

文章编号: 0258-7025(2009)04-0901-05

# 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性

周会娟 孟 洲 廖 毅

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于布里渊散射的分布式光纤传感技术是目前国内外研究的热点之一, 在基于布里渊光时域反射技术的分布式光纤传感技术中, 以相干检测的传感精度最高, 其关键是获得具有布里渊频移的参考光。详细分析了电光强度调制器(EOIM)的光波移频特性, 实验研究了 15 Gbit/s 的铌酸锂波导电光强度调制器光波长 1550 nm 处 11 GHz 移频的实现; 当微波调制频率及功率一定时, 可方便地调节直流偏置电压来改变各阶光波的强度。设置直流偏置电压为 6.5 V 时, 调制器总的输出光强最小, 具有布里渊频移的一阶光波的相对光强最大, 信噪比(SNR)最高, 可用于分布式光纤传感中布里渊信号的相干检测。

**关键词** 光电子学; 光波移频; 铌酸锂波导电光强度调制器; 布里渊分布式光纤传感技术

中图分类号 TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0901

## Frequency Shift Characteristics Analysis of LiNbO<sub>3</sub> Waveguide Electro-Optic Intensity Modulator

Zhou Huijuan Meng Zhou Liao Yi

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering is one of the subjects of intensive investigation all over the world at present. For the distributed fiber sensing based on Brillouin optical time-domain reflectometry, the heterodyne detection achieves the highest sensing resolution, and the key problem is how to obtain the referenced light with Brillouin frequency shift. The principle of frequency shift based on LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator (EOIM) is analyzed in detail. The 11 GHz frequency shift at 1550 nm is obtained experimentally with a 15 Gbit/s LiNbO<sub>3</sub> waveguide. It is convenient to change the optical intensity of the sidebands by tuning the DC bias voltage while the microwave modulation frequency and power are fixed. Particularly, when the DC bias voltage is set to 6.5 V, the modulator achieves minimum total output optical intensity, and the first sideband with Brillouin frequency shift reaches the maximums relative intensity and signal-to-noise ratio (SNR). These results can be used for Brillouin heterodyne detection in the distributed optical fiber sensing.

**Key words** optoelectronics; optical frequency shift; LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator; distributed Brillouin optical fiber sensing

## 1 引 言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术以其在温度、应变测量上的高精度、高空间分辨率成为目前国内外竞相研发的一项尖端技术<sup>[1~5]</sup>。基于布里渊

光时域反射技术的分布式光纤传感技术是利用光纤中的后向布里渊散射光, 通过测试其光强和频率的变化而实现温度和应变的分布式传感。由于布里渊散射光强度极其微弱(比瑞利散射光低 20~30 dB), 布

收稿日期: 2008-09-04; 收到修改稿日期: 2008-10-24

基金项目: 新世纪优秀人才项目(NCET-06-0925)资助课题。

作者简介: 周会娟(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事基于布里渊散射的分布式光纤传感技术方面的研究。

E-mail: songlzhou@163.com

导师简介: 孟 洲(1968—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤器件、光纤传感以及光纤激光器等方面的研究。

E-mail: zhousong6806@163.com

里渊频移很小(1550 nm 处约 11 GHz),检测起来较为困难,通常采用光滤波器直接检测<sup>[6,7]</sup>和光波移频相干检测<sup>[8,9]</sup>等方法,浙江大学采用微波电光调制移频实现了基于布里渊散射的分布式光纤传感<sup>[10]</sup>。在光通信中,电光晶体相位调制器的移频特性可用于激光扩频<sup>[11]</sup>的实现及多波长光源的产生<sup>[12]</sup>。电光强度调制器不仅可以实现光波移频,而且相比其他光波移频方法,其移频结构简单,易于产生稳定的高信噪比(SNR)的移频信号,满足高精度分布式光纤传感的需求。电光强度调制(EOIM)的移频特性与电光相位调制器不同,至今未见详细报道。

本文详细分析了铌酸锂波导电光强度调制器的光波移频特性,实验研究了 15 Gbit/s 的铌酸锂波导电光强度调制器光波移频的实现,深入讨论了如何获得相对强度最大、信噪比最高的具有布里渊频移的 1 阶光波。

## 2 移频特性

EOIM 的结构如图 1 所示。在一块铌酸锂波导衬底上用钛扩散技术制作出一个 M-Z 型的干涉仪,输入光波经过一段路程后在一个 Y 分支处被分成相等的两部分,每部分分别通过光波导的两个支路,然后在第二个 Y 分支处干涉。由于通过不同的支路经受不同的相位调制,最终干涉形成强度调制<sup>[13]</sup>。

假设输入光波的电场强度为

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t), \quad (1)$$

则经过 M-Z 干涉仪后输出光波的电场强度为

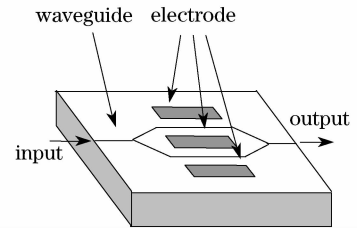


图 1 M-Z 型铌酸锂波导电光强度调制器的结构  
Fig. 1 Structure of the M-Z LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator

$$E(t) = E_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right), \quad (2)$$

其中  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为两个支路引起的相移,在(2)式中忽略了两个支路中的光损耗,并假设两臂光路完全对称,初始相位为 0。干涉仪采用推挽式的结构,使得两臂的光波受到大小相等、符号相反的电场的相位调制,即  $\varphi_1 = -\varphi_2$ ,此时(2)式简化为

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos(\varphi_1). \quad (3)$$

假设加载在 EOIM 上的调制电压为

$$V = V_{DC} + V_m \cos(\omega_m t), \quad (4)$$

其中  $V_{DC}$  为直流偏置电压,  $V_m \cos(\omega_m t)$  为射频端的微波调制电压,  $\omega_m$  为微波调制圆频率,则

$$\varphi_1 = \pi \frac{V}{2V_\pi} = C \cos(\omega_m t) + \varphi_{DC}, \quad (5)$$

其中  $C = \pi(V_m/2V_\pi)$  为调制深度,  $V_\pi$  为 EOIM 的半波电压,  $\varphi_{DC} = \pi(V_{DC}/2V_\pi)$  为由直流偏置电压  $V_{DC}$  导致的相位,将式(5)代入式(3)可得

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos[C \cos(\omega_m t) + \varphi_{DC}] \quad (6)$$

将(6)式按照 Bessel 函数展开得到

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t) \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(C) \cos(2n\omega_m t) \right] \cos\varphi_{DC} - \left[ 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \cos[(2n+1)\omega_m t] \right] \sin\varphi_{DC} \right\} \quad (7)$$

由(7)式可见,输出光的频谱中除了入射光的光频  $\omega_0$  外,还有  $\omega_0 \pm \omega_m, \omega_0 \pm 2\omega_m, \omega_0 \pm 3\omega_m, \dots$  等光频成分,各边频带与中心频率  $\omega_0$  的频移值  $n\omega_m$  取决于施加在 EOIM 上的微波调制电压的频率。简化起见,根据所对应的 Bessel 函数的阶数,分别称这些光频成分为 0 阶,1 阶,2 阶...光波等。由(7)式,0 阶及 1 到 3 阶光波的强度分别为

$$0 \text{ 阶: } E_0^2 J_0^2(C) \cos^2 \varphi_{DC} =$$

$$\frac{1}{2} E_0^2 J_0^2(C) [1 + \cos(2\varphi_{DC})], \quad (8a)$$

$$1 \text{ 阶: } E_0^2 J_1^2(C) \sin^2 \varphi_{DC} = \frac{1}{2} E_0^2 J_1^2(C) [1 - \cos(2\varphi_{DC})], \quad (8b)$$

$$2 \text{ 阶: } E_0^2 J_2^2(C) \cos^2 \varphi_{DC} = \frac{1}{2} E_0^2 J_2^2(C) [1 + \cos(2\varphi_{DC})], \quad (8c)$$

$$3 \text{ 阶: } E_0^2 J_3^2(C) \sin^2 \varphi_{DC} =$$

$$\frac{1}{2}E_0^2 J_3^2(C)[1 - \cos(2\varphi_{DC})]。 \quad (8d)$$

由(8)式可见,光谱中各频谱光强的相对值取决于调制深度  $C$  对应的第一类 Bessel 函数各阶值的平方与施加于 EOIM 的直流偏置电压。

特别地,当 EOIM 不加微波调制,也即调制深度  $C=0$  时,Bessel 函数  $J_0(C)=1, J_n(C)=0(n \geq 1)$ ,由(8)式,这时光谱中只有 0 阶频谱,对应的光强为

$$I_0 = \frac{1}{2}E_0^2[1 + \cos(2\varphi_{DC})] \quad (9)$$

显然(9)式表示 EOIM 不加微波调制时总的输出光强,它与施加给 EOIM 的直流偏置电压  $V_{DC}$  呈余弦变化关系。对于强度调制器, $2\varphi_{DC}$  即  $V_{DC}$  决定着调制器的工作点。

由(8)式,可以利用 0 阶与 2 阶或 1 阶与 3 阶光波的光强比分别得到  $J_0^2(C)/J_2^2(C), J_1^2(C)/J_3^2(C)$  的比值,从而计算出 EOIM 实际调制深度  $C$  值。通常  $C < 2$ ,增加  $C$  值可增大 1 阶以上光波的光强,但是电光调制器能够承受的最大微波调制功率有限,即  $C$  的最大值一定,此时可以通过改变施加在 EOIM 上的直流偏置电压  $V_{DC}$ ,使所需的光频  $\omega_0 + n\omega_m$  的光强达到最大。在 Bessel 函数值  $J_n(C) (n \geq 1)$  中,若  $C < 2, J_1(C)$  最大,因此可以选用相对光强最大的 1 阶光波为实际应用光波。在  $C$  值一定时,通过改变  $V_{DC}$  可以使 1 阶光波光强达到最大,这是利用 EOIM 实现光波移频的特色,也是强度调制优于相位调制之处。

### 3 实验结果及讨论

#### 3.1 光波移频的实现

实验中使用 15 Gbit/s 的 EOIM,所用光谱仪型号为 ADVANTEST Q8384,其光谱分辨率为 0.01 nm。图 2 所示为未加调制时 EOIM 的输出光谱,中心波长为 1552.778 nm。图 3 所示为频率 11 GHz,功率 26 dBm 的微波调制电压加载在 EOIM 上时的输出光谱,从图中可以清楚地观察到 0 阶光波两边有 1 到 4 阶边频带,1 阶到 4 阶的光频与中心频率分别相差 11 GHz,22 GHz,33 GHz 和 44 GHz,与理论吻合,表明 EOIM 能够实现光波移频,用作多波长光源。

#### 3.2 具有布里渊频移的参考光

EOIM 用于布里渊信号的相干检测时,希望作为参考光的具有布里渊频移的 1 阶光波的强度最大,信噪比最高。由式(8-b)可知,1 阶光波的强度取决于三个因素:入射光的强度、调制深度、直流偏置电压。因

为 EOIM 本身能够承受的最大入射光功率和最大微波调制功率有限,例如实验中使用的 EOIM 承受的最大微波调制功率为 27 dBm,因此,在入射光强度和微波调制功率固定的情况下,可以方便地调节直流偏置电压来改变各阶光波的强度。

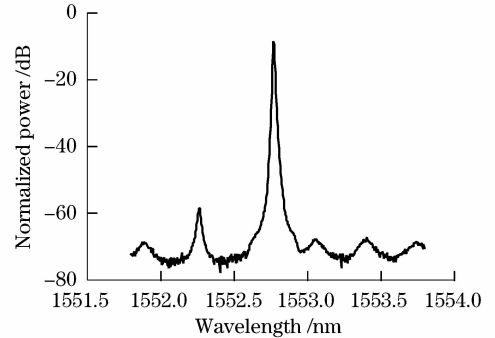


图 2 EOIM 未加调制时的输出光谱

Fig. 2 Output optical spectrum of the EOIM without modulation

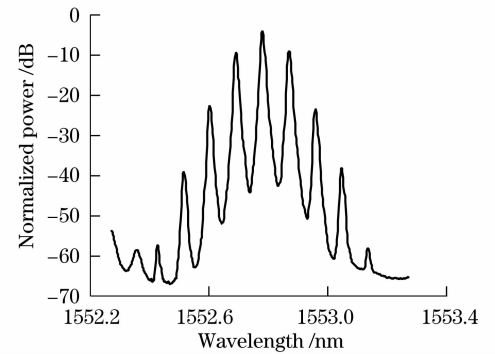


图 3 EOIM 加载 11 GHz 微波调制时的输出光谱

Fig. 3 Output optical spectrum of the EOIM with 11 GHz-microwave modulation

考虑到光波长 1550 nm 处的布里渊频移约为 11 GHz,给 EOIM 加载频率 11 GHz,输出功率 26 dBm 的微波调制,缓慢改变直流偏置电压得到输出光中各阶光强度随偏置电压的变化趋势,如图 4 所示。

由图可见 0 阶,2 阶与 1 阶,3 阶的变化趋势刚好相反,相位相差  $\pi$ ,这与式(8)符合,计算得到此时  $C \approx 0.9$ 。当直流偏置电压达到 6.5 V 时,1 阶光波的强度最大,也即  $\cos(2\varphi_{DC}) = -1, \varphi_{DC} = \pi/2$ ,此时输出光的频谱如图 5 所示,1 阶光强比包括 0 阶在内的其余各阶强度大 20 dB 以上;由(9)式可知此时总的输出光强最小,即噪声本底最低,此时 1 阶光波的信噪比最大。实用时,由于 EOIM 自身的温度特性导致初相位不为 0,调节直流偏置电压使得 EOIM 工作在总的输出光强最小值处,能够获得具有布里渊频移且光强相对最大信噪比最高的参考光,用于布里渊信号的相干检测。

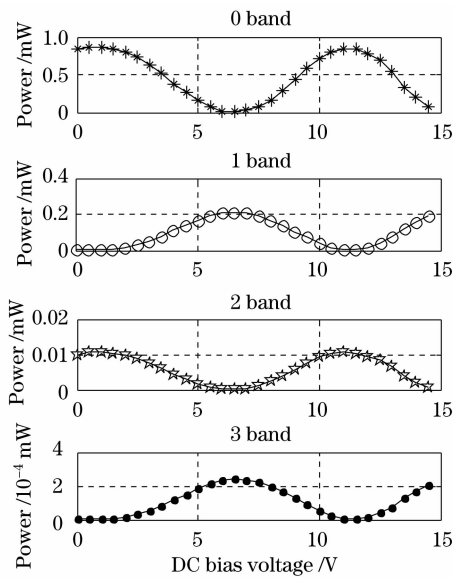


图4 输出光谱中0到3阶光强随直流偏置电压的变化

Fig.4 Optical intensity of 0 to 3 band of the output spectrum versus DC bias voltage

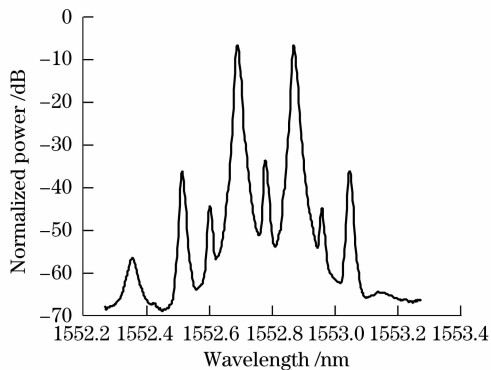


图5 直流偏置电压为6.5 V时EOIM的输出光频谱

Fig.5 Output optical spectrum of the EOIM with the DC bias voltage of 6.5 V

由于铌酸锂晶体自身的物理特性导致调制器的工作点随时间有一定的漂移,实验中发现数十分钟内器件的工作点漂移最大可达2 V,这虽然不影响输出光波的频移值,但输出光功率存在较大的波动,而高精度的布里渊分布式光纤温度传感要求较高的光功率测试精度(约0.013 dB对应1℃),实用中可在EOIM后接一个耦合器分出一小部分光进行光强监控,构成一个反馈控制环路接在调制器的偏置端,通过控制相应物理参量实现偏置电压的精确控制,进而保证电光强度调制器始终工作在总的输出光强最小处,该部分研究将在其他文章中详细报道。

## 4 结 论

铌酸锂波导电光强度调制器可以实现光波移

频,各阶移频光波的强度不仅与电光强度调制器上的微波调制功率有关,而且受制于调制器上的直流偏置电压。用15 Gbit/s 铌酸锂波导电光强度调制器实现了光波长1550 nm处11 GHz的频移,当直流偏置电压为6.5 V时,具有布里渊频移的1阶光波的强度比包括0阶光波在内的其余各阶光强大20 dB以上,并且此时电光强度调制器总的输出光强最小,1阶光波的信噪比最大,可用作布里渊信号相干检测的理想参考光,对于基于布里渊散射的高精度分布式光纤传感技术有重要意义。

## 参 考 文 献

- Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):197~201  
董玉明,张旭苹,路元刚等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 197~201
- Sun An, Chen Jialin, Li Guoyang *et al.*. Detection of spontaneous Brillouin backscattered power in distributed optical fiber sensor system based on high frequency microwave technology [J]. *Chinese. J. Laser*, 2007, **34**(4):503~506  
孙安,陈嘉琳,李国扬等. 基于高频微波技术的分布式光纤传感器布里渊散射信号检测[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):503~506
- Hiroshige Ohno, Hiroshi Naruse, Mitsuru Kihara *et al.*. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor (invited paper) [J]. *Opt. Fiber Technology*, 2001, **7**:45~64
- Luc Thévenaz. Fiber distributed sensing for a more secure society [C]. *Proceeding of the Symposium on Photonics Technologies for 7<sup>th</sup> Framework Program*. 2006, **10**:12~14
- Bao Xiaoyi, DeMerchant M., Brown A *et al.*. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(11):1698~1704
- T. R. Parker, M. Farhadiroushan, V. A. Handerek *et al.*. A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscatter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7):979~981
- K. D. Souza, G. P. Lees, P. C. Wait *et al.*. Diode-pumped landau placzek based distributed temperature sensor utilizing an all-fibre Mach-Zehnder interferometer [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(23):2174~2175
- Kaoru Shimizu, Toshio Kurashima, Tsuneo Horiguchi *et al.*. A new technique to shift lightwave frequency for distributed fiber-optic sensing [C]. *SPIE*, 1992, **1797**:18~30
- V. Lecoecuche, M. W. Hathaway, D. J. Webb *et al.*. 20 km distributed temperature sensor based on spontaneous Brillouin scattering [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10): 1367~1369
- Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1111~1114  
宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):1111~1114
- Shen Jun, Wei Dunkai, Jiang Fengxian *et al.*. Study of spectrum broadening characters with LiTaO<sub>3</sub> phase modulators [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2005, **32**(2):209~211  
沈俊,魏敦楷,蒋凤仙等. LiTaO<sub>3</sub> 相位调制器扩频特性的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 209~211
- Xiang Duanyan, Liu Lanfang, Chen Gang *et al.*. Optical

waveguide phase modulation technology for generating multi-wavelength optical source [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 73~75

向端燕,刘兰芳,陈刚等. 光波导位相调制技术产生多波长光源[J]. 光电工程,2006, **33**(2):73~75

13 Chen Fushen. Theory and Techniques of Integrated Electro-Optic Modulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. 56~57

陈福深. 集成电光调制理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. 56~57