脉冲预泵浦瑞利 BOTDA 系统的解析模型与仿真

李永倩,李 婷,安 琪,李晓娟,李 攀

(华北电力大学 电子与通信工程系,河北 保定 071003)

摘 要:将脉冲预泵浦的概念引入瑞利布里渊光时域分析系统,利用由传感脉冲和经微波调制的预泵浦脉冲组成的阶梯脉冲作调制信号,通过作为探测光的时间有限的预泵浦脉冲 1 阶边带的瑞利散射与传感脉冲的受激布里渊作用,实现布里渊信号的时域整形,减小非本地效应;通过预泵浦脉冲 0阶基带和传感脉冲的受激布里渊作用,实现布里渊信号的谱域整形,有效地解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾。利用频域法求解瞬态耦合波方程,建立了阶梯脉冲光在光纤中受激布里渊作用的解析模型。仿真结果表明,当传感脉冲宽度为 5 ns、峰值功率为 100 mW,预泵浦脉冲宽度为 50 ns、峰值功率为 16 mW 时,在空间分辨率 0.5 m 内受激布里渊散射增益在 0.14 m 处达到最大值,然后近似线性下降至 0.37 m 处,其余位置近似为零;系统布里渊散射谱宽近似为 35 MHz,约为传统瑞利布里渊光时域分析系统布里渊谱宽 212 MHz 的 1/6,在相同空间分辨率下提高了频率测量精度。

关键词:布里渊光时域分析; 脉冲预泵浦; 瑞利散射; 信号整形; 瞬态受激布里渊耦合波方程
中图分类号:TN247 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0822005

Analytical model and simulation of pulsed pre-pump Rayleigh BOTDA system

Li Yongqian, Li Ting, An Qi, Li Xiaojuan, Li Pan

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The concept of pulsed pre-pump was introduced into Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system. A step pulse composed of a sensing pulse and a pre-pump pulse modulated by microwave was used as the modulation signal in the system. The reshaping of Brillouin scattering signal in time domain was achieved through the stimulated Brillouin scattering interaction between Rayleigh scattering generated by the first-order sidebands of time-limited microwave-modulated pre-pump pulse used as the probe wave and the sensing pulse, by which the nonlocal effect was also reduced. The reshaping of Brillouin scattering signal in spectrum domain was achieved through the stimulated Brillouin scattering interaction between the zero-order baseband of microwave modulated pre-pump pulse and the sensing pulse, by which the contradiction between spatial resolution and measurement accuracy was effectively resolved. The transient coupled wave equations were calculated by applying frequency domain analysis method, through which the analytical model of stimulated Brillouin interaction occurred in the

收稿日期:2015-12-17; **修订日期**:2016-01-24
基金项目:国家自然科学基金(61377088);河北省自然科学基金(E2012502045,F2014502098)
作者简介:李永倩(1958-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光通信与光传感技术方面的研究。Email:liyq@ncepubd.edu.cn

fiber during the propagation of the step pulse light was set up. When the sensing pulse is with a width of 5 ns and a power of 100 mW, and the pre-pump pulse is with a width of 50 ns and a power of 16 mW, the simulation results show that, in the fiber length of spatial resolution of 0.5 m, stimulated Brillouin scattering gain with fiber position takes the maximum value at 0.14 m, then decreases linearly to the fiber position of 0.37 m, but in the rest of fiber positions it is approximately zero. The Brillouin spectrum width in pre-pump pulse Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system is about 35 MHz, which is only about 1/6 times of 212 MHz that is in the traditional Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system, so the measurement accuracy can be improved under the same spatial resolution.

Key words: Brillouin optical time domain analysis; pulsed pre-pump; Rayleigh scattering; signal reshaping; transient stimulated Brillouin coupled wave equations

0 引 言

基于布里渊光时域分析 (Brillouin Optical Time Domain Analysis,BOTDA) 的温度/应变测量技术具有高精度、准确定位、长距离连续分布式测量等显著优点[1],在电力线缆、大型建筑和水利工程结构、油气管道等的健康诊断、故障监测和寿命评估等领域具有广阔的应用前景[2]。因受声子寿命的影响,传统 BOTDA 系统的空间分辨率和温度测量精度限制在 1 m 和 1 ℃[3]。为了突破传统 BOTDA 系统性能的限制,2004 年 K. Kishida 等[4]首次提出脉冲预泵浦(Pulsed Pre-Pump,PPP)BOTDA 技术,通过在传感脉冲光前增加一段可充分激励声子的预泵浦脉冲,使系统信噪比(Signal-to-Noise Ratio,SNR)达到 45 dB,获得了 10 cm 的空间分辨率和±25 με 的应变测量精度。为了克服传统 BOTDA 系统双端入射在大范围监测场合应用中的不便,Q. Cui[5]提出了利用微波调制脉冲基底产生的瑞利散射作为连续探测光与传感脉冲光发生受激布里渊散射 (Stimulated Brillouin Scattering,SBS)作用的瑞利 BOTDA 系统,在 300 m 普通单模光纤上实现了空间分辨率 3 m 和温度分辨率 1 ℃的测量。该方案具有单光源、单端工作和非破坏等优点,但存在被测信号微弱、非本地效应严重的问题。

文中将 PPP 技术引入瑞利 BOTDA 系统, 利用由传感脉冲和微波调制的预泵浦脉冲组成的阶梯脉冲代替采用脉冲基底微波调制的传统瑞利 BOTDA 系统的传感脉冲, 通过经传感脉冲 SBS 放大的谱宽很窄的微波调制预泵浦脉冲 0 阶基带产生的布里渊散射谱和时间有限的微波调制预泵浦脉冲 1 阶边带的瑞利散射与传感脉冲 SBS 作用产生的谱宽很宽的布里渊散射谱的合成, 实现布里渊散射信号的谱域和时域整形, 解决空间分辨率和测量精度之间的矛盾,减小非本地效应。采用频域分析法求解受激布里渊瞬态耦合波方程,建立阶梯光脉冲在光纤中 SBS 作用的数学模型,并利用 Matlab 对 PPP 瑞利BOTDA 系统性能进行仿真。

1 PPP-瑞利 BOTDA 系统建模

1.1 系统原理

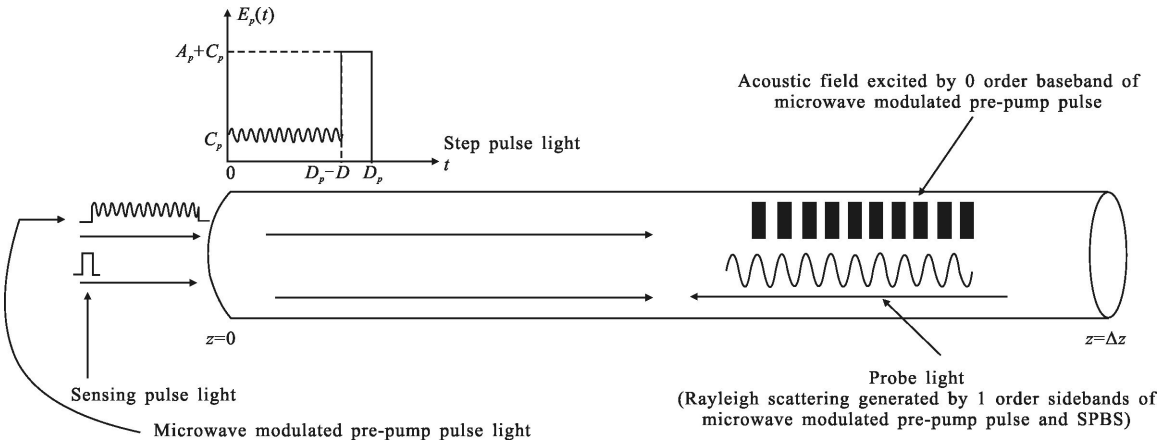
在文中提出的 PPP-瑞利 BOTDA 系统中光与声波的作用如图 1 所示, 微波调制的预泵浦脉冲光的 0 阶基带通过电致伸缩效应预激发声波场。根据布里渊散射理论,光纤中电子和质子的自身热运动变化激发介质内的弹性自发声波场,并与入射光相互作用产生自发布里渊散射。微波调制的预泵浦脉冲光的 1 阶边带产生的背向瑞利散射光和 0 阶基带产生的自发布里渊散射光(Spontaneous Brillouin Scattering,SPBS)作为探测光,与相向传输的传感脉冲光发生瞬态 SBS 作用,从而加强声波场调制介质的折射率,同时传感脉冲光通过 SBS 作用放大由瑞利散射和 SPBS 光构成的探测光。此时,被测信号仅携带预泵浦脉冲宽度对应长度光纤上的温度/应变信息,非本地效应小。

在 PPP-瑞利 BOTDA 传感系统中, 经高消光比的电光调制器(Electro Optic Modulator,EOM)调制后进入传感光纤的阶梯光脉冲可表示为:

$$E_p(t)=E_{p1}(t)+E_{p2}(t)=C_p\cdot\cos(\omega_0 t)\cdot\cos[C\cos(\omega_m t)+\varphi_1]\cdot$$

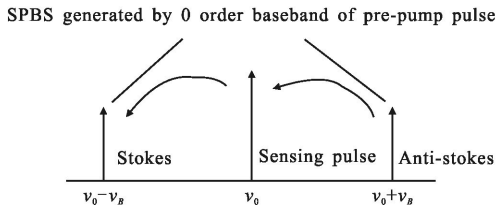
$$[u(t)-u(t-D_p+D)]+(A_p+C_p)\cdot\cos(\omega_0 t)\cdot [u(t-D_p+D)-u(t-D_p)] \quad (1)$$

式中：$E_{p1}(t)$、$E_{p2}(t)$分别表示微波调制预泵浦脉冲和传感脉冲光的场强；D_p 为阶梯脉冲持续时间；D 为传感脉冲持续时间；D_p-D 为微波调制预泵浦脉冲持续时间；A_p+C_p 和 C_p 分别为传感脉冲和预泵浦脉冲光场的幅度；$\omega_0=2\pi v_0$ 为光源输出光角频率；v_0 为入射光频；$\omega_m=2\pi v_m$ 为 EOM 微波调制信号角频率；v_m 为微波调制频率；C 为微波调制深度；φ_i 为预泵浦脉冲调制信号的相移。当 $\varphi_i=0$ 时 EOM 被偏置在传输曲线谷点，最大限度地抑制已调制信号的 0 阶基带光强，增大 1 阶边带光强；当 $\varphi_i=\pi$ 时 EOM 被偏置在传输曲线峰点，最大限度地抑制已调制信号的 1 阶边带光强，增大 0 阶基带光强。用偏压控制器将 EOM 工作点锁定在线性区近谷点处，由微波源驱动的 EOM 对预泵浦脉冲进行调制，产生较小强度的 0 阶基带和较大强度的 1 阶边带进入传感光纤，其中 0 阶基带预激发声波场并产生频率为 $v_0\pm v_B$ 的 SPBS(v_B 为布里渊频移)，1 阶边带产生频率为 $v_0\pm v_m$的背向瑞利散射光。频率为 v_0 的传感脉冲与上述传感光纤中散射光发生的 SBS 作用分为两部分：第一部分是图 1(b)所示的传感脉冲与预泵浦脉冲 0 阶基带产生的斯托克斯光和反斯托克斯光发生的 SBS 作用，产生窄布里渊谱宽实现信号的谱域整形，此时能量由反斯托克斯光转移至传感脉冲然后再转移至斯托克斯光；第二部分是图 1(c)所示的传感脉冲与预泵浦脉冲 1 阶边带产生的两个瑞利散射光分量发生的 SBS 作用，可实现布里渊信号的时域整形，同样频率为 v_0+v_m 的瑞利散射光上边带能量转移至传感脉冲再由传感脉冲转移至频率为 v_0-v_m 的瑞利散射光下边带，在两部分 SBS 作用过程中传感脉冲能量几乎不变，降低了泵浦耗尽效应。通过在光纤布里渊频移附近扫描微波调制信号频率，并测量探测光的光强，即可获得光纤的布里渊散射谱。



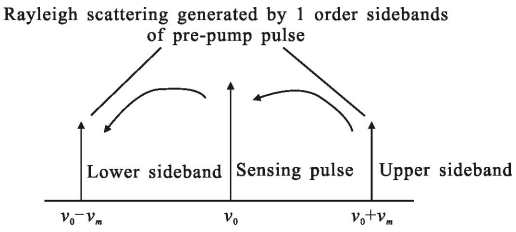
(a) 瞬态 SBS 作用

(a) Transient SBS interaction



(b) SPBS 与传感脉冲的能量转移

(b) Energy transfer between SPBS and sensing pulse



(c) 瑞利散射与传感脉冲的能量转移

(c) Energy transfer between Rayleigh scattering and sensing pulse

图 1 PPP-瑞利 BOTDA 系统中光与声波的相互作用

Fig.1 Interaction between optical and accoustic wave in PPP-Rayleigh BOTDA system

PPP-瑞利 BOTDA 系统的探测光成分主要是微波调制预泵浦脉冲的 1 阶边带产生的瑞利散射光，由于瑞利散射光功率较小，与传感脉冲发生 SBS 作用不易出现增益饱和，故 PPP-瑞利 BOTDA 系统具有潜在可实现长距离传感的优点。

1.2 瞬态 SBS 作用模型

阶梯脉冲调制的瑞利 BOTDA 系统中，当入纤传感脉冲宽度小于或等于声子寿命($\Delta\tau\approx 10$ ns)时，光场振幅随时间的变化显著，耦合波方程中的时间微分项不可忽略，须将光纤中的 SBS 增益作用作为瞬态过程进行处理，并对探测光中含有的微波调制预泵浦脉冲 1 阶边带产生的瑞利散射光和 0 阶基带产生的 SPBS 两部分分别进行解析。首先以瑞利散射光为例进行推导，通过 Navier-Stokes 方程可将传感脉冲光、瑞利散射光和声波的瞬态耦合波方程描述为[6]：

$$\left(\frac{\partial}{\partial z}+\frac{n}{c}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\right)E_{p2}=-QE_R \tag{2a}$$

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z}+\frac{n}{c}\cdot\frac{\partial}{\partial t}\right)E_R=Q^*E_{p2} \tag{2b}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}+\Gamma\right)Q=\frac{1}{2}\Gamma_1 g_B E_{p2}E_R^* \tag{2c}$$

式中：E_{p2}、E_R、Q 分别表示传感脉冲光、瑞利散射探测光和声波的场强；$\Gamma=\Gamma_1+j\Delta(z)$，$\Gamma_1=1/(2\Delta\tau)$为阻尼速率；$\Delta(z)=\omega_{pR}-\omega_B(z)$为频率失谐参数，其中 ω_{pR} 为传感脉冲和瑞利散射光的频差，$\omega_B(z)$为光纤 z 处布里渊频移；g_B 为 SBS 增益系数；c 为真空中的光速；n 为光纤折射率。

采用瞬态 SBS 耦合波方程的频域分析方法，对预泵浦脉冲 1 阶边带产生的瑞利散射光与传感脉冲光的受激布里渊增益作用进行解析，边界条件为传感脉冲光场强初值 $E_{p2}(0,t)=E_{p2}(t)$，背向瑞利散射光场强初值为 $E_R(\Delta z,t)$。预泵浦脉冲光在光纤始端 $z=0$ 处入射，沿+z 方向传播，在任意 z 点预泵浦脉冲 1 阶边带光场强为 $C_p^2J_1^2(C)[1-\cos(2\varphi_i)]/2$[7]，式中 $J_1(C)$为由调制深度决定的一阶第一类 Bessel 函数值。预泵浦脉冲 1 阶边带产生的背向瑞利散射光场强是$[z,z+\delta]$范围内各点处瑞利散射光场强的叠加，可表示为[8]：

$$E_R(z)=\frac{1}{2}C_p^2J_1^2(C)[1-\cos(2\varphi_i)]E_{p1}\cdot\sqrt{\frac{\alpha_S S}{2\alpha}\{\exp(-\alpha z)-\exp[-\alpha(2\delta-z)]\}} \tag{3}$$

式中：δ 为由预泵浦脉冲宽度决定的散射区间长度；α 为光纤损耗系数；α_S 为瑞利散射系数；S 为背向捕捉系数；E_{p1} 为预泵浦脉冲光的场强。$E_R(z)$与相向传输的传感脉冲发生 SBS 作用，且作用长度 Δz(即系统空间分辨率)取决于窄传感脉冲，将 Δz 内的慢变幅值表示为[6]：

$$E_{p2}(z,t)=\int_{-\infty}^{+\infty}E_{p2}(z,\omega_p)\exp\left[j\omega_p\left(t-\frac{n}{c}z\right)\right]\mathrm{d}\omega_p \tag{4a}$$

$$E_R(z,t)=\int_{-\infty}^{+\infty}E_R(z,\omega_R)\exp\left[j\omega_R\left(t+\frac{n}{c}z\right)\right]\mathrm{d}\omega_R \tag{4b}$$

$$Q(z,t)=\int_{-\infty}^{+\infty}Q(z,\Omega)\exp\left[j\Omega\left(t-\frac{n}{c}z\right)\right]\mathrm{d}\Omega \tag{4c}$$

式中：$E_{p2}(z,\omega_p)$、$E_R(z,\omega_R)$、$Q(z,\Omega)$分别为传感脉冲光、瑞利散射光和声波场频域场强；ω_p、ω_R、Ω 分别为传感脉冲光、瑞利散射光和声波场的角频率，其中 ω_R 是微波调制角频率 ω_m 的函数。

忽略 Δz 上的线性衰减，由瑞利散射光场在 Δz 处的频域边界条件 $E_R(\Delta z,\omega)=0$ 可得，在 $z=0$ 处经瞬态 SBS 作用后瑞利散射光的边界值为：

$$\begin{aligned}E_R(0,\omega)&=E_R(0,\omega)-E_R(\Delta z,\omega)=\\&\frac{g_B\Gamma_1}{2}\int_0^{\Delta z}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{E_{p2}(z,\omega_R)E_{p2}^*(z,\omega_R-\omega)E_R^*(z)}{\Gamma_1-j[\Delta(z)+\omega_R-\omega]}\cdot\\&\exp\left(-2j\frac{n}{c}\omega z\right)\mathrm{d}\omega_R\mathrm{d}z=\\&\frac{g_B\Gamma_1}{2}\int_0^{\Delta z}G_1(z,\omega)\exp\left(-2j\frac{n}{c}\omega z\right)\mathrm{d}z\end{aligned} \tag{5}$$

因此，瞬态 SBS 作用频域增益为：

$$G_1(z,\omega)=E_R(z)\cdot\left\{E_{p2}(0,\omega)*\frac{E_{p2}(0,\omega)}{\Gamma_1-j[\Delta(z)+\omega]}\right\} \tag{6}$$

式中：* 为卷积符号；$E_{p2}(0,\omega)$为窄传感脉冲时域表达式的傅里叶变换，即

$$E_{p2}(j\omega)=(A_p+C_p)\cdot D\cdot\mathrm{Sa}\left(\frac{\omega D}{2}\right)\mathrm{e}^{-j\omega\frac{D_p-D/2}{2}} \tag{7}$$

将公式(3)、公式(7)代入公式(6)中，可得瑞利散射光与传感脉冲光瞬态 SBS 作用的频域增益。

同理可得，在任意 z 点预泵浦脉冲 0 阶基带光场强为 $C_p^2J_0^2(C)[1+\cos(2\varphi_i)]/2$[7]，式中 $J_0(C)$为由调制深度决定的零阶第一类 Bessel 函数值。忽略泵浦耗尽效应的影响，传感光纤 z 处预泵浦脉冲光 0 阶基带产生的 SPBS 光场强为[1]：

$$E_{\mathrm{SPBS}}(z)=\frac{1}{2}C_p^2J_0^2(C)[1+\cos(2\varphi_i)]E_{p1}\cdot\sqrt{\frac{c\alpha_B S}{2n}(D_p-D)\cdot\exp(-2\alpha z)} \tag{8}$$

式中：α_B 为布里渊散射系数。预泵浦脉冲 0 阶基带产生的 SPBS 光与传感脉冲发生瞬态 SBS 作用的频域增益为：

$$G_2(z,\omega)=E_{\mathrm{SPBS}}(z)\cdot\left\{E_{p2}(0,\omega)*\frac{E_{p2}(0,\omega)}{\Gamma_1-j[\Delta(z)+\omega]}\right\} \tag{9}$$

公式(3)和(8)中，当调制深度 $C<2$ 时，增加 C 可增大 $J_1(C)$值，从而可增加微波调制预泵浦脉冲 1 阶边带和瑞利散射的光强；因微波调制预泵浦脉冲偏置在 EOM 线性区近谷点，增加 C 使 $J_0(C)$值变小，但为了充分预激发声波场，应保证适当光强的预泵浦脉冲 0 阶基带信号通过 EOM。综合上述两点可确定 C 值。

2 布里渊散射谱

PPP-瑞利 BOTDA 系统采用高消光比的 EOM，通过时间有限的微波调制预泵浦脉冲光 1 阶边带的瑞利散射作探测光与传感脉冲光发生 SBS 作用，并限制 SBS 作用的区间，从而实现布里渊响应的时域整形，减小非本地效应对系统性能的影响；利用微波调制预泵浦脉冲光的 0 阶基带充分预激发声波场，其产生的 SPBS 与传感脉冲发生 SBS 作用，并且经 SBS 放大后的谱宽主要由预泵浦脉冲 0 阶基带产生的自发布里渊散射谱宽决定；当传感脉冲和预泵浦脉冲 0 阶基带的光强为同一量级时，因传感脉冲宽度很窄，因此其产生的布里渊散射谱很宽，幅值很小；脉宽小于声子寿命的传感脉冲频率 v_0 保持不变，其与预泵浦脉冲产生的背向散射光相互作用，使返回入射端的布里渊散射谱 (Brillouin Scattering Spectrum，BSS) 由经与传感脉冲 SBS 作用放大后的预泵浦脉冲 0 阶基带产生的谱宽很窄的 BSS 和传感脉冲与预泵浦脉冲 1 阶边带的瑞利散射光之间发生 SBS 作用产生的谱宽很宽的 BSS 叠加而成，从而实现布里渊响应的谱域整形，在不降低系统空间分辨率的情况下有效地提高测量精度。

对窄脉冲而言，需考虑脉冲谱特性对布里渊增益谱的影响。将稳态布里渊增益 $g(z,v)=\gamma g_0(\Delta v_B/2)^2/[(v-v_B)^2+(\Delta v_B/2)^2]$与传感脉冲功率谱 $f(v)$卷积得到布里渊增益功率谱，再与瞬态 SBS 增益 $G_1(z,\omega)$相乘可得瞬态布里渊增益功率谱为[9-10]：

$$S_{p1}=G_1(z,\omega)\cdot g(z,v)*f(v)=G_1(z,\omega)\cdot\gamma g_0\frac{1}{A^2+1}\cdot\left\{1+\frac{(A^2-1)-\exp(-B_1)[(A^2-1)\cos B_1A+2A\sin B_1A]}{B_1(A^2+1)}\right\}=G_1(z,\omega)\cdot\gamma g_0\cdot F(A,B_1) \tag{10}$$

式中：$A=(v-v_B)/(\Delta v_B/2)$，$v=\omega/2\pi$ 为光频；Δv_B 为布里渊自然增益谱宽；$B_1=\pi D\Delta v_B$；g_0 为布里渊峰值增益；γ 为依赖于传感脉冲光和探测光偏振态的偏振因子[11]。

同时，预泵浦脉冲 0 阶基带在光纤中产生的 SPBS 功率谱为[10]：

$$S_{\mathrm{pre}}(z,v)=\frac{2S_{\mathrm{SPBS}}(z)\mathrm{e}^{\alpha z}}{\pi\cdot\Delta v_B}F(A,B_2) \tag{11}$$

式中：$B_2=\pi(D_p-D)\Delta v_B$；预泵浦脉冲 0 阶基带产生的 SPBS 光功率 $P_{\mathrm{SPBS}}(z)=|E_{\mathrm{SPBS}}(z)|^2A_{\mathrm{eff}}$，$A_{\mathrm{eff}}$ 为纤芯有效面积。与传感脉冲发生 SBS 作用后，预泵浦脉冲 0 阶基带产生的瞬态布里渊散射谱为：

$$S_{p2}=S_{\mathrm{pre}}(z,v)\cdot G_2(z,\omega) \tag{12}$$

根据公式(10)和(12)可得，阶梯脉冲光产生的布里渊散射谱叠加为：

$$S(z,v)=S_{p1}+S_{p2}=G_1(z,\omega)\cdot\gamma g_0\cdot F(A,B_1)+G_2(z,\omega)\cdot S_{\mathrm{pre}}(z,v) \tag{13}$$

式中：等号右端第一项表示谱宽很宽的传感脉冲光和微波调制预泵浦脉冲 1 阶边带产生的瑞利散射光 SBS 作用产生的瞬态受激布里渊散射谱，具有低频率测量精度和高空间分辨率特性；第二项表示谱宽很窄的预泵浦脉冲光 0 阶基带产生的 SPBS 光与传感脉冲 SBS 作用的瞬态布里渊散射谱，其中瞬态增益 $G_2(z,\omega)$含有传感脉冲宽度信息，具有高频率测量精度和高空间分辨率特性。因此，PPP-瑞利 BOTDA 系统的频率测量精度(即布里渊散射谱宽)和空间分辨率分别主要取决于预泵浦脉冲宽度和传感脉冲宽度。

3 仿真与分析

在传统瑞利BOTDA 系统中，当脉冲宽度小于或接近声子寿命时，布里渊散射谱急剧展宽且谱峰功率大幅度降低。文中根据时域和谱域整形的思想，将 PPP 技术引入瑞利 BOTDA 系统，用阶梯脉冲调制代替传统单脉冲调制，可使布里渊散射谱变窄，因此传感脉冲宽度 D 理论上可尽量小，但有研究表明当脉冲宽度小于 5 ns 时布里渊频谱会发生畸变[12]，因此选取传感脉冲宽度 D=5 ns，其值决定了系统空间分辨率 $\Delta z=cD/(2n)$=0.5 m；传感脉冲峰值功率取 100 mW。预泵浦脉冲宽度需大于 3 倍的声子寿命才可充分激发声波场[13]，同时，为了尽可能减小非本地效应的影响，设置预泵浦脉冲宽度 D_p-D=50 ns，峰值功率 P_{pre}=

16 mW;为了保证线性区近谷点调制,预泵浦脉冲峰值功率限制了加在 EOM 上的最大微波调制功率,因而调制深度 $C=\pi V_m/2V_\pi=0.33$,其中 $V_\pi=6$ V 为 EOM 半波电压,$V_m=1.26$ V 为微波调制信号幅度。采用长度 $L=1$ 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,根据公式(6)解得有关 z 变量的瞬态增益 $G_1(z,\omega)$,然后对某个散射点 z 处一个空间分辨率 Δz 内瑞利散射光的瞬态 SBS 增益进行仿真,可得不同光纤位置的瞬态 SBS 增益如图 2 所示。

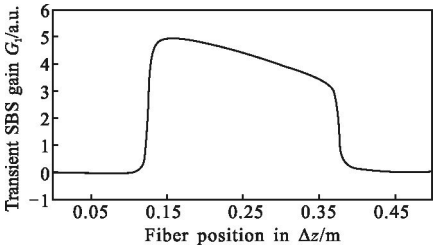


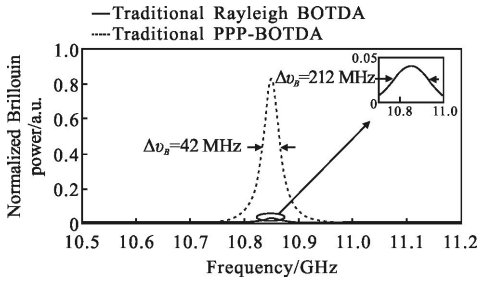
图 2 Δz 内不同光纤位置的瞬态 SBS 增益

Fig.2 Transient SBS gain of different fiber position in Δz

由图 2 可知,传感脉冲与预泵浦脉冲 1 阶边带产生的背向瑞利散射光在长度为 $\Delta z=0.5$ m 的光纤上发生瞬态 SBS 作用时,随距离的增加,SBS 增益呈现出初始段和末端段基本无增益,中间段约在横坐标 0.14 m 处达最大,然后近似线性地减小至横坐标约 0.37 m 处。这是由于当考虑每段 Δz 微元时,公式(6)中假设了相邻 Δz 之间 SBS 作用没有相互干扰,即假设瑞利散射光边界条件为在 $z=\Delta z$ 处 $E_R(\Delta z,\omega)=0$;因受声波场的影响,传感脉冲与作为探测光的瑞利散射产生一定时延,又由于预泵浦脉冲光超前传感脉冲光传输,在预泵浦脉冲 1 阶边带产生的瑞利散射光与传感脉冲相遇前的 0~0.14 m 区间内 $E_{p2}(z,t)=0$,故对应区间上 SBS 增益为零;瑞利散射光与相向传输的传感脉冲约在 0.14 m 处相遇,此时得到最大的 SBS 增益;在 0.14~0.37 m 区间内 SBS 增益表现出因瑞利散射光受光纤衰减影响而沿光纤单调下降,SBS 增益逐渐减小;在预泵浦脉冲产生的瑞利散射光与传感脉冲相离的过程中 SBS 作用减小,即在 0.37~0.5 m 区间 SBS 增益近似为零。

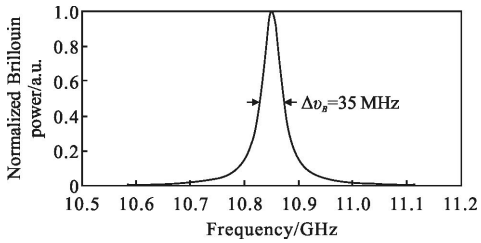
上述分析仅针对某个散射点的瑞利散射光与传感脉冲作用的 SBS 增益,而当考虑整条传感光纤上的 SBS 作用时,每段 Δz 微元处的 SBS 增益是瑞利散射光在各个散射点与传感脉冲作用后 SBS 增益的叠加。由于微波调制预泵浦脉冲光的时间有限,因此经 SBS 作用的探测光仅携带预泵浦脉冲对应的 5 m 光纤长度内的温度/应变信息,从而有效地减小了瑞利 BOTDA 系统中由脉冲泵浦光和连续探测光的能量转移累积而引起的非本地效应,实现了布里渊散射信号的时域整形。

根据公式(13)可得,单个传感脉冲调制时(即传统瑞利 BOTDA)和微波调制预泵浦脉冲 0 阶基带与传感脉冲发生 SBS 作用时(即传统 PPP-BOTDA)的布里渊散射功率增益谱如图 3(a)所示,阶梯脉冲调制时的布里渊散射功率增益谱如图 3(b)所示。



(a) 传统瑞利 BOTDA 系统和 PPP-BOTDA 系统的增益谱

(a) Gain spectra of traditional Rayleigh BOTDA and PPP-BOTDA



(b) PPP-瑞利 BOTDA 系统增益谱

(b) Gain spectrum of PPP-Rayleigh BOTDA

图 3 布里渊增益谱

Fig.3 Gain spectra of Brillouin scattering

由图 3(a)可知,单个传感脉冲调制时,由于脉宽 5 ns 小于声子寿命,中心频率为 ν_B 的 BSS 明显展宽至 212 MHz,谱峰功率很小,布里渊频移测量精度很低;由于微波调制预泵浦脉冲 0 阶基带可以预激发声波场,其产生的 SPBS 与传感脉冲发生 SBS 作用产生的中心频率为 ν_B 的 BSS 谱宽为 42 MHz。由图 3(b)可知,在文中提出的 PPP-瑞利 BOTDA 系统中采用阶梯脉冲调制,由于预泵浦脉冲 0 阶基带的存在,声波场完全被激发,阶梯脉冲光产生的 BSS 由传感脉

冲与预泵浦脉冲 1 阶边带的瑞利散射光 SBS 作用产生的谱宽很宽的 BSS 和经与传感脉冲 SBS 作用放大后的预泵浦脉冲 0 阶基带产生的谱宽很窄的 BSS 叠加而成，谱峰功率相对传统瑞利 BOTDA 系统增加了约 24 倍，叠加后中心频率为 ν_B 的布里渊谱宽为 $\Delta\nu\approx35$ MHz，小于传统 PPP-BOTDA 系统的 BSS 谱宽 42 MHz，远小于传统瑞利 BOTDA 系统的 BSS 谱宽，说明通过预泵浦脉冲布里渊散射谱对传感脉冲宽带布里渊散射谱的整形，有效地压缩了系统的布里渊散射谱宽。

由参考文献[14]可得布里渊频移测量精度与系统信噪比 SNR 的关系曲线如图 4 所示。由于阶梯脉冲调制的 PPP-瑞利 BOTDA 系统的布里渊谱宽仅为单脉冲调制的传统瑞利 BOTDA 系统布里渊谱宽的 1/6.06，故在相同空间分辨率、相同信噪比下 PPP-瑞利 BOTDA 系统可获得的布里渊频移测量精度相对传统瑞利 BOTDA 系统提高 6.06 倍。传统瑞利 BOTDA 系统在 300 m 传感光纤末端的 SNR 为 21 dB[5]，对应的频率测量精度为 45 MHz，而 PPP-瑞利 BOTDA 系统在 SNR 为 21 dB 时的频移测量精度为 7.4 MHz，相对传统瑞利 BOTDA 系统的频移测量精度有大幅提高。由于 PPP-瑞利 BOTDA 系统中预泵浦脉冲 0 阶基带可充分预激发声波，系统 SNR 远高于传统瑞利 BOTDA 系统，因此可实现远距离传感。

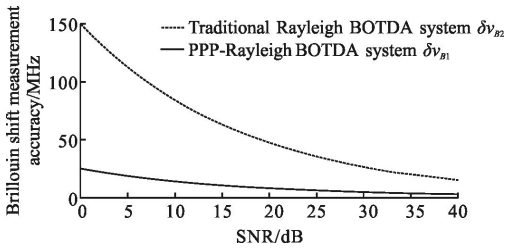


图 4 布里渊频移测量精度与信噪比的关系

Fig.4 Brillouin shift measurement accuracy versus SNR

4 结 论

文中将 PPP 技术引入瑞利 BOTDA 系统，提出了一种利用阶梯脉冲调制提高传感系统性能的方法，通过微波调制预泵浦脉冲 1 阶边带的瑞利散射和微波调制预泵浦脉冲 0 阶基带的 SPBS 与传感脉冲的 SBS 作用，产生的两部分布里渊散射谱的合成，实现了布里渊散射信号的时域和谱域整形。采用频域法求解了 SBS 瞬态耦合波方程，建立了脉冲预泵浦瑞利 BOTDA 系统中阶梯脉冲光在光纤中 SBS 作用的解析模型。仿真结果表明，当传感脉冲宽度为 5 ns、峰值功率为 100 mW，预泵浦脉冲宽度为 50 ns、峰值功率为 16 mW 时，在空间分辨率 0.5 m 内 SBS 增益在 0.14 m 处达到最大值，然后近似线性下降至 0.37 m 处，其余位置近似为零；系统布里渊散射谱宽近似为 35 MHz，与传统瑞利 BOTDA 系统布里渊谱宽 212 MHz 相比，在相同空间分辨率、相同信噪比下频率测量精度可提高 6.06 倍，有效地解决了空间分辨率和测量精度之间的矛盾，减小了非本地效应。文中的研究结果对于探索高性能单光源、单端工作、非破坏的 BOTDA 系统新方案具有重要参考价值。

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] Zhang Yi, Bai Lianfa, Chen Qian, et al. Application of Brillouin scattering on underwater laser imaging detection[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(4): 665-668. (in Chinese)
张毅, 柏连发, 陈钱, 等. 布里渊散射在水下激光成像探测中的应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(4): 665-668.

[3] Thevenaz L, Nikles M, Fellay A, et al. Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers [C]//SPIE, 1998, 3330: 301-314.

[4] Kishida K, Li C, Nishiguchi K. Pulse pre-pump method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [J]. ***Technical report of IEICE***, 2004, 47(10): 15-20.

[5] 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.

[6] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics [M]. Boston: Academic Press, 1995.

[7] Zhou Huijuan, Meng Zhou, Liao Yi. Frequency shift characteristics analysis of $LiNbO_3$ waveguide electro-optic intensity modulator[J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2009, 36(4): 901-905. (in Chinese)
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.

[8] Wang Hu. Reseach on key technologies of Rayleigh BOTDA system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.

[9] Ravet F, Bao X, Zou L, et al. Accurate strain detection and localisation with the distributed Brillouin sensor based on phenomenological signal processing approach [C]//SPIE, 2006, 6176: 61761C-1-9.

[10] Iida D, Ito F. Detection sensitivity of Brillouin scattering near Fresnel reflection in BOTDR measurement [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2008, 26(4): 417-424.

[11] Van Deventer M O, Boot A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 1994, 12(4): 585-590.

[12] Bao X, Brown A, Demerchant M, et al. Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short (<10-ns) pulses[J]. ***Optics Letters***, 1999, 24(8): 510-512.

[13] Foaleng S M, Tur M, Beugnot J C, et al. High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes [J]. ***Journal of Lightwave Technology***, 2010, 28(20): 2993-3003.

[14] 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): 1296-1302.