

doi:10.3788/gzxb20134208.0936

一种提高强度调制直接检测基带光双边带正交频分复用系统传输性能的预处理技术

郭天光^{1,2}, 陈林¹, 陈明¹, 吴巍¹

(1 湖南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410082)

(2 北京握奇数据系统有限公司, 北京 100102)

摘要:为了减轻电光调制器的非线性效应以及光纤色度色散给直接检测光正交频分复用系统性能带来的损伤,对两者的损伤机理进行了理论分析.在此基础上提出了在发射中使用一种针对调制器的非线性采用预失真技术,而高频子载波功率衰减采用预增强的联合预处理技术来改善系统的性能.运用数值仿真法对所提出的方法进行了验证,结果表明在光背靠背传输系统中调制指数最优时,接收信号的误差矢量幅度值可以得到 2 dB 的改善.随着光纤传输距离的增长,正交频分复用信号高频子载波功率衰减程度加剧而使得信噪比恶化,从而导致系统误码性能急剧下降.使用所提出的预处理技术的计算复杂度低,可以使接收机的灵敏度得到明显的改善.

关键词:电光调制器非线性;功率衰减;预处理技术;调制指数

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)08-0936-7

Improved Transmission Performance for Intensity Modulation and Direct Detection Baseband Optical Double Side Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing Systems with an Pre-processing Technique

GUO Tian-guang^{1,2}, CHEN Lin¹, CHEN Ming¹, WU Wei¹

(1 School of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2 Watchdata System Co. Ltd., Beijing 100102, China)

Abstract: In order to reduce the performance impairments of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing (DD-OOFDM) system caused by the nonlinear effects of electro-optic modulator and fiber chromatic dispersion, the impairment mechanisms are analyzed theoretically. Based on the analysis results, a digital pre-processing technique which combined pre-distortion and pre-emphasis methods to combat the nonlinearity and power fading, respectively, is proposed to employ to OFDM transmitter to improve the system's performance. The proposed method is verified by numerical simulation. The simulation results show that error vector magnitude (EVM) of the received signal can obtain a 2 dB improvement when both modulation indexes are optimum, compared to without employing the pre-distortion technique at the optical back-to-back transmission case. With the increasing of optical fiber transmission distance, the power of high frequency subcarriers of the received OFDM signal is attenuated severely, then the BER performance of the system is deteriorated dramatically. The sensitivity of OFDM receiver can be improved significantly with the proposed digital pre-processing technique with low computational complexity.

Key words: Nonlinearity of electro-optic modulator; Power fading; Pre-processing technique; Modulation index

基金项目:国家自然科学基金(No. 60977049)、国家高技术研究发展计划(No. 2011AA010203)和湖南省自然科学基金(No. 12JJ3070)资助
第一作者:郭天光(1974-),男,硕士研究生,主要研究方向为光网络与技术. Email:guotianguang@yahoo.cn
导师(通讯作者):陈林(1968-),男,教授,博士,主要研究方向为光 OFDM、ROF 等. Email:liliuchen12@vip.163.com
收稿日期:2012-09-14;录用日期:2013-04-17

0 引言

正交频分复用(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM)技术已广泛用于无线(802.11a, WiMax等)与有线(xDSL等)通信系统中.由于其较强的抗多径衰减能力,较高的频谱效率等优点,在光通信中被视为下一代无源光网络(Passive Optical Networks, PON)光接入网(Optical Access Networks, OAN)的关键技术之一^[1-5].光接入网中更多地是对众多光网络单元(Optical Network Unit, ONU)设备成本以及系统数据传输速率的考虑.而强度调制直接检测基带光双边带 OFDM(Double Side Band OFDM, DSB-OFDM)系统^[6-8]具有结构简单、成本较低、频谱率利用高等优点而备受关注,但由于电光调制器工作在较高调制指数时的非线性效应以及基带光 DSB-OFDM 信号经受光纤色散引发的信号频率选择性深度功率衰减效应严重干扰了系统性能.文献[9-10]分别分析了相干光 OFDM 系统中电光正交调制器非线性效应与直接检测光 OFDM 超带宽系统中的电光调制器与光电探测器的综合效应对系统的影响,并使用失真技术减轻电光调制器非线性干扰对系统的影响.为了抵抗光纤色散的影响,文献[11]采用单边带光 OFDM 信号格式来抵抗光纤色散,但需要使用光滤波器,增加了系统成本,同时降低了系统的频谱利用率.

本文理论分析了强度调制直接检测基带光 DSB-OFDM 传输系统中电光调制器的非线性效应及光纤色度色散引发的高频子载波深度功率衰减(Power Fading, PF)给系统带来的损伤,并针对 OFDM 发射机提出了一种计算复杂度低,容易实现的数字预处理技术来改善系统的传输性能.

1 理论分析

1.1 强度调制直接检测基带光 DSB-OFDM 传输系统

图 1 为强度调制直接检测基带光 DSB-OFDM 传输系统,基带 OFDM 信号的生成包括伪随机二进制序列(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)产生,做为测试系统的数据源.对原始二进制序列进行映射,为了使反傅里叶变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)输出的实数,IFFT 输入数据需要满足 Hermitian 对称,同时为了抵抗光纤色散引起的频率选择性衰减,需要对映射数据做失真处理,如图 1 中 PF Pre-distortion 模块(Power Fading Pre-distortion)所示,IFFT 输出数据经并串转换后

增加循环前缀.为抑制 OFDM 信号过高的峰值平均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR),对其进行直接限幅处理以降低过高 PAPR 对系统的不利影响.为了减轻调制指数较高时电光调制器非线性给系统带来的损伤,对限幅后的数据针对马赫曾德尔调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)非线性做失真处理.EDFA 放大电光调制器输出的光 OFDM 信号后经标准单模光纤传输至接收端,通过调节光衰减器得到不同的光信噪比(Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR)^[12],光电检测经光带通滤波器后的光 OFDM 信号,经电低通滤波器后使用相关 DSP 算法分析系统传输性能.

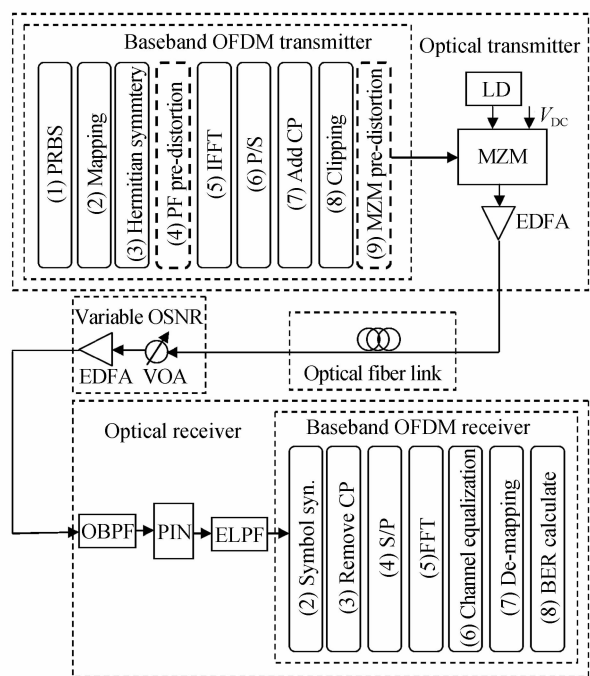


图 1 强度调制直接检测基带光 DSB-OFDM 传输系统
Fig. 1 Block diagram of intensity modulation and direct detection baseband optical DSB-OFDM transmission systems

1.2 理论模型

基带 OFDM 电信号由于满足 Hermitian 对称可表示为

$$V_m(t) = \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{sc}+1}^{\frac{1}{2}N_{sc}} c_k \exp(j2\pi f_k t) = \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{sc}+1}^{\frac{1}{2}N_{sc}} a_k \cos(2\pi f_k t) - b_k \sin(2\pi f_k t) \quad (1)$$

式中 c_k 为映射后的复数数据, f_k 为第 k 个子载波的频率, N_{sc} 为数据子载波个数, 并且有 $c_k = a_k + jb_k$, $c_{-k} = a_k - jb_k$, $c_0 = c_{N_{sc}/2} = 0$, $f_{-k} = -f_k$. 这里为了便于分析,假定激光器输出频率为 f_0 理想无色单一的,初始相位为零,则其电场分量可表示为

$$E_i(t) = E_0 \cos(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

式中 E_0 为光载波电场幅度. 将基带 OFDM 电信号加载到双电极驱动 Z 切向 LiNbO₃ 马赫曾德电光调制器 (Mach-Zehnder Modulator, MZM), 工作在推挽模式下, 输出光信号的电场表达式可表示为^[13]

$$E_{\text{MZM}}(t) = \frac{E_0 \cos(2\pi f_0 t)}{\sqrt{2}} \left[\exp\left(j\pi \frac{V(t)}{V_\pi}\right) + \exp\left(-j\pi \frac{V(t)}{V_\pi}\right) \right] = \sqrt{2} E_0 \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos\left(\frac{\pi(V_{\text{DC}} + 2V_m(t))}{2V_\pi}\right) \quad (3)$$

式中 $V(t) = V_{\text{DC}}/2 + V_m(t)$, V_π 为电光调制器的半波电压, 使调制器两臂相位相差 π , 输出光功率为零. V_{DC} 为加载到调制器上的直流偏置电压.

基带光 OFDM 信号经 EDFA 放大后经光纤链路传输 z km, 为了简化分析, 这里仅考虑光纤色度色散及放大器噪声的影响, 接收信号可表示为

$$E_{z \text{ km_fiber}}(t, z) = \sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} a_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_D(f_k)) - b_k \sin(2\pi f_k t + \varphi_D(f_k))\right)\right] + N(t) =$$

$$\sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cos(2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} \cos(\varphi_D(f_k)) (a_k \cos(2\pi f_k t) - b_k \sin(2\pi f_k t))\right)\right] + N(t) \quad (4)$$

式中 $\varphi_D(f_k) = \pi D z \lambda^2 f_k^2 / c$ 为第 k 个子载波受光纤色度色散作用带来的相位变化^[14], D 为色度色散 (ps/nm/km), λ 为激光器输出光源的波长 (nm), c 为光在真空中的速度 (m/s), $\text{Att}(\cdot)$ 光纤随长度的衰减, $N(t)$ 为光放大器自发辐射噪声. 定义 $B_k = \cos(\varphi_D(f_k)) (a_k \cos(2\pi f_k t) - b_k \sin(2\pi f_k t))$, 则式 (4) 可表示为

$$E_{z \text{ km}}(t, z) = \sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cos(2\pi f_0 t) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} B_k\right)\right] + N(t) \quad (5)$$

经平方律光电检测器后, 将光功率转换为电流, 表达式为

$$I(t) \propto |E_{z \text{ km}}(t, z)|^2 = \left| \sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cos(2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} B_k\right)\right] + N(t) \right|^2 = \frac{1}{2} E_0^2 \text{Att}^2(z) (1 + \cos(4\pi f_0 t)) \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} B_k\right)\right) \right] + 2\sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \cos\left[\frac{\pi}{2V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} B_k\right)\right] N(t) + N^2(t) = \frac{1}{2} E_0^2 \text{Att}^2(z) (1 + \cos(C) + \cos(4\pi f_0 t) + \cos(C) \cos(4\pi f_0 t)) + 2\sqrt{2} E_0 \text{Att}(z) \cos(2\pi f_0 t) \cos\left(\frac{C}{2}\right) N(t) + N^2(t) \quad (6)$$

式中, 定义 $C = \frac{\pi}{V_\pi} \left(V_{\text{DC}} + 2 \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} B_k\right)$, 式 (6) 中第 1、3、4 项经光电检测后为直流分量^[15], 合并表示为 DC , 第 2 项为余弦函数失真的基带 OFDM 信号, 第 5 与第 6 项分别为信号与放大器噪声互拍分量与放大器噪声之互拍分量, 合并表示为 $n(t)$. 因此式 (6) 可表示为

$$I(t) \propto \frac{1}{2} E_0^2 \text{Att}^2(z) \cos(C) + n(t) + DC \quad (7)$$

选择直流偏置电压 $V_{\text{DC}} = V_\pi/2$, 则式 (7) 可进一步简化为

$$I(t) \propto -\frac{1}{2} E_0^2 \text{Att}^2(z) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{V_\pi} \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{\text{sc}}}^{\frac{1}{2}N_{\text{sc}}} \cos(\varphi_D(f_k)) (a_k \cos(2\pi f_k t) -$$

$$b_k \sin(2\pi f_k t)) + n(t) + DC \quad (8)$$

至此本文对直接检测光基带 OFDM 传输系统中的电光调制器的非线性、光纤的频率选择性功率衰减效应、光放大器的噪声影响及平方律光电检测器的特性做了较为详细的理论推导, 进而将分析其给系统性能带来的损伤.

1.3 损伤分析

1) 电光调制器的非线性效应. 在光背靠背的情况下, 式 (8) 可表示为

$$I(t) \propto -\frac{1}{2} E_0^2 \text{Att}^2(z) \sin\left(\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t)\right) + n(t) + DC \quad (9)$$

这里定义 MZM 与 PD(Photo-Detector) 总的传输函数为

$$TF_{\text{MZM+PD}}(t) = -\gamma \sin\left(\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t)\right) \quad (10)$$

γ 为一常量系数,对式(10)一阶泰勒级数展开式为

$$TF_{\text{MZM+PD}}(t) = -\gamma \left[\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t) - O\left(\left(\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t)\right)^3\right) \right] \quad (11)$$

式中 $O\left(\left(\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t)\right)^3\right)$ 表示为 $\sin\left(\frac{2\pi}{V_\pi} V_m(t)\right)$ 一阶泰勒级数展开式中的误差函数,包含 3 次及高阶奇数次项。

从式(11)中知道,当偏置电压为二分之一调制器半波电压时,光电检测后,基带 OFDM 信号遭受到奇数次子载波间互拍干扰,无法使用滤波器滤除这些干扰,随着调制指数的不断提高,这种干扰严重影响系统的传输性能,如图 2 为 MZM 与 PD 传输特性曲线,当 $|V_m(t)| > V_\pi/4$ 时,接收信号出现失真。

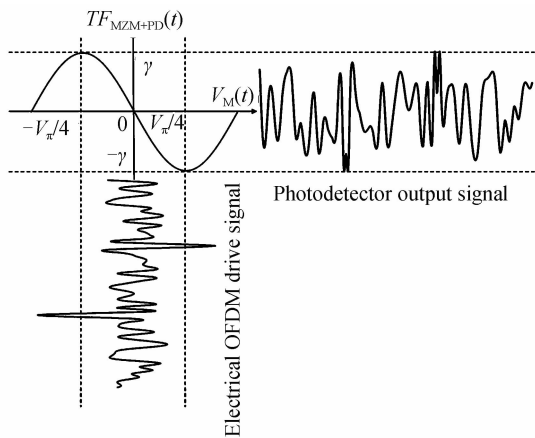


图 2 MZM 与 PD 传输特性曲线

Fig. 2 Transfer characteristic of Mach-Zehnder modulator and photodetector

2) 光纤色度色散产生信号频率选择性功率衰减效应。从式(4)可知光纤色度色散导致信号频域选择性衰减,其功率衰减函数为

$$PF(f_k) = \cos^2(\varphi_D(f_k)) = \cos^2(\pi D z \lambda^2 f_k^2 / c) \quad (12)$$

随着 $z f_{k \max}^2$ ($f_{k \max}$ 为 OFDM 信号中最高频率子载波对应的频率) 的增大, $PF(f_k)$ 呈现周期性衰减。当 $\pi D z \lambda^2 f_k^2 / c = \pi/2$ 时,相应频率分量衰减为零,我们将无法获得该频率分量的信息,而当 $FD(f_k)$ 值较小时,接收到的 OFDM 信号相应频率分量处于深度衰减的情况下,此时仅依靠训练符号来对其做均衡处理,系统性能得不到有效的改善。我们定义子载波经受的最大功率衰减因子为 $\mu = \cos^2(\pi D z \lambda^2 f_{k \max}^2 / c)$ 。如图 3 所示为特定长度光纤传输后,OFDM 信号中不同频率(相对于 $\mu=0$ 时频率做归一化处理)上功率衰减情况。

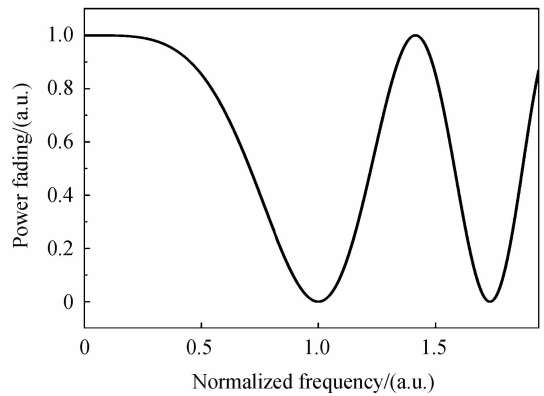


图 3 光纤色度色散的频率响应

Fig. 3 Frequency response of optical fiber chromatic dispersion

2 预处理技术

针对以上分析的两方面损伤,分别做预失真/预增强处理以改善系统性能。

1) 电光调制器的预失真处理。对式(10)正弦失真函数中的基带 OFDM 信号做预失真处理,满足如下关系

$$-\sin\left(\frac{2\pi}{V_\pi} PD[V_m(t)]\right) = \alpha V_m(t)$$

即

$$PD[V_m(t)] = -\frac{V_\pi}{2\pi} \arcsin(\alpha V_m(t)) \quad (13)$$

式中 $PD[V_m(t)]$ 表示对 $V_m(t)$ 做预失真处理, α 为一常量,其中 $\arcsin(\cdot)$ 的变量取值应在 $[-1, 1]$ 范围内,所以有

$$PD[V_m(t)] = \begin{cases} 1 & (\alpha V_m(t) < -1) \\ -\frac{V_\pi}{2\pi} \arcsin(\alpha V_m(t)) & (|\alpha V_m(t)| \leq 1) \\ -1 & (\alpha V_m(t) > 1) \end{cases} \quad (14)$$

2) 光纤色度色散的预增强处理。由分析可知,其频域衰减为一余弦函数,为了改善子载波深度功率衰减给系统带来的损伤,提高接收机的灵敏度,本文在基带 OFDM 发射机中对映射后的频域数据乘以 $1/PF(f_k) = 1/\cos(\pi D z \lambda^2 f_k^2 / c)$ 系数做数字预增强处理来预补偿信号高频分量的衰减。

至此,针对直接检测光基带 OFDM 系统中发射机的预失真处理的整体表达式可以写成为

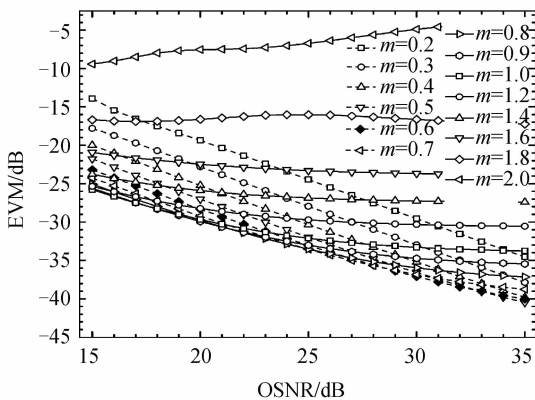
$$V_{\text{PF+MZM}}(t) = -\frac{V_\pi}{2\pi\gamma} \arcsin\left(\alpha \sum_{k=-\frac{1}{2}N_{sc}+1}^{\frac{1}{2}N_{sc}} 1/\cos(\varphi_D(f_k)) \cdot (a_k \cos(2\pi f_k t) - b_k \sin(2\pi f_k t))\right) \quad (15)$$

3 仿真分析与结果

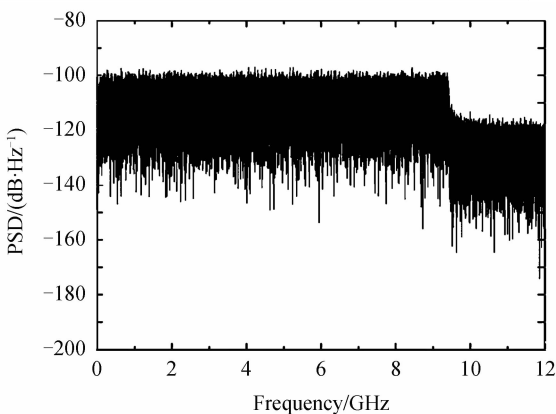
仿真系统装置如图 1, OFDM 帧由 800 个

OFDM 符号与 1 个用于信道估计的训练符号组成, 其中每个 OFDM 符号中有 200 个数据子载波, 直流及高频子载波置零, 1/8 循环前缀. QPSK 映射后的数据满足 Hermitian 对称, 对并串转换后的数据做功率归一化及直接限幅处理, 本文中采用的限幅率^[6]为 3.2, 式 (13) 中的 α 因子取值为 1. 有效数据速率为 16.65 Gbps. 激光器输出波长为 1 550 nm, 线宽为 100 kHz, 功率为 0 dBm; MZM 的半波电压为 $V_{\pi}=4V$, 调制器输出的光信号被 EDFA 放大至 0 dBm 后输入进光纤链路中, 光纤色散系数为 16.75 ps/nm/km. 可调光信噪比模块中 EDFA 增益为 20 dB, 噪声系数为 4 dB, 通过调节衰减器, 后经 0.2 nm 带宽 8 阶贝塞尔光带通滤波器后得到不同的光信噪比信号. 使用一个 12 G 带宽 8 阶巴特沃斯低通滤波器滤波光电转换器得到的电 OFDM 信号, 在接收机中使用 DSP 算法计算相关指标, 这里选择误差矢量幅度 (Error Vector Magnitude, EVM)^[12] 及误比特率与 OSNR 关系来分析系统性能.

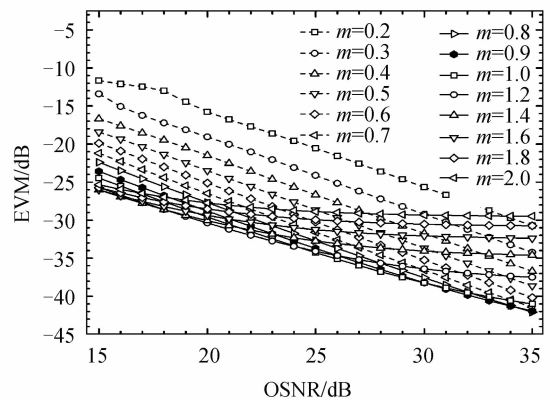
如图 4, 在没有经过光纤传输时, 分别在未做预处理和做预失真处理两种情况下, 测试了不同 OSNR 参量以及不同调制指数下得到的接收信号 EVM 关系曲线 (调制指数 $m=\sqrt{2}\pi V_{\text{RMS}}/V_{\text{DC}}$, V_{RMS} 为直接限幅后 OFDM 信号的均方根值). 图 4(a) 为未做预失真处理, 可以观察到在低调制指数下调制



(a) Without MZM pre-distortion



(a) Without pre-emphasis before fiber transmission

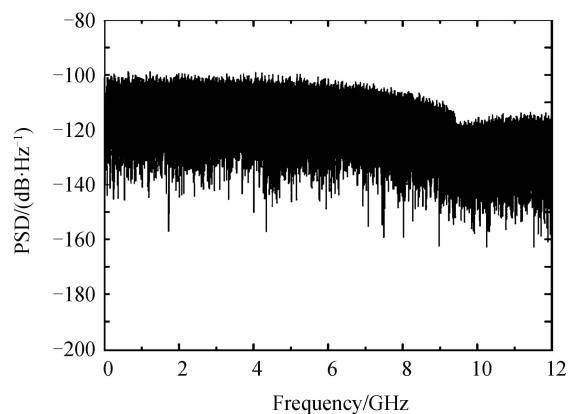


(b) With MZM pre-distortion

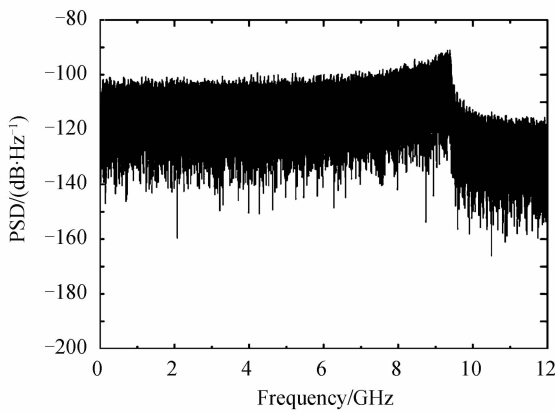
图 4 不同调制指数下 EVM 与 OSNR 曲线

Fig. 4 EVM versus OSNR under different modulation indices 信号处于调制特性曲线的线性范围之内, EVM 值随着 OSNR 的增加而线性降低, 此时系统属于噪音受限的. 随着调制指数的提高, 接收的灵敏度得到一定程度改善. 但在较高调制指数时, OSNR 的增加已不能线性改善系统 EVM 值, 此时系统主要受到电光调制器非线性干扰的影响, 带内干扰导致系统出现的地板效应. 当 $m=0.6$, OSNR=35 dB 时, EVM 值为 -40 dB, 定义 $m=0.6$ 为未做预失真处理时的最优调制指数, 此时 EVM 与 OSNR 有较好的线性关系, 而且接收机的灵敏度较高. 图 4(b) 为做了预失真处理后情况, 与图 4(a) 相比, 高调制指数下, 前者非线性效应相对较弱, 系统 EVM 值有明显的改善, 但随着调制指数的不断增加, 由于式 (14) 的限幅作用, 带内噪音增加, 带外功率扩散以及子载波间正交性遭到破坏使得系统性能恶化. 图 4(b) 中的最优调制指数为 $m=0.9$, 当 OSNR=35 dB 时, 对应的 EVM 值为 -42 dB, 较未做预失真处理, 系统的 EVM 值改善了 2 dB.

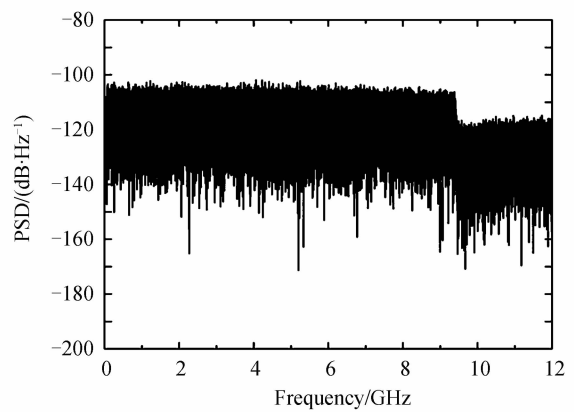
图 5 为基带 OFDM 发射机输出信号以及接收端低通滤波输出信号的功率谱密度与频率之间的关系, 接收信号的功率衰减因子为 $\mu=0.07$, OSNR=30 dB. 图 5(a) 与 (b) 为基带 OFDM 信号无预处理



(b) Without pre-emphasis after fiber transmission



(c) With pre-emphasis before fiber transmission



(d) With pre-emphasis after fiber transmission

图 5 使用/未使用 PF 预增强技术光纤传输前后 OFDM 信号功率谱密度

Fig. 5 PSD of OFDM signal with/without using PF pre-emphasis technique before/after fiber transmission

时,光纤传输前后时信号的功率谱密度与频率关系曲线,图 5(b)中看到 OFDM 信号高频子载波由于光纤色散作用遭受到深度衰减,而图 5(c)与(d)为施加了预增强技术后光纤传输前后基带 OFDM 信号的功率谱密度.图 5(d)中 OFDM 信号各子载波上功率表现出较好的平坦度,减轻了高频子载波深度功率衰减给系统带来的影响.

通过 Monte-Carlo 仿真分析了不同功率衰减因子 μ 下,在发射机中使用数字预失真技术来改善基带光 DSB-OFDM 系统性能.当 μ 较大时,即高频子载波上的功率衰减较小,系统性能主要受限于 MZM 的非线性干扰,如图 6(a)所示 $\mu=0.87$ 在有功率衰减预增强的情况下,系统误比特率保持一致.随着 μ 值不断减小,光纤色散导致 OFDM 信号高频子载波功率衰减加强,此时使用 PF 与 MZM 预处理技术相比不使用预处理或者仅使用 PF 与 MZM 预处理中的一种技术,传输系统的性能得到显著的改善.如图 6(b)所示, $\mu=0.02$,当 $\text{BER}=10^{-3}$ 时,接收机的灵敏度提高了至少 6.5 dB.

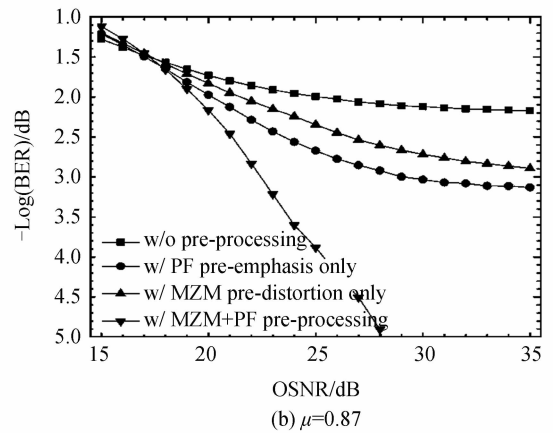
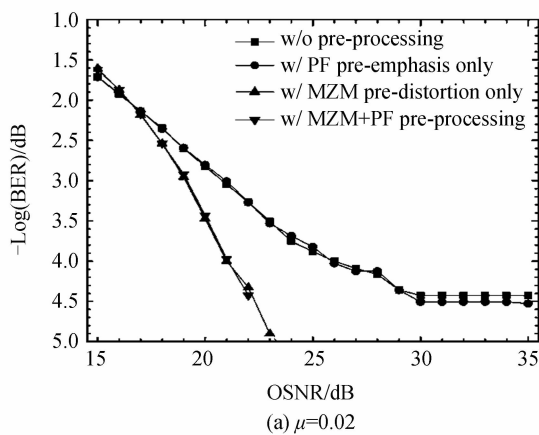
(b) $\mu=0.87$

图 6 不同功率衰减因子下误比特率曲线

Fig. 6 BER versus OSNR under different power fading factors

(a) $\mu=0.02$

4 结论

本文首先对调制器的非线性及光纤色散引发的 OFDM 信号频率选择性功率衰减进行了较为详细的理论推导与分析.在不考虑其它因素的情况下,调制器的非线性在不同调制指数下对信号有不同程度的影响.调制指数较低时,属于噪音受限系统,相反系统性能则受限于非线性效应带来的损伤;而高频子载波功率因双边带信号的特点,在 PD 中互拍后,功率衰减程度相对低频子载波上来说较大,因而其检测得到的电 OFDM 信号高频子载波上的信噪比较低,误码率高.针对这两种现象给系统带来的损伤分别使用数字预处理(预失真与预增强)技术以改善系统性能.通过数值仿真分析,结果表明在光背靠背传输系统中,使用该技术时系统的 EVM 值可得到 0.5~2 dB 的改善.当电光调制器调制指数较高时,

产生的非线性干扰降低了系统的传输性能,随着光纤传输距离的增加,基带 DSB-OFDM 信号中高频率子载波衰减程序不断加深,当功率衰减因子 μ 较小时,在发射机使用 PF 与 MZM 预处理技术后系统误比特率性能有明显的提升.

参考文献

- [1] QIAN D, CVIJETIC N, WANG T. Novel optical OFDM transceiver structures [C]. Optoelectronics and Communications Conference (OECC), 2010 15th. 2010: 470-471.
- [2] CVIJETIC N. OFDM for next-generation optical access networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(4): 384-398.
- [3] HU Shan-mei, CHEN Lin. A radio over fiber system with frequency sextuple optical millimeter-wave generation carrying OFDM signal utilizing phase modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 699-703.
胡善梅, 陈林. 基于相位调制器产生六倍频光毫米波的 OFDM 信号光传输系统研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(4): 699-703.
- [4] GAO Yang, CHEN Lin, YU Jian-jun. Research on performances of LDPC coded OFDM in long reach and multi-mode fiber access network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 162-168.
高扬, 陈林, 余建军. 长距离和多模接入网络中低密度奇偶校验-正交频分复用的性能研究 [J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 162-168.
- [5] ZHANG Chao-li, CHEN Lin, SHAO Yu-feng, et al. An optical packet switching system with a novel scheme for using optical OFDM label signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 84-88.
- [6] CHEN Lin, CAO Zi-zheng, DONG Ze, et al. Experimental investigation of direct-detection optical orthogonal frequency-division multiplexing transmission system [J]. *Chinese Journal of 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.
- [7] CHEN L, KRONGOLD B, EVANS J. Performance analysis for optical OFDM transmission in short-range IM/DD systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(7): 974-983.
- [8] ZOU Wei-gang, YU Jian-jun, XIAO Jiang-nan, et al. Direct-detection optical orthogonal frequency division multiplexing system with new training sequence [J]. *Frequenz*, 2012, **66**(1): 27-32.
- [9] TANG Y, Keang-Po Ho, SHIEH W. Coherent optical OFDM transmitter design employing predistortion [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(11): 954-956.
- [10] VUJICIC V, CARTAXO A. Predistortion technique for mitigating the Mach-Zehnder modulator nonlinearity effect in DD-OFDM-UWB optical transmission systems [C]. Transparent Optical Networks (ICTON), 2011 13th International Conference. 2011: 1-4.
- [11] ALI A, LEIBRICH J, ROSENKRANZ W. Spectral efficiency and receiver sensitivity in direct detection optical-OFDM[C]. Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009, OFC 2009, 2009: 1-3.
- [12] CARTAX A V T, ALVES T M F. Theoretical and experimental performance evaluation methods for DD-OFDM systems with optical amplification [J]. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2011, **10**(1): 82-94.
- [13] CARTLEDGE J C. Performance of 10 Gb/s lightwave systems based on lithium niobate Mach-Zehnder modulators with asymmetric Y-branch waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, **7**(9): 1090-1092.
- [14] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electronics Letters*, 2006, **42**(10): 587-589.
- [15] GAO Yang, YU Jian-jun, XIAO Jiang-nan, et al. Direct-detection optical OFDM transmission system with pre-emphasis technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(14): 2138-2145.