

提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法

李永倩 李晓娟 安琪

华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003

摘要 根据谱整形的思想将脉冲预抽运的概念引入布里渊光时域反射系统,提出了一种提高传感性能的方法。该方法利用由预抽运脉冲和传感脉冲组成的阶梯脉冲作调制信号,通过预抽运脉冲和传感脉冲的受激布里渊作用实现布里渊谱的整形和传感信号的放大,可有效地解决系统空间分辨率和测量精度的矛盾,并可提高系统信噪比,增加传感距离。通过受激布里渊稳态方程的瞬态分析对阶梯脉冲调制布里渊光时域反射系统中的受激布里渊散射模型进行了求解,对阶梯脉冲进行了最佳化设计,比较了矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制时的系统性能。结果表明,当预抽运脉冲和传感脉冲参数为50 ns、0.2 W和2 ns、1 W时,采用阶梯脉冲时的布里渊谱宽约为44 MHz,10 km光纤末端信噪比较采用矩形脉冲时提高了7.97 dB。最后,通过实验验证了所提方法的可行性。

关键词 光纤光学;光纤传感;阶梯脉冲调制;声波预抽运;布里渊光时域反射;谱整形

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0106003

New Method to Improve the Performance of Brillouin Optical Time Domain Reflectometer System

Li Yongqian Li Xiaojuan An Qi

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

Abstract A new method to improve the performance of Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) system is proposed, by introducing the reported pulsed pre-pump technique into the well known structure based on the consideration of Brillouin spectrum reshaping. In this method, the optical pulse launched into the fiber is provided by electro-optical modulation with a step pulse composed of a pre-pump pulse and a sensing pulse. The reshaping of Brillouin spectrum and the amplification of sensing signal are achieved through the stimulated Brillouin scattering (SBS) interaction between pre-pump pulse and sensing pulse, and the contradiction between spatial resolution and measurement accuracy can be solved, effectively. Meanwhile, the signal to noise ratio and the sensing distance can be enhanced significantly. SBS models under steady-state are solved by transient analysis in the step pulse modulation BOTDR, the optimal design of step pulse is made, and the system performance is compared with those in rectangular pulse and Lorentz pulse modulation structures. The results show that with a step pulse synthesized by a pre-pump pulse with a width of 50 ns and a peak power of 0.2 W and a sensing pulse with the corresponding parameters of 2 ns and 1 W, Brillouin spectrum width can be as narrow as about 44 MHz, and the signal to noise ratio at the end of 10 km single mode fiber can be 7.97 dB higher than that in the rectangular pulse structure. Finally, the feasibility of the proposed method is demonstrated experimentally.

Key words fiber optics; optical fiber sensing; step pulse modulation; acoustic wave pre-pump; Brillouin optical time domain reflectometer; spectrum reshaping

OCIS codes 060.2370; 290.5830; 290.5900

收稿日期: 2014-06-25; 收到修改稿日期: 2014-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(61377088)、河北省自然科学基金(F2014502098, E2012502045)、中央高校基本科研业务费专项资金(2014XS77)

作者简介: 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方面的研究。

E-mail: liyongqian1958@163.com

1 引 言

布里渊分布式光纤传感技术具有抗电磁干扰、精度高、定位准确及温度和应变的长距离连续分布式测量等优点,在电力、石油、建筑和水利等行业大型工程结构健康状况在线监测和故障点定位中具有广阔的应用前景。其中,布里渊光时域分析(BOTDA)系统利用受激布里渊散射(SBS)作传感信号,系统信噪比和频移测量精度高^[1-4]。但由于声子寿命的限制,空间分辨率和测量精度相互制约,因而无法同时提高;另一方面因受相干噪声和偏振噪声影响,布里渊强度难以利用,在不采用特殊光纤时无法实现温度和应变的同时测量。为克服以上缺点,文献[3]提出脉冲预抽运(PPP)BOTDA技术,实现了空间分辨率为10 cm和应变精度为 $\pm 25 \text{ m}\epsilon$ 的测量,但此技术不能实现温度和应变的同时测量。文献[4]采用温度和应变系数不同的双光纤,实现了温度分辨率为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 和应变分辨率为 $200 \text{ }\mu\epsilon$ 的双参量传感,但仍未解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾。

布里渊光时域反射计(BOTDR)系统通过在光纤始端检测自发布里渊散射(SPBS)信号,并利用布里渊频移和强度与温度和应变的线性关系,可实现温度和应变的同时测量,因此受到国内外广泛关注^[5-11]。在传统BOTDR系统中,由于被测信号微弱,检测难度大,无法获得高指标,而且声子寿命同样限制了空间分辨率和测量精度的同时提高。为了通过采用不同波形的脉冲调制提高布里渊散射信号的信噪比,文献[8]利用基于现场可编程门阵列(FPGA)的脉冲编码/解码硬件系统提高系统信噪比,缩短脉冲编码/解码时间;文献[9-10]提出不同脉冲波形调制的传感系统,在不降低空间分辨率的情况下,分别采用梯形、三角形和洛伦兹形脉冲获得了3 dB、4.8 dB、5 dB信噪比的提高,但两种方法仍存在空间分辨率和测量精度相互制约的问题。为了通过提高信号强度、提高系统信噪比,文献[11]在揭示BOTDR系统中SBS效应机理的基础上,利用漏光对传感脉冲产生的SPBS信号进行放大,在电光调制器消光比为20 dB时,仿真实现了系统信噪比为5 dB和动态范围为3 dB的提高。但由于漏光存在于整个传感光纤,系统中非本地效应严重,使得布里渊散射谱产生失真,影响系统频移测量精度。

本文将PPP技术引入BOTDR系统,利用由预抽运脉冲和传感脉冲组成的阶梯脉冲调制产生光脉冲,通过预抽运脉冲与传感脉冲之间的SBS作用实现布里渊散射谱的整形和传感信号的放大,系统空间分辨率主要由脉宽很窄的传感脉冲决定,测量精度主要由经SBS放大的谱宽很窄的预抽运脉冲产生的布里渊散射谱决定,从而可有效地解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾,并可提高系统信噪比、增加传感距离。采用受激布里渊稳态方程的瞬态分析方法对阶梯光脉冲在光纤中的SBS作用的数学模型进行求解,探讨阶梯脉冲的最佳化设计问题,仿真验证阶梯脉冲调制在解决BOTDR系统空间分辨率与测量精度之间矛盾方面相对矩形脉冲、洛伦兹形脉冲调制的优势。最后,实验验证阶梯脉冲调制BOTDR系统的可行性。

2 理论分析

2.1 阶梯脉冲调制BOTDR工作原理

在阶梯脉冲调制BOTDR传感系统中,经电光调制器(EOM)调制后注入传感光纤的阶梯光脉冲如图1所示,可以表示为^[3]

$$P_p(t) = \begin{cases} P_p, & 0 \leq t < D_s - D \\ P, & D_s - D \leq t \leq D_s \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $D_s - D = D_p$ 为预抽运脉冲持续时间, D 和 D_s 分别为传感脉冲和阶梯脉冲持续时间; P_p 和 P 分别为预抽运脉冲和传感脉冲光功率。阶梯光脉冲从光纤始端 $z=0$ 处进入传感光纤后,预抽运脉冲预激发声波,并产生频率为 $\nu_0 + \nu_B$ 和 $\nu_0 - \nu_B$ 的背向反斯托克斯(anti-Stokes)光和斯托克斯(Stokes)光。频率为 ν_0 的传感脉冲分别与由预抽运脉冲光产生的两个SPBS分量发生SBS作用,anti-Stokes光向传感脉冲转移能量,传感脉冲向Stokes光转移能量,从而使anti-Stokes光能量减小,Stokes光能量增大,传感脉冲能量几乎保持不变^[12]。

当传感脉冲宽度远小于声子寿命($\Delta t \gg 10 \text{ ns}$)时,传感脉冲产生的SPBS谱宽远大于光纤布里渊自然增益谱宽;而预抽运脉冲宽度远大于声子寿命,其产生的SPBS谱与传感脉冲发生SBS作用,且经SBS放大后的谱宽接近光纤布里渊自然增益谱宽。系统中阶梯光脉冲产生的布里渊散射谱为谱宽很宽的传感脉冲产生

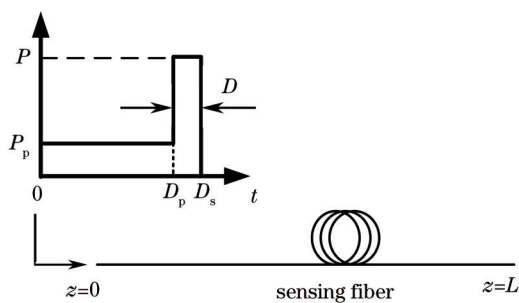


图1 阶梯光脉冲在传感光纤中的传输

Fig.1 Step pulse light propagation in sensing fiber

的SPBS谱和经SBS放大后的谱宽很窄的预抽运脉冲产生的布里渊散射谱的叠加,从而实现系统中传感脉冲产生的宽带布里渊散射谱的整形和传感信号的放大,解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾,并提高系统信噪比、增加传感距离。

2.2 预抽运脉冲和传感脉冲的SBS作用模型

阶梯脉冲调制BOTDR系统中,预抽运脉冲产生的SPBS信号作为探测光,传感脉冲作为抽运光,描述相向传播的两束光之间SBS作用的稳态耦合波方程为^[13]

$$\frac{dP}{dz} = \pm \frac{g}{A_{\text{eff}}} P_s P - \alpha P, \quad (2a)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \pm \frac{g}{A_{\text{eff}}} P_s P + \alpha P_s, \quad (2b)$$

式中“±”表示布里渊损耗和布里渊增益两种情况; $P_s(z)$ 和 $P(z)$ 分别为预抽运脉冲在光纤散射点 z 处产生的 anti-Stokes/Stokes光和传感脉冲光功率, g 为布里渊增益系数, A_{eff} 为光纤有效面积, α 为光纤损耗系数。

采用受激布里渊稳态方程的瞬态分析方法^[13-14]对预抽运脉冲产生的Stokes光与传感脉冲的受激布里渊增益作用过程进行解析,此时边界条件为预抽运脉冲初始值 $P_p(z=0)=P_p$,传感脉冲初始值 $P(z=0)=P$ 。预抽运脉冲光在光纤始端 $z=0$ 处入射,沿 $+z$ 方向传播,光纤 z 处产生的Stokes光功率为^[11]

$$P_s(z) = \frac{P_p \alpha_B S v D_p \exp(-\alpha z)}{2}, \quad (3)$$

式中 α_B 为光纤布里渊散射系数, S 为布里渊背向捕捉系数, v 为光在光纤中的传播速度。因预抽运脉冲产生的Stokes光与传感脉冲光之间的相互作用长度较短,首先忽略SBS作用对 $P_s(z)$ 的影响,将(3)式代入(2a)式,求得 z 处传感脉冲光功率为

$$P(z, \nu) = P \exp(-\alpha z) G(z, \nu), \quad (4)$$

式中 $G(z, \nu)$ 表示因SBS作用引起的传感脉冲光的损耗,其表达式为

$$G(z, \nu) = \exp\left[\int_0^z -\frac{g(z', \nu) P_s(z')}{A_{\text{eff}}} dz'\right] = \exp\left\{\frac{g(z, \nu) P_p \alpha_B S v D_p [\exp(-\alpha z) - 1]}{2\alpha A_{\text{eff}}}\right\}. \quad (5)$$

将(4)式代入(2b)式并求解可得

$$\int_{P_s(z)}^{P_s(z+\Delta z)} \frac{dP_s(z', \nu)}{P_s(z', \nu)} = \int_z^{z+\Delta z} -\frac{g(z', \nu) P(z', \nu)}{A_{\text{eff}}} dz' + \alpha \Delta z, \quad (6)$$

式中 $\Delta z = \nu D/2$ 为预抽运脉冲产生的Stokes光与传感脉冲光的SBS作用长度。假设Stokes光与传感脉冲光相互作用长度内的布里渊增益系数 $g(z, \nu)$ 和传感脉冲光功率 $P(z, \nu)$ 为恒定值,通过(6)式可计算出Stokes光与传感脉冲光相互作用的布里渊增益为

$$G'(z, \nu) = \frac{P_s(z)}{P_s(z + \Delta z)} = \exp\left[\frac{g(z, \nu) P(z, \nu)}{A_{\text{eff}}} \Delta z\right] \exp(-\alpha \Delta z). \quad (7)$$

传感脉冲宽度远小于声子寿命时,需获取预抽运脉冲产生的Stokes光的瞬态布里渊增益谱。对短脉冲而言,需考虑脉冲谱特性对布里渊增益谱的影响,将稳态下的布里渊增益 $g(z, \nu) = \gamma g_0 (\Delta \nu_B/2)^2 / [(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta \nu_B/2)^2]$ 与脉冲功率谱 $f(\nu)$ 卷积,可得瞬态布里渊增益为^[14-15]

$$g_i(z, \nu) = g(z, \nu) * f(\nu) = \gamma g_0 \cdot \frac{1}{A^2 + 1} \cdot \left\{ 1 + \frac{(A^2 - 1) - \exp(-B)[(A^2 - 1)\cos(BA) + 2A \sin(BA)]}{B(A^2 + 1)} \right\} = \gamma g_0 \cdot F(A, B), \quad (8)$$

式中 $A = (\nu - \nu_B) / (\Delta\nu_B / 2)$, ν 为光频, ν_B 为布里渊频移, $\Delta\nu_B$ 为布里渊自然增益谱宽; $B = \pi D \Delta\nu_B$, g_0 为布里渊峰值增益, γ 为依赖于传感脉冲和 Stokes 光偏振态的偏振因子^[16]。

将(5)式和(7)式中的 $g(z, \nu)$ 替换为 $g_i(z, \nu)$, 则预抽运脉冲产生的 Stokes 光与传感脉冲光发生 SBS 作用的布里渊增益为

$$G'_i(z, \nu) = \exp\left[\frac{g_i(z, \nu) P_i(z, \nu)}{A_{\text{eff}}} \Delta z\right] \exp(-\alpha \Delta z) = \exp\left\{\frac{g_i(z, \nu) P \exp(-\alpha \Delta z)}{A_{\text{eff}}}\right\} \exp\left\{\frac{g_i(z, \nu) P_p \alpha_B S \nu D_p [\exp(-\alpha z) - 1]}{2\alpha A_{\text{eff}}}\right\} \Delta z \times \exp(-\alpha \Delta z), \quad (9)$$

式中 $P_i(z, \nu)$ 表示瞬态分析时的传感脉冲光功率。

2.3 阶梯光脉冲产生的布里渊散射谱

在传统 BOTDA 系统中, 由于脉冲光与连续光功率相当, 两者相互作用产生的 SBS 信号远大于脉冲光产生的 SPBS 信号, 故可忽略 SPBS 信号对系统的影响。而在阶梯脉冲调制 BOTDR 系统中, 传感脉冲光功率远大于预抽运脉冲产生的 SPBS 光功率, 其产生的 SPBS 不可忽略, 因此, 阶梯光脉冲产生的布里渊散射功率谱由谱宽很宽的传感脉冲产生的 SPBS 功率谱和经 SBS 放大后的谱宽很窄的预抽运脉冲产生的布里渊散射谱叠加而成。

忽略抽运耗尽效应的影响, 光纤始端检测到的传感脉冲光产生的沿光纤分布的 SPBS 光功率为^[11]

$$P_{\text{SPBS}}(z) = \frac{P \alpha_B S \nu D \exp(-2\alpha z)}{2}. \quad (10)$$

入射光为连续光的情况下, 布里渊散射功率谱服从洛伦兹分布^[15], 可表示为

$$S_B(z, \nu) = \frac{P_{\text{SPBS}}(z)}{\pi} \frac{\Delta\nu_B / 2^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B / 2)^2}. \quad (11)$$

若入射光为矩形脉冲, 由(8)式可知, 传感脉冲光在光纤 z 处产生的 SPBS 功率谱为

$$S'_B(z, \nu) = S_B(z, \nu) * f(\nu) = \frac{2P_{\text{SPBS}}(z)}{\pi \Delta\nu_B} \cdot F(A, B). \quad (12)$$

根据(12)式可得, 预抽运脉冲产生的 SPBS 功率谱为

$$S'_{\text{SP}}(z, \nu) = \frac{2P_s(z) \exp(-\alpha z)}{\pi \Delta\nu_B} \cdot F(A, B_1), \quad (13)$$

式中 $B_1 = \pi D_p \Delta\nu_B$ 。

根据(9)、(12)和(13)式可得, 阶梯光脉冲产生的布里渊散射谱为

$$S_{\text{BSS}}(z, \nu) = S'_B(z, \nu) + S'_{\text{SP}}(z, \nu) \times G'_i(z, \nu) = \frac{2P_{\text{SPBS}}(z)}{\pi \Delta\nu_B} F(A, B) + \frac{2P_s(z) \exp(-\alpha z)}{\pi \Delta\nu_B} F(A, B_1) \exp\left[\frac{g_i(z, \nu) P_i(z, \nu) \Delta z}{A_{\text{eff}}}\right] \exp(-\alpha \Delta z), \quad (14)$$

式中等号右端第一项表示谱宽很宽的传感脉冲产生的自发布里渊散射谱, 其具有高空间分辨率和宽谱(即低频率测量精度)特性; 而第二项表示经 SBS 放大后的谱宽很窄的预抽运脉冲产生的受激布里渊散射谱, 其中包含传感脉冲的空间分辨率信息 Δz 和预抽运脉冲的持续时间 D_p , 因此, 该经 SBS 放大的散射谱具有高空间分辨率和窄谱(即高频率测量精度)特性, 与文献[3]中 PPP-BOTDA 系统空间分辨率和布里渊散射谱宽分别取决于传感脉冲和预抽运脉冲的理论分析和实验结果相吻合。

3 仿真与分析

空间分辨率和频移测量精度是布里渊光纤传感系统中的两个重要指标。传统 BOTDR 系统中, 空间分辨率 $\Delta L = vD/2$ 取决于传感脉冲宽度 D , 而频移测量精度 $\delta\nu_B$ 则与传感脉冲产生的自发布里渊散射谱宽 $\Delta\nu'_B$ 成正比, 可表示为^[12]

$$\delta\nu_B = \frac{\Delta\nu'_B}{\sqrt{2}(R_{\text{SN}})^{1/4}}, \quad (15)$$

式中 R_{SN} 为系统信噪比。可见,布里渊散射谱越窄和系统信噪比越高,频移测量精度越高。

在传统矩形脉冲调制 BOTDR 系统中,假设光纤布里渊自然增益谱宽为 35 MHz,则当脉冲宽度小于 28 ns 时,系统空间分辨率的提高是以频移测量精度的降低为代价来实现的。当脉冲宽度接近或小于声子寿命时,布里渊散射谱宽急剧增加且信号功率大幅度降低,严重影响系统频移测量精度^[7]。对于提出的阶梯脉冲调制 BOTDR 系统中,通过预抽运脉冲预激发声波、传感脉冲与预抽运脉冲产生的布里渊散射之间的 SBS 作用实现布里渊谱的整形和传感信号的放大,可在不降低系统空间分辨率的前提下,通过最佳化设计阶梯脉冲获得几乎不受传感脉冲产生的宽带布里渊散射谱影响、仅由光纤布里渊自然增益谱宽决定的测量精度。

3.1 阶梯脉冲最佳化设计

在阶梯脉冲调制 BOTDR 系统中,经 SBS 放大后的预抽运脉冲产生的布里渊散射谱包含传感脉冲的空间分辨率信息和预抽运脉冲的持续时间,系统空间分辨率取决于传感脉冲宽度,并可通过减小传感脉冲的宽度来实现系统所需的高空间分辨率。

由(15)式可知,阶梯脉冲参数对频移测量精度的影响可通过综合分析其对布里渊散射谱宽和散射信号功率的影响来评价。在系统所需达到的空间分辨率和传感脉冲入纤峰值功率确定后,由第2节的原理及分析可知,阶梯脉冲产生的布里渊散射谱宽和信号功率决定于预抽运脉冲宽度和峰值功率。采用长度 $L=10$ km、布里渊频移 $\nu_B=10.85$ GHz、布里渊自然增益谱宽 $\Delta\nu_B=35$ MHz 的标准单模光纤,当传感脉冲宽度 $D=2$ ns、峰值功率 $P=1$ W 时,利用 Matlab 软件对光纤末端 $z=10$ km 处的布里渊散射谱宽和功率进行仿真的结果如图 2 和图 3 所示。

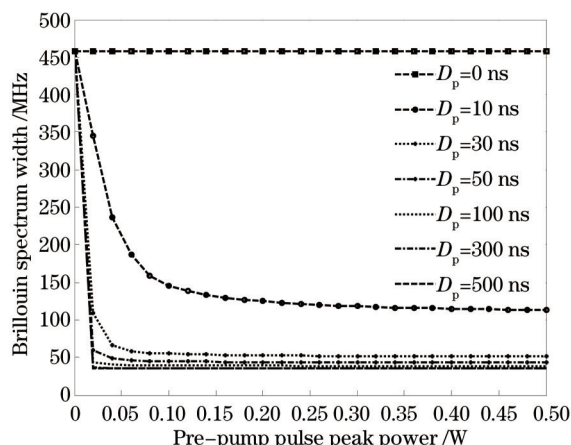


图 2 $D=2$ ns, $P=1$ W 时布里渊谱宽与预抽运脉冲峰值功率的关系

Fig.2 Brillouin spectrum width versus pre-pump pulse peak power when $D=2$ ns and $P=1$ W

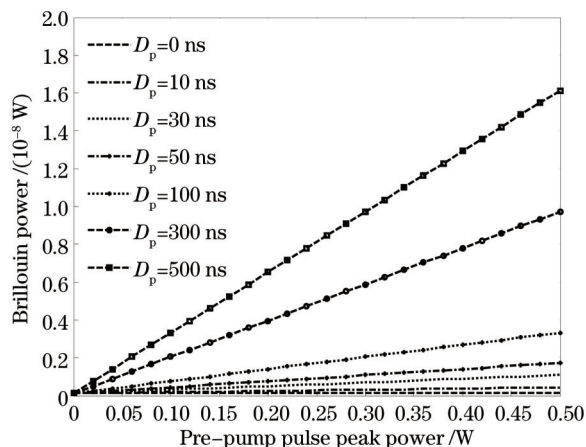


图 3 $D=2$ ns, $P=1$ W 时布里渊功率与预抽运脉冲峰值功率的关系

Fig.3 Brillouin power versus pre-pump pulse peak power when $D=2$ ns and $P=1$ W

图 2 为不同预抽运脉冲宽度下阶梯脉冲产生的布里渊散射谱宽与预抽运脉冲峰值功率的关系曲线。由

图可知,当预抽运脉冲峰值功率为0.01 W,即传感脉冲功率的1%时,充分建立一个强度光栅需要10倍声子寿命时间,传感脉冲通过已充分激发的声波场产生布里渊增益,且布里渊散射谱宽减小至48 MHz;而当预抽运脉冲峰值功率增大至传感脉冲功率的5%及以上时,50 ns的预抽运脉冲宽度可充分激发声波场,使布里渊谱宽接近44 MHz,且随脉冲宽度的增加,谱宽趋近于恒定值36 MHz,布里渊散射谱宽的减小有利于提高频移测量精度。需要指出的是,随预抽运脉冲宽度的增加,系统中的非本地效应也同时增大,在保证频移测量精度的情况下,应适当选取预抽运脉冲宽度。

图3为不同预抽运脉冲宽度时阶梯脉冲产生的布里渊散射功率与预抽运脉冲峰值功率的关系曲线。由图可知,直至预抽运脉冲宽度500 ns,布里渊散射功率与预抽运脉冲峰值功率呈线性关系,这是由于此时对应的不大于50 m的传感脉冲和预抽运脉冲的SBS作用长度远小于传感光纤有效作用长度 $L_{eff}=8$ km,因此SBS作用过程中的非线性增益不明显。这时随预抽运脉冲宽度和峰值功率的增加,光纤末端的布里渊散射功率迅速增加,SBS放大作用增强,有利于提高系统信噪比。但同时需要注意,由于SBS作用的增强,系统中的偏振噪声和相干噪声随之增大。因此,在预抽运脉冲宽度确定后,需根据系统测量精度要求选取最佳脉冲峰值功率,以便将系统中SBS作用控制在合理水平,减小各种噪声的影响。

在阶梯脉冲调制BOTDR系统中,为了充分激发声波场,将传感脉冲的幅度变化转化为布里渊增益,预抽运脉冲宽度应大于3倍的声子寿命^[18];同时考虑到非本地效应、各种噪声对系统测量精度的影响和将SBS作用控制在合理水平,这里选取最佳预抽运脉冲宽度为 $D_p=50$ ns。需要特别说明的是,在保证测量精度的前提下,为了获得尽可能强的传感信号,可适当增加预抽运脉冲的峰值功率。

3.2 不同波形脉冲调制 BOTDR 系统性能

空间分辨率和测量精度是表征布里渊光纤传感系统性能的两个关键参数。在矩形脉冲和洛伦兹形脉冲调制BOTDR系统中,空间分辨率分别由矩形脉冲宽度和洛伦兹形脉冲的半峰全宽决定^[10,17];而在阶梯脉冲调制BOTDR系统中,空间分辨率取决于传感脉冲宽度。在三种波形脉冲调制系统中,可通过改变矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和传感脉冲的宽度来达到相同的系统空间分辨率,因此为了验证所提出的阶梯脉冲调制BOTDR传感系统性能的优势,仅需在相同空间分辨率情况下,分析不同脉冲波形调制对频移测量精度的影响。

由(15)式可知,频移测量精度取决于布里渊散射谱宽和系统信噪比,因此不同脉冲波形调制对频移测量精度的影响可通过仿真比较采用矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制时的布里渊散射谱和散射功率时域波形来进行说明。

图4给出了矩形脉冲、洛伦兹形脉冲及阶梯脉冲波形。图中矩形脉冲宽度、洛伦兹形脉冲的半峰全宽和传感脉冲宽度相同,脉冲峰值均为预抽运脉冲峰值的5倍,而预抽运脉冲宽度为以上脉冲宽度的25倍。

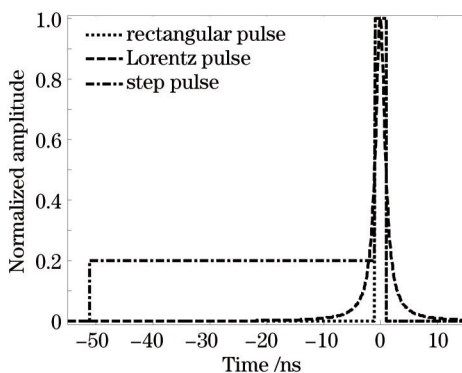


图4 不同调制脉冲波形

Fig.4 Waveforms of different modulating pulses

在矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制BOTDR系统中,若取矩形脉冲、传感脉冲和洛伦兹形脉冲宽度 $D=2$ ns、峰值功率 $P=1$ W,预抽运脉冲宽度 $D_p=50$ ns、峰值功率 $P_p=0.2$ W,可得10 km光纤末端布里渊散射谱及沿光纤分布的布里渊散射功率的时域波形如图5和图6所示。

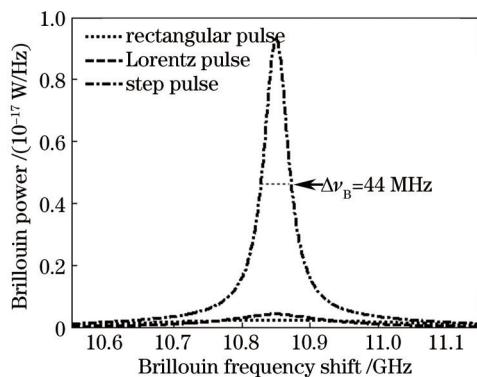


图5 不同波形脉冲调制时的布里渊散射谱

Fig.5 Brillouin power spectra under different pulses modulations

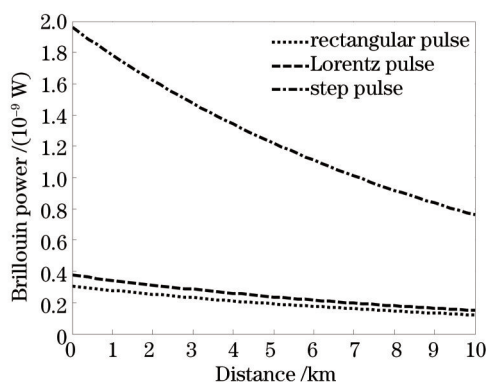


图6 不同波形脉冲调制时沿光纤分布的布里渊功率时域波形

Fig.6 Time domain waveforms of Brillouin powers distributed along fiber under different pulses modulations

由图5和图6可知,矩形脉冲调制时,由于脉冲宽度远小于声子寿命,布里渊散射谱明显展宽且布里渊散射功率很小,从而使系统信噪比和频移测量精度大大下降,换言之,系统空间分辨率的提高是以频移测量精度的降低为代价来实现的。由图5可知,当采用洛伦兹形脉冲调制时,布里渊散射谱峰功率为矩形脉冲调制时的1.9倍,且谱宽由矩形脉冲调制时的456 MHz变窄至166 MHz,但系统频移测量精度仍难提高,因此采用洛伦兹形脉冲调制无法从根本上解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾。而采用阶梯脉冲调制时,由于预抽运脉冲的存在,声波场完全被激发,阶梯脉冲产生的布里渊散射谱由谱宽很宽的传感脉冲产生的自发布里渊散射谱和SBS放大后的谱宽很窄的预抽运脉冲产生的布里渊散射谱叠加而成,其谱峰功率大幅度增加,比洛伦兹形脉冲调制时高20倍以上,比矩形脉冲调制时高40倍;且谱宽由预抽运脉冲和传感脉冲SBS作用产生的散射谱决定,其值变窄为 $\Delta\nu'_B = 44$ MHz,实现了对矩形脉冲产生的宽带布里渊散射谱的整形。

由图6可知,采用洛伦兹形脉冲调制时沿光纤分布的布里渊散射功率得到提高,光纤末端信号功率为矩形脉冲调制时的1.23倍,即系统信噪比增加0.9 dB;而采用阶梯脉冲调制时布里渊散射功率得到大幅度提高,光纤末端信号功率为矩形脉冲调制时的6.26倍,信噪比增加7.97 dB。在采用损耗为0.2 dB/km的标准单模光纤和相同信噪比情况下,洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制BOTDR系统相对矩形脉冲调制时可增加传感距离2.25 km和19.9 km。

根据(15)式、图4~6可知,在系统空间分辨率均为20 cm时,若采用矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制时的相同长度光纤末端信噪比分别为25 dB、25.9 dB、32.97 dB,系统频移测量精度分别为76.46、26.43、4.66 MHz。由此可知,阶梯脉冲调制BOTDR系统既可有效地解决空间分辨率和频移测量精度之间的矛盾,在不降低系统空间分辨率的前提下,提高频移测量精度,又可大幅度提高系统信噪比、增加传感距离。

4 实验及结果分析

为了验证阶梯脉冲调制BOTDR系统解决空间分辨率和频移测量精度矛盾的可行性,采用图7所示的实验

装置进行实验验证。传感系统采用线宽为 10.3 KHz、中心波长为 1550.057 nm、输出功率为 11 mW 的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD),通过保偏(PM)耦合器进行功率分配,一路光被 EOM1 调制成重复频率为 40 KHz、不同波形的光脉冲,经掺铒光纤放大器(EDFA)放大、光栅滤波器(FBGF)滤波和可调光衰减器(VOA)衰减后通过环行器进入传感光纤;另一路作为本振光,经 EOM2 移频后通过扰偏器(PS)与由传感光纤返回的布里渊散射光进行相干检测。实验中传感光纤长度为 2.3 km,经实验室标定该光纤布里渊频移的温度系数为 1.06 MHz/℃;因实验室条件限制,脉冲发生器(PG)输出脉冲宽度最窄为 8 ns,频谱分析仪(ESA)最大分辨率带宽为 8 MHz。

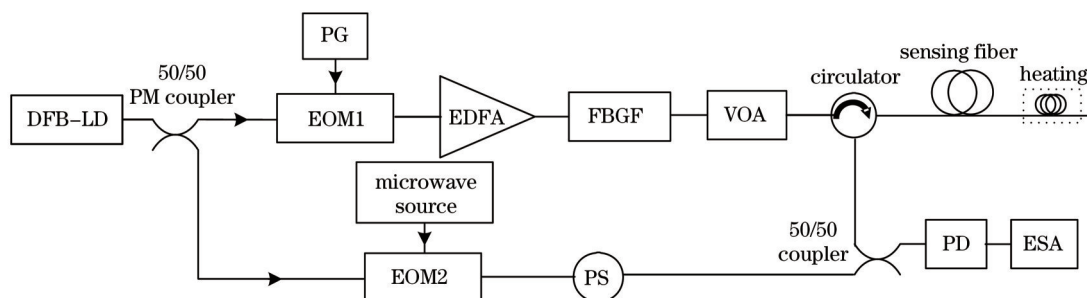


图 7 阶梯脉冲调制 BOTDR 系统实验装置

Fig.7 Configuration of step pulse modulation BOTDR

PG 产生的矩形和阶梯电脉冲驱动 EOM1,在传感光纤始端分别获得宽度为 8 ns、峰值功率为 1 W 的矩形脉冲光及传感脉冲宽度为 8 ns、峰值功率为 1 W 和预抽运脉冲宽度为 200 ns、峰值功率为 133 mW 的阶梯脉冲光,用 ESA 分别测量矩形脉冲和阶梯脉冲调制时光电检测器(PD)输出的频谱,得到两种调制时布里渊功率谱如图 8 所示,测试中设置 ESA 分辨率带宽为 8 MHz。由图可知,采用矩形脉冲调制时,其产生的自发布里渊散射谱宽约为 95 MHz;而采用阶梯脉冲调制时,其产生的布里渊散射谱宽近似为 32 MHz,且谱峰功率相对矩形脉冲调制时提高了 6 dB,实现了对矩形脉冲产生的宽带布里渊散射谱的整形。

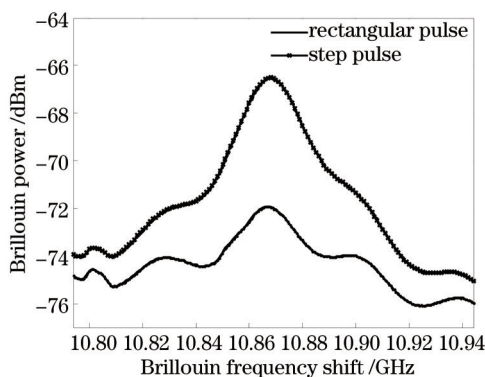


图 8 矩形脉冲和阶梯脉冲调制时的布里渊功率谱

Fig.8 Brillouin power spectra under rectangular pulse and step pulse modulations

将末端 8 m 光纤加温至 63.3 ℃,此时室温为 28 ℃,光纤温度上升 35.3 ℃。本振光经 EOM2 移频 9.568 GHz,设置 ESA 工作在“zero span”模式,测量中心频率为 1.3 GHz 附近的布里渊功率时域波形。设置 ESA 中心频率的调节步进为 8 MHz,在 1.228 ~1.388 GHz 范围内对背向布里渊散射时域波形进行扫频测量,每次测量平均 5000 次得到一条 BOTDR 时域波形,利用 Matlab 可绘制出如图 9 所示的三维布里渊功率分布图。由图可知,光纤加温段和未加温段的布里渊频移分别为 10.908 GHz 和 10.868 GHz,频移差为 40 MHz,换算的温度差为 37.74 ℃,与光纤实际温度变化误差为 2.44 ℃。ESA 中心频率设置为 1.34 GHz 时,光纤末端加温段的布里渊功率时域波形如图 10 所示。由图可见,采用阶梯脉冲调制时,系统空间分辨率约为 13 m,这是由于 ESA 的最大分辨率带宽为 8 MHz,滤除了宽度为 8 ns 传感脉冲的大部分高频分量,因而限制系统的空间分辨率最高为 12.5 m。这也一定程度上说明了系统空间分辨率主要决定于传感脉冲宽度,而不是预抽运脉冲宽度。

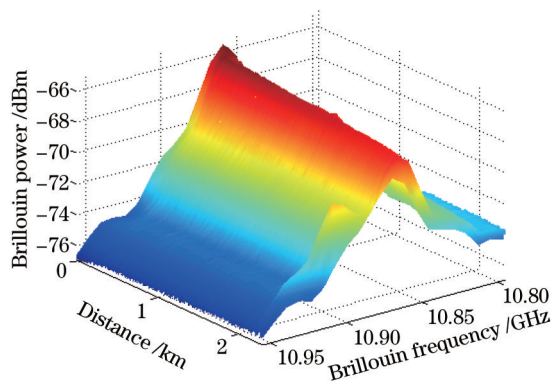


图9 三维布里渊功率分布

Fig.9 3D distribution of Brillouin power

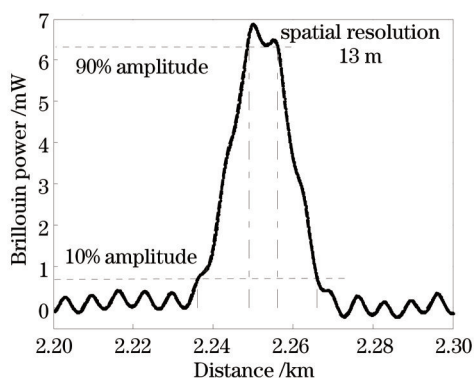


图10 光纤加温段的布里渊功率分布

Fig.10 Distribution of Brillouin power near the heated fiber

5 结 论

将PPP技术引入BOTDR系统,提出了一种通过阶梯脉冲调制来提高传感系统性能的方法,采用受激布里渊稳态方程的瞬态分析方法对阶梯光脉冲在光纤中的SBS作用的数学模型进行了求解。通过阶梯脉冲的最佳化设计,确定了适用于传感系统的最佳预抽运脉冲宽度和峰值功率,并利用Matlab仿真比较了矩形脉冲、洛伦兹形脉冲和阶梯脉冲调制时的传感系统性能。仿真和实验结果表明,采用阶梯脉冲调制、通过预抽运脉冲和传感脉冲之间的SBS作用可实现布里渊散射谱的整形和传感信号的放大,既可有效地解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾,又可提高系统信噪比,增加传感距离。

参 考 文 献

- 1 T Horiguchi, M Tateda. BOTDA- nondestructive measurement of single- mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory [J]. J Lightwave Technol, 1989, 7(8): 1170-1176.
- 2 Liu Yu, Ren Liyong, Hu Manli, *et al.*. Characteristic measurements of fiber Brillouin scattering using fiber Bragg grating based microwave-sweeping single sideband modulation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0105002.
刘 玉, 任立勇, 忽满利, 等. 基于光纤光栅的微波扫描单边带调制法测量光纤布里渊散射特性[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0105002.
- 3 K Kishida, C H Li, K Nishiguchi. Pulsed pre-pump method to achieve cm- order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [J]. IEICE Tech Rep, 2004, 47(10): 15-16.
- 4 Xie Hang, Song Muping, Ye Xianfeng. Study on the dual-parameter sensing technology of Brillouin optical time domain analyzer based on dual-optical fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030601.
谢 杭, 宋牟平, 叶险峰. 双光纤双参量布里渊光时域分析传感技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030601.
- 5 F C Chen, J C Hu, C T Zhang, *et al.*. Dual- source distributed optical fiber sensor for simultaneous temperature and strain

- measurements [J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(6): 060601.
- 6 Yang Wei, Yang Yuanhong. Digital envelope detection technique for Brillouin optical time-domain reflectometry based on generalized harmonic wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0506004.
杨 巍, 杨远洪. 基于广义谐波小波变换的布里渊光时域反射计的数字包络解调技术[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0506004.
- 7 Liu Yin, Fu Guangwei, Zhang Yanjun, *et al.*. A novel method for Brillouin scattering spectrum of distributed sensing systems based on radial basis function neural networks to extract features [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0206002.
刘 银, 付广伟, 张燕君, 等. 基于径向基函数神经网络的传感布里渊散射谱特征提取[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0206002.
- 8 Z Fan, X P Zhang, J H Hu, *et al.*. Design of fast pulse coding/decoding system for BOTDR [C]. Photonics Global Conference, 2012, 1-6.
- 9 Y Q Hao, Q Ye, Z Q Pan, *et al.*. Effects of modulated pulse format on spontaneous Brillouin scattering spectrum and BOTDR sensing system [J]. Opt Laser Technol, 2013, 46(1): 37-41.
- 10 Y Q Hao, Q Ye, Z Q Pan, *et al.*. Analysis of spontaneous Brillouin scattering spectrum for different modulated pulse shape [J]. Optik, 2012, 124(16): 2417-2420.
- 11 X H Yang, Y Q Li, Z Yang, *et al.*. An ameliorative technique for distributed Brillouin-based fiber optics sensing [C]. SPIE, 2008, 7278: 72780W.
- 12 Q S Cui, S Pamukcu, A X Lin, *et al.*. Performance of double sideband modulated probe wave in BOTDA distributed fiber sensor [J]. Microwave Opt Technol Lett, 2010, 52(12): 2713-2717.
- 13 X Y Bao, J Dhliwayo, N Heron, *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering [J]. J Lightwave Technol, 1995, 13(7): 1340-1348.
- 14 F Ravet, X Y Bao, L F Zou, *et al.*. Accurate strain detection and localisation with the distributed Brillouin sensor based on phenomenological signal processing approach [C]. SPIE, 2006, 6176: 61761C.
- 15 D Iida, F Ito. Detection sensitivity of Brillouin scattering near Fresnel reflection in BOTDR measurement [J]. J Lightwave Technol, 2008, 26(4): 417-424.
- 16 M O Van, A Deventer, J Boot. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers [J]. J Lightwave Technol, 1994, 12(4): 585-590.
- 17 S B Cho, Y G Kim, J S Heo, *et al.*. Pulse width dependence of Brillouin frequency in single mode optical fibers [J]. Opt Express, 2005, 13(23): 9472-9479.
- 18 S M Foaleng, M Tur, J-C Beugnot, *et al.*. High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes [J]. J Lightwave Technol, 2010, 28(20): 2993-3003.

栏目编辑: 王晓琰