

OFDM-RoF原理与关键技术

Principles and Key Technologies of OFDM-RoF

中图分类号: TN92 文献标识码: A 文章编号: 1009-6868 (2009) 03-0040-05

摘要: 光通信与无线通信的融合是未来通信的发展方向。正交频分复用(OFDM)技术即将成为下一代无线通信的物理层核心技术。OFDM光载无线(OFDM-RoF)接合了无线通信和光通信的优点,具有高速率、大容量、高频谱利用率的优势。OFDM-RoF系统有光纤色散、光纤非线性、调制非线性等问题,可以利用峰值平均功率比(PAPR)降低算法降低光纤非线性、调制非线性;利用循环前缀、信道估计消除色散影响;利用数字相位共轭、偏载波填充、非线性预补偿、降低序列相关性降低光纤非线性。

关键词: O-OFDM; OFDM-RoF; MZM; PAPR; 色散; 非线性

Abstract: There is a tendency that the future communication networks will be the integration of optical communications and wireless communications. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) will be the core physical layer technology for the next generation wireless communications. The OFDM-Radio over Fiber (OFDM-RoF) technology, which features high speed, huge capacity, high spectrum efficiency, combines the advantages of optical and wireless communications. There are problems such as fiber dispersion, fiber nonlinearity and modulation nonlinearity in OFDM-RoF systems. Finally the solutions to the drawbacks are given respectively, such as fiber nonlinearity and modulation nonlinearity mitigation by Peak to Average Power Ratio (PAPR) reduction algorithms, dispersion elimination by cycle prefix insertion and channel estimation, fiber nonlinearity mitigation by digital phase conjugation, partial carrier filling, nonlinear pre-distortion and serial correlation reduction.

Key words: O-OFDM; OFDM-RoF; MZM; PAPR; dispersion; nonlinearities

李伟林/LI Wei-lin

张杰/ZHANG Jie

顾婉仪/GU Wan-yi

(北京邮电大学光通信与光电子学研究院 北京

100876)

(Institute of Optical Communication and Opti-electronics Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing, 100876)

的传输链路,直接利用光载波来传输射频信号。光纤仅起到传输的作用,交换、控制和信号的再生都集中在中心站,基站仅实现光电转换,这样,可以把复杂昂贵的设备集中到中心站点,让多个远端基站共享这些设备,减少基站的功耗和成本,实现大容量、低成本的射频信号的有线传输、超宽带的无线接入。

正交频分复用(OFDM)是一种多载波的传输技术,其主要思想就是在频域内将信道分成许多正交子信道,在各个低速的子载波信道上承载高速的数据流,并且各子载波并行传输。OFDM技术以其抗频率选择性衰落等优势而成为下一代宽带无线通信系统的核心技术,已经广泛被采纳为无线通信物理层的标准,同时也成为了欧洲、亚洲、澳洲以及其他国家的数字音视频广播的物理层标准中的一部分^[1]。

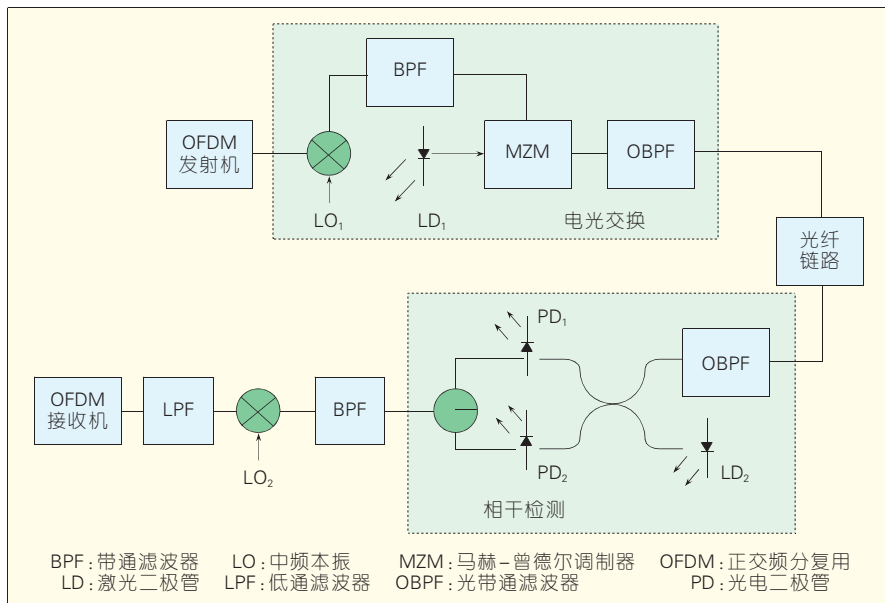
光载OFDM(O-OFDM)系统^[2]结合OFDM技术与光通信的特点,构建出高速率、大容量、低成本的光传输网络^[3-4],并且具有较强的信道容量的可扩展性,可以在现有网络的基础上很好的升级与过渡,提供高速率、大容量、高质量的通信服务。O-OFDM技术也可以作为全球微波互联接入(WiMAX)、无线局域网(WLAN)的一部

1 OFDM-RoF技术背景与特点

移动性、无线化、数字化和宽带化是当今信息业的发展趋势,超高速、超大容量成为信息传送追求的主要目标。随着社会信息化程度的深入,城域以太网、IPTV、高清晰电视、移动多媒体、视频流媒体等新业务的不断涌现,人类社会对于信息传输带宽的需求一直在以惊人的速度增长。与此同时,人们对于无线通信的需求

也急剧增长,3G时代的到来使人们实现“任何时间、任何地点以任何方式”获得各种多媒体信息的梦想成为现实。但是,无线通信有限的频谱资源和有限的传输距离使它的发展受到很大的限制,如何有效利用光通信与无线通信的优势,实现光通信与无线通信的融合将成为未来通信的发展方向。无线通信在40 GHz~60 GHz附近高频段的频谱资源丰富,而且不需要频率使用授权,如果将其作为无线信号载波频率,足够实现超宽带的无线通信的业务需求,因此光载无线(RoF)技术应运而生。RoF系统中运用光纤作为基站(BS)与中心站(CS)之间

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60877052); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA01Z220)



▲图1 CO-OFDM系统框图

分,通过RoF技术的使用^[5],在有效降低无线信号的多径衰落的同时提高了信号的质量,通过增加基站数目来实现无线网络的无缝覆盖,并且提高了信道容量、传输速率,简化了数字信号处理的复杂度。因此,O-OFDM系统可以成为OFDM-RoF系统的一种具体部署方案,本文将通过详细论述O-OFDM系统来揭示OFDM-RoF系统的原理与特点。

O-OFDM由于其独特的优势,在全世界范围内得到了深入的研究,在欧洲光通信展览会(OFC)2008、OFC2009和美国光电光纤通信展览会(ECOC)2007、ECOC2008会议上,O-OFDM传输理论与技术成为了会议的热点之一。O-OFDM系统的优势主要表现在如下几个方面:

- O-OFDM系统在传输过程中不需要复杂的色散管理,这样既能实现高速的数据传输,降低了网络的复杂度和建设、运行、维护的成本,也能适应动态变化的网络环境。

- O-OFDM系统可以最大限度的利用频谱资源,提高频谱效率。

- O-OFDM系统与原有的波分复用(WDM)系统有很好的兼容性,可充分利用WDM系统在光纤链路和光放

大器方面的巨大投资,只需要在发射和接收端进行适应性改造即能够完成升级。

虽然O-OFDM系统拥有明显的优势,但也有一些缺点,并带来新的需要研究的问题:

- O-OFDM是多个子信道信号的叠加,因此如果多个信号的相位一致,所得到的叠加信号的瞬时功率就会远远高于信号的平均功率,导致出现较大的峰值平均功率比(PAPR)。这对发射机的线性范围提出了很高的

要求,也容易引入信号失真和符号间干扰(ISI),降低系统的信噪比(SNR)。

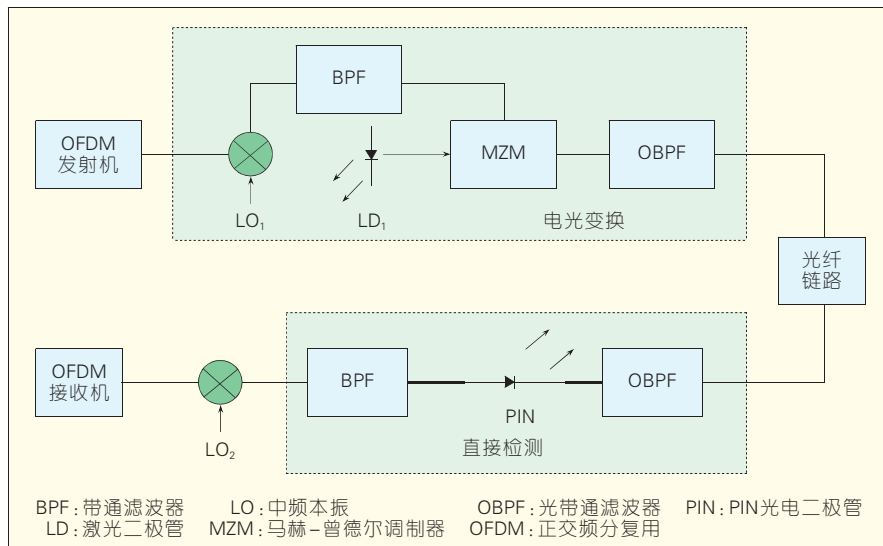
- O-OFDM技术能有效地解决光纤传输时的色散问题,但是由于其众多的子载波与较小的频率间隔,加之较高的PAPR,光纤非线性光学效应会严重影响系统的性能。

- O-OFDM系统对相位噪声极其敏感,这些相位噪声包括光器件的相位噪声、放大自发辐射(ASE)噪声、非线性相位噪声。相位噪声会使各个子载波之间的正交特性恶化,极大地降低系统性能。

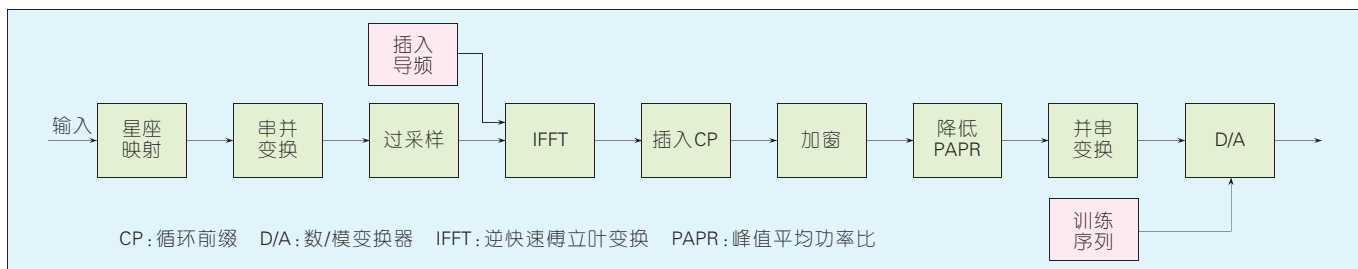
2 O-OFDM系统原理

一个典型的O-OFDM系统可以分为OFDM基带信号发射机、电/光变换、光纤链路、光/电检测和OFDM基带接收机5部分。根据接收端实现方式不同,可以分为相干检测光OFDM系统(CO-OFDM)与直接检测光OFDM系统(DDO-OFDM)两种方式。相干检测方式就是在接收端采用光相干外差(或零差)检测,直接检测方式就是接收端采用PIN光电二极管,直接将光功率转换成电流。典型的CO-OFDM系统如图1所示^[6],典型的DDO-OFDM系统除了接收端检测方式不同以外,其余部分基本一致,如图2所示。

OFDM基带信号发射机的工作原



▲图2 DDO-OFDM系统框图



▲图3 OFDM 发射机

理如图3所示。处理环节包括:星座映射、IFFT实现正交频分复用、过采样处理、导频符号添加、训练序列添加、循环前缀添加、加窗处理、PAPR降低处理模块等。

CO-OFDM系统通过马赫-曾德调制器(MZM)将射频OFDM信号调制到光域。系统的光纤链路使用现有的WDM光纤传输链路,由于OFDM技术的优越性,可以支持高速率、高容量、低色散的传输,因此色散补偿可以大为简化。

在CO-OFDM系统中,采用光相干检测,使用两对平衡接收机零差检测,完成光/电变换,还原到射频OFDM信号,最后还原成基带OFDM信号;使用相干检测的优点在于输出信号的质量好、信噪比高,缺点是对激光器的线性范围要求很高,要求激光器的线宽在100KHz以内,因此相关产品的成本较高,目前Intel公司已经推出可以达到近似此线宽的激光器。在DDO-OFDM系统中,采用PIN接收机进行光/电变换,在输出信号质量上虽然不如相干检测系统,但是系统的成本偏低。相干检测系统适合于长距离光纤传输,而直接检测系统则适合于短距离光纤传输,对于RoF技术的适用范围而言,需要在性能与成本上取得折中。

OFDM基带接收机的工作原理如图4所示,处理环节包括:训练序列的移除、OFDM符号同步、载波同步、快速傅立叶变换(FFT)、窗同步;循环前缀的移除;导频符号的移除、信道估计,使用电均衡技术消除由光器件非线性、光纤色散与非线性、ASE噪声带来的失真;进行FFT运算解调OFDM符号、星座逆映射等。

3 CO-OFDM系统中色散的影响与消除

在光纤传输中,色散的存在导致信号在时域上表现为峰值功率的下降,波形的展宽;频域上表现为不同频率分量产生不同的相移。OFDM技术的特点是使用多载波调制,那么各个频率不相同的子载波将引入不同的相移,因此会导致ISI的产生。

在O-OFDM系统中,调制到光域的OFDM信号在光纤中的传播满足非线性薛定谔方程,由于色散引入的相移可以通过求解方程得到:

$$\phi = \Phi_0 + \frac{c}{f_{lo}^2} D_l f^2 \quad (1)$$

其中 c 为光速, f_{lo} 为激光器的中心频率, D_l 为累计色散参量, $\Phi_0 = \beta_0 z$ 为中心频率处引入的相移。

由于色散导致的信号失真可以看作是线性的信道失真,故在

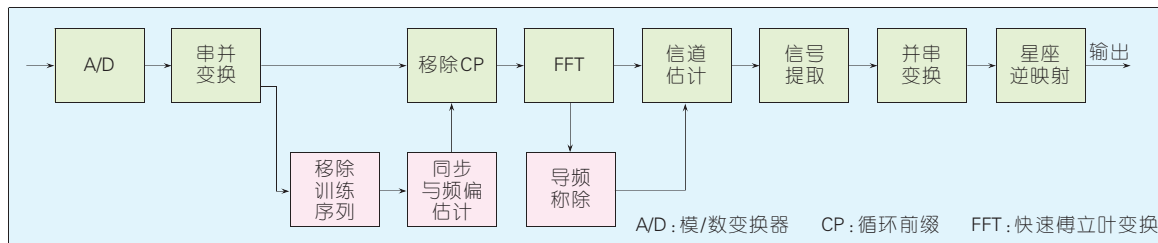
O-OFDM系统中处理色散更多的是引入循环前缀(CP)、使用电均衡处理技术,这样在接收端可以简化色散处理机制,同时在链路中简化甚至取消了色散补偿处理,实现了光网络的动态可重构性。

在O-OFDM系统中,引入的循环前缀的长度至少应该长于色散导致的时延,理论上只要循环前缀的长度足够长,色散的影响可以降低到最低点,但是OFDM系统的频谱利用率将大为降低,所以我们在引入合适的循环前缀的同时将在接收端使用电均衡处理,处理过程大体如下:通过在发送端添加适当长度的导频序列、训练序列,在接收端根据最小二乘准则(LS)、最小均方误差准则(MMSE)估计出导频位置的频率响应值,然后再从导频位置的初始估计出发,利用插值滤波算法得到信道其他所有位置的频率响应估计,从而得到整个信道的信道传递函数,最后根据信道传递函数进行均衡处理。

4 O-OFDM系统的非线性效应与消除

4.1 MZM调制非线性与PAPR

O-OFDM系统广泛应用MZM作为光发射机进行电/光变换。MZ调制器



◀图4 OFDM 接收机

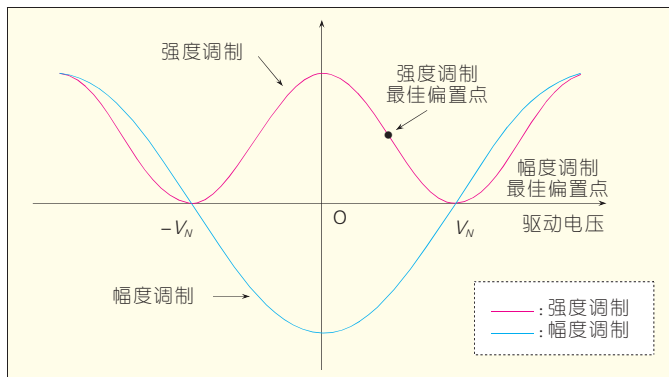


图5
MZM调制器偏置电压与输出信号的关系示意图

是一个非线性的调制器,其偏置电压与输出信号的关系如图5所示。当信号幅度超过MZM的最大变换线性区间,那么信号将会引入不可恢复性的失真,降低系统的误码率性能。因此不仅需要对信号进行处理,使信号幅度的均值尽量落在MZM的线性区间内,而且也需要对MZM的偏置点进行优化选择,使在调制过程中产生的交调失真产物最小。由于OFDM技术存在PAPR较高的缺陷,因而导致MZ调制深度过深,引入较大的交调失真,降低误码率特性,因此降低PAPR对于MZM调制器至关重要。

4.2 FWM与PAPR

OFDM技术应用于超长距离光纤传输可以利用其抗色散特性,但是OFDM技术对光纤非线性效应很敏感。对于单路WDM信道而言,由于信道内OFDM各个子载波之间的频率间隔很小,因此容易满足发生四波混频(FWM)现象所要求的相位匹配条件,使OFDM各个子载波上叠加较为严重的FWM噪声,降低信噪比。FWM产物跟OFDM各个子载波上的功率有直接的关系^[7],如果能降低OFDM符号的平均功率,将大大改善系统抗FWM的能力。而降低FWM最直接的方法是降低OFDM的峰值功率,也就等价于降低OFDM符号的PAPR。

4.3 FWM与各子载波之间序列相关性

FWM不仅与OFDM信号的功率有关,而且也与OFDM子载波之间的相

关性有关。在独立同分布条件 $E(x_i)=0$, $D(x_i)=\sigma^2$ 下,可以通过计算得到FWM噪声方差。第 d 个子载波上的FWM方差可以表示为^[8]:

$$D_d = \frac{1}{2} (\gamma Z_{eff} P)^2 \alpha \left[3 - \frac{9}{N_c} - \left(\frac{2d+1-N_c}{N_c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

其中 N_c 表示为子载波数目, P 为归一化的OFDM符号的平均功率, γ 为光纤的非线性系数, α 为光纤损耗系数, Z_{eff} 为有效光纤长度。如果数字基带调制采用MPSK,满足欧式距离 $|x_d|=1$, $\sigma^2=1$,可以得到第 d 个子载波处的信噪比(SNR):

$$SNR(d) = 20 \lg \left(\frac{\alpha}{\gamma Z_{eff} P} \right) - 10 \lg \left[\frac{3}{2} - \frac{9}{2N_c} - \frac{1}{2} \left(\frac{2d+1-N_c}{N_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

假设 $\gamma \approx 2 W^{-1} km^{-1}$, $P \approx 1 mw$, $\alpha=0.2$ dB/km, $N_c=1024$,那么典型的SNR值如下所示:

$$SNR_{min} = SNR \left(\frac{N_c}{2} \right) = 25.5 \text{ dB} \\ SNR_{max} = SNR(0) = SNR(N_c-1) = 27.2 \text{ dB} \quad (4)$$

在实际中我们很难在信道编码中做到使序列满足独立同分布,那么非线性噪声值会大于式(3)、式(4)。因此我们可以通过一些处理使序列接近于独立同分布,一个比较好的方法是降低OFDM各个子载波之间的相关性。如果能保证较小的相关性,信号时域功率将不会呈现剧烈的起伏,从而光纤的非线性效应也变得微弱。

4.4 O-OFDM非线性失真处理机制

(1) 偏载波填充算法

抑制FWM最直接的方法为破坏FWM的相位匹配条件。偏载波填充算

法(PCF)通过在特定的OFDM子载波上进行填充“空”子载波,而这些特定的子载波上传输的数据始终为“0”,通过破坏FWM相位匹配条件,使FWM产物主要落在这些“空”子载波上,而在接收端通过丢弃这些“空”子载波达到降低光纤非线性效应的目的。但是PCF算法是以牺牲带宽换取系统的性能,较大的降低了系统的频带利用率。

(2) PAPR降低算法

在O-OFDM系统中,MZ调制、光纤传输中的非线性效应都受信号峰值功率的影响,导致信号的失真,系统性能的下降。因此消除非线性效应最直接的方法是降低OFDM系统中的PAPR。

目前降低PAPR的方法大致分为3类^[9]:第一类为信号预畸变技术,即在信号经过放大之前,首先对功率值大于门限值的信号进行非线性畸变,包括限幅、峰值加窗、峰值消除等操作。第二类是编码方法,即避免使用那些会生成大峰值功率信号的编码图样。第三种是概率类算法,利用不同的加扰序列对OFDM符号进行加权处理,从而选择PAPR较小的OFDM符号来传输,例如:部分传输序列(PTS)、选择性映射(SLM)。

(3) 非线性预补偿

O-OFDM系统中由于色散引入的走离效应不强,但是引入了较强的非线性相位失真,导致星座点的旋转,当非线性效应较强时甚至会导致判决区域错误,降低误码率性能。因此为了进一步降低光纤非线性的影响,可以在进行电/光变换之前对信号进行处理,引入预失真相位。

非线性预补偿技术可以采用分布傅立叶算法^[10],相当于加入了一根“虚拟光纤”,那么OFDM符号经过该处理后都乘以一个相位因子 $\theta(t)$ 。

$$\theta(t) = P(t) \cdot s \cdot L_{eff} \cdot 2\pi \cdot n_2 / (\lambda_0 A_{eff}) \quad (5)$$

$P(t)$ 为瞬时光功率, s 为分布傅立叶算法中“光纤”的分段数, L_{eff} 为每段光纤的有效长度, n_2 为非线性系

数, λ_0 为激光器的波长, A_{eff} 为“光纤”的有效面积。

(4) 数字相位共轭

在光纤通信系统中,一般在光纤传输长度的中点处放置一个相位共轭器来减小光纤非线性引入的相位噪声。但是当动态重构性成为光网络发展的趋势时,使用相位共轭器不够灵活,无法处理动态建立的光纤链路。O-OFDM系统中大量的采用了数字信号处理技术,在发射端进行预失真相位补偿,同样也可以在接收端进行非线性相位补偿,因此我们可以将前面提到的相位共轭器的功能在接收端进行通过数字信号处理实现,这样通过运算复杂度的增加实现了动态可重构光网络非线性效应的抑制。

5 结束语

O-OFDM技术在RoF和超长距离传输中都有广阔的应用前景,在国内外已引起广泛的关注,并由此引发了许多新的研究热点,这些研究必将促使光通信与无线通信的融合,加快无线通信和光通信的发展。

6 参考文献

[1] SHIEH W, BAO H, TANG Y. Coherent optical OFDM: theory and design[J]. Optics Express,

- 2008, 16(2):841-859.
- [2] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Electronics Letters, 2006, 42(10): 587-589.
- [3] DJORDJEVIC I B, VASIC B. Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission[J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3767-3775.
- [4] LOWERY A J, DU L, ARMSTRONG J. Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems[C]//Proceedings of 2006 Optical Fiber Communication Conference and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC'06), Mar 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006.
- [5] UMASANKAR B, JAYALATH A D S, FERNANDO X. Adaptive Performance Improvement of OFDM Radio over Fiber Systems[C]//Proceedings of International Symposium on Signals, Systems and Electronics(ISSSE'07), Jul 30-Aug 2, 2007, Montreal, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 611-614.
- [6] TANG Yan, SHIEH W, YI Xingwen, et al. Optimum design for RF-to-optical up-converter in coherent optical OFDM systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(7):483-485.
- [7] GOEBEL B, FESL B, COELHO L D, et al. On the Effect of FWM in Coherent Optical OFDM Systems[C]//Proceedings of 2008 Optical Fiber Communication Conference and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference(OFC/NFOEC'08), Feb 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008.
- [8] LI Weilin, YU Song, QIU Wenbo, et al. FWM mitigation based on serial correlation reduction by partial transmit sequence in coherent optical OFDM systems[J]. Optics Communications, 2009, to be published.
- [9] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [10] LOWERY A J. Fiber nonlinearity mitigation in

optical links that use OFDM for dispersion compensation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (19):1556-1558.

收稿日期: 2009-03-13

作者简介



李伟林, 北京邮电大学光通信与光电子研究院电磁场与微波专业在读硕士研究生。目前研究方向为OFDM技术与光通信的结合、OFDM与RoF技术融合。



张杰, 北京邮电大学教授、博士生导师、光通信与光电子学研究院副院长。曾主持10余项国家和省部级科研项目, 授权发明专利7项, 发表ITU-T标准提案15篇、专著5部、SCI/EI论文百余篇。研究方向包括自动交换光网络、光传送网、分组传送网、超高速光传输技术等。



顾婉仪, 北京邮电大学学术委员会副主任, 电信工程学院学术委员会主任, IEEE会员, 中国通信学会会员, 北京通信与信息协会光通信专业组主任。主要从事高速光通信系统、WDM光传送网、智能光网络等方面的教学和科研工作。承担并圆满完成过十多项国家“863”、自然科学基金、攻关项目和部重点项目, 研究成果曾6次荣获部级科技进步奖。拥有7项发明专利、3项实用新型专利, 已发表论文200余篇。

中兴通讯将在马来西亚部署450个WiMAX基站

【本刊讯】2009年3月, 中兴通讯宣布与马来西亚最大的WiMAX运营商P1签订合同, 共同打造马来西亚高速无线宽带网络。根据合同, 2009年中兴通讯将在马来西亚部署450个基站, 届时P1的WiMAX网络将覆盖马来西亚31个主要城市近千万人口。P1并希望籍此达到2010年马来西亚家庭宽带普及率50%的目标。

P1和中兴通讯于3月19日在马来西亚吉隆坡举行了签字仪式。P1的CEO Michael Lai表示:“我们的目标很明确——让更多的马来西亚人享受高性能并且简单易用的高速无线网络。我们一直在强调提升网络的性能和覆盖范围, 今天和中兴通讯的签约使得我们的目标得以加快实现。我们后续将加快在全国范围内的覆盖, 确保在

2010年达到马来西亚家庭宽带普及率50%的目标。而我们的战略合作伙伴中兴通讯将是我们达成下一步目标的重要动力。”

中兴通讯WiMAX产品线总经理赵松璞表示:“中兴通讯和P1的目标是一致的, 那就是通过不断努力, 为更多的马来西亚人提供更快更好的高速移动宽带网络。”

中兴通讯是全球领先的WiMAX设备提供商。据知名咨询公司In-Stat报告, 中兴通讯在2008年的WiMAX新增市场中全球排名第二。目前, 中兴通讯已经在全球26个国家为超过35个运营商建设了WiMAX商用点。

P1是马来西亚知名WiMAX运营商, 也是东南亚最大的WiMAX运营商。其WiMAX一期网络已于2008年8月商用, 覆盖吉隆坡、马六甲、檳城等城市。