

三角形谱啁啾光纤光栅的制备及其在光纤无线单边带调制系统中的应用*

李晶 宁提纲† 裴丽 周倩 胡旭东 祁春慧 高嵩 杨龙

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

(2010年5月19日收到; 2010年7月6日收到修改稿)

本文涉及一种三角形谱啁啾光纤光栅的制备以及其在光纤无线 (radio over fiber, RoF) 单边带调制系统中的应用. 基于相位掩模法和变速度折射率调制, 实验制备了底部变化范围 1.9 nm、透射深度 0—15 dB 的三角形谱啁啾光纤 Bragg 光栅, 利用其透射谱具有较大负向斜边, 研究了其在 RoF 系统中的应用. 方案仅使用一个三角形谱光纤光栅, 实现了以下两种功能: 1) 双边带调制信号到单边带调制信号转换; 2) 降低信号的载波边带比 (carrier-to-sideband ratio, CSR), 提高接收灵敏度. 并结合数值分析和仿真验证对方案进行了进一步的讨论.

关键词: 光纤通信, 微波光子, 光纤布拉格光栅, 单边带调制

PACS: 42.30.Lr, 42.65.Ky, 42.79.Dj

1. 引言

微波光子学将微波学和光子学融合在一起, 成为一门新兴的学科, 其研究范围包括微波/毫米波信号的光学生成、微波/毫米波频段的光电子器件、光控微波器件、微波毫米波频率的光传输链路等^[1-2].

外部调制器在微波光子领域有着广泛的应用, 目前常用的为铌酸锂调制器, 不同结构的调制器可以实现相位调制、强度调制以及偏振调制功能. 典型的强度调制器能够实现双边带调制, 采用双边带调制技术的光纤无线 (radio over fiber, RoF) 系统, 受光纤色散影响, 差拍得到的电信号强度随光纤使用长度呈现周期性衰落. 常用的解决方法有: 1) 抑制载波调制 (optical carrier suppression, OCS); 2) 单边带调制 (single sideband, SSB). 最近的研究表示, 采用新型的调制器和滤波技术能够直接实现以上功能^[3,4], 文献[3]提出了一种基于 I/Q 调制器的四倍频技术得到不含载波的两个二阶调制边带, 实现 OCS 调制, 文献[4]则介绍了基于光纤 Bragg 光栅的边带滤波法, 实现 OCS 或 SSB 调制. 此外, 影响 RoF 单边带调制系统的另一个参数是载波边带抑制比

(carrier to sideband ratio, CSR), 通常调制器工作在弱调制状态, CSR 远大于 0 dB, 降低 CSR 能够获得更高系统接收灵敏度^[5], 可以使用光纤 Bragg 光栅^[6]和衰减器^[7]解决. 由于光纤光栅具有制作简单和频谱特性稳定的特点^[8,9], 因此基于光纤光栅的边带滤波法具有很高的研究价值.

我们通过实验制备了一个底部变化范围 1.9 nm、透射深度 0—15 dB 的三角形谱啁啾光纤 Bragg 光栅, 将其应用于单边带 RoF 系统中, 从而, 仅利用一个具有三角形谱啁啾光纤光栅即实现以下两种功能: 1) 滤波实现单边带调制; 2) 降低单边带信号 CSR. 同时, 由于光栅透射谱范围内具有较大负向斜边, 光栅调节相对容易.

2. 三角形谱啁啾光纤光栅的实验制备

图 1 为光栅写入的实验系统示意图^[9]. 系统主要包括: 1) 紫外写入光源、2) 计算机控制高精度移动平台、3) 掩模板及光纤固定/调节平台. 波长为 248 nm 的紫外光先经过衰减镜, 再由固定在高精度移动平台上的 248 nm 全反射镜反射, 通过适当焦距的 UV 级柱面透镜会聚后, 对相位掩模板及光敏光纤进行扫描曝光. 图中所使用的 KrF 准分子激光器设定

* 中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 2009YJS009) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: tgning@bjtu.edu.cn

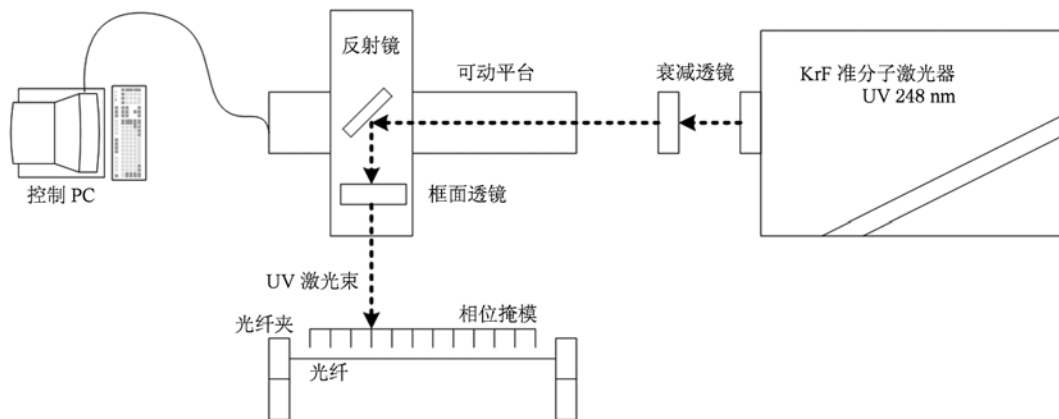


图1 光栅写入实验系统示意图^[10]

输出脉冲能量与频率分别为 50 mJ 和 2 Hz. 相位掩模板选用啁啾掩模板(掩模板周期 1069.45 nm, 啁啾量 1 nm), 写入光栅所用光纤为自行氢载长飞 G. 652 单模光纤. 通过计算机编程控制实现移动平台以线性加速度 0.00385 mm/s^2 移动, 最大移动速度 1 mm/s, 扫描方向为长波长至短波长, 光栅长度 130 mm, 制备得到的光栅透射与反射谱如图 2 所示.

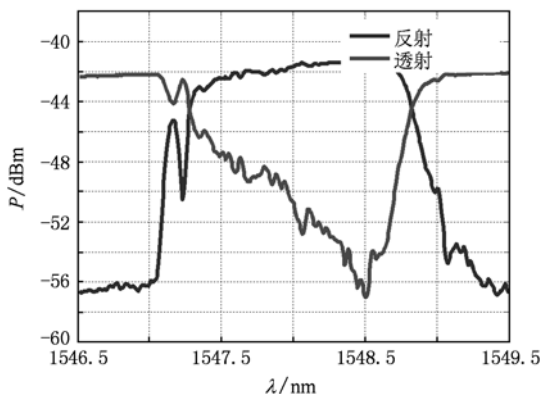


图2 三角形啁啾光纤光栅频谱图

如图所示, 光栅的透射谱呈现倒三角形, 且透射谱具有较大的负向斜边, 波长范围为 1547.1—1548.5 nm, 负向斜边宽度 1.4 nm, 透射深度由 0 dB 递增至 15 dB (对应反射率 0—97%), 由反射谱可测得光栅底部变化范围 1.9 nm.

3. RoF 单边带调制系统数值分析及仿真验证

图 3 为基于三角形谱啁啾光纤光栅的 RoF 单边带调制系统结构示意图, 受实验条件限制, 该部分的工作主要采用数值分析和仿真验证来完成. 图中 CW (continue wave laser) 为波长可调节连续波激光器, 设置输出中心波长 1547.8 nm, 双电极调制器 De-MZM (dual-electrode Mach-Zehnder) 工作于推挽模式下, 调节上下臂偏置电压差 $\Delta\varphi = 0$ 或 $\Delta\varphi = 2\pi$, 调制器工作于最大传输点, 本振源 LO (local oscillator) 输出信号频率 30 GHz, 则 De-MZM 输出光电场表示为

$$E_{\text{out}} = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos[m \cos(\omega_m t)], \quad (1)$$

其中 E_0 为 CW 输出光电场幅度 ($E_0^2 = 1 \text{ mW}$), ω_0 为 CW 输出信号角频率, $m = \pi V_m / V_\pi$ 为 De-MZM 调制系数, V_m 为调制电压, V_π 为半波电压, ω_m 为 LO 调制角频率, 然后, 将 (1) 式进行贝塞尔展开得到

$$E_{\text{out}}(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t) \left[J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(m) \times \cos(2n(\omega_m t)) \right]. \quad (2)$$

设置调制系数 $m = 1$, 高阶边带可忽略, (2) 式

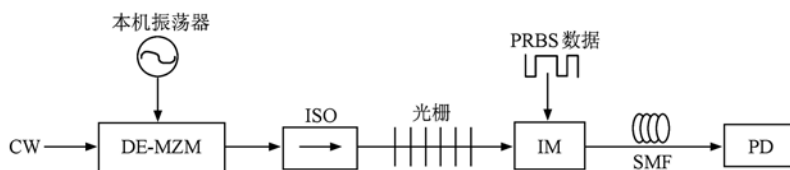


图3 RoF 单边带调制系统结构示意图

简化为

$$E_{\text{DSB}}(t) = -E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t + j2\omega_m t) + E_0 J_0(m) \exp(j\omega_0 t) - E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t - j2\omega_m t), \quad (3)$$

式中三项分别表示双边带调制信号 (DSB) 的上边带 (upper sideband)、载频 (carrier) 和下边带 (lower sideband), 则 DSB 信号仿真频谱图如图 4 所示.

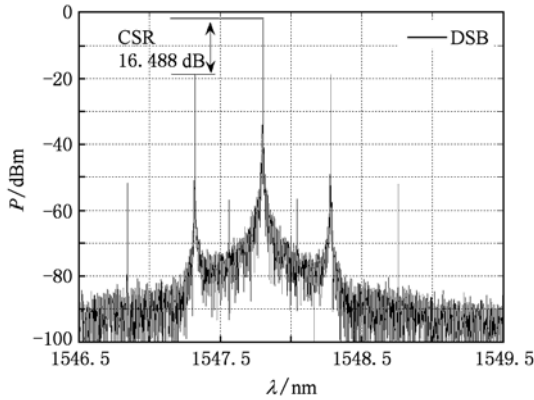


图 4 双边带信号仿真频谱图

载波边带比 (CSR) 可从图中测得, 或通过 (4) 式计算得到

$$\text{CSR} = 20 \log_{10} \left(\frac{J_0(m)}{J_2(m)} \right) = 16.488 \text{ dB}. \quad (4)$$

通过将光栅透射谱参数写入可编程模块, 代替制备所得光纤光栅, DSB 信号经过该模块后, 得到衰减后的信号, 结合光栅的透射谱 (图 2), DSB 信号的上边带 (波长 1547.32 nm)、载频 (波长 1547.8 nm) 和下边带 (波长 1548.28 nm) 分别经历不同的衰减, 衰减因子分别为 $a_1 = -1.2 \text{ dB}$, $a_2 = -3.4 \text{ dB}$ 和 $a_3 = -6 \text{ dB}$. 输出 SSB 信号仿真频谱图为如图 5 所示, 图示中, 下边带经历最大衰减, 上下边带强度相差 9.6 dB, 输出信号可以近似为单边带信号, 该单边带信号的 CSR 可由下式计算得到:

$$\text{CSR}' = 20 \log_{10} \left(\frac{a_1 J_0(m)}{a_2 J_2(m)} \right) = 12.088 \text{ dB}. \quad (5)$$

比较图 4 和 5, 不难看出, 经过三角形谱光纤光栅对 DSB 信号各边带及载波不同程度衰减后, 输出信号可以近似为 SSB 信号, 信号的 CSR 由原来的 16.488 dB 降低为 12.088 dB. CSR 与系统接收灵敏度的关系, 文献 [6—8] 已经对这个问题进行了类似的讨论, 因此, 本文不做的讨论.

随后得到输出信号光电场表达式为

$$E_{\text{SSB}}(t) = [-a_1 E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t + j2\omega_m t)$$

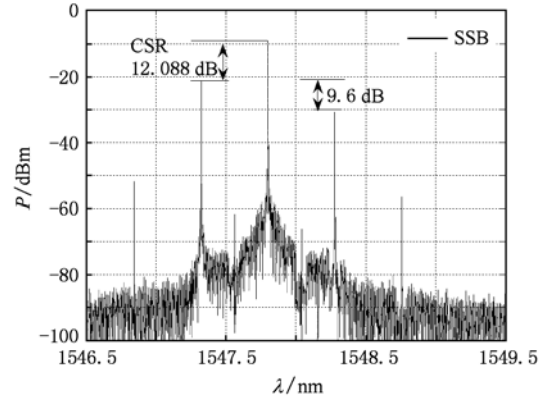


图 5 光栅透射信号仿真频谱图

$$+ a_2 E_0 J_0(m) \exp(j\omega_0 t) - a_3 E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t - j2\omega_m t)]. \quad (6)$$

然后利用一段长度为 L 的标准单模光纤传输, 只考虑光纤色散不考虑光纤传输损耗时, 光纤的传输函数可以表示为^[11]

$$H(f) = \exp \left[-j\pi D(\lambda) L \frac{\lambda^2 (v - v_c)}{c} \right], \quad (7)$$

其中 $D(\lambda) = 17 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}$ 表示光纤色散系数, λ 为工作波长, v 为边带或载波频率, v_c 为载波的频率. (6) 式的傅里叶变换为

$$F[E_{\text{SSB}}(t)] = [-a_1 E_0 J_2(m) \delta(\omega - \omega_0 - 2\omega_m) + a_2 E_0 J_0(m) \delta(\omega - \omega_0) - a_3 E_0 J_2(m) \delta(\omega - \omega_0 + 2\omega_m)]. \quad (8)$$

经光纤传输后光电场表示式为

$$F[E'_{\text{SSB}}(t)] = [-a_1 E_0 J_2(m) \delta(\omega - \omega_0 - 2\omega_m) + a_2 E_0 J_0(m) \delta(\omega - \omega_0) - a_3 E_0 J_2(m) \delta(\omega - \omega_0 + 2\omega_m)] \cdot \exp \left[-j\pi D(\lambda) L \frac{\lambda^2 (v - v_c)}{c} \right], \quad (9)$$

对 (9) 式两边同时进行傅里叶反变换得到

$$E'_{\text{SSB}}(t) = [-a_1 E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t + j2\omega_m t - jD(\lambda) \lambda^2 L \omega_m^2 / \pi c) + a_2 E_0 J_0(m) \exp(j\omega_0 t) - a_3 E_0 J_2(m) \exp(j\omega_0 t - j2\omega_m t - jD(\lambda) \lambda^2 L \omega_m^2 / \pi c)]. \quad (10)$$

输出的光信号经过光电二极管 (PD) 光-电转换 (O/E) 后, 光电流表示为

$$i(t) = R |E'(t)|^2, \quad (11)$$

R 为 PD 的相应系数, 默认 1 A/W , 最终得到频率 60 GHz 毫米波信号强度 P_{mm} 为

$$P_{\text{mm}} = RE_0^2 J_0(m) J_2(m) \{ \alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cos[2D(\lambda) \lambda^2 L \omega_m^2 / \pi c] \}, \quad (12)$$

同理,可以计算得到 DSB 信号 E_{DSB} 直接由光纤传输,得到频率 60 GHz 毫米波信号强度 P'_{mm} 为

$$P'_{\text{mm}} = RE_0^2 J_0(m) J_2(m) \{ 2 + 2\cos[2D(\lambda) \lambda^2 L \omega_m^2 / \pi c] \}. \quad (13)$$

改变光纤长度 L 从 0 递增至 20 km,比较 P_{mm} 和 P'_{mm} ,结果如图 6 所示,虚线为 DSB 信号强度数值计算结果,可以看到,由于最终毫米波频率项为上下边带和光载波差拍,产生的两个分量受到光纤色散的影响同频不同相,因而带来信号强度的周期性衰落,致使信号每传输 2.0448 km 即存在最大衰减.改进后的单边带信号强度曲线为实线,如图所示,毫米波强度只是呈现微弱的振荡,随后,采用仿真对其进行验证,不考虑插入损耗和光纤传输损耗,得到仿真结果如图 6 + 线所示,比较可见,仿真结果与数值计算结果基本符合.图 6 强度曲线的原理也可以结合 (12), (13) 式加以说明, (12), (13) 两式中信号强度均为常数项与余弦项之

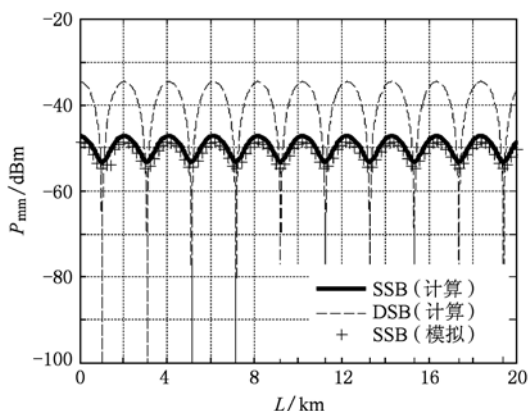


图 6 60 GHz 毫米波强度随光纤长度变化曲线

和,DSB 信号的情况, P'_{mm} 两项幅值相等,因而随着传输距离的增加,必然出现强度为零的情况,即存在最大衰减.比较(12)式,由于使用三角形谱啁啾光纤光栅对双边带信号的各个边带和载波进行不同程度的衰减,使常数项幅值大于余弦项的幅值,必然不会出现强度为零的情况,而且,由(12)式可以得到,毫米波振荡的幅度与衰减因子的乘积 $a_1 a_2^2 a_3$ 呈正比,结合光栅透射谱特性,我们发现,振荡的幅度实际上与所制作光栅透射谱斜边的斜率有关,斜率越大,振荡幅度越小,为了得到具有更大斜率的透射谱斜边,可以采取以下三种措施:提高紫外写入光源功率、降低移动平台线性加速度,提高光纤的光敏性.

4. 结 论

本文介绍了一种采用三角形谱啁啾光纤光栅实现单边带滤波的 RoF 系统,实验制备了一个透射谱呈现倒三角形,宽度为 1.4 nm 负向斜边,且最大深度达 15 dB 的三角形谱啁啾光纤光栅,充分利用该光栅的透射谱特性,将其应用与 RoF 单边带调制系统,从而仅使用一个光栅即解决了单边带调制系统中的两个问题:1) 滤波实现单边带调制;2) 降低单边带信号 CSR. 该方案还具有另一个优势,即由于光栅透射谱负向斜边宽度达到 1.4 nm,因而无需进行光栅布拉格波长与所需滤除波长的精确对准,只需要输入的双边带信号在光栅斜边波长范围内大致移动即可,大大降低了系统的复杂程度.采用相位掩模法和变速度折射率调制制作的三角形透射谱的光纤光栅,成本低廉,性能稳定,且制作方法简单,可广泛应用于 RoF 系统中.

[1] Seeds A J, Williams K J 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4628
 [2] Capmany J, Novak D 2007 *Nat Photon* **1** 319
 [3] Chen J, Lin C T, Shih P T, Jiang W, Dai Jr. S P, Lin Y M, Peng P C, Chi S 2009 *J. Opt. Netw.* **8** 188
 [4] Jianjun Y, Zhengsheng J, Yi L, Su Y, Gee-Kung C, Ting W 2006 *Photonics Technology Letters IEEE* **18** 265
 [5] Lim C, Attygalle M, Nirmalathas A, Novak D, Waterhouse R 2006 *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions on* **54** 2181
 [6] Attygalle M, Lim C, Pendock G J, Nirmalathas A, Edvell G 2005 *Photonics Technology Letters IEEE* **17** 190
 [7] Toda H, Yamashita T, Kuri T, Kitayama K, in *Microwave Photonics 2003 MWP 2003 Proceedings. International Topical Meeting on*, 2003, 287-290
 [8] Tan Z, Cao J, Chen Y, Liu Y, Ning T, Jian S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 274 (in Chinese) [谭中伟、曹继红、陈勇、刘艳、宁提纲、简水生 2007 物理学报 **56** 274]
 [9] Xu O, Nu S, Jian S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6404 (in Chinese) [许鸥、鲁韶华、简水生 2008 物理学报 **57** 6404]
 [10] Xu O 2009 *Ph. D Thesis* (Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [许鸥 2009 博士学位论文(北京交通大学)]
 [11] Elrefaie A F, Wagner R E, Atlas D A, Daut D G 1988 *Lightwave Technology, Journal* (6) 704

Fabrication of triangular chirped fiber Bragg grating and its application in single-sideband modulation based radio over fiber system *

Li Jing Ning Ti-Gang[†] Pei Li Zhou Qian Hu Xu-Dong Qi Chun-Hui Gao Song Yang Long

1) (*Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

(Received 19 May 2010; revised manuscript received 6 July 2010)

Abstract

In this work, we present an approach for fabricating triangular chirped fiber Bragg grating. Application of single-sideband modulation based radio over fiber system employing this grating is also analyzed. The proposed technology is based on phase mask and index modulation with changing velocity. A triangular fiber Bragg grating with 1.9 nm base width of transmission spectrum and 0—15 dB of transmission depth was fabricated experimentally. Due to the negative slope in transmission spectrum, the grating can be used in the radio over fiber system. In the proposed scheme, only a single grating is used to achieve two functions, i. e. OSSB + C generation from DSB modulation signals, and reducing the carrier to sideband ratio of the generated signals. Numerical calculation and simulation were performed and some discussions are given.

Keywords: optical communications, microwave photonic, fiber Bragg grating, single-sideband modulation

PACS: 42.30.Lr, 42.65.Ky, 42.79.Dj

* Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2009YJS009).

[†] Corresponding author. E-mail: tgning@bjtu.edu.cn