

# 毫米波光载无线系统的结构优化

## System-Structure Optimization for Millimeter-Wave Radio over Fiber System

中图分类号:TN253 文献标识码:A 文章编号:1009-6868 (2009) 03-0029-06

**摘要:**下一代接入网需要实现高带宽和低成本的便携性,基于宽带光通信和无线接入的无缝融合的毫米波光载无线(RoF)通信技术被认为是一个很有前景的解决方案。但是由于其实现成本较高,需要对其系统结构进行相应优化。在毫米波光产生部分,光外差法可利用低频信号源产生高频的毫米波信号,同时采用对半导体激光器的注入锁模可以提高其利用效率。在下行链路中,使用单边带调制可以提高光传输距离,而基于注入锁模半导体激光器的单模调制(单边带调制)是一种较为简单的方案;上行链路中,采用对于光外差信号的调制,可以实现上行毫米波信号的直接光学下变频,从而简化中心站接收机系统结构。在波分复用毫米波光载无线双向系统中,利用上下链路的波长重用可以节省波长资源,提高系统使用效率。

**关键词:**毫米波光载无线;上变频;下变频;波长重用;单模调制

**Abstract:** Based on the seamless integration of broadband optical and wireless access networks, millimeter wave Radio over Fiber (RoF) technology is considered a promising solution for the next generation access networks which will provide high capacity and flexibility with low cost. However, due to its large realization cost, the system architecture needs to be optimized. In the millimeter wave optical generation part, optical heterodyning method can be introduced to generate a high-frequency millimeter-wave signal using a low-frequency signal source; and the system efficiency can be greatly improved based on injection-locking of a semiconductor laser. In the downlink, the transmission distance can be greatly enhanced by single-sideband modulation, which, based on an injection-locked semiconductor laser, is a much simpler solution. In the uplink, direct modulation of optical heterodyning signal can be used to realize the down-conversion of uplink millimeter-wave signal, which simplifies the receiver structure at the centre office. In the wavelength division multiplexing millimeter wave RoF duplex system, the wavelength reuse in both downlink and uplink can save the wavelength resource in the whole system, which improves its efficiency.

**Key words:** millimeter-wave RoF; up-conversion; down-conversion; wavelength reuse; single-mode modulation

近年来,由于无线通信的便携性,移动通信在全球通信市场上发展迅速,并逐步占据了整个市场份额的一半以上。而随着高速互联网和高清电视等宽带多媒体业务的推广和发展,未来的无线通信将需要提供更

大的通信带宽,并保证每个用户的低成本接入。在这样的背景下,频率高、潜在应用带宽大的毫米波通信成为了一项很有竞争力的解决方案。参考文献[1]中,60 GHz频段由于是氧气的吸收峰而倍受关注,它可以实现无线短距离、高带宽的数据传输,并支持非常小的蜂窝结构。目前直接实现60 GHz无线通信由于器件成本的问

张诚/ZHANG Cheng  
陈章渊/CHEN Zhang-yuan  
胡薇薇/HU Wei-wei  
(北京大学区域光纤通信网及新型光纤通信系统国家重点实验室,100871)  
(State Key Laboratory on Advanced Optical Communication Systems & Networks, Peking University, Beijing, China, 100871)

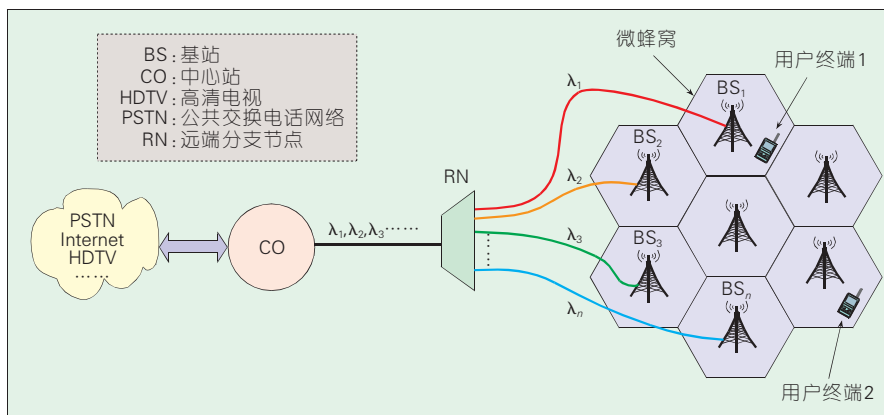
题,难度较大,而如果将现有高带宽的光纤通信技术和60 GHz毫米波通信技术相结合,在中心站和各个基站天线之间采用光纤连接,将复杂和昂贵的功能例如信号处理和路由等都放在中心站,则可大大降低整个系统的成本。于是,毫米波光载无线(RoF)通信技术应运而生。

一个典型的毫米波RoF通信系统主要由中心站、基站和用户终端3个部分组成,如图1所示。中心站与基站之间通过光纤连接,传输光信号;基站和用户终端之间则为毫米波无线通信。中心站的主要功能是实现下行链路中的毫米波光产生、基带信号的上变频和上行链路信号的接收处理;基站的主要功能是实现光电信号转换,发送下行信号,并将用户上行电信号转变成光信号回传中心站。目前对于毫米波RoF通信系统结构优化的研究重点主要侧重于中心站与基站之间的上下行光传输信号方面,具体的主要包括:毫米波光产生、下行信号上变频、传输性能、上行信号下变频、双向链路波长重用等方面。

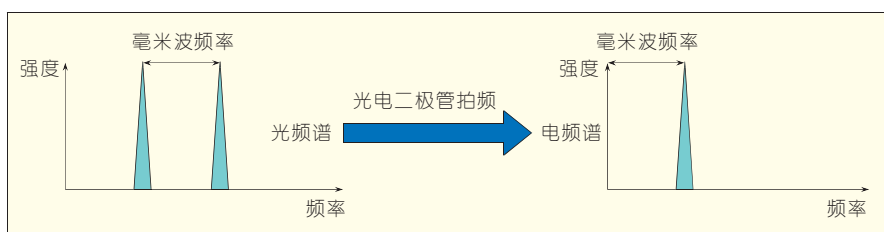
### 1 毫米波光产生部分的结构优化

传统的RoF通信系统对于微波的产生一般直接利用现有的射频源,但

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60736003); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2006AA01Z261)



▲图1 毫米波RoF系统示意图



▲图2 光外差法原理示意图

是对于毫米波RoF系统来说,采用毫米波频段的射频源是相当昂贵的。如果能使用低频的射频源甚至不使用射频源的光域方法来产生毫米波信号,则可以大大降低系统成本。目前主流的毫米波光产生方法是采用光外差法,即利用低频的射频源生成一对间距为所需毫米波频率的光相干纵模信号,通过将该信号接入光电二极管拍频可实现毫米波的光产生,原理示意图见图2。

在光外差法的实现方面,目前主要方法是采用外调制器,其又有两种具体的结构<sup>[2]</sup>,分别采用双臂锂酸铌

强度调制器和相位调制器加光带陷滤波器。

一种是采用双臂锂酸铌强度调制器,合适地选择调制器偏置点实现载波抑制调制,利用调制出的两个一阶边带实现相干光双纵模,这样就可以实现频率加倍,从而使用30 GHz信号源产生60 GHz的信号,其原理见图3(a)。

另一种是采用相位调制器加光带陷滤波器,在调制器输出的光谱中利用光带陷滤波器将光载波滤除,剩余的两个一阶边带即可实现相干光双纵模,其原理见图3(b)。这种方法

同样实现了频率加倍,不过结构较第一种复杂了些。

前面的两种方法均是使用30 GHz的信号源来产生60 GHz的信号,但是30 GHz的射频源仍然较为昂贵,于是在外调制器法的基础上,可以通过激光器的注入锁模来降低对参考频率源频率的要求,从而利用更低的频率源来产生60 GHz的毫米波信号。

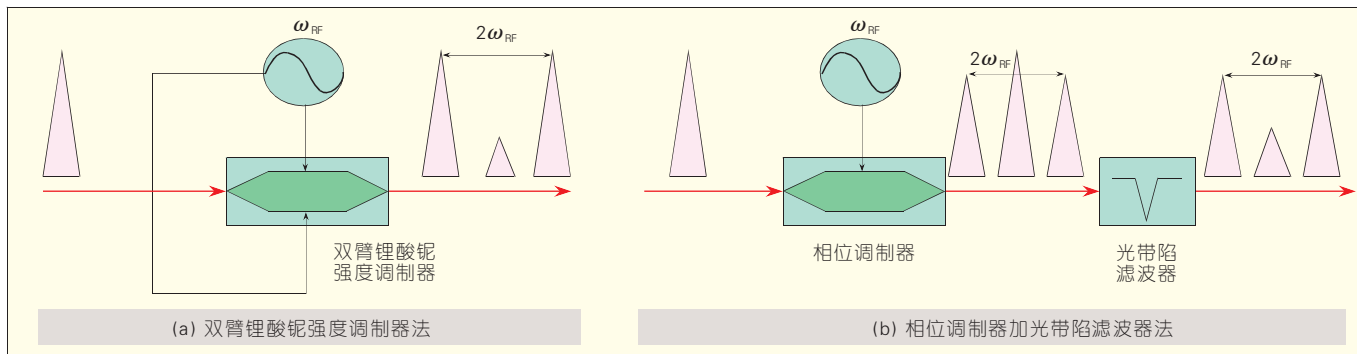
#### (1)FP激光器双模注入锁模实现60 GHz毫米波

采用法布尔-帕罗(FP)激光器双模注入锁模的方法可提高所产生的毫米波信号的质量,降低相位噪声<sup>[3]</sup>。通过调整调制器的偏置点和FP激光器的偏置电流,可以实现了对于FP激光器的二阶边带注入锁模,从而利用15 GHz来产生60 GHz的毫米波信号<sup>[4]</sup>。具体原理见图4。获得的相干光双纵模信号和拍频电谱见图5。

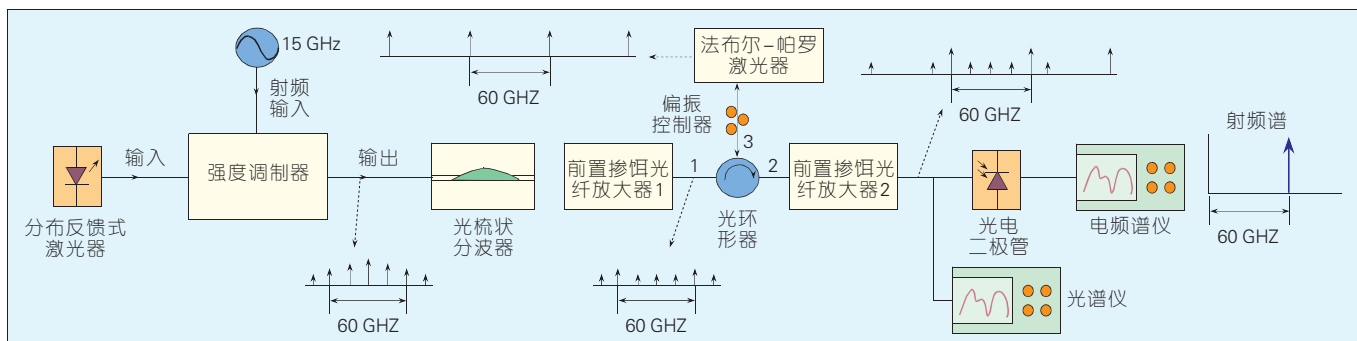
通过FP激光器双模注入锁模,锁定的相干光双纵模信号光信噪比在20 dB以上,拍频的毫米波电信号信噪比在40 dB以上,相位噪声100 kHz处为-94.30 dBc/Hz,质量很好。此外,通过对FP激光器的双模注入锁模还可以提高激光器的直调带宽,见图6,它在后面的基带信号光学上变频甚至上行信号光学下变频方面有很高的利用价值。

#### (2) 注入锁模分布反馈式激光器四波混频实现60 GHz毫米波

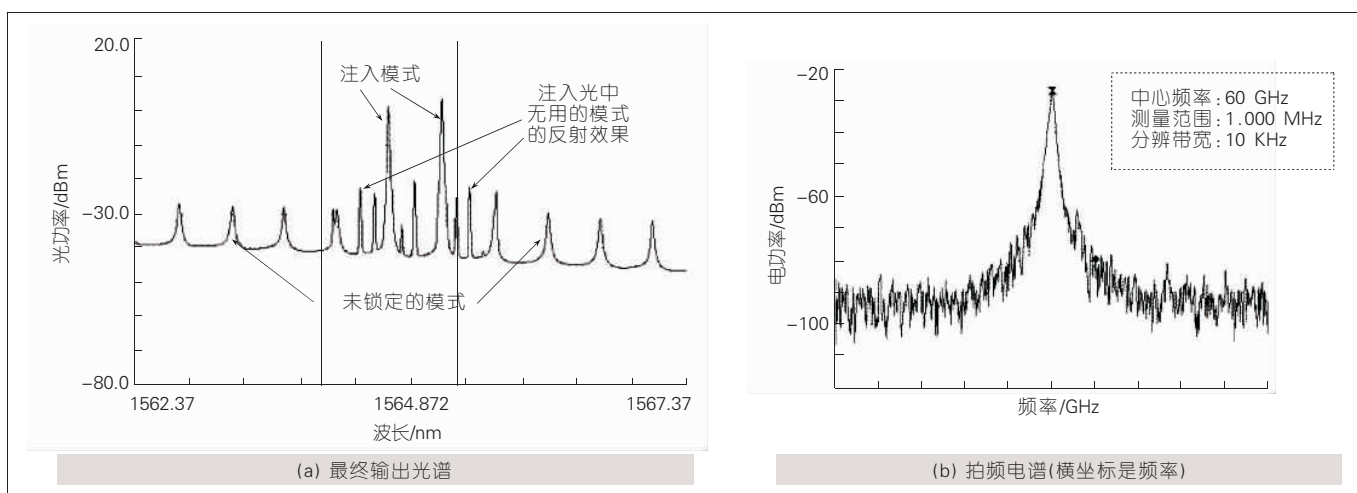
四波混频(FWM)效应是一种非线性效应,目前已经有在高非线性光纤和半导体光放大器(SOA)中的应用来



▲图3 外调制法实现光外差信号的原理示意图



▲图4 FP激光器双模注入锁模实现60 GHz毫米波实验装置原理图



▲图5 FP激光器双模注入锁模实现60 GHz毫米波实验

实现频率的加倍<sup>[5-8]</sup>。而在强注入条件下，可利用注入锁模分布反馈(DFB)激光器中的FWM效应来实现频率的三倍频。

在这种方法下，通过直接调制或者间接调制实现注入的种子光，利用注入锁定来增强所需要的模式。图7(a)给出了相应的实验装置原理图。图7(b)比较了从DFB激光器的输入光信号和输出的FWM信号，对于输入信号来说，二阶边带比一阶边带低30 dB以上，直接拍频的60 GHz几乎没有。而通过FWM效应，长波长处的二阶边带被放大了25 dB，同时被放大的还有注入锁定的长波长的一阶边带。图7(c)是拍频的60 GHz电信号，其在偏移100 kHz处的相位噪声在-95 dBc/Hz以下，同时信号质量与参考的20 GHz射频源相比只有5 dB的损伤，见图7(d)，利用这种方法也能产生高质量的

毫米波信号。

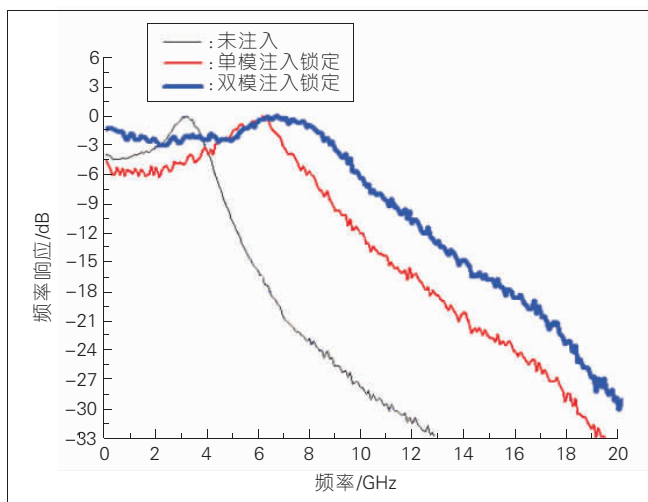
此外，更低频率的参考源10 GHz也可以被使用来实现60 GHz的毫米波信号，实验结果表明其在偏移100 kHz处的相位噪声在-90 dBc/Hz以下，同时相比参考源只有10 dB的相位噪

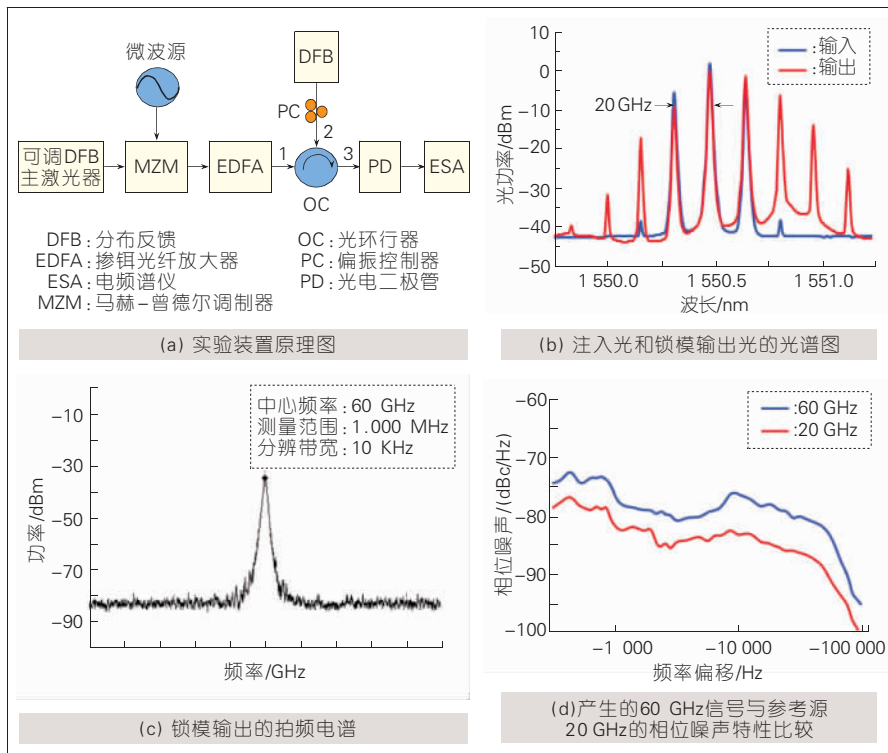
声损伤。

## 2 下行链路基带信号光学上变频部分及传输性能的结构优化

传统的RoF系统中，由于直接采

图6 ▶  
FP激光器注入与非注入条件下的频率响应





▲图7 DFB激光器四波混频实现60 GHz毫米波

用了微波射频源,其对下行基带信号的上变频采用高频的混频器即可,然后再将混频后的微波信号利用外调制器调制到光载波上。而对于毫米波RoF系统,由于毫米波射频源的昂贵,在毫米波产生部分已经采用光外差法,则在基带信号上变频方面需要进行相应的改动。

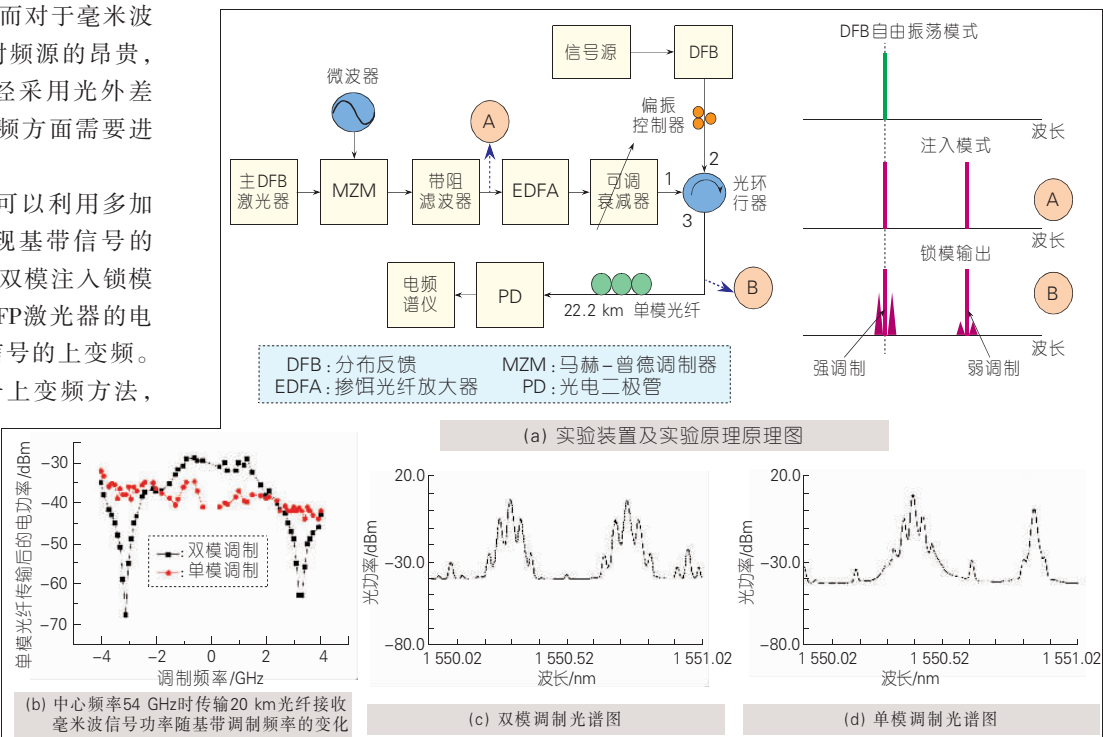
对于外调制器法,可以利用多加入一级光调制器来实现基带信号的上变频。而在FP激光器双模注入锁模方式中,则可以利用对FP激光器的电流直接调制实现基带信号的上变频。

上述两种基带信号上变频方法,最终实现的均是对光相干双纵模的双模调制,即两个纵模上都带有基带信号。而在毫米波RoF通信系统中,光纤色散损伤(特别是1.55  $\mu\text{m}$ 处)会对系统中光信号的作用距离加以限制。虽然相比传统的光双边带

调制(DSB),采用双模调制对于传输距离的色散损伤限制要弱些,但仍不如传统的光单边带调制(SSB)<sup>[9]</sup>。

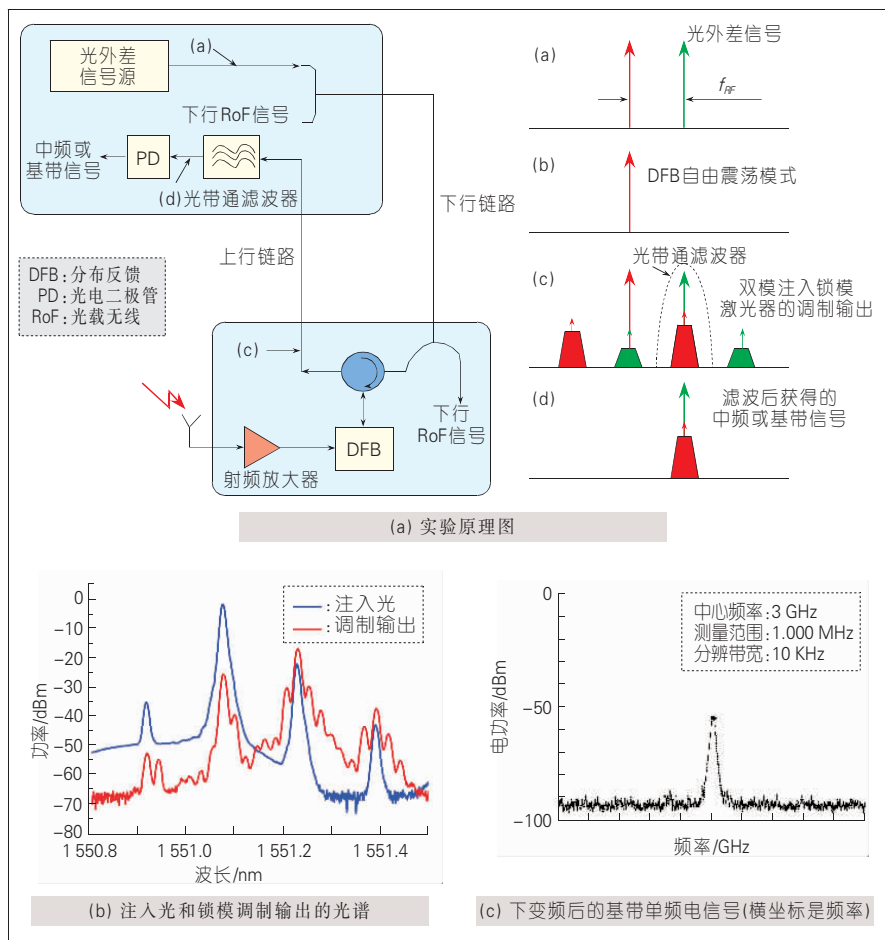
目前实现高频的单边带调制或者类似的单纵模调制已有的方法有DSB调制加滤波法<sup>[10]</sup>、光外差法分波后单独调制一个纵模<sup>[11]</sup>、强注入锁模DFB激光器的选择性放大作用<sup>[12]</sup>,其中文献[12]的方法需要DFB激光器有极高直调频率响应。最近一种实现基于DFB激光器单模锁模的、类似于SSB调制的单模调制新方法被提出<sup>[13]</sup>,下行的基带信号可以被主要调制到光双纵模中注入锁模的纵模上,从而大大克服色散损伤的影响。

具体的实验装置和实验原理图见图8(a)所示,图8(b)中给出了光信号传输22.2 km单模光纤后的接收到的毫米波功率随基带调制频率的变化(测试的中心频率为54 GHz,采用一阶边带单模注入锁模),可以看到单模调制在对抗色散的影响方面较双模调制有很大的优势,双模调制在基带频率为3 GHz处有一个很大的射频功率衰落,而单模调制则变化不大。最后调制输出的光谱见图8(c),而对比外调制法中加一级调制器上载基带数据后的光谱图如图8(d)所示。从



▲图8 注入单模锁模DFB激光器实现单模调制实验





▲图9 利用注入锁模DFB激光器来实现光下变频的实验

图8(c)可以看到,由于注入锁模效应,当改变从DFB激光器的电流时,被注入锁定的模式(1 550.39 nm)调制度较大,而另外一个未注入锁定的模式(1 550.82 nm)调制度较小,两者相差22 dB以上。此外,基于60 GHz毫米波的RoF单模调制2.5 Gb/s数据传输也进行了实验,采用G.652单模光纤,传输距离为50 km,传输后眼图仍然较为清晰,可实现无误码传输。而如果采用双模调制,则无法获得眼图信号。

### 3 上行链路中信号下变频部分的优化

在传统的RoF系统中,用户终端接收到的微波信号转换成基带信号的一般做法是在基站或中心站利用混频器在电域将其下变频。而对于毫米波RoF系统,由于毫米波射频源的

昂贵,就需要对系统结构进行优化以节省成本。

一种优化手段是在基站利用高速电吸收调制器<sup>[14]</sup>,通过对下行链路中空闲的、频率间隔与毫米波频率相同的光相干双纵模信号的调制,然后直接检测低频基带信号即可实现上行信号的下变频。

另一个可行方法是利用注入锁模DFB激光器来实现光下变频。其实实验原理装置图见图9(a)。目前已经有很多研究证明了在强注入锁定下,DFB激光器或者垂直腔面反射激光器(VCSEL)可以大大提高激光器的频率响应<sup>[15-16]</sup>。同时本文前面也说明了双模注入锁模可以大幅提升半导体激光器的频率响应。在注入锁模DFB激光器来实现光下变频的实验中,通过注入锁模,DFB激光器的直调频率响

应从自由振荡的5 GHz提高到了超过20 GHz。如果将纵模间距为毫米波频率的光相干双纵模信号从中心站发送到基站并注入锁定DFB激光器,同时将基站接收到的天线信号调制该DFB激光器,则注入纵模的调制后的边带将落在另一个纵模的基带,由于两个纵模是相干的,于是直接进行光滤波则可将中频或者基带信号获得。这样就可以在不需要在高速光电二极管和混频器的条件下进行毫米波信号的下变频。

### 4 波分复用毫米波RoF系统中的波长重用

在单路RoF系统(中心站、基站各一)中,下行链路和上行链路可以分别占有两个不同的波长,但是实际应用环境下,由于毫米波信号短距作用的特性,需要部署大量的基站,这时如何降低基站的成本,同时适应波分复用(WDM)-RoF系统是设计中需要重视的问题。在光网络中,波长是一个重要的资源,如果能实现波长的重复利用则将大大降低资源消耗,所以当前波分复用无源光网络(WDM-PON)是光网络中发展的重要趋势。目前在毫米波RoF系统中实现WDM-PON有几种可行方案。

中心站采用外调制法发送下行信号,同时保留光载波,下行基带数据采用强度调制。在基站中则将光载波利用光滤波器滤出,然后将下变频的用户上行基带信号用调制器或者半导体光放大器调制上光作为上行信号上传。

中心站采用外调制法实现光外差信号,下行基带数据的上载方式采用DPSK相位调制。基站处,发送的下行数据可用1比特马赫-曾德干涉仪解调,而对于上行的基带数据则可利用铌酸铍调制器采用强度调制上光,中心站只需要进行强度检测即可。

### 5 结束语

由于在传输带宽和无线接入方

面的巨大优势,毫米波RoF系统是一代接入网的一个很有潜力的解决方案。鉴于目前毫米波频段器件的昂贵以及实现系统的“成本—资源”考虑,本文针对毫米波光产生、下行信号上变频和传输性能、上行信号下变频、双向链路中的波长重用等方面进行了毫米波RoF系统结构优化方面的讨论。相信随着未来相应结构优化研究的深入,毫米波RoF系统的实用化将指日可待。

## 6 参考文献

- [1] SARKAR S, DIXIT S, MUKHERJEE B. Hybrid wireless-optical broadband-access network (WOBAN): A review of relevant challenges [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11):3329-3340.
- [2] JIA Zhenheng, YU Jianjun, ELLINAS G, et al. Enabling technologies for optical-wireless networks: Optical millimeter-wave generation, wavelength reuse, and architecture [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11):3452-3471.
- [3] HU Weiwei, INAGAKI K, OHIRA T. Radio-on-fiber techniques using two-mode injection-locked lasers for broadband millimeter-wave communications[C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT' 02), Aug 17-19, 2002, Beijing, China.
- [4] ZHANG Cheng, HONG Cheng, LI Mingjin, et al. 60 GHz Millimeter-wave generation by two-mode injection-locked Fabry-Perot laser using second-order sideband injection in radio-over-fiber system[C]//Proceedings of the 2008 Conference on Lasers and Electro-optics and Quantum Electronics and Laser Science (CLEO/QELS' 08), May 4-9, 2008, San Jose, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:JWA99.
- [5] HONG Cheng, LI Mingjing, ZHANG Cheng, et al. Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in sideband injection locking DFB lasers[C]//Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT' 08), Apr 21-24, 2008, Nanjing, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 876-877.
- [6] WIBERG A, PEREZ-MILLAN P, ANDRES M V, et al. Microwave-photonics frequency multiplication utilizing optical four-wave mixing and fiber Bragg gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1):329-334.
- [7] WANG Qing, RIDEOUT H, ZENG Fei, et al. Millimeter-wave frequency tripling based on four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(23):2460-2462.
- [8] WANG Tianliang, CHEN Minghua, CHEN Hongwei, et al. Millimeter-wave signal generation using two cascaded optical modulators and FWM effect in semiconductor optical amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(16): 1191-1193.
- [9] MA Jianxin, YU Chongxiu, ZHOU Zhen, et al. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression [J]. Optics Communications, 2006, 268(1): 51-57.
- [10] BLAIS S R, YAO Jianping. Optical single sideband modulation using an ultranarrow dual-transmission-band fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18 (21):2230-2232.
- [11] IZUTSU M, SHIKAMA S, SUETA T. Integrated optical SSB modulator/frequency shifter [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(11): 2225-2227.
- [12] SUNG Hyukkee, LAU E K, Wu M C. Optical single sideband modulation using strong optical injection-locked semiconductor lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19 (13):1005-1007.
- [13] HONG Cheng, LI Mingjin, ZHANG Cheng, et al. Single mode modulation using injection locked DFB lasers for millimetre wave radio over fibre system[C]// Proceedings of International Nano-photonics Workshop(i-NOW' 08), Aug 2-15, 2008, Tokyo, Japan. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:129-130.
- [14] HU Weiwei, TANAKA T, INAGAKI K, et al. 50 GHz WDM sources and its uplink system using two-mode injection-locked Fabry-Perot lasers and electro-absorption modulator for millimeter-wave radio-on-fiber communications[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC' 03):Vol 1, Mar 23-28, 2003, Atlanta, GA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003:145-146.
- [15] ZHAO Xiaoxue, CHANG HASNAIN C J, HOFMANN W, et al. Modulation efficiency enhancement of 1.55- $\mu\text{m}$  injection-locked VCSELs[C]//Proceedings of the 20th IEEE International Semiconductor Laser Conference(ISLC' 06), Sep 17-21, 2006, Waikoloa, HI, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:125-126.
- [16] LAU E K, SUNG Hyukkee, WU M C. Ultra-high, 72 GHz resonance frequency and 44 GHz bandwidth of injection-locked 1.55- $\mu\text{m}$  DFB lasers [C]// Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (OFC' 03), Mar 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 3p.

收稿日期:2009-03-14

## 作者简介



张诚, 北京大学信息科学技术学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室在读硕士研究生, 主要研究方向为毫米波光载无线通信技术。



陈章渊, 北京大学教授、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室通信研究所副所长。曾任法国国立电信高等学校电子与通信系、美国加州大学伯克利分校EECS系访问学者, 目前是中国通信学会理事、IEEE和OSA会员。主要研究方向为高速光传输系统、光网络和光子器件。



胡薇薇, 北京大学信息科学技术学院电子学系副主任, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室教授, 长期从事光纤通信领域的教学和科研工作, 主要研究方向为毫米波光载无线通信技术、光学相控阵和无线光通信。曾任日本国际先端技术研究所(ATR)客员研究员、德国图宾根大学物理系访问教授, 已发表学术论文70余篇, 获授权专利6项。

广告  
索引

A1—A3、封底:中兴通讯股份有限公司

