

文章编号:1004-4213(2011)01-0036-5

# 大气激光通信非对称限幅光正交频分复用技术

王勇,曹家年

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院,哈尔滨 150001)

**摘 要:**将一种新的正交频分复用调制技术运用到大气激光通信系统中,分析了采用这种非对称限幅光正交频分复用调制技术的大气激光通信系统在大气湍流信道下的性能.在此基础上,把非对称限幅光正交频分复用调制方案与传统的开关键控及直流偏置光正交频分复用调制方案进行了比较,并在大气湍流信道中进行了仿真.仿真结果表明:非对称限幅光正交频分复用调制技术增强了系统对大气湍流的抗干扰能力,该方案可以满足大气激光通信系统的需要.

**关键词:**大气激光通信;非对称限幅光正交频分复用;大气湍流

**中图分类号:**TN929.12

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20114001.0036

## 0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)<sup>[1-3]</sup>是一种多载波宽带数字调制技术. OFDM 将高速串行数据分成成百上千路并行数据后,分别对不同的载频进行调制. 在一个 OFDM 符号内,多个调制后子载波的合成信号在频谱上允许相互重叠,且满足正交性. 与传统频分复用各子载波之间的频谱互不重叠相比,OFDM 大大提高了频谱利用率. 又由于这种并行传输机制大大扩展了符号的脉冲宽度,提高了抗多径衰落性能,极大地减小了码间干扰对系统性能的影响. 目前,OFDM 已经广泛地应用于非对称数字用户环路、高清晰度电视、无线局域网等领域. 但是 OFDM 技术并没有成功地运用到大气激光通信领域中,这主要是因为 OFDM 符号是双极性的,而大气激光通信系统采用的是光强调制,只能传送单极性信号. 解决这个问题的一般方法就是增加一个很大的直流偏移量,以确保 OFDM 符号非负. 这样就会要求一个很高的平均光功率,但它的调制深度却很低,因此它是一种光功率高而效率低的方法. 本文采用了一种非对称限幅光 OFDM 调制技术,把它运用到大气激光通信系统中. 在大气湍流信道下,对该调制方案进行了仿真研究并和传统的调制技术进行了性能比较.

## 1 大气激光通信信道模型

当激光通过大气层时,部分光会被吸收、被散

射,这样传输链路的光能量就损失很大. 大气层是由各种不同的分子和小的悬浮微粒组成,它们与光相互作用会产生各种各样的现象:频率选择性衰减、吸收、散射和闪烁. 其中大气闪烁<sup>[4-6]</sup>对大气激光通信系统性能影响较大. 大气闪烁又称光强闪烁,是指激光传输一段距离后,光束强度忽大忽小、光斑忽明忽暗的现象. 大气闪烁会使接收信号光强随机起伏,从而对大气激光通信系统性能会产生很大的损害. 一般用闪烁指数<sup>[7]</sup>来表示光强起伏的强度,闪烁指数定义为

$$\sigma_{sc}^2 = \frac{E[I^2]}{E^2[I]} - 1 \quad (1)$$

式中, $I$ 代表信号光强度.

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,根据  $C_n^2$  的大小,又可以把大气湍流分为两种: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,接收信号光强闪烁服从对数正态分布,其概率密度函数为

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}I} \exp\left(-\frac{(\ln(I) - m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad I \geq 0 \quad (2)$$

式中, $m_i$  和  $\sigma_i$  分别表示  $\ln(I)$  的均值和标准方差.

对数正态分布仅适合于弱湍流起伏区域,对于强湍流区域时,光强起伏不再服从对数正态分布,而是指数分布.

$$f_I(I) = I_0^{-1} e^{-I/I_0} \quad (3)$$

基金项目:国家自然科学基金(No. 60602007)资助

第一作者:王勇(1974-),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为大气激光通信与光纤通信. Email:wangyong@hrbeu.edu.cn

导师:曹家年(1948-),男,教授,博导,主要研究方向为光纤传感器与光纤通信.

收稿日期:2010-07-09;修回日期:2010-08-26

式中,  $I_0 = E(I)$ .

## 2 非对称限幅光 OFDM 系统模型

文献[8]描述了 OFDM 技术在光强度调制系统中的运用,所采用的方法都是给 OFDM 符号增加直流偏移量,以保证对光源进行调制的信号是单极性的.对于一个固定的直流偏移量,OFDM 符号偶尔会出现较大的负值峰值,这些负值峰值将被削减掉,引起对信号的噪声.此外,对于直流偏移的 OFDM 光强调制系统,它的平均发射光功率大约等于直流偏移值,因此它是一种光功率效率低的系统.本文采用了一种非对称限幅光 OFDM 调制技术<sup>[9]</sup>,它不需要添加直流偏移量,在对光源进行强度调制之前,调制信号的所有负值都被归零.通过载波频率的正确选择,传输数据完全可以从这种非对称削减的信号中恢复出来,并且不会产生信号频带内的削减噪声.

图 1 给出了采用非对称限幅光 OFDM 调制技

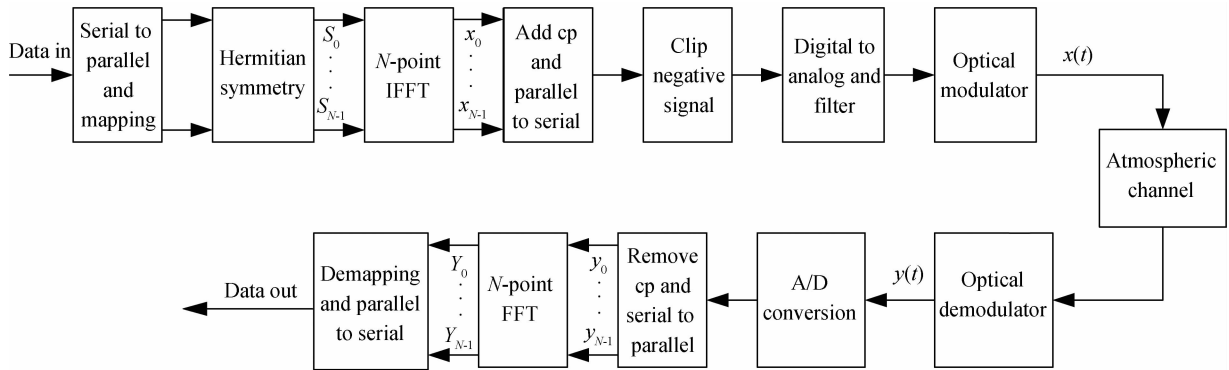


图 1 非对称限幅光 OFDM 调制技术的大气激光通信系统原理

Fig. 1 Block diagram of an asymmetrically clipped optical OFDM system

在非对称限幅光 OFDM 调制系统中,光发射机发出的光强为

$$x(t) = [s_{\text{OFDM}}(t)]_{\text{clipping}} \quad (4)$$

式中,

$$s_{\text{OFDM}}(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \omega(t-kT) \sum_{i=1}^N S_{i,k} e^{j2\pi f_i(t-kT)} \right\} \quad (5)$$

式中:  $S_{i,k}$  为第  $k$  个 OFDM 符号的第  $i$  个子载波的调制信号;  $T$  为 OFDM 符号间隔;  $\omega(t)$  为窗函数;  $[\cdot]_{\text{clipping}}$  表示对信号的非对称限幅,把信号值为负的点都归零.

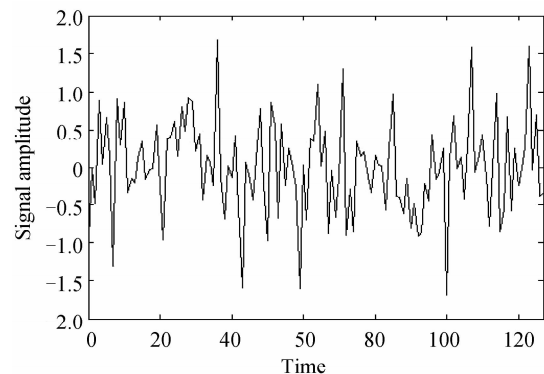
在接收端,经 PIN(Positive Intrinsic Negative) 或雪崩光电二极管(Avalanche Photo Diode, APD) 转换后,输出信号为

$$y(t) = RA(t)x(t) + n(t) \quad (6)$$

式中:  $A(t)$  为由大气湍流引起的光强度波动;  $R$  为 PIN 光电二极管的响应度;  $n(t)$  为接收机的电子噪声,其概率服从高斯分布.

术的大气激光通信系统原理方框图.要传输的数据首先映射为复数星座值,把这些复数再映射为向量  $\mathbf{S}; \mathbf{S} = [s(0), \dots, s(N-1)]$ ,其中,  $N$  为 IFFT 变换的点数.因为系统采用的是光强度调制,所以对光源进行调制的时域信号必须是实信号,并且信号值要大于等于 0.因此,这个星座向量有两个突出的特点:这个向量是 Hermitian 对称的,即向量  $\mathbf{S}$  为  $\mathbf{S} = (0 \ s_1 \ 0 \ s_2 \ 0 \ \dots \ s_{N/2-1} \ 0 \ s_{N/2-1}^* \ 0 \ s_{N/2-3}^* \ 0 \ \dots \ s_1^*)$ ,这样可以保证传输的信号是实信号;只有奇数载波传输数据,即  $S(k) = 0$  ( $k$  为偶数时).添加完循环前缀后,数据从并行的转化为串行的.在对光源强度调制前,对调制信号要进行削幅,把负数的样值变为 0,这样可以保证调制信号是一个单极性信号.因为只有奇数载波传输数据,所以时域信号是关于中心点反对称的( $x(n+N/2) = -x(n)$ ),这样可以确保削减负值不会使奇载波传输的数据失真,只会使它的幅度减小一半.

图 2(a) 给出了仅有奇数载波传输数据的 OFDM 时域信号波形,图 2(b) 给出了图 2(a) OFDM 时域信号波形经过非对称限幅(把所有负值归零)后的时域波形,采用的调制方式为正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK),  $N$  设为 128.



(a) Only add subcarriers modulated OFDM time domain signal

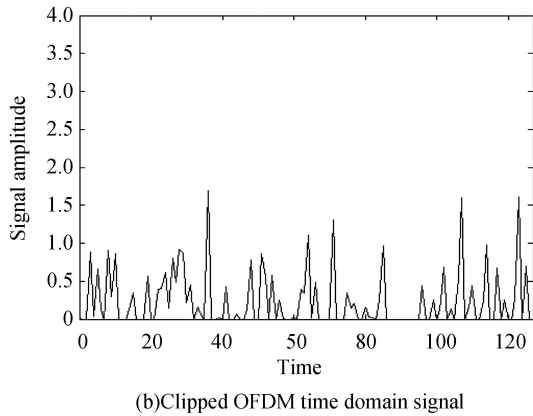


图2 OFDM 时域信号

Fig. 2 OFDM time domain signal

### 3 非对称限幅光 OFDM 系统性能

#### 3.1 非对称限幅光 OFDM 系统误码率

图3给出了非对称限幅光 OFDM 强度调制系统和传统开关键控 (On/Off Keying, OOK) 强度调制系统误码率曲线。当大气信道中没有湍流时, OOK 系统性能与子载波采用 4 正交振幅调制 (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) 的非对称限幅光 OFDM 系统性能大致相同, 但当大气湍流出现时, OOK 系统性能受到了较严重的影响, 非对称限幅光 OFDM 系统完全优于 OOK 系统。在大气湍流强度  $\sigma_{sc}^2 = 0.2$  时, 采用 OOK 强度调制的大气激光通信系统要达到误码率 (Bit Error Rate)  $BER = 5 \times 10^{-2}$ , 要求信噪比为  $E_b/N_0 = 12$  dB; 而非对称限幅光 OFDM 强度调制系统要达到相同的误码率, 仅需要信噪比  $E_b/N_0 = 6$  dB, 系统性能提高了 6 dB。此外, OOK 强度调制系统性能随着信噪比  $E_b/N_0$  的增加而呈现出非常缓慢的变化趋势, 即信噪比的增加不会给大气湍流中的 OOK 系统性能带来明显的改善。从图3中还可以清楚地发现, 湍流强度对系统性能的影响, 湍流强度从  $\sigma_{sc}^2 = 0.1$  到  $\sigma_{sc}^2 = 0.3$ , 非对称限幅光 OFDM 或 OOK 强度调制系统性能不断恶化。

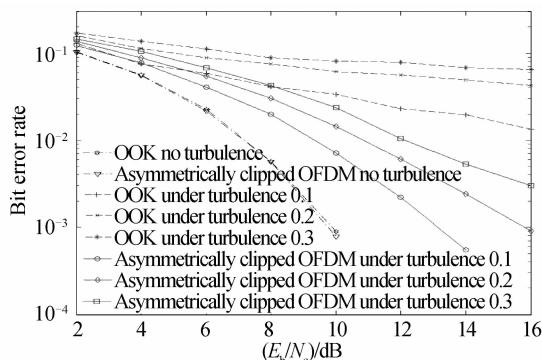


图3 非对称限幅光 OFDM 与 OOK 系统误码率

Fig. 3 BER as a function of  $E_b/N_0$  for asymmetrically clipped optical OFDM system and OOK system

图4给出了在大气湍流环境中直流偏置光 OFDM 和非对称限幅光 OFDM 系统误码率曲线。可以清楚地看出, 无论在哪个湍流强度下非对称限幅光 OFDM 系统性能都优于直流偏置光 OFDM。在不同湍流强度下, 系统性能改善的程度是不一样的。现以大气湍流强度  $\sigma_{sc}^2 = 0.2$  为例, 直流偏置光 OFDM 通信系统要达到误码率  $BER = 6 \times 10^{-3}$ , 系统要求信噪比为  $E_b/N_0 = 16$  dB; 在相同的误码率条件下, 非对称限幅光 OFDM 系统要求信噪比为  $E_b/N_0 = 12$  dB, 因此, 系统性能改善了 4 dB。在直流偏置光 OFDM 系统中, 在双极性 OFDM 信号上增加一个直流偏移量  $b$ , 这样以保证整个信号是单极性的。由于双极性 OFDM 信号是呈高斯分布的, 因此整个系统的平均发射光功率为  $P_{opt} = E[x(t)] = E[s_{OFDM} + b] = b$ 。当直流偏移量  $b$  取值不是很大时, OFDM 信号的负值峰值就会被削减掉, 这将产生限幅噪声, 影响系统的性能。限幅噪声的大小完全由直流偏移量  $b$  决定,  $b$  值越大, 限幅噪声越小,  $b$  值越小, 限幅噪声越大。因此直流偏置光 OFDM 系统性能很大程度上取决于直流偏移量  $b$  值的大小。在大气激光通信中, 平均发射光功率受限于人眼安全的

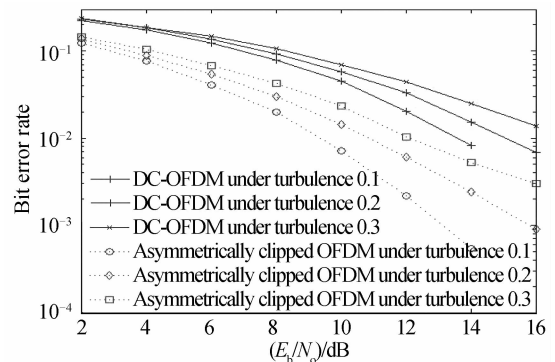


图4 非对称限幅光 OFDM 与直流偏置光 OFDM 系统误码率

Fig. 4 BER as a function of  $E_b/N_0$  for asymmetrically clipped optical OFDM system and DC optical OFDM system

考虑, 直流偏移量  $b$  不可能很大, 因此直流偏置光 OFDM 系统性能不如非对称限幅光 OFDM 系统。

#### 3.2 非对称限幅光 OFDM 系统频谱利用率

在无线 OFDM 系统中, 设共有  $N$  路子载波, 子信道码元持续时间为  $T_s$ , 每路子载波均采用  $M$  进制的调制, 则它占用的频带宽度等于

$$B_{OFDM} = (N+1)/T_s \quad (7)$$

信息传输速率为

$$R_b = (N \log_2 M)/T_s \quad (8)$$

则 RF-OFDM 系统频带利用率为

$$\eta = \frac{R_b}{B_{OFDM}} = \frac{N \log_2 M}{T_s} \cdot \frac{1}{B_{OFDM}} = \frac{N}{N+1} \log_2 M \quad (9)$$

然而在大气激光通信系统中采用的是非对称限幅光 OFDM 调制方案, 非对称限幅光 OFDM 仅用

奇数子载波传输数据,所以系统中实际共有  $N/2$  路子载波.为了计算方便,设系统的传输速率为  $R_b = 1$  b/s,子载波的调制方式为 4QAM,因此,可以得到非对称限幅光 OFDM 系统带宽为

$$B_{\text{CO-OFDM}} = \frac{2(N/2+1)}{T_s} = \frac{2(N/2+1)}{\frac{N}{2} \log_2 M} = 1 + \frac{2}{N} \quad (10)$$

因此,非对称限幅光 OFDM 系统的频带利用率为

$$\eta = \frac{R_b}{B_{\text{CO-OFDM}}} = \frac{1}{1+2/N} \quad (11)$$

在 OOK 系统中,它的带宽等于脉冲持续时间的倒数,由于系统的传输速率  $R_b = 1$  b/s,所以 OOK 系统带宽  $B_{\text{OOK}} = 1$ ,频带利用率  $\eta_{\text{OOK}} = 1$ .由式(10)和(11)可以看出,非对称限幅光 OFDM 系统带宽略大于 OOK 系统,非对称限幅光 OFDM 系统带宽利用率略小于 OOK 系统.但是两个系统对光功率的需求却是截然不同的.

由于比特光能量与比特电能量分别为

$$\begin{aligned} E_{b(\text{opt})} &= E[s(t)]/R_b \\ E_{b(\text{elect})} &= E[s^2(t)]/R_b \end{aligned} \quad (12)$$

因此,可以得出光信噪比与电信噪比之间的转换关系

$$(E_{b(\text{opt})}/N_o) = (E^2[s(t)]/E[s^2(t)])(E_{b(\text{elect})}/N_o) \quad (13)$$

图 5 给出了非对称限幅光 OFDM 系统和 OOK 系统频带利用率与光信噪比之间的关系.在大气湍流强度  $\sigma_{\text{sc}}^2 = 0.1$  时,OOK 系统频带利用率为 1,非对称限幅光 OFDM 系统频带利用率为 0.97,OOK 系统需要的光信噪比为  $E_{b(\text{opt})}/N_o = 11$  dB,而非对

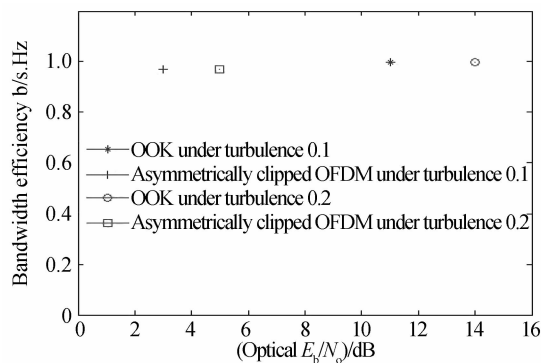


图 5 非对称限幅光 OFDM 与 OOK 系统频带利用率  
Fig. 5 Optical  $E_b/N_o$  versus bandwidth efficiency for asymmetrically clipped optical OFDM system and OOK system

称限幅光 OFDM 系统需要的光信噪比为  $E_{b(\text{opt})}/N_o = 3$  dB.虽然非对称限幅光 OFDM 系统频带利用率比 OOK 系统略小,但它对光功率的需求和 OOK 系统相比却大大减少了,这一点对大气激光通信系统来说特别重要.

## 4 结论

本文分析了非对称限幅光 OFDM 调制技术的基本原理及其在大气激光通信系统中的应用,并把非对称限幅光 OFDM 调制方案与传统的 OOK 及直流偏置光 OFDM 调制方案进行了比较,仿真结果表明非对称限幅光 OFDM 调制方案完全优于上述两个方案.此外,非对称限幅光 OFDM 是一种光功率效率很高的调制技术,这一点特别适合光功率受限于人眼安全考虑的大气激光通信系统.

### 参考文献

- [1] DIXON B J, POLLARD R D, IEZEKIEL S. Orthogonal frequency-division multiplexing in wireless communication systems with multimode fiber feeds[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, **49**(8): 1404-1409.
- [2] LOWERY A J, DU L, ARMSTRONG J. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2006: 1-3.
- [3] KOFFMAN I, ROMAN V. Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802.16 [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, **40**(4): 96-103.
- [4] ZHU Xiao-ming, KAHN J M. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, **50**(8): 1293-1300.
- [5] RAO Rui-zhong. General optical scintillation in turbulent atmosphere[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, **6**(8): 547-549.
- [6] ZHANG Yi-xin, ZHU Tuo, TAO Chun-kan. Aperture-averaging effects for weak to strong scintillations in turbulent atmosphere[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(7): 373-375.
- [7] KIASALEH K. Performance of APD-based, PPM free-space optical communication systems in atmospheric turbulence[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, **53**(9): 1455-1461.
- [8] GONZALEZ O, PEREZ-JIMENEZ R, RODRIGUEZ S, et al. OFDM over indoor wireless optical channel [J]. *IEEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, **152**(4): 199-204.
- [9] ARMSTRONG J, LOWERY A J. Power efficient optical OFDM[J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(6): 370-372.

## Performance Analysis of Atmospheric Laser Communication System Based on Asymmetrically Clipped Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing Intensity Modulation

WANG Yong, CAO Jia-nian

*(College of Information & Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)*

**Abstract:** The asymmetrically clipped orthogonal frequency division multiplexing technique was applied to the atmospheric communication system, and the performance of atmospheric communication system was analyzed using asymmetrically clipped orthogonal frequency division multiplexing technique through atmospheric turbulence channels. On this basis, asymmetrically clipped optical orthogonal frequency division multiplexing modulation was compared with on/off keying modulation and DC optical orthogonal frequency division multiplexing modulation, which was simulated in the atmospheric turbulence channel. The simulation results show that the proposed scheme can satisfy the requirements of atmospheric laser communication system.

**Key words:** Atmospheric laser communication; Asymmetrically clipped optical OFDM; Atmospheric turbulence