

一定背景噪声下的水下光 PPM 信道容量分析

周亚民^{1,2}, 刘启忠², 张晓晖², 李 方³

(1. 海军士官学校信息技术系, 安徽 蚌埠 233012; 2. 海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033;
3. 海军工程大学海洋电磁环境研究所, 湖北 武汉 430033)

摘 要:根据水下光信道的特点,在分析光 PPM 信号接收模型的基础上,从信息论出发,研究了在一定背景噪声下,采用软判决解调时,脉冲时域展宽、单位脉冲能量、单位时隙传信时隙数等信道参数对光 PPM 信道容量的影响。模拟计算结果表明:信道容量和信息传输速率均随脉冲宽度的增大而减小,随脉冲能量的增大而增大,随传信时隙数增大而表现出先增大后减小,最后趋于零的趋势,存在最佳传信时隙数,使信道容量和信息传输速率分别达到最大,为设计水下光无线通信系统提供一定的理论依据。

关键词:激光通信;信道容量;信息论;脉冲时域展宽

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

Analysis of Underwater Optical PPM Channel Capacity Under Certain Background Noise

ZHOU Ya-min^{1,2}, LIU Qi-zhong², ZHANG Xiao-hui², LI Fang³

(1. Department of Information Technology, Naval Petty Officer Academy, Bengbu 233012, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

3. Institute of Marine Electromagnetic Environment, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The characteristics of underwater laser channel are introduced and the receiving model of laser PPM signal is analyzed. Then beginning with information theory, the effects of channel parameters such as pulse time-domain extension, unit pulse power, and the number of time-slots transmitting information per unit symbol interval on the channel capacity of laser PPM have been studied by adopting soft decision demodulation in certain background noise. The simulation indicates that both the channel capacity and information transmission rate decrease with pulse width broadening, increase with power enhancing. And still the two parameters present a trend that they first increase then decrease and finally approach to zero when the transmission time-slot number becomes larger. So there is an optimal time-slot number that makes the channel capacity and information transmission rate reach a maximum respectively and provides theoretical basis for the design of underwater laser communication system.

Key words: laser communication; channel capacity; information theory; pulse time-domain extension

1 引言

光脉冲位置调制(PPM)传信方式以其高能量传输效率,在水下激光无线通信中有着良好的应用前景^[1-2]。但激光脉冲在水下传输时会发生严重散射,散射引起的多路径效应将导致激光脉冲时域展宽,其结果一方面导致接收信号的信噪比降低,加大了信号检测的错误概率;另一方面,为使接收信号仍具有正交性,在系统设计时,需要将时隙宽度选得足

够大。这两方面均会对水下激光通信信道容量产生严重影响。因此,对于设计水下激光通信系统,从信息论的理论出发来分析水下激光通信信道容量是非常必要的。

基金项目:“十一五”预研项目资助。

作者简介:周亚民(1984-),男,学士学位,硕士研究生,主要研究方向为水下激光通信。E-mail:yamin1023@163.com

收稿日期:2008-10-27

在光 PPM 信道容量研究方面,国内外一些学者做了相关的工作。MIT 实验室 J. W. S. Liu 在其博士论文中推导出了光 PPM 通信中基于光子计数的信道容量^[3-4],指出对于无噪声信道,单位光子的信道容量能达到无穷。其后, V. W. S. Chan 等研究了在一定背景噪声下采用软判决解调时光 PPM 信道容量^[5],指出采用软判决解调时的信道容量大于采用硬判决解调时的容量。文献[6]、[7]亦对无噪声下的光 PPM 信道容量进行了分析,证明了光 PPM 信道容量除受系统带宽限制外,还受信道脉冲功率的限制。

由于在 PPM 信号软判决解调方面, G. Prati 等学者指出在使解调错误概率最小的意义上,最大似然解调能使性能达到最佳^[8],本文基于最大似然解调方法,从信息论的理论出发,着重分析在一定背景噪声下,采用软判决解调时脉冲展宽等信道参数对光 PPM 信道容量的影响,为设计水下光无线通信系统提供一定的理论依据。

2 光 PPM 信号和信道模型

2.1 光 PPM 信号模型

本文假设到达接收机的信号脉冲功率 $p_s(t)$ 具有如下表示形式^[9]:

$$p_s(t) = E_R g(t), t \geq 0 \quad (1)$$

式中, E_R 表示接收到的光信号单元脉冲能量; $g(t) = t/t_M^2 \exp(-t/t_M) (t \geq 0)$ 是光脉冲能量时域分布的反映, $\int_0^\infty g(t) dt = 1$, t_M 是指 $p_s(t)$ 从信号出现至达到最大值的时间,它与传输距离、介质参数等密切相关。对 $g(t)$ 进行数学分析可知, $p_s(t)$ 的半功率点间的时间宽度(也常称脉冲半宽度) $\Delta t \approx 2.45t_M$ 。

由于 $g(t)$ 的拖尾很长,故从严格的意义上说,总是存在时隙间串扰的。因为 $\int_0^{2\Delta t} g(t) dt \approx 95.6\%$, 即接收脉冲信号 95.6% 以上的能量集中在 $2\Delta t$ 时间内,为方便起见,本文定义光脉冲的扩展宽度 $\bar{t} \triangleq 2\Delta t = 4.90t_M$, 忽略脉冲扩展宽度以外的信号能量。

2.2 光 PPM 信号取样模型

假设水下激光无线 PPM 通信系统中,时帧宽度为 T 秒,每时帧分成 M 个时间宽度为 τ 的时隙,其中前 Q 个时隙为传信时段 T_Q ,后 D 个时隙不传信息,称为静默时段 T_D (也称保护时段)。当全数字 PPM 接收机对接收信号进行采样时,如果采样周期为 T_s (满足 $T_s \leq \tau/2$),那么一个时隙的样值数为 P , $P = \lceil \tau/T_s \rceil$ ($\lceil x \rceil$ 表示对 x 的取整运算),于是一帧的

样值数为 PM ,接收机在一帧中的观测矢量可表示为:

$$\mathbf{Y} = [y(0), y(1), y(2), \dots, y(PM-1)]$$

它的每个分量 $y(i)$ 反映了光电检测器在 $[iT_s, iT_s + \Delta]$ 时间内产生的光电子数量,服从 Poisson 分布,于是,在 PPM 符号脉冲第一个样值位置为 $N = n$ ($n = 0, P, \dots, (Q-1)P$) 的条件下,观察到 \mathbf{Y} 的似然函数为^[9-10]。

$$L(\mathbf{Y}|N=n) = \prod_{i=0}^{PM-1} \frac{[u_s(i) + u_b]^{y(i)}}{y(i)!} \cdot \exp[-(u_s(i) + u_b)] = C \cdot \prod_{i=0}^{PM-1} \left(\frac{u_s(i) + u_b}{u_b} \right)^{y(i)} \quad (2)$$

其中, $C = \prod_{i=0}^{PM-1} \frac{u_b^{y(i)}}{y(i)!} \exp[-(u_s(i) + u_b)]$; u_b 表示背景噪声计数强度(Δ 时间内光电子计数平均值); $u_s(i) = u_{sm}f(i-n)$; u_{sm} 表示信号峰值计数强度; $f(i)$ 表示脉冲归一化波形 $f(t)$ 在 iT_s 时刻的取样值。

3 最大似然解调及误码率分析

考虑式(2),如果无帧间串扰,即 $f(i)$ 仅在 $[0, (D+1)P-1]$ 内有值,则式中因子 C 独立于 n ,对 $L(\mathbf{Y})$ 取对数,并去掉无关项,可将对数似然量度取为:^[9,11]

$$\Lambda(\mathbf{Y}|N=n) = \sum_{i=0}^{PM-1} y(i) \ln \left(1 + \frac{u_{sm}f(i-n)}{u_b} \right) \quad (3)$$

如果接收光脉冲扩展宽度为 \bar{t} ,可以认为 $f(i)$ 只在 ω 个取样点上有值, $\omega = \lceil \bar{t}/T_s \rceil$,则有:

$$\begin{aligned} \Lambda(\mathbf{Y}|N=n) &= \sum_{i=n}^{n+\omega-1} y(i) \ln \left(1 + \frac{u_{sm}f(i-n)}{u_b} \right) \\ &= \sum_{i=0}^{\omega-1} y(n+i) \ln \left(1 + \frac{u_{sm}f(i)}{u_b} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

最大似然解调就是对 Q 个可能的 n 计算上述量度,将具有最大量度的符号判决为发送符号。在这种情况下要精确求得解调误码率 P_E 的表达式是很困难的,然而,当 PPM 信号满足正交条件,即时隙间干扰可以不计,可以根据 Bhattacharyya 限技术推导出的上界^[12],即:

$$P_E \leq (Q-1) \exp \left(- \sum_{i=0}^{\omega-1} (\sqrt{u_{s_0}(i) + u_b} - \sqrt{u_b})^2 \right) \quad (5)$$

式中, $u_{s_0}(i) = u_{sm}f(i)$ 表示脉冲信号在 iT_s 时刻的计数强度,令 $x = u_{sm}/u_b$,代入式(5),并进行简单整理,可得:

$$\begin{aligned} P_E &\leq (Q-1) \exp \left(- \sum_{i=0}^{\omega-1} (\sqrt{u_{sm}f(i) + u_b} - \sqrt{u_b})^2 \right) \\ &= (Q-1) \exp \left(- u_b \sum_{i=0}^{\omega-1} (\sqrt{1 + xf(i)} - 1)^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

上面结果便是文献[9]中的 5.3.5 式,它将解调误率直接同信号峰值噪声比 x ,以及脉冲展宽波形联系起来,比式(5)更有实际意义。

4 水下信道容量分析

信道容量是信道本身特征参量的函数,反映信道自身的信息特性。在 Shannon 理论中,给定一个有限容量为 C 的信道,则信号的二进制信息传输速率 R 必须小于 C ,才可以通过信道编码解码使得数据传输的误差率任意小,即使得信道中存在的随机扰动本身不能限制传输的准确性。因此,对于时变的水下光信道,分析其信道显得尤为重要。

严格意义上,激光光束通过的水下传输路径是渐变的,相邻的脉冲信号经传输后,其强度起伏一定程度上相关联,在短暂的相关时间内,水下光信道是有记忆的。为方便分析信道的容量,本文忽略这种相关性,认为水下光信道是无记忆信道,接收信号独立同分布。

由 Shannon 理论,输入信号 X 和接收信号 Y 的平均互信息可以写成^[4]:

$$\begin{aligned}
 I(X;Y) &= H(X) - H(X/Y) \\
 &= - \sum_{i=1}^n P_X(i) \log_2 P_X(i) + \sum_{j=1}^m P_Y(j) \cdot \\
 &\quad \sum_{i=1}^n P_{X/Y}(i/j) \log_2 P_{X/Y}(i/j) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中, $P_X(i)$ 为输入信号为 i (发射脉冲在第 i 个时隙出现) 的先验概率; $P_Y(j)$ 为对所有可能的输入信号,判决为符号 j 的平均概率; $P_{X/Y}(i/j)$ 表示当收到为 j 时发送为 i 的概率。而信道容量的定义为平均互信息的最大值,即:

$$C = \max_{\{P_X(k)\}} I(X;Y) \quad (\text{bit/symbol})$$

对于一般 Q -元 PPM 信道,当 $P_X(k) = 1/Q$ ($k=1,2,\dots,Q$) 时,互信息达到最大。又由 $m=n=Q, P_Y(k) = P_X(k)$, 可得:

$$C = \sum_{i,j} P_Y(j) P_{X/Y}(i/j) \log_2 \frac{P_{X/Y}(i/j)}{P_X(i)} \quad (8)$$

其中, $P_X(k) = P_Y(k) = 1/Q$ 。由于一时帧需要时间 $T = M\tau$ (s), 因此信息传输速率 C_i (也即单位时间的信道容量) 为:

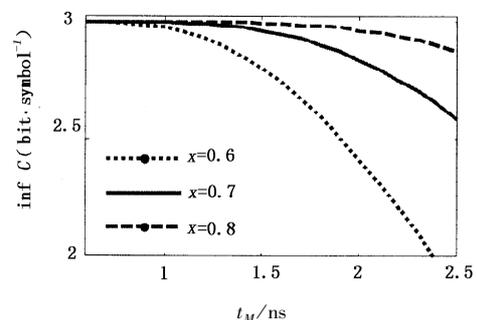
$$C_i = \frac{C}{T} = \frac{C}{M\tau} = \frac{C}{Q\tau + D\tau} \quad (\text{bit/s}) \quad (9)$$

5 计算机模拟及分析

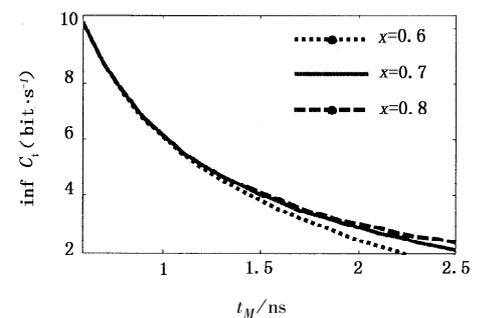
前文通过求界的方法给出解调误码率 P_E 上界的表达式,本节根据该表达式,模拟出各参数条件下水下光 PPM 信道容量的下界,使得参数变化对信道容量的影响比较清楚,在系统设计时是实用的。

首先分析背景噪声一定时,不同的单位脉冲能量下脉冲展宽对信道容量的影响,由式(1)易知,一定背景噪声下,对于一定能量的单位脉冲, x 是脉冲宽度的单调递减函数,对于确定的脉冲宽度,都有确定的 x 与之对应。反过来,对于同一脉冲宽度,单位脉冲能量不同,则具有不同的 x 值,脉冲能量越大, x 值越大。由于实际工程中,脉冲峰值比较容易测量,因此,本文以 x 变化表征单位脉冲能量的变化。

图 1 是在背景噪声计数强度 $u_b = 30, Q = 8, D = 2, T_s = 0.5\text{ns}$ 且时隙宽度 $\tau = \bar{t}$ 的条件下,以 t_M (反映了脉冲宽度) 为参数的信道容量 C 和信息传输速率 C_i 下界的模拟计算结果,图中三条不同的曲线代表 $t_M = 1\text{ns}$ 时, x 值分别取为 0.6, 0.7, 0.8 的情况。可以看出,当脉冲能量一定时,脉冲宽度增大会导致 C, C_i 减小,而当脉冲宽度一定时,脉冲能量越大, C, C_i 也就越大,并且脉冲能量增大,有利减小脉冲宽度对 C, C_i 的影响。



(a) 信道容量与脉宽的关系



(b) 信息传输速率与脉宽关系

图 1 模拟计算结果

考查系统在 u_b 取不同值时参数 Q 对信道容量 C 的影响,假设 $x = 0.6, t_M = 1\text{ns}, T_s = 0.5\text{ns}$, 且时隙宽度 $\tau = \bar{t}, C$ 的下界模拟结果如图 2 所示。由图可以分析,随着 Q 不断增大,由于误码率也随之增加的原因,信道容量呈现出先增大后减小的趋势,存在一个最佳传信时隙数 Q_s , 使得信道容量最大。由此可见,文献[13]、[14]在无噪声条件下得出的 PPM 信道容量 C 随符号 Q 无限增大而无穷提高的结

论^[6]在有噪声时是不成立的。同时也可以看出,当 x 一定时,背景噪声计数强度 u_b 越大(即信号峰值计数强度 u_{sm} 越大),最佳传信时隙数 Q_s 越大,相应的信道容量也越大。

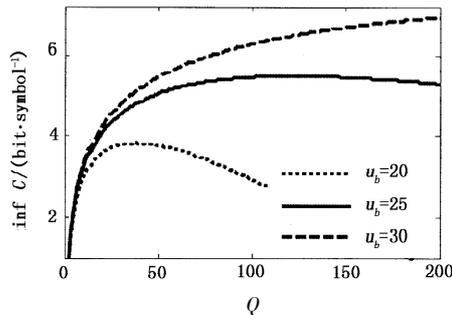


图2 不同背景噪声条件下信道容量随 Q 变化

取 $x = 0.6$, $t_M = 1 \text{ ns}$, $u_b = 30$, $T_s = 0.5 \text{ ns}$, 且时隙宽度 $\tau = t$, 图3给出了 D 取三种不同值时,信息传输速率 C_i 下界随系统参数 Q 的变化的模拟结果。由图可以看出,随着 Q 不断增大,信息传输速率呈现出先增大后减小,最后趋于零的趋势,有一个使 C_i 达到最大的最佳传信时隙数 Q_s 。对比图中分别在 $D = 1$, $D = 5$ 和 $D = 15$ 下模拟计算出的的3条曲线,可以发现,静默时段越小,最佳传信时隙数 Q_s 也越小,而相应的信息传输速率越大。

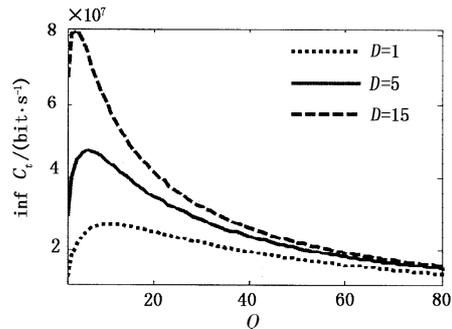


图3 D 取不同值时信息传输速率随 Q 变化

6 结论

本文在分析光 PPM 信号水下接收模型的基础上,从信息论出发,研究了在一定背景噪声下,采用软判决解调时,脉冲展宽、脉冲能量、单位时隙传信时隙数等信道参数对光 PPM 信道容量的影响,为设计水下光无线通信系统提供一定的理论依据。

模拟计算结果表明:背景噪声一定时,信道容量和信息传输速率均随脉冲宽度的增大而减小,随脉冲能量的增大而增大,随传信时隙数增大而表现出先增大后减小,最后趋于零的趋势,存在最佳传信时隙数,使信道容量和信息传输速率分别达到最大,这与无噪声条件下对光 PPM 信道容量的分析结论有所区别。

参考文献:

- [1] Chen Mingsong, Zhou Shengyuan, Li Tiansong. The implementation of PPM in underwater laser communication system [A]. Int. Conf. Commun. Circuits Sys [C]//Int. Conf. Commun. Circuits Sys., IEEE, 2007; 1901 - 1903.
- [2] Zhou Xiaomai. Research on signal demodulation and channel coding in submarine laser communications [D]. Wuhan: Huazhong University of science and technology, 1994; 3 - 4. (in Chinese)
- [3] Helstrom C W, Liu J W S, Gordon J P. Quantum-mechanical communication theory [J]. Proc. IEEE, 1970, 58 (10): 1578 - 1598.
- [4] Chan V W S. Free-space optical communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24 (12): 4750 - 4762.
- [5] Chan V W S. Soft decision decoding for PPM optical channels with direct detection [J]. Proc. Int. commun. Conf., 1980, 57. 4. 1 - 57. 4. 8.
- [6] Zou Chuanyun, Ao Faliang, Huang Xiangfu. Analysis of optical PPM channel capacity without background noise [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2000, 22(4): 682 - 686. (in Chinese)
- [7] Qin Ling, Ke Xizheng. Analysis of optical MPPM channel capacity without background noise [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(7): 107 - 110. (in Chinese)
- [8] Prati G, Gagliardi R M. Decoding with stretched pulses in laser PPM communications [J]. IEEE Trans. on Commun., 1983, 31(9): 1037 - 1045.
- [9] Zou Chuanyun. Study on optical wireless PPM communication [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 1999; 10 - 72. (in Chinese)
- [10] Zhou Xiaomai, Chen Wenge, Huang Tiexia, et al. A study of demodulation in stretched pulse PPM optical channels [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech., 1995, 23(10): 57 - 62.
- [11] Prati G. Joint pulse spreading estimation and decoding in stretched pulse PPM communications [J]. IEEE Trans. on Commun., 1985, 33(8): 760 - 766.
- [12] Zhou Xiaomai, Xiong Zhaofei, Huang Tiexia. The design of trellis coded overlapping PPM for optical direct-detection channels [J]. Journal of China Institute of Communications, 1995, 16(6): 17 - 24 (in Chinese)
- [13] Stanley A B, Joseph K, James R L. Bandwidth limitations on noiseless optical channel capacity [J]. IEEE Trans. on Commun., 1982, 30(5): 1262 - 1264.
- [14] Pierce J R. Optical channels: Practical limits with photon counting [J]. IEEE Trans. on Commun., 1978, 26(12): 1819 - 1821.