结果,并未考虑到光子探测器在探测到一个光子后该时隙内其他到达光子被湮没的情况,因此该误码率表达式不适用于光子探测阵列接收 PPM 系统误码性能分析。

2 光子探测阵列接收 PPM 信号系统误码性能

设 N 为光子探测器总数目, n_{dark} 和 n_{sky} 分别为一个 PPM 时隙内单个探测器的暗计数噪声和接收机总的天空背景噪声, T_s 为一个时隙宽度,用 R_{dark} 和 R_{sky} 分别表示单位时间内探测器暗计数率和天空背景光子到达率,则有 $R_{\text{dark}} = n_{\text{dark}}/T_s$ 和 $R_{\text{sky}} = n_{\text{sky}}/T_s$ 。在一个时隙内接收机的背景噪声由探测器暗计数噪声和天空背景噪声组成:

$$n_b = N \times n_{\text{dark}} + n_{\text{sky}}. \quad (4)$$

设信号光子数和背景光子数平均分成 N 等份分配到各探测器单元中,用 r 表示一个 PPM 时隙内某个探测器到达的光子数,其概率密度函数可表示为^[11]

$$p(r|1) = \frac{[(n_s + n_b)/N]^r}{r!} \exp[-(n_s + n_b)/N], \quad (5)$$

$$p(r|0) = \frac{(n_b/N)^r}{r!} \exp(-n_b/N). \quad (6)$$

当发送端发送‘1’时,用 f_{01} 、 f_{11} 分别表示该时隙内某个探测单元探测不到光子的概率和探测到光子的概率,结合式(5),其概率密度函数可表示为

$$\begin{cases} f_{01} = p(r=0|1) = \exp[-(n_s + n_b)/N] \\ f_{11} = 1 - p(r=0|1) = 1 - \exp[-(n_s + n_b)/N] \end{cases}, \quad (7)$$

则总共有 k 个探测器探测到光子的概率密度函数表达式如下:

$$f_{Y|X}(k|1) = C_N^k f_{11}^k f_{01}^{N-k}, \quad (8)$$

式中, $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$ 表示在 N 个探测器中有 k 个探测器探测到光子的所有可能组合个数。

当发送端发送‘0’时,用 f_{00} 、 f_{10} 分别表示该时隙内某个探测单元探测不到光子的概率和探测到光子的概率,结合式(6),其概率密度函数可表示为

$$\begin{cases} f_{00} = p(r=0|0) = \exp(-n_b/N) \\ f_{10} = 1 - p(r=0|0) = 1 - \exp(-n_b/N) \end{cases}. \quad (9)$$

则总共有 k 个探测器探测到光子的概率密度函数为

$$f_{Y|X}(k|0) = C_N^k f_{10}^k f_{00}^{N-k}. \quad (10)$$

最终结合式(2)可得,使用光子探测器阵列接收 PPM 信号系统误码率函数的表达式为

$$P_b = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=0}^N \frac{f_{11}^k f_{01}^{N-k}}{f_{10}^k f_{00}^{N-k}} \cdot \left[MC_N^k f_{10}^k f_{00}^{N-k} - \left(\sum_{m=0}^k C_N^m f_{10}^m f_{00}^{N-m} \right)^M + \left(\sum_{m=0}^{k-1} C_N^m f_{10}^m f_{00}^{N-m} \right)^M \right]. \quad (11)$$

3 结果分析

图 1 所示为 4-PPM、16-PPM 和 64-PPM 调制阶数下的误码性能曲线,时隙宽度 $T_s = 32$ ns,背景噪声 n_b 取 0.2 光子/时隙。仿真过程如下:生成随机二进制信息序列,再转换为 PPM 时隙符号。设置每个探测器单元信号时隙所在位置的平均光子数为 $(n_s + n_b)/N$,无信号的时隙位置平均光子数为 n_b/N ,由此生成泊松随机数。光子探测器各阵列单元对每支路信号每个时隙的光子进行计数,当某个探测器单元探测到光子数大于 1 个时,将该探测器单元该时隙实际探测的光子数限制为 1 个。然后对 N 个探测器输出信号求和,并对探测器阵列合成输出作最大似然判决得到 PPM 符号,再将判决的 PPM 符号转换为二进制比特数据,统计误码率。

由图 1 可知,不同参数下的仿真数据与修正后

误码率表达式得出数据相一致,验证了该表达式的正确性与可行性,且随着探测器数目不断增多,接收机性能越逼近式(3)中理想公式条件下的性能。

结合修正后的 PPM 误码率表达式,图 2 所示为探测器暗计数噪声对接收机误码性能的影响,采用 64-PPM,时隙宽度 $T_s = 32 \text{ ns}$ 。

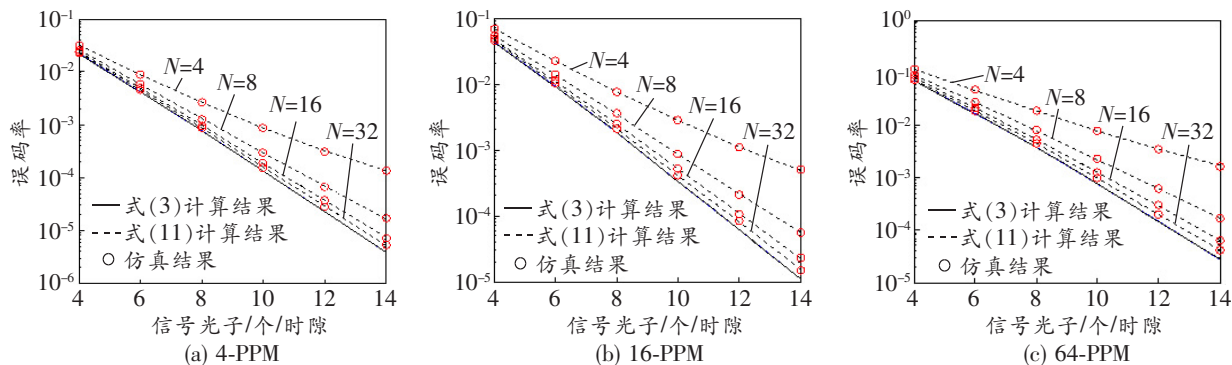


图 1 不同调制阶数下的误码性能曲线

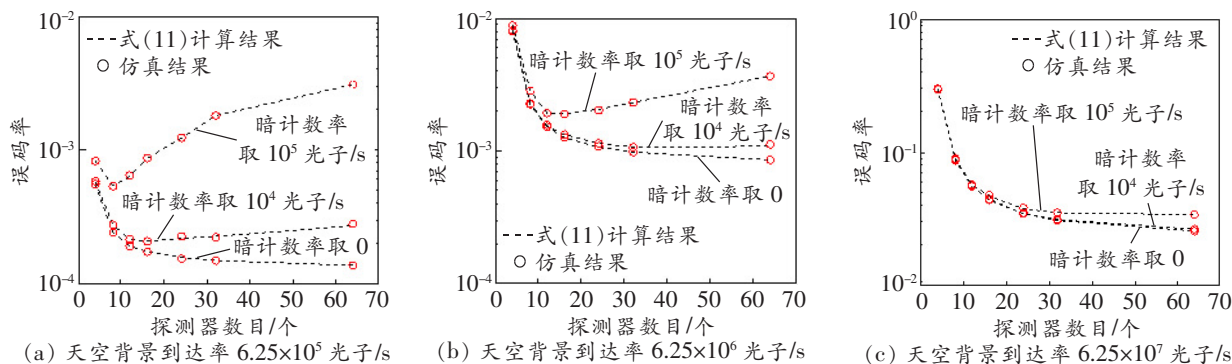


图 2 探测器暗计数噪声对接收机误码性能的影响

由图 2(a)和图 2(b)可知,在天空背景较弱时,接收机性能受探测器暗计数噪声影响较大,误码性能曲线出现极小值,探测器阵列数目有最优值;当天空背景光子到达率为 6.25×10^5 光子/s,单个探测器暗计数率分别取 10^4 、 10^5 光子/s 时,对应最优探测器阵元数为 $N=8$ 和 $N=16$;当天空背景光子到达率取 6.25×10^6 光子/s 时,对应最优探测器阵元数为 $N=12$ 和 $N=32$;图 2(c)表示天空背景足够强时的误码性能曲线,此时探测器暗计数噪声被天空背景噪声淹没,不再是影响接收机性能的主要因素。

4 结束语

为准确分析光子探测阵列接收 PPM 系统误码性能,对现有光 PPM 误码率表达式进行了修正。在 4-PPM、16-PPM 和 64-PPM 下,探测器阵元数目分别取 4、8、16 和 32 个时,对接收机误码性能进行仿真分析,得到的数据与修正后表达式计算结果相吻合。利用该式结合各种噪声对探测器数目进行分析表明:天空背景光子到达率为 6.25×10^5 光子/s,探测器暗计数率分别取 10^4 、 10^5 光子/s 时,最优探

测器数目分别为 8 和 16 个;天空背景光子到达率为 6.25×10^6 光子/s 时,最优探测器数目为 12 和 32 个;天空背景光子到达率为 6.25×10^7 光子/s 时,暗计数噪声对探测器数目选取影响不明显。

参考文献:

- [1] 刘宏展,廖仁波,孙建锋,等. 无线光通信新型组合脉冲调制性能分析 [J]. 光学学报,2015,35(7):91-98.
- [2] 王岩,李洪祚,张猛,等. 空间光通信光纤激光器脉冲位置调制特性研究 [J]. 中国激光,2015,(8):132-140.
- [3] Sarbazu E, Safari M, Haas H. Photon detection characteristics and error performance of SPAD array optical receivers [C]// IWOW 2015. Istanbul, Turkey: IEEE,2015:132-136.
- [4] Farr W. Technology development for high efficiency optical communications [C]//Aerospace Conference IEEE 2012. Montana, US:IEEE,2012:1-8.
- [5] Srinivasan M, Vilnvotter V. Avalanche Photodiode Arrays for Optical Communications Receivers [D]. Pasadena, USA:Jet Propulsion Laboratory, 2001.

(下转第 53 页)