

# 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术

张立欣, 李永倩, 安 琪, 李晓娟

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(BOTDA)存在信号小、噪声大的问题,会导致系统空间分辨率与信噪比难以同时提高。将脉冲编码技术引入瑞利 BOTDA 系统,可在不降低空间分辨率的前提下有效地提高系统信噪比和布里渊频移测量精度。分析了瑞利 BOTDA 温度传感系统的原理,介绍了 Golay 互补序列的特性,并给出了单脉冲和编码脉冲系统的信噪比表达式;搭建了单脉冲和脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感系统,测量了单脉冲瑞利 BOTDA 系统的温度传感特性及脉冲编码瑞利 BOTDA 系统的空间分辨率和温度测量精度。实验结果表明,由瑞利 BOTDA 系统获得的布里渊频移与温度呈良好的线性关系,温度系数为  $(1.109 \pm 0.010) \text{ MHz} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;当采用 10 ns 脉冲宽度、64 bit 格雷编码时,在 1.77 km 光纤的加温段上实现了空间分辨率为 1 m、温度测量精度为 1.39 °C 的传感测量。

**关键词** 光纤光学; 布里渊光时域分析; 单端结构; 瑞利散射; 脉冲编码; 格雷互补序列

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1106004

## Temperature Sensing Technology Based on Rayleigh Brillouin Optical Time Domain Analysis with Pulse Coding

Zhang Lixin, Li Yongqian, An Qi, Li Xiaojuan

*Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University,  
Baoding, Hebei 071003, China*

**Abstract** Spatial resolution and signal-to-noise ratio are difficult to be improved at the same time due to the small signal and big noise in Rayleigh Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system. A technique of pulse coding is introduced into Rayleigh BOTDA system, and then the signal-to-noise ratio and Brillouin frequency shift measurement accuracy of the system can be improved effectively without decreasing spatial resolution. The principle of the temperature sensing system based on Rayleigh BOTDA is analyzed. The characteristic of Golay complementary sequence is introduced and the expressions of the signal-to-noise ratio between single pulse system and coded pulse system are achieved. Rayleigh BOTDA temperature sensing systems of single pulse and coded pulse are constructed. The temperature sensing characteristic of single pulse system and the spatial resolution and the accuracy of temperature measurement of coded pulse system are measured. The experimental results show that the Brillouin frequency shift obtained by the Rayleigh BOTDA system has a linear relationship with temperature, and the temperature coefficient is  $(1.109 \pm 0.010) \text{ MHz} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ . The spatial resolution of 1 m and temperature accuracy of 1.39 °C are obtained on the heated section of 1.77 km fiber when Golay code is 64 bit and the pulse width is 10 ns.

**Key words** fiber optics; Brillouin optical time domain analysis; single-ended structure; Rayleigh scattering; pulse coding; Golay complementary sequence

**OCIS codes** 060.2370; 290.5900; 290.5870

**收稿日期:** 2017-03-31; **收到修改稿日期:** 2017-07-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(61377088)、河北省自然科学基金(F2014502098)、国家自然科学基金青年基金(51407074, 51607066)、中央高校基本科研业务费专项基金(2016XS104)

**作者简介:** 张立欣(1989—),女,博士研究生,主要从事光通信与光传感技术方面的研究。E-mail: zhanglxmail@126.com

**导师简介:** 李永倩(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光通信与光传感技术方面的研究。

E-mail: liyq@ncepu.edu.cn(通信联系人)

# 1 引 言

基于布里渊频移(BOTDA)的分布式光纤温度与应变传感技术是一种新型传感技术<sup>[1-2]</sup>,具有一次测量可获取沿整个光纤被测量场分布信息、精度高、定位准确、测量距离可达  $10^5$  m 量级等优点<sup>[3]</sup>,在电力、石油、水利等行业的大型工程结构健康状况的在线监测和故障点定位中具有广阔的应用前景。

传统 BOTDA 系统需在光纤两端分别注入相向传输的抽运光和探测光,当抽运光与探测光的频率差为布里渊频移时,传感光纤中会出现受激布里渊散射(SBS)现象,通过直接检测经 SBS 作用后的探测光即可实现分布式温度/应变的测量。但是,传统 BOTDA 系统结构复杂,不适合用于大范围测量场合,且若光纤发生断裂便无法进行检测,可靠性低。因此,无需探测光支路、在光纤发生断裂时仍然能够进行检测的单端结构 BOTDA 系统以其独特的优势得到了广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

瑞利 BOTDA 系统<sup>[4]</sup>是一种非破坏性的单端结构 BOTDA 传感系统,在传感光纤发生断裂时仍然能够进行检测。该系统以微波调制脉冲基底产生的背向瑞利散射光作为探测光,相对于传统 BOTDA 系统,探测光功率较小,SBS 作用较小,存在信号小、噪声大的问题。增加脉冲宽度可增大信号强度,进而提高系统信噪比,但会降低系统空间分辨率,系统空间分辨率与信噪比相互制约,难以同时提高。脉冲编码技术<sup>[6-8]</sup>可在不降低空间分辨率的前提下提高入纤功率,进而提高系统信噪比和测量精度;常用的编码序列为基于相关运算的序列和线性组合序列,其中最具代表性的相关运算序列和线性组合序列分别是 Golay 互补序列<sup>[7]</sup>和 Simplex 序列<sup>[8]</sup>。

针对空间分辨率与测量精度之间的矛盾,将脉冲编码技术引入瑞利 BOTDA 系统中,首先分析了瑞利 BOTDA 温度传感系统的原理;接着分析了 Golay 互补序列的特性,并对比了单脉冲和编码脉冲瑞利 BOTDA 系统的信噪比;最后设计并搭建了单脉冲和脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感系统,对瑞利 BOTDA 系统的温度传感特性进行测量,并在  $50\text{ }^\circ\text{C}$  温度下对脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感系统的性能进行分析。

## 2 理论分析

### 2.1 瑞利 BOTDA 温度传感系统原理

瑞利 BOTDA 温度传感系统原理示意图如图 1 所示, $I_p^0$  为脉冲抽运光在传感光纤  $z=0$  处的光强, $I_b^0$  为微波调制脉冲基底 1 阶边带在传感光纤  $z=0$  处的光强, $I_R$  为微波调制脉冲基底 1 阶边带在传感光纤中产生的背向瑞利散射光的光强。经频率在布里渊频移附近的微波调制脉冲基底光和未经微波调制的传感脉冲光先后进入传感光纤,在光纤中,经微波调制的脉冲基底光的 0 阶基带通过电致伸缩效应预激发声波场,微波调制脉冲基底光的 1 阶边带产生的背向瑞利散射光作为探测光,未经微波调制的脉冲光作为抽运光,两者在传感光纤中发生 SBS 作用,瑞利探测光经过 SBS 作用后会携带沿光纤分布的温度信息,因此,通过检测瑞利探测光相对抽运光的频移即可获得沿传感光纤长度分布的温度信息。

传感脉冲光与微波调制脉冲基底 1 阶边带产生的瑞利散射光之间的 SBS 作用可以由稳态耦合波方程组描述<sup>[9]</sup>,即

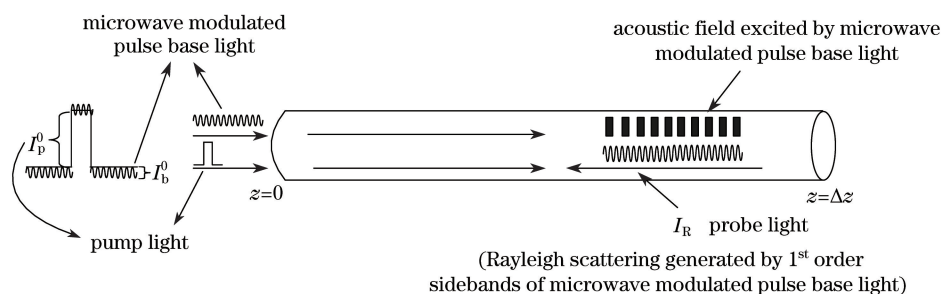


图 1 瑞利 BOTDA 温度传感系统原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of Rayleigh BOTDA temperature sensing system

$$\frac{dI_p}{dz} = -gI_R I_p - \alpha I_p, \quad (1)$$

$$\frac{dI_R}{dz} = -gI_R I_p + \alpha I_R, \quad (2)$$

式中  $I_p$  为传感脉冲光强,  $\alpha$  为光纤衰减系数,  $g$  为布里渊增益系数。

微波调制脉冲基底 1 阶边带在光纤某点 ( $z$  处) 的瑞利散射光强为在光纤中  $[z, L]$  范围内各点处产生的瑞利散射光强的叠加, 可以表示为<sup>[9]</sup>

$$I_R(z) = \frac{\alpha_s S}{2\alpha} I_b^0 \{ \exp(-\alpha z) - \exp[-\alpha(2L - z)] \}, \quad (3)$$

式中  $\alpha_s$  为瑞利散射系数,  $S$  为背向瑞利散射光捕获系数,  $L$  为传感光纤长度。

在瑞利 BOTDA 传感系统中, 传感光纤中发生的 SBS 作用会引起瑞利散射光功率变化, 因此忽略光纤的损耗, 在传感光纤始端检测到的散射光功率为

$$P_R(z, \nu) \approx \frac{\alpha_s S A_{\text{eff}}}{2\alpha} I_b^0 [1 - \exp(-2\alpha L)] \exp \left[ \int_z^{z+\Delta z} -g(z', \nu) I_p(z', \nu) dz' \right], \quad (4)$$

式中  $A_{\text{eff}}$  为纤芯的有效面积;  $\Delta z$  为空间分辨率最小单元对应的光纤长度;  $\nu = \nu_s - \nu_p + \nu_B$  为包含布里渊频移  $\nu_B$  的失谐参量,  $\nu_s$  为探测光频率,  $\nu_p$  为抽运光频率。

使传感光纤保持松弛状态, 可忽略应变对布里渊频移的影响, 此时布里渊频移  $\nu_B$  与温度  $T$  的关系可以表示为<sup>[10]</sup>

$$\nu_B = \nu_{B0} + C_{\nu T}(T - T_0), \quad (5)$$

式中  $T_0$  为参考温度,  $C_{\nu T}$  为布里渊频移的温度系数,  $\nu_{B0}$  为参考温度下的布里渊频移。

根据 (5) 式和  $\nu$  与  $\nu_B$  的关系, 当光纤上的温度发生变化时, 光纤的  $\nu_B$  会发生相应的变化, 同时会引起  $P_R$  的变化, 因此, 通过测量散射功率谱即可实现对温度信息的检测。

## 2.2 Golay 互补序列

Golay 互补序列是两个由 1 和 -1 组成的序列组, 设  $A_k$ 、 $B_k$  为一对长度为  $N$  的 Golay 互补序列, 根据互补序列的频域特性, 它们自相关函数的和为单位冲击函数 ( $\delta$  函数) 的整数倍, 可以表示为<sup>[11-12]</sup>

$$A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k = 2N\delta_k, \quad \delta_k = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\otimes$  为相关运算符号。

Golay 互补序列为双极性互补序列, 而在光纤传感系统中仅能传输单极性光脉冲信号, 因此需要将双极性的互补序列转换成单极性的正脉冲进行传送。将  $A_k$  和  $B_k$  分别分解成编码脉冲  $U_{k1}$ 、 $U_{k2}$  和  $W_{k1}$ 、 $W_{k2}$ , 则  $A_k$ 、 $B_k$  可以表示为

$$A_k = U_{k1} - U_{k2}, \quad B_k = W_{k1} - W_{k2}, \quad (7)$$

$$\text{式中 } U_{k1} = \begin{cases} 1, & A_k = 1 \\ 0, & A_k = -1 \end{cases}, U_{k2} = \begin{cases} 0, & A_k = 1 \\ 1, & A_k = -1 \end{cases}, W_{k1} = \begin{cases} 1, & B_k = 1 \\ 0, & B_k = -1 \end{cases}, W_{k2} = \begin{cases} 0, & B_k = 1 \\ 1, & B_k = -1 \end{cases}.$$

由 (7) 式可知, Golay 互补序列在光纤中传输时需转化为单极性正脉冲, 因此为获得一组编码序列的实验结果需进行 4 次实验测量。

## 2.3 系统信噪比

由第 2.1 节的分析可知, 单脉冲瑞利 BOTDA 传感系统获得的不含噪声的理想信号为  $P_R(z, \nu)$ ,  $P_R(z, \nu)$  不仅是  $\nu$  的函数, 还是光纤位置  $z$  的函数, 因此雪崩二极管 (APD) 探测器的输出光电流  $i(z, \nu) = MRP_R(z, \nu)$ , 其中  $M$  为 APD 探测器的平均倍增因子,  $R$  为 APD 探测器的响应度。为了简化计算, 下述分析中不再写出变量  $\nu$ 。考虑到探测器的噪声, 可将 APD 探测器检测到的含噪声的光电流表示为

$$I(z) = i(z) + e_{\text{sh}}(z) + e_{\text{th}}, \quad (8)$$

式中  $e_{sh}(z)$  和  $e_{th}$  分别为单脉冲瑞利 BOTDA 系统经 APD 探测器检测到的与散粒噪声和热噪声相关的电流波动。散粒噪声和热噪声均为不相关的零均值随机噪声,  $e_{sh}(z)$  和  $e_{th}$  的方差分别为  $\sigma_{sh}^2 = 2qBF(M)MRP_R(z)$  和  $\sigma_{th}^2 = 4kTB/R_L$ , 其中  $q$  为电子电荷,  $B$  为探测器的带宽,  $F(M)$  为探测器的过剩噪声系数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $R_L$  为探测器的负载电阻。

单脉冲瑞利 BOTDA 系统的信噪比可表示为

$$R_{SN} = \frac{[MRP_R(z)]^2}{4kTB/R_L + 2qBMRF(M)P_R(z)} \quad (9)$$

$U_{k1}$  在瑞利 BOTDA 传感系统中产生的不含噪声的理想信号为  $C_{U_{k1}}(z) = \sum_{n=0}^{N-1} U_{k1} P_R(z - nV_g T_c/2)$ , 其中  $T_c$  为码元周期即传感脉冲宽度,  $N$  为 Golay 编码位数,  $V_g$  为光在光纤中传播的群速度, 则 APD 探测器探测到的电流  $i_{U_{k1}}(z) = MRC_{U_{k1}}(z)$ 。考虑到探测器的噪声, APD 探测器检测到的含噪声的光电流可表示为

$$I_{U_{k1}}(z) = i_{U_{k1}}(z) + e_{U_{k1s}}(z) + e_{U_{k1t}}, \quad (10)$$

式中  $e_{U_{k1s}}(z)$  和  $e_{U_{k1t}}$  分别为脉冲编码瑞利 BOTDA 系统经 APD 探测器检测到的与散粒噪声和热噪声相关的电流波动,  $e_{U_{k1s}}(z)$  和  $e_{U_{k1t}}$  的方差分别为  $\sigma_{U_{k1s}}^2 = 2qBMRF(M)K_{U_{k1}}P_R(z)$  和  $\sigma_{U_{k1t}}^2 = 4kTB/R_L$ , 其中  $K_{U_{k1}}$  为  $U_{k1}$  序列中 1 的个数。

同理, 可以得到  $U_{k2}$  在瑞利 BOTDA 传感系统产生的经 APD 探测器探测到的含噪声的光电流为

$$I_{U_{k2}}(z) = i_{U_{k2}}(z) + e_{U_{k2s}}(z) + e_{U_{k2t}}, \quad (11)$$

式中  $e_{U_{k2s}}(z)$  和  $e_{U_{k2t}}$  分别为脉冲编码瑞利 BOTDA 系统经 APD 探测器检测到的与散粒噪声和热噪声相关的电流波动,  $e_{U_{k2s}}(z)$  和  $e_{U_{k2t}}$  的方差分别为  $\sigma_{U_{k2s}}^2 = 2qBMRF(M)K_{U_{k2}}P_R(z)$  和  $\sigma_{U_{k2t}}^2 = 4kTB/R_L$ , 其中  $K_{U_{k2}}$  为  $U_{k2}$  序列中 1 的个数。

经  $A_k$  序列编码后 APD 探测器检测到的含噪声的光电流为

$$I_{A_k}(z) = I_{U_{k1}}(z) - I_{U_{k2}}(z) = i_{U_{k1}}(z) + e_{U_{k1s}}(z) + e_{U_{k1t}} - i_{U_{k2}}(z) - e_{U_{k2s}}(z) - e_{U_{k2t}} = MR \sum_{n=0}^{N-1} A_k P_R(z - nV_g T_c/2) + i_{A_s}(z) + i_{A_t}, \quad (12)$$

式中  $i_{A_s}(z) = e_{U_{k1s}}(z) - e_{U_{k2s}}(z)$ ,  $i_{A_t} = e_{U_{k1t}} - e_{U_{k2t}}$ 。  $i_{A_s}(z)$  和  $i_{A_t}$  的方差可以分别表示为  $\sigma_{A_s}^2 = \sigma_{U_{k1s}}^2 + \sigma_{U_{k2s}}^2 \approx 2qBMRF(M)NP_R(z)$ ,  $\sigma_{A_t}^2 = \sigma_{U_{k1t}}^2 + \sigma_{U_{k2t}}^2 = 8kTB/R_L$ 。

同理, 经  $B_k$  序列编码后 APD 探测器检测到的含噪声的光电流为

$$I_{B_k}(z) = I_{W_{k1}}(z) - I_{W_{k2}}(z) = MR \sum_{n=0}^{N-1} B_k P_R(z - nV_g T_c/2) + i_{B_s}(z) + i_{B_t}, \quad (13)$$

式中  $i_{B_s}(z) = e_{W_{k1s}}(z) - e_{W_{k2s}}(z)$ ,  $i_{B_t} = e_{W_{k1t}} - e_{W_{k2t}}$ ,  $i_{B_s}(z)$  和  $i_{B_t}$  的方差可以分别表示为  $\sigma_{B_s}^2(z) = \sigma_{W_{k1s}}^2(z) + \sigma_{W_{k2s}}^2(z) \approx 2qBMRF(M)NP_R(z)$ ,  $\sigma_{B_t}^2 = \sigma_{W_{k1t}}^2 + \sigma_{W_{k2t}}^2 = 8kTB/R_L$ 。

热噪声和散粒噪声均为不相关的零均值随机噪声, 解码结果可表示为<sup>[13]</sup>

$$X(z) = I_{A_k}(z) \otimes A_k(z) + I_{B_k}(z) \otimes B_k(z) = 2NMRP_R(z, v) + 16kTBN/R_L + 4qBMF(M)RN^2P_R(z). \quad (14)$$

因此, 脉冲编码瑞利 BOTDA 系统的信噪比可以表示为

$$R_{SNC} = \frac{[2NMRP_R(z)]^2}{16kTBN/R_L + 4qBMF(M)RN^2P_R(z)} \quad (15)$$

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验系统

采用图 2 所示的瑞利 BOTDA 温度传感实验系统对单脉冲瑞利 BOTDA 温度传感系统的温度特性进行标定, 并对脉冲编码瑞利 BOTDA 系统的性能进行测试。

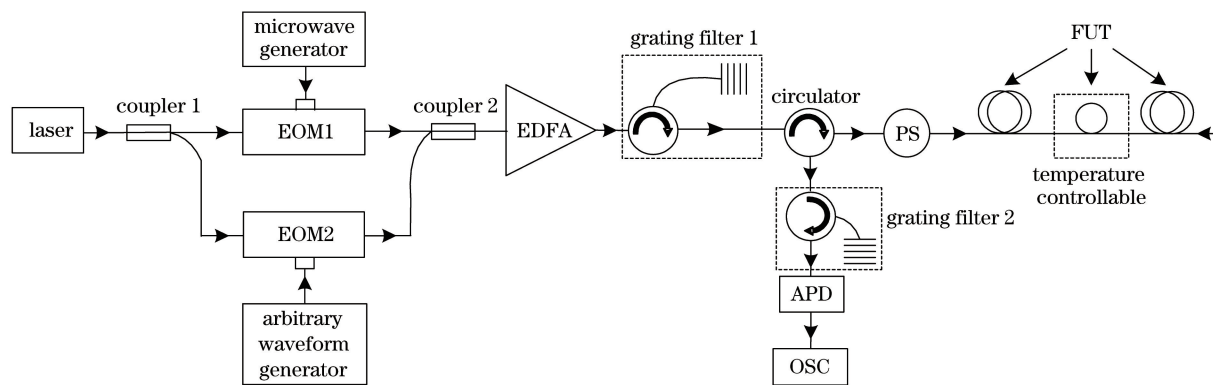


图 2 瑞利 BOTDA 温度传感实验系统

Fig. 2 Experimental system for Rayleigh BOTDA based temperature sensing

中心波长为 1550.12 nm、线宽为 1.86 MHz 的激光器光源的输出经耦合器 1 分成两路：一路经频率在光纤布里渊频移附近可调的微波信号发生器驱动的电光调制器 1 (EOM1) 进行抑制载波的双边带调制, 并以该双边带信号在光纤中产生的背向瑞利散射光作为系统的探测光; 另一路进入任意波形发生器驱动的电光调制器 2 (EOM2), EOM2 对信号进行脉冲调制, 产生的光脉冲用作系统的脉冲抽运光。两路光信号经耦合器 2 合成后由掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行放大, 并由中心波长为 1550.151 nm、带宽为 0.25 nm 的光栅滤波器 1 滤除自发辐射噪声, 再经环行器、扰偏器 (PS) 后进入待测光纤 (FUT)。探测光与抽运光在传感光纤中发生 SBS, 然后经中心波长为 1550.362 nm、带宽为 0.364 nm 的光栅滤波器 2 滤除载波和反斯托克斯分量后进入 APD 探测器, APD 探测器对携带 SBS 信息的作为斯托克斯分量的瑞利散射光信号进行直接强度检测, 最后由示波器 (OSC) 进行数据显示和采集。

实验中, FUT 由长度分别为 70, 800, 900 m 的 3 段 G.652D 标准单模光纤组成, 总长度约为 1.77 km, 将长度为 70 m 的光纤置于恒温水浴中, 进行温度控制。为了通过叠加平均提高系统的信噪比并缩短测量时间, 选择抽运光脉冲的重复频率为 50 kHz。

### 3.2 瑞利 BOTDA 系统温度传感特性

任意波形发生器输出单脉冲信号时, 可进行瑞利 BOTDA 系统温度特性标定。设置传感脉冲宽度为 100 ns、峰值功率为 300 mW, 微波调制脉冲基底功率为 3 mW, 在 10.79~10.94 GHz 范围内以步进 5 MHz 改变微波信号发生器的频率, 以对光纤不同位置处的布里渊散射谱进行扫描测量; 每次测量后, 对探测光的时域波形进行  $10^4$  次叠加平均。在 20~80 °C 温度范围内对布里渊增益谱进行测量, 并根据 3 次测量的实验结果对布里渊频移与温度的关系进行线性拟合, 以得到瑞利 BOTDA 系统的布里渊频移对温度的依赖特性。布里渊频移与温度的关系曲线如图 3 所示, 图中给出了 3 次测量平均后由布里渊增益谱得到的布里渊频移与温度的关系曲线。由图 3 可见, 在 20~80 °C 温度范围内, 布里渊频移随温度的升高呈线性增加, 布里渊频移的温度系数为  $1.109 \text{ MHz} \cdot \text{C}^{-1}$ , 且 3 次测量的拟合误差为  $0.010 \text{ MHz} \cdot \text{C}^{-1}$ , 与传统双端 BOTDA 技术测得的结果 ( $1.200 \text{ MHz} \cdot \text{C}^{-1}$  [12]) 具有良好的一致性。

由于 100 ns 脉冲宽度对应的系统空间分辨率为 10 m, 为了更好地与脉冲编码瑞利 BOTDA 传感系统的性能指标进行对比, 将传感脉冲宽度减小至 50 ns, 此时环境温度为 24.1 °C, 保持脉冲峰值功率为 300 mW、微波调制脉冲基底功率为 3 mW 不变。将恒温水浴温度调整为 50 °C, 在 10.78~10.92 GHz 范围内以 5 MHz 步进改变微波信号发生器的频率, 每次测量对探测光的时域波形进行  $10^4$  次叠加平均。取 780~880 m 光纤上的散射谱测量数据进行洛伦兹拟合, 得到的加温段布里渊频移分布如图 4 所示, 由图 4 可见, 采用 50 ns 脉冲宽度时的空间分辨率约为 5 m, 加温段的布里渊频移约为 10.859 GHz, 频移波动约为 8.91 MHz。

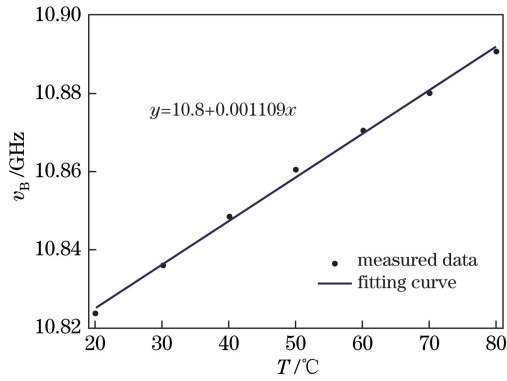


图 3 布里渊频移与温度的关系

Fig. 3 Brillouin frequency shift versus temperature

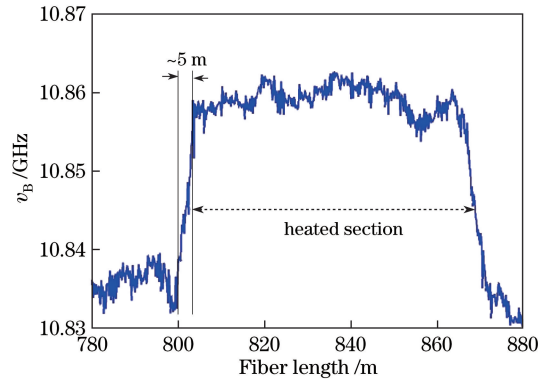


图 4 加热段布里渊频移分布

Fig. 4 Brillouin frequency shift distribution along heated section

### 3.3 脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感

任意波形发生器输出编码脉冲信号时可进行脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感测量,设置编码脉冲宽度为 10 ns, Golay 编码位数为 64, 峰值功率为 150 mW, 微波调制脉冲基底功率为 2.5 mW, 在 10.78~10.92 GHz 范围内以步进 5 MHz 改变微波信号发生器的频率, 以便对光纤不同位置处的布里渊散射谱进行扫描测量。每次测量对探测光的时域波形进行 1000 次叠加平均。

设定恒温水浴温度为 50 °C, 对布里渊增益谱进行测量可以得到整条光纤上的温度信息, 取 780~880 m 光纤上的散射谱测量数据进行洛伦兹拟合, 可得加热段光纤的布里渊频移和功率分布如图 5 所示, 此时的环境温度为 25.9 °C。从图 5(a)中可以看出, 光纤未加热部分的布里渊频移约为 10.836 GHz, 加热段光纤的布里渊频移约为 10.861 GHz, 频移波动约为 1.54 MHz, 空间分辨率约为 1 m, 由温度测量精度与布里渊频移测量精度的关系公式  $\Delta T = \delta v_B / C_{vT}$  可知, 布里渊频移温度系数仅与光纤材料特性和光波长有关, 并且已由第 3.2 节获得  $C_{vT} = (1.109 \pm 0.010) \text{ MHz} \cdot \text{°C}^{-1}$ , 因此可以得到加热段的温度测量精度约为 1.39 °C。

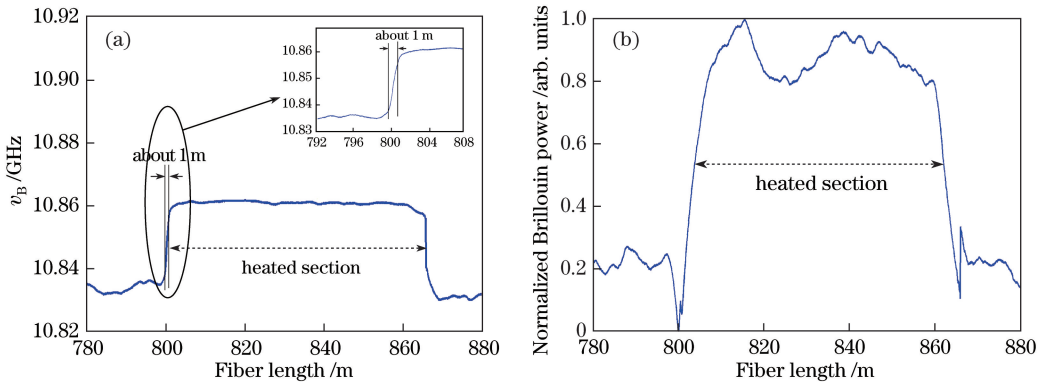


图 5 加热段光纤的 (a) 布里渊频移和 (b) 功率分布

Fig. 5 (a) Brillouin frequency shift and (b) power distribution along heated section

在加热段光纤的 820 m 处对测量数据进行洛伦兹拟合, 得到光纤 820 m 处的布里渊增益谱如图 6 所示, 由图 6 可见, 此位置处的  $v_B$  约为 10.862 GHz, 测量值相对于拟合值的均方根误差为 0.87722 MHz, 布里渊谱宽  $\Delta v_B = 26.7 \text{ MHz}$ ; 布里渊增益谱的自然线宽约为 30~40 MHz, 而加热会引起布里渊谱宽的下降<sup>[14]</sup>, 因此在加热段获得的布里渊谱宽小于自然线宽是合理的。对光纤加热段中间 3 m (约 820~823 m) 长度上的布里渊功率进行线性拟合, 可得到测量值相对于拟合值的均方根误差  $\sigma^2 = 0.01046$ , 即  $R_{\text{SNC}} = P / \sigma^2 = 95.603$ , 其中  $P$  为拟合后的归一化布里渊功率平均值 (近似为 1)。根据布里渊频移测量精度公式  $\delta v_B = \Delta v_B / (4R_{\text{SNC}})^{1/4}$  可得布里渊频移测量精度为 6.038 MHz, 再依据温度测量精度与布里渊频移测量精度的关系公式  $\Delta T = \delta v_B / C_{vT}$  和  $C_{vT} = (1.109 \pm 0.010) \text{ MHz} \cdot \text{°C}^{-1}$ , 可以得到温度测量精度约为 5.45 °C。

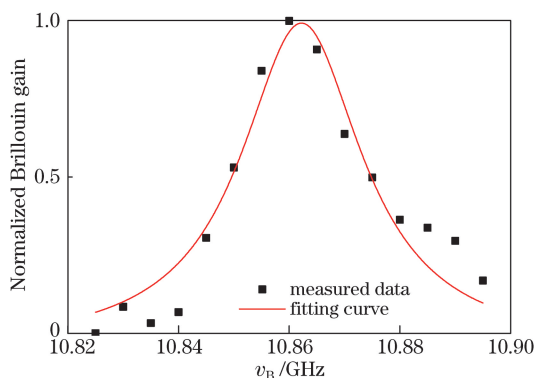


图 6 光纤 820 m 处的布里渊增益谱

Fig. 6 Brillouin gain spectrum at position of 820 m of fiber

### 3.4 分析与讨论

在瑞利 BOTDA 温度传感系统中,将微波调制脉冲基底光在光纤中产生的背向瑞利散射光作为探测光,但探测光功率很小,存在信号小、噪声大的问题,从而会限制系统的传感距离。在单脉冲下,通过增加脉冲宽度可增加信号强度并提高测量精度,但同时伴随着空间分辨率的降低。由第 3.2 节的分析可知,采用 50 ns 传感脉冲宽度时,对应的空间分辨率为 5 m,根据加温段布里渊频移的分布情况可以看出,此时布里渊频移波动较大,系统信噪比和布里渊频移的测量精度低。若进一步减小传感脉冲宽度,则会导致系统信噪比和频移测量精度降低,难以有效地提取布里渊频移信息。因此,在不依靠其他性能提升手段的情况下,单脉冲瑞利 BOTDA 系统难以实现高性能的传感测量。

脉冲编码技术作为提升系统信噪比的有效技术手段,已广泛应用于 BOTDA 和布里渊光时域反射系统中,在第 3.3 节中,利用传感脉冲宽度为 10 ns、编码序列为 64 位的 Golay 编码,可达到的空间分辨率为 1 m,根据布里渊频移波动[图 5(a)]和功率分布[图 5(b)],获得的温度测量精度分别为 1.39 °C 和 5.45 °C。得到的两种温度测量精度差别较大的原因在于布里渊散射功率受相干噪声、偏振噪声等乘性噪声的影响较大,布里渊散射功率起伏较大,因此在布里渊传感技术中普遍依据布里渊频移值来获取温度值。通过上述实验结果可以看出,脉冲编码瑞利 BOTDA 系统性能可提高系统空间分辨率,且布里渊频移波动远小于 50 ns 单脉冲系统中的频移波动,因此脉冲编码瑞利 BOTDA 系统较单脉冲系统性能有了很大的提升。虽然第 3.1 节中实验系统使用的传感光纤长度仅为 1.77 km,但通过增大编码位数及调整系统参数可增加传感距离,从而实现长距离传感。

## 4 结 论

针对瑞利 BOTDA 系统存在的信号小、噪声大的问题,将脉冲编码技术引入瑞利 BOTDA 系统,分析了瑞利 BOTDA 温度传感系统的工作原理,并对 Golay 互补序列及单脉冲和编码脉冲系统的信噪比进行分析;设计并搭建了单脉冲和脉冲编码的瑞利 BOTDA 温度传感系统,分别对单脉冲瑞利 BOTDA 系统的温度传感特性和脉冲编码瑞利 BOTDA 系统的空间分辨率、温度测量精度等性能进行了测试。结果表明,在 20~80 °C 温度范围内,瑞利 BOTDA 系统获得的布里渊频移与温度呈良好的线性关系,温度系数为  $(1.109 \pm 0.010)$  MHz·°C<sup>-1</sup>;传感脉冲宽度为 10 ns 时,使用 64 位 Golay 编码的条件下,脉冲编码瑞利 BOTDA 温度传感系统在 1.77 km 光纤的加温段上实现了空间分辨率为 1 m、温度测量精度为 1.39 °C 的传感测量。研究结果表明,脉冲编码技术可有效地提高瑞利 BOTDA 系统的性能,并为实现非破坏性的单端 BOTDA 长距离传感提供了理论和实验依据。

### 参 考 文 献

- [1] 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.

- [2] Hu J H, Zhang X P, Yao Y G, *et al.* A BOTDA with break interrogation function over 72 km sensing length[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 145-153.
- [3] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120 km distance employing optical preamplification[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 232-234.
- [4] Cui Q S, Pamukcu S, Lin A X, *et al.* Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(2): 399-403.
- [5] Nikles M, Thévenaz L, Robert P A. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. Optics Letters, 1996, 21(10): 758-760.
- [6] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, *et al.* Enhanced long-range distributed strain and temperature sensing using BOTDA and optical pulse coding[C]. 35<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, 2009: 1-2.
- [7] Soto M A, Le Floch S, Thévenaz L. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16390-16397.
- [8] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, *et al.* Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. Optics Letters, 2010, 35(2): 259-261.
- [9] Wang Hu. Research on the key technology of Rayleigh BOTDA system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.  
王虎. 瑞利 BOTDA 系统关键技术研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [10] Kurashima T, Horiguchi T, Ohno H, *et al.* Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques[C]. 24<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, 1998: 149-150.
- [11] Luo Yuan, Yan Lianshan, Shao Liyang, *et al.* Golay-coded BOTDA fiber sensor employing differential hybrid pulse[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806002.  
罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的 Golay-差分脉冲混合编码技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806002.
- [12] Liang Hao, Lu Yuangang, Li Cunlei, *et al.* Study on decoding method of correlation coded pulses based Brillouin optical time-domain reflectometric system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1006002.  
梁浩, 路元刚, 李存磊, 等. 基于相关序列脉冲的布里渊光时域反射测量系统解码方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1006002.
- [13] Wan S P, Xiong Y H, He X D. The theoretical analysis and design of coding BOTDR system with APD detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2626-2632.
- [14] Bao X Y, Smith J, Brown A W. Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape and frequency shift of the Brillouin loss spectrum[C]. SPIE, 2002, 4920: 311-322.