

多调制方式下的强度叠加编码多发多收大气 光通信系统性能分析

赵顾颖 赵尚弘 蒙 文 王 翔 朱子行

(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要 对开关键控(OOK)、脉冲位置调制(PPM)、差分脉冲位置调制(DPPM)和数字脉冲间隔调制(DPIM)下强度叠加编码多发多收(MIMO)光通信系统的性能进行了比较分析。研究表明:随着调制阶数的提高,后三种调制在平均发射功率需求方面较 OOK 调制有很大优势,但是相应的传输容量却有所下降。在差错性能方面,OOK 调制在接收功率较低时误包率相对其它三种调制要小,当接收功率提高到一定程度时,PPM、DPPM 和 DPIM 调制相对 OOK 调制均体现出了 3~10 dB 的误包率优势。

关键词 大气光学;强度叠加;光多发多收;脉冲位置调制;差分脉冲位置调制;数字脉冲间隔调制;传输容量;误包率
中图分类号 TN243 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0206001

Analysis of Free Space Optical Multiple Input Multiple Output Communication Based on Intensity Superposition Coding at Different Modulations

Zhao Guhao Zhao Shanghong Meng Wen Wang Xiang Zhu Zhihang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University,
Shaanxi, Xi'an 710077, China)

Abstract Under the modulations of on-off keying (OOK), pulse-position modulation (PPM), differential pulse-position modulation (DPPM) and digital pulse interval modulation (DPIM), the intensity superposition coding multiple input multiple output (MIMO) optical communication system is compared and analyzed. With the improvement of modulation order, the results demonstrate that the latter three modulations have greater advantage than OOK modulation in the average transmission power, but the corresponding transmission capacity has declined. In the error performance, OOK modulation's packet error rate is smaller than other three modulations in receiving low power. But when the received power is increased to a certain level, PPM, DPPM and DPIM modulations have the advantage of the 3~10 dB packet error rate to OOK modulation.

Key words atmospheric optics; intensity superposition; optical multiple input multiple output system; pulse-position modulation; differential pulse-position modulation; digital pulse interval modulation; transmission capacity; packet error rate

OCIS codes 200.2605; 200.3050; 200.2610

1 引 言

在大气光通信中,大气湍流是影响通信质量的重要因素^[1]。分布式多发多收(DMIMO)技术能够有效地抑制湍流带来的信道衰弱,提高接收信噪比,

降低通信系统的误码率^[2,3]。近年来,研究人员将开关键控(OOK)^[4,5]、脉冲位置调制(PPM)^[6]、数字脉冲间隔调制(DPI)制^[7]技术与多发多收(MIMO)空间光通信相结合,深入研究了其信道特性模型。

收稿日期:2011-06-21;收到修改稿日期:2011-09-19

基金项目:国家 863 计划(2007AA01Z294)资助课题。

作者简介:赵顾颖(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: zghlupin@163.com

导师简介:赵尚弘(1964—),男,博士后,教授,博士生导师,主要从事光通信与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn

作者在文献[8]中提出了一种基于强度叠加的光 MIMO 编码算法,能够在不增加系统平均功率的前提下成倍地提高系统传输容量,对理想信道下 OOK 调制的系统模型进行了研究。本文将对弱湍流模型下的 MIMO 光通信的 OOK,PPM,差分脉冲位置调制(DPPM)和 DPIM 调制算法进行进一步分析。

2 MIMO 系统模型与强度叠加编码方式

光 MIMO 系统模型框图在文献[8]中进行了详细的解释和说明,本文采用 N 发 N 收模式。不考虑光束相干性对接收性能的影响,即认为发射孔径间距 $S_t \geq \sqrt{\lambda z}^{[2]}$ 。其中 λ 为激光波长, z 为通信距离。

光 MIMO 系统发射的光信号强度在接收端会产生线性的叠加,根据这一特性,可以设计一个利用叠加光强大小代表信息位的编码方式。以四发四收系统为例,四束信号光可以在接收端叠加出五种不同的光强。在一个时隙中,四个发射端分别以“0000”“1000”“1100”“1110”“1111”形式发送,分别

表示“0”“1”“2”“3”“4”。两位二进制值有四种排列方式:“00”“01”“10”“11”。将后四个发送形式与两位二进制信息位一一对应起来可以得到 OOK 调制下的强度叠加编码。

PPM 调制中,信息是由光脉冲所在位置表示的。光脉冲位于 2^n 个时隙位置之一用以表示一个 n 位二进制值。DPPM 对 PPM 进行了些许的改进,即去掉 PPM 信号中“1”时隙后面的“0”,可得到相应的 DPPM 信号。容易发现,DPPM 信号的帧长度是不固定的。在 DPIM 中,信息是由两个连续的光脉冲中间的时隙数来传递的。在判断接收到脉冲时隙后,对空时隙进行计数,再减 1 即可得到所需要的信息。与 DPPM 类似,DPIM 信号的帧长度也是不固定的。加入强度叠加编码时,当调制阶数 $M=4$ 时,即信息位个数为 4,利用强度叠加编码表示四位信息位中的前两位,用光脉冲位置或空时隙表示后两位,可以得到以上三种调制方式下的强度叠加编码。表 1 选取了四个四位二进制信息位进行编码调制。

表 1 调制阶数为 4 时强度叠加编码的 OOK,PPM,DPPM 和 DPIM 调制符号表

Table 1 Mapping of 4-bit message into OOK, PPM, DPPM, DPIM symbol of superposition code

Information bit	OOK	PPM	DPPM	DPIM
00 00	1 1	1 0 0 0	1	1 0
	0 0	0 0 0 0	0	0 0
	0 0	0 0 0 0	0	0 0
	0 0	0 0 0 0	0	0 0
01 01	1 1	0 1 0 0	0 1	1 0 0
	1 1	0 1 0 0	0 1	1 0 0
	0 0	0 0 0 0	0 0	0 0 0
	0 0	0 0 0 0	0 0	0 0 0
10 10	1 1	0 0 1 0	0 0 1	1 0 0 0
	1 1	0 0 1 0	0 0 1	1 0 0 0
	1 1	0 0 1 0	0 0 1	1 0 0 0
	0 0	0 0 0 0	0 0 0	0 0 0 0
11 11	1 1	0 0 0 1	0 0 0 1	1 0 0 0 0
	1 1	0 0 0 1	0 0 0 1	1 0 0 0 0
	1 1	0 0 0 1	0 0 0 1	1 0 0 0 0
	1 1	0 0 0 1	0 0 0 1	1 0 0 0 0

3 性能仿真

3.1 功率需求与传输容量分析

假定输入的二进制数据信息位“0”和“1”等概出现。各调制方式下单天线峰值功率相等,即发射“1”

码时功率相同,记作 P_1 ，“0”码无功率。调制时隙宽度为均 τ ,调制阶数为 M 。根据以上假设可以获得 OOK,PPM,DPPM,DPIM 的平均码长,平均发射功率,传输容量表达式,汇总如表 2 所示。

表 2 各调制方式性能比较

Table 2 Performance comparison of different modulations

Modulation	OOK	PPM	DPPM	DPIM
Average code length	$\frac{M}{2}$	2^{M-2}	$\frac{2^{M-2}+1}{2}$	$\frac{2^{M-2}+3}{2}$
Average power	$2.5P_1$	$\frac{5}{2^{M-1}}P_1$	$\frac{5}{2^{M-2}+1}P_1$	$\frac{5}{2^{M-2}+3}P_1$
Transmission capacity / (bit/s)	$\frac{2}{\tau}$	$\frac{M}{2^{M-2}\tau}$	$\frac{2M}{(2^{M-2}+1)\tau}$	$\frac{2M}{(2^{M-2}+3)\tau}$

图 1 和图 2 分别为 PPM, DPPM, DPIM 相对与 OOK 调制方式的归一化平均功率需求和平均传输容量。从图中可以看出,前三种调制方式由于采用脉冲位置或空时隙个数来传输数据,使得数据流中占空比大大降低,从而减少了对发射功率的需求。但是传输容量也应此相应降低了。

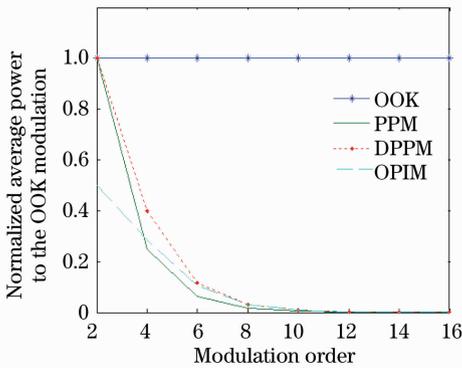


图 1 不同调制方式功率需求比较

Fig. 1 Power demand of different modulations

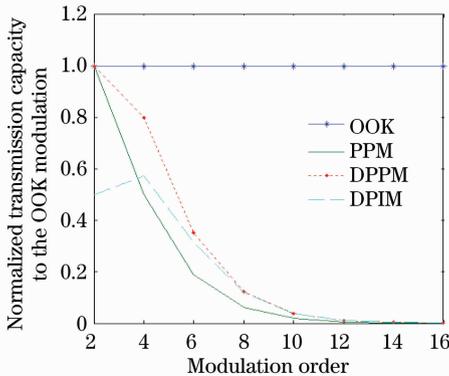


图 2 不同调制方式传输容量比较

Fig. 2 Transmission capacity of different modulations

3.2 差错性能分析

在弱湍流条件下,单束激光经过大气传播在接收端的光强起伏近似满足对数正态分布^[9]:

$$P_1 = \frac{1}{2I \sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + 2\sigma_x^2]^2}{8\sigma_x^2}\right\}, \quad (1)$$

式中 I 表示接收光场的强度, I_0 为光强均值, σ_x^2 表示光信号的对数振幅的方差。在多光束传输且不考虑

相干的条件下,接收端的叠加光强起伏概率密度函数应通过单光束分布的特征函数的积取傅里叶逆变换获得。但对数正态分布无法获得其特征函数的解析解,从而叠加光强分布的概率密度函数表达式也无法获得。因此,本文计算中作如下近似:多个发射光束在发端不远处叠加以后,通过弱湍流传输环境,在接收端光强起伏也满足对数正态分布。

对于 OOK 来说,一个时隙的差错只会造成一个码元的传输错误,但是对于 PPM, DPPM 和 DPIM 来说,一个时隙的错误往往会造成连续的几个码元的传输错误,因此,衡量大气无线光通信系统在不同调制方式下误码性能时往往采用误包率这一标准。

假设单天线到达光强为 I_1 ,接收端采用 P-I-N 光电二极管进行直接检测,接收端噪声包括:背景光强 I_b ,暗电流 i_d ,量子噪声电流 i_q ,热噪声电流 i_{th} 。各噪声电流的等效辐照强度分别为

$$I_d = \frac{h\nu}{e\eta} i_d, \quad (2)$$

$$I_q = \frac{h\nu}{e\eta} \sqrt{2e\left(\frac{e\eta}{h\nu}I_1 + i_d + \frac{e\eta}{h\nu}P_b\right)B}, \quad (3)$$

$$I_{th} = \frac{h\nu}{e\eta} \sqrt{\frac{4kTB}{R_L}}, \quad (4)$$

式中 e 为电子电量, η 为量子效率, ν 为光频率, h 为普朗克常量, k 为波尔兹曼常数, T 为接收机的绝对温度, B 为接收机带宽, R_L 为负载电阻。经过计算,总的噪声强度均值为 $I_z = I_b + I_d + I_q + I_{th}$,服从方差为 σ_z^2 的高斯分布。在本文的仿真条件下噪声强度总小于 -58 dB,相比一般的接收光功率差距较大。因此,在判决门限的选取上,为了方便表述和计算,采用 $Q_1 = I/2$, $Q_2 = 3I/2$, $Q_3 = 5I/2$, $Q_4 = 7I/2$,作为判决门限。相应判决器依次编号为 1,2,3,4。译码时综合判决输出以判定为“1”的最高编号判决器为准,例如,若 4 号判决器输出为“0”,3 号判决器输出为“1”,不论 1,2 号判决器输出何值,都认为发射方发送信号为“1110”。同理,若 4 号判决器输出为

“1”，不论 1,2,3 号判决器输出何值，都认为发射方发送信号为“1111”。当所有判决器输出均为“0”时，认为发射方发送信号为“0000”。

应此，在噪声的影响下“0000”，“1000”，“1100”，“1110”，“1111”时隙差错概率分别为

$$P_0(0/1) = 1 - \int_{-\infty}^{Q_1} f_0(I) dI \int_{-\infty}^{Q_2} f_0(I) dI \int_{-\infty}^{Q_3} f_0(I) dI \int_{-\infty}^{Q_4} f_0(I) dI, (5)$$

$$P_1(1/0) = 1 - \int_{Q_1}^{+\infty} f_1(I) dI \int_{-\infty}^{Q_2} f_1(I) dI \int_{-\infty}^{Q_3} f_1(I) dI \int_{-\infty}^{Q_4} f_1(I) dI, (6)$$

$$P_2(1/0) = 1 - \int_{Q_2}^{+\infty} f_2(I) dI \int_{-\infty}^{Q_3} f_2(I) dI \int_{-\infty}^{Q_4} f_2(I) dI, (7)$$

$$P_3(1/0) = 1 - \int_{Q_3}^{+\infty} f_3(I) dI \int_{-\infty}^{Q_4} f_3(I) dI, (8)$$

$$P_4(1/0) = \int_{-\infty}^{Q_4} f_4(I) dI, (9)$$

式中 $f_n(I)$ 为 n 个天线同时发射时接收端等效光强分布。

对于各种不同调制方式，空时隙出现概率不同，因此需要分别讨论。根据表 1，在 OOK 模式下，无空时隙；PPM 模式下，空时隙出现概率为 $\frac{2^{2(M-1)} - 1}{2^{2(M-1)}}$ ；DPPM 模式下，空时隙出现概率为

$\frac{2^{2(M-1)} - 1}{2^{2(M-1)} + 1}$ ；DPIM 模式下，空时隙出现概率为

$\frac{2^{2(M-1)} + 1}{2^{2(M-1)} + 3}$ 。各调制模式下其它码元时隙出现概率

相等。所以 OOK, PPM, DPPM, DPIM 的平均误时隙率可表示为

$$P_{SER} = f_0 \times P_0(0/1) + (1 - f_0) \times \frac{1}{4} [P_1(1/0) + P_2(1/0) + P_3(1/0) + P_4(1/0)] (10)$$

式中 f_0 为该调制模式下空时隙出现概率，系统的误包率可表示为

$$P_{per} = 1 - (P_{SER})^{NY}, (11)$$

式中 P_{SER} 为各调制方式下的平均误时隙率， N 表示一个符号所包含平均时隙个数， Y 表示一个数据包包含符号个数，表 3 给出了仿真中采用的参数值。图 3 给出了不同调制阶数下的误时隙率曲线。

表 3 仿真参数列表

Table 3 Particular parameters used in simulation

Parameters	Values
Wavelength λ	1550
Quantum efficiency $\eta / \%$	80
Dark current (i_d) / nA	20
Absolute temperature of receiver T/K	300
Receiver bandwidth B / MHz	800
Resistance R_L / Ω	50
Background intensity I_b / dBm	-60
Log amplitude variance (σ_x^2)	0.2
Number of symbols in one data packet (Y)	500
Noise standard deviation (σ_z^2)	$0.5 I_z$

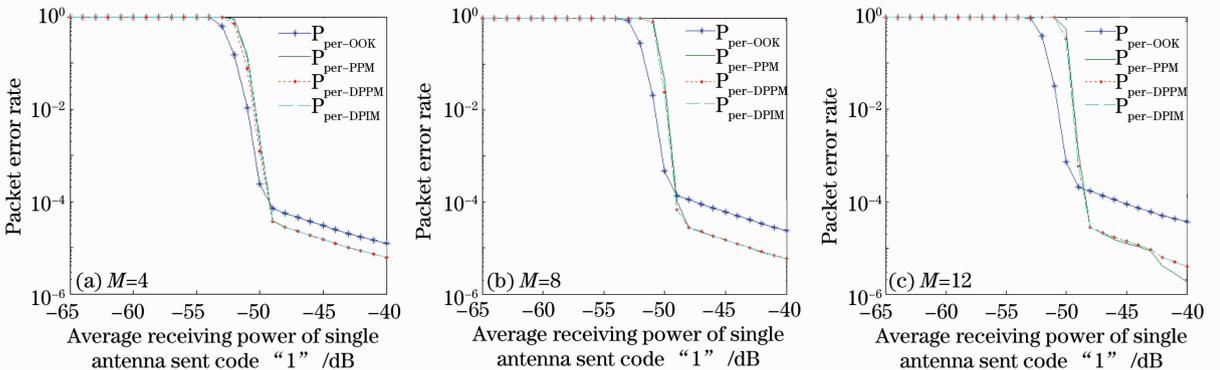


图 3 不同调制阶数下 OOK, PPM, DPPM, DPIM 的误包率曲线

Fig. 3 Packet error ratio (PER) curves for OOK, PPM, DPPM and DPIM for different modulation orders

仿真图 3(a), (b), (c) 显示的是调制阶数分别为 4, 8, 12 时不同调制方式下的误包率。容易发现，在相同调制阶数下，OOK 调制方式在较低接收功率时 (-57 ~ -52 dB) 有明显误包率优势。这是由于采用非归零码的 OOK 调制在低接收功率处的信噪

比相对含有大量空时隙的其它调制方式要高得多。随着接收功率的升高，接收机的判决门限也相应提升，空时隙的误时隙率反而大大降低。此时，PPM, DPPM 和 DPIM 的误包率得到迅速降低，并超越 OOK 调制方式。

随着调制阶数的增加,每个数据包中的时隙数成比例增加,这使得各调制方式的误包率整体升高。但是由于 PPM, DPPM 和 DPIM 调制的占空比随调制阶数的升高而降低,平均误时隙率也随之下降,其误包率相对 OOK 调制来看得到了一定的下降。而 OOK 调制不受调制阶数影响较小,故变化不明显。从图 3(a)中可以看出 PPM, DPPM 和 DPIM 三种调制方式的误包率曲线非常接近。且 DPPM 稍优于其它两种调制方式,这是因为在一个数据包中 DPPM 调制方式的占空比最小。综合各曲线图不难看出,各调制方式下的误包率很难低于 10^{-6} ,这是因为一个数据包中的时隙个数非常大,任意一个时隙发生差错都将造成该数据包的错误,从而导致 PPM, DPPM 和 DPIM 调制的误包率很难降低。

4 结 论

基于强度叠加编码的大气光 MIMO 通信算法能够在不增加系统带宽和平均发射功率的前提下有效的提高系统的容量。将 PPM, DPPM 和 DPIM 调制与强度叠加编码相结合,利用其占空比高的特点进一步的降低平均发射功率。在发射功率足够高时,这三种调制方式在不同调制阶数下的误包率均比 OOK 调制低 2~10 倍。

本文在文献[8]工作的基础上对多调制方式下的强度叠加编码光 MIMO 通信性能进行了分析,获得的结果对今后的工程实践有一定的指导意义。由于采用直接检测加硬判决的方式接收,光强的起伏对多判决门限接收系统的影响极大,只在弱湍流条件下对系统的误包率做了一个定性的分析。若能在 PPM, DPPM 和 DPIM 中均采用非归零码,即让一个天线持续发射信号以此来代替空时隙,那么接收端就能够以该信号作为参考,采用软判决的方式进

行解码。如何设计软判决算法,采用非归零码对系统带来什么样的影响是下一步工作需要探讨的方向。

参 考 文 献

- Xin Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Effect of the atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850~1852
邢建斌, 许国良, 张旭莘 等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1850~1852
- Ma Dongtang, Wei Jibo, Zhuang Zhaowen. Performance evaluation and channel modeling of multiple-beam propagation for atmospheric laser communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1020~1024
马东堂, 魏急波, 庄利文. 大气激光通信中多光束传输性能分析和信道建模[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1020~1024
- I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari. Scintillation reduction using multiple transmitters [C]. *SPIE*, 1997, **2990**: 102~113
- Neda Cvijetic, Stephen G. Wilson, M. Brandt-Pearce. Free-space optical MIMO transmission with APD receivers [C]. Conference on Information Sciences and Systems, 2005; 16~18
- S. M. Navidpour, U. Murat, K. Mohsen. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 2007, **6**(8): 2813~2820
- G. Stephen, B. Maite, Cao Qianling. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, **53**(8): 1402~1412
- Li Ming, Ai Yong, Cao Yang. MIMO free-space optical communication systems with digital pulse interval modulation[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2009, **38**(9): 2325~2329
黎明, 艾勇, 曹阳. 基于 DPIM 调制的 MIMO 空间光通信系统[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2325~2329
- Zhao Guhao, Zhao Shanghong, Li Yongjun *et al.*. The free space optical MIMO communication based on intensity superposition code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0706002
赵顾颢, 赵尚弘, 李勇军 等. 基于强度叠加编码的空间光 MIMO 通信[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0706002
- Zhang Yixin, Chi Zeyang. *Optical Wave Propagation and Imaging in Atmosphere*[M] Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 110~112
张逸新, 迟泽英. *光波在大气中的传输与成像*[M] 北京: 国防工业出版社, 1997. 110~112