

偏振差分脉冲位置调制方法

蒋军敏, 汤琦, 巩稼民

(西安邮电大学 通信与信息工程学院, 西安 710121)

摘要: 高效调制技术可以最大化消除背景噪声对紫外光通信的影响, 从而有效提高紫外光通信距离。因此, 提出了一种适用于无线紫外光通信的偏振差分脉冲位置调制(PDPPM)方法, 该方法利用圆偏振光可以分解成两路正交线偏振光, 两路正交的线偏振光构成了原始信息的差分信号, 有用信息为双极性差分信号传输信息; 给出了PDPPM的实现结构, 并对其误码率性能进行了分析比较。实验结果表明, PDPPM解调信噪比比脉冲位置调制(PPM)提高2dB左右, 在紫外光远距离通信上具有优异的性能。

关键词: 调制; 紫外光通信; 偏振差分脉冲; 偏振光

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)03-0039-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.03.011

Polarization differential pulse position modulation method

JIANG Junmin, TANG Qi, GONG Jiamin

(School of Communications and Information Engineering,

Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: High efficiency modulation technology can eliminate the influence of background noise to ultraviolet communication maximally, which effectively improve the distance of ultraviolet communication. So a polarization differential pulse position modulation (PDPPM) method for wireless ultraviolet communication is proposed in this paper, the method utilizes circularly polarized light which can be divided into two orthogonal polarization lines, which constitutes a differential signal of the original information, useful information is the transmission information of bipolar differential signal. The implementation structure of PDPPM is given, the BER performance of the demodulation is analyzed and compared, the results show that the signal-to-noise ratio of the demodulation is about 2dB higher than that of pulse position modulation (PPM), it has excellent properties in ultraviolet communication.

Key words: modulation; ultraviolet communication; polarization differential pulse position; polarized light

0 引言

紫外光通信利用大气粒子散射作用进行信息传输, 实现非视距散射传输, 极大地降低了通信终端间捕获、跟踪和瞄准(ATP)的实现难度, 保证了快速、可靠通信; 同时, 紫外光在大气中呈指数衰减、保密性高, 适用于海洋、山区和无人机等特种通信场合, 正成为保密通信等特种通信的研究热点^[1]。

由于大气层对紫外波段的吸收较强, 近地空间太

阳光中紫外波段成分相对较少, 并且基于 GaN、InGaN 和 AlInGa 的紫外 LED 具有高调制带宽、寿命长和驱动电路简单等优点, 所以, 紫外 LED 光通信在军事和民用领域均具有重要的应用价值^[2,3]。

紫外光通信系统通常采用强度调制/直接检测^[4]方案, 如开关键控调制(OOK)^[5], 其优点是实现方式简单, 但功率利用率低; 脉冲位置调制(PPM)^[6]功率利用率最高, 但带宽需求高, 并且需要符号同步; 数字脉冲间隔调制(DPIM)^[7]的优点是带宽效率高, 但它的符号长度不固定, 接收端必须进行复杂的同步才能正确解调; 多脉冲位置调制(MPPM)本质上是 PPM 的变形,

收稿日期: 2017-10-10。

基金项目: 国家自然科学基金(F050302)资助。

作者简介: 蒋军敏(1977-), 女, 硕士, 讲师 主要研究方向为光通信与现代通信网等方面。

MPPM 不仅可以改善带宽效率和信息传输容量, 而且具有较高的功率效率^[8,9], 在工程中应用较多。

在紫外 LED 光通信系统中, 由于太阳光等噪声光源导致接收信号的背景噪声较大; 在远距离通信中, 基于强度调制/直接检测类调制系统的性能急速下降。为此, 本文提出一种基于偏振光的差分脉冲位置调制 (Polarization differential pulse position modulation, PDPPM) 方法, 通过解差分消除了背景噪声的影响, 提高了接收信号信噪比。

1 圆偏振光的 Stokes 向量描述及实现

1.1 Stokes 向量

Stokes 向量可以描述任何状态的光, 其形式为 $\vec{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3]$ 。其中, S_0 为全部光强, S_1 为线偏振向量在水平和垂直两个方向上的强度差, S_2 为 $\pm 45^\circ$ 线偏振方向上的强度差, S_3 为右旋圆和左旋圆极化的强度差。其定义为:

$$\begin{cases} S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ S_2 = 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ S_3 = 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{0x} 、 E_{0y} 和 δ 分别为光矢量沿 X 坐标轴、Y 坐标轴的振幅分量和相位因子^[10-12]。

1.2 圆偏振光调制器实现

LED 发射的光通过偏振片和 $\lambda/4$ 相位延迟器可以得到圆偏振光如图 1 所示。当偏振片的极化方向为 90° 时, 得到左旋圆偏振光; 当偏振片的极化方向为 0° 时, 得到右旋圆偏振光。由图 1 可知, 透射光的 Stokes 向量

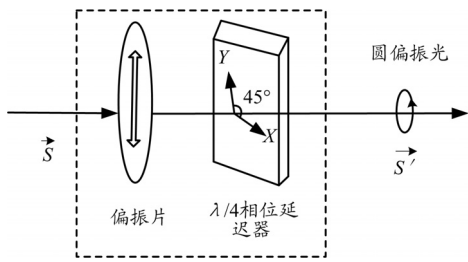


图 1 左旋圆偏振光的产生原理图

为 $\vec{S}' = M_2 M_1 \vec{S}$ 。

其中, M_1 为偏振片的 Mueller 矩阵, θ 为光透射方向和 Y 轴的夹角; M_2 为 $\lambda/4$ 相位延迟器的 Mueller 矩阵, δ 为光透射方向和 X 轴的夹角。 M_1 和 M_2 均为 4×4 的矩阵, M_1 各元素分别为: $m_{11}^1 = m_{44}^1 = 1$, $m_{21}^1 = m_{12}^1 = \cos 2\theta$, $m_{31}^1 = m_{13}^1 = \sin 2\theta$, $m_{32}^1 = m_{23}^1 = \cos 2\theta \sin 2\theta$, $m_{22}^1 = \cos^2 2\theta$, $m_{33}^1 = \sin^2 2\theta$, 其

余元素为 0; M_2 各元素分别为: $m_{11}^2 = 1$, $m_{22}^2 = \cos^2 2\theta + \cos \delta \sin^2 2\theta$, $m_{23}^2 = m_{32}^2 = (1 - \cos \delta) \cdot \sin 2\theta \cos 2\theta$, $m_{33}^2 = \sin^2 2\theta + \cos \delta \cos^2 2\theta$, $m_{24}^2 = -m_{42}^2 = -\sin \delta \cdot \sin 2\theta$, $m_{34}^2 = -m_{43}^2 = \sin \delta \cos 2\theta$, $m_{44}^2 = \cos \delta$, 其余元素为 0。

如果 $\theta = 90^\circ$ 、 $\delta = 45^\circ$, 则可得:

$$S' = \frac{1}{2} M_2 M_1 S = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

即两个偏振器件把紫外 LED 发出的自然光转换成左旋圆极化光。同理, 当线极化方向 $\theta = 0^\circ$ 时, 则得到的发射光为右旋圆极化光。

2 PDPPM 方法

2.1 系统组成

基于圆偏振光的 PDPPM 紫外 LED 光通信系统如图 2 所示。在发射端, 首先对信源数据进行编码、调制; 然后用调制信号控制驱动电路驱动紫外 LED; 最后经过圆偏振光转换装置 (由偏振片和 $\lambda/4$ 相位延迟器组成) 得到分别对应原始信息“0”和“1”的左旋、右旋两种正交圆偏振态光信号。而接收端的处理过程是发射端处理过程的逆过程。首先, 经过由 $\lambda/4$ 相位延迟器和正交偏振片组成的圆偏振光接收装置, 如果输入光为左旋圆偏振光, 则得到 90° 线偏振光, 否则输入右旋偏振光, 则得到 0° 线偏振光; 然后, 光电探测器 P_1 和 P_2 分别对 90° 线偏振光和 0° 线偏振光进行光电转换; 最后, 差分放大电路对所得到的电信号进行解差分和放大处理, 实现对原始信息的解调。

自由空间信道中的背景光为自然光, 其主要由无偏振光和少量偏振光等组成^[13,14]。当背景光进入图 2 所示的接收系统后, 经过接收端中的圆偏振光接收装置, 在 P_1 和 P_2 两个光电探测器上能够检测到同样强

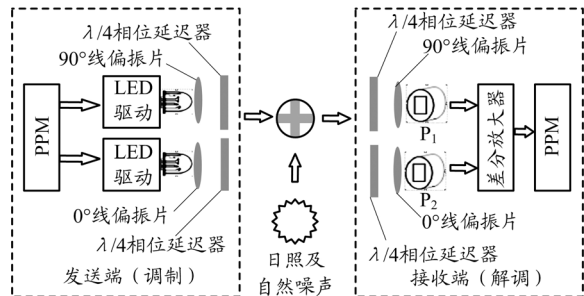


图 2 基于圆偏振光的 PDPPM 通信系统原理图

度的背景光信号, 并且其光生电流是一样的, 所以差分放大器输出结果为 0, 即得到:

$$S = S_1 - S_2 = \begin{cases} 1, \text{左旋圆偏振光} \\ -1, \text{左旋圆偏振光} \\ 0, \text{背景光} \end{cases} \quad (3)$$

其中, S 为解差分后的信号, S_1 和 S_2 为光电转换后的信号。所以, 基于圆偏振光 PDPPM 的调制/解调系统能有效地消除背景噪声的影响, 提高系统通信性能。

2.2 编码结构

紫外光通信中常用的调制方式为幅度调制, 典型的有 OOK、PPM 和 DPIM 等。OOK、PPM 和 DPIM 的编码结构如图 3 所示, OOK 调制方式采用二进制编码, 并用光强的有、无表示要传输的信息“0”和“1”, 优点是实现简单且带宽需求小, 但功率需求大; PPM 是把 M bit 占用的时间划分为 2^M 个时隙, 用其中的一个唯一位置时隙表示要传递的信息, 优点是降低了功率需求, 但对带宽需求较高, 当 $M=1$ 时, PPM 就退化为 OOK 调制, 所以 OOK 调制本质上是 PPM 的特例; DPIM 利用不同的时隙数表示信息的分组, 由于信息分布不均衡导致时隙数是随机的, 也即调制信息速率是变化的, 增加了系统处理的复杂性, 并且随机时隙数也会引起误码的后向传播, 所以在工程中应用较少。

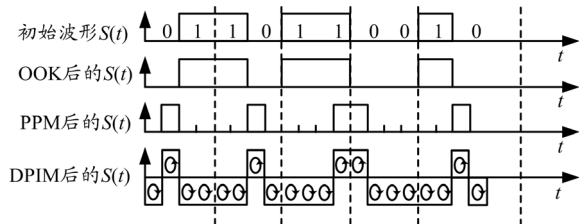


图 3 各调制方式时隙序列脉冲波形示意图 ($M=2$)

由以上分析可知, OOK、PPM 等调制方式都属于无极性正交幅度调制, 在 Stokes 空间中的最小欧几里德距离为 1。本文提出的 PDPPM 为极性正交幅度调制如图 4 所示, 其在 Stokes 空间中的最小欧几里德距离为 2。最小欧几里德距离增加直接提高系统的通信性能, 所以相对于无极性幅度调制, 采用 PDPPM 的紫外光通信系统的性能得到较大提高。另外, 由于在接收

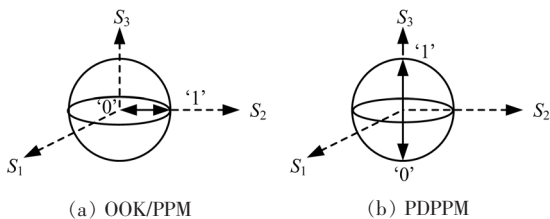


图 4 Stokes 空间 OOK/PPM 和 PDPPM 调制方式比较

端采用差分接收, 消除了背景杂散光的影响, 极大降低了紫外光远距离通信误码率。

由上述编码结构可以得到 OOK、PPM 和 PDPPM 3 种调制方式的带宽、功率需求如图 5 所示, 从图中可以看出 OOK 调制占用带宽最小、功率需求最大, PPM 和 PDPPM 的调制带宽需求一致, 但 PDPPM 的功率需求比 PPM 大。

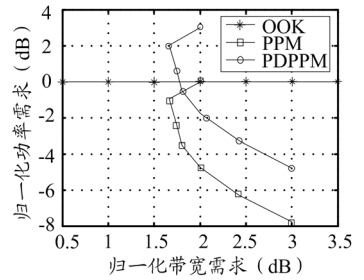


图 5 OOK、PPM 和 PDPPM 调制归一化带宽和功率需求

3 PDPPM 性能分析

设 $s_1(t)=g(t)$ 表示左旋圆极化信号, $s_2(t)=-g(t)$ 表示右旋圆极化信号。假定要传输的两个信号等概率出现, 当发送 $s_1(t)$ 时接收端解调器得到的接收信号为:

$$r = s_1 + n = \sqrt{E_b} + n \quad (4)$$

其中, n 是均值为 0、方差 $\sigma_n^2 = \frac{N_0}{2}$ 的高斯白噪声, r 的判决准则为:

$$r = \begin{cases} s_1(t), & r > 0 \\ s_2(t), & r < 0 \end{cases} \quad (5)$$

在给定发送 s_1 情况下, 接收误码率为:

$$\begin{aligned} p(e|s_1) &= \int_{-\infty}^0 p(r|s_1) dr \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{2E_b/N_0}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \\ &= Q\left[\sqrt{\frac{d_{\min}^2}{N_0}}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $d_{\min}^2 = \min_{i \neq j} \int [x_i(t) - x_j(t)]^2 dt$ 是不同分组对应的调制波形间的最小欧几里德距离, $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 表示不同信息组合对应的调制信号波形。

PPM 的最大似然接收的误码率^[1]公式为:

$$BER = Q\left(\sqrt{\frac{d_{\min}^2}{2N_0}}\right) \quad (7)$$

其中, $d_{\min}$ 是不同分组对应的调制波形间的最小欧几里德距离。

假定 P 为平均发射功率, R_b 为调制信号的速率, 要传输的信息为二进制“0”和“1”, 且等概率出现, 则对于 PPM 其峰值功率为 $2P$, M bit 信息分组对应的最小

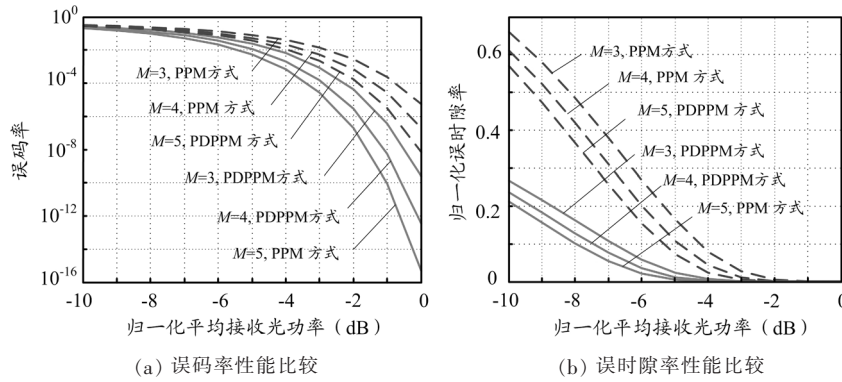


图6 不同信息分组长度时 PDPPM 和 PPM 调制性能比较

欧几里德距离为 $d_{\min}^2 = \min_{i \neq j} \int [x_i(t) - x_j(t)]^2 dt = \frac{2^M P^2 M}{R_b}$ 。

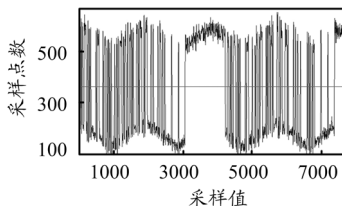
把 $d_{\min}$ 代入到式(6)、式(7)可得 PPM 和 PDPPM 的误码率如式(8)所示:

$$P_{\text{error-PPM}} = Q \left(\sqrt{\frac{2^M M P^2}{R_b N_0}} \right)$$

$$P_{\text{error-PDPPM}} = Q \left(\sqrt{\frac{2^{M+1} M P^2}{R_b N_0}} \right) \quad (8)$$

在信息分组长度 M 分别为 3、4 和 5 的情况下, PDPPM 和 PPM 性能比较如图 6 所示, 由图 6(a) 可见, 在加性高斯白噪声信道下, 当误码率为 10^{-4} 时, PDPPM 接收功率比 PPM 低 2dB 左右, 即 PDPPM 的解调信噪比比 PPM 提高 2dB 左右; 由图 6(b) 可以看出, 当平均接收光功率相同时, PDPPM 误时隙率比 PPM 小一倍左右。

我们利用本文的方法搭建了测试系统对 PDPPM 的调制性能进行了实验研究, 实验中采用中心波长为 365nm、光谱宽度为 20nm 的 LED 光源; 发送端由一个表面贴装的商用蓝紫光 LED 和可调焦手电筒组成光学准直系统(接收口径为 60mm), 接收端由双反射天线(主口径为 300mm)、滤光片、圆偏振光转换器和光电倍增管组成。为了便于对准, 发射角设计为 180° , 在接收端, 通过高速模数转换器实现数字化, 并在 FPGA 中实现解调、解码, 完成了语音通信, 图 7 为 1km 处 FPGA 采集到的语音编码波形。仿真结果表明: 叠加了 50Hz 工频信号后接收信号的幅度在 900mV 左右, 接收端接收到的语音质量较好、没有失真。

图7 基于 PDPPM
紫外远距离接收语音编码信号

4 结束语

本文提出了一种适用于无线紫外光通信的 PDPPM 方法, 该方法利用圆偏振光可以分解成两路正交线偏振光, 两路正交的线偏振光构成了原始信息的差分信号, 有用信息为极性信号通过差分传输。实验结果表明, 相比非归零单极性强度调制(如 PPM、OOK 等), 该方法具有更高的分集增益, 并且能有效地抑制背景噪声, 在紫外光远距离通信上具有优异的性能和重大工程应用价值。

参考文献:

- [1] XU Zhengyuan, SADLER B M. Ultraviolet Communications: Potential and State-of-the-Art [J]. IEEE Journals & Magazines, 2008, 46(5): 67-73.
- [2] ZHANG Hailiang, YIN Hongwei, JIA Honghui, et al. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21216-21226.
- [3] DING Haipeng, CHEN Gang, MAJUMDAR A K, et al. Modeling of Non-Line-of-Sight Ultraviolet Scattering Channels for Communication [J]. IEEE Journals & Magazines, 2009, 27(9): 1535-1544.
- [4] 程刚, 王红星, 孙晓明, 等. 无线光通信双脉冲间隔调制方法[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1750-1754.
- [5] 庞志勇, 朴大志, 邹传云. 光通信中几种调制方式的性能比较[J]. 桂林电子工业学院学报, 2002, 22(5): 1-4.
- [6] 吴继礼, 赵尚弘, 胥杰, 等. 相干光脉冲位置调制信道容量及传信率最大化研究[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 643-647.
- [7] GHASSEMLOOY Z, HAYES A R, SEED N L, et al. Digital pulse interval modulation for optical communications[J]. IEEE communications Magazine, 1998, 36(12): 95-99.
- [8] 秦岭, 柯熙政. 无背景噪声下的光 MPPM 信道容量分析 [J]. 光电工程, 2007, 34(7): 107-110.
- [9] 秦岭, 柯熙政. 一种二脉冲的 MPPM 编码映射方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 27(3): 269-272.
- [10] GOLDSTEIN D H. Polarized Light (Third Edition) [M]. New York: CRC Press, 2011: 61-97.
- [11] ZHAO X J, PAN X F, FAN X L, et al. Patterned dual-layer achromatic micro-quarter-wave-retarder array for active polarization imaging[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 8024-8034.
- [12] QIAN H, ZHAO S, CAI S Z, et al. Digitally Controlled Micro-LED Array for Linear Visible Light Communication Systems [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 501-508.
- [13] MODEPALLI K, PARASA L. Dual-Purpose Offline LED Driver for Illumination and Visible Light Communication [J]. IEEE transactions on industry applications, 2015, 51(1): 406-419.
- [14] ZHAO X, BERMAK A, BOUSSAID F, et al. Chigrinov High-resolution photo-aligned liquid-crystal micro-polarizer array for polarization imaging in visible spectrum [J]. Opt. Lett., 2009, 34(23): 3619-3621.