

# 基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生技术\*

裴丽<sup>†</sup> 刘观辉 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3日收到; 2011年7月27日收到修改稿)

首次提出了一种基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生技术, 利用保偏光纤光栅选频产生两个偏振稳定的激光信号, 采用扰偏器确保激光输出的两个正交偏振态功率的一致性, 最后输入高速光电探测器产生微波/毫米波. 通过对保偏光纤光栅施加不同大小的侧向应力, 可以灵活调谐输出的毫米波频率. 实验制作了基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生装置, 通过对保偏光纤光栅施加不同的轴向拉力分别产生了 20.407 和 22.050 GHz 的微波信号. 仿真产生了 60 GHz 的毫米波信号, 并分析该毫米波在光纤无线通信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, 解调后仍然得到很好的眼图, 充分证明了本方案的优越传输性能.

**关键词:** 保偏光纤光栅, 光纤无线通信系统, 毫米波, 光外差

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

## 1 引言

光纤无线通信 (ROF) 是一种光和微波/毫米波相结合的技术, 大容量、低成本、低功耗的特点使其成为超宽带无线接入最有前景的技术之一<sup>[1]</sup>. 毫米波产生技术是影响 ROF 系统性能的关键因素之一. 目前主流的光生毫米波方法有直接调制法、外部调制法和光外差方法<sup>[2]</sup>. 其中光外差方法是一种相对简单、成本较低的技术. 但光外差方法中采用的是两个相互独立的半导体激光器, 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<sup>[3]</sup>、光学锁相环法<sup>[4]</sup>和光注入锁相环法<sup>[5]</sup>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, 人们希望找到既能减少相位噪声又能降低成本的技术. 文献[6]提出了一种利用分布反馈光纤光栅激光器产生的双波长激光信号拍频产生毫米波的技术, 在减小随机相位噪声影响的同时又降低了成本, 但其存在波长难以校准、不稳定、不易调谐等缺点. 为解决上述

问题, 本文首次提出了一种基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生技术, 其结构简单、紧凑, 易于实现, 利用扰偏器和保偏光纤, 结合自行研制的保偏光纤光栅激光器, 可以获得一种全光纤的微波/毫米波发生器. 其具有成本低、功耗小的优点, 并且由于利用同一波长激光的两个正交偏振态输入高速光电探测器 (PD) 产生微波/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, 大大降低了对保偏光纤光栅环形激光器的波长稳定性要求以及功率噪声对系统性能的影响, 从而提高了系统的传输性能.

## 2 基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生技术

### 2.1 基本原理

本文提出的基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生装置如图 1 所示.

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

<sup>†</sup> E-mail: lipei@bjtu.edu.cn

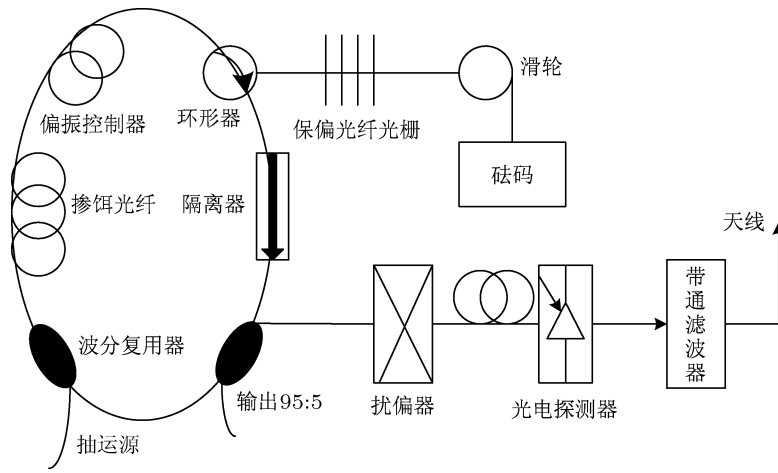


图1 基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生装置

其中, 环形激光器由掺铒光纤、光环形器、偏振控制器、波分复用耦合器 (95:5) 和 980 nm 抽运源组成. 保偏光纤光栅 (可通过应力调节) 作为选频器件, 可以保证保偏光纤光栅激光器获得偏振态正交的双波长激光输出 [7], 两个激光波长分别对应保偏光纤光栅两个正交偏振的反射峰波长 (以下简称为两个偏振态分量). 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 PD 中拍频产生微波/毫米波信号, 其频率为保偏光纤光栅两个反射峰的频率差.

保偏光纤光栅两反射峰之间的波长间距为 [8]

$$\Delta\lambda = \lambda_B^x - \lambda_B^y = 2\Lambda(n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y), \quad (1)$$

$n_{\text{eff}}^x$  和  $n_{\text{eff}}^y$  分别对应保偏光纤两个主轴的折射率,  $\Lambda$  为光纤布拉格光栅的周期.  $\lambda_B^x$  和  $\lambda_B^y$  分别对应环形激光器产生的两个激光频率. 由公式 (1) 可知, 在保偏光纤光栅中传输的光被偏振分离, 波长间隔由保偏光纤光栅的保偏特性决定.

设环形激光器产生的两个偏振态电场分量分别为

$$E_x(t) = A_x \cos(\omega_x t + \varphi_x), \quad (2)$$

$$E_y(t) = A_y \cos(\omega_y t + \varphi_y), \quad (3)$$

式中,  $A_x, A_y$  分别为两个偏振态电场的振幅,  $\omega_x, \omega_y$  分别为两个偏振态的角频率,  $\varphi_x, \varphi_y$  分别是两偏振态的初始相位. 经过扰偏器扰偏并通过保偏光纤传输至 PD, 由 PD 的平方律特性 [9], 输出光电流为

$$i_{\text{out}} = \alpha [\overline{E_x(t) + E_y(t)}]^2, \quad (4)$$

式中方括号上的横线表示在几个光频周期上的时间平均,  $\alpha$  为含有量子效率  $\eta$  的比例因子,

且  $\alpha = \eta e/h\nu$ , 其中,  $e$  为库伦常数,  $h$  为普朗克常量,  $\nu$  为光频率. 将 (2) 和 (3) 式代入 (4) 式得:

$$i_{\text{out}} = \alpha \left\{ \overline{0.5A_x^2 + 0.5A_y^2} + \overline{0.5A_x^2 \cos(2\omega_x t + 2\varphi_x)} + \overline{0.5A_y^2 \cos(2\omega_y t + 2\varphi_y)} + \overline{A_x A_y \cos[(\omega_x + \omega_y)t + (\varphi_x + \varphi_y)]} + \overline{A_x A_y \cos[(\omega_x - \omega_y)t + (\varphi_x - \varphi_y)]} \right\}, \quad (5)$$

(5) 式中前两项为直流功率项; 第三、四、五项由于频率太高, PD 不响应; 差频项  $\omega_x - \omega_y$  相对于  $2\omega_x, 2\omega_y, \omega_x + \omega_y$  来说是个慢变化的功率分量, 设  $\omega_{\text{RF}} = \omega_x - \omega_y$ , 当  $\omega_{\text{RF}}$  小于 PD 的截至频率  $f_c$  时, PD 有相应的光电流输出. 由于激光器输出的两个偏振态初始相位形同,  $\varphi_x = \varphi_y = \varphi$ ; 扰偏器使两个正交偏振态功率一致,  $A_x = A_y = A$ . 所以输出的光电流可以表示为

$$i_{\text{out}} = \alpha [0.5A_x^2 + 0.5A_y^2 + A_x A_y \cos(\omega_{\text{RF}} t)] = \alpha A^2 [1 + \cos(\omega_{\text{RF}} t)]. \quad (6)$$

经过带通滤波器滤除直流项和不需要的频率分量

$$i_{\text{out}} = \alpha A^2 \cos(\omega_{\text{RF}} t). \quad (7)$$

(7) 式中的微波/毫米波频率  $\omega_{\text{RF}}$  由保偏光纤光栅的双折射决定, 而对保偏光纤光栅施的应力可以影响光栅的双折射, 故改变对保偏光纤光栅的应力可以改变微波/毫米波频率. 保偏光纤光栅两反射波长间距压力敏感系数 [10,11] 为 0.25 nm/MPa, 即

$$\frac{\Delta\lambda_x - \Delta\lambda_y}{\Delta P} = 0.25 [\text{nm} \cdot (\text{MPa})^{-1}], \quad (8)$$

$\Delta\lambda_x, \Delta\lambda_y$  分别为两反射波长的变化量,  $\Delta P$  为所施加的压力变化量. 由 (1) 式和 (8) 式得保偏光纤光

栅的双折射  $B$  与所施加压力  $P$  的关系式为

$$B = \frac{1}{2\lambda} P * 0.25 [\text{nm} \cdot (\text{MPa}^{-1})]. \quad (9)$$

保偏光纤光栅的双折射与所受应力的关系如图 2 所示, 所产生的微波/毫米波频率与双折射的关系如图 3 所示.

由图 2 可以看出, 当光栅所受应力的范围 0.3—3.3 MPa, 对应的双折射变化为  $0.77 \times 10^{-4}$ — $7.69 \times 10^{-4}$ . 由图 3 可以看出, 光栅的双折射从  $0.77 \times 10^{-4}$ — $7.69 \times 10^{-4}$  之间变化时, 产生的微波/毫米波频率的变化范围为 10—100 GHz, 即对光栅施加 0.3—3.3 MPa 的应力可以实现 10—100 GHz 的调谐. 所以, 通过改变加在光栅上侧向应力的方向和大小, 可有效控制两个激光信号的频率间隔, 即控制产生的微波/毫米波频率.

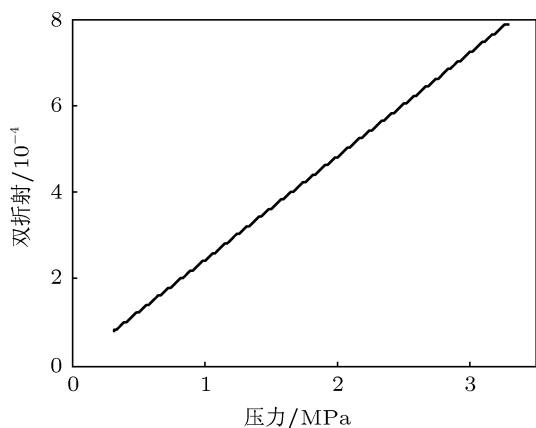


图 2 双折射与所受应力的关系

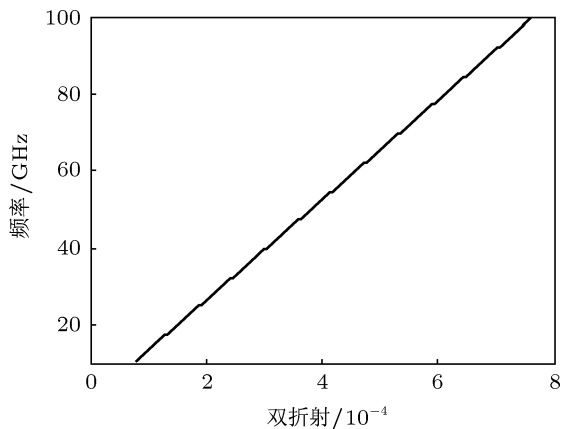


图 3 微波/毫米波频率与双折射的关系

## 2.2 仿真分析

用 980 nm 的半导体二极管作为抽运源. 保偏光纤光栅的两个反射峰波长分别为 1553.599

(对应频率为 193.1 THz) 和 1553.117 nm (对应频率为 193.16 THz), 带宽都为 0.01 nm, 反射率都为 50%. 调节保偏光纤光栅激光器的腔长、光纤掺杂的辐射带宽 [12–14] 等产生功率为 1 mW, 谱线宽度为 2 kHz 的偏振态正交的激光信号, 其波长分别对应于保偏光纤光栅的两个反射波长, 如图 4 所示.

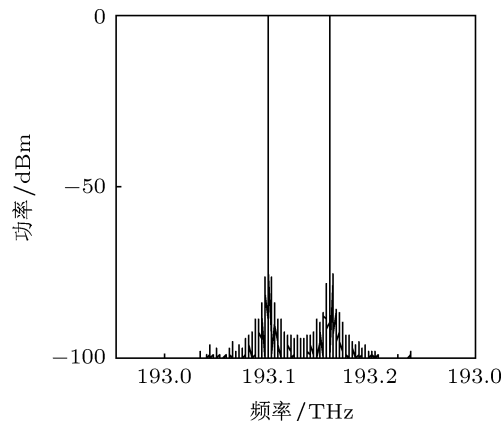


图 4 环形激光器输出的激光信号

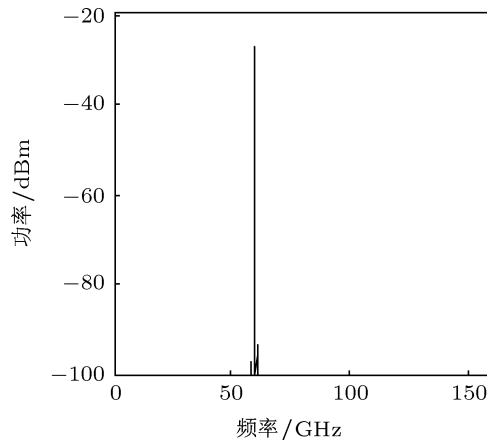


图 5 PD 输出的信号频谱

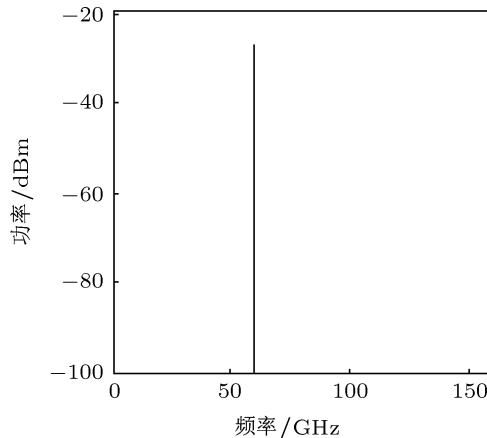


图 6 滤波器滤出的毫米波

两个偏振态分量经过扰偏器充分扰偏, 以确保两个偏振态功率的一致性, 然后由保偏光纤稳定传输, 最后经 PD 拍频产生毫米波信号. 如图 5 所示, 我们可以看到 PD 输出的信号并不是单一频率的毫米波, 而是很多频率的毫米波的组合. 这是因为自然界中并不存在单一频率的光, 激光器产生的激光信号的谱线宽度为 2 kHz, 所以需要再用一个滤波器滤出 60 GHz 毫米波信号. 我们采用频率为 60 GHz, 带宽为 10 MHz 的四阶贝塞尔滤波器, 滤波器滤出的毫米波信号如图 6 所示.

### 2.3 实验分析

采用图 1 所示结构, 在保偏光纤光栅一侧通过滑轮加一托盘, 通过向托盘添加砝码改变对保偏光纤光栅的轴向拉力. 实验制作基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波发生器, 保偏光纤光栅激光器输出的激光信号如图 7 所示.

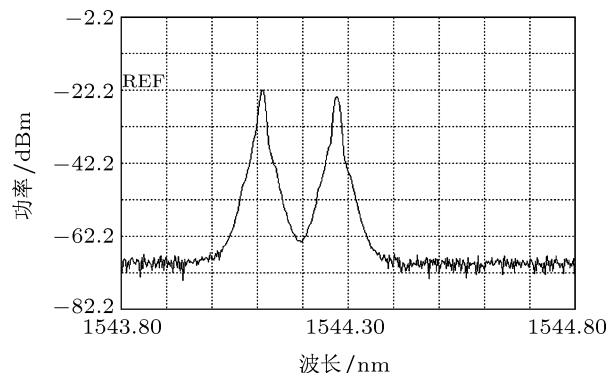


图 7 实验中保偏光纤光栅激光器输出的双波长激光信号

保偏光纤光栅激光器输出的激光信号进入高速 PD 拍频产生微波/毫米波. 图 8 和 9 分别为向托盘中添加 0.83 和 0.88 g 砝码时所产生的微波信号, 产生的微波频率分别为 20.407 和 22.050 GHz.

由图 8 和 9 可以看出, 通过向托盘中添加不同质量的砝码以改变对光纤光栅的轴向拉力, 可以改变产生的微波/毫米波频率. 结合 (9) 式以及图 2 和 3 可以计算出向托盘中添加 0.37—4.13 g 的砝码可以产生 10—100 GHz 的微波/毫米波. 由于可以方便地控制添加的砝码质量, 所以很容易改变产生的微波/毫米波频率.

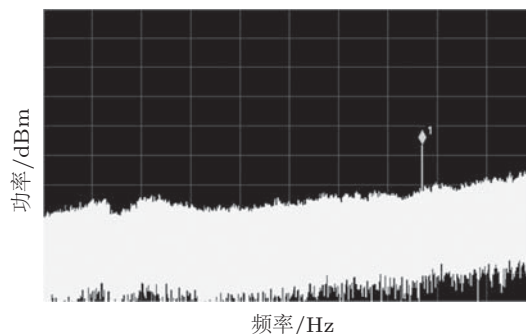


图 8 向托盘添加 0.83 g 砝码产生的微波信号

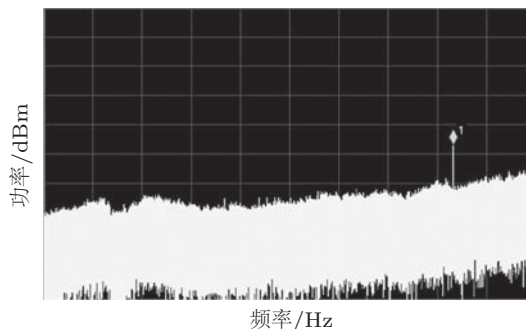


图 9 向托盘添加 0.88 g 砝码产生的微波信号

### 3 基于毫米波产生技术的 ROF 下行链路仿真分析

基于本文所提毫米波产生技术的 ROF 下行链路<sup>[15]</sup>模型如图 10 所示. 在中心站基带信号首先调制到产生的毫米波上, 然后通过马赫-曾德尔调制器 (MZM) 调制到光载波上进入光纤传输, 光纤将其传输到基站, 在基站出经过 PD 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用户端接收到的毫米波信号完全相同<sup>[16-20]</sup>.

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. 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, 光载波的频谱如图 11 所示.

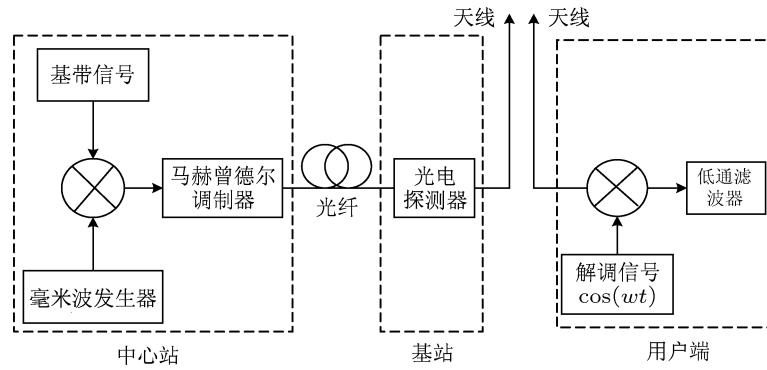


图 10 ROF 下行链路模型

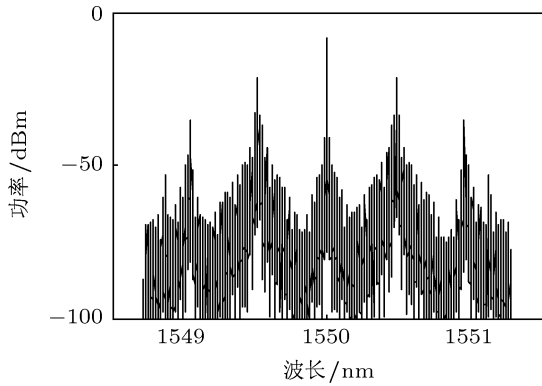


图 11 MZM 得到的光载波信号

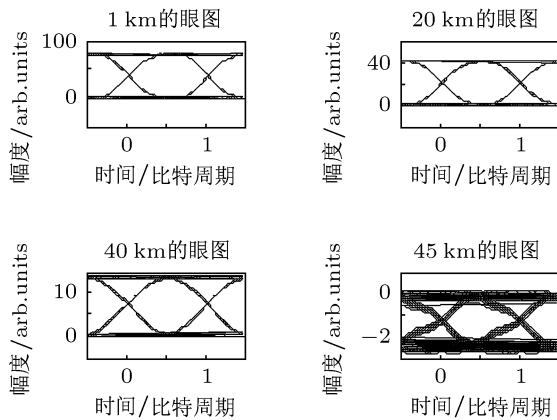


图 12 未采用色散补偿时光载波传输不同距离在用户端解调得到的眼图

采用单模光纤将光载波传输至基站，在基站经过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 为光载波分别在单模光纤中传输 1, 20, 40, 和 45 km 后在用户端解调得到的眼图。由图 12 中可以看出，由于光纤色散的影响，已调光载波只能传输 40 km 的距离，我们可以对单模光纤采用色散补偿技术，采用色散补偿后光载波分别在单模光纤中传输 45, 70, 80 和 90 km 后在用户端解调得到的眼图如图 13

所示。

由图 12 和 13 可以看出，负载波在光纤中传输的距离会影响眼图的张开度，这是因为负载波在传输的过程中受到光纤的色散及损耗的影响。由图 13 可以看出，采用色散补偿技术后，光载波在光纤中传输 80 km 后在接收端解调仍可以得到很好的眼图。80 km 的传输距离完全可以满足 ROF 在大城市应用中的光载波传输距离的要求，所以本文提出的毫米波发生器在实际中是可以应用的。

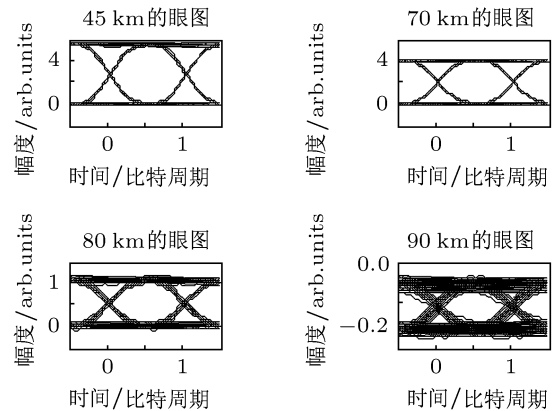


图 13 采用色散补偿后光载波传输不同距离在用户端解调得到的眼图

## 4 结论

本文介绍了一种基于偏振稳定双波长保偏光纤光栅激光器的可调谐微波/毫米波产生技术，由于利用两个偏振稳定且相位一致的激光信号输入 PD 产生微波/毫米波，并采用扰偏器确保了两个偏振态功率的一致性，大大降低了对保偏光纤光栅环形激光器的波长稳定性要求以及功率噪声对系统性能的影响。仿真验证了载有 60 GHz 毫米波副载波的光载波在光纤中可以传输 80 km，充分证明了该方案在长距离传输中的优越性能。本文利用光纤具有

的低损耗、大容量、无感应、重量轻、易于搬运等特点, 在传统的微波/毫米波发生技术中引入光纤

技术, 为下一代的高速大容量的 ROF 系统提供了一种本振源.

- 
- [1] Li J, Ning T G, Pei L, Qi C H 2009 *Opt. Lett.* **34** 3136
- [2] Li J, Ning T G, Pei L, Qi C H, Hu X D, Zhou Q 2010 *Opt. Express* **18** 2503
- [3] Braun R P, Grosskopf G, Rohde D, Schmidt F 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 728
- [4] Bordonalli A C, Walton C, Seeds A J 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 328
- [5] Johansson L A, Seeds A J 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 690
- [6] Leng J S, Lai Y C, Zhang W, Williams J A R 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1729
- [7] 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]
- [8] Pei L, Zhao R F, Ning T G, Qi C H, Li Z X, Gao S 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1028 (in Chinese) [裴丽, 赵瑞峰, 宁提纲, 祁春慧, 李卓轩, 高嵩 2010 中国激光 **37** 1028]
- [9] An S Y, Zeng X D 2004 *Principle of PhotoDetector* (Vol. 1) (Xi'an: Xidian University Press) p152 (in Chinese)[安毓英, 曾晓东 2004 光电探测原理 (第一版) (西安: 西安电子科技大学出版社) 第 152 页]
- [10] Wang W, Meng Z, Yang H Y, Li Z Z 2006 *Sensor World* **6** 23 (in Chinese) [王伟, 孟洲, 杨华勇, 李智忠 2006 传感器世界 **6** 23]
- [11] Botero-Cadavid J F, Causado-Buelvas J D, Torres P 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 1291
- [12] 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]
- [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 *Chin. 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]
- [16] Ji H C, Kim H, Chung Y C 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** 9
- [17] Xin X J, Zhang L J, Liu B, Yu J J 2011 *Opt. Express* **19** 7847
- [18] Liu B, Xin X J, Zhang L J, Yu J J, Zhang Q, Yu C X 2010 *Opt. Express* **18** 2137
- [19] Li S Y, Zheng X P, Zhang H Y, Zhou B K 2011 *Opt. Lett.* **36** 546
- [20] 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]

# A technique for tunable microwave/millimeter-wave generation based on a polarization-stable dual-wavelength polarization maintaining fiber Bragg grating laser\*

Pei Li<sup>†</sup> Liu Guan-Hui 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 3 June 2011; revised manuscript received 27 July 2011)

## Abstract

A technique for tunable microwave/millimeter-wave generation based on a polarization-stable dual-wavelength polarization maintaining fiber Bragg grating (PMFBG) laser is proposed in which the frequency selecting of PMFBG is used to produce two polarization-stable lasing signals, the polarization scrambler is adopted to ensure the consistency of the orthogonal polarization's power, and then the beating frequency in high-speed photodetector is used to generate the microwave/millimeter-wave. Lateral strain loading on the PMFBG allows the frequency of the microwave/millimeter to be controlled. In the experiment, a scheme for tunable microwave/millimeter-wave generation based on a polarization-stable dual-wavelength PMFBG laser is produced, and the microwave signals of 20.407 GHz and 22.050 GHz are generated by different axial pulls loading on PMFBG. In the simulation, the millimeter-wave of 60 GHz is generated and transmission performance of the millimeter-wave in radio-over-fiber downlink is analyzed. The results show that the eye diagrams demodulated in the mobile station are excellent when the optical carrier which is modulated as the millimeter-wave sub-carrier transmits over 80 kilometers from center station to base station. The excellent performance of the system is verified.

**Keywords:** polarization-maintaining optical fiber Bragg grating, radio-over-fiber system, millimeter-wave, optical heterodyne

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

---

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

<sup>†</sup> E-mail: lipei@bjtu.edu.cn