

文章编号: 0253-2239(2010)06-1586-06

# 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较

夏敏敏 董 泽 曹子峥 张益民 陈 林

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要** 实验研究了分别采用光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载正交频分复用(OFDM)信号的毫米波光纤无线通信(ROF)系统,并比较了二者的传输性能。在中心站,将 20 GHz 的射频(RF)正弦波信号与 2.5 Gb/s 的 OFDM 信号混频后驱动相位调制器或强度调制器进行双边带(DSB)调制,产生的光载 OFDM 信号的毫米波经标准单模光纤(SSMF)传输到基站。在基站,经光纤布拉格光栅(FBG)滤除中心载波后的光调制信号经光电探测器转换成电调制信号,再与射频信号混频,恢复出基带 OFDM 信号,而分离出来的中心载波信号可以用于实现波长重用。实验验证了 OFDM 信号峰值-平均(峰均)功率比大小对系统误码率的影响。实验结果显示,在大入纤功率情况下,相位调制和强度调制产生的毫米波光信号经过 50 km SSMF 传输后,其功率代价分别为小于 0.5 dB 和大于 1 dB。说明光相位调制器产生光载毫米波加载 OFDM 信号在光纤中的传输性能优于光强度调制器。

**关键词** 光纤无线通信;正交频分复用;光毫米波产生;相位调制器;强度调制器

中图分类号 TN929.9 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1586

## Performance Comparison of 40 GHz Optical Millimeter Wave with OFDM Signal Generated by an Optical Phase Modulator and an Optical Intensity Modulator

Xia Minmin Dong Ze Cao Zizheng Zhang Yimin Chen Lin

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices of Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract** A 40 GHz radio-over-fiber (ROF) system is investigated experimentally to generate optical millimeter wave with optical orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal using an optical phase modulator or an optical intensity modulator, and the transmission performances of optical millimeter waves are compared. In the central station, the 2.5 Gb/s OFDM analog data and a 20 GHz radio frequency (RF) clock are mixed to drive an optical phase modulator or an optical intensity modulator to realize the double-sideband (DSB) modulation, generated optical millimeter wave with OFDM signal, transmitted to the base station over standard single-mode fiber(SSMF). In the base station, the optical millimeter wave signals are converted to electrical signals after optical-electrical conversion, and the down-converted OFDM signals are detected after mixed with the local oscillators, and the optical carrier filtered out by a fiber Bragg grating (FBG) can be used to realize wavelength reuse. Effect of different peak-to-average power ratios on bit error rate (BER) is demonstrated experimentally. The results show that under the high optical power, after transmission over 50 km SSMF, the power penalty for the optical millimeter wave generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator are less than 0.5 dB and more than 1 dB, respectively. It demonstrates that the fiber transmission quality of optical millimeter wave with OFDM signal generation using an optical phase modulator is better than an optical intensity modulator.

收稿日期: 2009-06-12; 收到修改稿日期: 2009-09-05

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z263, 2009AA01Z222)和教育部光通信和光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金资助课题。

作者简介: 夏敏敏(1982—),女,硕士研究生,主要从事光纤无线通信技术和光正交频分复用等方面的研究。

E-mail: xia.minmin@163.com

导师简介: 陈 林(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤无线通信技术、光正交频分复用和光标记交换等方面的研究。E-mail: liliuchen12@vip.163.com(通信联系人)

**Key words** radio-over-fiber; orthogonal frequency division multiplexing; generation of millimeter wave; phase modulator; intensity modulator

## 1 引言

随着多媒体技术的发展,人们对带宽的需求越来越大,对服务的方便灵活性要求越来越高。光纤无线通信(ROF)技术融合了无线通信的灵活性和光纤通信的高带宽、低损耗等特性,受到了广泛研究<sup>[1~7]</sup>。在以往的 ROF 系统中传输信号为开关键控(OOK)等码型,因其频谱效率低且不能克服色散的影响而限制了 ROF 系统的接入距离。采用光正交频分复用(OOFDM)技术相比于传统的二进制、单载波调制,不仅频谱利用率高且能有效克服色散影响从而极大提升 ROF 系统传输性能<sup>[8~13]</sup>。此外,未来的无线通信将基于正交频分复用(OFDM)调制方式,因此对 OFDM-ROF 系统的研究既是 ROF 系统不断提升性能的需要,也是面向未来应用的需要。

在 ROF 系统中光载毫米波信号的产生是关键技术之一。在众多的光载毫米波产生方案中<sup>[4~6]</sup>,基于外调制技术并结合光强度调制技术常用作产生高频率、高质量的光载毫米波信号。目前,基于外调制器的光毫米波生成技术主要分为两类,1)采用两个级联调制器分别生成毫米波和调制数据;2)采用副载波调制技术(SCM)先将数据调制在本振信号上再调制到光波上。目前人们针对 OOK 信号的光载毫米波产生技术展开了大量的研究,而针对 OFDM 信号的光载毫米波技术以及以其为基础的 OFDM-ROF 系统研究才刚开始。文献[14,15]对基于相位调制的 OFDM 信号和系统性能进行了理

论研究,本文在此基础上,提出将相位调制 OFDM 信号应用于光频,开展了光频 OFDM 的相位调制技术的研究,并将其和基于强度调制器的副载波调制 OFDM 光载毫米波产生方案从理论和实验两方面进行了比较。基于相位调制器副载波调制的 OFDM 光载毫米波产生方案仅需要一个光相位调制器和一个电混频器即可实现两个调制器的功能,且该方案不需要复杂的直流偏置模块。提出了一个基于光相位调制器副载波调制产生光载 OFDM 毫米波系统和基于光强度调制器副载波调制产生光载 OFDM 毫米波系统的理论模型,并比较了两类结构的传输特性。理论分析指出,当入纤功率较小且调制深度较小时,强度调制器和相位调制器传输差异不大,都能克服色散引起的码型走离所致性能劣化。此外,本文实验研究了在入纤功率较大情况下的两类不同光载毫米波 OFDM 信号传输特性。选取不同峰值-平均(峰均)功率比(PAPR)的 OFDM 信号进行比照实验,实验结果显示在大入纤功率情况下基于相位调制器的实验系统其性能随信号 PAPR 劣化较基于强度调制的实验系统明显改善,这得益于相位调制的恒包络特性。

## 2 实验原理与理论分析

### 2.1 实验原理

实验原理如图 1 所示。图中 RF 为射频,OFDM 为正交频分复用器,LD 为激光器,EA 为电放大器,PM

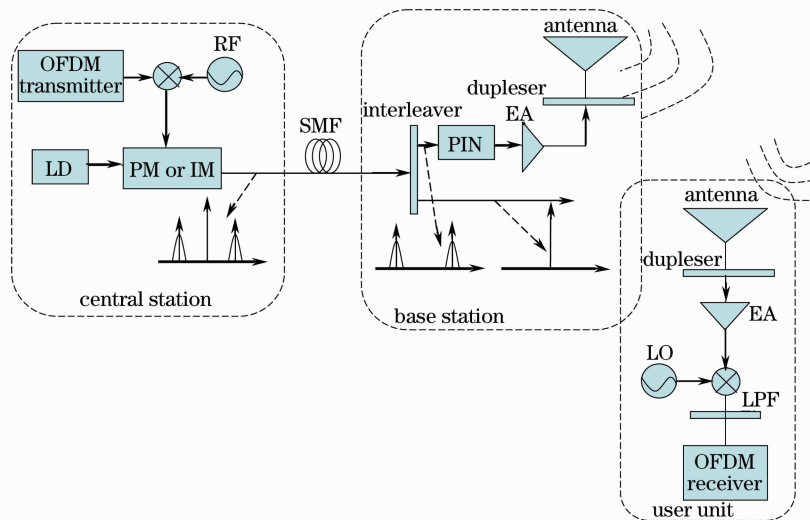


图 1 基于单个光相位调制器或光强度调制器的 OFDM-ROF 系统实验原理图

Fig. 1 Principle of the OFDM-ROF system with an optical phase modulator or an optical intensity modulator

or IM 为相位调制器和强度调制器, LPF 为低通滤波器, SMF 为单模光纤, LO 为本地振荡器, PIN 为 PIN 光电二极管。在中心站, 频率为  $f$  的射频 (RF) 正弦信号与 OFDM 模拟信号混频后驱动光调制器对光源进行相位或强度调制产生双边带 (DSB) 光信号。两个一阶边带上都载有 OFDM 信号, 频差为  $2f$ , 即为光载 OFDM 毫米波信号, 中心载波不带信息。光载 OFDM 毫米波信号经标准单模光纤 (SSMF) 传输至基站。在基站, 经光纤布拉格光栅 (FBG) 滤除中心载波后的两一阶边带拍频得到  $2f$  的电毫米波信号。而分离出来的中心载波信号可用作上行的光源实现波长重用。电毫米波信号经放大后由天线发射至用户端。

用户单元接收到毫米波信号后先放大再与  $2f$  的本振信号混频, 经低通滤波后恢复基带 OFDM 信号。

## 2.2 理论分析

OFDM 信号可以表示为

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n(t) \exp\left(j \frac{2\pi n}{N} t\right), \quad (1)$$

实验中取  $N=256$ 。从(1)式中可以看出, 当基带数据同相时将使 OFDM 信号具有很高的峰均功率比从而引入器件非线性畸变噪声。

设射频信号为  $V(t) = V_m \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0)$ ,  $\omega_{\text{RF}}$  为射频信号角频率,  $V_m$  和  $\phi_0$  分别为射频信号的振幅和相位。OFDM 信号与射频信号混频得

$$S(t) = V_m x(t) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0) = \frac{V_m}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n(t) \exp\left(j \frac{2\pi n}{N} t\right) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0). \quad (2)$$

分布式反馈激光器 (DFB-LD) 产生一个线宽很窄的连续光波  $E_{\text{in}}(t) = E \cos(\omega_c t)$ ,  $E$  为光载波功率,  $\omega_c$  为角频率。

将光波输入光相位调制器中, 混频信号作调制信号, 则光相位调制器的输出信号为

$$E_{\text{PMout}}(t) = E \cos[\omega_c t + \beta_1 x(t) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0)], \quad (3)$$

式中  $\beta_1 = \pi(V_m/V_\pi)$  为调制器的调制深度,  $V_\pi$  为调制器半波电压,  $J_k (k = 0, 1, \dots)$  表示第一类  $k$  阶贝塞尔 (Bessel) 函数。将(3)式 Bessel 展开并调节  $\beta_1$ , 使  $J_i(\beta_2) \approx 0, i \in (2, 3, 4, \dots)$ , (3) 式可以近似化为

$$E_{\text{PMout}}(t) \approx E \cos(\omega_c t) J_0[\beta_1 x(t)] - E x(t) J_1(\beta_1) [\sin(\omega_c t + \omega_{\text{RF}} t + \phi_0) + \sin(\omega_c t - \omega_{\text{RF}} t - \phi_0)]. \quad (4)$$

将光波输入光强度调制器中, 混频信号作调制信号, 则光强度调制器的输出为

$$E_{\text{IMout}}(t) = E \cos(\omega_c t) \cos\left[\frac{\varphi_0}{2} + \beta_2 x(t) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0)\right], \quad (5)$$

式中  $\varphi_0 = \pi V_{\text{DC}}/V_\pi$  表示由直流偏置电压引起的相位偏转, 直流偏置  $V_{\text{DC}}$ ,  $\beta_2 = \pi(V_m/V_\pi)$  为调制器的调制深度, 调节  $\beta_2$ , 使  $J_i(\beta_2) \approx 0$ , Bessel 展开, (5) 式可近似化为

$$E_{\text{IMout}}(t) \approx E \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_0[\beta_2 x(t)] \cos(\omega_c t) + 2E \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1(\beta_2) x(t) \cos(\omega_c t) \cos(\omega_{\text{RF}} t + \phi_0) =$$

$$E \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_0[\beta_2 x(t)] \cos(\omega_c t) + E \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1(\beta_2) x(t) [\cos(\omega_c t - \omega_{\text{RF}} t - \phi_0) + \cos(\omega_c t + \omega_{\text{RF}} t + \phi_0)]. \quad (6)$$

当光信号在长度为  $L$  的光纤中传输时, 两个边带由于色散发生了相位偏移, 设定相位偏移常数为  $\beta(\omega)$ , 其中  $\beta'(\omega), \beta''(\omega)$  为一阶、二阶的相位偏移常数, 使用泰勒公式展开, 得到

$$\beta(\omega_c \pm \omega_{\text{RF}}) = \beta(\omega_c) \pm \omega_{\text{RF}} \beta'(\omega_c) + \frac{1}{2} \omega_{\text{RF}}^2 \beta''(\omega_c) + \dots, \quad (7)$$

因此, 将(7)式代入(4)式, 令  $\theta_i = \beta(\omega_c + i\omega_{\text{RF}})L/(\omega_c + \omega_{\text{RF}}), i = 0, \pm 1$ , 则

$$E_{\text{PMSMFout}}(t) = E \cos[\omega_c(t + \theta_0)] J_0[\beta_1 x(t + \theta_0)] - E J_1(\beta_1) x(t + \theta_{+1}) \sin[(\omega_c + \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{+1}) + \phi_0] - E J_1(\beta_1) x(t + \theta_{-1}) \sin[(\omega_c - \omega_{\text{RF}})(t + \theta_{-1}) - \phi_0]. \quad (8)$$

在基站用 FBG 分离(8)式的一阶边带和中心载波, 利用一阶边带拍频产生频率为  $2\omega_{\text{RF}}$  的毫米波。通过光电二极管后的光电流并代入 OFDM 信号表达式后为

$$I_{\text{PMSout}}(t) = \frac{1}{2} \mu E^2 J_1^2(\beta_1) \frac{1}{N} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t + \theta_{+1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N} (t + \theta_{+1})\right] \right\}^2 + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n(t + \theta_{-1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N} (t + \theta_{-1})\right] \right\}^2 + 2 \cos[2\omega_{\text{RF}} t + 2\beta'(\omega_c)L] \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^N \left\{ a_q(t + \theta_{-1}) a_p(t + \theta_{-1}) \exp\left[j \frac{2\pi(q+p)}{N} (2t + \theta_{+1} + \theta_{-1})\right] \right\}. \quad (9)$$

将(7)式代入(6)式, 再同样在基站分离一阶边带和中心载波, 拍频, 通过光电二极管后的光电流为

$$I_{\text{IMSout}}(t) = \frac{1}{2} \mu E^2 \sin^2\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) J_1^2(\beta_2) \frac{1}{N} \left\{ \left\{ \sum_{n=1}^N a_n(t + \theta_{+1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N}(t + \theta_{+1})\right] \right\}^2 + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n(t + \theta_{-1}) \exp\left[j \frac{2\pi n}{N}(t + \theta_{-1})\right] \right\}^2 + 2 \cos[2\omega_{\text{RF}}t + 2\beta'(\omega_c)L] \sum_{q=1}^N \sum_{p=1}^N \{ a_q(t + \theta_{+1}) a_p(t + \theta_{-1}) \times \exp\left[j \frac{2\pi(q+p)}{N}(2t + \theta_{+1} + \theta_{-1})\right] \} \right\}, \quad (10)$$

从(10)式可知,色散引起两个一阶边带的时延不同,导致解调后的基带信号等效于两路时延差为 $\Delta\tau = \theta_{+1} - \theta_{-1}$ 的基带信号的乘积。当基带信号为非归零(NRZ)或OOK等码形的单信道信号时,时延将表现为码元的占空比变小,引起码间干扰,限制传输距离。由于每个OFDM符号间加了循环前缀,循环前缀的作用有两个。当所加循环前缀长度大于 $\Delta\tau$ 时,可以消除码间干扰。由于采用的是循环前缀,发生时延相当于子载波间有了相移,这个相移不会影响子载波的正交性,不会产生子信道干扰。

### 3 实验装置及结果

#### 3.1 实验装置

图2为采用单个光相位调制器或单臂光强度调制器副载波调制产生光载OFDM毫米波信号的ROF系统实验装置图。图2(a)~2(c)分别表示实验装置中 $a, b, c$ 处测的光谱图。图中AWG为任意波发生器, Circle为环形器, ATT为衰减器, TOF为可调光滤波器, OA为光放大器, TDS为实时示波器。本实验用的RF信号发生器为HP Agilent E8257D模拟信号发生器,信号的频率范围为250 kHz~20 GHz。在本实验中的频率为10 GHz,再用一个1:2的倍频器将

频率倍频成20 GHz。20 GHz RF与由任意波形发生器(AWG)产生的2.5 Gb/s OFDM信号混频得到电OFDM毫米波,经电放大器放大后驱动光相位调制器或光强度调制器,对由DFB-LD激光器产生的波长为1543.7 nm的连续光进行双边带调制。为使实验更具对比性,无论使用哪一种调制器时,都保证载波带比(中心光载波与一阶边带峰值功率比, CSR)为20 dB,二阶边带功率比一阶边带功率低30 dB,因而可以忽略二阶边带信号在光纤中传输时的影响。中心光载波不载OFDM信号,两个一阶边带载有OFDM信号,构成光载OFDM毫米波信号,通过光放大器放大后,注入光纤的功率为13 dBm。经50 km SSMF传输至基站。在基站用一个环形器加一个FBG将中心载波与一阶边带分开。中心载波可重新用于上行链路。为了分析功率代价,将FBG输出的一阶边带送入了一个衰减器,进行相关的功率测量。接着进行了光放大,滤波,再送入高速光电转换器检测得到电OFDM毫米波信号。电毫米波信号经放大后与一个40 GHz本振信号混频,再进行低通滤波后恢复基带OFDM信号。基带OFDM信号送往Tektronix实时数字示波器中采样。采样后的数据处理和恢复在Matlab接收程序中离线完成。

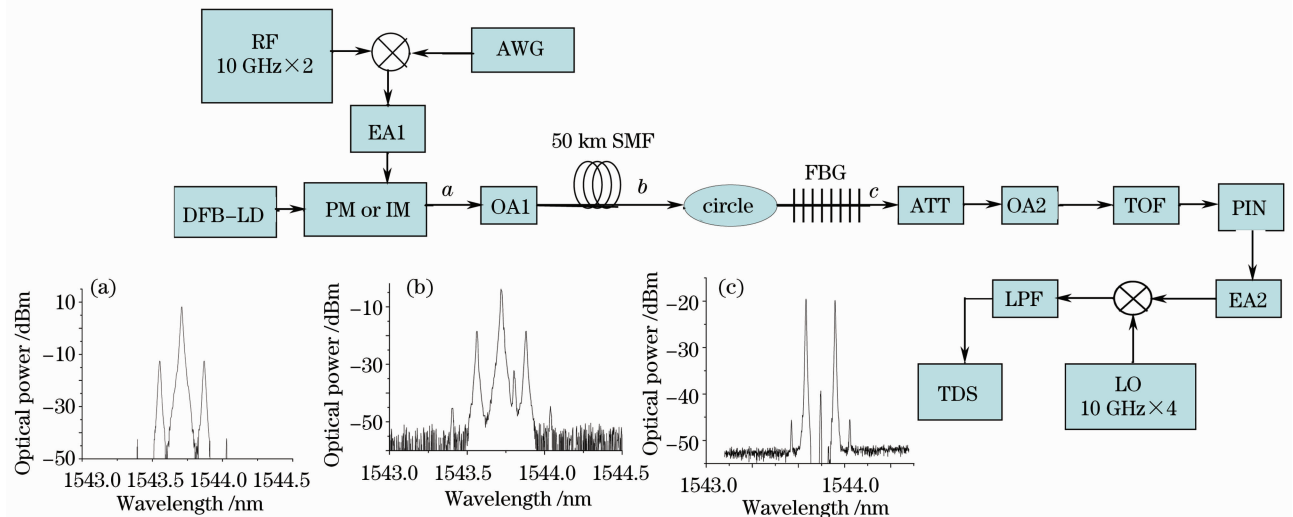


图2 基于单个光相位调制器或光强度调制器的OFDM-ROF系统实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for the OFDM-ROF system with an optical phase modulator or an optical intensity modulator

实验分别使用了两个不同的光调制器和两个具有不同 PAPR 的 OFDM 基带信号,其中 OFDM2 的 PAPR 较高,OFDM1 的 PAPR 较低。在发送端,Matlab 程序进行编码,快速傅里叶变换(FFT),插零,加循环前缀等一系列处理生成 OFDM 波形的离散值。每帧 OFDM 信号包含 256 个子信道,其中 200 个子信道用来传数据,56 个子信道作为频域保护间隔被置零。时域的循环前缀为 1/32,即每帧前需要增加 8 个循环值。离散的 OFDM 信号送入 Tektronix 任意波发生器,产生连续 OFDM 信号波形。在接收端,OFDM 信号的接收端的处理和分析都是在 Matlab 程序中离线完成。Matlab 程序除了译码恢复二进制数据信号,还要制做星座图,误码分析。

### 3.2 实验结果分析与比较

实验验证了不同 PAPR 的 OFDM 信号对 ROF 系统传输性能的影响,两个 OFDM 信号的互补累积分布函数(CCDFF)曲线图如图 3(a),不同 OFDM 信

号在基于不同光调制器的 OFDM-ROF 系统中的误码曲线图如图 3(b)。图 3(a)表明 OFDM1 的 PAPR 低于 OFDM2 约 4 dB。从图 3(b)可知基于光强度调制器的 OFDM-ROF 系统比基于光相位调制器的对 PAPR 的变化更敏感。

在 OFDM2 作基带信号,保证 CSR 都为 20 dB 的情况下,光相位调制器和光强度器副载波调制产生的光载 OFDM 毫米波信号经背靠背和 50 km 标准模光纤传输后,不同光接收功率对应的误码曲线和星座图如图 4 所示。随着接收光功率的降低,误码率(BER) $n_{BER}$ 升高,星座图渐散。星座图虽散,但还保持在 4 个标准区域,表示还可以解码。图 4(a)显示光相位调制器产生的光载 OFDM 毫米波信号经 50 km 标准单模光纤传输后功率代价不足 0.5 dB。图 4(b)显示光强度调制器产生的光载 OFDM 毫米波信号经过 50 km SSMF 传输后功率代价大于 1 dB。

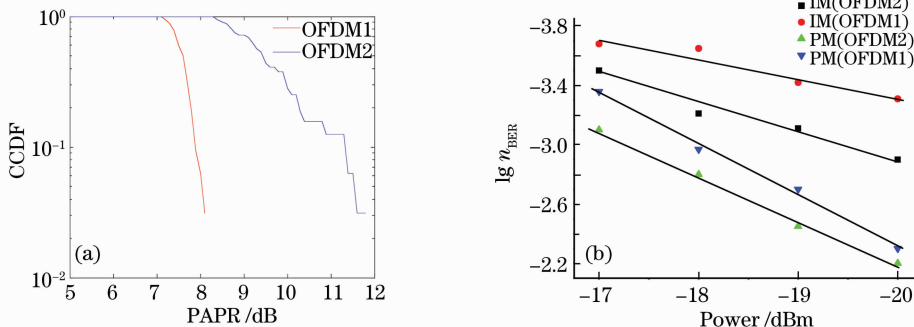


图 3 (a)OFDM 信号 CCDF 曲线图,(b)不同 OFDM 信号在不同 OFDM-ROF 系统的误码率曲线图

Fig. 3 (a) CCDF curves of OFDM signal, (b) BER curves for different OFDM signals of different OFDM-ROF systems

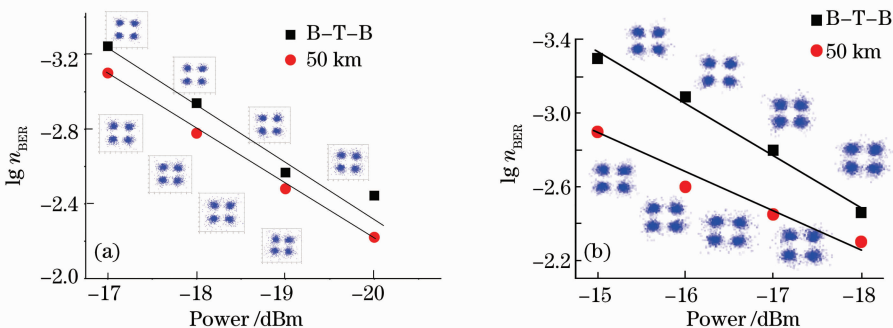


图 4 OFDM 信号的误码曲线图及星座图。(a)相位调制产生的光毫米波;(b)强度调制产生的光毫米波

Fig. 4 BER curves and constellation figures for OFDM signal. (a) optical millimeter wave signal generated by an optical phase modulator (b) optical millimeter wave signal generated by an optical intensity modulator

对比(3)式和(5)式可知相位调制产生的光信号总强度保持恒定,强度调制产生的光信号总强度随调制信号非线性变化。光纤中大部分非线性效应起源于光纤的非线性,对于线偏振光,可定义非线性折射率,它与光强的关系可表示成  $\bar{n}(\omega, |E|^2) =$

$n(\omega) + n_2 |E|^2$ ,式中  $|E|^2$  为光强, $n(\omega)$  是线性部分, $n_2$  是与三阶电极化率  $\chi^3$  有关的非线性折射率系数。当调制信号包含高 PAPR 的 OFDM 信号时,强度调制的光载 OFDM 信号比相位调制的更易受光链路中非线性的影响。

## 4 结 论

本文研究的 OFDM-ROF 系统只使用了一个光调制器且实验证明可行。实验验证了不同 PAPR 的 OFDM 信号对 OFDM-ROF 系统误码率的影响, 比较了光相位调制器和光强度调制器副载波调制产生的光载 OFDM 毫米波信号在 ROF 系统中传输 50 km SSMF 后的性能。由于相位调制产生的光信号包络恒定, 从而光相位调制产生的光载 OFDM 毫米波信号比光强度调制产生的更能克服高 PAPR 引起的非线性。同时相位调制器不需要直流偏置电压的控制, 可以避免直流漂移的影响, 而且对其线性调制带宽要求低, 省略了控制电路, 简化了系统结构。实验结果表明, 相位调制和强度调制产生的光载毫米波信号分别经过 50 km SSMF 传输后功率代价分别为小于 0.5 dB 和大于 1 dB。

## 参 考 文 献

- 1 Lin Chen, Hong Wen, Shuangchun Wen. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength for up-link connection[J]. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(19): 2056~2058
- 2 Gee-Kung Chang, Jianjun Yu, Zhensheng Jia. Architectures and enabling technologies for super-broadband radio-over-fiber optical-wireless access networks[J]. *Microwave Photonics*, 2007 *IEEE International Topical Meeting*, 2007, (s): 24~28
- 3 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488  
方祖捷, 叶青, 刘峰等. 毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- 4 Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 238~242  
胡黎亮, 陈林, 余建军等. 一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 238~242
- 5 Lei Xiaoyan, Dong Ze, Pi Yazhi *et al.*. Performance of a novel scheme to generate single-sideband millimeter-wave signals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 889~893  
雷小燕, 董泽, 皮雅稚等. 一种新型的单边带调制技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 889~893
- 6 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 73~76  
黄诚, 陈林, 余建军等. 采用单个相位调制器产生毫米波[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 73~76
- 7 Jianjun Yu, Gee-Kung Chang, Zhensheng Jia *et al.*. A ROF downstream link with optical mm-wave generation using optical phase modulator for providing broadband optical-wireless access service. [J]. *Proc. Opt. Soc. Am.*, 2008, Paper OFM3
- 8 H. Yang, J. Zeng, Y. Zheng *et al.*. Evaluation of effects of MZM nonlinearity on QAM and OFDM signals in RoF transmitter [J]. *Microwave Photonics*, 2008, PP: 90~93
- 9 Linghui Rao, Xiaoqiang Sun, Wei Li *et al.*. OFDM-ROF system and performance analysis of signal transmission [J]. *Optoelectronics*, 2006 *Optics Valley of China International Symposium*, 2006, 67~70
- 10 J. E. Mitchell. Performance of OFDM at 5.8 GHz using radio over fibre link[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(21): 1353~1354
- 11 J. Yu, J. Hu, D. Qian *et al.*. Transmission of microwave-photonics generated 16 Gbit/s super broadband OFDM signals in radio-over-fiber system [J]. *Proc. OFC/NFOEC*, 2008, Paper OThP2
- 12 Jianping Wang, Xianwei Zhou, Yongxia Xu *et al.*. Performance improvement of OFDM-ROF system with clipping and filtering technique[J]. *IEEE Trans. Consumer Electronics*, 2008, **54**(2):
- 13 Chen Lin, Cao Zizheng, Dong Ze *et al.*. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 554~557  
陈林, 曹子峥, 董泽等. 直接检测的光正交频分复用信号光纤传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 554~557
- 14 Zhang Yi, Zhang Hang, Tang Chengkai. Reducing PAPR (peak-to-average-power ratio) in OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) signal transmission [J]. *J. Northwestern Polytechnical University*, 2007, **25**(6): 834~837  
张怡, 张航, 唐成凯. 基于连续相位调制的 OFDM 信号研究[J]. *西北工业大学学报*, 2007, **25**(6): 834~837
- 15 Guan Jie, Hui Xiaowei. Analysis of the performance of orthogonal frequency division multiplexing system based on simulation [J]. *Computer Measurement and Control*, 2008, **16**(4): 538~540, 551  
官捷, 惠晓威. 正交频分复用系统的性能仿真分析[J]. *计算机测量与控制*, 2008, **16**(4): 538~540, 551