

文章编号: 0258-7025(2009)11-2945-07

# 新型双均匀光栅结构产生毫米波的光载无线通信下行链路

吴树强 裴 丽 宁提纲 祁春慧 郭 兰

(北京交通大学光波技术研究所, 全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 提出了一种全新的基于双均匀光纤光栅(UFBG)结构的毫米波产生方法, 主要利用光纤光栅的滤波特性在中心站取得两束频率间隔为所需毫米波的光波, 经差频后得到毫米波, 并将其作为副载波。分析了经过 0 km, 10 km, 30 km, 40 km 光纤传输后在基站接收端经过光电检测和相干解调滤波后得到的眼图。研究表明, 该方法应用于光载无线通信(ROF)下行通信链路可获得比较理想的传输效果, 且相同情况下, 减小毫米波发生器中带通滤波器的带宽可以进一步改善系统的传输效果。

**关键词** 信号处理; 光载无线通信; 毫米波副载波; 光外差; 光纤光栅滤波器

**中图分类号** TN012; TN929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2945

## Radio Over Fiber Downlink System Based on a New Double-Uniform Fiber Bragg Grating Millimeter-Wave Generator

Wu Shuqiang Pei Li Ning Tigang Qi Chunhui Guo Lan

(*Institute of Lightwave Technology, State Key Laboratory of All-Optical Network and Modern-Communication network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

**Abstract** A new method is proposed to realize millimeter-wave sub-carrier generation at central station by using a double-uniform fiber Bragg grating filter (UFBG) scheme. Two optical waves with a spectrum of a millimeter-wave sub-carrier distance heterodyne after detector at base station then we can get the wanted millimeter-wave signal. The advantages of this new method of millimeter-wave sub-carrier generation are analyzed by designing a radio over fiber (ROF) downlink system, and the eye diagrams after detection and interference demodulation in 0 km, 10 km, 30 km, 40 km transmission distance are also analyzed. Moreover, performance of this radio over fiber downlink system could be improved by reducing the bandwidth of band-pass filter of millimeter-wave sub-carrier generator. The proposed scheme may be taken as one of the candidates for the next generation high-speed and large-capability radio over fiber system.

**Key words** signal processing; radio over fiber; millimeter-wave sub-carrier; optical heterodyne; optical fiber grating filter

## 1 引 言

目前移动通信的发展极为迅猛。中国移动通信用户已接近 4 亿, 随着时分同步码分多址(TD-SCDMA)技术的实用化, 移动无线接入正向着宽带宽、高速接入的方向发展。然而, 随着移动通信的迅

猛发展, 无线频谱资源缺乏的问题也越来越突出。为了解决以上频率资源匮乏等问题, 提出了光载无线通信(ROF)技术。光纤通信所固有的超宽通信带宽正是移动通信所奇缺的, 该技术正是利用了光纤通信的宽带宽和低损耗等优势来弥补移动通信空

收稿日期: 2008-10-14; 收到修改稿日期: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(60771008, 60837002)、北京市自然科学基金(4082024)、留学回国人员基金(教外 2008890)和教育部博士点基金(200800040002)资助课题。

作者简介: 吴树强(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤无线电系统毫米波发生器方面的研究。

E-mail: treeheni@163.com

导师简介: 裴 丽(1970—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信、光器件、光网络关键技术等方面的研究。

E-mail: lipei@bjtu.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420540)

中接口受限的不足,从而达到为用户提供高速宽带业务服务的目的。

在目前 ROF 系统中常用的几种毫米波产生方案中,光外差技术的产生机制简单<sup>[1]</sup>,同时由于射频信号的频率由两个激光器输出光波的频率差决定,因而频率范围较宽并且便于调整。但由于外差的两束光来自不同的激光器,它们之间的相位关系难于控制,在接收端得到的射频信号总是伴随着严重的相位噪声。目前有几种减少相位噪声技术,比如光注入锁相环技术(OIPLL)<sup>[2]</sup>、光学锁相环技术(OPLL)和光注入锁定技术(OIL)等,都需要复杂的设备和系统结构来实现。要采用这些方法来解决相位噪声的问题对于降低无线通信网络基站建设成本以及 ROF 系统技术的应用来说是很不利的。现在的主要任务就是寻找一种方法,最大限度地减小或者避免相位噪声对于 ROF 系统毫米波产生的影响并能够大大降低无线通信网络的基站建设成本。

光外差方法的主要目的是要产生两束用于差频的光波,目前最简单的方法是采用两个均匀光纤布拉格光栅(UFBG)滤波器将一个激光器输出的光波分为两束,其中之一携带数据信息,经传输后在接收端差频。由于差频的两束光来自同一激光器,相位噪声较小,产生的射频信号带宽较窄。但是在对其实验方案研究后发现,因为光纤光栅的工艺局限,难于制造出反射带宽足够小的光栅滤波器,以获得高频谱纯度的反射波用于基带信号的调制和探测器处的差频。关键是在接收端,因为基带信号是调制在一个光栅的反射波上然后与另一个光栅的反射波经 3 dB 耦合器耦合后,再由光纤传输到基站接收端差频。而在差频时,由于两束反射波都具有一定的带宽,都不是单一频率,所以在基站接收端经过光电探测器差频后输出的射频信号也不是单一的,而是非常复杂的。除上述局限外,要使激光器到两个光栅的距离完全相等是极难的,甚至是不可实现的。因此由两个光纤布拉格光栅(FBG)得到的两束反射波相位就很难保持完全一致,这就相当于人为地引入了相位噪声。在传输过程中还会因为各种因素如色散的影响等使相位噪声累积,这也会导致接收端因相位噪声过大而无法恢复基带信号。在基站接收端,经光电探测得到的射频信号因掺杂了太多的无用复杂频率分量而导致无法恢复基带信号。即使两个光栅的反射谱带宽减小到 1 GHz,在接收端仍然无法恢复基带信号。

鉴于以上方案的问题,本文提出一种双光栅结构

的改进方案。其基本思想就是利用光域产生高频毫米波的方法来代替 ROF 系统中的高频信号源振荡器。其中两个光纤光栅滤波器的作用是选频,以获得两束用于差频的光波,在经光电探测器实现光电转换后获得一系列高频的毫米波信号,经过滤波器滤波后获得 ROF 系统需要的毫米波信号。本文对应用该改进方案的 ROF 下行链路通信系统进行了分析,由模拟计算的结果看,得到了比较好的传输效果。

## 2 基本工作原理

### 2.1 光外差方法

光外差方法的原理是指传输两个频率差等于所需要的毫米波频率的窄线宽光波,其中之一携带了需要传输信息的基带数据。在基站通过外差产生毫米波载波信号<sup>[3]</sup>。在传输光纤中两光波的光谱都很窄,色散效应很小。因此,光外差方法既可以克服光纤中的色散问题,又可以简化基站的结构和成本,成为近年来 ROF 发射机研究工作的热点。两个光信号的电场强度分别可以描述为

$$E_1(t) = E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2). \quad (2)$$

它们经过耦合器耦合调制后进入基站的光电探测器,根据探测器的平方率特性,输出的光电流可表示为

$$I = \alpha [E_1(t) + E_2(t)]^2. \quad (3)$$

把(1)式和(2)式代入(3)式,展开可得

$$I = \alpha E_1^2 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + E_1 E_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + E_1 E_2 \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (\varphi_1 + \varphi_2)], \quad (4)$$

式中  $\omega_1, \omega_2$  和  $(\omega_1 + \omega_2)$  频率成分远远高于光电探测器的探测带宽,探测器探测不到,所以只有直流分量  $E_1^2, E_2^2$  和交流分量  $(\omega_1 - \omega_2)$  会被探测到,所产生的毫米波频率分量就是输出光电流对应的交流分量。

若在光外差法中采用两个半导体激光器(LD),把基带信号直接调制在其中一个激光器产生的光波上,与另一个激光器产生的光波耦合进光纤传输,原理如图 1 所示。其中 LD1 和 LD2 为两个激光器,

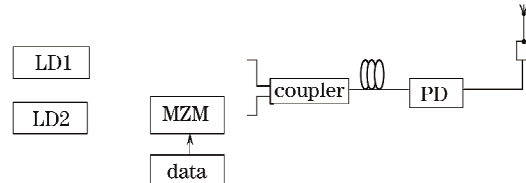


图 1 光外差方案原理图

Fig. 1 Structural diagram of optical heterodyne

MZM 为马赫-曾德尔调制器, PD 为光探测器。

其过程<sup>[4,5]</sup>为两个光信号的电场强度分别表示为

$$E_1(t) = m(t)E_{01} \exp[j(\omega_1 t - \Phi_1)], \quad (5)$$

$$E_2(t) = E_{02} \exp[j(\omega_2 t - \Phi_2)], \quad (6)$$

(5)式中的  $m(t)$  为幅度调制的基带信号;  $E_{01}, E_{02}$  分别为两束光波的电场强度的振幅;  $\omega_1, \omega_2$  和  $\Phi_1, \Phi_2$  分别为两束光波的角频率和初始相位。经过光纤传输后在探测器 PD 处经光电转换为毫米波信号, 相应的光电流  $i(t)$  表示为

$$i(t) \propto m(t - \tau_R) \cos[(\omega_2 - \omega_1)t - (\Phi_2 - \Phi_1)], \quad (7)$$

(7)式中的  $\tau_R$  表示由光纤色散引入的时延, 它对数据信号并不引入误差。值得注意的是(7)式中的  $(\Phi_2 - \Phi_1)$ , 因为采用的是两个相互独立的半导体激光器, 初始相位不相关, 所以产生的毫米波信号带宽很宽, 同时伴随着随机的相位噪声  $(\Phi_2 - \Phi_1)$ ; 另外, 传输过程中外界因素的影响也会对光纤中传输的两束光相位产生影响, 使得相位噪声累积变得更加复杂, 这将对系统性能造成很大的影响, 因此必须消除。

图 2 是使用图 1 方案时分别传输 30 km, 40 km 后在接收端得到的眼图。比较图 2(a), (b) 与图 10 (c), (d) 可以直观地看出随机的相位噪声  $(\Phi_2 - \Phi_1)$  和传输过程中外界因素的影响使得相位噪声累积对系统的影响。

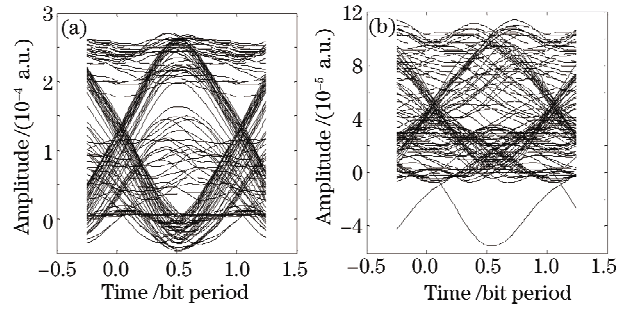


图 2 使用图 1 方案在基站接收端得到的眼图  
(a) 30 km; (b) 40 km

Fig. 2 Eye diagram after demodulation in different transmission distance in structural Fig. 1. (a) Transmission distance: 30 km; (b) transmission distance: 40 km

## 2.2 基于双均匀光栅结构的毫米波发生器

基于双均匀光栅结构的毫米波发生器原理如图 3 所示。其中 LD 为激光器, coupler1 和 coupler2 为耦合器, circulator1 和 circulator2 为环形器, FBG1 和 FBG2 为光纤布拉格光栅, band-pass filter 为带通滤波器。从连续波激光器到带通滤波器的这一部分起到了产生高频信号源的本地振荡器的作用。激光器发出的连续波经过 coupler1 分成均匀的两路, 通过光纤环形器入射到两个中心频率差为 60 GHz 的光纤布拉格光栅, 并被其反射回到环形器, 从环形器的另一个端口输出两束频率差为 60 GHz 高功率、高谱纯度和稳定度的光波。在 coupler2 处耦合输出到光电检测器。光纤光栅<sup>[6]</sup>反射谱表示为

$$r = \frac{-\kappa \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}{\zeta^+ \sinh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2} + i \sqrt{\kappa^2 - \zeta^{+2}} \cosh \sqrt{(\kappa L)^2 - (\zeta^+ L)^2}}, \quad (8)$$

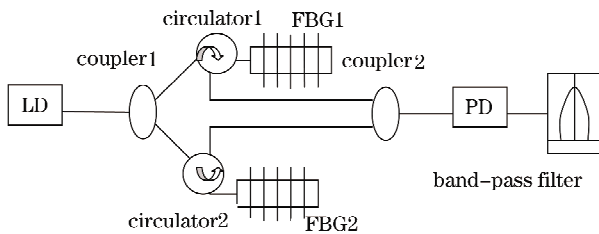


图 3 基于双均匀光栅选频的毫米波产生原理图

Fig. 3 Millimeter-wave generation based on double uniform filter Bragg grating filters scheme

由(8)式可发现均匀光栅的最大反射率为  $R_{\max} = \tanh^2(\kappa L)$ , 这个最大值发生在直流自耦合系数  $\zeta^+ = 0$  时, 即在波长  $\lambda_{\max}$  处。其中

$$\lambda_{\max} = \left(1 + \frac{\delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}\right) \lambda_d. \quad (9)$$

光纤光栅的反射谱带宽定义为谐振波长两侧反射率第一次为零的间距, 由(8)式可得反射谱带宽

$$\text{FWHM} = \frac{s \delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_d}{s \delta n_{\text{eff}} L}\right)^2}. \quad (10)$$

其中  $\kappa$  为交流耦合因子,  $\lambda_d$  为初始谐振波长,  $L$  为光栅长度,  $n_{\text{eff}}$  和  $\delta n_{\text{eff}}$  分别为有效折射率和折射率变化量,  $s$  为折射率调制的条纹可见度。

在本文中, 光源采用连续波激光器, 输出光波中心波长为 1552.52 nm, 线宽 0.1 THz, 功率 1 mW。FBG1 中心波长取  $\lambda_1 = 1552.52$  nm, 对应频率  $f_1 = 193.1$  THz。要产生的毫米波频率为 60 GHz, 由  $c = \lambda f$  可得 FBG2 中心波长  $\lambda_2 = 1553.01$  nm。反射谱带宽都取 15 GHz (在本方案中, 光纤光栅滤波器

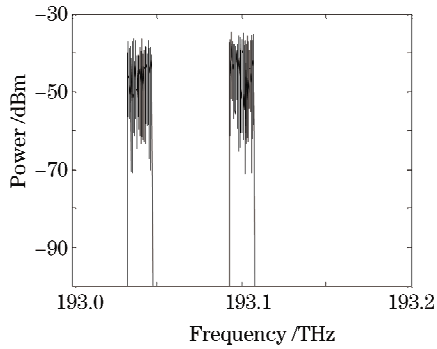


图 4 经过 coupler2 耦合后的输出波形

Fig. 4 Output pulse for coupler2

的反射谱带宽还可以更宽)。在这里,光纤光栅滤波器的频率响应采用理想的矩形模型。由激光器输出的光信号经过第一个 coupler1 分为两束(分光比 50:50)。分束后的光波经过环形器的 1 口进入,由 2 口进入 FBG1,FBG2,在经过中心波长不同的 FBG1 和 FBG2 的反射之后,反射波由环形器 3 口输出。两束反射光在 coupler2 处混频进入光电检测器。图 4 为经过 coupler2 混频后的输出波形。耦合波输入 PIN 光电检测器,暗电流为 10 nA,响应度为 1 A/W。

$$I = \alpha \left\{ \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + E_1 E_2 \cos[\omega_{RF} t + (\varphi_1 - \varphi_2)] \right\}. \quad (11)$$

其中  $\omega_{RF} = \omega_1 - \omega_2$ 。

经过带通滤波器滤除直流分量和不需要的 RF 分量,得到毫米波信号可表示为

$$I = \alpha E_1 E_2 \cos[\omega_{RF} t + (\varphi_1 - \varphi_2)]. \quad (12)$$

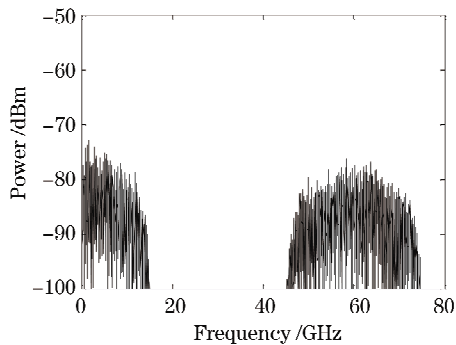


图 5 经过 PIN 光电探测器输出的信号波形

Fig. 5 Output pulse for PIN detector

经过 PIN 光电探测器输出的信号波形如图 5 所示。从图 5 可以看出,经过 PIN 光电检测器输出的射频信号频谱包括 0~15 GHz 和 46~74 GHz 两部分。这是因为输入光电探测器的耦合波来自两个均匀光栅滤波的反射波,而其反射带宽为 15 GHz,因为耦合波并不是两个单一频率波长的耦合,而是两个频率段的耦合波。由前面提到的光外差技术,

因为采用的是连续波激光器,激光器输出谱线比较宽,相干性也就比较差,所以两束光栅的反射波在 coupler2 耦合混频后输入探测器,在 PIN 探测器处同时存在直接探测和外差探测 2 种探测方式。直接探测过程简单,产生了低频段成分。这两个频段光波的各个同相频率成分在光电探测器处发生差频<sup>[7]</sup>,两个频段之间的差频产生了 46~74 GHz 的高频部分。因为连续波激光器的相干性比较差,所以产生的射频信号的频谱纯度很差,这就需要在光电探测器后加一个滤波器,滤出所需要的毫米波信号。在本方案中,采用的是频率为 60 GHz,带宽为 10 MHz 的四阶贝塞耳带通滤波器模型。带通滤波器滤出的 60 GHz 毫米波频谱如图 6 所示。

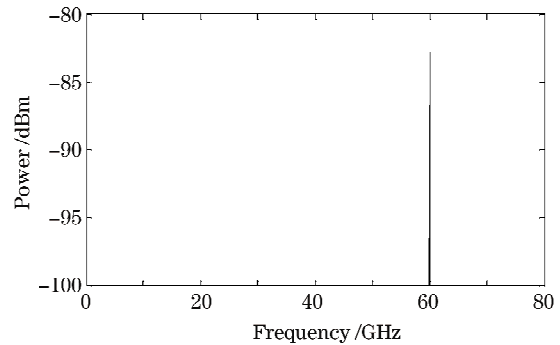


图 6 带通滤波器滤出的 60 GHz 毫米波频谱

Fig. 6 Spectrum of the output 60 GHz millimeter-wave for bandpass filter

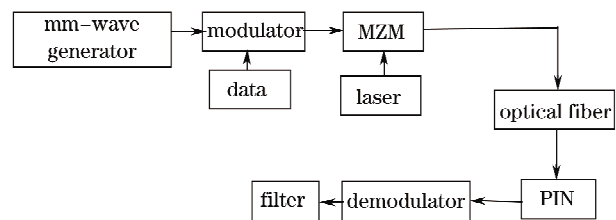


图 7 基于双均匀光栅结构毫米波产生方法的光载无线通信下行链路原理框图

Fig. 7 Downlink of ROF system based on double uniform FBG filters scheme generator

此改进方案不仅放宽了对光栅滤波器的反射带宽的要求,只要求两个光栅滤波器能滤出用于差频产生需要毫米波的两束光波即可,而且还避免了由于相位噪声的引入而导致接收端无法恢复基带信号的问题,从而大大延长了传输距离。此外,因为采用了两个光栅的结构还避免了采用摩尔光栅方案<sup>[8]</sup>中摩尔光栅难于制备的问题;同时,与光外差方法产生毫米副载波相比,此种方案可以获得相对较低的相位噪声,因为把外差产生毫米波副载波和基带数据调制分离,简化了系统结构,预期成本也很低。

### 2.3 基于双均匀光栅结构毫米波产生方法的 ROF 下行链路

基于本文提出的双光栅结构毫米波产生方案,建立 ROF 通信系统下行链路模型<sup>[9]</sup>如图 7 所示。基带信号首先调制到差频产生的毫米波上<sup>[10]</sup>,然后经过光电调制器调制到光载波上进入光纤传输。光纤把调制信号传输到基站接收端,经过光电探测器探测出的是载有基带信号的毫米波副载波信号,经过一次相干解调后得到的是带有噪声的幅移键控(ASK)基带信号,最后加一个滤波器滤除噪声,得到基带数据信号。在本方案的下行链路模型中,为分析方便略去了通过基站天线发射到用户端的无线传输部分,把用户端等效在基站中。包括探测器、功放、天线、解调、滤波等这一部分是在基站完成的<sup>[11]</sup>。

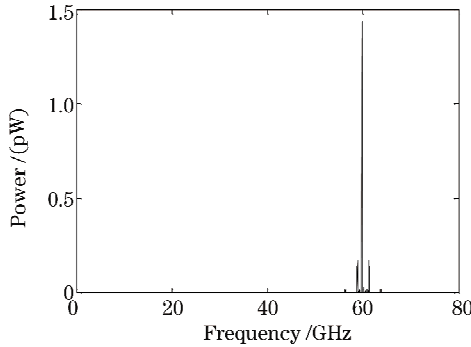


图 8 第 1 次调制后的频谱

Fig. 8 Spectrum for the first modulation

ROF 系统其实是一个副载波通信系统,其中在发送端包含两次调制过程,第 1 次是把基带信号调制到副载波上,第 2 次是把调制有基带信号的副载波调制到光载波上。在本结构中,第 1 次调制的基带信号为

$$m(t) = \sum_k a_k g(t - kT_b), \quad (13)$$

式中  $a_k$  为二进符号取 1 或者 0;  $g(\cdot)$  为单极性不归零波形;  $T_b$  为二元序列码元间隔。由(13)式,载波表示为  $A_0 \cos(\omega_{RF}t + \theta_0)$ , 其中  $A_0 = \alpha E_1 E_2$ ,  $\theta_0 = \varphi_1 - \varphi_2$ 。经过乘法器后实现 ASK 调制,得到的 ASK 信号为

$$\begin{aligned} S_{ASK}(t) &= m(t)c(t) = m(t)A_0 \cos(\omega_{RF}t + \theta_0) = \\ &A_0 \sum_k a_k g(t - kT_b) \cos(\omega_{RF}t + \theta_0) \\ &kT_b \leq t \leq (k+1)T_b, \end{aligned} \quad (14)$$

(14)式对应的频谱为

$$S_{ASK}(f) = \frac{A_0^2}{16} T_b \left[ \text{Sa}^2(f + f_{RF}) \frac{T_0}{2} + \right.$$

$$\left. \delta(f - f_{RF}) \right], \quad (15)$$

在第 2 次调制中,调制后输出的光信号表示为

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cos[\Delta\theta(t)] \exp[j\Delta\varphi(t)], \quad (16)$$

其中  $\Delta\varphi(t)$  为调制信号的相位变化。光载波为  $E_{in}(t)$ ,  $\Delta\theta(t)$  是通过 M-Z 调制器两臂信号的相位差,

$$\Delta\theta(t) = \frac{\pi}{2} \{0.5 - ER[S_{ASK}(t) - 0.5]\}, \quad (17)$$

$$ER = 1 - \frac{\pi}{4} \cdot \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{K_{\text{extrat}}}}\right), K_{\text{extrat}}$$

是调制器消光比,取 30 dB。经过第 1 次调制后的频谱如图 8 所示,毫米波副载波的频率为 60 GHz。然后再使用马赫-曾德尔强度调制器把这个副载波调制到光载波上,得到的频谱如图 9 所示。以上两次调制都是在中心站完成的。

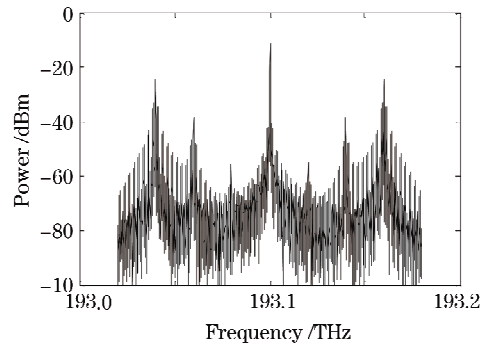


图 9 副载波调制到光载波上的光谱

Fig. 9 Spectrogram of carrier after second modulation

### 3 性能分析

在中心站调制过程完成后,已调光载波进入光纤进行传输。图 10 中的(a),(b),(c),(d)分别是在经过 0 km, 10 km, 30 km, 40 km 光纤传输后在基站接收端经过光电检测和相干解调滤波后得到的眼图。从眼图中可以看出,该方案在传输毫米波副载波信号 30 km 后还可以保持相当不错的眼图。在本方案中,接收端没有采取去除相位噪声和码元走离的措施,仍然得到了比较理想的传输效果,充分证明了本方案的合理性。

值得注意的是,ROF 系统方案的提出,主要是解决无线频谱资源不足以及降低基站建设成本等问题,而上述问题则主要出现在无线用户集中的大城市中。所以在大城市中应用 ROF 时,根据实际情况,并不需要光纤承担远距离传输的任务,而是只需要 ROF 基

站覆盖人群密集区域,提供高速无线接入即可。所以本文提出的毫米波发生器的改进方案和该改进方案用于 ROF 下行链路结构是合理适用的。

在本方案中,因为采用的是一个宽谱线的连续波激光器,经两个光纤光栅选频后得到的两束光波之间相位不会保证完全一致,存在有相位差。但是当激光器开机工作之后,在探测器处得到的毫米波

信号是稳定的,这一毫米波信号是加载到光载波上传输,并不受传输过程中外界因素的影响,所以接收端恢复的毫米波信号相位也是稳定的。根据相干解调的原理<sup>[12]</sup>,接收端从接收信号中提取离散的载波分量,使得接收信号与恢复载波同步。本方案的毫米波发生器起到了与一般通信系统电域信号源一样的作用。

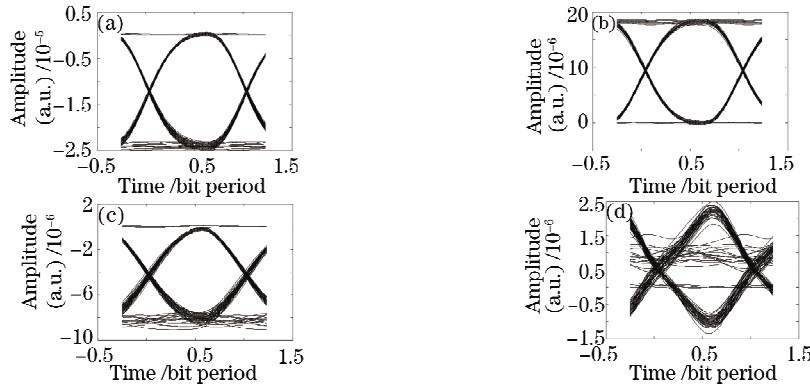


图 10 在基站接收端得到的眼图。(a) 0 km;(b)10 km;(c) 30 km;(d) 40 km

Fig. 10 Eye diagrams after demodulation in different transmission distance at basestation. (a) Transmission distance,0 km;(b) transmission distance,10 km;(c) transmission distance,30 km;(d) transmission distance 40 km

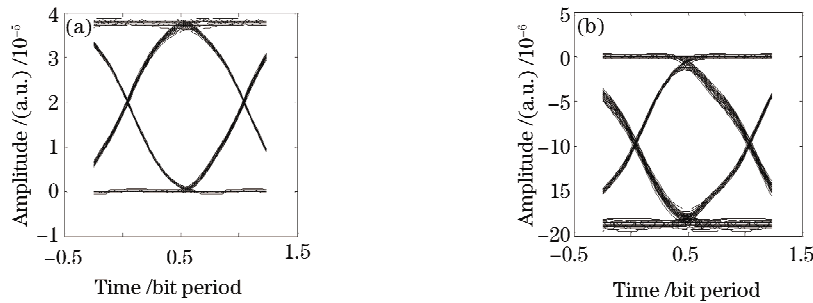


图 11 反射波不同相时在光栅上得到的眼图。(a) 30 km;(b) 40 km

Fig. 11 Eye diagrams after demodulation in different transmission distance when the two reflected waves are out-of-phase. (a) Transmission distance,30 km;(b) transmission distance,40 km

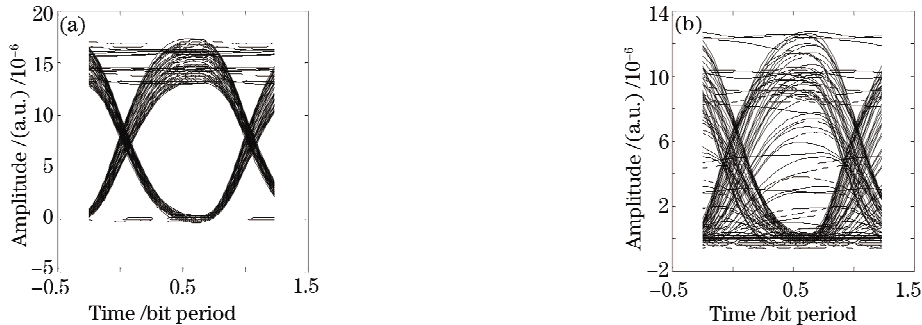


图 12 不同滤波器带宽传输 10 km 后在基站端得到的眼图。(a)滤波器带宽 20 MHz;(b)滤波器带宽 50 MHz

Fig. 12 Eye diagrams after demodulation with different band-pass filter bandwidth of millimeter-wave generator, transmission distance 10 km. (a) Band-pass filter bandwidth,20 MHz;(b) band-pass filter bandwidth,50 MHz

比较图 10 中的(c),(d)与图 11 的(a),(b)的眼图可以看出,在相同传输距离的情况下,两个光纤光栅选频得到的光波的相位是否一致对于整个通信系统的影响并不大,也就是说采用本方案把毫米波的发生与基带信号的调制过程分离一定程度地避免了相位噪声对整个系统的影响。

此外值得注意的是,在本下行链路方案中双均匀光纤光栅结构起到的是为第 1 次调制提供毫米波副载波的作用,那么由滤波器滤出的毫米波频谱纯度就成了本方案成功与否的一个关键因素。在本下行链路结构中,由滤波器滤出的毫米波频谱纯度取决于带通滤波器带宽。当取带通滤波器带宽为 20 MHz 和 50 MHz 时,同样传输 10 km 后在基站端得到的眼图分别如图 12(a),(b)所示。在同样传输 10 km 的情况下比较图 11 和图 12,可以看出在相同情况下,系统的传输效果随着毫米波发生器处的带通滤波器的带宽增大而恶化。

## 4 结 论

介绍了光外差技术,总结了双光栅选频结构用于产生毫米波在实际应用上的缺陷,并提出了改进方案。目前,基于射频光纤传输的商用光纤无线系统已经有所发展,然而它们仅仅工作在低频段,例如蜂窝和个人通信系统。这些系统工作于价格低廉的多模激光器或者单模激光器<sup>[13,14]</sup>(依赖于不同的应用),并且采用直接调制的方案。所以,要使 ROF 系统用于高频段的无线信号传输还需要合适的高速光调制技术、高速光传输技术以及高速的光探测技术等,这些都是目前 ROF 系统中研究的重点和热点。

## 参 考 文 献

- 1 Yu Xianbin. Study on the application of fiber Bragg grating in microwave signal processing[D]. Hangzhou, Zhejiang University, 2005. 68~76  
余显斌. 光纤光栅在微波信号处理中的应用研究[D]. 浙江:浙江大学, 2005. 68~76
- 2 L. A. Johansson, A. J. Seeds. Generation and transmission of millimeter-wave data-modulated optical signals using an optical injection phase-lock loop[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, 21(2): 511~520
- 3 Xiupu Zhang, Baozhu Liu, Jianping Yao *et al.*. A millimeter-wave-band radio-over-fiber system with dense wavelength-division multiplexing bus architecture [J]. *Trans. Microwave Theory Techn.*, 2006, 54(2): 929~937
- 4 Chen Xue, C. R. Lima. Generation of a 60 GHz signal in fiber/mm-wave systems using optical heterodyne [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 1995, 18(4): 67~70  
陈 雪, C. R. Lima. 光纤/毫米波系统中 60 GHz 信号的光外差产生 [J]. 北京邮电大学学报, 1995, 18(4): 67~70
- 5 Fang Zujie, Ye Qing, Liu Feng *et al.*. Progress of millimeter wave subcarrier optical fiber communication technologies [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, 33(4): 481~488  
方祖捷, 叶 青, 刘 峰等. 毫米波副载波光通信技术的研究进展. [J]. 中国激光, 2006, 33(4): 481~488
- 6 Qu Ronghui, Ding Hao, Zhao Hao *et al.*. Effects of grating substructures on the spectral characteristics of fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(5): 567~572  
瞿荣辉, 丁 浩, 赵 浩等. 光栅子结构对光纤光栅特性的影响 [J]. 光学学报, 1998, 18(5): 567~572
- 7 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
- 8 Zhao Ling, Qu Ronghui, Li Lin *et al.*. Apodization of fiber Bragg grating based on Moiré effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, 30(12): 1103~1106  
赵 岭, 瞿荣辉, 李 琳等. 基于莫尔效应的光纤光栅变迹的研究 [J]. 中国激光, 2003, 30(12): 1103~1106
- 9 Zhu Meiwei, Lin Rujian, Ye Jiajun *et al.*. Novel millimeter-wave radio-over-fiber system using dual-electrode Mach-Zehnder modulator for millimeter-wave generation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(4): 126~130  
朱美伟, 林如俭, 叶家骏等. 使用双电极 Mach-Zehnder 调制器产生毫米波的新型 mm-ROF 系统 [J]. 光电工程, 2008, 35(4): 126~130
- 10 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通信方案 [J]. 光学学报, 2006, 26(10): 1464~1468
- 11 Lin Chen, Hong Wen, Shuangchun Wen. A radio-over-fiber system with a novel scheme for millimeter-wave generation and wavelength reuse for up-link connection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(19): 2056~2058
- 12 Zhou Jiongpian, Pang Qinhu, Xu Dawo *et al.*. Communications Principle [M]. Beijing: Press of Beijing University of Posts & Telecommunications, 2005. 200~202  
周炯槃, 庞沁华, 续大我等. 通信原理 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005. 200~202
- 13 Yu Li, Song Yuejiang, Zhang Xuping. Single-longitudinal-mode and wavelength-switchable fiber laser with linear cavity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(10): 1455~1458  
俞 力, 宋跃江, 张旭苹. 单纵模、波长可开关的线性腔光纤激光器 [J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1455~1458
- 14 Zhang Xin, Chen Wei, Liu Yu *et al.*. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, 34(1): 50~54  
张 欣, 陈 伟, 刘 宇等. 单纵模多环形腔掺铒光纤激光器及其稳定性 [J]. 中国激光, 2007, 34(1): 50~54