

车辆间大气激光移动通信调制方式研究*

林志琦^{1,2}, 宋国明², 刘涛², 逢林²

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春工业大学 电气与电子工程学院, 长春 130012)

摘 要:对大气激光移动通信的调制方式进行了研究,介绍了 OOK、PPM、DPPM、DPIM 及 DH-PIM 调制方式并分析了其各项性能指标,提出一种 H-PPM 调制方式并与其它调制方式进行了比较.该方式在继承标准 PPM 优良误码特性的同时,在接收端解调时不需要符号同步,简化了接收机的设计,降低了系统实现的难度.理论分析和仿真结果表明,此 H-PPM 调制方式可以满足移动车辆间短距离、高可靠性、小数据容量激光通信的需要.

关键词:大气激光通信;调制方式;移动通信;误码率;可靠性

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)02-334-5

0 引言

现代战争中,战车之间存在视距内的敌我识别问题.由于大气激光通信除了具有无线电通信的优点外,还具有方向性强、保密性好、反侦听、电子对抗能力强等优点,国内外开展了将大气激光通信用于车辆间移动通信的研究,如在车辆间的敌我识别等的应用^[1].

车辆间大气激光移动通信的特点是通信距离相对较短,数据容量小,而对通信的要求是可靠性必须高.因此,在车辆间大气激光通信系统中,选取调制方式的原则是:在保证一定误码率的前提下,尽可能的降低功率损耗,并能够考虑到激光器发射特性以及在实际系统中实现的可能性.本文在分析当前常用激光通信调制方式的各项性能后,提出一种改进的 PPM 调制方式——H-PPM 调制,该方式在继承标准 PPM 的优良误码特性的同时,在接收端解调时不需要符号同步,从而大大简化了接收机的设计,使系统更容易实现.理论计算和仿真结果表明,H-PPM 调制更适用于车辆间大气激光移动通信.

1 大气激光通信的调制方式

当前大气激光通信普遍采用强度调制/直接检测(Intensity Modulation, IM/Direct Detection, DD)系统,调制方式有:开关键控(On-Off Keying, OOK),脉冲位置调制(PPM),差分脉冲位置调制(Differential Pulse Position Modulation, DPPM),数字脉冲间隔调制(Digital Pulse Interval Modulation, DPIM)以及双头

脉冲间隔调制(Double Heads-Pulse Interval Modulation, DH-PIM)等^[2-4].

1.1 OOK-NRZ 调制

大气激光通信系统中的 OOK 调制方式中,每个信息位时间 T_b (单位 s) 内光脉冲处于开状态,“1”表示有光脉冲,“0”则表示无光脉冲^[2].

1.2 PPM 调制

在 PPM 调制方式中,信息是由光脉冲所在的位置表示的.用 M 位二进制表示一帧某特定位置的光脉冲, M 为正整数.每个 PPM 帧包含 2^M 个时隙,光脉冲位于 2^M 个时隙位置之一^[3].

1.3 DPPM 调制

DPPM 调制是一种改进的 PPM 调制方式.只要把 PPM 调制方式信号中“1”时隙后面的“0”时隙去掉就可以得到相应得 DPPM 调制信号,它由一串低电平和一位高电平构成^[3].

1.4 DPIM 调制

DPIM 调制方式是一种脉冲间隔调制,用两个连续的光脉冲间的相对距离(时隙数)传递信息.它的帧长度不固定,每帧都是以“1”开始,后面跟上相应个数的“0”^[4].

1.5 DH-PIM 调制

DH-PIM 调制与 DPIM 相似,只是它采用两种起始脉冲,相对比较复杂.每个符号都是以长度为 $T_b = (\alpha + 1)T_s$ 的头序列开始,再加上长度为 dn 的空时隙序列.一般取 $\alpha = 2$,当对应的 OOK 符号的第一个时隙为“0”时隙时,头序列取 $h_1 = [1\ 0\ 0]$,当对应的 OOK 符号的第一个时隙为“1”时隙时,头序列 $h_1 = [1\ 1\ 0]$.后续空序列的长度 dn 取值范围为

$$dn = \begin{cases} k, & k < 2^{M-1} \\ 2^M - 1 - k, & k \geq 2^{M-1} \end{cases} \quad (1)$$

* 总装备部预研基金(ZLB05172)资助

Tel: 13364303562 Email: zhiqilin@yahoo.com

收稿日期: 2008-06-30

即当头序列取 h_1 时, d_n 等于对应的 OOK 符号的十进制数值, 当头序列取 h_2 时, d_n 等于对应的 OOK 符号的十进制数值的补^[4].

2 改进的 PPM 调制——H-PPM

改进的 PPM 调制是在标准 PPM 调制方式的基础上, 在每个字符的前两个时隙加脉冲“1”的同步头. 因为是在标准的 PPM 调制前加了同步头, 所以在此称之为: H-PPM 调制. 加上同步头后, H-PPM 的时隙数变为 $2^M + 2$ 个. 当整个符号内除同步头外所有时隙均没有脉冲“1”时, 表示对应的 OOK 符号的十进制数值 0; 其余的十进制数 $i (i \in (1, 2^M - 1))$ 为 PPM 调制方式中对应十进制数 i 加 1, 即 $i + 1$. 由于 H-PPM 调制符号长度是固定的, 因此在接收端解调时的不需符号同步, 比标准 PPM 容易实现. H-PPM 调制是将 PPM 和 DH-PIM 两种调制方式结合在一起, 综合两种调制方式的优点, 从而能够同时解决误码率和字符同步的实现问题.

$M=4$ bit 时, 列出 OOK 符号与 H-PPM 举例如表 1.

表 1 OOK 符号与对应 H-PPM 举例

OOK 符号	对应 H-PPM 符号
0000	11 0000 0000 0000 0000
0001	11 1000 0000 0000 0000
0010	11 0100 0000 0000 0000
.....	11 0
1111	11 0000 0000 0000 0010

$M=4$ bit 时, OOK, PPM, H-PPM, DPPM, DPIM 和 DH-PIM 等调制方式的符号波形如图 1, M 为每个符号所包含的比特数^[4].

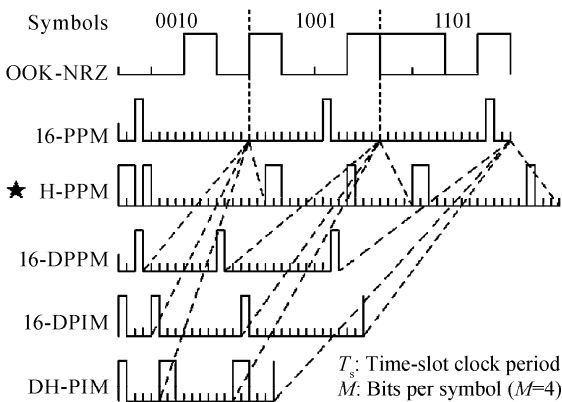


图 1 信号脉冲波形调制
Fig. 1 Signal waveform of different modulations

3 常用激光调制方式性能比较

3.1 功率利用率

假设发送“1”脉冲需功率 P_t 且输入“0”、“1”比特的概率相等, 则 OOK-NRZ 的平均发射功率为 $P_{OOK} =$

$P_t/2$; 由于一个 PPM 符号所包含的 2^M 个时隙中, 只有一个时隙发送脉冲, 因此, PPM 的平均发射功率为 $P_{PPM} = (P_t/2^M)$ ^[3]. 同理可得, DPPM 的平均发射功率为 $P_{DPPM} = [2/(2^M + 1)]P_t$; DPIM 的平均发射功率为 $P_{DPIM} = [2/(2^M + 3)]P_t$; DH-PIM 的平均发射功率为 $P_{DH-PIM} = [3/(2^{M-1} + 5)]P_t$; H-PPM 符号所含平均时隙个数为 $2^M + 2$, 而它平均每个符号有 $2(15/16)$ 个“1”脉冲, 因此 H-PPM 的平均发射功率为 $P_{H-PPM} = [47/16(2^M + 2)]P_t$ ^[5].

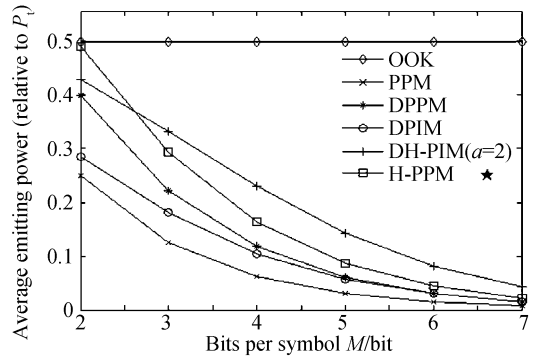


图 2 各调制方式平均发射功率比较
Fig. 2 Average emitting power of different type of modulation

图 2 给出了在峰值功率 P_t 相同条件下的平均发射功率. 从图 2 中可以看出, 对于固定的调制系数 M , 排除 OOK-NRZ 调制在外, PPM 调制的平均发射功率最低, DH-PIM 的平均发射功率最高. H-PPM 的平均发射功率仅次于 DH-PIM, 但是随着调制阶数 M 的增加, 其平均发射功率减小的趋势非常明显. 在实际应用中, 可以适当增加调制阶数 M , 从而能够减小平均发射功率, 提高功率利用率.

3.2 带宽需求

假设 OOK 信号的码元速率为 $R_{OOK} = R_b$, 在相同信息速率的情况下 (即在相同的时间内传送相同的信息)^[6], 有

$$B_{PPM} = 2^M R_b / M \tag{2}$$

$$B_{DPPM} = (2^M + 1) R_b / (2M) \tag{3}$$

$$B_{DPIM} = (2^M + 3) R_b / (2M) \tag{4}$$

$$B_{DH-PIM} = (2^{M-1} + 5) R_b / (2M) \tag{5}$$

$$B_{H-PPM} = (2^M + 2) R_b / M \tag{6}$$

各种调制方式相对 OOK 的归一化带宽与 M 的关系如图 3. 由图 3 可知, H-PPM 的带宽效率最低, PPM 次之, 再次是 DPPM 和 DPIM, DH-PIM 的带宽效率最高. H-PPM 的带宽效率随着 M 的增加向 PPM 无限接近. 由于移动大气激光通信系统中数据传输量比较小, 所以 H-PPM 调制也是可以应用的.

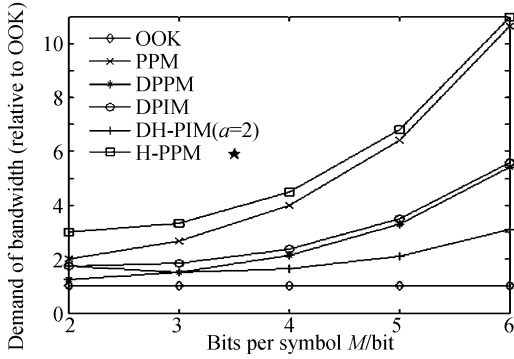


图3 各调制方式带宽需求比较

Fig. 3 Demand of bandwidth of different modulation schemes vs M

3.3 误码率

差错性能是大气激光通信的重要性能指标,用误时隙率和包误码率来衡量^[7].文献[8]给出了采用强度调制、直接检测(IM/DD)的无线光通信系统的等价基带信道模型.为了讨论方便,假定只有加性高斯白噪声存在,没有多径散射,且噪声 $n(t)$ 为正态分布,均值为0,方差为 $\sigma_n^2 = N_0 \cdot B$.其中, $N_0/2$ 为高斯白噪声的双边功率谱密度, B 为噪声等效带宽.同时认为接收机的带宽很宽,则抽样判决器输入端得到的 $x(t)$ 在发送脉冲“1”时为 $\sqrt{S_t} + n(t)$,不发送脉冲时为 $n(t)$,其中 S_t 为判决器输入端的信号峰值功率^[9].若令判决门限为 b ,则将“1”错误判断为“0”的概率 P_{01} 和将“0”错误判断为“1”的概率 P_{10} 分别为

$$P_{01} = (1/2) \{1 + \text{erf} [(b - \sqrt{S_t}) / \sqrt{2\sigma_n^2}]\} \quad (7)$$

$$\text{和 } P_{10} = (1/2) [1 - \text{erf} (b / \sqrt{2\sigma_n^2})] \quad (8)$$

式中 $\text{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x \exp(-u^2) du = 1 - \text{erfc}(x)$.则总的误时隙率 P_{se} 为

$$P_{se} = P_1 \cdot P_{01} + P_0 \cdot P_{10} \quad (9)$$

P_1 和 P_0 分别为发送“1”和“0”的概率且 $P_1 + P_0 = 1$.在分析中,假定信息源中“0”和“1”出现的概率相等,即在OOK中, $P_1 = P_0 = 1/2$.显然其最佳判决门限为 $b = \sqrt{S_t}/2$,则

$$P_{se,OOK} = (1/2)P_{01} + (1/2)P_{10} = (1/2)\text{erf}(\sqrt{S_t}/\sqrt{2\sigma_n^2}/2) \quad (10)$$

同理可得 PPM、DPPM、DPIM、DH-PIM 和 H-PPM 的误时隙率为

$$P_{se,PPM} = \frac{1}{2^{M+1}} \left\{ [1 + \text{erf} \left(\frac{b - \sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] + (2^M - 1) [1 - \text{erf} \left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] \right\} \quad (11)$$

$$P_{se,DPPM} = \frac{1}{2^{M+1}} \left\{ [1 + \text{erf} \left(\frac{b - \sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] + \frac{(2^M - 1)}{2} [1 - \text{erf} \left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] \right\} \quad (12)$$

$$P_{se,DPIM} = \frac{1}{2^M + 3} \left\{ [1 + \text{erf} \left(\frac{b - \sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] + \frac{(2^M + 1)}{2} [1 - \text{erf} \left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] \right\} \quad (13)$$

$$P_{se,DH-PIM} = \frac{1}{2(2^{M-1} + 5)} \left\{ 3[1 + \text{erf} \left(\frac{b - \sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] + (2^{M-1} + 2) [1 - \text{erf} \left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] \right\} \quad (14)$$

$$P_{se,H-PPM} = \frac{1}{32 \cdot (2^M + 2)} \left\{ 47[1 + \text{erf} \left(\frac{b - \sqrt{S_t}}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] + (2^{M+4} - 15) [1 - \text{erf} \left(\frac{b}{\sqrt{2\sigma_n^2}} \right)] \right\} \quad (15)$$

将上式的两边对 b 求导得到的导函数等于0,则得最佳门限为

$$b = [2\sigma_n^2 \ln(l) + S_t] / 2 \sqrt{S_t} \quad (16)$$

式中,对于 PPM, $l = 2^M - 1$;对于 DPPM, $l = (2^M - 1)/2$;对于 DPIM, $l = (2^M + 1)/2$;对于 DH-PIM, $l = (2^{M-1} + 2)/3$;对于 H-PPM, $l = (2^{M+4} - 15)/47$.

由于一个符号出错会对后续符号的传输产生影响,因此通常需要分析包误码率

$$P_{pe} = 1 - (1 - P_{se})^{N \cdot L_{ave}/M}$$

式中 N 为一个数据包的比特数, N/M 为每包的符号数, L_{ave} 为每符号的平均时隙数. $N \cdot L_{ave}/M$ 为一个数据包包含的时隙个数.

调制阶数 M 为4时,在最佳门限下,各调制方式对于平均接收光功率的包误码率曲线如图4.由图4可见,H-PPM调制方式的误码性能最好,OOK的误码性能最差.误码性能从好到差依次为:H-PPM、PPM、DPIM、DPPM、DH-PIM、OOK.而且随着接收光功率的增加,H-PPM的包误码率明显下降.一般来讲,要保证移动大气激光通信的可靠性,包误码率不能大于 10^{-6} ,此时对应H-PPM的平均接收光功率为 -55.2 dBm.

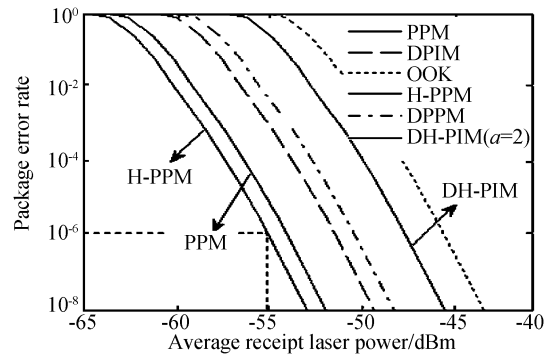


图4 包误码率与平均接收光功率曲线

Fig. 4 PER performances of different modulation schemes vs average receipt power

4 车辆间激光大气移动通信的选择

根据移动车辆间大气激光通信的特点及其对调制方式的要求,并以此作为选择调制方式的依据.表 2 是车辆间激光大气移动通信与固定点激光大气通信特点的比较.

表 2 固定点间与移动大气激光通信需求对比

性能指标	固定点间通信	移动车辆间通信
误码率	低	高,敌我识别错误会造成误伤
频带宽度	宽	通信内容为一些特殊信息,如敌我识别的口令等,对频带要求较低
能量利用率	高	受车载条件的限制越高越好

从表 2 可以看出,车辆间激光大气移动通信对误码率提出较高的要求,且要求能量利用率尽量高,而对频带宽度要求不高.因此,综合上面所有的调制方式,H-PPM 比较符合其要求.首先,H-PPM 的包误码率最低,而且由于它的符号长度是固定的,可以消除误码积累.另外,与 DPPM 和 PPM 相比,H-PPM 的符号具有特定起始序列,因此在接收端不需要符号级同步,降低了系统的复杂度.

5 结论

H-PPM 调制方式既继承了 PPM 调制方式的符号长度确定,从而能够保证不会出现误码积累,又继承了 DH-PIM 的优点,以两个连续脉冲“1”作为符号的开头,从而不需时钟同步,降低了系统实现的难度.理论计算和仿真研究表明,在上述调制方式中,H-PPM 调制的误码特性最好.而从系统实现的角度,H-PPM 的符号结构决定了在接收端解调时不需要符号同步,这就大大简化了接收机的设计,因而 H-PPM 调制方式更易于实现.

参考文献

[1] YIN Fu-chang,ZHANG Jin-feng. Laser identification of friend or foe[J]. *Acta Photonica Sinica*,1995,**24**(3):226-229.

尹福昌,张锦凤. 激光敌我识别[J]. 光子学报,1995,**24**(3):226-229.

[2] ZHANG Jiong-long. Modulation analysis for outdoors applications of optical wireless communications [J]. *IEEE Transactions on Communication*,2000,**32**(7):1483-1487.

[3] WANG Jing-yuan,ZHANG Zheng-xian. PPM in optical wireless communication[J]. *Telecommunication Technologies*,2000,(5):81-84.

汪井源,张正线. 无线光通信中的 PPM 调制[J]. 电讯技术,2000,(5):81-84.

[4] MA Hui-ping. Research on optical modulation and demodulation techniques in mobile atmospheric laser communication[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2003.

马惠萍. 移动大气激光通信中的光调制解调技术研究[D]. 长沙:国防科技大学研究生院,2003.

[5] CAI Ran,XUE Cai,CAO Jie, et al. Intra-satellite wireless optical network communication technologies and implementation[J]. *Acta Photonica Sinica*,2005,**34**(2):263-266.

蔡然,薛蔡,曹捷,等. 卫星内无线光网络通信技术及其实现[J]. 光子学报,2005,**34**(2):263-266.

[6] ZHAO Li,KE Xi-zheng,LIU Jian. Study on model and key technique of atmosphere laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*,2007,**36**(6):28-30.

[7] WANG Hong-xing,ZHU Yin-bing,ZHANG Tie-ying, et al. performance study of modulation for optical wireless communication[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2006,**43**(6):38-41.

王红星,朱银兵,张铁英,等. 无线光通信调制方式性能分析[J]. 激光与光电子学进展,2006,**43**(6):38-41.

[8] HAYES A R,GHASSEMLOOY Z,SEED N L. Baseline-wander effects on systems employing digital Pulse interval modulation[J]. *IEE Proc. -Optoelectronic*. 2000,**147**(4):295-300.

[9] HU Zong-min,TANG Jun-xiong. digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communications [J]. *Journal on Communications*,2005,**26**(3):75-79.

胡宗敏,汤俊雄. 大气无线光通信系统中数字脉冲间隔调制研究[J]. 通信学报,2005,**26**(3):75-79.

Modulation Schemes of Mobile Atmosphere Laser Communication Between Autos

LIN Zhi-qi^{1,2}, SONG Guo-ming², LIU Tao², PANG Lin²

(1 *Institute of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China*)

(2 *School of Electric and Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

Received date: 2008-06-30

Abstract: Modulation scheme of atmosphere laser communication was discussed. Typical modulation schemes OOK, PPM, DPPM, DPIM and DH-PIM were introduced and its performances were analyzed. A new type of modulation called H-PPM was proposed, which was compared with the modulation scheme mentioned above. This type of modulation inherits the excellent bit error rate performance of standard PPM modulation scheme, it also need not the symbol synchronization when the information was demodulated at receiver. In this way, the design of receiver was simplified; and the difficulty of system was much reduced. Theoretical analysis and simulation results show that H-PPM is the best type of modulation for short instance, high reliability and little content laser communication between autos.

Key words: Atmosphere laser communication; Modulation scheme; Mobile communication; Bit error rate; Reliability



LIN Zhi-qi was born in 1964. He is a Ph. D. degree candidate at Institute of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology. Now he is working as associate professor of Changchun University of Technology, and his research interests focus on atmosphere laser communication, laser identification of friend or foe and embedded system application.