

OFDM-ROF 系统中峰均比抑制及 预失真技术的研究*

毛陆虹¹, 张智栋², 郭志英², 南敬昌²

(1. 天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072; 2. 辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对 OFDM-ROF 链路中各器件非线性分别分析的复杂性, 就 OFDM-ROF 系统提出了基于 MATLAB 的联合仿真系统分析, 采用了峰值抵消法和记忆多项式预失真技术; 最终的 AM/AM 特性、频谱、星座图和收敛误差仿真结果显示该系统较原来的系统有很大的改进, 说明了对 OFDM-ROF 系统采用峰均比抑制以及预失真技术的可行性。

关键词: 光纤无线通信(ROF); 正交频分复用; 非线性; 预失真; 峰均比

中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2610-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.057

Research on PAPR restrain and pre-distortion technique in OFDM-ROF system

MAO Lu-hong¹, ZHANG Zhi-dong², GUO Zhi-ying², NAN Jing-chang²

(1. School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: For the nonlinear analysis of OFDM-ROF link devices respectively is complex, this paper proposed the OFDM-ROF joint system simulation analysis based on MATLAB, used the peak offset method and memory polynomial pre-distortion technology. The final AM/AM characteristics, spectrum, constellation chart and convergence error simulation results show that the system has a great improvement, it illustrates the feasibility using the suppression of PAPR and pre-distortion technology to OFDM-ROF system.

Key words: ROF(radio over fiber); OFDM; nonlinearity; pre-distortion; PAPR(peak to average power ratio)

0 引言

数字多媒体技术迅猛发展, 语音通信已不能满足人们的需要, 而是更生动形象的视频通信, 且希望无论何时何地都能享受到可靠、无缝的个人通信。传统的通信网络已不能满足日益增长的宽带和容量需求^[1], 为增加带宽使无线载波频率向射频微波、毫米波频段发展。由于频率升高、传输损耗加大, 致使无线通信系统易受环境影响, 传输范围变短, 导致每个射频接入点的覆盖范围缩小。按传统无线通信技术, 需建立大量天线基站, 且每个基站都需高性能数据处理设备、高频调制解调器, 成本很高。相对而言, 光纤通信技术的低成本、小传输损耗和巨大带宽资源使人们开始转向光纤通信与高频无线通信技术的结合, 这就是备受关注的光纤无线技术(ROF)^[2-13]。ROF通信网实现了无线网与有线网的融合, 将光纤接入网的超带宽、高可靠性等优点和宽带无线接入网的可移动性有机结合。

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术频谱利用率高, 能有效对抗无线信道的多径延迟等特点, 是一种很适合的无线通信技术。目前, 随技术的进步,

OFDM 技术已被广泛地应用于无线通信系统中。

移动通信发展迅速, 第三代(3G)移动通信技术近年已成熟, 已投入商业运营, 但其整体性能与期望相差很多。因此各国已开始着眼于 4G 移动通信系统的研发上。ROF 和 OFDM 技术被公认是 4G 核心技术, 将这两种技术结合成 OFDM-ROF 系统是这两种技术发展成熟的必然趋势, 于是可以将两种技术的优势加以结合互补。对 OFDM-ROF 系统的研究已成为业内热点^[12,13]。在 OFDM-ROF 系统研究中, 相比于 ROF 系统, 制约其传输性能的因素主要有两点: a) OFDM 信号的高 PAPR 值对 OFDM-ROF 系统的影响^[10-13]; b) ROF 链路的非线性器件对 OFDM 信号传输的影响。ROF 系统的非线性器件会产生非线性效应。链路中的 OFDM 信号传输动态范围较大时, 这种非线性效应越严重, 同样引起信号的子信道间干扰和非线性失真, 从而会影响系统传输性能。针对这种情况, 本文提出了 OFDM-ROF 联合系统仿真, 通过加入预失真系统将非线性链路的各部分作为一个整体来进行处理, 最终的性能有了较大提高。

收稿日期: 2011-10-31; **修回日期:** 2011-12-08 **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2010ZX03007-002-03); 国家自然科学基金资助项目(60971048)

作者简介: 毛陆虹(1961-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为射频集成电路、新型半导体器件与集成技术、光电子器件与光电集成电路; 张智栋(1986-), 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向为射频电路及放大器设计及线性化技术等; 郭志英(1986-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要研究方向为射频电路及线性化技术等; 南敬昌(1971-), 男, 河南滑县人, 教授, 硕导, 博士, 主要研究方向为射频电路与器件、多媒体信息编码、通信系统仿真等(nanjc886@sina.com)。

1 OFDM-ROF 系统

1.1 ROF 系统

ROF 是光纤承载无线信号的简称,可表述为:以光纤为传输媒介,以光波为载波,以高频微波、厘米波或毫米波为调制波,传输信息的一种技术。ROF 融合了两种常规技术,即无线通信和光纤传输。ROF 无线接入系统由中心站(central station, CS)、光纤链路、基站(base station, BS)和用户单元组成,如图1所示。其原理是:中心站负责光载光波生成、无线信号调制、编码及协议处理等操作,调制在光载波上的无线信号通过光纤在中心站与基站或基站之间传输,基站负责光电转换及信号放大,通过天线完成基站和用户端间无线信号的收发。

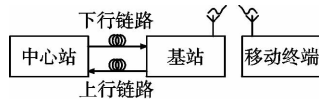


图1 无线通信系统框图

作为无线通信领域中一项非常有吸引力的解决方案,ROF 技术特点包括:a) 高带宽、低损耗;b) 对信号格式透明,基站结构简单,部署灵活;c) 抗化学腐蚀、抗电磁干扰能力强,保密性好。

1.2 OFDM 技术

OFDM 作为一种多载波调制传输技术,具有抗干扰能力强、传输容量大和频谱效率高等特点,是实现高速传输、提高传输质量的重要途径。OFDM 技术^[13]充分利用频率资源,利用多个载波互相正交,在不需要增加频谱资源的情况下,可以成倍地提高信道容量和频谱利用率。OFDM 还易于结合空时编码、分集、干扰(包括 ISI 和 ICI)抑制、智能天线以及 MIMO 系统。目前,无线通信的频谱资源很有限,因此在解决未来无线网络巨大容量问题上 OFDM 技术显得非常突出,在下一代移动通信中,得到越来越多的重视。与传统无线通信系统相比,OFDM 技术有以下优点:可以有效地对抗 ISI,适用于多径环境和衰落信道中的高速数据传输;有很强的抗突发干扰能力。OFDM 自身的优点对于无线通信的发展非常具有吸引力。

1.3 OFDM-ROF 系统

OFDM 技术与 ROF 技术相结合组成 OFDM-ROF 系统,即在光纤无线通信系统中传输的基带信号为 OFDM 信号。它是一种新颖的光线无线通信系统,称为 OFDM-ROF 光无线传输系统,简称 OFDM-ROF 系统。

图2 为一个全双工 OFDM-ROF 系统结构框图。

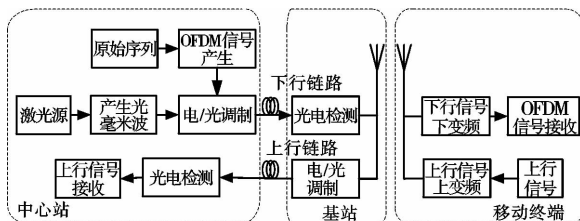


图2 全双工OFDM-ROF系统结构框图

中心站主要负责下行光载 OFDM 无线信号的产生和上行数据的检测和接收;基站主要完成将下行的光载 OFDM 无线信号检测得到电 OFDM 无线信号,通过天线发射和从天线接收上行信号并调制到光载波上产生上行光载信号;移动终端即用户单元,通过天线接收无线 OFDM 信号,下变频得基带信号并接收解调,同时发射上行信号。实际通信网络中,一个中心站与多个基站连接,一个基站又与多个用户单元相连。为了节

约整个通信网络的成本和便于管理,通常尽可能地将复杂的处理和昂贵设备放在中心站。本系统对 OFDM 信号的处理和调制、无线信号的产生都由中心站完成,降低了基站的成本,从而降低了整个系统的成本。

OFDM-ROF 系统利用了两项技术的优势,将光通信网络的巨大传输容量和无线网络的灵活性充分结合。由于 OFDM 信号的峰均功率比(PAPR)高,当 OFDM 信号在 ROF 链路中传输时,过大的 PAPR 值会引起 ROF 链路中的非线性器件(光源、调制器、光检测器以及光纤等)产生非线性效应。这些非线性效应将引起传输信号波形的失真,导致整个光传输系统性能的急剧下降。系统的实施还需对其优化。

1.4 OFDM-ROF 系统中的非线性分析

1.4.1 PAPR 值对 OFDM-ROF 系统的影响

峰值平均比简称峰均比,是指峰值功率和平均功率的比值。 $PAPR(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{\max \{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}}$ 。其中: x_n 表示经过 IF-

FT 运算之后得到的输出信号,即 $x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk}$,对于包含 N 个子信道的 OFDM 系统来说,当 N 个子信号都以相同的相位求和时,所得峰值功率就是平均功率的 N 倍,因而基带信号的峰均比可以为 $PAPR = 10 \log_{10} N$ 。当子信道数目较大时,OFDM 系统的峰均功率比很高,将严重影响系统性能。

1.4.2 ROF 系统中非线性分析

ROF 系统是由分立的非线性光电器件组成的,要在 ROF 系统应用数字预失真技术,首先需要对 ROF 系统的非线性组成及其特性进行分析。本文基于 IM-DD 结构研究数字预失真技术在 OFDM-ROF 系统中的应用。典型 IM-DD 结构 ROF 系统如图3所示。

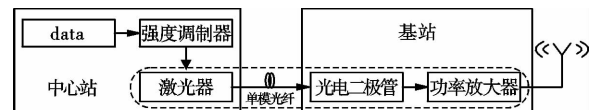


图3 典型IM-DD结构ROF系统

图3 虚线框中为 ROF 系统中造成非线性效应的主要部分,称为非线性链路,数字预失真主要是针对这部分产生的非线性进行补偿。以图3为例,对 ROF 链路中造成非线性的各部分进行简要分析。

1) 激光二极管(laser diode transmitter)

造成激光二极管产生非线性的主要原因包括受激辐射、自发辐射及其增益抑制特性。由此产生的非线性特性又分为静态非线性和动态非线性两类。

a) 静态非线性,通常以三阶多项式来描述。激光二极管的输出功率 $P_{\text{out}}(t)$ 是输入电信号 $s(t)$ 的非线性函数,表示为

$$P_{\text{out}}(t) = p_0 [1 + ms(t) + A_1 m^2 s^2(t) + A_2 m^3 s^3(t)] \quad (1)$$

其中: m 是调制系数, A_1 、 A_2 分别是与器件相关的非线性系数。

b) 动态非线性,常以激光器速率方程(laser rate equations)来描述。当激光器谐振频率(laser resonance frequency)高于调制频率 5 倍以上时,相关性很弱,可认为其与频率无关。除此以外,泄漏电流(leakage current)和轴向空间烧孔效应(axial hole burning)也会造成激光器的非线性。

2) 单模光纤(single mode fiber, SMF)

在分析 ROF 传输系统或者光纤传输系统中的单模光纤时,人们一般关注其色散特性和衰减特性。光纤的色散情况可

以通过其传输方程反映出来,为

$$H(f) = e^{-j\alpha l} (f - f_0)^2 \quad (2)$$

其中: α 是色散系数; l 代表光纤长度, f 是调制无线频率; f_0 是光载波频率。

3) 光电二极管接收器 (photodiode receiver)

高速光电管中的光电敏感区较小。虽然其敏感度较低,在采用直接调制的 ROF 链路里,瞬时光功率受限于激光器的非线性,所以光电二极管会在线性区内工作。在传统的 ROF 链路中,光电二极管本身的非线性并不是决定整个链路非线性的主要因素。相比之下,光电二极管的额定功率 (power-handling capability) 是一个更值得关注的参数,它和其他器件的非线性特性同等重要,共同决定整个 ROF 链路的动态范围。

4) 功率放大器 (power amplifier, PA)

采用直接调制的 ROF 链路中仅光电转换、电光转换两个过程就引入了高达 30 dB 的损耗,这一方面是因为 LD 的转换效率低下;另一方面光纤和连接器的使用都会产生插入损耗。在发送端,调制激光器的输入信号出于保护器件考虑及避免其产生广泛非线性失真,输入功率被限制不能太高,典型的调制深度大概在 10% ~ 30% 左右。所以,实际基站中接收经转换得到的射频信号功率很低,为达到天线发射要求,在光电二极管完成光电转换后必须使用功放。功放是 ROF 非线性链路的主要组成器件,其非线性也是系统必须考虑的一部分。

2 联合仿真系统分析

2.1 自适应预失真结构

从以上的分析可以看出,构成 OFDM-ROF 系统非线性的因素很多,试图针对每一项分别精确补偿的方法将很困难,因为:首先,OFDM-ROF 系统的配置参数过多,且很多参数都跟器件相关。说明对每一个 OFDM-ROF 系统,需详勘其每一个配置参数。其次,OFDM-ROF 系统中对其非线性构成影响的参量因素是变化的。这些因素的变化大致来自于两方面:a) 影响系统非线性的时变因素,如器件老化及温度、湿度等工作环境的变化;b) OFDM-ROF 系统工作时的无线接入用户数量是随机的,且每个移动用户的接入信号功率也会因衰减影响而动态变化,用户的上线、离线或支持多业务系统中服务功能的切换等操作都会对系统传输射频信号功率产生影响,从而改变整个系统非线性。最后,针对每一个非线性因素精确补偿需要多种补偿机制,其间协调和同步也是一大问题,会大大增加系统集成化难度。

本文采用了引入反馈回路的自适应数字预失真方法来完成系统的线性化。其结构框图如图 4 所示。

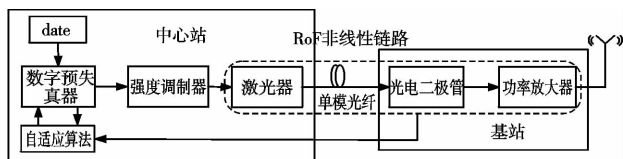


图4 OFDM-ROF系统自适应预失真框图

在此方案中,将 OFDM-ROF 系统的非线性链路视做一个黑盒(图 4 虚线框部分),只需考虑其输入输出特性,通过对负反馈的信号和参考信号的对比,通过自适应算法不断更新预失真器中的参数,使其特性逐渐逼近 OFDM-ROF 非线性特性的逆特性,以达线性化的目的。

本方案引入自适应反馈回路的好处在于:未知系统环境

中,采用自适应方法可不用过多考虑系统中各器件具体参数的变化,只需关注系统的输入输出关系,并根据反馈数据进行实时调整,仿真证明非线性补偿效果良好。

2.2 峰值抵消法结构分析

为了提高系统的线性度,在数字预失真模块前,对于高峰均比的输入信号,采用峰均比抑制技术,在保证一定性能指标的前提下,适当地减小峰均比值,再经过预失真处理,整个系统的性能将有更大的改善。峰值抵消法是一种基于直接削峰思想的改进型峰均比抑制技术。相比直接削峰法,在保留其算法简单、易于实现的优点的同时,更为有效地减小了直接削峰引起的带内失真和带外频谱扩散。

峰值抵消法原理如图 5 所示。该算法的具体操作是:首先对输入的复信号进行极坐标削峰,并记录原始信号的 $\sin/\cos$ 值来保留信号的相位信息;然后对一次削峰后产生的误差脉冲信号,使用跟输入信号相同频带的低通滤波器成形,滤除由于直接削峰引起的带外频谱扩散;之后反向叠加在相应的输入信号上,达到峰值抵消的效果。由于叠加的误差脉冲具有有限带特性,因而随机叠加后对信号的频谱影响集中在带内,不会破坏信号原有的频谱特性。引入了二次极坐标削峰,是为了避免低通滤波可能会带来的峰均比回升^[14]。

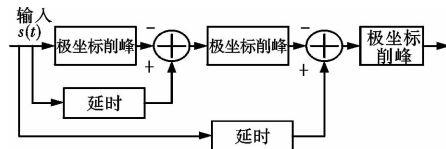


图5 峰值抵消法原理

2.3 联合仿真系统仿真结果

联合仿真系统框图如图 6 所示,输入信号为 64QAM 信号,带宽为 7.56 MHz,经过 4 倍内插采样,再经升余弦成形滤波,滤波系数为 0.05。在预失真前,引进了功率回退技术,由于信号峰均比为 7.550 1,对于回退量一般取信号峰均比的一半,因此输入信号回退 4 dB。在功率回退后,采用峰值抵消技术,对信号进行峰均比抑制 1.5 dB,再经基于多项式的自适应预失真系统。其中自适应算法采用 LMS 算法,步长为 0.35。功放模型采用具有 5 阶非线性,2 阶记忆性的 Wiener 模型,由线性时不变系统 $H(z)$ 级联无记忆非线性系统 $F(v)$,如图 7 所示。

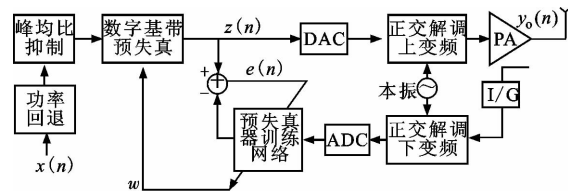


图6 联合仿真系统框图

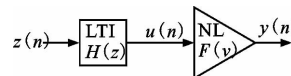


图7 Wiener功放模型

本文的预失真器采用记忆多项式模型来模拟非线性功放的逆特性。记忆多项式模型的数学表述为

$$u(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^L w_{kl} r(n-l) |r(n-1)|^{k-1} \quad (3)$$

仿真中采用 7 阶非线性和 10 阶记忆效应的记忆多项式模型,即非线性阶数 $K=7$,记忆深度 $L=10$ 。最终得出了仿真结果,其中的功放的 AM/AM 特性如图 8 所示。

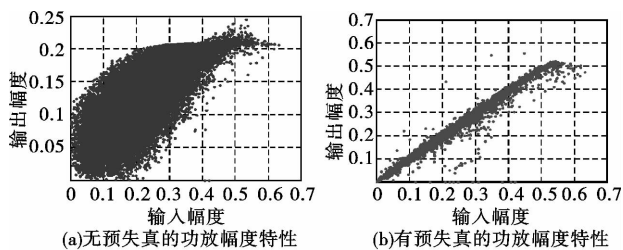


图8 有无预失真的功放幅度特性

由图8可知,系统在无预失真处理前 AM/AM 特性很差、点很分散,而经过预失真后,AM/AM 特性有了显著的改善,基本上成一条直线,可以满足系统要求。

图9为系统星座仿复图。由图9可知,经预失真和极坐标削峰后的星座图与原星座图相差不大,无太大的相位偏差和发散,而直接经过非线性系统的星座图相移很大,发散严重。

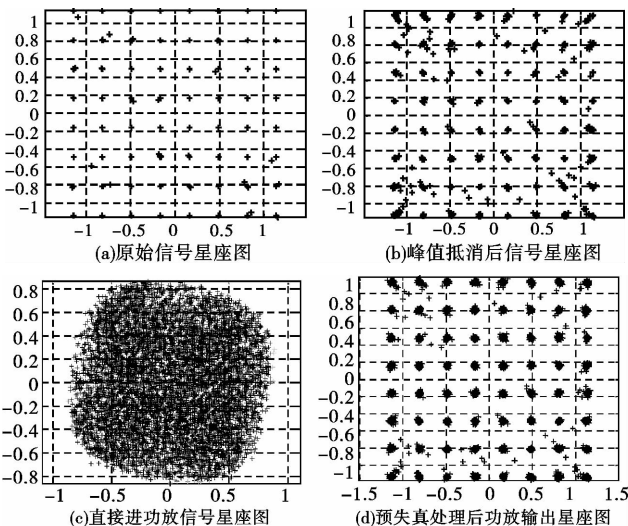


图9 星座仿真图

图10是OFDM-ROF系统频谱图,分别进行了无预失真、预失真后、削峰后等仿真,并与原始信号进行了对比,最终的频谱对比如图9所示。

由图10可知,OFDM-ROF系统频谱图中无预失真频谱;输入信号的 PAPR = 7.5501,邻信道干扰非常严重,如①所示;而经过预失真后的信号有了改善,如②所示;而经过极坐标削峰后的信号线性度非常好,削峰后的信号 PAPR = 6.0659,如③所示;④为原始信号。

图11为最终的收敛误差幅度曲线。以下分别为削峰后、直接经过功放和预失真后的 EVM 值,可知,加入削峰和预失真后的系统效果改善显著。 $EVM_1 = 1.0976$ (削峰后的 EVM), $EVM_2 = 54.28029$ (直接经过功放的 EVM), $EVM_3 = 1.7610$ (预失真之后的 EVM)。

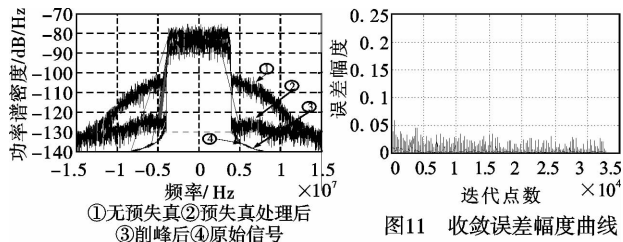


图10 OFDM-ROF系统频谱图

图11 收敛误差幅度曲线

3 结束语

OFDM-ROF 系统是多媒体通信中的一种重要技术,对于

满足人们对当今社会高速率、高保真度的通信需求具有极其重要的作用。针对 OFDM-ROF 系统中存在的非线性特性,本文就整个系统的非线性进行分析,提高了改进系统非线性的能力,简化了系统的分析过程,使系统的预失真性能较单独针对系统非线性器件和因素进行预失真有更大提高,并且节约了成本。通过对系统的 AM/AM、频谱、星座图和收敛误差仿真结果显示,该系统较原来未加入预失真和削峰的系统在各项性能指标上有了很大的改进,说明了对 OFDM-ROF 系统采用峰均比抑制以及预失真技术的可行性,对从事该方面研究的人员有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴伟陵,牛凯. 移动通信原理[M]. 北京:电子工业出版社,2005:16-72.
- [2] FERNANDO X, SESAY A. Nonlinear distortion compensation of microwave fiber optic links with asymmetric adaptive filters [C]//Proc of IEEE International Microwave Symposium. 2000:1821-1824.
- [3] JIAN Wei, YU Chong-xiu, WANG Jian-xin, et al. A digital adaptive predistortion method of OFDM power amplifier[C]//Proc of International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. Washington DC: IEEE Computer Society, 2009: 623-626.
- [4] FERNANDO X N, SESAY A B. Adaptive asymmetric linearization of radio over fiber links for wireless access[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1576-1586.
- [5] HEKKALA A, LASANEN M, HARJULA I, et al. Analysis of and compensation for non-ideal ROF links in DAS [J]. IEEE Wireless Communications, 2010, 17(3): 52-59.
- [6] HEKKALA A, LASANEN M, VIEIRA L C, et al. Architectures for joint compensation of ROF and PA with nonideal feedback [C]//Proc of the 71st Vehicular Technology Conference. 2010:1-5.
- [7] VIEIRA L C, GOMES N J, NKANSAH A, et al. Behavioral modeling of radio-over-fiber links using memory polynomials [C]//Proc of IEEE Topical Meeting on Microwave Photonics. 2010:85-88.
- [8] FERNANDO X N, SESAY A B. Characteristics of directly modulated ROF link for wireless access[C]//Proc of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. 2004:2167-2170.
- [9] ANDREA D A N, LOTTICI V, REGGIANNINI R. Efficient digital pre-distortion in radio relay links with nonlinear power amplifiers [J]. IEEP Proceedings Communications, 2000, 147(3): 175-179.
- [10] ASSIMAKOPOULOS P, VIEIRA L C, NKANSAH A, et al. Modelling of a DFB laser at low bias directly modulated with an OFDM signal for RoF applications[C]//Proc of International Topical Meeting on Microwave Photonics. 2009:1-4.
- [11] VIEIRA C L, GOMES N J, NKANSAH A. An Experimental study on digital pre-distortion for radio-over-fiber links [C]//Proc of IEEE Communications and Photonics Conference and Exhibition. 2010:126-127.
- [12] ISLAM A H M R, SHAFIK R A, RAHMAN M S, et al. On the nonlinear distortion effects in an OFDM-ROF link [C]//Proc of the 2th International Conference on Emerging Technologies. 2006:20-26.
- [13] 龚珉杰. 数字预失真技术在 ROF 系统中应用研究[D]. 北京:北京邮电大学,2010.
- [14] 张福洪,孔庆浩,栗慎吉. 宽带系统中有记忆大功率功放的数字预失真器研究[J]. 电子器件, 2008, 31(6): 1903-1906.