

doi: 10. 3788/gzxb20124110. 1161

# 基于光电振荡器的宽带射频下转换及在 高清视频传输的应用

唐震宙, 潘时龙, 周沛, 朱丹, 郭荣辉, 贲德

(南京航空航天大学 电子信息工程学院 微波光子学实验室, 南京 210016)

(毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘 要:**以无压缩全高清视频的光载无线传输为背景,通过研究宽带射频光子下转换技术,从而构建全高清视频的实时传输系统,其中下转换系统主要基于光电振荡器实现.由于光电振荡器的注入锁定,光微波信号中的载波信号被提取出来,并反馈至调制器,与宽带光微波信号混频,在光域实现信号下转换.实验论证了载频为 10 GHz,码率大于 2 Gb/s 的信号下转换和有线无线传输.利用天线和光纤实现了距离为 0.5 m 的无线分发和距离为 10 km 的有线传输.本文还成功实现了 1.5 Gb/s 无压缩高清视频信号的实时传输.实验结果表明,该系统具有大带宽、抗电磁干扰等优点,同时利用光电振荡器的自动相位跟踪技术,无须外加锁相等操作.整个下转换系统简单稳定,为高清视频的有线无线传输提供了论证和演示平台.

**关键词:**下转换;光电振荡器;高清视频传输;光载无线

**中图分类号:** TN29

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)10-1161-6

## 0 引言

高清视频的日益普及和广泛应用,对高速无线接入产生了迫切需求.一方面,视频会议、视频监控、高速多媒体接入等新业务需要高数据量的无线通信作为支撑,另一方面,新的终端设备如智能手机、平板电脑、上网本等的大量涌现,为大带宽移动视频传输提供了良好的市场基础.据统计,过去三年中,全球移动数据量每年以超过两倍的速率增长,未来 5 年还将增长 18 倍,平均接入速率提高 9 倍<sup>[1]</sup>.通信容量的快速增长给无线通信带来了巨大的挑战,现有的无线接入技术和有限的无线带宽资源无法满足未来无线视频业务的需求,有线与无线混合的接入方式将成为未来发展的重要趋势<sup>[2-4]</sup>.光纤具有大带宽、低损耗、重量轻和抗电磁干扰等突出优势,是宽带信息传输的最佳媒质之一.在光纤有线接入的基础上,光载无线技术开始蓬勃发展.光载无线技术充分发挥光纤技术和无线技术的优势,具有大带宽、低损耗、对协议透明、抗电磁干扰等众多优点,被认为是实现宽带泛在接入网络的有效方案<sup>[5-7]</sup>.

在光载无线系统中,在光域对射频信号进行下

转换能够减少高速电子器件的使用并大幅降低电磁干扰的影响<sup>[8]</sup>.如果同时使用光波分复用技术,还可实现多路信号的同时下转换,降低器件的使用数量和系统的复杂度,提高系统的可靠性<sup>[9]</sup>.但是,当前报道的光子射频下转换系统都没有经过实时业务服务的测试,因而难以考证其实际应用的可行性.另一方面,高质量微波源是高性能微波系统的核心.光电振荡器(Opto Electronic Oscillator, OEO)是一种基于光子学储能单元的微波振荡器,可产生从数百 MHz 到上百 GHz 的高纯度微波信号,其相位噪声在频偏 10 kHz 处最低可达 -163 dBc/Hz<sup>[10]</sup>.由于光电振荡器可直接输出光微波信号,因而非常适合用于光载无线系统.先前, W. Shieh 等人利用光电振荡器实现了多波长微波频率上下转换<sup>[11]</sup>,但其转换对象仅为单个点频,没有涉及宽带信号.

本文论证了基于光电振荡器的宽带射频信号下转换技术,实现了 1.5 Gb/s 无压缩高清视频信号无线传输的实时业务演示.实验结果表明基于 OEO 的宽带射频信号下转换可与宽带射频信号实时同步,获得高质量的下转换信号.由于器件限制,实验中使用的是 10 GHz 载波,该频段尚未成为宽带无

**基金项目:**新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-10-0072)、国家自然科学基金(No. 61107063)、国家重点基础研究发展计划(No. 2012CB315705)、博士点基金(No. 20113218120018)和霍英东基金(No. 131063)资助

**第一作者:**唐震宙(1990-),男,本科在读,主要研究方向为光电振荡器和光电测量. Email: tang.zhzh@gmail.com

**责任作者/导师(通讯作者):**潘时龙(1982-),男,教授,主要研究方向为微波光子学. Email: pans@ieec.org

**收稿日期:**2012-05-17; **修回日期:**2012-06-08

线接入的标准,但只需调整器件参量,本系统就有可能在实际系统中发挥作用。

## 1 实验原理分析

本实验的原理如图 1 所示,其核心是基于 OEO

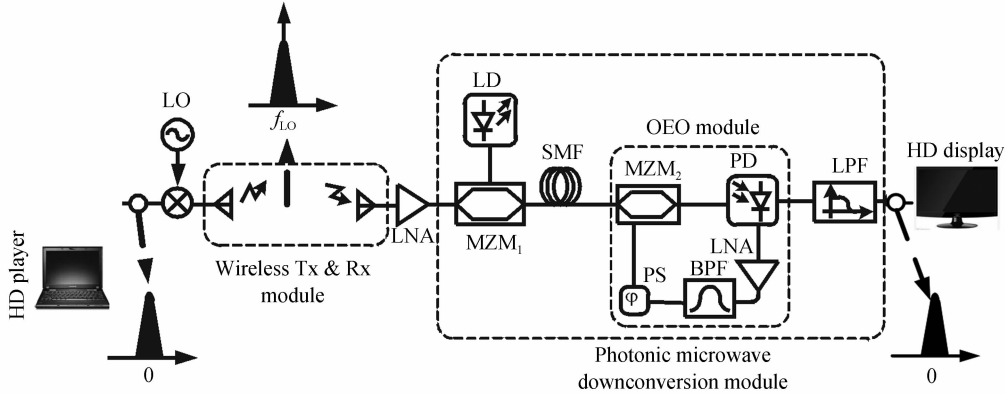


图 1 基于光电振荡器的射频下转换及高清视频传输系统

Fig. 1 Photonic microwave downconversion and uncompressed HD video transmission system based on an optoelectronic oscillator(LNA: low noise amplifier; PS: phase shifter)

滤波器(Low Pass Filter, LPF)等器件组成。

由接收天线收集的射频信号经  $MZM_1$  加载到角频率为  $\omega_c$  的光载波上. 为简化分析,假设该射频信号由一载频  $\omega_{RF}$  和一边带  $\omega_{RF} + \omega_1$  组成. 由强度调制器的特性可知,调制器所输出的光微波信号中包含有频率为  $\omega_c \pm m\omega_{RF}$  及  $\omega_c \pm m(\omega_{RF} + \omega_1)$  ( $m=1, 2, 3 \dots$ ) 的边带分量. 在小信号调制情况下,高阶边带 ( $m \geq 2$ ) 的幅度很小,可以忽略不计,故只考虑存在光载波  $\omega_c$  和上下边带  $\omega_c \pm \omega_{RF}$ 、 $\omega_c \pm (\omega_{RF} + \omega_1)$  的情况. 该光微波信号通过单模光纤(Single Mode Fiber, SMF)耦合到  $MZM_2$ . 实验中  $MZM_2$  有两个作用: 1) 实现射频光子下转换; 2) 与光电探测器(Photo Detector, PD)、带通滤波器、微波耦合器、微波放大器等组成 OEO. 当一束连续波激光输入 OEO 环路,若整个环路的增益大于损耗,那么, OEO 将会以某个单纵模所对应的频率振荡. 该振荡频率为 OEO 的自由振荡频率,由高 Q 带通滤波器的中心频率所决定. 另一方面,若输入 OEO 环路的光信号中含有载波信号与 OEO 自由振荡频率接近的光微波信号,那么 OEO 将工作于注入锁定模式,载频将被提取出来,而其他频率分量被抑制<sup>[12]</sup>. 然后,该载频反馈至  $MZM_2$ ,与入射的光微波信号混频,产生  $\omega_c \pm \omega_1$  分量以及多个高阶分量. 在 PD 中,这些光分量与光载波  $\omega_c$  拍频,输出基带信号  $\omega_1$  和若干高频分量. 其中高频分量将被 LPF 抑制,仅留下基带信号,从而实现频率下转换. 值得说明的是,在光域里实现信号的下转换一方面具有较大的带宽,另一方面因为光器件对电磁干扰的不敏感性,可以直

接将信号转换到基频,从而降低系统的复杂度. 此外,可使用光波分复用技术实现多路信号的同时下转换,降低器件的使用数量和系统的复杂度,提高系统的可靠性。

### 1.1 射频光子下转换

图 1 为本实验中射频光子下转换模块的结构示意图. 该模块由激光器(Laser Diode, LD)、强度调制器(Mach-Zehnder Modulator, MZM)、OEO、低通

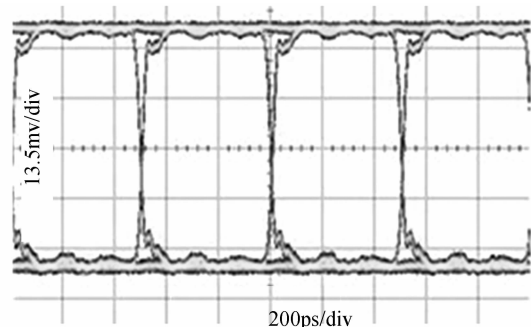
滤波器(Low Pass Filter, LPF)等器件组成。

### 1.2 无压缩高清视频的无线分发

基于上述射频光子下转换,可以实现无压缩高清视频的有线无线分发. 首先视频播放器输出无压缩的高清视频基带信号. 该基带信号与本振  $f_{LO}$  通过商用混频器上转换,使得原本处于基带的视频信号搬移到本振  $f_{LO}$  处,由发射天线辐射到自由空间. 该射频信号经过一定距离的无线传输,由接收天线收集输入到基于 OEO 的光子射频下转换模块,恢复出基带视频信号,在高清视频显示器上实时播放。

## 2 实验测试及分析

为测试系统性能,首先用伪随机信号(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)代替高清视频信号输入系统. PRBS 信号由误码仪(Anritsu MP1763C)产生,速率为 2 Gb/s,其眼图和频谱如图 2.



(a) Eye diagram

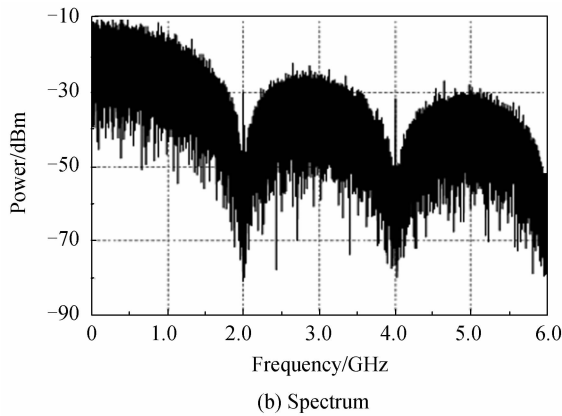


图2 PRBS 信号的眼图和频谱

Fig. 2 The eye diagram and spectrum of the PRBS signal

该信号通过商用混频器(带宽 2~18 GHz)与微波信号源(Agilent 8257D)输出的频率信号混频. 本实验中,为了达到 OEO 的注入锁定,需要调节微波源频率使之接近 OEO 的自由振荡频率. 由于 OEO 环路中高 Q 带通滤波器的中心频率为 9.955 GHz, 所以,当微波源输出的信号频率在接近 9.955 GHz 时,OEO 实现注入锁定. PRBS 信号与该频率信号混频之后的眼图和频谱如图 3. 由图 3 可知,原本处于基带的 PRBS 信号被搬移到 9.955 GHz 处. 该混频后的信号通过无线收发模块进行信号的发射和接收. 收、发天线的工作带宽均为 8.2~12.4 GHz,

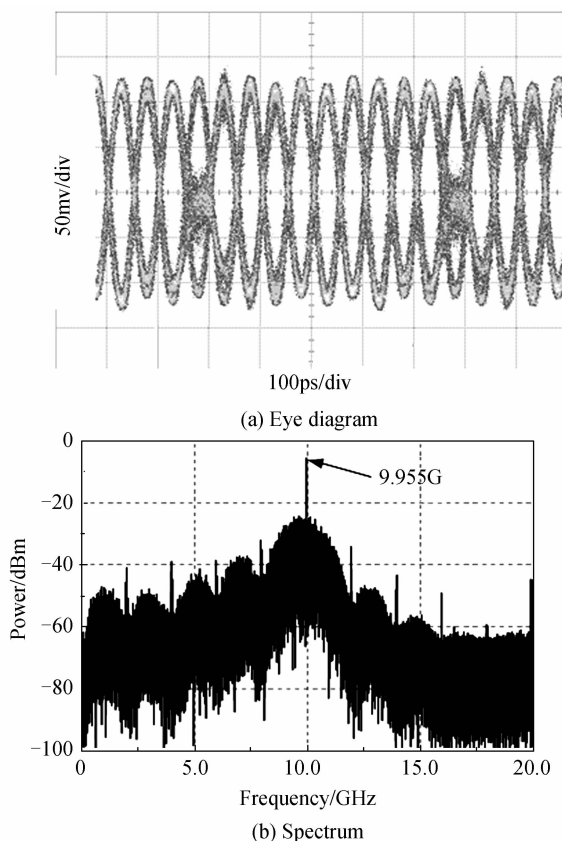
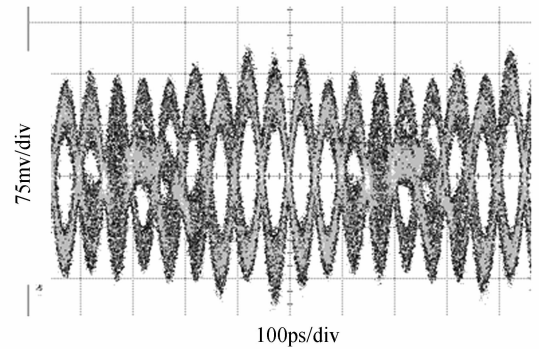
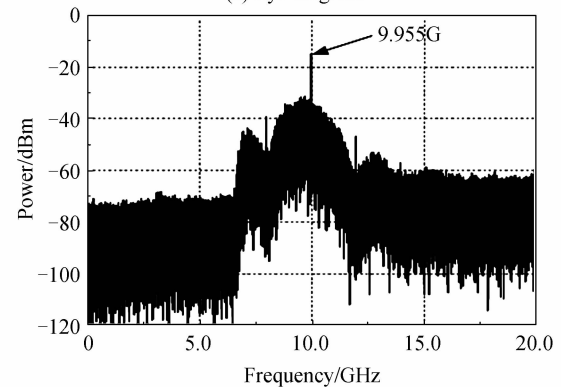


图3 PRBS 信号上转换后的眼图和频谱

Fig. 3 The eye diagram and spectrum of the upconverted PRBS signal



(a) Eye diagram



(b) Spectrum

图4 天线接收信号的眼图和频谱

Fig. 4 The eye diagram and spectrum of the signal received by antenna

9.955 GHz 处的增益约 20 dB. 接收到信号的眼图和频谱如图 4.

由图 4 中可以看出,信号在经过无线收发模块时,由于无线传输链路(约 0.5 m)的不稳定和环境影响,信号除了有衰减外,还引入了少量噪音. 但是,从眼图可以看出,信号基本保持原来的形状. 并且由于天线工作带宽的限制,发射前信号的低频部分(图 3)被完全滤除,从而去除了原信号低频分量对系统下转换后的信号的影响. 值得说明的是,无线传输链路的长度与发射功率、天线增益、实验空间和基带信号处理有关. 由于在发射时没有进行放大,实验空间受限,且未对基带信号进行编码,因此无线链路距离设置在 50 cm. 如果进行适当放大并引入基带信号处理,无线链路的距离将能会大幅提高<sup>[13-14]</sup>.

天线接收到的信号输入到 MZM<sub>1</sub> (Fujitsu Limited, 带宽 40 GHz). 激光由可调谐激光器输出,波长为 1 550 nm,功率为 10 dBm. MZM<sub>1</sub> 将该微波信号调制到连续波光信号后,经过 10 km 的单模光纤传输,然后进入光电振荡器进行频率下转换.

图 5 为 OEO 提取的载频信号与信号源直接输出的频率信号的频谱. 由于带通滤波器的带宽仅 12 MHz,远小于数据的带宽,因此,光微波信号中的数据信号基本上被全部滤除,从而保证了提取的载频信号的纯度. 所提取出的载频信号在稳定性、相位噪

音等特性上都保持和原信号载频几乎完全相同的性能.此外,OEO注入锁定产生的频率信号将自动跟踪到达信号的相位,因而该载频用于射频信号下转换时无需主动调节相位.

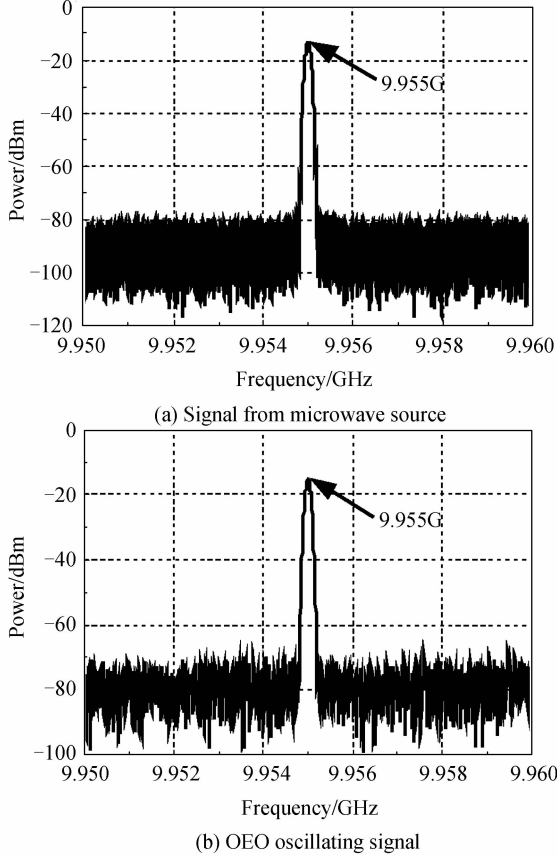
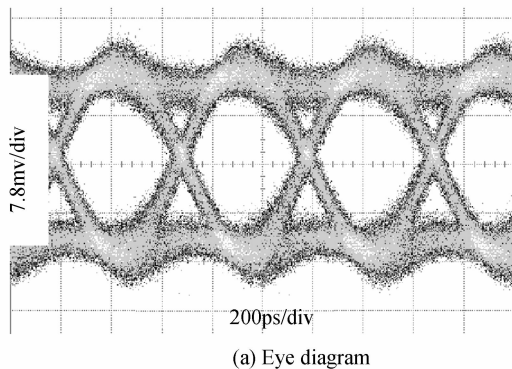
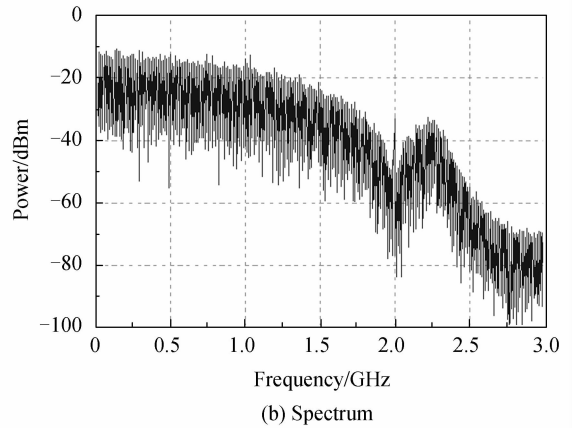


图5 微波信号源频谱和 OEO 振荡信号频谱  
Fig. 5 The spectra of the signal from the microwave source and the OEO oscillating signal

OEO所提取的载波反馈至M<sub>ZM2</sub>(Versawave Technologies,带宽40 GHz)的射频端口,与入射的光微波信号混频,经PD探测,并由截止频率为2.2 GHz的LPF滤波后重新得到基带信号.图6给出了低通滤波之后的信号眼图和频谱.从图6可以看出,PRBS信号通过整个系统之后,能保持良好的信号质量,从而说明该系统能较好地完成高速、宽带信号( $\geq 2$  Gb/s)的高保真传输.



(a) Eye diagram



(b) Spectrum

图6 低通滤波之后信号的眼图和频谱  
Fig. 6 The eye diagram and spectrum of the signal after low-pass filtering

将PRBS信号替换成高清播放器输出的无压缩高清视频信号,进行高清视频的传输测试.信号格式为1280×720 P,速率为1.5 Gb/s.高清视频信号通过如图1所示的传输系统后,其频谱与初始视频信号的频谱如图7.由图7可以看出,经过系统传输后的视频信号频谱在低频处基本保持不变.实验证实,该系统可成功将视频信号传输至末端的高清显示器进行实时显示.整个系统的实物照片如图8.

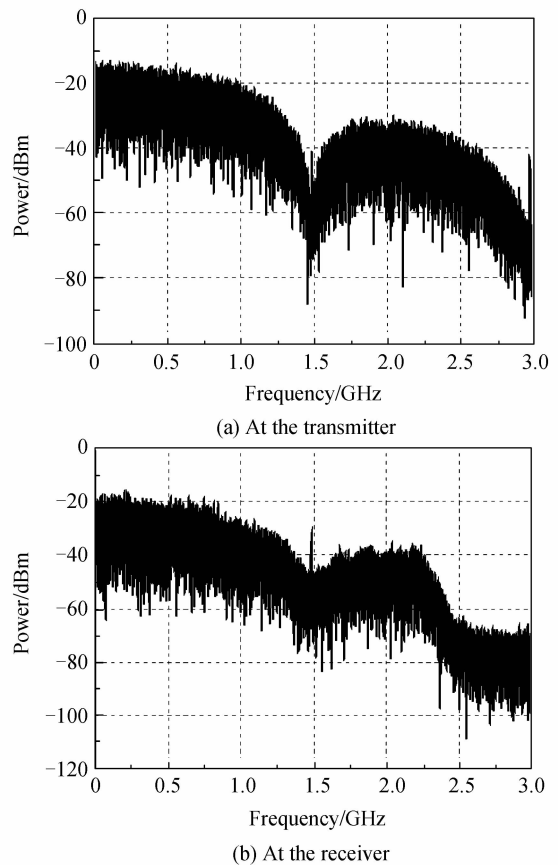


图7 经过系统前、后的视频信号频谱  
Fig. 7 The spectra of the video signal at the transmitter and the receiver

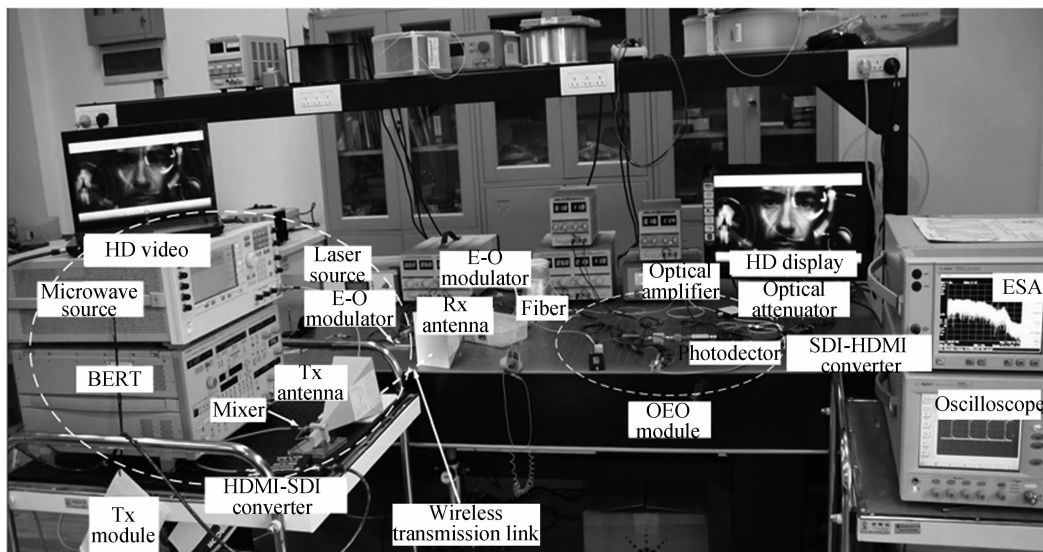


图 8 高清视频传输系统的实物照片

Fig. 8 The photograph of the HD video transmission system

### 3 结论

本文设计了基于光电振荡器的宽带射频光子下转换系统,并成功应用于速率 1.5 Gb/s 的高清视频的无线传输.系统中通过 OEO 的注入锁定,产生高质量的射频同步信号,并直接在光域中进行信号的下转换.本系统是基于光电振荡器注入锁定和下转换的应用展示,实现了全高清视频信号的有线无线传输.该系统具有大带宽、低功耗、抗电磁干扰、工作灵活等优点,有良好的实用价值和应用前景.

#### 参考文献

- [1] CISCO INC. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011 - 2016[EB/OL]. Feb. 2012. [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html).
- [2] USAMI M. Strategy for KDDI's next generation network[C]. International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2008), 2008, 186-189.
- [3] BELBEKKOUCHE A, REZGUI J, HAFID A. Wireless mesh and optical burst switching convergence for a novel metropolitan area network architecture [J]. *Computer Networks*, 2011, **55**(1): 159-172.
- [4] PAN S L, YAO J P. UWB over fiber communications: modulation and transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(16): 2445-2455.
- [5] XU Kun, YIN Jie, LI Jian-qiang. Super wideband radio over fiber system and the research of key technologies[J]. *ZTE Communication*, 2009, **15**(3): 21-24.  
徐坤,殷杰,李建强.超宽带光载无线系统及其关键技术[J].中兴通讯技术, 2009, **15**(3): 21-24.
- [6] WANG Xiao-yun, HUANG Yu-hong, CUI Chun-feng, et al. C-RAN: evolution toward green radio access network [J]. *China Communications*, 2010, **7**(3): 107-112.  
王晓云,黄宇红,崔春风,等. C-RAN:面向绿色的未来无线接入网演进 [J]. *中国通信*, 2010, **7**(3): 107-112.
- [7] AL-RAWESHIDY H, KOMAKI S. Radio over fiber technologies for mobile communications networks[M]. Artech House Publishers, 2002.
- [8] PAGAN V R, HASS B M, MURPHY T E. Linearized electrooptic microwave downconversion using phase modulation and optical filtering[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(2): 883-895.
- [9] SONG H J, SONG J I. Simultaneous all-optical frequency downconversion technique utilizing an SOA-MZI for WDM radio over fiber (RoF) applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(8): 3028-3034.
- [10] YAO X S, MALEKI L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. *JOSA B*, 1996, **13**(8): 1725-1735.
- [11] SHIEH W, YAO S X, LUTES G, et al. Microwave signal mixing by using a fiber-based optoelectronic oscillator for wavelength-division multiplexed systems[C]. Conference on Optical Fiber Communication (OFC 97), 1997, 358-359.
- [12] PAN S L, YAO J P. Optical clock recovery using a polarization-modulator-based frequency-doubling optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(16): 3531-3539.
- [13] HSUEH Y T, LIU C, FAN S H, et al. A novel full-duplex tested demonstration of converged all-band 60-GHz radio-over-fiber access architecture [C]. Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2012), 2012, OTu2H. 5.
- [14] CHEN W E, LU T H, LIN C T, et al. Transmission distance improvement employing simple 60GHz radio-over-fiber system with beat noise mitigation[C]. Conference on Optical Fiber Communication (OFC 2012), 2012, OM2B. 4.

## Wideband Photonic Microwave Downconversion Based on an Optoelectronic Oscillator for Uncompressed HD Video Distribution

TANG Zhen-zhou, PAN Shi-long, ZHOU Pei, ZHU Dan, GUO Rong-hui, BEN De  
(*Microwave Photonic Research Laboratory, College of Electronic and Information Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)  
(*State Key Laboratory of Millimetre Waves, Nanjing 210096, China*)

**Abstract:** Wideband photonic microwave downconversion based on an optoelectronic oscillator (OEO) is proposed and demonstrated for the uncompressed HD video radio-over-fiber (RoF) transmission system. By using the injection locking of the OEO, high-quality RF carrier is extracted from the optical microwave signal. The extracted RF carrier is then fed back to the modulator to perform the downconversion in the optical domain. An experiment is performed. The distribution and downconversion of the signal with a carrier frequency of 10 GHz and a data rate of  $\geq 2$  Gb/s is verified. The wireless distance is 0.5 m and the length of optical fiber is 10 km. The distribution of a real-time 1.5-Gb/s uncompressed HD video is also demonstrated in the radio over fiber link. The results show that the system features wide bandwidth and low electromagnetic interference. Meanwhile, thanks to the automatic phase tracking of the OEO, no additional phase-locking operation is needed. The overall system is simple and stable, which provides a presentation and demonstration platform for HD video transmission.

**Key words:** Downconversion; Optoelectronic oscillator; HD video distribution; Radio over fiber