

FSO-WOFDM 系统的实验研究

柯熙政, 张棋雯

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在无线光正交频分复用(FSO-OFDM)系统中,因需要加入循环前缀而消耗近 20%的带宽,降低了数据传输效率。为了进一步减少带宽损耗,改善系统性能,采用小波包变换代替 FSO-OFDM 中的傅里叶变换,设计了一种基于小波变换的无线光正交频分复用(FSO-WOFDM)系统。该系统无需加入循环前缀,利用小波基函数的正交性来抑制子载波间的干扰。根据 FSO-WOFDM 系统原理,研究了信道估计方法、湍流强度、小波基对 FSO-WOFDM 系统误码率的影响,对比分析了 FSO-WOFDM 与 FSO-OFDM 的系统性能,并通过实验验证了 FSO-WOFDM 系统的可行性及其优良的抗混合噪声干扰能力。

关键词: 无线光通信; 离散小波包变换; 正交频分复用; Mallat 算法

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1022003

Experimental study on FSO-WOFDM system

Ke Xizheng, Zhang Qiwen

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

Abstract: In the free space optical orthogonal frequency division multiplexing (FSO-OFDM) system, nearly 20% of the bandwidth is consumed due to add a cyclic prefix, the data transmission efficiency is reduced. In order to further reduce the bandwidth loss and improve the system performance, a wavelet packet transform was used instead of the Fourier transform in FSO-OFDM, free space optical orthogonal frequency division multiplexing system based on wavelet transform (FSO-WOFDM) was designed. The system didn't need to add a cyclic prefix, and the orthogonality of the wavelet basis functions was used to suppress inter-carrier interference. According to the principle of FSO-WOFDM system, the effects of channel estimation method, turbulence intensity and wavelet based on the bit error rate of FSO-WOFDM system were studied. The system performance of FSO-WOFDM and FSO-OFDM was compared and analyzed. The experiment verifies the feasibility of FSO-WOFDM system and its excellent ability to resist mixed noise.

Key words: free space optical; discrete wavelet packet transform; OFDM; Mallat algorithm

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054); 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 柯熙政(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事无线激光通信方面的研究。Email: xzke@263.net

0 引言

在无线光正交频分复用 (FSO-OFDM) 中, 当 OFDM 信号经过时变信道时, 子载波的正交性遭到破坏。由于小波基函数良好的正交性, 所以可以利用正交的小波基, 构建一种基于小波变换的无线光正交频分复用(FSO-WOFDM)系统。

目前国内外多对无线光通信中的多载波系统和在高斯信道、多径瑞利衰落信道下的小波 OFDM (WOFDM)进行了研究。2001 年, B.G. Negash 等^[1]提出 WOFDM 的概念。2001 年, M.J. Manglani 等^[2]研究了在无线衰落信道下小波调制。2003 年, Omoaki Ohtsuki^[3]提出了无线光多载波调制的概念。2006 年, O.Gonzalez^[4]提出了应用于室内环境的自适应 FSO-OFDM 方案, 这种方案数据速率高而且不需要道均衡。2009 年, Marius Oltean 等^[5]提出了在 WOFDM 系统中随着小波变换迭代次数的增加, 误码性能降低。2012 年, Volkan Kumbasar 等^[6]分析了在多径瑞利衰落信道下 OFDM 和 WOFDM 的优缺点。2014 年, Alaa Ghaith 等^[7]提出了加性高斯白噪声(AWGN)信道下 WOFDM 系统, 并对比了小波调制和小波包调制下的系统性能。2015 年, 柯熙政等^[8]提出了无线光 OFDM 系统, 并用实验验证了该系统良好的性能。2016 年, Chafii M 等^[9]对比了基于 Meyer 小波的 WOFDM 和传统 OFDM 的峰均功率比和码率等问题。目前国内外多研究于无线光通信中的 FSO-OFDM 系统和高斯信道、多径瑞利衰落信道下的 WOFDM。

文中将小波变换与 FSO-OFDM 系统结合实现了 FSO-WOFDM 系统, 并将 FSO-WOFDM 系统与 FSO-OFDM 系统的误码率性能进行对比, 表明 FSO-WOFDM 在提高通信系统性能上具有很强的技术优势和广阔的应用前景, 是对 FSO-OFDM 的改进和提升。

1 FSO-WOFDM 的基本理论

FSO-WOFDM 系统是用逆小波变换/小波变换 (IDWT/DWT) 替代了 FSO-OFDM 中的逆快速傅里叶变换/快速傅里叶变换 (IFFT/FFT)。该系统不再需要加入循环前缀, 从而降低了系统的复杂度, 提高了信息传输效率。

图 1 为 FSO-WOFDM 系统的实现框图。如图 1 所示, 在发送端信号经过串并转换为多路数据, 对每路数据进行符号映射后再经逆小波变换综合成一路信号, 将这路信号加载到光发射机上进行发送; 接收端信号通过光接收机后将信号进行小波变换, 分解为原来的多路数据, 再对信号进行逆星座映射、串并转换, 还原出原来的一路输入数据。

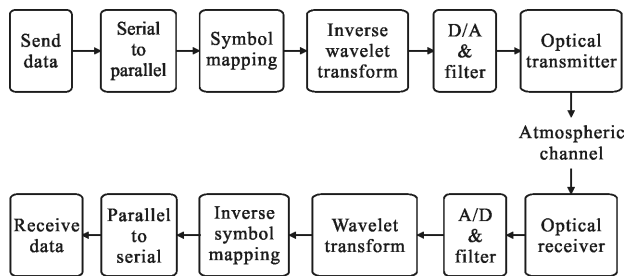


图 1 FSO-WOFDM 系统

Fig.1 System of FSO-WOFDM

图 2 为 FSO-WOFDM 系统的调制解调框图。根据 Mallat 算法^[10], 发送端串并转换后的 N 路信号需要两两一组进行 \log_2^N 次小波包综合直到变为一路信号; 接收端则需要将一路信号进行 \log_2^N 次小波包分解恢复原来的为 N 路信号。

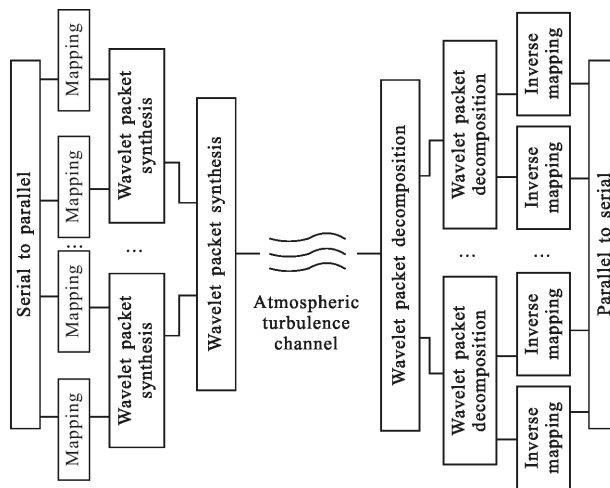


图 2 FSO-WOFDM 系统中调制解调过程

Fig.2 Modulation and demodulation process of FSO-WOFDM

2 仿真分析

2.1 大气湍流信道模型

光在大气传输过程中湍流会对光的强度造成起伏变化。湍流的强弱用归一化的光强起伏方差 σ_I^2 表

示^[11]:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} \quad (1)$$

式中: I 为光强; $\langle \rangle$ 表示均值。

当湍流强度较弱时, 光强起伏服从对数正态分布模型, 其概率密度函数为^[12]:

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

式中: σ_I^2 为对数起伏方差, 可以表示为 $\sigma_I^2 = 1.23C_n^2 \cdot k^{7/6}L^{11/6}$ 。其中, k 是波数; L 是传输距离; C_n^2 是大气折射率常数。

当湍流强度较弱时, 光强起伏方差服从对数正态分布模型, 其概率密度函数见参考文献[12]; 在湍流强度较强时, 光强起伏方差服从 Gamma-Gamma 分布^[13], 其概率密度函数见参考文献[14]。在下面仿真过程中, 将以 σ_I^2 作为描述在不同湍流强度下湍流大小的指标。

FSO-WOFDM 系统的信道噪声模型如图 3 所示。接收信号 $y(t)$ 是由发送端的已调信号 $s(t)$ 在信道中受到加性高斯白噪声 $n(t)$ 和大气湍流产生的乘性噪声 $k(t)$ 的共同作用后得到的。

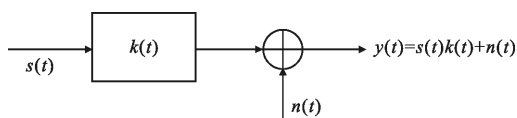


图 3 噪声模型

Fig.3 Noise model

2.2 不同调制方式下 FSO-WOFDM 系统性能

根据图 1 所示, 在弱湍流条件下对 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 进行对比分析。其中系统的子载波数为 128 路, 每一路发送 1 000 bit 数据, 采用 db4 小波基作为载波, 子载波映射采用 BPSK、QPSK、QAM-16 三种方式。

图 4 是当乘性噪声光强起伏方差 $\sigma_I^2 = 0.1$ 时分别采用 BPSK、QPSK 和 QAM16 对 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 进行仿真得到的误码率曲线图。从图 4 可以看出, 当 $SNR = 12$ dB 时, BPSK 调制方式下 FSO-OFDM 误码率为 10^{-6} , FSO-WOFDM 的误码率为 10^{-7} , 在三种方式中误码率最低; QPSK 调制下 FSO-

OFDM 的误码率为 10^{-3} , FSO-WOFDM 的误码率为 10^{-4} ; QAM16 调制下 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 的误码率为 10^{-2} 左右, 在三种方式中误码率最高。可以得出在弱湍流条件下, FSO-WOFDM 系统性能明显优于 FSO-OFDM。

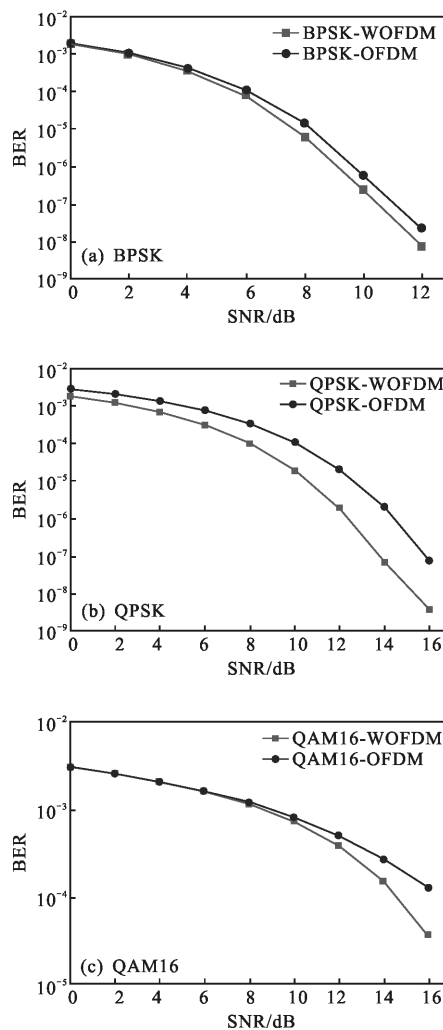


图 4 不同调制方式 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 误码率对比

Fig.4 Comparison of BER of FSO-OFDM and FSO-WOFDM with different modulation methods

在中强湍流下, FSO-WOFDM 系统的误码率性能也都好于 FSO-OFDM 系统。可以得出, 在大气信道中 FSO-WOFDM 系统相比于 FSO-OFDM 误码率更低。

图 5 为在弱湍流信道下加性噪声 $SNR = 20$, 乘性噪声光强起伏方差 $\sigma_I^2 = 0.1$ 的情况下, FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 解调信号星座图。当星座图上的点越聚合时, 说明系统对于噪声的抵抗能力越强; 当星

座图上的点越分散时,说明系统对于噪声的抵抗能力越弱。由图 5 可以看出,图 5(b)的星座点聚合度较图 5(a)的高,说明相比于 FSO-OFDM,FSO-WOFDM 抗混合噪声的能力更强。

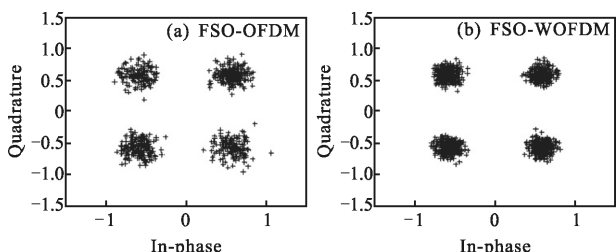


图 5 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 解调信号星座图
Fig.5 FSO-OFDM and FSO-WOFDM demodulated signal constellation

2.3 FSO-WOFDM 系统的信道估计

信道估计是通过在系统的发送端插入导频,在接收端对信道模型参数进行估计。在 OFDM 中常用最小二乘(LS)、线性最小均方误差(LMMSE)和 DFT 等方法。对 FSO-WOFDM 进行信道估计是在小波包综合前插入导频,在接收端进行信道估计并在小波包分解后去除导频。

图 6 为在不使用信道估计方法、LS 方法和 LMMSE 方法下对 FSO-WOFDM 系统进行信道估计得出的误码率曲线。由图 6 可以看出,未加入任何信道估计方法的 FSO-WOFDM 系统误码率低于加入了信道估计的系统。使用 LMMSE 的 FSO-WOFDM 的误码率要低于使用 LS 的 FSO-WOFDM。

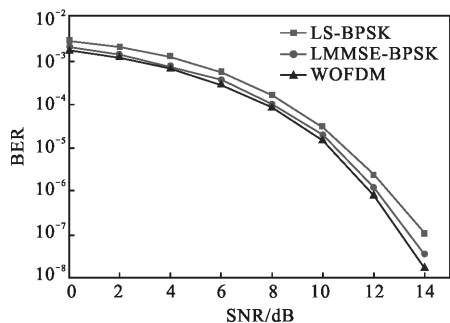


图 6 不同信道估计方法下 FSO-WOFDM 的误码率
Fig.6 FSO-WOFDM error rate curve under different channel estimation methods

这是由于 LS、LMMSE 均是频域的信道估计方法,但 WOFDM 系统是将信号从小波域变换到时域,再从时域变换到小波域的,所以以上两种方法已经

不适用于 FSO-WOFDM 系统,因此造成了信道估计后误码率反而下降的情况。如果对 FSO-WOFDM 进行信道估计来提高系统性能,需要在小波域或时域寻找更合适的方法。

2.4 不同湍流强度下 FSO-WOFDM 系统的性能

在无线光通信中,湍流的强度影响着通信的质量。图 7 为不同湍流强度下 FSO-WOFDM 的误码率性能。由图 7 得,当 SNR=12 dB 时,采用 BPSK 映射的 FSO-WOFDM 在弱湍流下的误码率为 10^{-7} ,在中强湍流下的误码率为 10^{-6} ;采用 QPSK 映射的 FSO-WOFDM 系统在弱湍流中的误码率为 10^{-4} ,在中强湍流中误码率为 10^{-3} 。由此验证了 FSO-WOFDM 系统在湍流强度较低时具有良好的传输性能。

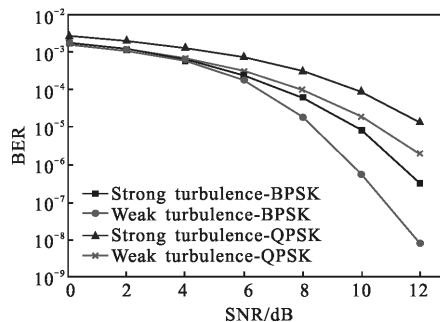


图 7 不同湍流强度下 FSO-WOFDM 的误码率
Fig.7 Bit error rate of FSO-WOFDM under different turbulence intensities

图 8 和图 9 表示的是在弱湍流信道下加性噪声 SNR=20,乘性噪声光强起伏方差分别为 $\sigma_I^2=0.1$ 和 $\sigma_I^2=0.3$ 的情况下,FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 系统解调信号的星座图。对比图 8、图 9 可以看出:当 σ_I^2 由 0.1 增大到 0.3 时,星座点分布变得弥散,系统性

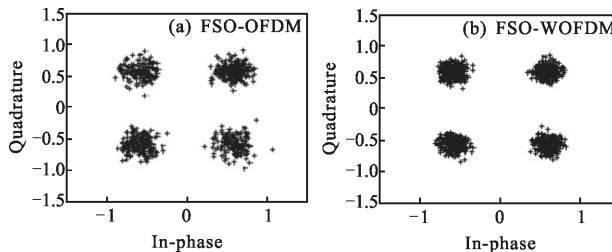


图 8 SNR=20, $\sigma_I^2=0.1$ 时 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 解调信号星座图
Fig.8 FSO-OFDM and FSO-WOFDM demodulated signal constellation when SNR=20, $\sigma_I^2=0.1$

能降低。分别对比图 8、图 9 中的(a)和(b)的星座图可以发现,在相同 SNR 值和光强起伏方差共同作用于系统的条件下,图(b)的星座点聚合度较图(a)的高。说明相比于FSO-OFDM 系统,FSO-WOFDM 系统的抗混合噪声干扰的能力更强。

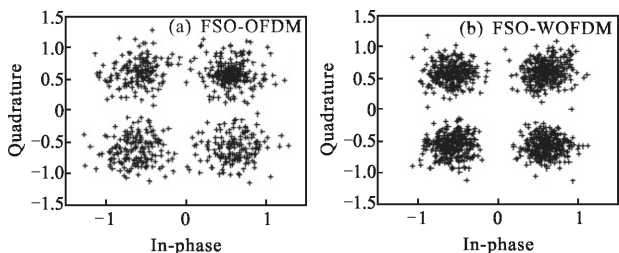


图 9 SNR=20, $\sigma_i^2=0.3$ 时 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 解调信号星座图

Fig.9 FSO-OFDM and FSO-WOFDM demodulated signal constellation when SNR=20, $\sigma_i^2=0.3$

2.5 不同小波基的 FSO-WOFDM 系统的性能

在 FSO-WOFDM 系统中,需要合适的小波基。首先,小波基必须是正交的;其次,小波要满足紧支撑的条件。在小波族中, Daubechies(dbN)小波满足上述要求。

图 10 为使用四种 Daubechies 小波基的 FSO-WOFDM 系统误码率曲线。从图 10 可以得出,当 SNR=12 dB 时,使用 db2 小波基的 FSO-WOFDM 性能最差,误码率大于 10^{-3} ;使用 db12 小波基的 FSO-WOFDM 性能最好,误码率约为 10^{-5} 。当 Daubechies 小波消失矩阶数 N 越来越大,FSO-WOFDM 系统的误码越来越低。

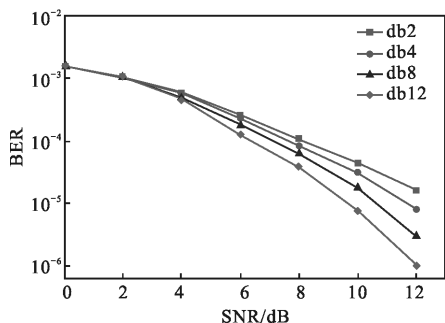


图 10 使用不同 dbN 的 FSO-WOFDM 误码率曲线

Fig.10 Bit error rate curves of FSO-WOFDM systems with different dbN

这表明 N 值越大,滤波器长度越长,系统能有效

克服 ICI 的能力越强。但是在实现 FSO-WOFDM 选择小波基时,应将系统误码率要求和系统复杂度这两个因素综合考虑。

3 实验分析

3.1 实验装置

其中 FSO-WOFDM 数据帧共有 128 个子载波,子载波调制方式为 QPSK。实验是在西安理工大学教五楼六楼道中进行的,激光器的波长为 850 nm,光的传输距离为 50 m。

FSO-WOFDM 实验装置各模块如图 11 所示。在实验中,使用 DG5102 信号发生器对信号的幅值及偏置进行调整使其适合在大气中进行传输。选用 LQA850 激光器作为光源,接收时将光耦合到光纤中再用光电探测器对信号进行接收。

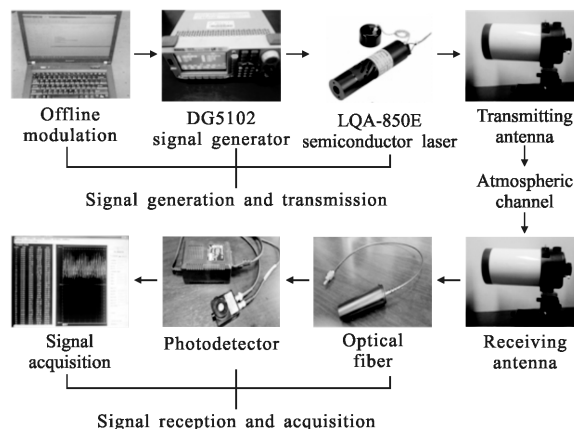


图 11 实验装置各模块实物图

Fig.11 Modules of experimental device

3.2 实验验证

图 12 为发送端的已调波形。将图 12 所示的 FSO-WOFDM 已调信号通过激光器发送,接收端将

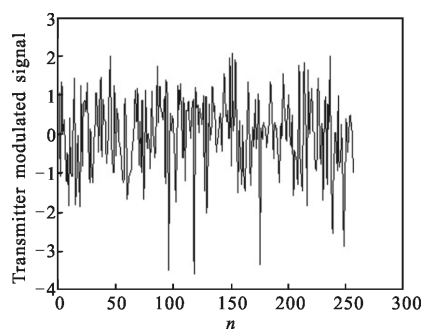


图 12 发送端已调信号波形

Fig.12 Modulated signal waveform of transmitter

电信号进行采集处理,采集到的数据如图 13 所示。可以看出接收端产生了畸变,但与发送端是大致相同的。

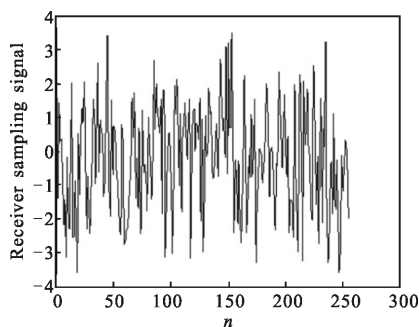


图 13 接收端抽样信号波形

Fig.13 Sampling signal waveform of receiver

图 14 为每一路发送的比特数和误比特率的关系图。从图 14 可以看出,当每一路发送 100bit 时,误比特率约为 2.3×10^{-4} ; 当每一路发送 1000 bit 时,误比特率约为 4.7×10^{-5} 。由此可以得出,当发送的数据量不断增加,FSO-WOFDM 系统的误比特率不断减少。

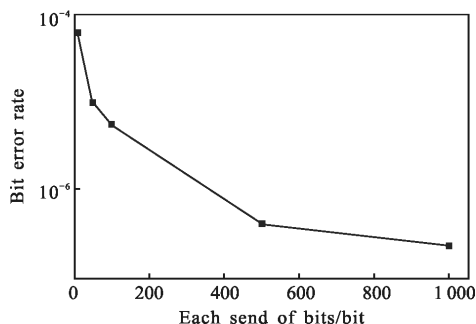


图 14 每一路发送的比特数与误比特率关系

Fig.14 Relationship between each send of bits and bit error rate

图 15(a)和图 15(b)为每一路发送 4 bit 数据时 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 接收端解调信号星座图。从图 15 中可以看出,FSO-WOFDM 系统星座点聚

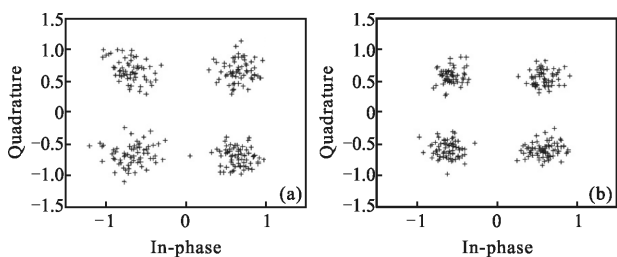


图 15 FSO-OFDM 和 FSO-WOFDM 解调信号星座图

Fig.15 Demodulated signal constellation diagram of FSO-OFDM and FSO-WOFDM

合清晰,FSO-OFDM 系统接收端星座图的星座点相比较于 FSO-WOFDM 星座点弥散较严重,可以得出 FSO-WOFDM 系统抵抗噪声能力优于 FSO-OFDM。这是由于 FSO-WOFDM 中小波基良好的正交性使得系统抗信道间干扰的能力更好。

4 结 论

文中将小波变换应用于无线光多载波通信中,从多个方面入手研究了 FSO-WOFDM 系统的误码率特性。证明了 FSO-WOFDM 系统相比于 FSO-OFDM 具有更低的误码率和更好的抗噪声干扰能力,通过实验验证了该系统的可行性和对抗噪声干扰的优势。结果表明 FSO-WOFDM 不仅可以减少近 20% 的带宽损耗,还能降低系统运算的复杂度。FSO-WOFDM 不仅实现了 WOFDM 与无线光通信的结合,而且为解决 FSO-OFDM 系统缺陷提供了新的方法,提高了 FSO-OFDM 的信息传输速率和可靠性,具有较高的研究价值。

参 考 文 献:

- [1] Negash B G, Nikookar H. Wavelet based OFDM for wireless channels [C]//Vehicular Technology Conference, 2001, 1: 688-691.
- [2] Manglani M J, Bell A E. Wavelet modulation performance in Gaussian and Rayleigh fading channels [C]//Military Communications Conference, 2001, 2: 845-849.
- [3] Tomoaki Ohtsuki. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 74-79.
- [4] Gonzalez O, Perez-Jimenez R, Rodriguez S, et al. Adaptive OFDM system for communications over the indoor wireless optical channel [J]. *IEEE Proc Optoelectron*, 2006, 153(4): 139-144.
- [5] Oltean M, Nafornia M. Errors per scale statistics for a wavelet OFDM transmission in flat fading channels [C]//IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing, 2009(7): 119-124.
- [6] Kumbasar V, Kucur O. Performance comparison of wavelet based and conventional OFDM systems in multipath Rayleigh fading channels [J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(5): 841-846.
- [7] Ghaith A, Hatoum R, Mrad H, et al. Performance analysis of

- the Wavelet-OFDM new scheme in AWGN channel [C]// Third International Conference on Communications and Information Technology, 2014(2): 100-106.
- [8] Ke Xizheng, Lei Sichen, Li Beilei. Experimental study on free space optical orthogonal frequency division multiplexing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42 (12): 1205003. (in Chinese)
- [9] Chafii M, Harbi Y J, Burr A G. Wavelet-OFDM vs. OFDM: Performance comparison [C]//International Conference on Telecommunications, 2016: 1-5.
- [10] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [11] Ke Xizheng, Zhang Yu. Scintillation of partially coherent beam in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0106001. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] Chen Mu, Ke Xizheng. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822009. (in Chinese)
- [14] Bayaki E, Schober R, Mallih R K. Performance analysis of free-space optical systems in Gamma-Gamma fading [C]// IEEE Global Communications Conference, 2008, 57 (11): 1-6.