

文章编号: 0253-2239(2010)01-0031-05

光载毫米波上变频系统的设计与研究

张大鹏¹ 余重秀¹ 忻向军² 马健新² 张锦龙¹

(¹ 北京邮电大学 信息光子学与光通信研究院, 信息光子学与光通信教育部重点实验室, 北京 100876)

² 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876

摘要 对光载毫米波(ROF)系统中毫米波副载波的上变频方案进行了理论分析及仿真研究。在中心站端通过 30 GHz 的本地振荡源, 采用载波抑制技术得到了差频为 60 GHz 的光载射频信号, 即在中心站实现了上变频的处理。该系统不需要在基站设置高频震荡源, 大大降低了 ROF 系统的成本, 满足了未来光无线通信系统中不断增长的载波频率的要求。同时, 理论分析了中心站上变频的信号产生方法, 搭建了仿真系统, 结合理论分析结果, 验证了该方案产生的 ROF 信号在光线中的传输性能及传输距离。

关键词 光通信; 光载毫米波; 上变频; 毫米波副载波; 光载波抑制

中图分类号 O436.3; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103001.0031

Design of Up Conversion System Based on Millimeter Sub-Carrier ROF Technique

Zhang Dapeng¹ Yu Chongxiu¹ Xin Xiangjun² Ma Jianxin¹ Zhang Jinlong¹

¹ Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Ministry of Education, Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

² School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract The up conversion method of radio-over-fiber (ROF) system is theoretically investigated and simulated, which is the key technique of ROF system. Based on optical carrier suppression, the 60 GHz optical-wireless signal is generated by the 30 GHz local oscillator in central station (CS). The up conversion procedure also take effect in CS, thus the local oscillator is not needed in the base station (BS). The cost is cut down by this method. Thus the growing need of the high frequency telecommunication can be met. Also, the simulation system is set up to testify the transmission performance of the ROF signal.

Key words optical communication; radio-over-fiber (ROF); up-conversion; millimeter sub-carrier; optical carrier suppression (OCS)

1 引 言

毫米波光纤无线通信系统是宽带通信到用户的最后“无线一跳”的系统^[1~3], 它能向大量的用户提供无线局域网、宽带接入和移动多媒体业务。作为下一代高速移动通信的候选方案之一, 60 GHz 毫米波光纤无线通信系统具有通信容量大、便携和通信安全性高等诸多优点。

光载射频系统整合了光通信与无线通信的优点^[4,5], 可以提供高速率大带宽的透明传输管道。

同时, 充分利用了高频段的资源。由于其灵活性和对业务的透明性特点, 光载射频系统已经在车载通信、无线接入和室内覆盖等许多领域得到了广泛的应用。

如果光载毫米波(ROF)系统采用毫米波段的射频信号, 将可以实现单信道大于 1 Gb/s 的无线信号传输, 结合光纤通信的波分复用(WDM)技术和毫米波频谱资源的空间复用(SDM)技术^[6~8], ROF 系统的传输能力是相当大的, 所以 ROF 技术将会

收稿日期: 2008-11-30; 收到修改稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(60677004)资助课题。

作者简介: 张大鹏(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事光载毫米波方面的研究。E-mail: roccheang@gmail.com

导师简介: 余重秀(1946—), 女, 教授, 主要从事光载毫米波方面的研究。E-mail: cxyu@bupt.edu.cn

成为一种很有前景的宽带/超宽带无线接入技术。

2 ROF 上变频系统传输理论分析

光载波抑制(OCS)调制的光载毫米波链路的原理图如图 1 所示。数据信号通过一个调制器调制到由激光二极管(LD)发出的角频率为 ω_c 的光波上,然后,光信号被一个双臂马赫-曾德尔(M-Z)调制器进行 OCS 调制,产生 OCS 光载毫米波信号,该信号抑制了中心频率成分,用两个一阶边带成分来进行信息传输。该信号经过光纤传输后在接收端由光电探测器将光载毫米波信号转换为毫米波信号^[9]。相比而言,双边带(Double sideband, DSB)调制采用中心频率和两个一阶边带成分进行信息传输,频谱利用率没有 OCS 方式高。由于 DSB 光载射频中第 ± 1 阶边带传输速度不同。光纤色散会使光载波的

第 ± 1 阶边带传输速度不同,这两个边带分别与光载波拍频各自产生一个拍频波,这两个拍频波频率相同但是传输速度不同,光电流的输出是二者的相干叠加,所以就导致了光电流沿光纤方向幅度衰落,这对 ROF 系统的性能产生严重的影响。

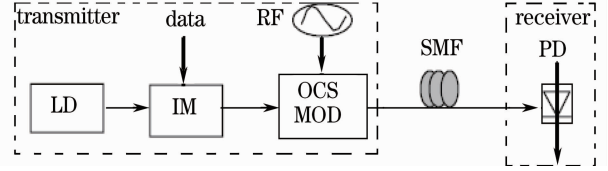


图 1 基于 OCS 调制的光载毫米波(ROF)下行链路

Fig. 1 Millimeter-wave radio-over-fiber downlink transmission system based on optical carrier suppression

由于在实际的系统中,光载波不容易完全被抑制,总是存在一定的残留部分,但是比光载波抑制调制产生的一阶边带幅度小的多,其光场可以表示为

$$E_{\text{OCS}}(0, t) = A(t) \{ \exp\{j[(\omega_c - \omega_m)t + \phi_1]\} + \delta \exp\{j[\omega_c t + \phi_0]\} + \exp\{j[(\omega_c + \omega_m)t + \phi_1]\} \}, \quad (1)$$

式中 $\delta \ll 1$ 。在经过光纤传输之前,由光电探测器产生的光电流可以表示为

$$I_{\text{OCS}}(0, t) = \mu |E_{\text{OCS}}(0, t)|^2 = \mu A^2(t) [(2 + \delta^2) + 4\delta \cos(\phi_0 - \phi_1) \cos(\omega_m t) + 2\cos(2\omega_m t)] \approx 2\mu A^2(t) [1 + \cos(2\omega_m t)]. \quad (2)$$

从(2)式可以看到光电流包括直流(DC)成分和射频(RF)成分^[10~13],各种成分均携带有传输的信号。由于载波抑制($\delta \ll 1$),频率为 ω_m 的一阶谐波幅度非常小,所以射频光电流主要为频率为 $2\omega_m$ 的二阶谐波。

可见,由于光载射频信号的光谱包括多个波长成分^[14,15],光纤的色散对 ROF 系统的影响非常明显,它不仅会引起解调出来的射频信号功率随着传输距离衰落,而且还会造成信号码形的严重失真甚至是严重畸变,波形失真还会引起码间干扰,这严重限制了信号的传输距离。在本方案中采用了 OCS 调制方式,克服了幅度衰落效应,色散对传输性能的影响分析如下:

经过色散光纤的传输之后,光场表达式为

$$E_{\text{OCS}}(0, t) = A[t - (\omega_c - \omega_m)^{-1} \beta(\omega_c - \omega_m)z] \exp\{j[(\omega_c - \omega_m)t - \beta(\omega_c - \omega_m)z + \phi_1] - \gamma z\} + A[t - (\omega_c + \omega_m)^{-1} \beta(\omega_c + \omega_m)z] \exp\{j[(\omega_c + \omega_m)t - \beta(\omega_c + \omega_m)z + \phi_1] - \gamma z\} = A_{-1} \exp\{j[(\omega_c - \omega_m)t - \beta(\omega_c - \omega_m)z + \phi_1] - \gamma z\} + A_{+1} \exp\{j[(\omega_c + \omega_m)t - \beta(\omega_c + \omega_m)z + \phi_1] - \gamma z\}, \quad (3)$$

式中 A_{+1} , A_{-1} 分别为正负一阶边带上信号幅度, $\beta(\omega)$ 为色散系数, γ 为信号幅度衰减系数, z 为光纤长度。

该光信号通过光电检测器之后将得到电信号,得到的光电流可表示为

$$I_{\text{OCS}}(z, t) = \mu (A_{+1}^2 + A_{-1}^2) + 2\mu A_{+1} A_{-1} \cos[2\omega_m t + \beta(\omega_c - \omega_m)z - \beta(\omega_c + \omega_m)z] = \mu (A_{+1}^2 + A_{-1}^2) + 2\mu A_{+1} A_{-1} \cos\{2\omega_m [t - \beta'(\omega_c)z]\}, \quad (4)$$

其中用到了泰勒展开:

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + (\omega - \omega_0) \beta'(\omega_0) + \frac{1}{2} (\omega - \omega_0)^2 \beta''(\omega_0) + \dots \quad (5)$$

从(4)式可以看到,得到的光电流中含有直流分量和频率为 $2\omega_m$ 的射频分量。由于 A_{+1} 和 A_{-1} 在光纤中传输速度不同,由频率为 $\omega_c + \omega_m$ 的光波承载的信号 A_{+1} 和由频率为 $\omega_c - \omega_m$ 的光波承载的信号 A_{-1} 会逐渐错开,因此 A_{-1} 和 A_{+1} 的码边沿会逐渐走离。

对于直流分量来说,从(4)式可以看出上下边带承载脉冲的错开将使脉冲的沿逐渐展宽,这将造成符号间干扰和误码率增加。对于射频分量来讲,由于该信号脉冲的幅度是由上下边带幅度的乘积,由于上下边带的错开导致信号脉冲的宽度逐渐减小,

使得信号性能恶化。由于 OCS 光载毫米波信号解调的光电流主要由直流成分和二阶射频成分构成，

且在光纤中传输时不存在衰落现象。上下边带的走离时间为

$$\Delta t_{+1-1} = \frac{\beta(\omega_c + \omega_m)}{\omega_c + \omega_m} z - \frac{\beta(\omega_c - \omega_m)}{\omega_c - \omega_m} z = \frac{2\omega_m z}{\omega_c^2 - \omega_m^2} \left[\omega_c \beta'(\omega_c) - \beta(\omega_c) + \frac{1}{2} \omega_m (2\omega_c - \omega_m) \beta'(\omega_c) \right] = \frac{2\omega_m z}{\omega_c^2 - \omega_m^2} \left[\omega_c^2 \beta'(\omega_c) + \frac{1}{2} \omega_m (2\omega_c - \omega_m) \beta'(\omega_c) \right] \approx 2\omega_m \beta'(\omega_c) z = 2\lambda_c^2 D c^{-1} f_m z. \quad (6)$$

因此信号码元边沿的时间走离与射频频率 f_m ，光纤长度 z 和色散系数 D 相关。随着传输距离的增加，信号码元边沿走离变形，使信号性能大大降低。若给定信号码元速率 R (bit/s)，占空比 η ($RZ: 0 < \eta < 1$, NRZ: $\eta = 1$)，则可得到码宽 $\tau = \eta/R$ 。信号码元在光纤中传输时，若 $\Delta t_{+1-1} \rightarrow \tau$ ，则信号的眼图就会逐渐闭合，因此传输距离将受到(7)式的限制。

$$l < \frac{\eta c}{2R\lambda_c^2 D f_m}. \quad (7)$$

当数据速率选择为 2.5 Gb/s，载波频率选择为 60 GHz 时，由(7)式计算可得，基于 OCS 调制方式的 ROF 通信系统的传输距离约为 40 km。

3 ROF 上变频系统的仿真验证和分析

利用 Optisystem 仿真软件搭建系统对理论分析进行验证。按照第一部分中的理论分析，系统仿真示意图如图 2 所示。连续激光器发出的波长为 1554.7 nm，带宽为 100 MHz 的光波首先被 2.5 Gb/s 的伪随机非归零序列调制，得到的光谱如图 3 所示，其上调制有所需要的数据基带信号。然后 30 GHz 的本振信号通过一个双臂的 LN-MZM 调制器对光波进行光载波抑制调制产生两个一阶边带，二者之间的频率间隔为 60 GHz，其上均含有所需要的数据信号，光谱如图 4 所示。相对于一阶边

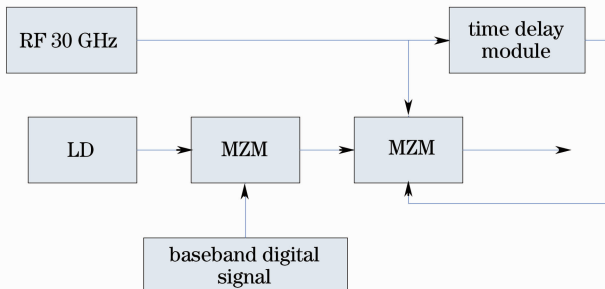


图 2 毫米波副载波 ROF 上变频系统示意图

Fig. 2 Up conversion system based on millimeter sub-carrier ROF technique

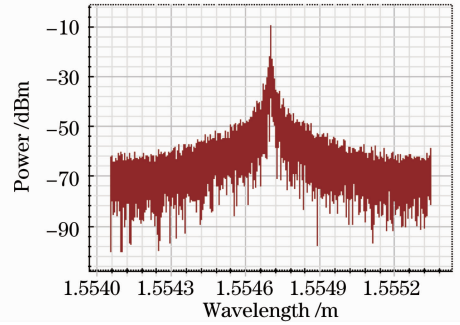


图 3 基带信号调制后光谱

Fig. 3 Baseband signal spectrum after modulation

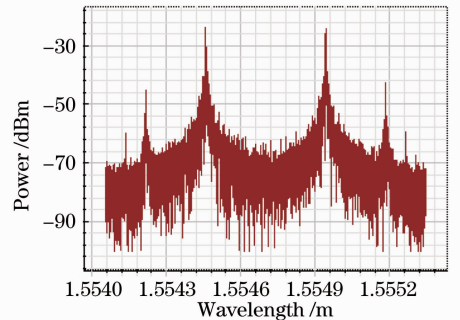


图 4 光抑制载波调制后光谱

Fig. 4 Spectrum after optical carrier suppression

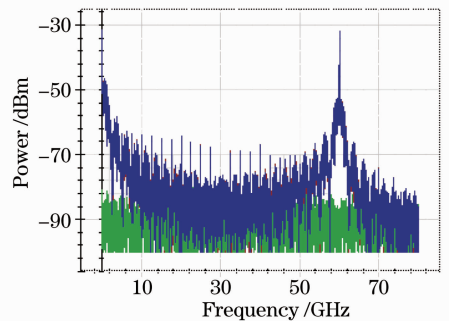


图 5 经过 PIN 光电检测后的频谱图

Fig. 5 Frequency spectrum detected by PIN photodetection

带，光载波的抑制比达 41 dB，二阶边带的抑制比达 20 dB，载波抑制效果较好。然后经过 EDFA 的放大和滤波，光载毫米波信号注入到光纤中进行传输，其中光纤的色散为 16.75 ps/(nm·km)，功率衰减

常数为 0.2 dB/km;在接收端,两个差频为 60 GHz 的含有数据信号的频率成分注入 PIN-PD 中,将光信号转换成电信号,产生所需要的含有数据信号的 60 GHz 射频信号。转换后得到的电域频谱如图 5 所示,在 60 GHz 处即所需要的射频信号。

为了考察光载毫米波的性能,这里不通过天线将 60 GHz 射频信号发射出去而是用 60 GHz 的本振信号对射频信号进行相干解调以替代天线,解调部分框图如图 6 所示。解调的基带数据信号的眼图随着光纤长度不断增长如图 7 所示。从图 7 中眼图随传输距离的变化可以看到,20 km 处光载毫米波信号的质量已经变差,30 km 之后信号的性能很快恶化,在 50 km 处眼图完全闭合,因此该系统可以传输约

30 km 光纤长度。这里可以采取的改进方法包括减小激光器的发光线宽和提高发射功率,系统中采用的是 100 MHz 的激光器发射线宽,因为现实中激光器功率越高,线宽越小,价格越昂贵。如果该系统采用 Optisystem 中的系统默认值 10 MHz 线宽,在传输 40 km 光纤时,误码率与 Q 值均可控制在可以接受的范围内。本系统与 DSB 调制相比具有更优良的性能。

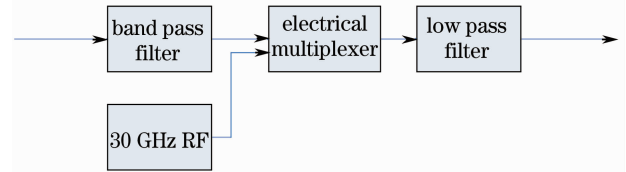


图 6 检测部分系统框图

Fig. 6 Diagram of detection system

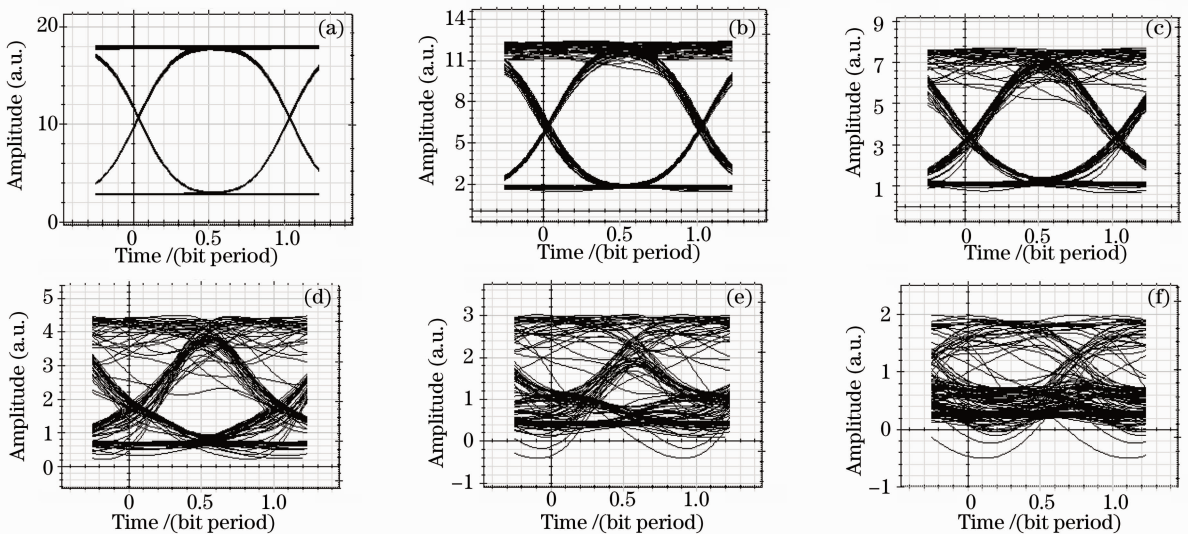


图 7 不同长度光纤情况下解调出的数据信号眼图。(a)0; (b)10 km; (c)20 km; (d)30 km; (e)40 km; (f)50 km

Fig. 7 Signal eye pattern or diagram after demodulation in cases of different length fibers. (a) 0; (b) 10 km;

(c) 20 km; (d) 30 km; (e) 40 km; (f) 50 km

ROF 系统中对传输距离的要求不是很高,30~40 km 基本可以满足需求。以上建立的系统基本上满足了 ROF 系统的传输要求,验证了毫米波作为副载波进行上变频方案的可行性。仿真结果与理论分析吻合较好。此种方案在中心站应用,就在光载波上有差频为 60 GHz 的两个频率成分存在,属于在中心站进行上变频的方案。采用本方案,克服了幅度衰落效应,由于在基站不需要本地振荡源,因此极大地降低了系统成本。

4 结 论

本文提出了一种在中心站进行上变频的 ROF 系统的模型。在中心站,通过 30 GHz 的本振,采用 OCS 技术得到了频率差为 60 GHz 的两个载有数据

的光载射频信号。在基站通过光电探测得到了 60 GHz 的毫米波信号,在基站不需要昂贵的本地振荡源,极大地降低了系统成本。同时,对系统的传输性能进行了仿真分析,该系统传输距离可以达到 40 km,相比 DSB 调制方式,采用 OCS 调制技术,克服了光电流沿光纤方向幅度衰落,取得了更好的传输效果。

参 考 文 献

- Hamed Al Raweshidy, Shozo Komaki. Radio over Fiber Systems for Mobile Applications in Radio over Fiber Technologies for Mobile Communications Networks [M]. USA: Artech House, 2002. 10~15
- Ma Jianxin, Yu Jianjun, Yu Chongxiu *et al.*. Fiber dispersion influence on transmission of the optical millimeter-waves generated using LN-MZM intensity-modulation [J]. *J. Lightw.*

- Technol.*, 2007, **25**(11): 3244~3256
- 3 Yu Jianjun, Jia Zhensheng, L. Yi *et al.*. Optical millimeter-wave generation or up-conversion using external modulator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(1): 265~267
 - 4 R. P. Braun, G. Grosskrof, D. Rohde *et al.*. Optical millimetre-wave generation and transmission experiments for mobile 60 GHz band communications [J]. *IEEE Electron. Letts.*, 1996, **32**(7): 626~627
 - 5 A. Stohr, R. Hemzelmann, C. Kaezmarek *et al.*. Ultra-broadband Ka to W-band 1.55 μm traveling-wave photomixer[J]. *IEE Electron. Lett.*, 2000, **36**(11): 970~972
 - 6 Qi Guohua, Yao Jianping, J. Seregelyi *et al.*. Optical generation and distribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator [J]. *J. Lightw. Technol.*, 2005, **23**(9): 2687~2695
 - 7 Qi Guohua, Yao Jianping, J. Seregelyi *et al.*. Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2005, **53**(10): 3090~3097
 - 8 J. L. Corral, J. Marti, J. M. Fuster. General expressions for IM/DD dispersive analog optical links with external modulation or optical up-conversion in a Mach-Zehnder electrooptical modulator [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2001, **49**(10): 1968~1976
 - 9 Ma Jianxin, Yu Chongxiu, Zhou Zhen *et al.*. Optical mm-wave generation by using external modulator based on optical carrier suppression[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(1): 51~57
 - 10 J. Ma, C. Yu, J. Yu *et al.*. Transmission performance of the optical mm-wave signals generated by optical carrier suppression [C]. Lasers and Electro-Optics Society, 2006: 197~198
 - 11 T. Niiho, M. Nakaso, K. Masuda *et al.*. Transmission performance of multichannel wireless LAN system based on radio-over-fiber techniques [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, **54**(2): 980~989
 - 12 S. T. Choi, K. S. Yang, S. Nishi *et al.*. A 60-GHz point-to-multipoint millimeter-wave fiber-radio communication system[J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2006, **54**(5): 1953~1960
 - 13 T. Kuri, K. Kitayama, Y. Takahashi. A single light-source configuration for full-duplex 60-GHz-band radio-on-fiber system [J]. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2003, **51**(2): 431~439
 - 14 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 73~76
黄 诚, 陈 林, 余建军等. 采用单个相位调制器产生毫米波 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 73~76
 - 15 Hu Liliang, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. A novel scheme for optical millimeter-wave generation based on double-sideband modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 238~242
胡黎亮, 陈 林, 余建军等. 一种改进的双边带调制产生光毫米波的方案 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 238~242