

基于新型偏振稳定毫米波发生器的 光载无线通信下行链路*

刘观辉 裴丽[†] 宁提纲 高嵩 李晶 张义军

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

(2011年6月27日收到; 2011年8月21日收到修改稿)

为了降低 ROF 系统成本, 增加传输距离, 提高系统性能, 提出了一种基于新型偏振稳定毫米波发生器的光载无线通信下行链路传输系统. 与传统 ROF 系统相比, 该系统利用保偏光纤光栅选频产生的两个偏振稳定激光信号拍频产生毫米波, 易于实现并降低了功率噪声对系统的影响. 仿真分析了该系统中环形激光器强度、谱线宽度、保偏光纤光栅反射谱特性对毫米波性能的影响; 分析了系统中保偏光纤光栅的群时延、长度、色散, 双波长激光信号脉冲包络宽度、啁啾系数对毫米波频率的影响. 优化保偏光纤参数, 差频产生 60 GHz 的毫米波信号, 并分析该毫米波信号在 ROF 下行链路的传输性能, 结果表明该毫米波作为副载波调制到光波上从中心站传输 80 km 至基站后经天线发射至用户端, 解调仍然得到很好的眼图, 充分证明了本方案的优越性能.

关键词: 光纤无线通信系统, 毫米波, 保偏光纤, 光通信

PACS: 42.25.Ja, 42.30.Lr, 42.65.-k

1 引言

随着移动通信的迅猛发展, 现有无线频谱资源已无法满足日益增加的宽带无线业务的需求^[1,2], 为解决无线频谱资源匮乏的问题, 人们提出了光载无线通信 (radio over fiber, ROF) 技术. 该技术利用光纤实现毫米波副载波的传输, 既可解决毫米波在大气中传输距离短的问题, 又可实现大容量传输、高速接入的通信需求, 被认为是未来超宽带无线接入最有前景的技术之一, 近年来引起了人们广泛的关注. 毫米波发生器在 ROF 系统中具有本振源和发射源的作用, 是影响 ROF 系统性能的关键因素之一; 传统 ROF 系统中的光生毫米波方法有: 直接调制法、外部调制法、光外差方法; 其中光外差方法是一种相对简单、成本较低的技术. 光外差方法的原理是指两个频率差等于所需要毫米波频率的窄线宽光波在光电探测器中拍频产生毫米波信号, 拍频所需要的两个光波信号可以通过两个独立的半导体激光器产生^[3]; 但由于两个半导体激光器的初始相位不相关, 导致产生的毫米波信号带

宽很宽, 同时伴随着随机的相位噪声, 这将对系统性能造成很大影响. 近年来人们提出了光注入锁定法 (OIL)^[4]、光学锁相环法 (OPLL)^[5] 和光注入锁相环法 (OIPLL)^[6] 等技术以减少激光器随机相位噪声的影响, 这几种技术都需要复杂的设备和系统结构, 从经济成本来考虑, 我们希望找到既能减少相位噪声又能降低成本的技术. 本文提出了一种基于新型偏振稳定毫米波发生器的光载无线通信下行链路, 与传统 ROF 链路相比较, 该系统的毫米波发生器结构简单、紧凑, 成本低, 功耗小, 易于实现; 并且利用保偏光纤光栅选频产生的两个偏振稳定激光信号拍频产生毫米波, 并采用扰偏器确保了两个正交偏振态功率的一致性, 避免了光外差中初始相位不相关的缺点, 大大降低了功率噪声对系统性能的影响, 提高了系统传输性能.

2 基本原理

基于新型偏振稳定毫米波发生器的光载无线通信下行链路如图 1 所示. 该系统主要由中心

* 国家自然科学基金 (批准号: 60837002, 61177069) 和教育部博士点基金 (批准号: 200800040002) 资助的课题.

[†] E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

站 (central station, CS)、基站 (base station, BS) 和 用户端 (mobile station, MS) 组成. 新型偏振稳定毫米波发生器作为中心站的主要设备, 在系统中具有本振源和发射源的作用, 它主要由基于保偏光纤光栅 (PMFBG) 的环形激光器、扰偏器 (PS)、保偏光纤 (PMF) 和高速光电探测器 (PD) 组成. 其原理为: 环形激光器输出的偏振态正交的双波长激光信号进入扰偏器充分扰偏后, 经保偏光纤传输, 以确保双波长激光信号的功率一致, 最后, 在高速探测器中拍频产生毫米波信号; 通过改变加在保偏光纤光栅上侧向应力的大小和方向, 可有效控制两

激光信号的频率间隔, 即控制产生的毫米波频率. 在中心站基带信号首先调制到偏振稳定毫米波发生器产生的毫米波上, 然后通过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 调制到光波上进入光纤传输, 光纤将其传输到基站, 在基站出经过光电探测器光电转换解调出毫米波副载波信号, 然后经过天线发送到用户端, 用户端经过相干解调出带有噪声的 ASK 基带信号, 然后通过一个低通四阶贝塞尔滤波器滤出所要的基带信号. 为了分析方便, 我们假设在基站中光电转换出的毫米波副载波信号和 MS 接收到的毫米波信号完全相同 [7].

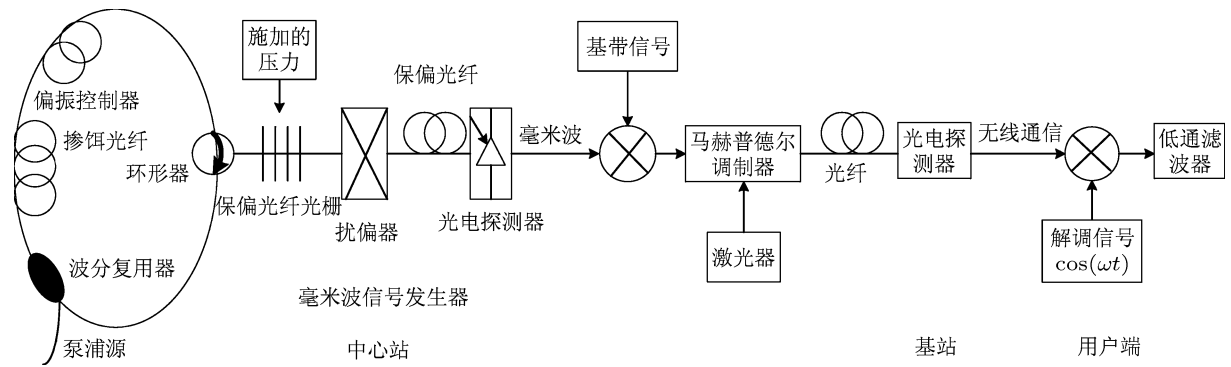


图 1 基于新型偏振稳定毫米波发生器的光载无线通信下行链路

设激光器输出的两个正交偏振的激光信号脉冲包络分别为

$$A'_x(z=0, t) = A_{0x} \exp\left(-\frac{(1+iC_1)t^2}{2T_1^2}\right), \quad (1)$$

$$A'_y(z=0, t) = A_{0y} \exp\left(-\frac{(1+iC_1)t^2}{2T_2^2}\right), \quad (2)$$

C_1, C_2 和 T_1, T_2 分别为两激光信号脉冲包络啁啾系数和宽度.

不考虑保偏光纤的衰减损耗的情况下, 保偏光纤中的耦合波非线性方程为 [8]

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} + \delta \frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} \\ = i\gamma(|A_x|^2 + \frac{2}{3}|A_y|^2)A_x, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_y}{\partial z} - \delta \frac{\partial A_y}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} \\ = i\gamma(|A_y|^2 + \frac{2}{3}|A_x|^2)A_y, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, γ 为非线性系数, β_2 为群速度色散系数, 其可正可负, 这主要取决于光波长是大于还是小于光纤的零色散波长. $2\delta = (1/v_{gx} - 1/v_{gy})$ 为两个偏振态分量在 X 轴和 Y 轴上的群时延速度倒数之差, A_x

和 A_y 分别为 X 偏振态和 Y 偏振态分量的包络, 两个偏振态分量可分别表示为

$$E_x(z, t) = A_x(z, t) \exp(-i\omega_0 t) \exp(i\beta_x z), \quad (5)$$

$$E_y(z, t) = A_y(z, t) \exp(-i\omega_0 t) \exp(i\beta_y z), \quad (6)$$

ω_0 为脉冲的频率, β_x 和 β_y 分别为 x 偏振态和 y 偏振态的脉冲波数.

在 (3) 和 (4) 式中, 由于保偏光纤的双折射对色散系数的影响很小, 所以我们假设两个偏振态分量的色散系数是相同的. 根据偏振态对应的群速度和时间的关系, 结合 $\tau_x = t - \delta z$ 和 $\tau_y = t + \delta z$ 做变换, 并忽略保偏光纤的非线性损耗. 则 (3) 和 (4) 式可简化为

$$i \frac{\partial A_x(\tau_x, z)}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_x(\tau_x, z)}{\partial \tau_x^2}, \quad (7)$$

$$i \frac{\partial A_y(\tau_y, z)}{\partial z} = \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A_y(\tau_y, z)}{\partial \tau_y^2}. \quad (8)$$

将 (1) 和 (2) 式分别代入 (7) 和 (8) 式, 由于激光器输出的两激光信号初始相位相同, 扰偏器使两个正交偏振态功率一致, 所以两激光信号的脉冲包络是相同的, 即 $C_1 = C_2 = C, T_1 = T_2 = T_0$,

$A_{0x} = A_{0y} = A_0$. 可以得到两个正交偏振的激光信号脉冲包络由于光纤色散的作用后的相位因子分别为

$$\varphi(z, \tau_x) = \frac{1}{2} \left[-\frac{(\beta_2 z + CT_0^2 + C\beta_2 z)\tau_x^2}{(T_0^2 + C\beta_2 z)^2 + (\beta_2 z)^2} + \arctan \frac{\beta_2 z}{T_0^2 + C\beta_2 z} \right], \quad (9)$$

$$\varphi(z, \tau_y) = \frac{1}{2} \left[-\frac{(\beta_2 z + CT_0^2 + C\beta_2 z)\tau_y^2}{(T_0^2 + C\beta_2 z)^2 + (\beta_2 z)^2} + \arctan \frac{\beta_2 z}{T_0^2 + C\beta_2 z} \right]. \quad (10)$$

可以看出, 环形激光器输出的两个正交偏振的激光信号经过保偏光纤时发生了频率啁啾, 两个激光信号通过保偏光纤后的相对频率偏移量为

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{\text{PMF}} &= \frac{d\varphi(z, \tau_y)}{d\tau_y} - \frac{d\varphi(z, \tau_x)}{d\tau_x} \\ &= -\frac{2(\beta_2 z + CT_0^2 + C\beta_2 z)}{(T_0^2 + C\beta_2 z)^2 + (\beta_2 z)^2} \cdot \delta z. \end{aligned} \quad (11)$$

长度为 L 的保偏光纤对两激光信号的相对频率偏移量影响为^[9]

$$\Delta f_{\text{PMF}} = -\frac{\delta L[CT_0^2 + \beta_2 L(1 + C^2)]}{\pi(T_0^2 + C\beta_2 L)^2 + \pi(\beta_2 L)^2}. \quad (12)$$

当 $\Delta f_{\text{PMF}} < 0$ 时, 会减小两个激光信号的频率差, 从而减小产生的毫米波频率; 当 $\Delta f_{\text{PMF}} > 0$ 时, 会增大两个激光信号的频率差, 从而增大产生的毫米波频率.

3 仿真分析和优化设计

3.1 激光器对毫米波性能影响分析

图 2 为激光信号强度对毫米波功率的影响. 可见, 毫米波信号功率与激光器输出的激光信号强度成正比. 所以, 通过调整环形激光器的腔长、光纤掺杂的辐射带宽等改变环形激光器输出功率可以获得不同强度的毫米波信号^[10-14]. 通过对接收端信号的误码率来分析双波长激光信号谱线宽度对毫米波性能的影响, 如图 3 所示. 可以看出, 激光信号的谱线宽度越窄, 误码率越小. 因此制作窄线宽的环形激光器对本系统尤为重要.

在实际中, 由于保偏光纤光栅的制作工艺, 以及产生双折射时用力的不均匀性等原因会使光栅的两个反射波长所对应的反射率有所差异, 从而使激光器输出的双波长激光信号功率不相等. 图 4 为保偏光纤光栅两反射峰反射率差对接收端误码率的影响. 可以看出, 当两反射率之差在 0—0.1 之间

变化时, 对误码率影响不大, 但是大于 0.1 时对误码率的影响比较大.

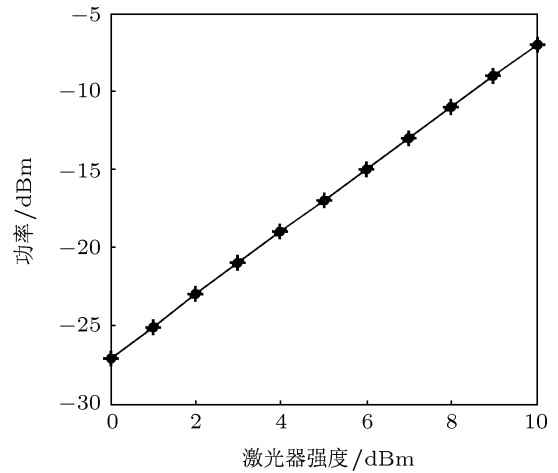


图 2 激光信号强度对毫米波功率的影响

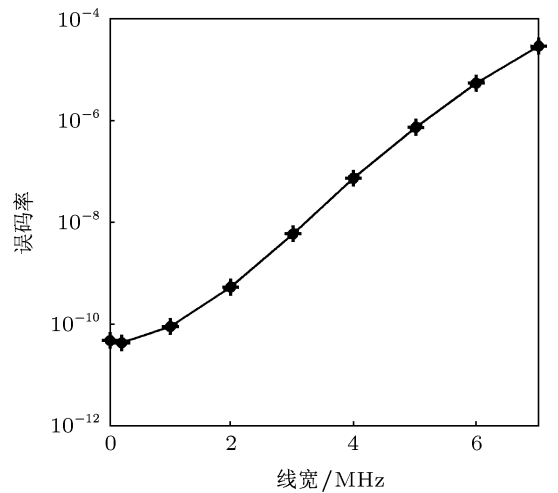


图 3 激光信号谱线宽度对毫米波传输性能的影响

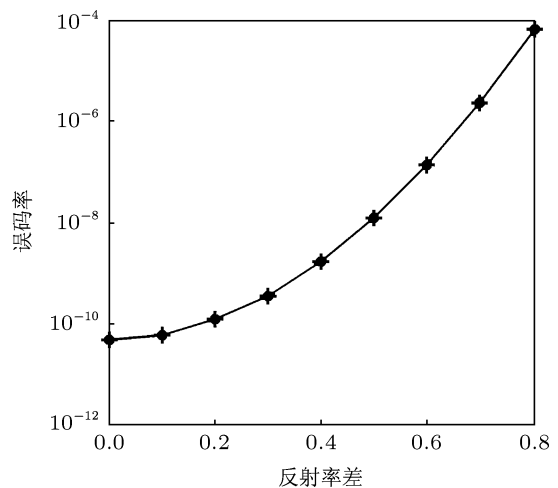


图 4 保偏光纤光栅两反射峰反射率差的影响

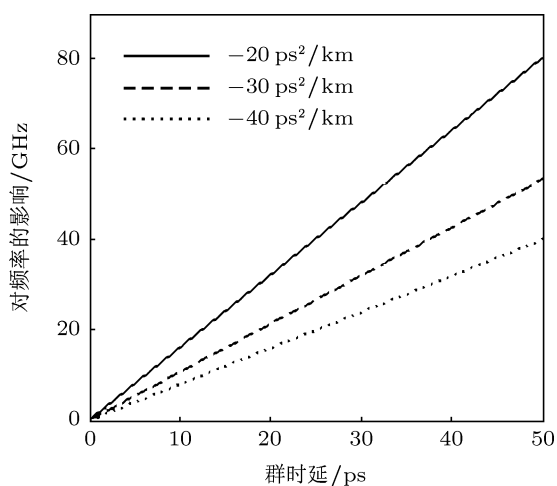


图5 保偏光纤群时延对毫米波频率的影响

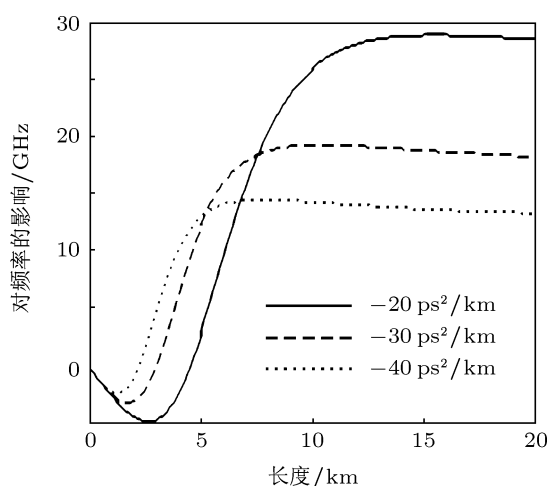


图6 保偏光纤长度对毫米波频率的影响

3.2 保偏光纤对毫米波频率影响分析

图5为保偏光纤群时延对毫米波频率的影响。可见,对毫米波信号频率的影响与保偏光纤群时延成正比。图6为不同色散系数保偏光纤的长度从0—20 km变化时对毫米波频率的影响。可以看出,当保偏光纤长度在0—10 km内变化时,光纤长度变化对毫米波频率的影响比较显著,当光纤长度达到一定的值后,长度对毫米波频率的影响效果减弱。另外,随着色散系数的减小,保偏光纤长度变化对毫米波频率影响效果更加显著。图7为保偏光纤群速度色散对毫米波频率的影响。可见,无论在反常色散区还是正常色散区,随着保偏光纤色散系数的减小,对毫米波频率影响程度增大。

3.3 激光信号脉冲包络对毫米波频率影响

图8为激光信号脉冲包络宽度对毫米波频率的影响。可以看出随着脉冲包络宽度增加,对毫米

波频率的影响先增大后减小,当脉冲包络的宽度增大到一定程度时,脉冲包络宽度的增大对毫米波频率没有影响。图9为两激光信号通过不同长度的保偏光纤后,啁啾系数对毫米波频率的影响,可以看出,啁啾系数对毫米波频率的影响同样不容忽视。

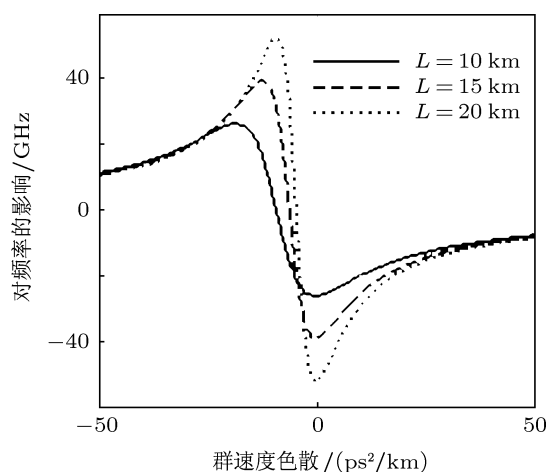


图7 保偏光纤群速度色散对毫米波频率的影响

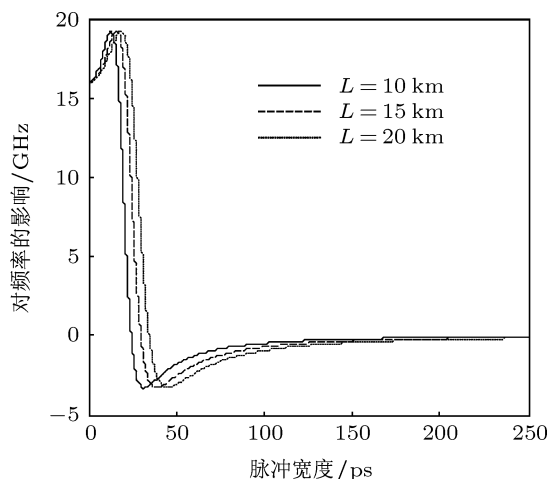


图8 激光脉冲包络宽度对毫米波频率的影响

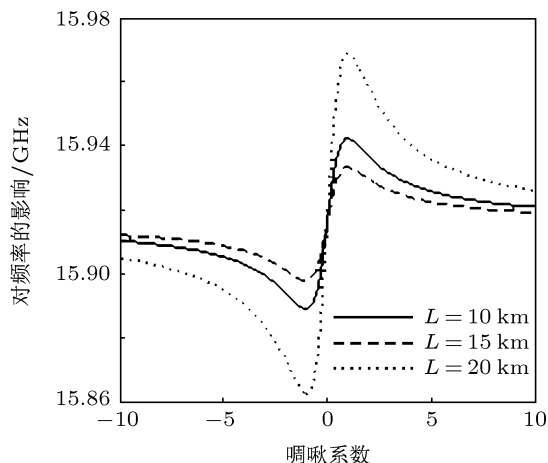


图9 激光脉冲包络啁啾系数对毫米波频率影响

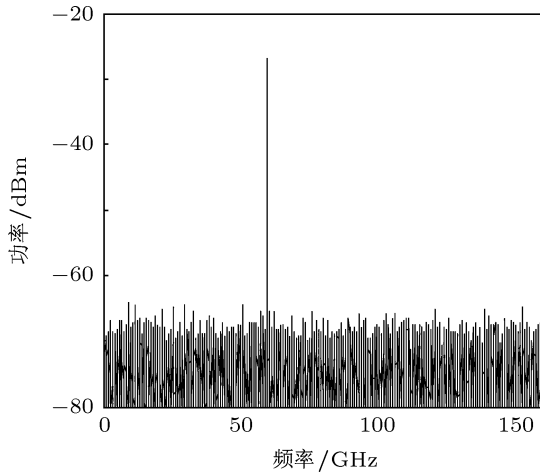


图 10 60 GHz 毫米波信号

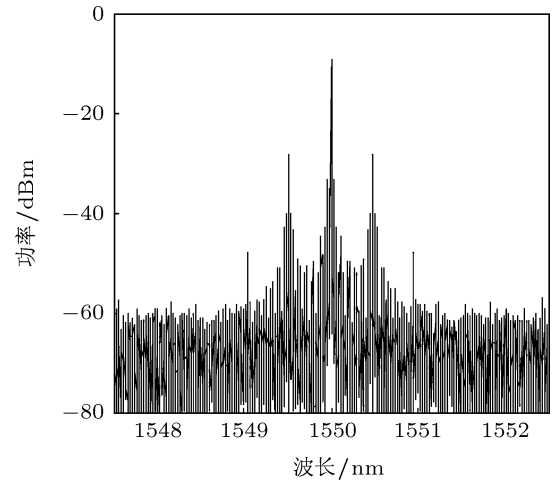


图 11 光载波频谱

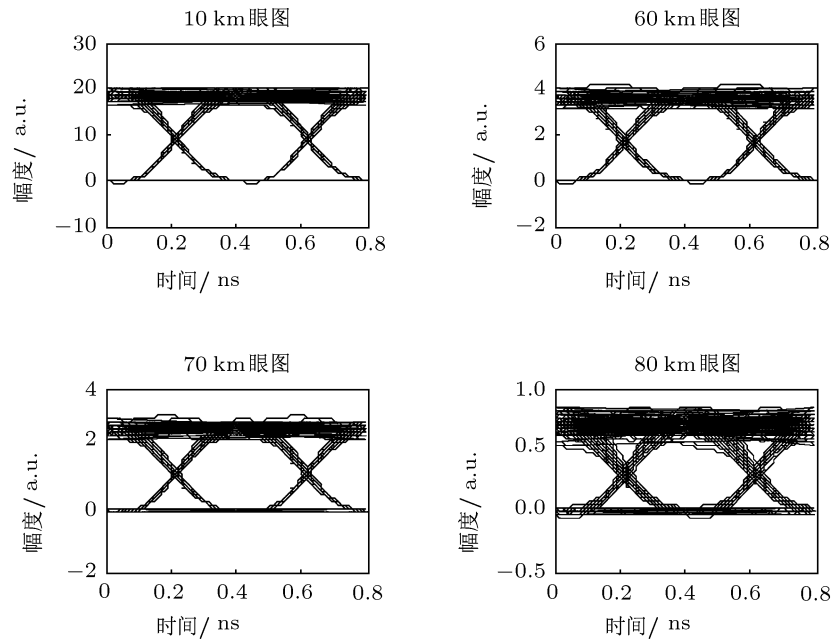


图 12 光载波传输不同距离时接收端的眼图

3.4 下行链路优化设计及传输性能

通过以上的分析可以得出结论, 通过优化保偏光纤的参数, 可以使保偏光纤对毫米波频率不产生影响, 从而使毫米波频率只受双波长激光信号频率间隔的影响, 以方便调谐. 我们选取群速度色散系数为 $-20 \text{ ps}^2/\text{km}$ 、长度为 2.5 km 的保偏光纤, 当激光信号脉冲包络的啁啾系数为 1, 宽度为 10 ps 时, 保偏光纤对毫米波频率没有影响. 此时, 生成的毫米波频率即为保偏光纤光栅两反射峰对应的频率差. 保偏光纤光栅两反射峰对应频率差为 60 GHz 时产生的毫米波信号如图 10 所示.

在中心站, 将速率为 2.5 Gbit/s 的非归零码伪

随机序列作为基带信号通过乘法器调制到产生的毫米波上实现 ASK 调制, 得到毫米波副载波信号. 设基带信号为

$$m(t) = \sum_n a_n g(t - nT), \quad (13)$$

式中 a_n 为二数码符号, $g(t - nT)$ 为单极性不归零波形, T 为码元间隔. 偏振稳定毫米波发生器产生的毫米波信号为 $i_{\text{RF}}(t) = A_{\text{RF}} \cos(\omega_{\text{RF}}t)$, 基带信号调制后得到的毫米波副载波信号为

$$\begin{aligned} S_{\text{ms}}(t) &= m(t) \times i_{\text{RF}}(t) \\ &= A_{\text{RF}} \sum_n a_n g(t - nT) \cos(\omega_{\text{RF}}t). \end{aligned} \quad (14)$$

然后再将毫米波副载波信号通过 MZM 强度调制器调制到光波上得到光载波^[15]

$$S_{os}(t) = c(t) \times \cos[\Delta\varphi(t)] \times \exp[j\Delta\theta(t)]. \quad (15)$$

图 11 为光载波 S_{os} 的频谱图. (15) 式中 $c(t)$ 为光信号, $\Delta\theta(t)$ 为调制信号相位变化, $\Delta\varphi(t)$ 为 MZM 两臂信号的相位差, 其表达式为

$$\Delta\varphi(t) = 0.5\pi\{0.5 - \text{Erc}[S_{ms}(t) - 0.5]\}, \quad (16)$$

其中 $\text{Erc} = 1 - 0.25\pi \times \arctan(1/\sqrt{K})$, K 为 MZM 的消光比.

对连接中心站和基站的单模光纤采用色散补偿技术. 采用此单模光纤将光载波 S_{os} 传输至基站, 在基站光电转换后经过功放、天线发射到用户端, 在用户端经相干解调并用滤波器滤出噪声. 图 12 为光载波在单模光纤中传输不同距离在用户端解

调得到的眼图, 可以看到, 随着传输距离的增大, 眼图的高度会逐渐减小, 但是当光载波传输 80 km 后解调得到的基带信号眼图仍未闭合, 充分展示了该系统在长距离传输时的优越性能.

4 结论

提出了一种基于新型偏振稳定毫米波发生器的光载无线通信下行链路, 分析了环形激光器、保偏光纤、激光信号脉冲包络对系统性能的影响, 优化保偏光纤参数后差频产生了 60 GHz 的毫米波信号, 并验证了其在下行链路中至少可以传输 80 km, 充分证明了本方案的优越性. 为下一代高速大容量的 ROF 系统提供了一种可行的备选方案.

-
- [1] Xin X J, Zhang L J, Liu B, Yu J J 2011 *Optics Express* **19** 7847
- [2] Liu B, Xin X J, Zhang L J, Yu J J, Zhang Q, Yu C X 2010 *Optics Express* **18** 2137
- [3] Li J, Ning T G, Pei L, Qi C H 2009 *Optics Letters* **34** 3136
- [4] Braun R P, Grosskopf G, Rohde D, Schmidt F 1998 *IEEE Photonics Technology Letters* **10** 728
- [5] Bordonalli A C, Walton C, Seeds A J 1999 *Journal of Lightwave Technology* **17** 328
- [6] Johansson L A, Seeds A J 2000 *IEEE Photonics Technology Letters* **12** 690
- [7] Li J, Ning T G, Pei L, Zhou Q, Hu X D, Qi C H, Gao S, Yang L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 054203 (in Chinese) [李晶, 宁提纲, 裴丽, 周倩, 胡旭东, 祁春慧, 高嵩, 杨龙 2011 物理学报 **60** 054203]
- [8] Levinson O, Horowitz M 2003 *Journal of Lightwave Technology* **21** 1179
- [9] Shi Y Y 2009 *MS Thesis* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [史媛媛 2009 硕士学位论文 (北京: 北京交通大学)]
- [10] Xu O, Lu S H, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6404 (in Chinese) [许鸥, 鲁韶华, 简水生 2008 物理学报 **57** 6404]
- [11] Ren G J, Wei Z, Yao J Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 941 (in Chinese) [任广军, 魏臻, 姚建铨 2009 物理学报 **58** 6404]
- [12] Yang W, Liu Y, Xiao L F, Yang Z X, Pan J X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1030 (in Chinese) [杨薇, 刘迎, 肖立峰, 杨兆祥, 潘建旋 2010 物理学报 **59** 1030]
- [13] Wang J, Zheng K, Li J, Liu L S, Chen G X, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7695 (in Chinese) [王静, 郑凯, 李坚, 刘利松, 陈根祥, 简水生 2009 物理学报 **58** 7695]
- [14] Xue L F, Zhang Q, Li F, Zhou Y, Liu Y L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014213 (in Chinese) [薛力芳, 张强, 李芳, 周燕, 刘育梁 2011 物理学报 **60** 014213]
- [15] Wu S Q, Pei L, Ning T G, Qi C H, Guo L 2009 *Chinese J. Lasers* **36** 2945 (in Chinese) [吴树强, 裴丽, 宁提纲, 祁春慧, 郭兰 2009 中国激光 **36** 2945]

Radio-over-fiber downlink system based on a new polarization-stable millimeter-wave generator*

Liu Guan-Hui Pei Li[†] Ning Ti-Gang Gao Song Li Jing Zhang Yi-Jun

(*Institute of Lightwave Technology, Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network,
Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 27 June 2011; revised manuscript received 21 August 2011)

Abstract

A radio-over-fiber(ROF) downlink system based on a new polarization-stable millimeter-wave generator is proposed to reduce costs, increase transmission distance and improve system performance. Compared with traditional system, the system uses two polarization-stable laser signals produced by selecting the frequency of the polarization maintaining fiber Bragg grating(PMFBG) to generate millimeter-wave by beating frequency. It is easy to be implemented and the influence of power noise on the system is reduced. The effects of laser power, linewidth and reflectance spectrum of PMFBG on the performance of millimeter-wave are analyzed; Simulation shows that the frequency of millimeter-wave is affected by the group delay, the length, the dispersion of the polarization-maintaining fiber(PMF) and the width, the chirp coefficient of laser's pulse profile. After optimizing parameters of PMF, millimeter-wave of 60GHz is generated, and the ROF downlink system is analyzed. The results of the study show that the eye diagrams demodulated in the mobile station are excellent when the optical carrier which is modulated by the millimeter-wave serving as sub-carrier transmits over 80 kilometers from center station to base station. The excellent performance of the system is verified.

Keywords: radio-over-fiber system, millimeter-wave, polarization-maintaining fiber, optical communications

PACS: 42.25.Ja, 42.30.Lr, 42.79.Dj

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60837002, 61177069), and the Fund for Doctoral Program of Ministry of Education of China (Grant No. 200800040002).

[†] E-mail: lipei@bjtu.edu.cn