

文章编号: 0253-2239(2008)01-0036-07

# 全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统

江 涛 黄德修 张新亮 张 强 王俊毅

(华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 基于光纤无线通信(ROF)的无线网络被认为是提供高带宽、交互式 and 多媒体无线通信服务很有前景的实现方式,但目前毫米波频段的光纤无线通信系统都存在色散严重或基站结构复杂等问题。设计完成了一个全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统,利用双光源技术和 60 GHz 的电吸收收发器(EAT)分别在下行和上行链路实现单波长和双波长调制,完成基站的探测、调制、射频上变频和下变频四种功能,在基站中实现了电吸收收发/混频器(EATX),从而避免了制作电吸收收发/混频器件,同时也解决了光纤无线通信系统中常见的色散和基站结构复杂等问题。

**关键词** 光电子学; 光纤无线通信; 毫米波变频; 电吸收收发/混频器; 全双工

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A

## A Full-Duplex 60 GHz-Band Radio over Fiber System

Jiang Tao Huang Dexiu Zhang Xinliang Zhang Qiang Wang Junyi

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,  
Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** Wireless networks based on radio over fiber (ROF) technologies have been proposed as a promising solution to meet the future demand on broadband, interactive and multimedia services over wireless media. However, millimeter-wave band signals suffer from the dispersion problem in fiber, and the structure of base station is complex. A full-duplex 60 GHz band ROF system employing a 60 GHz electroabsorption transceiver (EAT) together with a dual-lightwave technique is reported. By realizing single- and dual-wavelength modulation in downlink and uplink respectively, a base station with detection, modulation and frequency up/down-conversion functions which acts as a electroabsorption transceiver/mixer is obtained. Simultaneously, its chromatic dispersion is small and base station structure is simple.

**Key words** optoelectronics; radio over fiber (ROF); millimeter-wave frequency conversion; electro-absorption transceiver/mixer (EATX); full duplex

## 1 引 言

光纤无线通信(ROF)系统相对于传统高频无线或者有线链路具有低廉的价格、巨大的带宽、高性能以及更长的传输距离等优点,是未来实现交互式多媒体宽带无线通信的有效方式<sup>[1,2]</sup>。

光纤无线通信系统的实现技术包括信号源的设计、基站(BS)的设计以及系统的色散管理<sup>[3]</sup>。信号源的设计重点是如何产生高质量的光信号和如何产

生合适的射频(RF)信号<sup>[4~6]</sup>,基站的设计目的主要是要简化基站结构,而光纤色散管理是影响系统传输性能的主要因素。目前用电吸收调制器模块来实现光纤无线通信系统已有很多报道<sup>[7~9]</sup>。文献<sup>[10, 11]</sup>中利用 60 GHz 的电吸收调制模块实现了毫米波通信,但是色散影响较严重,且结构复杂。本文从光纤无线通信系统的实现技术出发,利用电吸收调制器模块设计了新型的全双工 60 GHz 光纤无线通

收稿日期: 2007-04-16; 收到修改稿日期: 2007-07-09

基金项目: 国家 973 计划(2006CB302805)资助课题。

作者简介: 江 涛(1983—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事光通信系统与技术等方面的研究。

E-mail: hustjiangtao@163.com

导师简介: 黄德修(1937—),男,湖南宁乡人,教授,博士生导师,主要从事半导体、激光器件与技术、光纤通信与传感等方面的研究。E-mail: wnlo2@mail.hust.edu.cn

信系统,在基站中实现了电吸收收发/混频器(EATX),系统链路中传输的是中频信号,所以在很大程度上克服了色散的影响。

## 2 系统设计

全双工 60 GHz 光纤无线通信系统如图 1 所示,包括中心站和基站两大部分。中心站中有光信号产生模块、光发射机模块和光接收机模块。光信号产生模块中有两组由半导体激光器(LD)和马赫-曾德尔调制器(MZM)组成的激光器,每组 LD 出射的光载波经过马赫-曾德尔调制器载波抑制调制后得到两个由一阶边带组成的双模激光输出,这里不

考虑它的载波和高阶边带分量。由 LD-1 组产生的两个光波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,  $\lambda_1$  是用于携带下行链路信号的光载波,  $\lambda_2$  是用于传输到基站的本征光信号,它们在先后经过光放大器和光分波器后分成两路传输到光发射机中。由 LD-2 组产生的两个光波长为  $\lambda_3$  和  $\lambda_4$ ,它们用于上行链路传输。光发射机模块中包括一个调制器和一个合波器,  $\lambda_1$  在经过下行中频 IF-d 信号强度调制后和  $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  合波送往基站。光接收机模块中包括光探测器(PD)和包络检波器,经过探测解调获得所需上行链路数据,由于此处探测的是中频信号,所以只需用到低速的探测器。

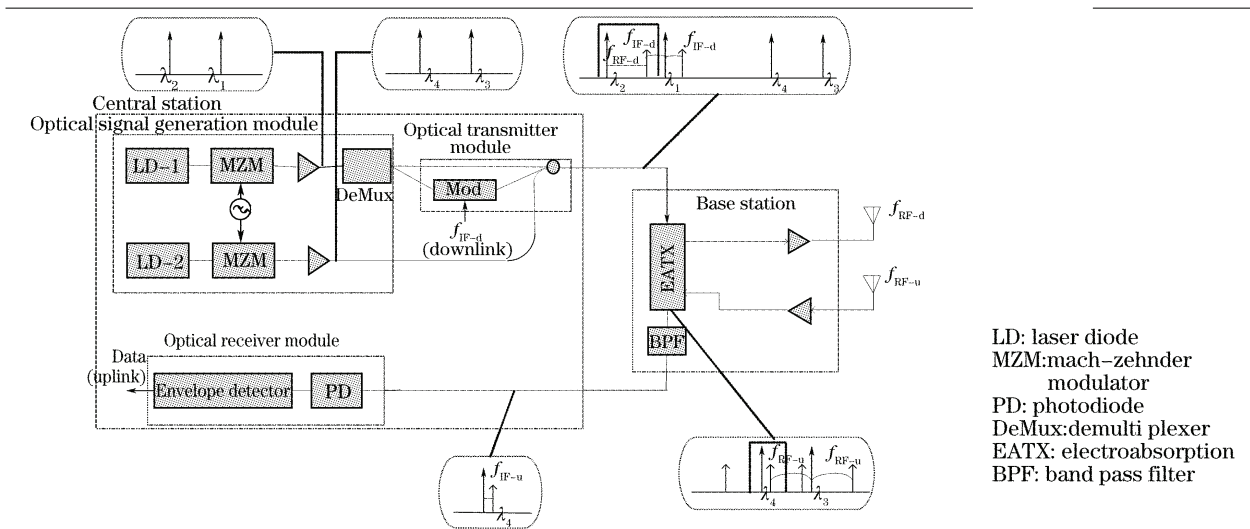


图 1 全双工 60 GHz 光纤无线通信系统框图

Fig. 1 Block diagram of full duplex 60 GHz-band radio over fiber system

基站由电吸收收发/混频器和一个光带通滤波器(BPF)构成,最主要的部分在于利用电吸收收发器(EAT)实现电吸收收发/混频。电吸收收发器对波长远远小于吸收边带的  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  可以完全吸收,而对在吸收边带附近的波长  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  产生很大的消光比,所以一个单独的电吸收收发器可以用来同时实现探测和调制。另外,下行的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  经过  $\lambda_1$  的单波长调制,在电吸收收发器的探测过程中拍频完成中频 IF-d 信号到毫米波 RF-d 信号的转变,即  $\lambda_2$  和  $\lambda_1$  的一阶边带之间的拍频完成。上行的  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  在电吸收收发器的调制区域进行双波长调制,完成毫米波信号 RF-u 到中频 IF-u 信号的转变,即利用电吸收收发器将接受到的外界毫米波信号 RF-u 调制到未被电吸收收发器吸收的  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  光载波上去,从而在  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  上各自都形成了两个一阶边带。由于外界接受的毫米波和  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  之间的拍频是差不多大小

的,在  $\lambda_4$  与  $\lambda_3$  的一个边带之间就形成了一个中频拍频信号。所以一个单独的电吸收收发器又实现了射频的上变频和下变频的功能。这样便获得了完成探测、调制、射频上变频和下变频四种功能的电吸收收发/混频。

从系统中还可以看出,光信号产生模块产生的双模光信号可以在基站中获得高的频率稳定的射频毫米波信号,这是由于激光器的相位噪声自动抵消所致。

## 3 系统理论分析

本文采用了双边带载波抑制调制的方法<sup>[12]</sup>作为系统的双光源输出,它可以在远端产生稳定的窄线宽毫米波信号,这对于毫米波光纤无线通信通信系统是非常有利的。马赫-曾德尔调制器的输出场强<sup>[12]</sup>为

$$E(t) = \frac{1}{2}J_0\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos\left[\frac{\pi}{2}(1+\epsilon)\right]\cos(\omega_0 t) - J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\sin\left[\frac{\pi}{2}(1+\epsilon)\right]\cos(\omega_0 t \pm \omega t) - \\ J_2\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos\left[\frac{\pi}{2}(1+\epsilon)\right]\cos(\omega_0 t \pm 2\omega t) + J_3\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\sin\left[\frac{\pi}{2}(1+\epsilon)\right]\cos(\omega_0 t \pm 3\omega t) + \dots, \quad (1)$$

$\epsilon$  为归一化的调制器偏置点,  $\alpha$  为归一化的调幅系数 ( $\alpha = 1$  时为 100% 调制),  $\omega$  为驱动调制器的电信号频率,  $\omega_0$  为光载波频率。从(1)式可以看出, 如果马赫-曾德尔调制器偏置在半波电压  $V_\pi$  ( $\epsilon = 0$ ) 处, 所有的偶数项全部消失, 从而光载波频率  $\omega_0$  被抑制。

先分析下行链路。从(1)式分析可知, 由 LD-1 经马赫-曾德尔调制器载波抑制调制后得到的光场强为

$$E_1(t) = J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 \pm \omega)t + \phi_1(t)], \quad (2)$$

式中  $\omega_1$  为下行光载波的中心频率, 在这里考虑了激光器输出光载波的相位噪声  $\phi_1(t)$ 。另外只关注频率为  $\omega_1 \pm \omega$  的两个边带, 分别对应  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ , 对于高阶的边带不予考虑。

经过分波器后, 分成频率为  $\omega_1 - \omega$  与  $\omega_1 + \omega$  的两路光, 其中频率为  $\omega_1 + \omega$  的光载波在光发射机中被下行中频信号 IF-d 调制, 调制后的光场输出为

$$E'_1(t) = J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 + \omega)t + \phi_1(t)] + \frac{\xi}{2}J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 + \omega - \omega_{\text{IF-d}})t + \phi_1(t) - \theta(t)] + \\ \frac{\xi}{2}J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 + \omega + \omega_{\text{IF-d}})t + \phi_1(t) + \theta(t)], \quad (3)$$

$\omega_{\text{IF-d}}$  和  $\theta(t)$  分别为中频信号的中心频率和它所携带的数据信号,  $\xi$  为相对于光载波归一化调幅系数。

在光发射机中,  $E'_1(t)$  与原来的频率为  $\omega_1 - \omega$  的光载波合波后通过光纤发射出去, 这里不考虑光纤的色散作用。当光载波传输到基站后, 由基站探测, 利用平方律定律。在电吸收调制器(EAM)中产生的电流为

$$i(t) = \mathcal{R}E_1(t)E'^*_1(t) = \\ \mathcal{R}J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 - \omega)t + \phi_1(t)]\left\{\frac{\xi}{2}J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_1 + \omega - \omega_{\text{IF-d}})t + \phi_1(t) - \theta(t)]\right\}^* + \dots = \\ \frac{A}{4}\{\cos[(2\omega - \omega_{\text{IF-d}})t - \theta(t)] + \cos[(2\omega_1 - \omega_{\text{IF-d}})t + 2\phi_1(t) - \theta(t)]\} + \dots, \quad (4)$$

式中  $A = \mathcal{R}\xi J_1^2\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)$ ,  $\mathcal{R}$  为 EAM 的响应率。考虑到本文 60 GHz 电吸收收发器关于射频回程损耗随射频频率的变化关系, 这里  $i(t)$  中实际可以输出的只有  $\omega_1 - \omega$  与  $\omega_1 + \omega - \omega_{\text{IF-d}}$  之间的拍频电流项, 如图 1 中顶部的虚线框所示, 其他的电流项被衰减损耗掉。由于探测器无法响应频率为  $2\omega_1 - \omega_{\text{IF-d}}$  的高频光信号, 所以输出电流为

$$i(t) = \frac{A}{4}\cos[(2\omega - \omega_{\text{IF-d}})t - \theta(t)], \quad (5)$$

由此得到了频率为毫米波频段的信号  $2\omega - \omega_{\text{IF-d}}$ , 同时消除了激光器的相位噪声  $\phi_1(t)$  的影响。

再分析上行链路。如上所述, 由 LD-2 和马赫-曾德尔调制器载波抑制调制产生的光场强为

$$E_2(t) = J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[\omega_2 t \pm \omega t + \phi_2(t)], \quad (6)$$

式中  $\omega_2$  为上行光载波的中心频率,  $\omega_2 \pm \omega$  这两个边带分别对应  $\lambda_3, \lambda_4$ , 这里同样考虑了激光器输出光载波的相位噪声  $\phi_2(t)$ 。这两路光到达基站被电吸收收发/混频器接收, 在调制区域同时被上行的毫米波 RF-u 信号调制, 调制后的光场输出:

$$E'_2(t) \propto J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[\omega_2 t \pm \omega t + \phi_2(t)] + \xi'J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_2 \pm \omega - \omega_{\text{RF-u}})t + \phi_2(t) - \theta'(t)] + \\ \xi'J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_2 \pm \omega + \omega_{\text{RF-u}})t + \phi_2(t) + \theta'(t)], \quad (7)$$

式中  $\omega_{\text{RF-u}}$  和  $\theta'(t)$  分别为毫米波信号 RF-u 的中心频率和所携带的数据信号。可见, 调制过程分别在两个光载波之上产生了各自的一阶边带信号, 这里同样忽略了高阶边带信号的影响。可以发现, 在  $\omega_2 - \omega$  与  $\omega_2 + \omega - \omega_{\text{RF-u}}$  以及  $\omega_2 + \omega$  与  $\omega_2 - \omega + \omega_{\text{RF-u}}$  之间频率间隔为中频频段, 大小为  $2\omega - \omega_{\text{RF-u}}$ , 如图 1 中底部的虚线框所示。利用

这一现象,当光场通过电吸收收发 / 混频器之后的光滤波器后再通过光纤传输送回中心站,在中心站的光接收机中被光探测器接受,探测器的电流  $i_{PD}(t)$  为

$$i_{PD}(t) = \mathcal{R}J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_2 - \omega)t + \phi_2(t)]\xi'J_1\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\cos[(\omega_2 + \omega - \omega_{RF-u})t + \phi_2(t) - \theta'(t)]^* = \frac{A}{2}\{\cos[(2\omega - \omega_{RF-u})t - \theta'(t)] + \cos[(2\omega_2 - \omega_{RF-u})t + 2\phi_2(t) - \theta'(t)]\}, \quad (8)$$

式中  $A = \mathcal{R}\xi'J_1^2\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)$ ,由于探测器无法响应频率为  $2\omega_2 - \omega_{RF-u}$  的高频光信号,所以输出电流为

$$i(t)_{PD} = \frac{A}{2}\cos[(2\omega - \omega_{RF-u})t - \theta'(t)], \quad (9)$$

由此得到频率为中频频段的信号  $2\omega - \omega_{RF-u}$ ,同时消除了激光器的相位噪声  $\phi_2(t)$  的影响。

## 4 系统仿真试验及结果

采用 60 GHz 频带的电吸收收发器模块包含三个区域:探测区域,被动波导区域和调制区域。在模块上的射频输入输出端口都配有阻抗匹配电路以减小 60 GHz 射频的回程损耗。在 59~61 GHz 的探测端和 57.5~60.5 GHz 的调制端的射频回程损耗分别可以降低到 -42 dB 和 -22 dB,这样的频率范围对于传输 60 GHz 频带毫米波信号上的低速中频数据信号来说是足够的。在射频输入偏压为 -1.8 V 下,1550 nm 以下的光波长最适合用做探测波长,因为它们的光功率几乎被完全吸收,仿真中取 1520 nm。在 1550~1590 nm 之间的光波长能得到高的调制效率,最适合的波长在 1575 nm 处。

### 4.1 下行链路

图 2 给出了系统下行链路仿真的装置图。在光

信号产生模块中由 LD-1 发射 1520 nm 的光波,输出功率取 5 dBm。马赫-曾德尔调制器的偏置电压为 2 V,调制系数为 98%。它被频率为 31 GHz 的正弦波载波抑制调制形成间隔为 0.477 nm(频率间隔  $\Delta f \sim 62$  GHz)的一阶边带,分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的两路波长,功率为 -6 dBm,它们比载波和其他边带功率高出 21 dBm,载波以及一阶以上的边带可以忽略不计,如图 3(a)所示。在光发射器中, $\lambda_1$  经马赫-曾德尔调制器由下行中频信号 IF-d (约 2 GHz)强度调制后在两边形成频率间隔为 2 GHz 的边带,此时  $\lambda_1$  的一阶边带功率为 -24 dBm, $\lambda_2$  的功率为 -12 dBm,它和  $\lambda_2$  耦合之后发射到远处的基站,光谱图如图 3(b)所示。光纤长度取 40 km,损耗是 0.2 dB/km,基站中的电吸收收发/混频器在接受到 1520 nm 左右的光波时,会对  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  探测吸收,电吸收收发/混频器的偏置电压在 -1.8 V,响应率为 1 A/W。此时  $\lambda_1$  的一阶边带和  $\lambda_2$  的功率分别为 -32 dBm,-20 dBm。探测过程中会产生各种不同的拍频,包括  $\Delta f - f_{IF-d}$ (约 60 GHz), $\Delta f + f_{IF-d}$ (约 64 GHz), $2f_{IF-d}$ (约 4 GHz), $f_{IF-d}$ (约 2 GHz)。在这四个拍频中,对应于电吸收收发器探测端射频回程损耗最小的频率范围内(59~61 GHz)只有  $\Delta f - f_{IF-d}$ (约 60 GHz)这一个分量,由此也获得了想要

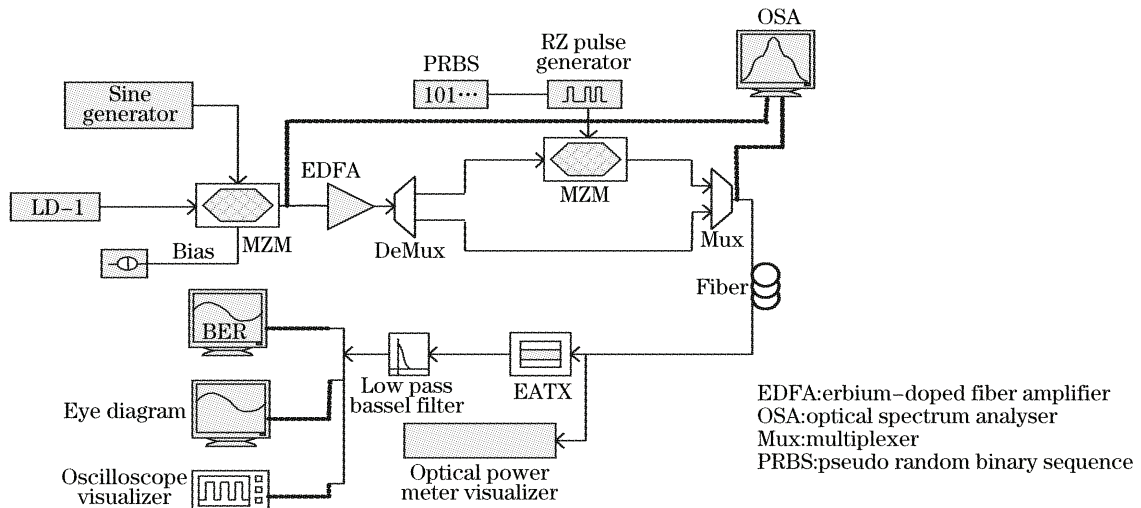


图 2 光纤无线通信系统下行链路仿真装置图

Fig.2 Simulation setup of downlink of radio over fiber system

的 60 GHz 的毫米波信号。

若用速率为 2 Gb/s 的伪随机归零(RZ)信号作为调制  $\lambda_1$  的中频信号,可以在系统中得到不同阶段的归零信号比特流图,分别如图 4(a)、图 4(b)所示,这里只列举了前 20 位比特流。它在基站解调后的信号眼图如图 5(a)所示。经过了 40 km 的光纤传

输后,测得不同接受功率下的误码率(BER),如图 5(b)所示,可见在接受功率为  $-32.5$  dBm 时,误码率达到  $10^{-9}$ 。仿真中,在中间没有光纤时,测得接受功率为  $-33.5$  dBm 时,误码率达到  $10^{-9}$ 。也就是说,40 km 的光纤传输引入了 1 dBm 的功率代价。

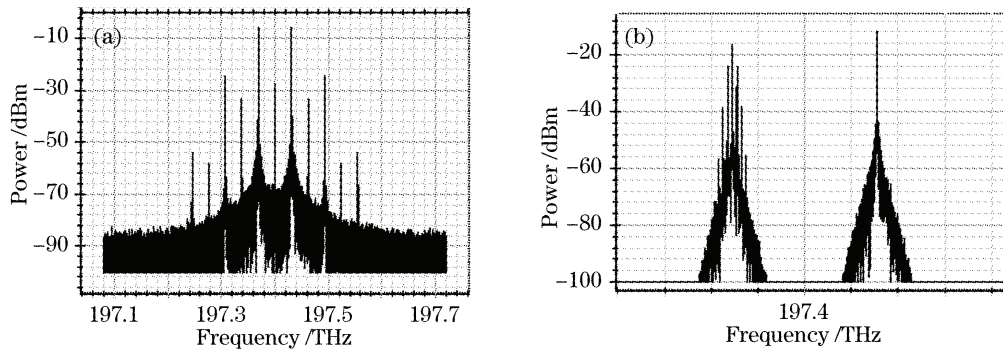


图 3 下行链路。(a) 光载波抑制后的光谱图,(b) 光信号送到基站之前的光谱图

Fig. 3 Downlink. (a) Spectrogram of optical-carrier suppression, (b) spectrogram of optical signal before base station

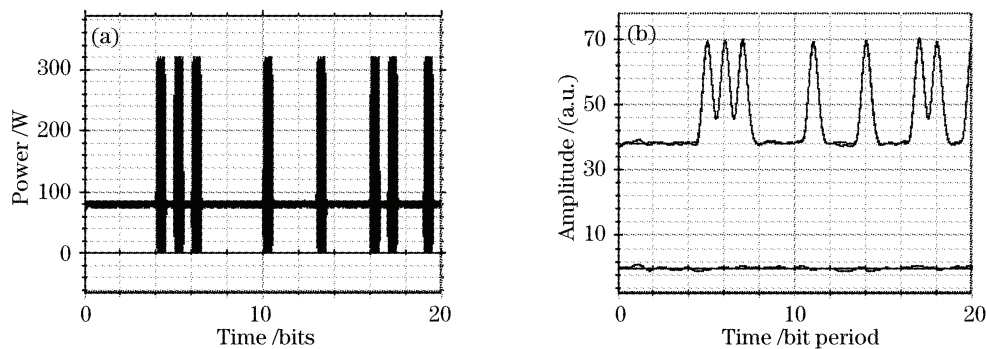


图 4 下行链路 2 Gb/s 归零比特流图。(a) 光发射机模块发射后的比特流,(b) 基站中接受解调后的比特流

Fig. 4 Downlink 2 Gb/s RZ bit stream. (a) After optical transmitter (b) after demodulation in base station

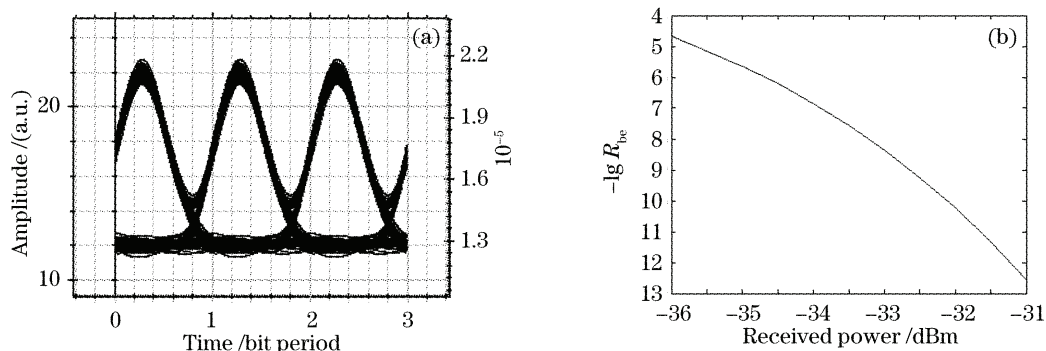


图 5 (a) 2 Gb/s 归零信号解调后的眼图,(b) 测量的误码率随接受功率的变化曲线图

Fig. 5 (a) Eye diagram of 2 Gb/s RZ signal after demodulation, (b) measured bit error rate  $R_{be}$  against received optical power

#### 4.2 上行链路

图 6 给出了系统上行链路仿真的装置图。LD-2 出射波长取 1575 nm,经过频率为 31 GHz 的正弦波载波抑制调制形成间隔为 0.512 nm(频率间隔  $\Delta f \sim 62$  GHz)的  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ ,它们的功率大小同样为

$-6$  dBm。通过光纤到达基站后,功率为  $-14$  dBm。电吸收收发/混频器偏置在  $-1.8$  V,调制系数为 99%。在电吸收收发/混频器的调制区域,都将被上行的毫米波(约 59.5 GHz)强度调制,于是在  $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  两边都生成了双边带,此时  $\lambda_3$  和  $\lambda_4$  的功率为

-17 dBm,它们的一阶边带功率为-28 dBm,如图 7(a)所示。正是这一调制过程,获得了中频载波信号,即 $\lambda_3$ 的一阶边带和 $\lambda_4$ 之间的频率间隔正好是中频大小(约 2.5 GHz)。之后,将调制过的 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ 通过带宽为 0.2 nm 的光窄带滤波器,从而获得了

中频光载波信号并且是一个单边带的光载波信号,如图 7(b)所示。此光载波信号再次传回中心站后, $\lambda_3$ 的一阶边带和 $\lambda_4$ 的功率分别为-37 dBm 和-26 dBm,被低速探测器探测可得到中频电信号(约 2.5 GHz)。

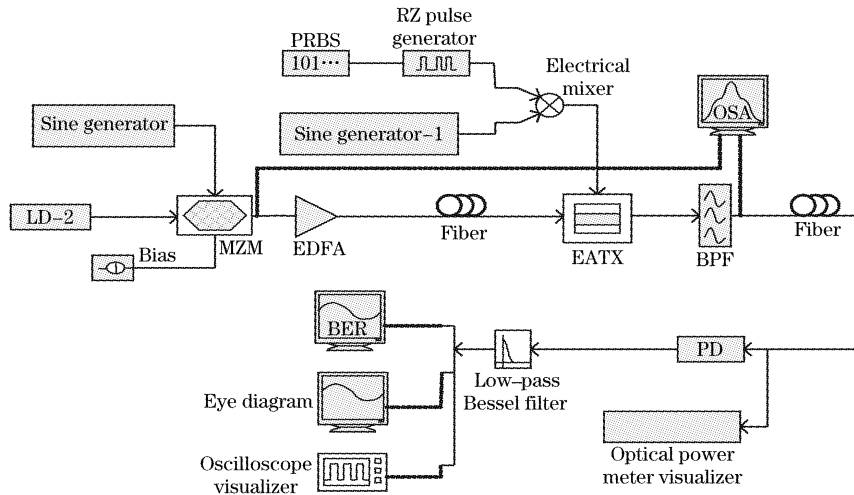


图 6 光纤无线通信系统上行链路仿真装置图

Fig. 6 Simulation setup of uplink of radio over fiber system

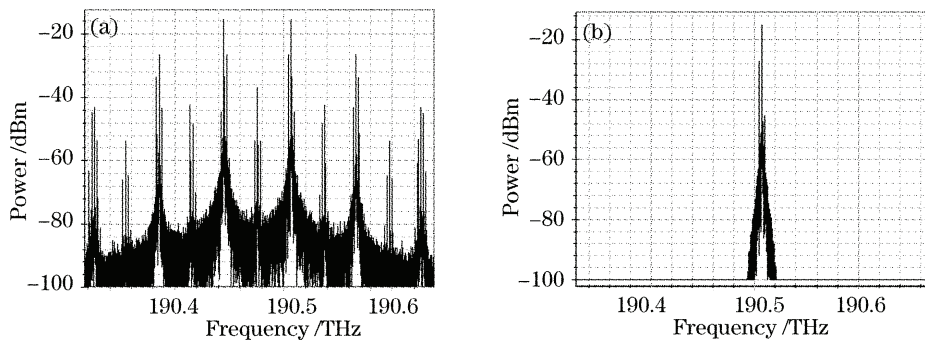


图 7 上行链路。(a)被双波长调制后的光信号的光谱图,(b)通过光窄带滤波器之后的光谱图

Fig. 7 Uplink. (a) Spectrogram of optical signal after dual-wavelength modulation, (b) spectrogram of signal after optical narrowband filter

若将 500 Mb/s 的伪随机归零信号加载到 59.5 GHz 的毫米波上,可以在系统中得到不同阶段

的归零信号比特流图,分别如图 8(a)、图 8(b)所示,这里同样只列举了前 20 位比特流。它在中心站接

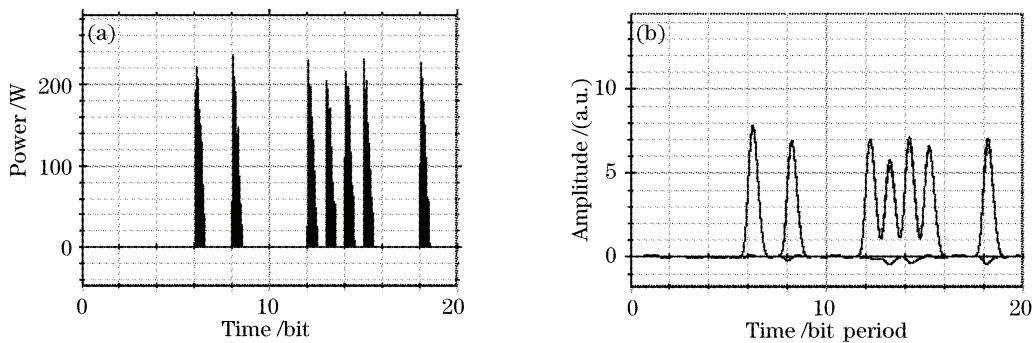


图 8 上行链路 500 Mb/s 归零比特流图。(a) 基站中双波长调制后的比特流,(b)中心站解调后的比特流

Fig. 8 Uplink 500 Mb/s RZ bit stream. (a) After dual-wavelength modulation in base station, (b) after demodulation in central station

收解调的信号眼图如图 9(a)所示。经过 80 km 的光纤传输,所测得的误码率与接收功率之间的关系如图 9(b)所示,可见在接受功率为 $-49.8$  dBm 时,误码率达到 $10^{-9}$ 。仿真中,在没有经过光纤传输时,测得接受功率为 $-46$  dBm 时,误码率达到 $10^{-9}$ 。也就

是说,80 km 的光纤传输引入了 3.8 dBm 的功率代价。另外,下行链路的最小接受功率要高于上行链路最小接受功率,这主要是由电吸收收发/混频器中下行链路数据接收到上行信号的信道间串扰引起的。

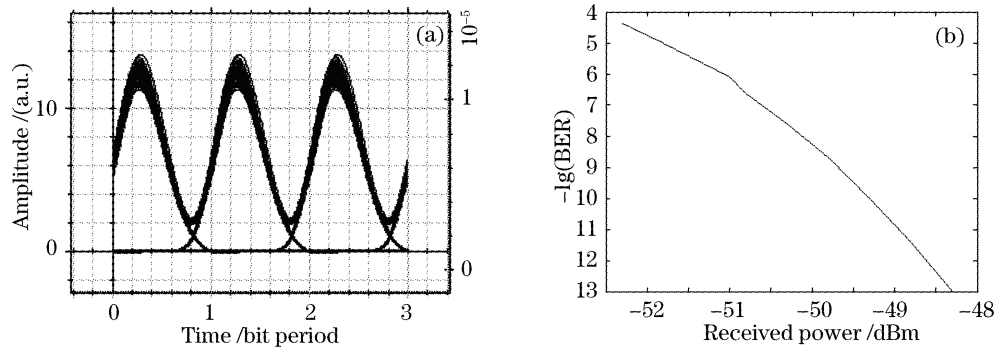


图 9 (a)信号解调后的眼图, (b)测量的误码率随接收功率的变化曲线图

Fig. 9 (a) Eye diagram after demodulation, (b) measured BER against received optical power

## 5 结 论

设计了一个全双工 60 GHz 的光纤无线通信系统,此系统利用 60 GHz 频带的电吸收收发器和双光源外差拍频的方法分别在下行和上行链路实现单波长和双波长调制,实现了基站探测,调制以及射频的上/下变频的功能,从而实现了简单廉价的基站设计,克服了光纤链路色散的影响。仿真试验中完成了 60 GHz 频带下行链路 2 Gb/s 和上行链路 500 Mb/s 伪随机归零数据信号的传输。

## 参 考 文 献

- Ye Qing, Liu Feng, Qu Ronghui *et al.*. Fiber-communication project of millimeter-wave subcarrier based on fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1464~1468  
叶青,刘峰,瞿荣辉等.一种基于光纤光栅的毫米波副载波光纤通信方案[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1464~1468
- Xiupu Zhang, Baozhu Liu, Jianping Yao *et al.*. A novel millimeter-wave-band radio-over-fiber system with dense wavelength-division multiplexing bus architecture [J]. *Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2006, **54**(2): 929~937
- Y. L. Guennec, G. Maur, J. Yao *et al.*. New optical microwave up-conversion solution in radio-over-fiber networks for 60-GHz wireless applications[J]. *Lightwave Technol.*, 2006, **24**(3): 1277~1282
- Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(4): 481~488
- 方祖捷,叶青,刘峰等.毫米波副载波光纤通信技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 481~488
- Qing Ye, Ronghui Qu, Zujie Fang. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 8~10
- J. Yu, Z. Jia, T. Wang *et al.*. A novel radio-over-fiber configuration using optical phase modulator to generate an optical mm-wave and centralized lightwave for uplink connection [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(3): 140~142
- D. S. Shin, G. L. Li, C. K. Sun *et al.*. Optoelectronic RF signal mixing using an electroabsorption waveguide as an integrated photodetector/mixer [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(2): 193~195
- K. Hagedorn, R. Gindera, A. Stohr *et al.*. Heterogeneous wireless/wireline optical access networks with R-EAT as backend component [C]. *Proc. SPIE, Microwave and Terahertz Photonics*, 2004, **5466**: 27~33
- S. Hur, H. Jang, Y. Kim *et al.*. Performance margins of passive pico-cell systems with an electroabsorption modulator using radio-over-fiber techniques [C]. *Microwave Photonics*, 2005, *MWP 2005, International Topical Meeting*, 2005. 257~260
- T. Kuri, K. Kitayama, Y. Takahashi. 60-GHz-band full-duplex radio-on-fiber system using two-RF-port electroabsorption transceiver[J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(4): 419~421
- T. Taniguchi, N. Sakurai, K. Kumozaki *et al.*. Full-duplex 1 Gb/s 60 GHz-band radio-on-fiber access based on loop-back optical heterodyne technique [C]. *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference*, 2006. 5~10
- J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann *et al.*. Optical generation of very narrow linewidth millimeter wave signals[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(25): 2309~2311