

文章编号: 2095-4980(2016)01-0053-05

W波段正交频分复用信号传输系统的实验研究

陈 龙^{a,b}, 肖江南^{a,b}, 余建军^{a,b}

(复旦大学 a.电磁波信息科学教育部重点实验室; b.信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 实验研究了工作在W波段的正交频分复用毫米波传输系统的传输特性。系统中应用了优化信道估计的符号内频域平均技术和减少信号峰均比的基于离散傅里叶变换的扩频技术(DFT-Spread)来提高传输性能。实验成功地将21.2 Gb/s 84.5 GHz载频的16QAM OFDM信号传输2 m的无线距离, 误码率控制在7%冗余度的软判决纠错码门限内(比特误码率为 3.8×10^{-3})。

关键词: W波段; 光载毫米波; 符号内频域平均; 基于离散傅里叶变换的扩频技术

中图分类号: TN928

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201601.0053

Experimental investigation on a W-band OFDM transmission system

CHEN Long^{a,b}, XIAO Jiangnan^{a,b}, YU Jianjun^{a,b}

(a.Education Ministry Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Science; b.Information Science and Engineering School, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A millimeter-wave system at W-band with sixteen Quadrature Amplitude Modulation (16QAM) optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) signals transmission is experimentally demonstrated. Intra-Symbol Frequency-domain Averaging(ISFA) based channel estimation and the Discrete Fourier Transform-Spread(DFT-Spread) techniques are employed to improve the system performance. A 21.2 Gbit/s 16QAM OFDM signal at 84.5 GHz can be successfully transmitted over 2 m wireless delivery under a 7% soft-decision forward-error-correction threshold(bit error rate of 3.8×10^{-3}).

Key words: W band; Radio over Fiber(RoF); Intra-Symbol Frequency-domain Averaging; Discrete Fourier Transform-Spread techniques

近年来移动互联网流量呈爆炸式增长, 无线化和宽带化是当今信息行业的热点。光载无线通信技术(RoF)充分结合光纤和无线的传输特点, 能够实现高频信号有线传输和超宽带无线接入。中国4G网络发展正处于快车道, 作为4G核心技术, 正交频分复用(OFDM)技术因频谱利用率高, 抗干扰能力强, 成为研究热点。将OFDM技术应用于RoF系统中, 能帮助毫米波信号抵抗光纤链路中色散效应和无线传输中多径衰落, 被视为解决未来宽带无线接入的有效方法。在高频率频谱资源中, 许多国家在60 GHz附近划分了连续的免许可频谱资源, 吸引了许多公司和科研团队对该频段信号的研究。目前60 GHz毫米波段的光载无线通信系统已经比较成熟^[1-4]。处于75 GHz~110 GHz的W波段毫米波因有着更小的大气衰减, 更高的频率和带宽, 能实现更高速率的光纤和无线无缝连接传输, 获得了国内外大量关注和研究^[5-17]。

采用光子技术产生电毫米波信号具有宽带宽的优点。其中采用如下几种方式能够产生毫米波信号^[18-20]: 直接强度调制、外部调制和光外差调制。直接强度调制受限于直接激光器的带宽, 很难产生高频率的光毫米波; 外部调制方案通过将电毫米波调制到外部调制器上, 调制方式中双边带调制格式毫米波会受到严重的色散影响, 单边带调制格式通常被选择用来降低色散影响; 光外差调制方案通常传输2个频率之差为所需毫米波频率的光波信号, 这2个光信号通过外差拍频产生光毫米波。

本文研究了工作在W波段的毫米波传输系统, 传输信号采用OFDM调制, 光毫米波的产生通过光外差调制方式。系统中应用了符号内频域平均技术(ISFA)来优化信道估计以及基于离散傅里叶变换的扩频技术(DFT-Spread)来减少峰均比。实验结果表明, 应用了ISFA技术和基于DFT-Spread技术后, 系统性能相比之前得到明显提升。

收稿日期: 2014-11-24; 修回日期: 2015-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61325002; No. 61250018); 上海市科委基金资助项目(No.13JC1400700)

1 ISFA技术和DFT-Spread技术理论

1.1 ISFA技术

信道估计在OFDM信号传输系统中是一个重要的步骤,通过准确的信道响应估计,光纤传输链路中的色散和偏振色散等物理损耗可以被获知,传输信号能通过信道均衡得以恢复。在直接检测OFDM系统中,通过光电转换后检测器产生的接收噪声对系统造成很大影响。ISFA技术可以通过抑制接收噪声来提高信道估计的准确度^[21-22]。

对于OFDM系统,通常利用训练序列来估计信道的频率响应。ISFA即是在一个训练序列周期内,已知第 k 个子载波的信道响应为 H_k ,将与其相邻的前 m 个子载波和后 m 个子载波,共 $2m+1$ 个子载波信道响应值取平均,计算得到第 k 个子载波的优化信道响应值,如式(1)所示:

$$H_{\text{ISFA}} = \frac{\sum_{k'=k-m}^{k+m} H_{k'}}{\min(k'_{\max}, k+m) - \max(k'_{\min}, k-m) + 1} \quad (1)$$

式中 $k'_{\max}$ 和 $k'_{\min}$ 分别代表最大和最小的子载波序号,当 k' 的值不在最小和最大子载波序号之间时, $H_{k'}$ 的取值为0。得到优化后的信道响应值可用于恢复接收的信号数据。

ISFA中每个子载波利用的平均样点数目 $2m+1$ 称为抽头数目,噪声功率会随着ISFA抽头的增加而减小,因为平均样点数目会变得足够大以抑制噪声的功率。为减少信道估计时噪声的影响,ISFA的抽头应该很大。但是ISFA应用时是基于用于平均的样点之间高度相关这一假设,当ISFA的抽头很大时,样点相关性会减小,因此抽头不能非常大。当选择ISFA的抽头大小时,需要找到噪声抑制程度和信道估计准确的平衡点,本实验使用的抽头数目为9。

1.2 DFT-Spread技术

OFDM调制方式有一个缺点是信号具有很高的峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR)。当OFDM信号的瞬时功率值大于功率放大器的工作动态范围时,放大器会对信号进行剪裁,产生非线性失真。DFT-Spread技术可用来减小传输信号的峰均比,使信号具有单载波信号的特性^[22]。

一个OFDM信号的时域波形可以表示为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi \frac{k-1}{T_s} t}, \quad t \in [0, T_s] \quad (2)$$

式中: N 为OFDM信号中的子载波数目; T_s 为码元符号的周期; a_k 表示每个子载波上携带的数据信息,一般经过QAM或者PSK调制。OFDM信号的PAPR定义式为:

$$\text{PAPR} = \frac{\max \{ |s(t)|^2 \}}{E \{ |s(t)|^2 \}}, \quad t \in [0, T_s] \quad (3)$$

假设信号功率归一化,则:

$$E \{ |s(t)|^2 \} = N, \quad t \in [0, T_s] \quad (4)$$

$$|s(t)|^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^N a_k a_n^* e^{j2\pi \frac{k-n}{T_s} t} = N + 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{k=n+1}^N a_k a_n^* e^{j2\pi \frac{k-n}{T_s} t} \right\} = N + 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k-n}{T_s} t} \sum_{n=1}^{N-k} a_{k+n} a_n^* \right\} \quad (5)$$

对于复数,有 $\operatorname{Re}(z) \leq |z|, |\sum z_n| \leq \sum |z_n|$,则:

$$\text{PAPR} = \frac{N + 2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{k=1}^{N-1} e^{j2\pi \frac{k-n}{T_s} t} \sum_{n=1}^{N-k} a_{k+n} a_n^* \right\}}{N} \leq 1 + \frac{2}{N} \sum_{k=1}^{N-1} |\rho(k)| \quad (6)$$

式中 $\rho(k)$ 代表快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)输入信号的非周期自相关函数^[23],具体表示为:

$$\rho(k) = \sum_{n=1}^{N-k} a_{k+n} a_n^*, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

当IFFT输入信号的自相关函数旁瓣越小,峰均比的上限越小。采用DFT矩阵可以降低序列的相关性,以此减小系统中信号的峰均比。如图1所示,与传统OFDM系统相比,DFT-Spread方案在调制端信号进入IDFT之前,先进行M点的DFT,然后插入零符号,扩充成N点的新序列,再通过IDFT变换,其他过程与传统OFDM调制一样,此外在解调端进行OFDM信号解调时相应地要多进行一个IDFT的过程。

2 实验装置及结果

图2为16QAM-OFDM W-波段毫米波传输系统实验装置图。在发送端,外腔激光器(ECL1)产生波长为

1 549.232 nm的光波进入光IQ调制器,被16QAM的电OFDM信号调制。电OFDM信号由Matlab离线产生,然后通过带宽为13 GHz,采样频率为8 GSa/s的任意波形产生器生成。该任意波产生器的3 dB带宽为13 GHz。离线端OFDM信号先经过16QAM调制,一个符号周期内有256个子载波,其中数据子载波193个,再加上32个循环前缀后,OFDM码元长度为288。传输信号过程中,每100个OFDM符号传输一个训练序列。因此可以计算出系统总的的数据比特速率为: $8 \text{ GS/s} \times 193/256 \times 4 \times 256 / (32 + 256) \times 0.99 = 21.2 \text{ Gb/s}$ 。经OFDM调制后的光信号通过掺铒光纤放大器(EDFA)补偿损耗,与另一个外腔激光器(ECL2)产生的波长为1 548.564 nm光波经过保偏光耦合器耦合。耦合后的光信号频谱图如图2所示,耦合后的2路光信号功率大小相同。耦合光信号随后到达外差拍频端,在3 dB带宽为90 GHz的光探测器内拍频产生84.5 GHz的W波段电毫米波信号。信号经过电放大器(增益30 dB,饱和输出3 dBm)后通过W波段喇叭天线(WR-10接口,25 dBi增益)发射进行无线传输。信号在自由空间中传输2 m的无线距离后被另外一个相同的W波段喇叭天线接收,之后电毫米波信号与16 dBm功率的75 GHz本地射频混频进行下变频操作。下变频信号通过电放大器后进行外差探测。在接收端,16QAM-OFDM信号被采样频率为50 GS/s、模拟带宽为16 GHz的实时数字存储示波器(Agilent DSA7164C)获得。随后OFDM信号在Matlab离线模块中进行数字信号处理,得到原始数据,进行误码测量。

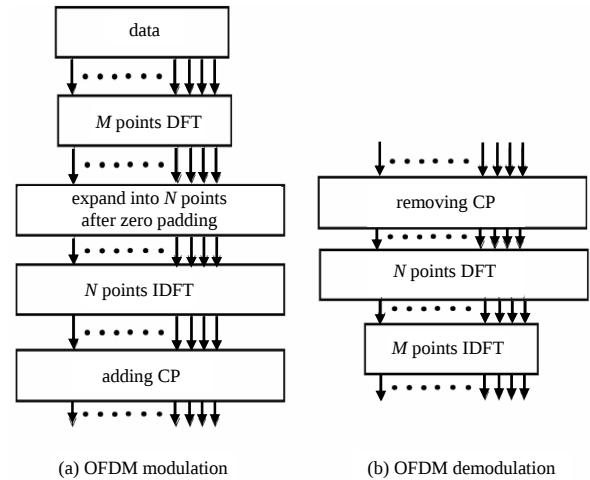


Fig.1 Principle of DFT-spread OFDM generation and recovery
图1 DFT-spread OFDM 调制与解调原理图

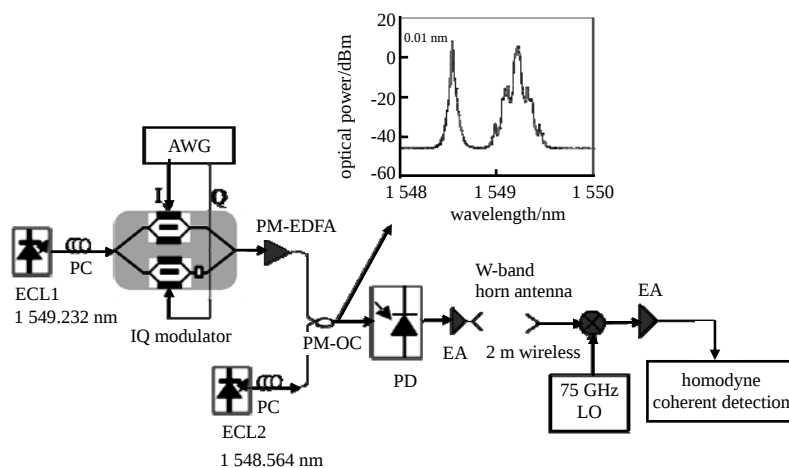


Fig.2 Schematic of 16QAM-OFDM W-band RoF communication systems
图2 16QAM-OFDM W-波段RoF 传输系统实验装置图

图3(a)~3(f)展示了光接收功率分别为-5.5 dBm和-5.3 dBm时的接收信号星座图、频谱图以及时域波形图。当接收功率为-5.5 dBm时,系统仅使用ISFA技术,而在接收功率为-5.3 dBm时,系统使用ISFA和DFT-Spread技术。从星座图可以看出,在接收功率大小基本相同的条件下,2种技术均应用的接收信号对比未使用DFT-Spread技术的信号,星座图明显较为收敛,系统性能较好。图4展示了不同光接收功率情况下系统的误码曲线。从图中可以

看出,应用ISFA和DFT-Spread 2种技术的系统在光接收功率为 -6.3 dBm时,比特误码率低于 3.8×10^{-3} ,其性能较分别只使用一种技术的系统性能有所提高,接收灵敏度提高 0.5 dB以上。

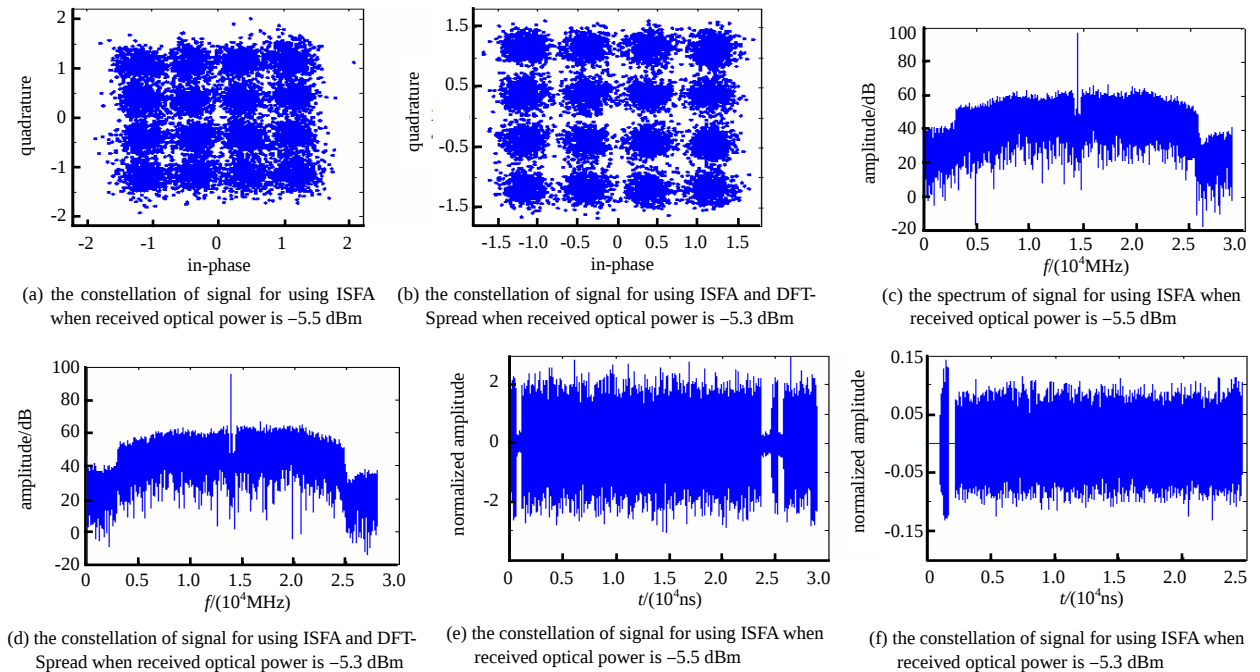


Fig.3 Constellation, spectrum and waveform of OFDM when the received optical power is -5.5 dBm and -5.3 dBm

图3 光接收功率分别为 -5.5 dBm 和 -5.3 dBm 时的接收信号星座图、频谱图以及时域波形图

3 结论

本文首次将符号内频域平均技术和基于离散傅里叶变换的扩频技术应用到工作在W波段的光载毫米波系统,实验展示了成功将 21.2 Gb/s, 84.5 GHz载频的16QAM-OFDM信号传输 2 m的无线距离,误码率控制在7%冗余度的软判决纠错码门限以内(比特误码率为 3.8×10^{-3}),性能较分别只使用一种技术的系统均有所提高,接收灵敏度提高 0.5 dB以上。

参考文献:

- [1] LIU Cheng, JIAN Wei, CHIEN H C, et al. Experimental analyses and optimization of equalization techniques for 60 GHz OFDM radio-over-fiber system[C]// Optical Fiber Communication, Collocated National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego, CA: IEEE, 2010:1-3.
- [2] CAO Z, YU J, WANG W, et al. Low-cost 60 GHz radio-over-fiber architecture compatible with wavelength-division-multiplexing passive optical networks by employing directly modulated laser and frequency quadruple techniques[J]. Optical Engineering, 2010, 49(6):402.
- [3] LI F, YU J, CAO Z, et al. Reducing the peak-to-average power ratio with companding transform coding in 60 GHz OFDM-ROF systems[J]. Optical Communications and Networking, 2012, 4(3):202-209.
- [4] WEI C C, LIN C T, CHAO M I, et al. Adaptively modulated OFDM RoF signals at 60 GHz over long-reach 100 km transmission systems employing phase noise suppression[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2012, 24(1):49-51.
- [5] KANNO A, INAGAKI K, MOROHASHI I, et al. 40 Gb/s W-band(75-110 GHz) 16QAM radio-over-BER signal generation and its wireless transmission[J]. Optics Express, 2011, 19(26):B56-B63.
- [6] CHOW C W, KUO F M, SHI J W, et al. 100 GHz ultra-wideband(UWB) fiber-to-the-antenna(FTTA) system for in-building and in-home networks[J]. Optics Express, 2010, 18(2):473-478.

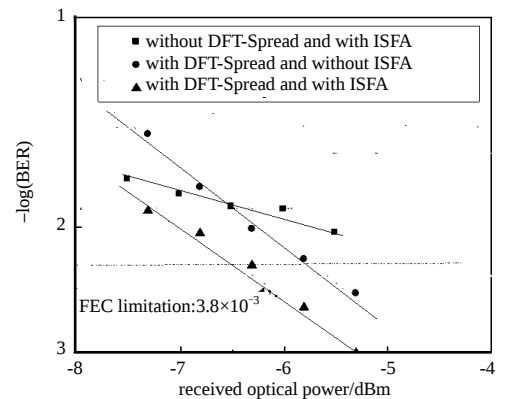


Fig.4 Curves of BER vs. received optical power in the system using different techniques

图4 不同光接收功率情况下系统的误码曲线

- [7] ZIBAR D,SAMBARAJU R,CABALLERO A,et al. High-capacity wireless signal generation and demodulation in 75 to 110 GHz band employing all-optical OFDM[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2011,23(12):810–812.
- [8] ZIBAR D,CABALLERO A,YU X B,et al. Hybrid optical fibre-wireless links at the 75 GHz –110 GHz band supporting 100 Gbps transmission capacities[C]// Proc. 2011 MWP/APMP. Singapore:IEEE, 2011:445–449.
- [9] LI X,DONG Z,YU J,et al. Performance improvement by pre-equalization in W-band(75 GHz–110 GHz)RoF system[C]// Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013. Anaheim,California:IEEE, 2013:1–3.
- [10] ISLAM A H M R,BAKAUL M,NIRMALATHAS A T,et al. Simplified generation,transport,and data recovery of millimeter-wave signal in a full-duplex bidirectional fiber-wireless system[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2012,24(16):1428–1430.
- [11] LI X Y,YU J J,ZHANG J W,et al. A 400 G optical wireless integration delivery system[J]. Optics Express, 2013,21(16):18812–18819.
- [12] LI X,DONG Z,YU J,et al. Fiber wireless transmission system of 108 Gb/s data over 80 km fiber and 2×2 MIMO wireless links at 100 GHz W-band frequency[J]. Optics Letters, 2012,37(24):5106.
- [13] ZHANG J,YU J,CHI N,et al. Multichannel 120 Gb/s data transmission over 2×2 MIMO fiber-wireless link at W-band[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013,25(8):780–783.
- [14] LI X Y,YU J J,CHI N,et al. Antenna polarization diversity for high-speed polarization multiplexing wireless signal delivery at W-band[J]. Optics Letters, 2014,39(5):1169–1172.
- [15] LI X,YU J,XIAO J,et al. Fiber-wireless-fiber link for 128 Gb/s PDM 16QAM signal transmission at W-band[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014,26(19):1948–1951.
- [16] LI X,YU J,ZHANG J,et al. Fiber-wireless-fiber link for 100 Gb/s PDM-QPSK signal transmission at W-band[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2014,26(18):1825–1828.
- [17] YU J J,LI X Y,ZHANG J W,et al. 432 Gb/s PDM 16QAM signal wireless delivery at W-band using optical and antenna polarization multiplexing[C]// 2014 European Conference on ECOC. Cannes:IEEE, 2014:1–3.
- [18] MA J X,YU J,XIN X J,et al. DSB optical mm-wave with signal only on optical carrier generated by embedded LiNbO_3 Mach Zehnder modulator[J]. Optics Communications, 2008,281(18):4634–4639.
- [19] SHADDAD R Q,MOHAMMAD A B,Al-HETAR A M,et al. A novel optical single-sideband frequency translation technique for transmission of wireless MIMO signals over fiber-wireless system[J]. Optics & Laser Technology, 2013,47(7):347–354.
- [20] 方祖捷,叶青,刘峰,等. 毫米波副载波光纤通信技术的研进展[J]. 中国激光, 2006,33(4):481–488. (FANG Zujie,YE Qing,LIU Feng,et al. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006,33(4):481–488.)
- [21] LIU X,BUCHALI F. Intra-symbol frequency-domain averaging based channel estimation for coherent optical OFDM[J]. Optics Express, 2008,16(26):21944–21957.
- [22] LI F,YU J,FANG Y,et al. Demonstration of DFT-spread 256QAM-OFDM signal transmission with cost-effective directly modulated laser[J]. Optics Express, 2014,22(7):8742–8748.
- [23] TELLAMBURA C. Upper bound on peak factor of N-multiple carriers[J]. Electronics Letters, 1997,33(19):1608–1609.

作者简介:



陈 龙(1989–),男,湖南省湘潭市人,在读博士研究生,主要研究方向为光与无线融合及高速无线通信系统.email:cl07tx@163.com.

肖江南(1974–),男,湖南省衡阳市人,博士,主要从事光传输系统、光 OFDM、光载无线系统、光传输信号处理及信息编码等方面的研究工作.

余建军(1968–),男,湖南省益阳市人,博士,主要从事高速光传输系统及网络技术的研究和教学工作.