

doi: 10. 3788/gzxb20124111. 1286

# 瑞利布里渊光时域分析系统中电光调制器的理论模型与实验研究

李永倩, 王虎, 李欢, 何青尔

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 瑞利布里渊光时域分析系统能够以非破坏性方式实现单光源、单端工作, 利用强度型电光调制器同时调制脉冲基底和脉冲信号是获得该系统所需连续光和脉冲光的关键技术. 本文理论分析、仿真和实验研究了一种将脉冲信号输入到电光调制器偏置端、微波信号输入到电光调制器射频端同时调制脉冲基底和脉冲信号的新调制方法, 探讨了电光调制器用于瑞利布里渊光时域分析系统时的最佳工作点问题. 结果表明, 当调制脉冲基底和脉冲时分别将电光调制器偏置在传输曲线的谷点和峰点, 并根据实际系统的组成和性能指标要求选择合适的微波调制信号幅度, 可获得满足瑞利布里渊光时域分析系统要求的连续光和脉冲光. 本文的研究结果为瑞利布里渊光时域分析系统的最佳化设计提供了理论依据.

**关键词:** 光纤传感; 光波移频; 电光调制器; 布里渊散射; 脉冲基底调制

**中图分类号:** TN256

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)11-1286-6

## 0 引言

基于布里渊散射的分布式光纤传感技术可以实现温度和应变的长距离连续分布式测量<sup>[1]</sup>, 而且在温度、应变测量上所达到的测量准确度、测量距离和空间分辨率均优于其它分布式光纤传感技术<sup>[2-3]</sup>, 在近 20 年来取得了飞速的发展. 其中, 在基于布里渊光时域分析 (Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA) 的分布式光纤传感系统中, 当从光纤两端入射的脉冲光和连续光的频差满足受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering, SBS) 放大条件时, 频率高的光信号向频率低的光信号转移能量, 通过 SBS 效应对频率低的光信号进行放大. 因此, 该系统接收信号强度大, 测量准确度高, 动态范围宽<sup>[4]</sup>.

在传统的 BOTDA 系统中, 需要从光纤两端入射脉冲光和连续光<sup>[5]</sup> 或者在光纤末端加反射镜实现单光源、单端和单纤工作<sup>[6]</sup>, 这使得 BOTDA 系统在大范围监测场合中应用很不方便, 如果传感光纤在某处断裂将不能获取传感信号. 2011 年, Cui Q 等人提出瑞利 BOTDA 系统, 利用脉冲基底激发的瑞利散射作为连续光与脉冲光发生 SBS 效应, 在 300 m 的普通单模光纤上实现了空间分辨率 3 m、温度分辨率 1 °C 的测量<sup>[7]</sup>.

与传统的 BOTDA 系统相比, 瑞利 BOTDA 系统只需单光源、单端入射光信号, 由于将脉冲基底激发的瑞利散射作为探测光, 即使传感光纤某处出现断点也不影响测量, 而且由于瑞利散射叠加了不同方向的偏振态, 该系统可以有效地降低传感系统的偏振敏感性. 电光调制器 (Electro-Optic Modulator, EOM) 可以实现光波移频, 利用该特性可实现激光扩频<sup>[8]</sup> 和多波长光源<sup>[9]</sup>、产生多倍频毫米波<sup>[10]</sup>, 而且比其它光波移频方法易于产生稳定、高信噪比的移频信号, 满足高精度分布式光纤传感的要求. 在瑞利 BOTDA 系统中利用 EOM 的光波移频特性同时对脉冲基底和脉冲信号进行调制, 产生所需连续光和脉冲光信号.

本文对 EOM 产生瑞利 BOTDA 系统中所需信号的数学模型进行了推导, 讨论了获得瑞利 BOTDA 系统中所需连续光和脉冲光的方法, 探讨了 EOM 用于瑞利 BOTDA 系统时的最佳工作点问题, 仿真和实验研究了利用微波信号对脉冲基底和脉冲信号进行调制时 EOM 的输出特性.

## 1 瑞利 BOTDA 系统中 EOM 调制原理

### 1.1 系统所需光信号

图 1 为瑞利 BOTDA 分布式传感原理图. 在光纤中泵浦光场、斯托克斯 (Stokes) 光场和声波场的

基金项目: 苏州市科技发展计划项目 (No. SYG201013) 和福建省电力有限公司重大科技项目 (No. tz201104) 资助

第一作者: 李永倩 (1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光传感. Email: liyongqian1958@163.com

收稿日期: 2012-03-01; 修回日期: 2012-08-29

相互作用可分为以下两步: 1) 先将经过微波调制的脉冲基底信号入射到光纤中并将其产生的瑞利散射光作为探测光; 2) 从光纤同一端入射的脉冲光由于光纤介质的电致伸缩效应产生相干弹性声波场, 从而形成一个运动的折射率光栅, 由于多普勒效应, 散射光频率下移即产生 Stokes 散射光. 瑞利探测光经过 SBS 效应后会携带沿光纤分布的温度和应变信息, 因此, 通过检测瑞利散射光的强度和频移即可获得沿传感光纤长度分布的温度和应变信息.

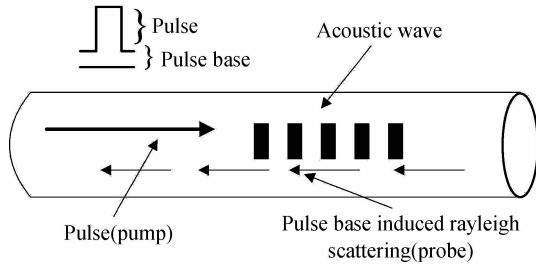


图 1 瑞利 BOTDA 传感原理  
Fig. 1 Sensing principle of Rayleigh BOTDA system

瑞利 BOTDA 系统中脉冲基底和脉冲信号同时由微波信号调制, 所产生的连续光和脉冲光功率主要由 EOM 的工作点和微波调制信号幅度决定, 连续光和脉冲光之间的频差等于布里渊频移, 约为 11 GHz. 在调制过程中, 脉冲基底信号的载波分量被抑制, 产生强度远高于基带的 1 阶双边带信号; 脉冲信号的边带被抑制, 产生基带强度远高于边带的脉冲光信号.

1.2 EOM 强度调制的数学模型

图 2 是马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder, MZ) 干涉仪式强度调制器的结构图. 在一片铌酸锂波导-衬底上应用钛扩散技术制作出一个波导型 MZ 干涉仪, 输入光在第一个 Y 分支处分成两部分, 然后在第二个 Y 分支处又合成一个光波, 由于各个光支路受到不同的相位调制, 所以最终形成强度调制<sup>[11]</sup>.

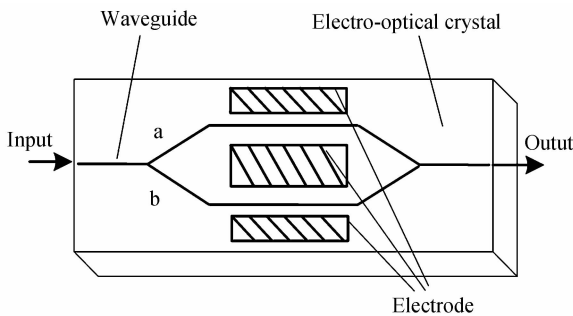


图 2 电光调制器结构  
Fig. 2 Structure of electro-optical modulator

假设在第一个 Y 分支输入端光场的表达式为<sup>[11-12]</sup>

$$E(t) = E_0 \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

则进入两个支路的光场可表示为

$$E_a(t) = E_b(t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \exp(j\omega_0 t) \quad (2)$$

经过第二个分支节点后输出光场为

$$E(t) = \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \{ \exp[j(\omega_0 t + \varphi_a)] + \exp[j(\omega_0 t + \varphi_b)] \} = E_0 \left[ \cos(\omega_0 t + \frac{\varphi_a + \varphi_b}{2}) \cdot \cos(\frac{\varphi_a - \varphi_b}{2}) \right] \quad (3)$$

式中,  $\varphi_a, \varphi_b$  分别为两个支路引起的相移,  $E_0$  为光场的幅度,  $\omega_0$  为光场的角频率. 在式(3)中忽略了两个支路中的损耗, 并假设两个光支路完全对称. 如果通过外电场的作用使得一个支路的相移恰好与另一个支路的相移等值异号, 即  $\varphi_a = -\varphi_b$ , 则式(3)变为

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos(\frac{\Delta\varphi}{2}) = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos(\varphi_a) \quad (4)$$

式中,  $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b = 2\varphi_a$ . 假设加载在 EOM 上的调制信号为  $V = V_m \cos(\omega_m t) + V_i$ , 则

$$\varphi_a = \pi \frac{V}{2V_\pi} = Z \cos(\omega_m t) + \varphi_i \quad (5)$$

式中,  $Z = \pi V_m / 2V_\pi$  为微波调制的调制深度,  $V_m$  为微波调制信号幅度,  $V_\pi$  为 EOM 半波电压,  $\varphi_i$  为调制脉冲信号  $V_i$  产生的相移. 瑞利 BOTDA 系统中 EOM 的调制原理如图 3 所示, 由图可知  $\varphi_i$  可以表

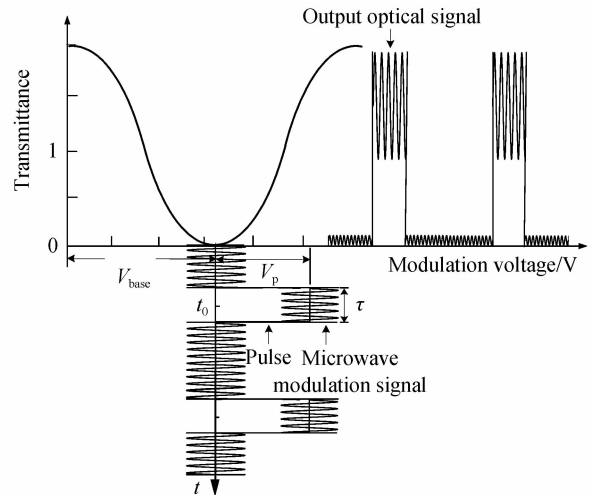


图 3 瑞利 BOTDA 系统中 EOM 调制原理  
Fig. 3 Modulation principle of EOM in Rayleigh BOTDA system

示为<sup>[13]</sup>

$$\varphi_i = \begin{cases} \pi \frac{V_{base}}{2V_\pi}, & t < t_0 - \tau/2, t > t_0 + \tau/2 \\ \pi \frac{V_{base} + V_p}{2V_\pi}, & t_0 - \tau/2 \leq t \leq t_0 + \tau/2 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $V_{base}$  为偏置电压,  $V_p$  为脉冲调制电压幅度,  $\tau$  为脉冲宽度. 式(4)可改写为

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos[Z \cos(\omega_m t) + \varphi_i] \quad (7)$$

将式(7)按贝塞尔函数展开,得

$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) \left\{ [J_0(Z) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot J_{2n}(Z) \cos(2n\omega_m t)] \cos \varphi_i - [2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot J_{2n+1}(Z) \cos((2n+1)\omega_m t)] \sin \varphi_i \right\} \quad (8)$$

由式(6)、(8)可知,当  $V_{\text{base}} = V_\pi$  时,输出光谱中只有奇次分量;当  $V_{\text{base}} = V_p = V_\pi$  时,输出光谱中只有偶次分量.式(8)展开得 0 到 3 阶光波边带频谱分量分别为

$$\begin{cases} 0 \text{ 阶: } \cos(\omega_0 t) J_0(Z) \cos \varphi_i \\ 1 \text{ 阶: } -J_1(Z) [\cos(\omega_0 + \omega_m)t + \cos(\omega_0 - \omega_m)t] \sin \varphi_i \\ 2 \text{ 阶: } -J_2(Z) [\cos(\omega_0 + 2\omega_m)t + \cos(\omega_0 - 2\omega_m)t] \cos \varphi_i \\ 3 \text{ 阶: } J_3(Z) [\cos(\omega_0 + 3\omega_m)t + \cos(\omega_0 - 3\omega_m)t] \sin \varphi_i \end{cases} \quad (9)$$

各阶边带对应的光强分别为

$$\begin{cases} 0 \text{ 阶: } \frac{1}{2} J_0^2(Z) [1 + \cos(2\varphi_i)] \\ 1 \text{ 阶: } \frac{1}{2} J_1^2(Z) [1 - \cos(2\varphi_i)] \\ 2 \text{ 阶: } \frac{1}{2} J_2^2(Z) [1 + \cos(2\varphi_i)] \\ 3 \text{ 阶: } \frac{1}{2} J_3^2(Z) [1 - \cos(2\varphi_i)] \end{cases} \quad (10)$$

式中,为书写方便略去了符号  $E_0$ . 由式(10)可知,各阶光谱分量的光强取决于调制深度  $Z$  对应的第一类 Bessel 函数值和脉冲信号产生的相位  $\varphi_i$ .

## 2 瑞利 BOTDA 系统 EOM 最佳工作点

### 2.1 调制脉冲基底时 EOM 最佳工作点

在瑞利 BOTDA 系统中,利用 EOM 对脉冲基底信号进行调制时,需要最大限度地抑制光载波,产生强度远高于基带的 1 阶双边带光信号,也就是说,应尽可能大地抑制 0 阶光强,增大 1 阶光强.

由式(10)可知,在  $J_1^2(Z)/J_0^2(Z)$  为定值时,若  $\varphi_i$  取  $0.5\pi$ ,则 1 阶与 0 阶光强比值最大;在  $\varphi_i$  为定值时,  $J_1^2(Z)/J_0^2(Z)$  越大,1 阶与 0 阶光强比值越大.由图 3 分析可知,微波调制信号幅度  $V_m$  应不大于半波电压  $V_\pi$ ,故由调制深度定义可得  $Z \leq 1.57$ .图 4 给出了不同阶贝塞尔函数与 0 阶贝塞尔函数平方比值随  $Z$  的变化曲线.由图 4 可知,  $J_1^2(Z)/J_0^2(Z)$  随  $Z$  单调增大,当  $Z$  取 1.57 时达到最大值.因此,在调制脉冲基底信号时,为了最大限度地抑制光载波和获得最大的 1 阶边带光强,需通过调节脉冲信号和微波调制信号幅值,使  $\varphi_i = 0.5\pi, Z \approx 1.57$ . 此时脉

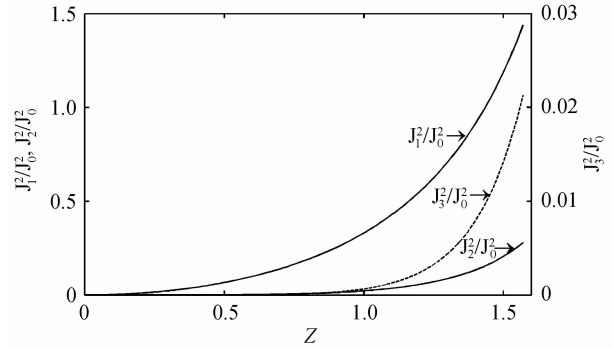


图 4 不同阶贝塞尔函数与 0 阶贝塞尔函数平方比值与调制深度  $Z$  的关系

Fig. 4 Ratios of squared Bessel function and 0 order Bessel function with modulation depth  $Z$

冲基底信号  $V_{\text{base}}$  等于半波电压  $V_\pi$ , EOM 被偏置在传输曲线的谷点,微波调制信号幅度  $V_{\text{mbase}}$  近似为  $V_\pi$ .

### 2.2 调制脉冲时 EOM 最佳工作点

在对脉冲进行调制即  $V_i = V_p$  时,需要最大限度地抑制光边带,产生强度远高于边带的脉冲光信号,也就是说,应尽可能大地抑制 1 阶光强,增大 0 阶光强.

由式(10)可知,在  $J_0^2(Z)/J_1^2(Z)$  为定值时,若  $\varphi_i$  取  $\pi$ ,则 0 阶与 1 阶光强比值最大;在  $\varphi_i$  为定值时,  $J_0^2(Z)/J_1^2(Z)$  越大,0 阶与 1 阶光强比值越大.由图 4 可知,  $Z$  接近于 0 时,  $J_0^2(Z)/J_1^2(Z)$  最大.因此,在调制脉冲时,为了最大限度地抑制 1 阶边带光强和获得最大的 0 阶基带光强,需调节脉冲信号和微波调制信号幅值,使  $\varphi_i = \pi, Z \approx 0$ . 此时,脉冲信号幅度等于半波电压  $V_\pi$ , EOM 被偏置在传输曲线的峰点,微波调制信号幅度  $V_{\text{mpulse}}$  近似为 0.

由以上讨论可知,脉冲基底调制和脉冲调制达到最佳时所要求的微波调制信号幅度不同.事实上,最佳微波调制信号幅度需根据实际瑞利 BOTDA 系统的组成和性能指标要求,通过求解连续光和脉冲光的 SBS 耦合波方程并通过实验验证来确定.本文考虑到各阶贝塞尔函数与零阶贝塞尔函数平方的比值的单调性及 EOM 传输特性对微波信号幅度的限制,通过取平均值的方法确定微波信号幅度,可以在最佳脉冲基底和脉冲调制对微波信号幅度的要求之间达到最好的折衷,即取  $V_m = (V_{\text{mbase}} + V_{\text{mpulse}})/2 \approx V_\pi/2$ ,此时  $Z \approx 0.79, J_1^2(Z)/J_0^2(Z) \approx 0.18$ . 故当微波信号幅度  $V_m \approx V_\pi/2$  时,脉冲基底信号在 EOM 的谷点调制,其光载波被有效抑制,产生强度远高于基带的双边带光信号;脉冲信号在 EOM 的峰点调制,其 1 阶边带被有效抑制,产生基带强度远高于边

带的脉冲光信号. 在图 4 中还给出了  $J_3^2(Z)/J_0^2(Z)$  和  $J_2^2(Z)/J_0^2(Z)$  随  $Z$  的变化曲线, 由相应曲线可知,  $J_3^2(Z)/J_0^2(Z) \ll J_1^2(Z)/J_0^2(Z)$ ,  $J_2^2(Z)/J_0^2(Z) \ll 1$ , 故已调光信号的 3 阶边带和 2 阶边带对系统性能影响很小.

### 3 实验仿真

图 5 为瑞利 BOTDA 系统电光调制实验装置, 图中窄谱光源为工作波长 1 550 nm 的分布反馈激光器 (Distributed Feedback Laser Diode, DFB-LD). 激光器发出的光经偏振控制器 (Polarization Controller, PC) 进入 EOM, 调整 PC 使入射到 EOM 输入端光的偏振态与 EOM 的偏振轴重合. 将微波信号输入到 EOM 的射频端, 周期、脉宽可调的脉冲信号输入到 EOM 的偏置端, 二者共同对输入光波进行强度调制, 产生具有两个边带的输出光信号, 最后通过光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 观察输出信号光谱.

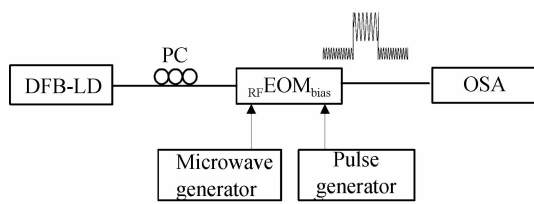


图 5 瑞利 BOTDA 系统电光调制实验装置

Fig. 5 Experimental setup of electro-optic modulation in Rayleigh BOTDA system

依据第 1、2 节的原理及讨论, 利用 Optisystem 软件对瑞利 BOTDA 系统所需光信号进行了仿真, 所选 EOM 模型为双驱动差分 MZ 调制器, 偏置电压和射频调制信号分别加到 MZ 干涉仪的两臂, 在理想消光比下 EOM 输出光信号为<sup>[14]</sup>

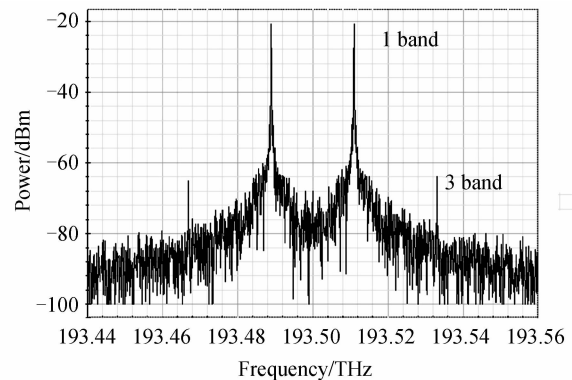
$$E(t) = E_0 \cos(\omega_0 t) \cos \left[ \pi \frac{2V_{RF}}{2V_\pi} \cos(\omega_m t) + \pi \frac{2V_b}{2V_\pi} \right],$$

令

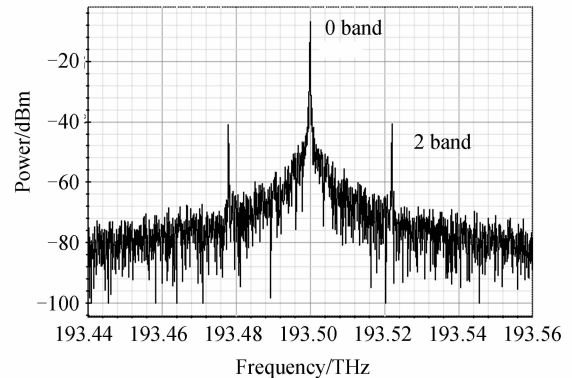
$$Z = \pi 2V_{RF} / 2V_\pi, \varphi_i = \pi 2V_b / 2V_\pi,$$

则 EOM 输出光信号与 1.2 讨论中式 (7) 一致, 即仿真软件中 MZ 调制器中两臂的微波调制信号幅度之和与 1.2 中  $V_m$  相等, 两臂偏置电压幅度之差与 1.2 中的  $V_i$  相等. 由于该仿真软件中 EOM 模型的偏置电压只能取一些离散的值, 在仿真时做了下述合理近似: 在 EOM 谷点对脉冲基底信号进行调制时, 将两臂偏置电压之差设置为半波电压  $V_\pi$ ; 在 EOM 峰点对脉冲信号进行调制时, 将其偏置电压之差设置为  $2V_\pi$ . 首先由 DFB-LD 产生波长为 1 550.39 nm、

线宽为 10 MHz 的连续光载波, 进入消光比为 60 dB、半波电压为 5 V 的 EOM. 仿真采用的微波信号频率为 11 GHz, 幅值为 1.26 V,  $Z=0.79$ . 对脉冲基底进行调制时, 取直流偏压为半波电压, EOM 输出频谱如图 6(a) 所示, 图中噪音由仿真软件中激光器自身的噪音产生. 由图可见, 脉冲基底调制时光载波被抑制, 产生了强度远高于基带的双边带信号, 1 阶边带比包括基带信号在内的其余各阶边带光强大 40 dB 以上, 光谱能量主要集中在两个频率间隔为 22 GHz 的 1 阶边带上.



(a) Spectrum of modulated pulse base



(b) Spectrum of modulated pulse

图 6 EOM 输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of EOM

对脉冲进行调制时, 取直流偏压为 2 倍的半波电压, EOM 输出频谱如图 6(b) 所示. 由图可见, 1 阶光边带被抑制, 产生了强度远高于边带的脉冲光信号, 基带信号比各阶边带光强大 32 dB 以上, 光谱能量主要集中在基带上.

由上述仿真结果可知, 合理设置脉冲信号和微波调制信号幅值可获得瑞利 BOTDA 系统所需连续光和脉冲光, 与第 2 节的讨论一致. 需要指出的是, 分别利用图 6(a) 中 1 阶上、下边带和图 6(b) 中 0 阶基带信号可分别构成损耗型、增益型 BOTDA 系统<sup>[4]</sup>, 同时利用图 6(a) 中 1 阶双边带和图 6(b) 中 0 阶基带信号可构成差分参量放大 BOTDA 系统<sup>[15]</sup>, 图中的高阶边带可在光域或电域滤除.

## 4 实验验证

为了测试在调制脉冲基底和脉冲时 EOM 的输出光谱,本文搭建了图 5 所示实验系统.实验中光源使用波长可调 DFB 半导体激光器,其中心波长为 1 550.12 nm,线宽为 1.6 MHz,输出功率为 18 mW;EOM 为 10 Gb/s 铌酸锂光强度调制器,其直流半波电压为 6.3 V,射频半波电压为 5.8 V;光谱分析仪由法布里珀罗干涉仪和光谱分析控制器组成,其自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 10 GHz.将频率为 800 MHz、幅度为 0.76 V 的微波调制信号加载到 EOM 的射频端,通过调节 EOM 偏压控制器的工作状态实现 EOM 工作点的转换.

图 7(a)、7(b)分别为将 EOM 偏置在谷点和峰点,即调制脉冲基底和脉冲时的输出光谱.由于实验用微波信号源输出幅度有限,实验中调制深度仅为  $Z \approx 0.2$ ,远小于 0.79,故未能显示高阶边带光谱.由图 7(a)可见,光载波被有效抑制,产生了强度远高于基带的 1 阶双边带信号,光谱能量主要集中在两个频率间隔为 1.6 GHz 的 1 阶边带上;由图 7(b)可见,1 阶以上边带被有效抑制,产生了强度远高于其他边带的基带信号.实验结果与理论和仿真分析一致.

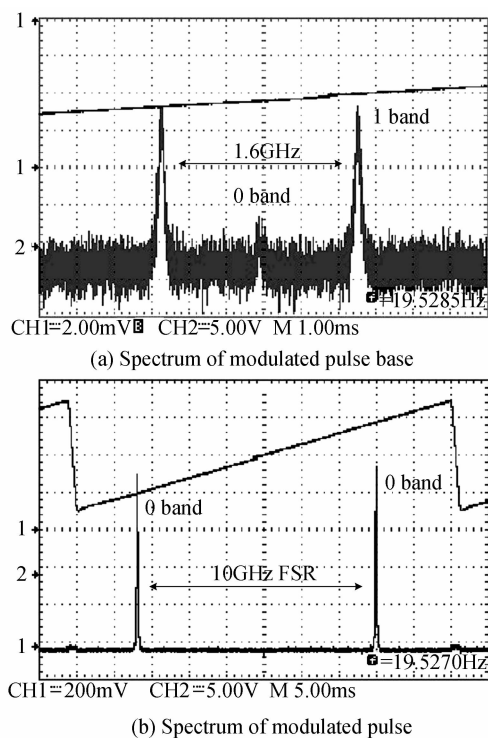


图 7 EOM 输出光谱

Fig. 7 Output spectrum of EOM

## 5 结论

本文建立了 EOM 强度调制的数学模型,仿真

和实验研究了将脉冲信号输入到偏置端、微波信号输入到射频端同时调制脉冲基底和脉冲信号时 EOM 的最佳工作点设置问题及其输出特性.结果表明,当脉冲基底信号在 EOM 的谷点调制、调制深度  $Z$  约为 1.57 时,光载波被有效抑制,1 阶与 0 阶光强的比值最大;当脉冲信号在 EOM 的峰点调制、 $Z$  约为 0 时,1 阶边带被有效抑制,0 阶与 1 阶光强的比值最大;通过取平均值的方法取  $Z \approx 0.79$ ,可以获得满足瑞利 BOTDA 系统要求的连续光和脉冲光;微波信号的最佳调制幅度需根据实际瑞利 BOTDA 系统的组成和性能指标要求来确定.此结果不但为瑞利 BOTDA 系统的最佳化设计提供了理论依据,而且对分析和设计不同结构的受激布里渊分布式传感系统具有重要的借鉴意义.

### 参考文献

- [1] BAO X, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152-4187.
- [2] BAO X, LI W, LI Y, *et al.* Distributed fiber sensors based on stimulated Brillouin scattering with centimeter spatial resolution[C]. *SPIE*, 2009, **7158**: 715802-12.
- [3] JAMIOY G, JOSE M. Decimeter spatial resolution by using differential pre-excitation BOTDA pulse technique[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(10): 2344-2348.
- [4] HORIGUCHI T, TATEDA M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, **7**(8): 1170-1176.
- [5] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1296-1297.
- [6] NIKLES M, THEVENAZ L, ROBERT P A. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**(10): 758-760.
- [7] CUI Q, PAMUKCU S, LIN A, *et al.* Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, **11**(2): 399-403.
- [8] SHEN Jun, WEI Dun-kai, JIANG Feng-xian, *et al.* Study of spectrum broadening characters with LiTaO<sub>3</sub> phase modulators [J]. *Chinese Journal of 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.
- [9] XIANG Duan-yan, LIU Lan-fang, 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.
- [10] YUAN Yan, QIN Yi. Frequency sextupling technique using two cascaded dual-electrode Mach-Zehnder modulators[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(10): 1005004-1-5. 袁燕, 秦毅. 基于串联双电极马赫-曾德尔调制器的六倍频技术[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1005004-1-5.
- [11] 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.
- [12] ZHOU Hui-juan, MENG Zhou, LIAO Yi. Frequency shift characteristics analysis of LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009,

- 36(4): 901-905.  
周会娟, 孟洲, 廖毅. 铌酸锂波导电光强度调制器的移频特性[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 901-905.
- [13] ZOU L, BAO X, WAN Y, *et al.* Coherent probe-pump-based Brillouin sensor for centimeter-crack detection [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(4): 370-372.
- [14] WEN Y J, NIRMALATHAS A, LEE D S. RZ/CSRZ-DPSK and chirped NRZ signal generation using a single-stage dual-electrode Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(11): 2466-2468.
- [15] LI Y, BAO X, DONG Y, *et al.* A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric Amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2621-2626.

## Theoretical Model and Experimental Study of Electro-optic Modulator in Rayleigh BOTDA System

LI Yong-qian, WANG Hu, LI Huan, HE Qing-er

(Department of electronic and communication engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system can be operated with single laser and single end of sensing fiber in a non-destructive way, and the modulation of pulse base and pulse with an intensity-type electro-optic modulator is the key technique for obtaining continuous light and pulse light required by the system. A new modulation method with a pulse applied to the bias port of electro-optic modulator and a microwave applied to the RF port of the electro-optic modulator to modulate the pulse base and pulse is analyzed theoretically, simulated with computer and studied experimentally in this paper, and the optimal operating point of electro-optic modulator in Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system is discussed. The results show that if the operating point of electro-optic modulator is set at the valley and peak of its transmission curve respectively and the amplitude of microwave modulation signal is chosen appropriately according to the configuration and performance of the actual system, then the continuous light and pulse light meeting the requirements of Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system can be obtained when the pulse base and pulse are to be modulated. The results of this study can provide a theoretical basis for the optimal design of Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system.

**Key words:** Optical fiber sensing; Optical frequency shift; Electro-optic modulator; Brillouin scattering; Pulse base modulation