

无线光通信强度调制方式性能比较

王宝鹏^{1,2}, 余锦^{1,2*}, 孙礼朋³, 王云哲^{1,2}

(1.中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.北京华科博创科技有限公司, 北京 100096)

摘要: 调制技术是影响无线光通信系统性能的关键因素。在统一尺度下比较多种典型强度调制方式的综合性能, 推导了 19 种典型强度调制方式的平均符号长度、带宽需求、带宽利用率、平均发射功率和传输容量 5 项性能表达式, 并进行了数值仿真; 绘制了各调制方式的综合性能结构图, 给出了不同调制方式的适用场景。

关键词: 强度调制; 无线激光通信; 脉冲位置调制; 脉冲间隔调制; 脉冲宽度调制

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)11-0024-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.11.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance comparison of intensity modulation in free space optical communication

WANG Baopeng^{1,2}, YU Jin^{1,2*}, SUN Lipeng³, WANG Yunzhe^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing HKBCTECH limited company, Beijing 100096, China)

Abstract: Modulation technology is the key factor affecting the performance of space optical communication system. Comparing the comprehensive performance of several typical intensity modulation schemes in a unified scale, five performance expressions of average symbol length, bandwidth requirement, bandwidth utilization, average transmit power and transmission capacity of 19 typical intensity modulation schemes are derived, and the numerical simulation is carried out. The comprehensive performance structure chart of each modulation mode is drawn, and the applicable scenarios of different modulation modes are given.

Key words: intensity modulation; space optical communication; pulse position modulation; pulse interval modulation; pulse width modulation

0 引言

与传统射频通信相比, 无线光通信具有高带宽、高保密性、低成本和无需频谱牌照等优点^[1]。实际工程中的无线光通信系统通常采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式, 但不同调制方式在不同性能上经常表现出较大差异, 因此根据使用场景选取最优的调制方式是无线光通信系统构建的关键环节。近年来, 围绕

收稿日期: 2020-06-07。

基金项目: 中国科学院联合基金(6141A1070103)资助; 国家重点研发计划(2018YFB0407400)资助; 中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20170035)资助。

作者简介: 王宝鹏(1996—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 2018年6月毕业于北京交通大学电气工程学院, 获学士学位, 现就读于中国科学院空天信息创新研究院(中国科学院大学光电学院), 主要从事无线激光通信方面的研究工作。

* 通信作者: 余锦(E-mail: jinyu@aoc.ac.cn)。



无线光通信系统的强度调制技术被广泛研究, 出现了多种类型的调制方式。丁德强等人^[2]和涂焱阳^[3]分析了脉冲位置调制(PPM)的差错性能。秦岭等人^[4]比较了无背景噪声信道模型中多脉冲位置调制(MPPM)和PPM的信道容量、信息传输率和容量能量效率。柯熙政等人^[5]比较了PPM、数字脉冲间隔调制(DPIM)和双头脉冲间隔调制(DHPIM)的平均符号长度、平均发射功率、带宽需求、功率谱密度和信道容量。赵黎^[6]、孙长梅^[7]和贾超^[8]分别比较了差分脉冲位置调制(DPPM)、双幅度PPM和DHPIM的差错性能。柳美平^[9]比较了多个类脉冲位置调制方式的平均符号长度、带宽需求、带宽利用率、平均发射功率和误时隙率。刘宏展等人^[10]分析了PPM、DPIM、脉冲位置宽度调制(PPWM)、差分脉冲位置宽度调制(DPPWM)的平均发射功率、带宽需求和高斯信道下的差错性能。

上述研究分析了一些调制方式的不同性能, 但由

于所做假设和使用的模型不尽相同、涉及的调制方式种类不足,无法在统一条件下对多种典型的强度调制方式进行多方面性能的综合比较。文献[11]在同一条件下比较了19种典型强度调制方式在不同强度大气湍流中的差错性能,但未涉及其它关键性能。本文在其基础上推导这些调制方式的平均符号长度、带宽需求、带宽利用率、平均发射功率和传输容量表达式,并进行数值仿真,结合文献[11]关于差错性能的比较结果,绘制各调制方式的综合性能结构图,给出不同调制方式的适用场景,实现统一条件下多种典型强度调制方式的综合性能比较。

1 调制方式简介

强度调制方式主要分为脉冲位置类调制、脉冲间隔类调制和脉冲宽度类调制三大类。每种调制方式都具有不同的编码原理,编码原理决定其各项性能优劣,本文所涉及的全部调制方式及其编码原理如表1所示。

由于篇幅所限,表1只给出了各调制方式的编码原理,详细的调制过程和调制符号结构可在文献[11]中查阅。

2 性能比较

2.1 平均符号长度

由文献[11]可知,OOK、PPM、PWM、MPPM、DDPPM、双幅度PPM、SPPM、SDPPM、OPPM、DPPIM、FDPIIM和PPWM的符号长度固定,而DPPM、差分幅度PPM、DPIM、DPPIM和DAPIIM的符号长度可变,因此使用“平均符号长度”这一参数来衡量各调制方式的符号平均长短。假设编码符号 S 中每bit都等概率出现0和1,则 S 对应的十进制数 k 等概率取得数组 $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$ 中的每一个元素、调制后的符号等概率出现每一种可能的结构。在最小时隙等宽的情况下,本文根据文献[11]中各调制方式 s 的符号结构,推导其平均符号长度 L_s 关于调制阶数 m 的表达式,如表2所示。

取 $\alpha=2$, m 依次取2~10,代入表2各式,得各调制方式平均符号长度 L_s 随 m 变化趋势的仿真结果,如图1所示。可以看出,随着 m 增大,各调制方式的 L_s 出现分层,可将各调制方式按性能从优到劣(L_s 越小性能越优)分为五级。第一级:OOK、MPPM、SDPPM;第二级:DAPIIM、差分幅度PPM、DHPIM;第三级:SPPM、DDPPM、DPPWM($r=m-1$)、DPPIM、DPIM、DPPM、双幅

表1 调制方式汇总

调制方式	中文全称	编码原理	调制方式	中文全称	编码原理
OOK ^[12]	开关键控	以脉冲有无直接表示二进制信息	DPIM ^[23]	数字脉冲间隔调制	利用脉冲间隔携带信息
PPM ^[13]	脉冲位置调制	利用脉冲位置携带信息	DHPIM ^[24]	双头脉冲间隔调制	采用2种脉冲宽度
DPPM ^[14]	差分脉冲位置调制	差分形式的PPM	DPPIM ^[25]	双脉冲间隔调制	单个调制符号内含2种功能不同的脉冲
MPPM ^[15-16]	多脉冲位置调制	单个调制符号内含多个幅度相同的脉冲	DAPIIM ^[26]	双幅度脉冲间隔调制	采用2种脉冲幅度
DDPPM ^[17]	双宽度脉冲位置调制	采用2种脉冲宽度的PPM	FDPIIM ^[27]	定长数字脉冲调制	符号长度相同且含有2种宽度不同的脉冲
双幅度PPM ^[18]	双幅度脉冲位置调制	采用2种脉冲幅度的PPM	FDAPIIM ^[28]	定长双幅度脉冲间隔调制	符号长度相同且含有2种幅度不同的脉冲
差分幅度PPM ^[19]	差分幅度脉冲位置调制	符号长度和脉冲幅度都可变的PPM	PWM ^[29]	脉冲宽度调制	利用脉冲宽度携带信息
SPPM ^[20]	缩短脉冲位置调制	采用OOK和PPM 2种方法分步调制	PPWM ^[30]	脉冲位置宽度调制	同时利用脉冲位置和宽度携带信息
SDPPM ^[21]	分离双脉冲位置调制	舍弃了出现连续脉冲的符号结构	DPPWM ^[31]	差分脉冲位置宽度调制	差分形式的PPWM
OPPM ^[22]	重叠脉冲位置调制	脉冲宽度固定为多时隙			

表 2 不同调制方式平均符号长度比较

调制方式 s	平均符号长度 L_s	调制方式 s	平均符号长度 L_s	调制方式 s	平均符号长度 L_s
OOK	m	差分幅度 PPM	$\frac{L+1}{2}$	DPPIM	$2^{m-1}+\alpha$
PPM, PWM, PPWM	2^m	SPPM	$2^{m-1}+1$	DAPIM	$\frac{2^{m-1}+3}{2}$
DPPM	$\frac{2^m+1}{2}$	SDPPM	$\{n C_{n-1}^2 - (n-2) \geq 2^m\}$	FDPIIM	2^m+4
MPPM	$\{n C_n^p \geq 2^m\}$	OPPM	$\{pq q(p-1)+1 \geq 2^m\}$	FDAPIM	2^m+3
DDPPM	$2^{m-1}-1+\alpha$	DPIM	$\frac{2^m+3}{2}$	DPPWM	$\frac{2^{m-r}+2^m}{2}$
双幅度 PPM	2^{m-1}	DH-PPM	$\frac{2^{m-1}+2\alpha+1}{2}$		

度 PPM;第四级:DPPWM($r=1$);第五级:PPM、PWM、PPWM、OPPM、FDPIIM、FDAPIM。

2.2 带宽需求与带宽利用率

带宽需求指比特率相同时所需带宽大小,是衡量调制方式性能的一项重要指标,其它条件相同时,通信速率与带宽正相关,但受硬件等条件限制,带宽不可能无限大。无线光通信中的带宽 B 表示调制频率,当调制方式 s 的最小调制宽度为 T_s 时,其带宽为 $B_s=1/T_s$ 。 R_b 表示二进制编码信息的传输速率,单位为 bit/s。带宽利用率 η 也叫频谱效率或净比特率,表示单位带宽下的比特率,定义式为:

$$\eta = \frac{R_b}{B_s} \quad (1)$$

2.2.1 带宽需求

设 T_b 为传送 1 bit 编码信息所需时间,则比特率为 $R_b=1/T_b$ 。设 s 的平均符号长度为 L_s ,时隙宽度为 T_s ,则比特率相等时,各调制方式传送 m 位编码符号 S 所需的时间为 m/R_b ,以此为依据列方程,有 $m/R_b=L_s T_s$,得 s 的时隙宽度为:

$$T_s = \frac{m T_b}{L_s} \quad (2)$$

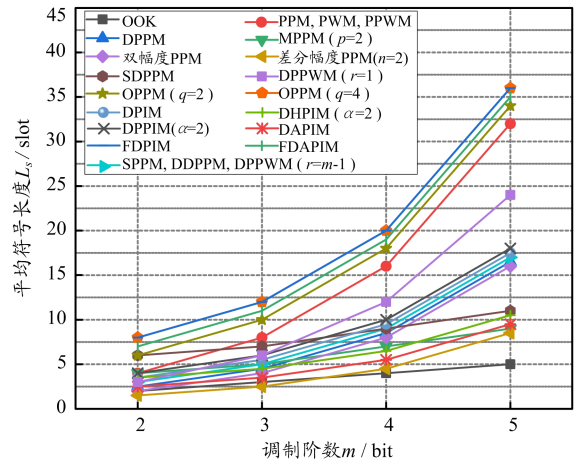
对应的带宽需求为:

$$B_s = \frac{1}{T_s} = \frac{L_s}{m T_b} \quad (3)$$

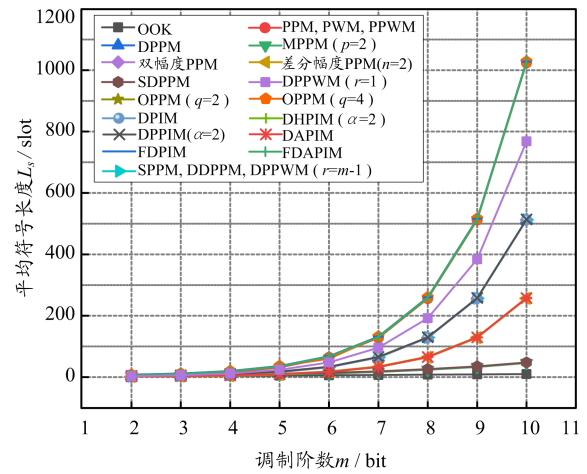
由于 DDPPM、DPPIM 和 DHPIM 3 种调制方式的最小调制宽度为 $(\alpha/2)T_s$,因此其对应的带宽需求为:

$$B_s = \frac{2}{\alpha T_s} \quad (4)$$

将表 2 所列各 L_s 表达式与式(2)、式(3)和式(4)



(a) $2 \leq m \leq 5$



(b) $2 \leq m \leq 10$

图 1 各调制方式平均符号长度比较

联立,化简得出各调制方式的时隙宽度 T_s 和带宽需求 B_s 的表达式,如表 3 所示。

取 $\alpha=2$,将 OOK 的带宽需求 B_{OOK} 作为归一化因子,代入表 2 得各调制方式的 B_s 随 m 变化趋势的仿真结果,如图 2 所示。可以看出,随着 m 的增大,可将各调制方式按性能从优到劣(B_s 越小性能越优)分为五级。第一级:OOK、SDPPM、MPPM;第二级:DHPIM、DAPIM、差分幅度 PPM;第三级:DPPIM、DPIM、SPPM、DDPPM、DPPWM($r=m-1$)、DPPM、双幅度 PPM;第四级:DPPWM($r=1$);第五级:PPM、PWM、PPWM、FDAPIM、FDPIIM、OPPM。

2.2.2 带宽利用率

将表 2 所列各 B_s 的表达式代入式(1)可得各调制方式的带宽利用率 η_s 的表达式,如表 4 所示。

取 $\alpha=2$,得各调制方式的带宽利用率 η_s 随 m 变化趋势的仿真结果,如图 3 所示。可以看出,各调制方式的 η_s 相对于 OOK 呈整体下降的趋势。随着 m 的增

表3 不同调制方式带宽需求比较

调制方式 s	时隙宽度 T_s	带宽需求 B_s	调制方式 s	时隙宽度 T_s	带宽需求 B_s
OOK	T_b	R_b	OPPM	$\frac{m}{pq} T_b$	$\frac{pq}{m} R_b$
PPM, PWM, PPWM	$\frac{m}{2^m} T_b$	$\frac{2^m}{m} R_b$	DPIM	$\frac{2m}{2^m+3} T_b$	$\frac{2^m+3}{2m} R_b$
DPPM	$\frac{2m}{2^{m+1}} T_b$	$\frac{2^{m+1}}{2m} R_b$	DHPIM	$\frac{2m}{2^{m-1}+2\alpha+1} T_b$	$\frac{2^{m-1}+2\alpha+1}{\alpha m} R_b$
MPPM	$\frac{m}{n} T_b$	$\frac{n}{m} R_b$	DPPIM	$\frac{m}{2^{m-1}+\alpha} T_b$	$\frac{2^m+2\alpha}{\alpha m} R_b$
DDPPM	$\frac{m}{2^{m-1}+\alpha-1} T_b$	$\frac{2^m+2\alpha-2}{\alpha m} R_b$	DAPIM	$\frac{2m}{2^{m-1}+3} T_b$	$\frac{2^{m-1}+3}{2m} R_b$
双幅度 PPM	$\frac{m}{2^{m-1}} T_b$	$\frac{2^{m-1}}{m} R_b$	FDPIIM	$\frac{m}{2^{m+4}} T_b$	$\frac{2^{m+4}}{m} R_b$
差分幅度 PPM	$\frac{2m}{L+1} T_b$	$\frac{L+1}{2m} R_b$	FDAPIM	$\frac{m}{2^{m+3}} T_b$	$\frac{2^{m+3}}{m} R_b$
SPPM	$\frac{m}{2^{m-1}+1} T_b$	$\frac{2^{m-1}+1}{m} R_b$	DPPWM	$\frac{2m}{2^{m-r}+2^m} T_b$	$\frac{2^{m-r}+2^m}{2m} R_b$
SDPPM	$\frac{m}{n} T_b$	$\frac{n}{m} R_b$			

大,可将各调制方式按性能优劣(η_s 越大性能越优)分为五级。第一级:OOK;第二级:MPPM、SDPPM;第三级:DHPIM、差分幅度 PPM、DAPIM;第四级:双幅度 PPM、DDPPM、SPPM、DPPWM ($r=m-1$)、DPPM、DPIM、DPPIM;第五级:DPPWM ($r=1$)、PPM、PWM、PPWM、OPPM、FDPIIM、FDAPIM,且后三级随着 m 的增大趋于一致。

2.3 平均发射功率

本文考虑到系统能耗及人眼安全等因素,无线光通信系统的平均发射功率应在保证通信质量的前提下尽可能小。设标准脉冲幅值 A 对应峰值功率为 P_c 、调制符号中脉冲时隙的宽度之和为 l_1 、平均峰值功率为 P'_c ,对于脉冲幅值固定的调制方式而言, $P'_c=P_c$;但双幅度 PPM、差分幅度 PPM、DAPIM 和 FDAPIM 的脉冲幅值不固定,对系统瞬时发射功率要求较高。根据其符号结构,可得平均峰值功率 P'_c 的表达式,如表5所示。

定义平均脉宽参数 $r_s=l_1/L_s$,则平均发射功率可表示为:

$$P_{ave}=r_s P'_c \quad (5)$$

由各调制方式的符号结构易得 r_s ,将 r_s 代入式(5)

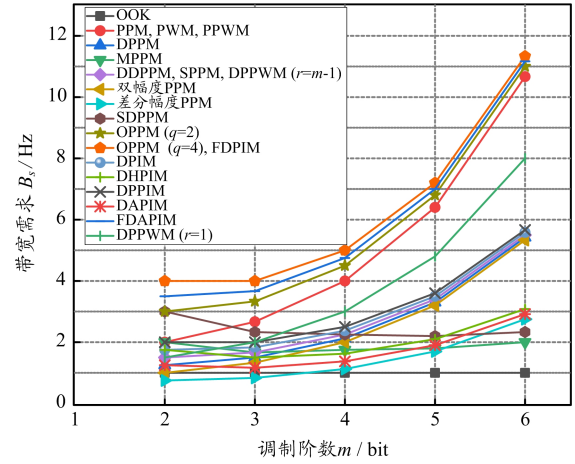
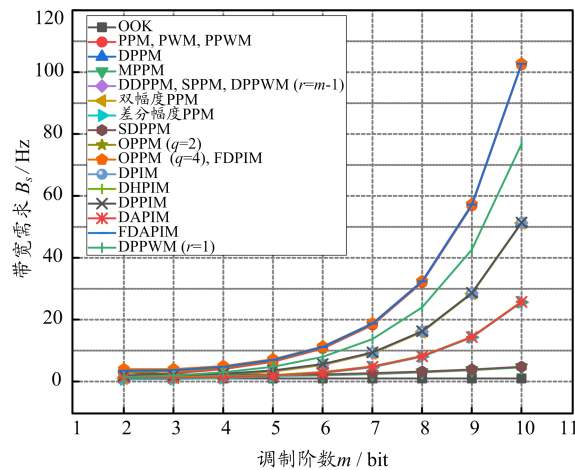
(a) $2 \leq m \leq 6$ (b) $2 \leq m \leq 10$

图2 不同调制方式带宽需求比较

表4 不同调制方式带宽利用率比较

调制方式 s	带宽利用率 η_s	调制方式 s	带宽利用率 η_s	调制方式 s	带宽利用率 η_s
OOK	1	差分幅度 PPM	$\frac{2m}{L+1}$	DPPIM	$\frac{\alpha m}{2^m+2\alpha}$
PPM, PWM, PPWM	$\frac{m}{2^m}$	SPPM	$\frac{m}{2^{m-1}+1}$	DAPIM	$\frac{2m}{2^{m-1}+3}$
DPPM	$\frac{2m}{2^{m+1}}$	SDPPM	$\frac{m}{n}$	FDPIIM	$\frac{m}{2^{m+4}}$
MPPM	$\frac{m}{n}$	OPPM	$\frac{m}{pq}$	FDAPIM	$\frac{m}{2^{m+3}}$
DDPPM	$\frac{\alpha m}{2^m+2\alpha-2}$	DPIM	$\frac{2m}{2^m+3}$	DPPWM	$\frac{2m}{2^{m-r}+2^m}$
双幅度 PPM	$\frac{m}{2^{m-1}}$	DH-PIM	$\frac{\alpha m}{2^{m-1}+2\alpha+1}$		

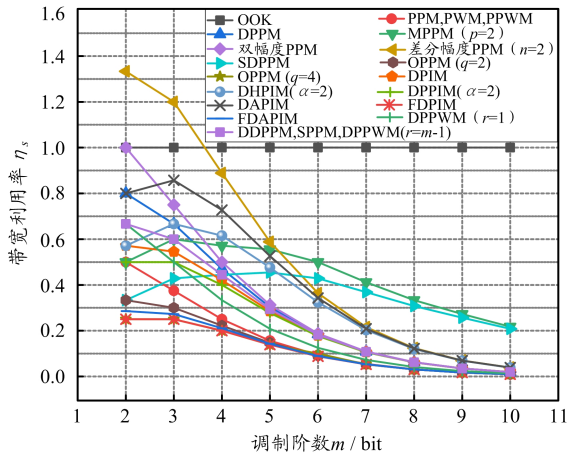


图3 不同调制方式带宽利用率比较

表5 脉冲幅度不固定调制方式的平均峰值功率

调制方式 s	幅值范围	平均峰值功率 P_c'
双幅度 PPM、DAPIM、FDAPIM	$\{A, \beta A\}$	$\frac{1+\beta}{2}P_c$
差分幅度 PPM	$\{A, 2A, \dots, nA\}$	$\frac{1+n}{2}P_c$

可得各调制方式的平均发射功率 P_{ave} 的表达式,如表6所示。

取 $\alpha=\beta=2$,以 P_c 为归一化因子,得各调制方式的平均发射功率 P_{ave} 随 m 变化趋势的仿真结果,如图4所示。可以看出,OOK 的 P_{ave} 始终为 $P_c/2$,其它调制方式的 P_{ave} 呈下降趋势。随着 m 的增大,可将各调制方式按性能从优到劣 (P_{ave} 越小性能越优)分为五级。第一

表6 各调制方式平均发射功率比较

调制方式 s	平均发射功率 P_{ave}	调制方式 s	平均发射功率 P_{ave}	调制方式 s	平均发射功率 P_{ave}
OOK	$\frac{1}{2}P_c$	SPPM	$\frac{3}{2^{m+2}}P_c$	DAPIM	$\frac{2}{2^{m+1}+3}P_c$
PPM	$\frac{1}{2^m}P_c$	SDPPM	$\frac{2}{n}P_c$	FDPIIM	$\frac{3}{2^{m+4}}P_c$
DPPM	$\frac{2}{2^{m+1}}P_c$	OPPM	$\frac{1}{p}P_c$	FDAPIM	$\frac{1+\beta}{2^{m+3}}P_c$
MPPM	$\frac{p}{n}P_c$	DPIM	$\frac{2}{2^{m+3}}P_c$	PWM	$\frac{2^m+1}{2^{m+1}}P_c$
DDPPM	$\frac{3\alpha}{2^{m+1}+4\alpha-4}P_c$	DHPIM	$\frac{3\alpha}{2^{m+1}+4\alpha+2}P_c$	PPWM	$\frac{1+2^{m-r}}{2^{m+1}}P_c$
双幅度 PPM	$\frac{1+\beta}{2^m}P_c$	DPPIM	$\frac{3\alpha+4}{2^{m+1}+4\alpha}P_c$	DPPWM	$\frac{1+2^{m-r}}{2^{m+2}+2^{m-r}}P_c$
差分幅度 PPM	$\frac{1+n}{L+1}P_c$				

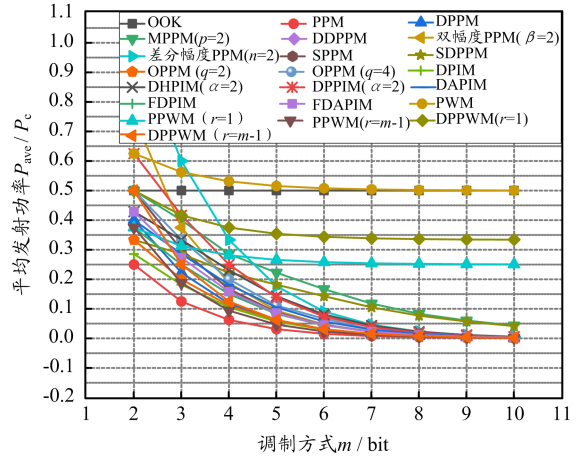


图4 不同调制方式平均发射功率比较

级:PPM、DPPM、DDPPM、双幅度 PPM ($\beta=2$)、差分幅度 PPM、SPPM、OPPM、DPIM、DHPIM、DPPIM、DAPIM、FDPIIM、FDAPIM、DPPWM ($r=m-1$); 第二级:MPPM、SDPPM、PPWM ($r=m-1$); 第三级:PPWM ($r=1$); 第四级:DPPWM ($r=1$);第五级:PWM、OOK。

2.4 传输容量

传输容量 C_s 表示带宽相等时比特率的大小,设各调制方式的最小调制宽度均为 T_b ,以传输一个 m bit 的编码符号为例, C_s 的表达式为:

$$C_s = \frac{m}{L_s T_b} \quad (6)$$

设 $T_b=1/T_b$,将表1所列各 L_s 代入式(6)可得各调制方式 C_s 的表达式,如表7所示。

以 OOK 的传输容量 C_{OOK} 为归一化因子,得到各调制方式的传输容量 C_s 随 m 变化趋势的仿真结果,

表7 各调制方式传输容量比较

调制方式 s	传输容量 C_s	调制方式 s	传输容量 C_s	调制方式 s	传输容量 C_s
OOK	R_b	差分幅度 PPM	$\frac{2m}{L}R_b$	DPPIM	$\frac{m}{2^{m+1}+\alpha}R_b$
PPM、PWM、PPWM	$\frac{m}{2^m}R_b$	SPPM	$\frac{m}{2^{m+1}+1}R_b$	DAPIM	$\frac{2m}{2^{m+1}+3}R_b$
DPPM	$\frac{2m}{1+2^m}R_b$	SDPPM	$\frac{m}{n}R_b$	FDPIIM	$\frac{m}{2^{m+4}}R_b$
MPPM	$\frac{m}{n}R_b$	OPPM	$\frac{m}{pq}R_b$	FDAPIM	$\frac{m}{2^{m+3}}R_b$
DDPPM	$\frac{m}{2^{m+1}+\alpha-1}R_b$	DPIM	$\frac{2m}{2^{m+3}}R_b$	DPPWM	$\frac{m}{2^{m-1}+2^{m-1}}R_b$
双幅度 PPM	$\frac{m}{2^{m-1}}R_b$	DH-PIM	$\frac{2m}{2^{m+1}+2\alpha+1}R_b$		

如图5所示。可以看出,相对于OOK,其它调制方式的 C_s 都呈下降趋势。随着 m 的增大,可将各调制方式按性能优劣(C_s 越大性能越优)分为五级。第一级:OOK;第二级:MPPM与SDPPM;第三级:差分幅度PPM、DAPIM、DHPIM;第四级:DPPM、DDPPM、双幅度PPM、SPPM、DPIM、DPPIM、DPPWM($r=m-1$);第五级:PPM、OPPM、FDPIIM、FDAPIM、PWM、PPWM、DPPWM($r=1$)。同时可以看出,DPPWM的各项性能都随着 r 的增大而提升,PPWM的平均发射功率随着 r 的增大而提升。

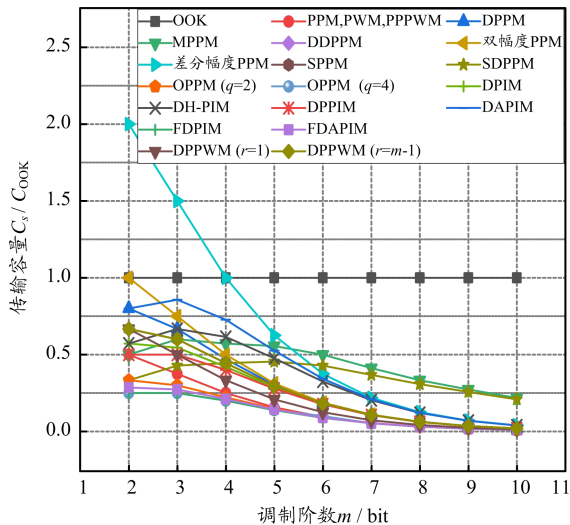


图5 各调制方式传输容量归一化比较

3 仿真结果分析

从图1~图5可知,同一调制方式在不同性能上的表现并不完全一致;不同调制方式在5种性能上都表现出不同程度的分级现象,属于同一级别的调制方式在对应性能上的表现差异较小,并且随着 m 的增加逐渐趋于一致。

为直观比较各调制方式的综合性能,本文结合文献[30]中对平均误时隙率 $\langle P_{se} \rangle$ 的比较结果,制作各调制方式综合性能结构图,如图6所示。

图6中,不同调制方式被归纳为8种性能结构,其中图6(d)的性能结构整体优良且分布均衡,图6(e)次之,图6(f)最差,图6(a)最为畸形。由于差错性能是评价调制方式的最重要指标,因此图6(b)、图6(c)和图6(e)对应的调制方式(PPM、OPPM、FDPIIM、FDAPIM、PPWM($r=m-1$))、DPPM、DDPPM、双幅度PPM、SPPM、DPIM、DPPIM、DPPWM($r=m-1$)、差分幅度PPM、DHPIM、DAPIM)适用于大气湍流、海洋湍流和强噪声背景等干扰严重的信道;OOK适用于真空、无湍流大气和深层无湍流海水等弱干扰信道,或对能耗有严格限制的系统;PWM的性能结构虽然最差,但由于其平均发射功率很高,可用于与照明相结合的光通信系统;PPWM($r=1$)与DPPWM($r=m-1$)性能结构较差,但可通过增加 r 的值来提升其整体性能;若系统未对某项特定性能有严格要求,图6(d)、图6(e)对应的调

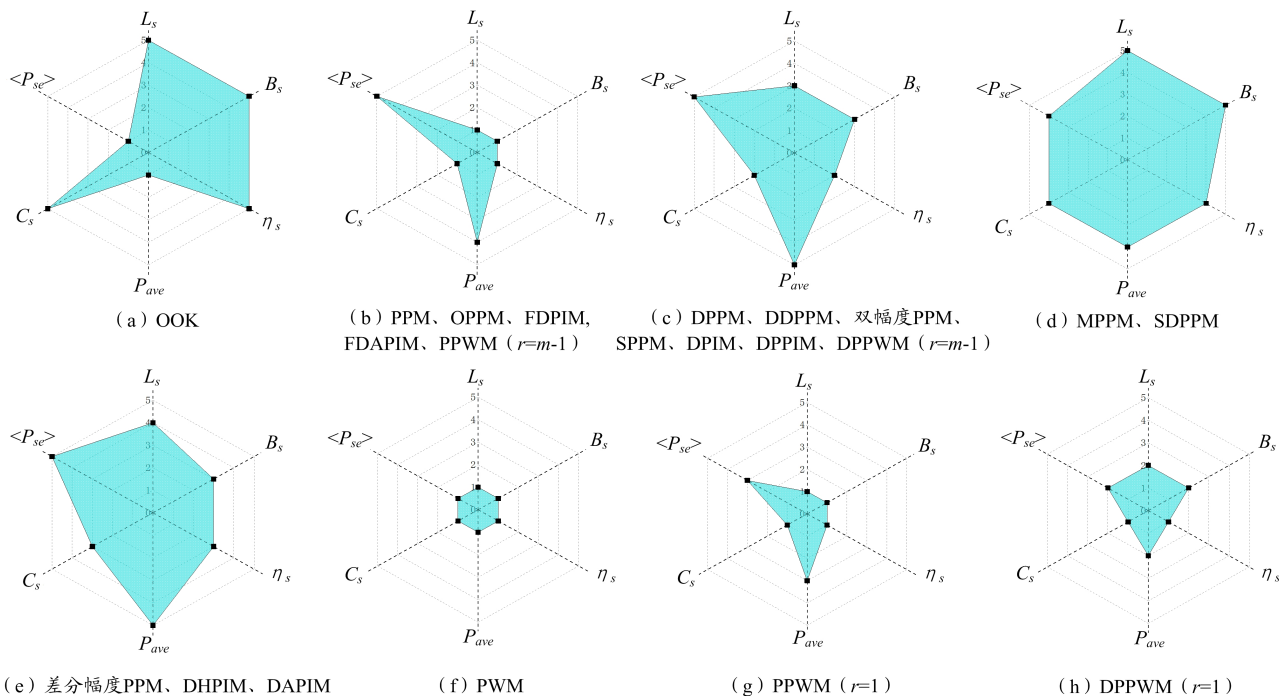


图6 各调制方式性能结构比较

王宝鹏,余锦,孙礼朋,等:无线光通信强度调制方式性能比较

制方式 (MPPM、SDPPM、差分幅度 PPM、DHPIM、DAPIM)是较好的选择。由于同一性能结构下调制方式的各项性能并非完全相同,因此,在同一种性能结构下做选择时,可根据具体性能表现进一步选择最优的调制方式。

4 结束语

针对无线光通信中的多种典型强度调制方式,本文通过理论推导与数值仿真,在统一尺度比较了平均符号长度、带宽需求、带宽利用率、平均发射功率和传输容量 5 个方面的性能,并结合文献[11]中关于差错性能的比较结果,绘制了综合性能结构图,给出了不同性能结构对应调制方式的适用场景,对实际系统的调制方式选择具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 柯希政. 无线激光通信概论[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004: 24-25.
- [2] 丁德强,柯熙政. 大气激光通信 PPM 调制解调系统设计与仿真研究[J]. 光通信技术,2005,29(1):50-52.
- [3] 涂焱阳. 大气激光通信 PPM 调制解调系统研究与设计 [D]. 长春:中国科学院大学,2018.
- [4] 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(7):107-110.
- [5] 柯熙政,陈锦妮. 无线激光通信类脉冲位置调制性能比较[J]. 激光技术,2012,36(1):67-76.
- [6] 赵黎. 大气激光通信 DPPM 调制解调技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2006.
- [7] 孙长梅. 大气激光通信 DAPPM 调制解调系统仿真研究[D]. 西安:西安理工大学,2011.
- [8] 贾超. 大气激光通信 DHPIM 调制解调技术研究[D]. 陕西:西安理工大学,2011.
- [9] 柳美平. 无线光通信中类脉冲位置调制性能分析[D]. 陕西:西安理工大学,2013.
- [10] 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):99-106.
- [11] 王宝鹏,余锦,王云哲,等. 大气激光通信强度调制技术差错性能研究[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(23):45-54.
- [12] KAHN J M, BARRY J R. Wireless infrared communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1997, 85(2): 265-298.
- [13] PIERCE J. Optical Channels: Practical limits with photon counting[J]. IEEE Transactions on Communications, 1978, 26(12): 1819-1821.
- [14] ZWILLINGER D. Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1988, 35(5): 1269-1273.
- [15] HISAYOSHI S, KIYOSHI N. MPPM: A method for improving the band utilization efficiency in optical PPM[J]. IEEE Lightwave Technology, 1989, 7(3): 465-472.
- [16] 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(3):269-272.
- [17] 程刚,王红星,孙晓明,等. 一种新型的无线光通信调制方法[J]. 中国激光,2008,35(12):1914-1918.
- [18] 张铁英,王红星,朱银兵,等. 无线光通信双幅度脉冲位置调制[J]. 激光杂志,2007(6):71-73.
- [19] SETHAKASET U, GULLIVER T A. Differential amplitude pulse-position modulation for indoor wireless optical channels [C]// IEEE Global Telecommunications Conference, November 29-December 3, 2004, Dallas, America. Texas: IEEE, 2004: 1867-1871.
- [20] MEIHONG S, XINSHENG Y, ZHANGGUO Z. The modified PPM modulation for underwater wireless optical communication[C]//2009 International Conference on Communication Software and Networks, February 27-28, 2009, Macau, China. Macau: IEEE, 2009: 173-177.
- [21] 徐志勇,沈连丰,汪井源,等. 分离双脉冲位置调制及其性能研究[J]. 通信学报,2009,30(11):113-119.
- [22] LEE G, SCHROEDER G. Optical pulse position modulation with multiple positions per pulsewidth [J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(3): 360-364.
- [23] KALUARACHI E D, GHASSEMLOOY Z, WILSON B. Digital pulse interval modulation for optical free space communication links [J]. IEEE Electrical Engineers, 1996: 996-1000.
- [24] ALDIBBIAT N, GHASSEMLOOY Z, SAATCHI R. Pulse interval modulation-dual header (PIM-DH) [C]//2nd International Conference on Information, Communications & Signal processing (ICICS'99), November 9-11, Sydney, Australia. Singapore: ICICS, 1999: 724-732.
- [25] 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):1750-1755.
- [26] 张凯,张海涛,巩马理,等. 红外双幅度脉冲间隔调制通信系统性能分析[J]. 红外与毫米波学报,2003(6):411-414.
- [27] 张铁英,王红星,程刚,等. 无线光通信中的定长数字脉冲间隔调制[J]. 中国激光,2007(12):1655-1659.
- [28] 黄爱萍,樊养余,李伟,等. 无线光通信中的定长双幅度脉冲间隔调制[J]. 中国激光,2009,36(3):602-606.
- [29] 樊养余,白勃,黄爱萍,等. 无线光通信中的脉冲位置宽度调制技术[J]. 中国激光,2008,35(12):1883-1887.
- [30] 黄爱萍,樊养余,白勃,等. 光通信中一种有效的差分脉冲位置宽度调制[J]. 计算机仿真,2009,26(12):103-106.