

非限幅 QPSK 类正弦调制大气激光通信系统的性能研究

邓莉君 柯熙政 史炜坚

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 提出了一种非限幅四相相移键控(QPSK)类正弦调制技术,并将其运用到大气激光通信系统中。介绍了大气激光通信信道模型,给出了非限幅 QPSK 类正弦调制的大气激光通信系统模型。在此基础上,对采用非限幅 QPSK 类正弦调制和采用直流偏置副载波强度调制的大气激光通信系统在无湍流和弱湍流信道下的功率利用率、误码率、中断概率和信道容量进行了分析和比较。结果表明,非限幅 QPSK 类正弦调制具有更好的抗噪声性能、更高的功率利用率、较低的中断概率及较高的信道容量,提高了大气激光通信系统的性能,可满足大气激光通信系统的需要。

关键词 光通信;大气激光通信;副载波强度调制;非限幅类正弦调制;直流偏置

中图分类号 TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0205001

Performance Research on the Non-Clipped QPSK Sine-Like Modulation of Atmospheric Laser Communication System

Deng Lijun Ke Xizheng Shi Weijian

(College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract A non-clipped quadrature phase shift keying (QPSK) sine-like modulation technology is proposed in this paper and applied to the atmospheric laser communication system. The atmospheric laser communication channel model is introduced and the atmospheric laser communication system model of non-clipped QPSK sine-like modulation is given. Based on there, the power efficiency, bit error rate (BER), outage probability and channel capacity of atmospheric laser communication systems which adopt non-clipped QPSK sine-like modulation and direct current bias sub-carrier intensity modulation are compared and analyzed. The results demonstrate that the proposed scheme has better anti-noise performance, higher power utilization, lower outage probability and higher channel capacity, and improves the performance of atmospheric laser communication system. The scheme can satisfy the requirements of atmospheric laser communication system.

Key words optical communications; atmospheric laser communication system; sub-carrier intensity modulation; non-clipped sine-like modulation; direct current bias

OCIS codes 060.2605; 060.4080; 060.5060

1 引 言

大气激光通信系统多采用两类强度调制,分别是类脉冲位置调制和副载波强度调制。国内外学者

已经对类脉冲位置调制无线光通信系统进行了大量研究^[1~8],虽然各有优势,但也存在不足,如降低差错率需要根据信道噪声的变化而自适应地改变检测

收稿日期: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-10-10

基金项目: 陕西省自然科学基金(2007F12)、西安市科技计划项目(CX1252(6)和西安理工大学科学研究计划项目(105-211111)资助课题。

作者简介: 邓莉君(1985—),女,硕士,助教,主要从事大气激光通信基础理论与关键技术等方面的研究。

E-mail: denglj@xaut.edu.cn

阈值;带宽需求与平均符号长度有关,带宽效率差;提高脉冲速率可以增加通信容量,但会引入严重的码间串扰;经过大气信道后频谱展宽,闪烁过程在低频处产生的干扰不容易滤除等。

针对以上问题,学者们提出将副载波强度调制用于大气激光通信系统。1993年,Huang等^[9]首次提出了用于大气激光通信系统的副载波相移键控(PSK)调制,通过实验验证得到,开关键控(OOK)系统要达到相同的误码率(BER)性能所需要的信噪比(SNR)比副载波PSK强度调制系统要高6dB。随后,Lu等^[10]对副载波二进制相移键控(BPSK)强度调制与OOK在大气湍流情况下的误码率进行了仿真分析。前者的判决阈值为“0”,后者要根据湍流的强度和加性噪声的变化选择合适的阈值,即使信噪比很高,OOK方式的误码率也不可能无限小。在相同的闪烁水平下,要达到相同的误码率,OOK方式需要的信噪比要比副载波BPSK强度调制需要的信噪比高3dB。为了增强无线激光通信系统对大气湍流的抗干扰能力,王勇等^[11]于2010年提出了非对称限幅光正交频分复用(OFDM)调制技术。该调制方案具有很高的功率利用率,适合光功率受限的无线激光通信系统,性能也完全优于传统OOK及直流偏置光正交频分复用调制方案,但完全恢复出非对称消减信号依赖于载波频率的选择,若出现频率偏移将不利于信号的恢复。文献[12]提出在四进制频移键控(4FSK)副载波强度调制大气激光通信系统中采用同态滤波技术能够有效抑制大气信道中的乘性噪声,提高系统的误码率性能。

副载波强度调制为了保证对激光强度进行调制

的信号是单极性的,必须对副载波信号加直流(DC)偏置,使得大气激光通信系统功率利用率不高。本文提出一种非限幅四相相移键控(NC_QPSK)类正弦调制技术,该调制具有副载波强度调制的优点,对激光强度进行调制时该调制方案不需要加直流偏置,系统功率利用率更高,传输距离更远,在大气激光通信系统应用中具备一定的优势。

2 大气激光通信信道模型

当激光通过大气时,大气分子、气溶胶以及各种液态和固态微粒都会对激光信号产生影响。大气通信链路中存在许多湍流涡旋,当光束穿过那些直径比其小的涡旋时,光束截面内包含的多个湍流涡旋各自对照射其上的那部分光束独立散射和衍射,从而引起接收端光强随机变化,即光强闪烁效应。光强信号的变化将使激光信号受到随机的寄生调制而呈现出额外的大气湍流噪声,从而降低光通信系统的性能。

大气激光传输中的湍流效应是湍流大气的折射率随机变化造成的。折射率的起伏用折射率结构常数 C_n^2 表示,大气湍流根据 C_n^2 的大小分为两种:弱湍流($10^{-16} \leq C_n^2 \leq 10^{-15}$)和强湍流($10^{-13} \leq C_n^2$)。

在弱起伏大气湍流环境下,接收光强闪烁 I 服从对数正态分布,其概率密度函数为^[13-15]

$$f(I) = \frac{1}{I \sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(\ln I + \sigma_0^2/2)^2}{2\sigma_0^2}\right], \quad (1)$$

式中 $\sigma_0^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ 是Rytov方差,与信道特性有关, $\sigma_0^2 k$ 代表光波数, L 表示光链路的长度。采用Hufnagle-Valley模型计算大气结构常数如下:

$$C_n^2(h) = 0.00594(v/27)^2(10^{-5}h)^{10} \exp(-h/1000) + 2.7 \times 10^{-16} \exp(-h/1500) + A \exp(-h/100), \quad (2)$$

式中 h 表示高度, v 表示风速, $A=1.7 \times 10^{-14}$ 。

一般用闪烁指数 σ_I^2 表示光强起伏的强度,对于弱湍流情况,闪烁指数 σ_I^2 与Rytov方差的关系为

$$\sigma_I^2 = \exp(\sigma_0^2) - 1. \quad (3)$$

3 非限幅 QPSK 类正弦调制及解调方法

目前用于大气激光通信系统的副载波强度调制需要给副载波信号加直流偏置来保证对激光进行调制的信号是单极性的,该直流偏置副载波强度调制大气激光通信系统的平均发射功率约为直流偏移

量,是一种功率利用率低的系统。本文提出的非限幅QPSK类正弦调制是对QPSK信号进行绝对值变换后再对激光器进行强度调制,并不限制电信号的负半轴,而是对电信号进行绝对值变换。该电信号属于一种正弦波,无需再加直流偏置便可直接对激光器进行强度调制,实际中也不需要额外的硬件设施便能提高系统的功率利用率,易于实现。根据该调制过程的特点将这种调制表述为“非限幅”。

如图1所示,非限幅类正弦调制过程为:首先产生QPSK信号(星座图如图2所示),对产生的QPSK信号进行绝对值(ABS)变换得到NC_QPSK信号(星座图如图3所示),同时提取对应QPSK信

号的相位 θ 。当 θ 为 π 或 $3\pi/2$ 时,在 NC_QPSK 信号后对其进行标记,标记信号是一个周期频率为

$2\omega_c$ 的正弦信号。当 θ 为其他值时,不需要在 NC_QPSK 信号后对其进行标记。

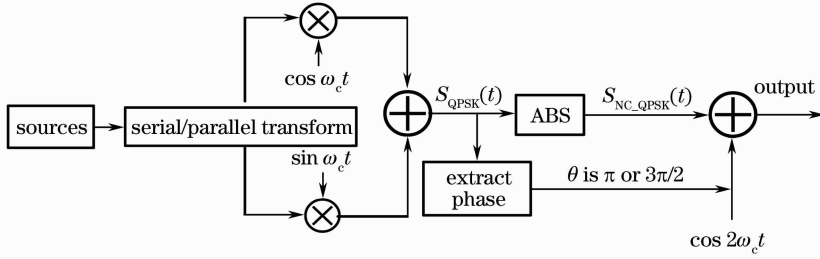


图 1 非限幅类正弦调制

Fig. 1 Non-clipped QPSK sine-like modulation of the aperture for beam transmission

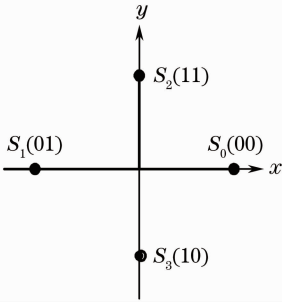


图 2 QPSK 信号星座图

Fig. 2 Constellation diagram of QPSK signal

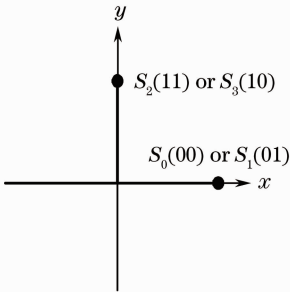


图 3 NC_QPSK 信号星座图

Fig. 3 Constellation diagram of NC_QPSK signal

经过大气信道后非限幅 QPSK 类正弦信号解调过程如图 4 所示。对接收到的信号,首先检测出其是否含有标记信号。检测信号为周期函数,表达式如下:

$$y(t) = \begin{cases} 0, & N\pi/\omega_c \leq t \leq (N+2)\pi/\omega_c \\ -\sin 2\omega_c t, & M\pi/\omega_c \leq t \leq (M+2)\pi/\omega_c \end{cases} \quad (4)$$

式中 $N = (n-1) \times 4, M = 2 + (n-1) \times 4, n$ 为正整数,标记信号的周期为非限幅 QPSK 类正弦信号的 2 倍。

若非限幅 QPSK 类正弦信号与检测信号相加后的信号在 $M\pi/\omega_c \leq t \leq (M+2)\pi/\omega_c$ 内变为零,则该时间段为调制时所加的标记信号,该时间段对应于非限幅 QPSK 类正弦信号的一个周期,该周期即为所加标记信号的位置。记录该周期,该周期的前一个周期即为被标记的信号。若非限幅 QPSK 类正弦信号与检测信号相加后的信号在 $M\pi/\omega_c \leq t \leq (M+2)\pi/\omega_c$ 内不为零,则该时间段对应周期的前一个周期信号没有标记。

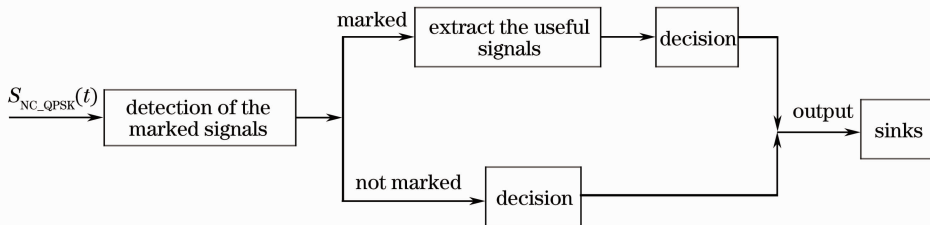


图 4 非限幅类正弦解调

Fig. 4 Non-clipped QPSK sine-like demodulation

对标记的与未标记的非限幅 QPSK 类正弦信号分别进行解调。先提取出被标记的非限幅 QPSK 类正弦信号中的有用信号,该信号和未标记信号的相位信息有两种,0 或 $\pi/2$ 。判决方法是若信号 1/4 周期处的幅值小于 0.5,被判相位为零,那么对应于

未标记信号及标记信号的符号分别为“00”和“01”;若信号 1/4 周期处的幅值大于 0.5,被判相位为 $\pi/2$,那么对应于未标记信号及标记信号的符号分别为“11”和“10”。

4 非限幅 QPSK 类正弦调制系统的性能

采用对数正态光强闪烁分布模型描述弱湍流影响下接收光强的起伏特性,对非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置副载波强度调制大气激光通信系统的功率利用率、误码率、中断概率和信道容量进行仿真分析。

4.1 非限幅 QPSK 类正弦调制系统的功率利用率

本文所提的调制将发射功率全部用于传输有用信号,而直流偏置调制方式需要加直流偏置,直流偏置越大,用于传输的有用信号功率就越低。除此之外,激光在大气信道中传输将会受到各种因素的影响,存在着较大的功率损耗,大气激光通信系统的传输方程可以表示为^[16]

$$P_r = P_t \times \eta_t \times \eta_s \times \eta(L, \beta) \times \eta_A \times \tau(L), \quad (5)$$

式中 L 为通信距离, P_r 为 L 处的接收光功率, P_t 为发射功率, η_t 和 η_s 分别为发射和接收天线的效率, β 为光束发散角, η_A 是瞄准误差产生的接收效率变化量。 $\eta(L, \beta)$ 是由光束扩展导致的接收效率, 与光束发散角 β 、传输距离 L 和激光器口径 D (单位为毫米)有关,可表示为

$$\eta(L, \beta) = \frac{\{\exp[-2D^2/(L^2\beta^2)] - 1\}}{[\exp(-2) - 1]}. \quad (6)$$

$\tau(L)$ 为大气透射率,与大气衰减系数 α 和传输距离 L 有关,表示为

$$\tau(L) = 10^{-\alpha L/10}. \quad (7)$$

假设效率 η_t 和 η_s 分别为 40%, 瞄准误差 η_A 为 50%, 激光器口径为 80 mm, 根据 (6)、(7) 式, (5) 式可以简化为

$$P_r = 0.09P_t \times \{1 - \exp[-0.0128/(L^2\beta^2)]\} \times 10^{-\alpha L/10}. \quad (8)$$

仿真中探测灵敏度为 $0.1 \mu\text{W}$, 大气衰减系数 α 为 5 dB/km, β 为 0.2 mrad。图 5 给出了非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制大气激光通信系统中激光器所需发射功率与传输距离的关系曲线。从图 5 可以看到, 在传输距离 L 相同时, 所需的发射功率从大到小依次为直流偏置四进制幅移键控 (4ASK)、直流偏置四进制正交幅度调制 (4QAM)、直流偏置 QPSK、直流偏置 4FSK、非限幅 QPSK, 即非限幅 QPSK 类正弦调制所需要的发射功率最小。在 $L=5 \text{ km}$ 时, 非限幅 QPSK 类正弦调制所需要的发射功率仅为直流偏置 4ASK 的 2%、直流偏置 QPSK 的 16.7%。当传输距离变大时, 要求激光器

的发射功率也变大, 但与直流偏置调制相比, 非限幅 QPSK 类正弦调制所需的发射功率随传输距离变化比较缓慢; 当通信距离达到一定值后, 如直流偏置 4ASK 通信距离达到 3 km, 直流偏置 4QAM 通信距离达到 3.5 km, 直流偏置调制所需的激光器的发射功率随距离的增加急剧上升, 所以采用非限幅 QPSK 类正弦调制可以提高大气激光通信系统的功率利用率。从图 5 还可以看到, 当直流偏置调制系统的通信距离达到一定值的时候, 即使再增大发射功率也很难再增大传输距离, 而采用非限幅 QPSK 类正弦调制, 增加很小的发射功率依然可以增加系统的传输距离。

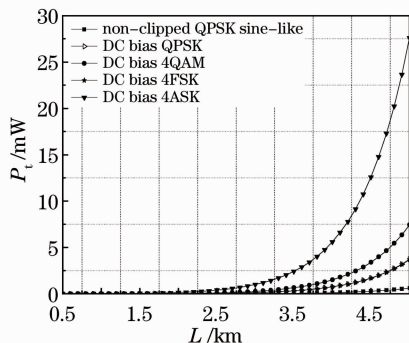


图 5 非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制不同通信距离所需的发射功率

Fig. 5 Required transmitting powers for different communication distances for non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias modulation

4.2 非限幅 QPSK 类正弦调制系统的误码率

图 6 给出了非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的误码率曲线。当大气信道中没有湍流时, 采用非限幅 QPSK 类正弦调制的大气激光通信系统要达到 10^{-3} 的误码率要求的信噪比为 6 dB, 而直流偏置 QPSK 调制系统要达到相同的误码率需要的信噪比为 7 dB, 前者比后者的性能提高了 1 dB。在湍流强度 $\sigma_i^2 = 0.2$ 时, 系统要达到 10^{-2} 的误码率, 采用非限幅 QPSK 类正弦调制的大气激光通信系统需要的信噪比比采用直流偏置 QPSK 调制系统所需要的信噪比低 2 dB。在湍流强度为 $\sigma_i^2 = 0.1$ 和 $\sigma_i^2 = 0.3$ 时, 系统的性能也提高 1 dB。从图 6 也可以看出, 当湍流强度 σ_i^2 在 0.1~0.3 间变化时, 非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的性能不断恶化。无湍流且信噪比为 9 dB 时, 非限幅 QPSK 类正弦调制与 QPSK 调制的误码率大致相同。图 7 对比了湍流强度 $\sigma_i^2 = 0.2$ 时非限幅 QPSK 类正弦调制系统与直流偏置调

制(4ASK、4FSK、方形 4QAM)系统的误码率。系统要达到 10^{-2} 的误码率,采用非限幅 QPSK 类正弦调制和采用直流偏置 4QAM 的大气激光通信系统需要的信噪比分别为 7 dB 和 9 dB,而直流偏置 4ASK 和直流偏置 4FSK 要达到相同的误码率所需要的信噪比超过了 12 dB。在信噪比大于 12 dB 时,4FSK 与 4ASK 误码率大致相同。

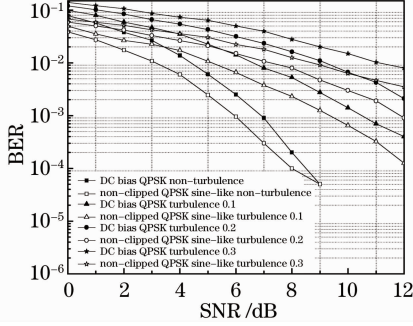


图 6 非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的误码率

Fig. 6 BER of non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias QPSK modulation

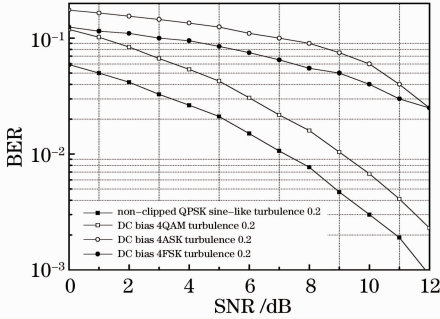


图 7 非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制系统的误码率

Fig. 7 BER of non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias modulation

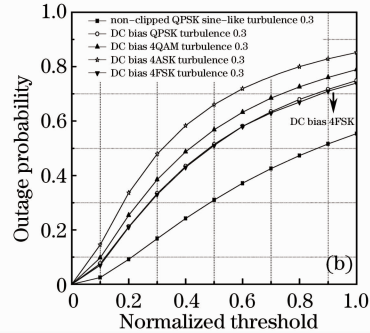
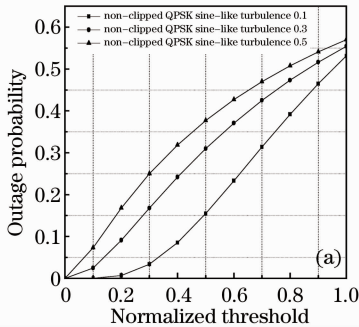


图 8 (a)不同湍流强度下非限幅 QPSK 类正弦调制系统中断概率;(b)非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制(4ASK、4FSK、方形 4QAM)系统中断概率

Fig. 8 (a) Outage probabilities of non-clipped QPSK sine-like modulation under different turbulence intensities; (b) outage probabilities of non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias modulation (4ASK、4FSK、4QAM) system

4.3 非限幅 QPSK 类正弦调制系统的中断概率

中断概率是指大气激光通信系统的瞬时信噪比低于某一目标信噪比门限的概率,瞬时信噪比高于目标信噪比门限表明信道质量良好,能够保证正常通信。调制方式的功率利用率越高,则经过大气随机信道时瞬时信噪比低于目标信噪比门限的概率就越小,中断概率就越低。其表达式为^[17]

$$P_{\text{out}} = P_r(R_{\text{SN}} \leq \mu) = P_r\left(\frac{\xi^2 I^2}{N_0} \leq \mu\right) = P_r\left(I \leq \frac{\sqrt{\mu N_0}}{\xi}\right) = \int_0^{\frac{\sqrt{\mu N_0}}{\xi}} f(I) dI, \quad (9)$$

式中 $P_r(\cdot)$ 为概率函数, μ 为系统信噪比门限值, 信噪比 $R_{\text{SN}} = \frac{\xi^2 I^2}{N_0}$, ξ 是光电转换效率, N_0 是均值为 0 的加性高斯白噪声的方差。

在弱湍流情况下, $f(I)$ 服从对数正态分布,由(1)式和(3)式可得中断概率为

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\frac{\sqrt{\mu N_0}}{\xi}} \frac{1}{I \sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp\left[-\frac{(\ln I + \sigma_0^2/2)^2}{2\sigma_0^2}\right] dI. \quad (10)$$

由(10)式可知,中断概率 P_{out} 是对数正态分布概率密度函数的积分,即 P_{out} 为累积分布函数,可得弱湍流下 P_{out} 的表达式为

$$P_{\text{out}} = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\ln x + \sigma_0^2/2}{\sigma_0 \sqrt{2}}\right), \quad (11)$$

式中 $\operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} \exp(-t^2) dt$ 是误差补偿函数。

在发射功率相同时,图 8(a)给出了不同湍流强度下,非限幅 QPSK 类正弦调制系统中断概率随信噪比阈值的变化曲线。结果表明,当湍流强度 σ_0^2 从 0.1 增强到 0.3 时,系统的性能下降。图 8(b)是非

限幅 QPSK 类正弦调制系统与直流偏置调制系统在湍流强度 $\sigma_i^2=0.3$ 时中断概率随信噪比阈值的变化曲线,当信噪比归一化阈值为 0.5 时,非限幅 QPSK 类正弦调制系统的中断概率为 0.3,而直流偏置 QPSK 和直流偏置 4FSK 的中断概率约为 0.5,直流偏置方形 4QAM 的中断概率约为 0.58,直流偏置 4ASK 的中断概率约为 0.63。可以看出,

非限幅 QPSK 类正弦调制系统与直流偏置调制(4ASK、4FSK、方形 4QAM)系统相比,性能有了很大提高。

4.4 非限幅 QPSK 类正弦调制系统的信道容量

对于 M 阶离散输入,连续输出的离散无记忆加性高斯白噪声(AWGN)信道,一维调制与二维调制的信道容量可以表示为^[18]

$$C = \text{lb } M \frac{1}{M\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-t^2) \times \text{lb} \left\{ \sum_{j=1}^M \exp \left[-\frac{2t(x_m - x_j)}{\sqrt{N_0}} - \frac{(x_m - x_j)^2}{N_0} \right] \right\} dt, \quad (12)$$

$$C = \text{lb } M \frac{1}{M\pi} \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-|t|^2) \times \text{lb} \left\{ \sum_{j=1}^M \exp \left[-\frac{2\text{Re}[t(x_m - x_j)^*]}{\sqrt{N_0}} - \frac{|x_m - x_j|^2}{N_0} \right] \right\} dt, \quad (13)$$

式中 M 为调制阶数, $x_m, x_j, m, j \in (1, 2, \dots, M)$ 为矢量信号空间的星座点,每维噪声方差为 $N_0/2$ 。

一维调制与二维调制的平均信噪比分别表示为^[18]

$$\gamma = \frac{2}{MN_0} \sum_{i=1}^M x_i^2, \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{1}{MN_0} \sum_{i=1}^M |x_i|^2. \quad (15)$$

由于多进制频移键控(MFSK)和多进制幅移键控(MASK)属于一维调制,而 MFSK 信道容量的定义不同于一般的一维调制,其信道容量可定义为平均互信息关于信源概率密度函数的极大值

$$C = \max_{\{P(x)\}} I(X; Y). \quad (16)$$

考虑 M 进制的信号, $\{X_m(t), m = 1, 2, \dots, M\}$ 是等信号间隔的有限能量波形,每个波形可在一组标准正交集上展开:

$$x_m(t) = x_m \varphi(t), m = 1, 2, \dots, M. \quad (17)$$

每个信号波形 $x_m(t)$ 和它的坐标矢量 $\mathbf{x}_m = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 之间建立起一一对应关系。由(16)式可得 MFSK 信号的信道容量为

$$C = \max_{P(x_m, m=1, 2, \dots, M)} \sum_{m=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} P(x) P(y/x) \times \left[\text{lb} \frac{P(y/x_m)}{P(y)} \right] dy. \quad (18)$$

在弱湍流信道下,平均信道容量定义为^[19]

$$\langle C \rangle = \int_0^{\infty} B \text{lb} \left[1 + \frac{(\xi I)^2}{N_0} \right] f(I) dI, \quad (19)$$

其中 $f(I)$ 为(1)式定义的弱湍流情况下对数信道模型的概率密度函数, B 为信道带宽。

图 9(a)给出了非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的平均信道容量。可以看出,无大气湍流时,非限幅 QPSK 类正弦调制系统的平均信道容量最接近 Shannon 限,比湍流信道下的平均信道容量要高。随着湍流强度的增强,系统的平均信道容

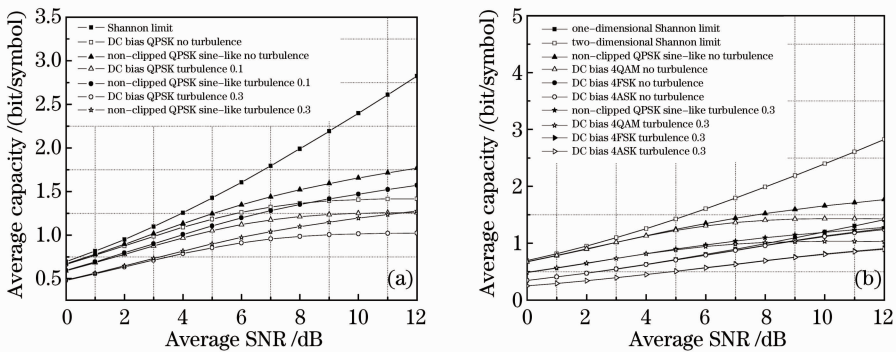


图 9 (a)非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的信道容量;(b)非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制(4ASK、4FSK、方形 4QAM)系统的信道容量

Fig. 9 (a) Channel capacities of non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias QPSK modulation; (b) channel capacities of non-clipped QPSK sine-like modulation and DC bias modulation (4ASK、4FSK、4QAM)

量也在下降。在信噪比为 10 dB 时,无大气湍流的非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置 QPSK 调制系统的平均信道容量分别为 1.655 bit/symbol 和 1.407 bit/symbol,前者比后者高约 18%。湍流强度 σ_r^2 为 0.1 和 0.3 时,非限幅 QPSK 类正弦调制比直流偏置 QPSK 调制系统的平均信道容量在信噪比为 10 dB 时也分别高出约 16%。在信噪比大于 8 dB 时,直流偏置 QPSK 调制系统的平均信道容量随着信噪比的增加几乎不变,而非限幅 QPSK 类正弦调制系统的平均信道容量随着信噪比的增加还在增加。

图 9(b)是非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置调制(4ASK、4FSK、方形 4QAM)系统在无湍流和湍流强度为 $\sigma_r^2 = 0.3$ 时的平均信道容量对比曲线。可以清楚地看出,随着信噪比的增加,系统的平均信道容量在不断增加,但无论是无湍流的情况还是湍流强度 $\sigma_r^2 = 0.3$,非限幅 QPSK 类正弦调制都要比直流偏置调制系统的平均信道容量高,且湍流信道下的平均信道容量低于无湍流时的平均信道容量。从图 9 还可以看到,在信噪比高于 8 dB 时,直流偏置调制系统的平均信道容量随着信噪比的增加变化已经不明显,而非限幅 QPSK 类正弦调制系统的平均信道容量还在不断提高。

5 结 论

提出了一种非限幅 QPSK 类正弦调制技术,介绍了该类调制的基本原理,对系统的功率利用率、误码率、中断概率和信道容量进行了理论分析。在此基础上,把非限幅 QPSK 类正弦调制与直流偏置副载波强度调制方案(4ASK、4FSK、方形 4QAM 和 QPSK)在无湍流和弱湍流信道中的性能进行了比较。仿真结果表明,非限幅 QPSK 类正弦调制系统的功率利用率比直流偏置副载波强度调制方案的系统高,而且前者误码率和中断概率要比后者的低,前者信道容量也比后者有了很大提高。如何进一步降低非限幅 QPSK 类正弦调制系统在湍流信道下的误码率还需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Dashan Shiu. Differential pulse-position modulation for power-efficient optical communication[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1999, **47**(8): 1201~1210
- 2 Zou Chuanyun, Ao Faliang, Zhang Dekun *et al.*. Maximum-likelihood block and frame synchronization for optical OPPM communication[J]. *J. China Institute of Communications (J. Communications)*, 1999, **20**(S1): 127~133

- 邹传云, 敖发良, 张德琨 等. 光 OPPM 通信的最大似然帧节同步[J]. *通信学报*, 1999, **20**(S1): 127~133
- 3 Zou Chuanyun, Ao Faliang, Huang Xiangfu. Analysis of optical PPM channel capacity without background noise [J]. *J. Electronics*, 2000, **22**(4): 682~686
- 邹传云, 敖发良, 黄香馥. 无背景噪声下的光 PPM 信道容量分析[J]. *电子科学学刊*, 2000, **22**(4): 682~686
- 4 Zhang Kai, Zhang Haitao, Gong Mali *et al.*. Performance of dual-amplitude pulse interval modulation for wireless infrared communication [J]. *J. Infrared Millimeter Waves*, 2003, **22**(6): 411~414
- 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
- 5 Hu Zongmin, Tang Junxiong. Digital pulse interval modulation for atmospheric optical wireless communication [J]. *J. 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
- 6 Hongxing Wang, Xiaoming Sun, Xiaoyan Sun. Performance of current digital pulse modulation schemes for optical wireless communications[C]. *IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2006
- 7 Zhang Tieying, Wang Hongxing, Shi Jianguo *et al.*. Spectral characteristics of dual amplitude pulse position modulation in optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0305001
- 张铁英, 王红星, 史建国 等. 光通信中双幅度脉冲位置调制的功率谱分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0305001
- 8 Tieying Zhang, Chuanjun Xie, Ting Kong. A novel modified digital pulse interval modulation for optical wireless communications[C]. *4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008
- 9 W. Huang, J. Takayanagi, T. Sakanaka. Atmospheric optical communication system using subcarrier PSK modulation [C]. *IEEE International Conference on Communications*, 1993, **3**: 1597~1601
- 10 Qi Lu, Qingchong Liu, G. S. Mitchell. Performance analysis for optical wireless communication systems using subcarrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel[C]. *Global Telecommunications Conference*, 2004, **3**: 1872~1875
- 11 Wang Yong, Cao Jianian. Performance analysis of atmospheric laser communication system basing on asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing intensity modulation and lower density parity check code[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3031~3036
- 王 勇, 曹家年. 基于低密度奇偶校验码和非对称限幅光正交频分复用技术的大气激光通信系统性能[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3031~3036
- 12 Chen Dan, Ke Xizheng, Qu Fei. Research on homomorphism filtering technology of wireless optical communication based on four frequency shift keying modulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205001
- 陈 丹, 柯熙政, 屈 菲. 基于四进制频移键控控制的无线光通信同态滤波技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205001
- 13 Wang Jin, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Performance analysis of the reception based on least-mean-square adaptive algorithm in optical wireless communication system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1379~1383
- 王 瑾, 黄德修, 元秀华. 基于最小均方自适应滤波器的无线光通信接收性能分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1379~1383
- 14 N. Letzepis, A. G. Fabregas. Outage probability of the MIMO Gaussian free-space optical channel with PPM[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2009, **57**(12): 3682~3690
- 15 Jing Li, M. Uysal. Optical wireless communications: system model, capacity and coding[C]. *58th IEEE Vehicular Technology*

Conference, 2003, **1**: 168~172

16 Xu Xiaojing, Yuan Xiuhua, Huang Dexiu. Analysis of the parameters influencing the distance of free-space laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(5): 493~496

徐晓静, 元秀华, 黄德修. 影响激光大气通信距离的诸因素分析[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(5): 493~496

17 Han Liqiang, Wang Qi, Shida Katsunori. Outage probability of free space optical communication over atmospheric turbulence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(4): 660~663

韩立强, 王 祁, 信太克归. 大气湍流下自由空间光通信中断概率分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, **39**(4): 660~663

18 Weidong Li, Hongwen Yang, Dacheng Yang. Simple approximation formula for the symmetric capacity[C]. Proc. Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2007

19 Dan Chen, Xizheng Ke, Qiang Sun. Outage probability and average capacity research on wireless optical communication over turbulence channel [C]. 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011. 19~23

栏目编辑: 王晓球

309 W 全光纤结构 1018 nm 掺镱光纤激光器

高功率光纤激光器是近年来国际上的研究热点。受抽运源亮度和热效应等因素的限制,由半导体激光器(LD)直接抽运的光纤激光器输出功率目前仍停留在千瓦量级。光纤激光同带抽运方案具有抽运光亮度高,量子亏损小等优势,相比于 LD 直接抽运方案具有更高的功率提升潜力,成为近年来国际上的研究热点。目前输出功率最高的光纤激光器正是由多路 1018 nm 光纤激光抽运掺镱光纤实现的。

国防科学技术大学高能激光技术研究所继 2011 年 11 月报道了 113 W、1018 nm 掺镱光纤放大

器后,近期又成功实现了 1018 nm 掺镱光纤激光器 309 W 高功率输出。1018 nm 激光由全光纤结构振荡器产生,输出特性如图 1 所示。当注入抽运光功率为 435 W 时,获得了 309 W 的 1018 nm 激光输出,激光器效率为 71%。图 1(b)所示为最高功率时的光谱,从光谱中可以看出,放大自发辐射(ASE)得到了有效抑制,残余的抽运光也被充分滤除。图 1(c)所示为激光器工作在最高功率时的测量现场。

本实验成功解决了短波长光纤激光器中的 ASE 抑制问题,为进行高功率光纤激光同带抽运奠定了基础。

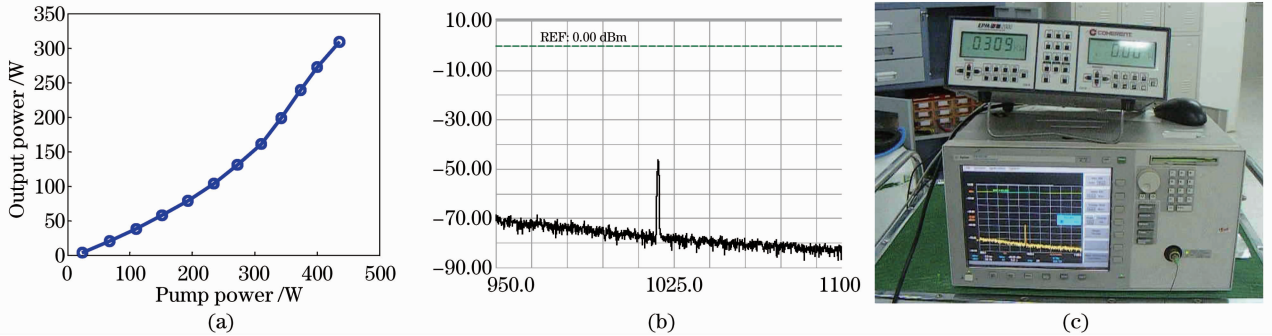


图 1 1018 nm 光纤激光器实验结果。(a)功率特性;(b)输出功率为 309 W 时的光谱;(c)测量现场

Fig. 1 Experimental results of high power 1018 nm fiber laser. (a) Power characteristics; (b) spectrum measured at 309 W; (c) measurement field

刘泽金 肖 虎 周 朴* 王小林 陈金宝
(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

* E-mail: zhoupu203@163.com

收稿日期: 2012-10-29; 收到修改稿日期: 2012-12-01