

脉冲状态间隔调制方法及恶劣环境下通信实验

母一宁^{1,4}, 王贺², 李平³, 姜会林¹

(1. 长春理工大学 空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022; 2. 吉林交通职业技术学院 电子系, 吉林 长春 130022;
3. 长春理工大学 计算机科学技术学院, 吉林 长春 130022; 4. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了增强激光通信对信道的适应性, 在香农理论的基础上对大气调制模型展开了研究。首先从差错的角度推导大气光通信系统误符号率与误码率的转换关系; 接着通过分析大气信道下光通信的香农极限通信速率, 指出大气信道带宽是影响激光通信的重要技术参数。进而提出了脉冲状态间隔调制编码方式并分析其结构特点; 最后通过恶劣环境下的通信实验验证 PSIM 的可行性和大气信道带宽的重要性, 指出信道特性实时反馈将是实现全天候激光通信的前提。

关键词: 无线激光通信; 信道带宽; 调制编码; 全天候

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)03-0224-07

Pulse state-interval modulation and experiment in the hostile environments

MU Yi-ning^{1,4}, WANG He², LI Ping³, JIANG Hui-lin¹

(1. Institute of Space Optical Electronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. School of Electronic & Information Engineering, Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130012, China;
3. School of Computer Science & Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
4. Faculty of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the Shannon classical communication theory, the atmospheric modulation model of wireless laser communication was investigated for enhancing wireless laser communication adaptability of the atmospheric channel. Firstly, the conversion relations of SER and BER was discussed, from error theory perspectives analysis atmospheric optical wireless communications. Afterwards, by analyzing Shannon limit communication rate of wireless laser communication in atmospheric channel, the importance of atmospheric channel bandwidth gradually came out. On the basis of this, an efficiency pulse state-interval coded modulation was present and its characteristics were estimated. Finally, the feasibility of the PSIM and the importance of atmospheric channel bandwidth to wireless laser communication were proved by wireless laser communication experiment in the hostile environments, At the end, a prospect was pointed out that atmospheric channel properties feedback technique in real time might be a key and precondition in all-weather wireless optical communication.

Key words: wireless laser communication; channel bandwidth; modulation and coding; all-weather

1 引言

激光通信具有通信速率高、频带宽等优点^[1]。然而, 大气是一种包含固体、气体、液体分子的混合物, 俗称气溶胶, 所以当调制后的激光信号在大气信道中传输时, 该调制信号会被大气信道调制,

即大气信道二次调制^[2,3]。从微观角度讲, 大气信道的二次调制可以分解为大气衰减、大气湍流和大气散射等现象, 这些现象影响到调制信号的幅度、相位与频带。所以在无线激光通信的调制解调模型与大气二次调制模型直接相关。目前无线激光通信普遍采用强度调制/直接检测 (IM/DD) 系统, 其基本

收稿日期: 2012-09-30; 修回日期: 2013-02-24

基金项目: 吉林省科技发展计划基金资助项目(20121302)

Foundation Item: The Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20121302)

调制模型为开光键控 (OOK)，带宽、功率、差错率是衡量一种调制解调性能的重要指标。虽然当今一些学者针对无线激光通信提出了一系列调制方式，比如：PPM、MPPM、DPIM、FDPIM、DP-PIM、DH-PIM、DH-PIM 等^[4-9]。但是因为大气湍流效应会造成接收功率随机起伏^[10]，造成信号误判；大气散射会造成多径效应展宽脉冲^[11]，引起码间粘连和码间串扰。所以大气信道属于一种时变非因果信道，需要根据其信道特性对带宽、功率、差错率这三者进行联合分析，进而制定调制解调模型。

本文首先分析在湍流下差错模型，采用最大似然判决近似计算误码率，从数学的角度论证误码率、误时隙率与误分组率三者之间的关系。接着从香农定理的角度分析大气信道对激光通信系统的干扰模型，在该模型的基础上提出列一种脉冲状态间隔调制编码方式，并且详细论述了该编码结构和带宽需求、功率需求、差错性能这 3 个指标。最后通过野外恶劣环境的全双工通信实验验证了该调制编码方式的可行性与可靠性。

2 差错通信模型分析

2.1 信道功率误差模型

大气是一种典型的时变非因果系统，其成分、温度、湿度、密度等在小空间和短时间内都是随机变化的，进而是大气信道的折射率也随之变化，这种由大气引入的随机干扰便是大气湍流效应。大气湍流对激光传播的干扰与激光直径和湍流漩涡尺度之比直接相关。当激光直径与湍流尺寸的比值远小于 1 时会发生光束漂移；当激光直径和湍流漩涡的尺度相当时，湍流漩涡使激光波前发生随机偏折，使到达角随机起伏；当激光直径比湍流漩涡的尺度大得多时会造成光束强度在时间和空间上随机起伏，即所谓的光强闪烁。可见从接收功率角度讲光束漂移、到达角起伏和光强闪烁均会引入噪声功率信号，对于距离在几公里以内的噪声功率可以近

似服从对数正态分布，其概率分布函数为

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

其中， σ_x 为光强闪烁指数， I_0 为光强的时间平均值， I 为接收光强。大气湍流对光波传输影响程度通常用 Rytov 变量度量，对应于弱起伏平面波的归一化光强起伏方差可表示为

$$\sigma_{\text{Rytov}}^2(z) = 1.23 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} z^{\frac{11}{6}} \quad (2)$$

其中， C_n^2 为折射率结构常数， k 为波数 ($2\pi/\lambda$)， z 为光波的传播距离。传输距离为 13 km 的 CCD 探测的光斑平均亮度曲线如图 1 所示。

背景光噪声可以通过一个高通滤波器将其滤除，光电转换过程与接收机电路引入的噪声服从高斯分布，即引入为加性高斯白噪声。此时的信道等价于大气随机信道与高斯随机信道相互级联。通常情况下调制波形为单极信号。当信号为 1 时，其时隙信号表达式为 $\eta I + n(t)$ ；当信号为 0 时，其时隙信号表达式为 $n(t)$ ，其中， $\eta = \gamma_e T e g \lambda / (hc)$ 为光电转换效率， γ_e 为探测量子效率， e 为量子电荷， g 为光电增益， λ 为光波波长， h 为普朗克常数， c 为光速， T 为每个时隙的持续时间。 $n(t)$ 为加性高斯白噪声 N_{awng} (噪声功率谱密度为 n_{awng}) 与大气信道噪声 N_{rand} 的累加和，其高斯信道下的差错时隙出现概率为 P_i ，所以级联后的传输错误率为

$$P_e = E[P_i] = \int_0^\infty f_i P_i di \quad (3)$$

2.2 信道带宽误差模型

激光的波长很短，所以将激光光波作为载波无须考虑载波带宽的问题。由经典香农理论可知

$$C = B \log(1 + S/N) \quad (4)$$

其中， B 代表带宽， S 代表功率， n 为噪声功率谱密度， N 代表噪声功率。在无线激光通信中带宽 B 分别被激光器发射带宽 (B_s)、光电检测带宽 (B_r) 和信道

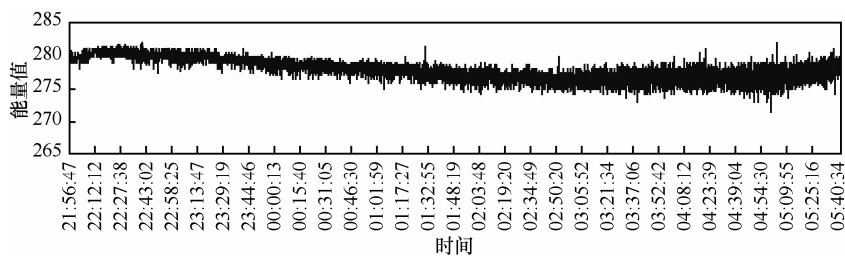


图 1 光斑亮度变化曲线

传输带宽(B_{rand})所限制 (因为光载波趋近与无穷大所以不加考虑)。相互关系为

$$B_x = \{B_s^{-1} + B_r^{-1} + B_{rand}^{-1}\}^{-1} \quad (5)$$

大气对光波的散射效应会改变光子的传播方向, 并由于存在多次散射效应, 使部分光子到达探测器所经过的时间发生改变 (光程不变, 路径改变), 即激光在大气中传输存在多径效应。可见在实际通信过程中激光器发射带宽和光电检测带宽均是恒定不变的常量, 而信道传输带宽是一个随机变量, 该变量和天气环境直接相关, 即无线激光通信系统的香农极限速率与大气信道环境直接相关, 信道带宽对通信带宽的影响是非线性的。

空间无线激光通信 (FSO) 的香农极限通信速率公式可以改写为

$$C_{FSO} = B_x \text{lb}[1 + \eta I / (N_{rand} + n_{awng} B_r)] \quad (6)$$

设激光器发射带宽 $B_s=2\ 500\ \text{MHz}$, 光电检测带宽 $B_r=2\ 500\ \text{MHz}$, 激光接收功率为 $1\ \text{dBm}$, 大气信道引入的光强闪烁噪声 $N_{rand} = -10\ \text{dBm}$, 接收噪声功率谱密度为 $n_{awng}=5\ \text{pW/MHz}$, 信道传输带宽 B_{rand} 逐渐降低, 其香农极限通信速率变化效果图如图 2 所示。同理, 设定大气信道带宽恒定在 $2.5\ \text{GHz}$, 大气信道引入光强闪烁噪声逐渐变化, 效果图如图 3 所示。

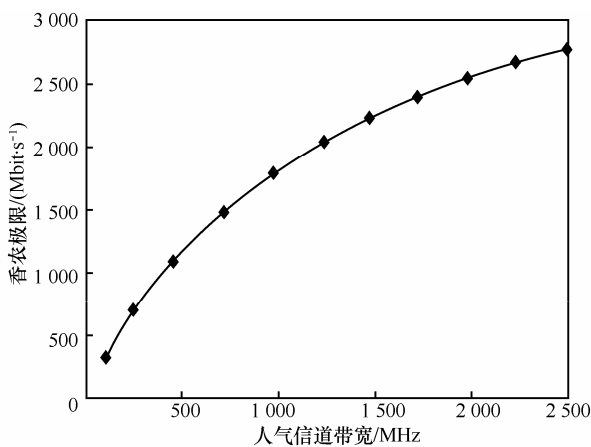


图 2 信道带宽影响效果

大气信道的变化是不能通用单一的方程式解释的, 虽然图 2 和图 3 不能完全说明大气信道可通率 (因为当大气信道带宽下降的同时, 光强闪烁强度也会随之增加), 但是图 2 和图 3 足以证明大气信道带宽的衰减与大气光强闪烁对激光通信有着相同的抑制作用, 所以在确立调制解调模型时应该

把功率需求与带宽需求放在同等重要的位置。大气信道带宽的降低直接会对通信引入码间串扰和码间粘连, 与调制解调模型的抗差错性能直接相关。

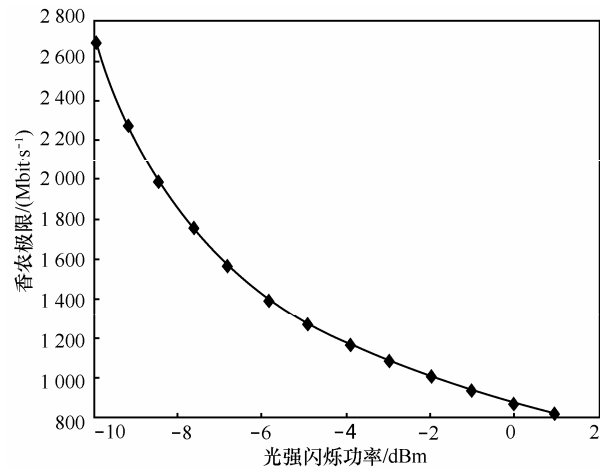


图 3 信道功率影响效果

3 PSIM 调制概述及相关性能分析

3.1 误码与误分组

从符号结构的角度可以将调制编码分为定长调制与变长调制 2 大类。最为典型的定长调制编码为 PPM 编码, 其符号长度和脉冲数固定, 当其调制阶数为 M 时, 其接收到的电流矢量为 $r = (r_0, r_1, \dots, r_{2M-1})$, 其各个分量独立统计, 假定脉冲出现位置为 $k \in S\{0, 1, \dots, 2^{M-1}\}$ 时, 只有 $r_k > \max(r_j | j \in S, j \neq k)$ 时才能正常判决, 令 $A_j = \{r_j < r_k, j \neq k\}$, 符号可以正常判决的概率为 $A \cap A_j$, 其中, A_j 事件均互相独立, A 为时钟提取正确几率, 误分组率为

$$P_X = 1 - \prod_{j=0}^{2^{M-1}} \int_{-\infty}^{\infty} f_0(r_j) dr_j \int_{r_j}^{\infty} f_1(r_k) dr_k \quad (7)$$

2 个积分函数分别为不同时隙电平的概率密度, PPM 的误符号率的近似表达式为

$$P_{PPM} = \iint_{0-\infty}^{\infty} f_1(i) \exp\left[-\frac{r_j^2}{2\sigma^2}\right] Q\left[\frac{i-r_j}{\sigma}\right] dr_j di \quad (8)$$

单个符号内发生误判是会同时产生 2 个时隙误差, 所以其时隙误差为 $[1/(2^{M-1})]P_{PPM}$ 。错误的符号经过解调后仍会产生部分正确信息, 因为在调制前各个码字具有相同的先验概率, 其错误概率只能发生在接收译码端, 所以 PPM 平均误比特率为

$$P_{PPM_bit} = \frac{1}{M} \sum_{d=1}^M da_d P_d \quad (9)$$

式(9)中的 P_d 为发送全零码字时，解调出汉明码重为 d 的码字出现概率，其中， a_d 是汉明重为 d 的码字个数。脉冲出错位置为

$$P_d = [1/(2^{M-1})]P_{PPM} \quad (10)$$

因为 $a_d=C_m^d$ ，所以平均误码率与误符号率关系为

$$P_{PPM_bit} = \frac{1}{M} \sum_{d=1}^M \frac{dC_m^d}{2^{M-1}} P_{PPM} = \frac{2^{M-1}}{2^M - 1} P_{PPM} \quad (11)$$

可见这种以 PPM 为代表的定长编码性能主要受调制阶数、大气闪烁强度、平均接收光强及噪声影响。当调制阶数为一阶时，其误比特率和符号率相同，但调制阶数逐渐增大时，误比特率变化与误符号率相似，但误时隙率则较为平稳。但是以 DPIM 为代表的变长调制方式，由于符号内时隙个数不定，所以当出现时隙误判时，不仅会影响当前符号，并且会使后续符号均发生错误。进而导致非定长调制编码的误码率高于理论计算的误分组率^[12]。

3.2 PSIM 符号结构与特点

因为不同调制方法的符号结构各不相同，所以不同种类调制方法的性能特性也有所不同，其中性能特性主要包括功率需求、带宽需求、差错能力等。以 OOK 为例，输出高功率激光表示为比特“1”，输出低功率激光表示为比特“0”，用带宽 B_{OOK} 来表述 OOK 在传递信息时比特“1”可能出现的频率范围。但采用二进制 OOK 调制方式传输 $2X$ 数据时，其频谱带宽 B_{OOK} 为 $0 \sim X$ Hz (0 Hz 特指连零情况， X Hz 特指“1”和“0”等间隔出现)。

在调制编码中，设每 2 次“1”出现的时间间隔为 T ，即 $1/T$ 便是“1”出现的频率 f_x ，其中，“1”出现的时间与总时间 T 的比为占空比。脉冲出现频率 f_x 的不确定度可以实现信息的传输，例如，PPM 根据脉冲出现位置不确定度传递信息，DPIM 根据脉冲间隔不确定度传递信息。但是通过 f_x 的不确定度传递信息。但仅仅靠脉冲之间不确定度传递信息，其带宽利用率必然很低。

脉冲状态间隔调制编码方法则是通过根据脉

冲间隔不确定度和不同脉冲间隔出现状态不确定度联合传递信息。以四进制 PSIM 编码拥有 5 种脉冲时间间隔，分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 和 T_x ，其中， T_x 为同步间隔 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为信息间隔，设定每组符号有 4 组脉冲信息位，每组符号位可以传输 8 bit。具体符号编码的组合方式为首先出现时钟同步时隙 T_x ，然后在 T_x 的后面为 4 个信息时隙，根据这 4 个信息时隙的绝对组合方式获得该符号的信息值。其中， T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 这 4 种时间间隔可以是等变长间隔也可以是渐变长间隔，设时钟同步时隙和最小步进时隙均为 T_x ，信息间隔时隙表达式为

$$T_M = T_x + a \cdot 2^M T_x \quad (12)$$

其中，当 $a=1$ 时为等变长 PSIM 编码；当 a 取值范围为 $0 \sim 1$ 时为渐变长 PSIM 编码。

四键控渐变长 PSIM 符号结构如图 4 所示，该图为可编程逻辑门阵列(FPGA)仿真环境下实际符号结构图。由图可见该符号可以传输 32 bit 信息。

3.3 性能分析

功率需求与带宽利用率是评价通信模型的 2 个重要指标，并且这 2 个指标直接影响该调制方式的抗差错能力，在此分析 OOK、PPM、等变长 PSIM、渐变长 PSIM 这 4 种调制方式在不同键控进制下的功率需求与带宽利用率以及抗差错能力。

从调制表达式的角度对比，在相同误码率条件下，不同调制方式的功率需。本文将带宽利用率定义为

$$\eta = \frac{B}{R} = \frac{n}{M} \quad (13)$$

其中， R 为数据速率， B 为通频带宽， M 为信息比特分组长度， n 为与 M 信息比特时间内划分的脉冲位置数，因为 $\eta_{OOK}=B/R=1$ ，所以本文对 OOK 频带利用率做归一化处理，用其他频带利用率与 η_{OOK} 做比较，进而评价带宽利用率的高低程度。设 OOK 调制编码的码速为 R_b ，在相同码速率下，PPM 和 DPIM 带宽需求量为

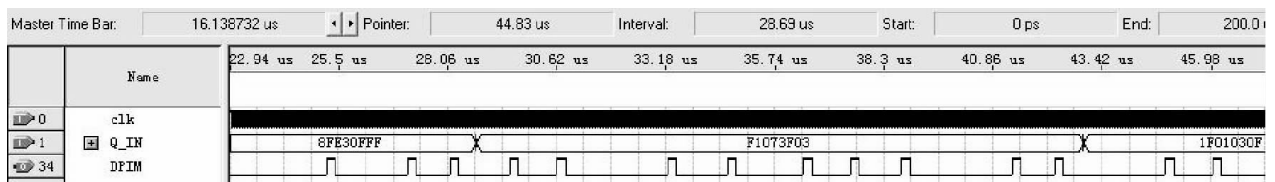


图 4 PSIM 符号结构

$$B_{PPM} = \frac{2^M}{M} R_b \quad (14)$$

$$B_{DPIM} = \frac{2^M + 3}{2M} R_b \quad (15)$$

在相同码速率下，PSIM 带宽需求量为

$$B_{PSIM} = \frac{2 + a \cdot 2^M M + aM}{2M} R_b \quad (16)$$

由图 5 可知，PSIM 调制编码的带宽利用率均高于其他编码方式，仅仅低于 OOK 调制方式。

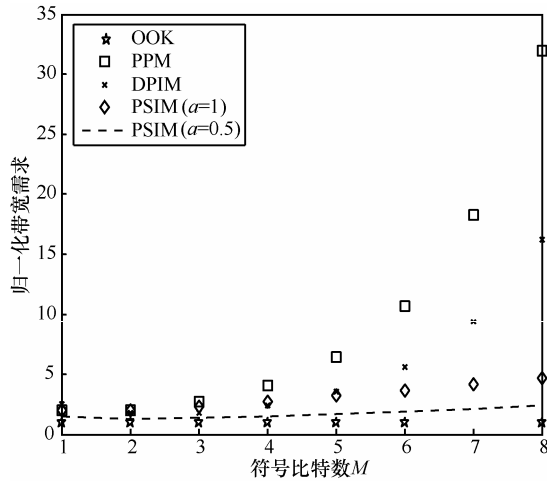


图 5 开关键控、脉冲位置调整、脉冲间隔调制、脉冲状态间隔调制带宽对比

同理在对比功率需求时依然对 OOK 调制的功率需求做归一化处理，在相同码速率下，PPM 和 DPIM 功率需求为

$$P_{PPM} = \frac{2}{2^M} P_{OOK} \quad (17)$$

$$P_{DPIM} = \frac{4}{2^M + 3} P_{OOK} \quad (18)$$

在相同码速率下，PSIM 功率需求量为

$$P_{PSIM} = \frac{2(1+M)}{2 + a \cdot 2^M M + aM} P_{OOK} \quad (19)$$

由图 6 可知，PSIM 调制编码的功率需求优于其他编码方式，仅略低于 PPM 编码方式，当 $a=0.5$ 时其功率需求较高，但随着键控阶数的增加，功率需求逐渐降低。由图 5 和图 6 可知，PSIM 的信道利用率和功率需求这 2 个指标的性能均非常优异，唯有渐变式 PSIM 的功率需求较高，以至于在低阶次键控 (M 小于 4) 调制时这种调制方式不具有可行性，但随着键控阶数增加，这种编码方式的优势

便体现出来了，当 M 不小于 4 以后，渐变式 PSIM 编码的高带宽利用率和低功率需求的特点便体现出来，因为在恶劣环境下信道带宽衰减得十分明显，所以本文后续再浓雾环境下进行的野外通信实验就是采用 $M=4, a=0.5$ 的渐变式 PSIM 调制模型。

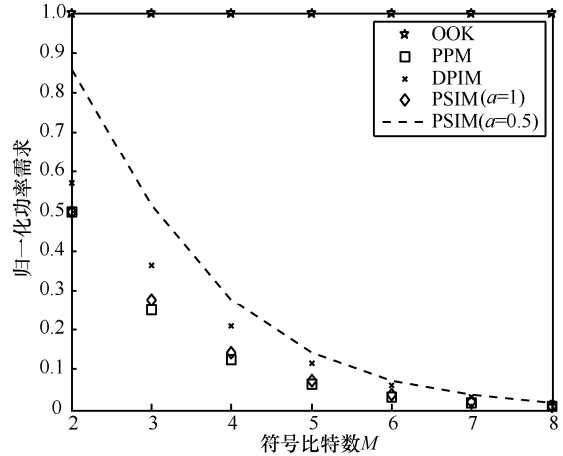


图 6 开关键控、脉冲位置调整、脉冲间隔调制、脉冲状态间隔调制功率对比

衡量调制解调模型的抗差错能力可以直接比较不同调制模型星图中的最小欧几里得距离，最小欧几里得距离与误码率之间的关系为

$$BER = Q [d_{\min} / (2\sqrt{N_0})] \quad (20)$$

其中， d_{\min} 是不同调制码元结构之间的最小欧几里德距离， N_0 为噪声功率谱密度。最小欧几里得距离的表达式为

$$d_{\min}^2 = \min_{i \neq j} \int [X_i(t) - X_j(t)]^2 dt \quad (21)$$

其中， $X(t)$ 表示输入为不同码元结构所对应的调制波形。

当大气信道变化时，不仅大气的多径效应会随之变化，而且相应的湍流闪烁效应也会随之增强，所以单独对大气的脉冲展宽模型和光强闪烁模型进行误码率仿真不足以及反映该调制编码在真实的通信情况下的误码性能^[6]的。所以通过比较不同编码方式最小欧几里德距离的长短粗略评价编码方式的抗差错能力，最后通过在恶劣气候环境下的野外通信实验验证其可行性。设 P 为平均功率， R_b 为传输速率，即 $R_b=1/\tau$ ，由于在传输信息时 OOK 调制中高低电平间隔出现，所以 OOK 脉冲的峰值功率为 $2P$ ，即最小欧几里得距离为

$$d_{OOK}^2 = 4P^2 / R_b \quad (22)$$

同理可求 PPM 调制、DPIM 调制、PSIM 调制

的最小欧几里德距离为

$$d_{PPM}^2 = 2^{M+1} P^2 M / R_b \quad (23)$$

$$d_{DPIM}^2 = (2^M + 3) P^2 M / R_b \quad (24)$$

$$d_{PSIM}^2 = \frac{4M(2 + a2^M M + aM)P^2}{(1 + M)R_b} \quad (25)$$

假定上述 4 种方法采用相同的激光平均功率和相同的传输速率，最小欧几里德对应如图 7 所示。

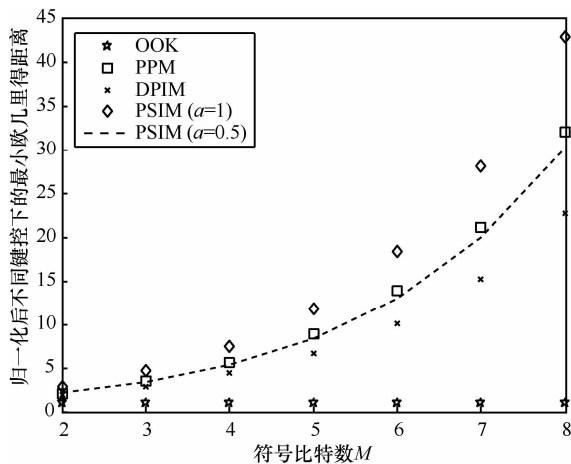


图 7 最小欧几里德距离变化趋势对比

可见，在相同的平均功率和相同传输带宽时，PSIM 具有优良的抗差错能力。

4 恶劣环境 PSIM 通信实验

为了提高环境对 PSIM 调制模型的影响，所以本系统并未采用大气窗口的通信波长进行通信，而是采用易受大气信道影响的 658 nm 波段进行通信，该激光器连续输出功率为 18 dBm，发散角为 0.8 mrad，接收口径为 80 mm 透射式光学天线，由于通信光属于单色光，所以只需要对该系统校正球差，无需校正色差，光电探测器选择 PIN 接收管。PIN 探测器前置窄带滤光片。具体光学接收天线如图 8 所示，整体系统结构如图 9 所示。

2012 年 9 月 1 日下午 13 时~17 时，在长春净月潭国家森林公园展开了浓雾环境下 2 km 野外无线激光通信实验，由于当天大雾弥漫，能见度不足 500 m，以至于光轴自动对准系统完全失效，改用手动进行光轴调整，采用全反射角锥棱镜作为第三方合作目标实现光轴对准。

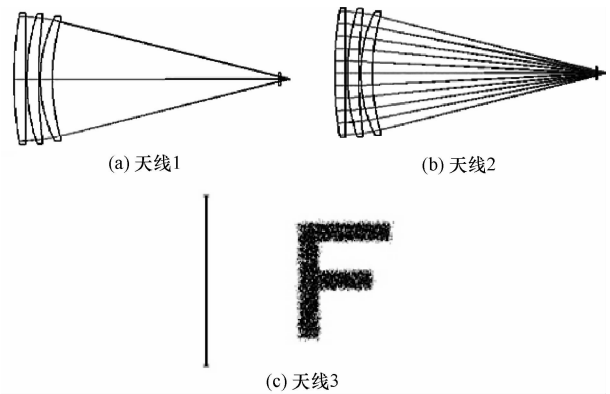


图 8 光学天线

系统采用 USB 总线控制数据流速率，通过 Visual C++编写 MFC 上位机控制程序，最终实现 USB 通信速率连续可调，发送固定 txt 文件通过对比前后数据计算误码率。底层采用 PSIM 调制解调模型。

当 M=4 时，时序基准频率为 50 MHz，a=1 时，其时隙频率出现范围为[50 MHz, 2.94 MHz]，上位机以 8 Mbit/s 的通信速率进行通信（将上位机作为数据源通信速率较低，所以每发送一个符号后会有一段空闲期），传输数据量为 50 Mbyte txt 文件，即 13 107 200 个符号。通信完成后有 7 个符号发生错误。

当 M=4，时序基准频率为 16.6 MHz，a=0.5 时，其时隙频率出现范围为[16.6 MHz, 1.85 MHz]，上位机以 8 Mbit/s 的通信速率进行通信，传输数据量为 50 Mbyte txt 文件，即 13 107 200 个符号。通信完成后未有符号发生错误。可见，PSIM 在恶劣大气环境下具有通信的可行性，并且大气信道带宽对激光通信影响十分明显。

5 结束语

首先从工程应用的角度分析了无线激光通信模型，通过研究大气信道模型和经典香农理论指出大气信道带宽是直接影响激光通信的重要技术参数，为了降低激光通信对信道带宽的需求，本文提出一种高效率的脉冲状态间隔调制方式，采用脉冲间隔和脉冲间隔的状态联合传递信息，并且分析了该调制编码方式的特性。最后通过恶劣环境下的无线激光通信实验验证该调制编码方式具有通信的可行性和大气信道带宽对激光通信的重要性。

从式(12)可以看出，该编码方式的具有脉冲渐变特性，即 a 变小时其通信速率增加抗信道影响能

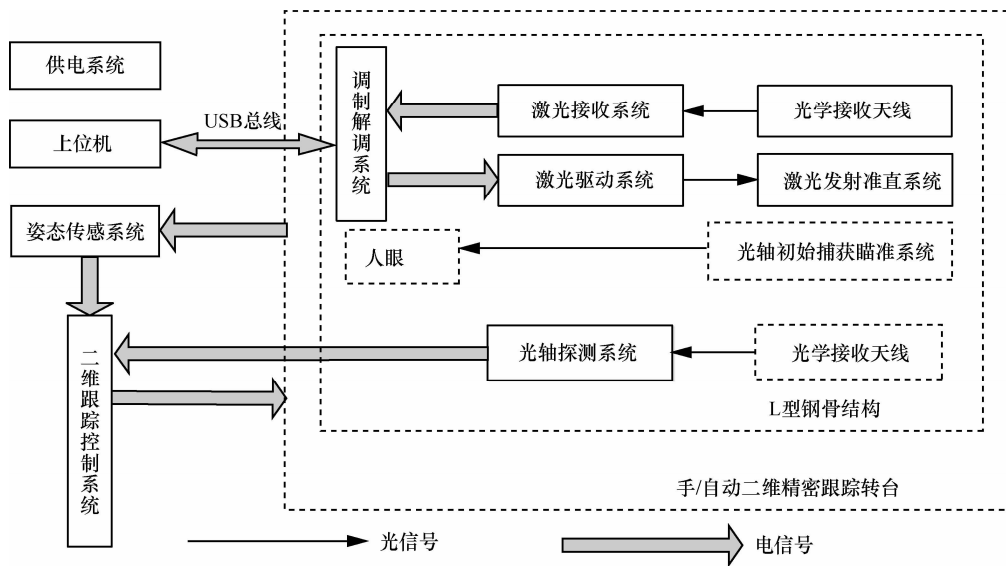


图 9 光端机结构

力降低，所以大气信道带宽的实时反馈探测技术将是下一步的研究目标，如果可以实现大气信道带宽的实时反馈，便可以根据大气信道情况实时改变通信速率实现“最优激光通信”，为全天候大气无线激光通信奠定基础。

参考文献:

[1] 姜会林, 佟首峰, 宋路等. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
JIANG H L, TONG S F, SONG L, *et al.* The System and Technology of the Free Space Laser Communications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[2] 母一宁, 刘泉, 于林韬. 哈特曼技术在序列光斑检测中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9):2197-2204.
MU Y N, LIU Q, YU L T. Application of hartmann technique in sequence spot detection[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9):2197-2204.

[3] 母一宁, 温冠宇, 王贺. 基于序列信息圆心拟合的大气激光光斑检测技术[J]. 空军工程大学学报, 2011, 12(1):59-62.
MU Y N, WEN G Y, WANG H X. Study of technique of spot detection based on sequence information fit circle center[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2011, 12(1):59-62.

[4] ZHU N, ZHU J, ZHONG Q D. The transmission performance of the MPPM modulation in indoor optical wireless communication based on white LED[A]. Proc Asia-Pacific Optical Communication (APOC)[C]. Hangzhou, China, 2008. 1-11.

[5] 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.

[6] 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, 34(12):1655-1659.
ZHANG T Y, WANG H X, CHENG G, *et al.* A novel fixed length digital pulse interval modulation for optical wireless communications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(12):1655-1659.

[7] SHIU D S, KAHN J M. Differential pulse-position modulation for power efficient optical communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8):1201-1210.

[8] ALDIBBIAT N M, GHASSEMLOOY Z, CLAUGHLIN R M. Performance of dual header pulse interval modulation for optical wireless

communication systems[A]. SPIE[C]. Sheffield, UK, 2001. 144-152.

[9] 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, 22(6):411-414.
ZHANG K, ZHANG H T, GONG M L, *et al.* Performance of dual-amplitude pulse interval modulation for wireless infrared communications[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(6): 411-414.

[10] YUKSEL H. Studies of the Effects of Atmospheric Turbulence on Free Space Optical Communication[D]. Maryland, USA: the University of Maryland, 2005.34-51.

[11] DANIEL V H, DONALD D D. Optimized link model for optical communications through clouds[A]. SPIE[C]. London, UK, 2004. 170-181.

[12] 胡昊, 王红星, 周昱等. 湍流大气中脉冲位置调制和数字脉冲间隔调制差错性能的建模与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(5):1269-1274.
HU H, WANG H X, ZHOU M, *et al.* Modeling and analyzing for error performance for pulse position modulation and digital pulse interval modulation under turbulence[J]. Chinese Journal of Laser, 2010, 37(5): 1269-1274.

作者简介:



母一宁 (1985-), 男, 吉林长春人, 博士, 长春理工大学讲师, 主要研究方向为大气激光通信及光电检测技术。

王贺 (1986-), 女, 吉林长春人, 吉林交通职业技术学院讲师, 主要研究方向为数字图像处理及跟踪制导技术。

李平 (1958-), 女, 吉林长春人, 硕士, 长春理工大学教授, 主要研究方向为神经网络及最优控制技术。

姜会林 (1945-), 男, 辽宁辽中人, 博士, 长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为大气激光通信及光电检测技术。