

文章编号: 1001-3806(2016)02-0232-05

光学差分参量放大布里渊时域分析优化研究

秦祖军^{1,2,3}, 梁国令¹, 张文涛^{1,3}, 叶松^{1,3}, 熊显名^{1,3}

(1. 桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学 广西信息科学实验中心, 桂林 541004; 3. 桂林电子科技大学 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 为了优化设计基于光学差分参量放大的布里渊光时域分析抽运的脉冲编码形式以及斯托克斯光与反斯托克斯光脉宽差, 采用微扰法和小信号近似法, 获得了探测光与斯托克斯光脉冲、反斯托克斯光脉冲在较小作用区域内的脉冲响应, 对其性能进行了理论分析与数值验证。结果表明, π 相位斯托克斯光脉冲可有效压缩布里渊增益谱宽, 提高布里渊信号信噪比; 当斯托克斯光与反斯托克斯光传感脉冲脉宽差为 8ns 时, 探测光布里渊增益最大。这一结果对进一步分析基于光学差分参量放大的布里渊光时域分析系统性能以及开展相关实验研究是有帮助的。

关键词: 光纤光学; 优化设计; 微扰法与小信号近似法; 布里渊光时域分析

中图分类号: O437; TP212.1⁺4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.02.017

Optimization of Brillouin optical time-domain analysis based on optical differential parametric amplification

QIN Zujun^{1,2,3}, LIANG Guoling¹, ZHANG Wentao^{1,3}, YE Song^{1,3}, XIONG Xianming^{1,3}

(1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 2. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to optimize pump pulse formats of Brillouin optical time-domain analysis based on optical differential parametric amplification (ODPA-BOTDA) and pulse-width difference between Stokes pulse and anti-Stokes pulse, by using perturbation method and small signal approximation, pulse response of probe light with Stokes and anti-Stokes pulses in the small region was obtained. After theoretical analysis and numerical verification of the performances, the results show that Stokes pulse with π -phase can effectively compress Brillouin gain spectrum width and increase Brillouin signal-to-noise ratio. Meanwhile, the maximum Brillouin gain is achieved when an optimized pulse-width is 8ns. The study would be helpful for the investigation of ODPA-BOTDA in the subsequent research.

Key words: fiber optics; optimization design; perturbation method and small signal approximation; Brillouin optical time-domain analysis

引言

近年来, 布里渊分布式光纤传感器可以感知整条光纤链路上被测物理场的空间分布和随时间连续变化信息, 在重要军民大型基础设施的安全监测领域有广

泛应用前景; 同时, 它具有体积小、耐强磁场、耐辐射和抗腐蚀等诸多优点, 因此得到极大的关注^[1-2]。其中, 基于光纤受激布里渊散射机理的布里渊时域分析 (Brillouin optical time-domain analysis, BOTDA) 探测信号光较强, 具有传感距离较远和测量精度高等优点。在 BOTDA 系统中, 布里渊抽运光和探测光在传感光纤中相向传输, 由电致伸缩效应激发超声波, 并通过声波场产生能量转移, 能量转移大小与两者光频差相关。通过扫频法和光时域反射技术, 可重构出传感链路的 3 维布里渊谱, 并提取出传感光纤布里渊频移分布。最后, 根据传感光纤布里渊频移与待测物理参量之间的线性关系反演出待测物理量的沿线分布信息。

空间分辨率是 BOTDA 性能的关键指标之一。然

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (2013GXNSFBA019269; 2014GXNSFAA118389); 桂林电子科技大学广西信息科学实验中心资助项目 (20130382); 广西自动检测技术与仪器重点实验室资助项目 (YQ14107)

作者简介: 秦祖军 (1978-), 男, 博士, 现主要从事非线性光纤光学研究。

E-mail: junqinzu@sina.com

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-03-23

而受声子寿命的限制,传统 BOTDA 的空间分辨率最高只能达 1m,限制了其在一些高空间分辨率场合的应用^[3-6]。进一步提高空间分辨率的通常方法是减小抽运脉冲宽度至小于 10ns^[1,7],但是该方案使布里渊增益减小和增益谱展宽,降低了探测信号信噪比和测量结果准确度^[4]。近年来,研究学者提出了诸多新颖的科学思路和技术手段,实现了厘米量级的空间分辨率,包括布里渊相关域分析^[8]、脉冲预抽运 (pulse pre-pump, PPP) 布里渊光时域分析^[9]、差分脉宽对 (differential pulse-width pair, DPP) 布里渊光时域分析^[10]等。其中, SOTO 等人提出的 DPP 技术在远距离测量 BOTDA 系统中具有较强实用性,它通过对同一扫描频率处的一组不同脉宽抽运脉冲获取的电域时域波形做差分运算,在数十千米量级传感链路上达到了 0.25m 的空间分辨率^[11]。但在研究时也发现, DPP-BOTDA 测量时间过长 (约为普通 BOTDA 的 2 倍),影响了其时效性^[11]。为此, BAO 等人提出了基于光域差分参量放大技术 (optical differential parametric amplification, ODPA) 对 DPP 进行改进^[4]。该方案中,抽运脉冲光包含脉宽存在差异 (脉宽差小于 10ns) 的斯托克斯光脉冲和反斯托克斯光脉冲,使探测光在传感光纤中同时受到布里渊增益和损耗作用,在光域内直接完成差分运算。BAO 等人还指出, ODPA 同时保证了测量时间和空间分辨率,是一种有效提高 BOTDA 空间精度的方法,具有潜在应用价值^[12]。目前,虽然实验验证了基于 ODPA 技术的 BOTDA,但是并未对其性能进行优化设计。

作者基于 ODPA 瞬态耦合模型,对不同脉冲编码方式的 ODPA-BOTDA 性能进行了优化研究。为充分利用预激发声波, ODPA-BOTDA 反斯托克斯光脉冲固定为强度脉冲,斯托克斯光脉冲分别为强度脉冲、亮脉冲、暗脉冲和 π 相位脉冲等不同形式脉冲编码。分析了斯托克斯光脉冲与反斯托克斯光脉冲脉宽差对探测光布里渊增益的影响,获得了最佳脉宽差。

1 ODPA-BOTDA 理论模型

ODPA-BOTDA 原理如图 1 所示。探测光 (幅值为 A_1 , 以下均用幅值表示光波) 从传感光纤一端 ($z=L, L$ 为传感光纤长度) 注入; 幅值为 A_2 的斯托克斯光和幅值为 A_3 的反斯托克斯光为抽运脉冲, 从传感光纤另一端 ($z=0$) 输入。 A_1 与 A_2 和 A_3 在光纤中相遇, 同时产生布里渊增益和布里渊损耗过程, 其中: A_1 与 A_2 相互作用产生 $-z$ 方向传输声波 (幅度为 ρ_1), 为布里渊损耗过程; A_1 与 A_3 相互作用产生 $+z$ 方向传输声波 (幅度为 ρ_2), 为布里渊增益过程。图中, $\nu, \nu + \nu_B, \nu - \nu_B$

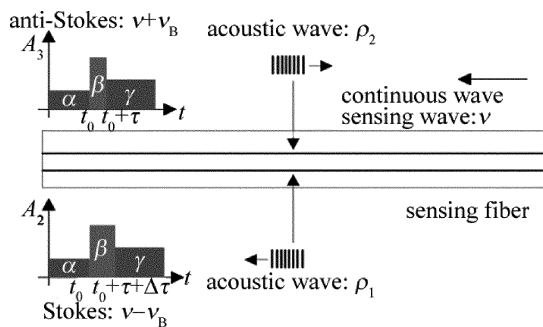


Fig. 1 Scheme of ODPA-BOTDA

分别是探测光、反斯托克斯光和斯托克斯光的频率。一般斯托克斯光脉冲 A_2 和反斯托克斯光脉冲 A_3 均由预抽运脉冲 α 、传感脉冲 β 和尾脉冲 γ 等三部分组成, 它们可分别表示为:

$$\begin{cases} A_2(z, t) = \bar{A}_2(z) [\alpha_2 u(t - z/v_g) + (\beta_2 - \alpha_2) u(t - T_0) + (\gamma_2 - \beta_2) u(t - T_1)] \\ A_3(z, t) = \bar{A}_3(z) [\alpha_3 u(t - z/v_g) + (\beta_3 - \alpha_3) u(t - T_0) + (\gamma_3 - \beta_3) u(t - T_2)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, 函数 u 表示单位阶跃函数, $\alpha_i \bar{A}_i, \beta_i \bar{A}_i, \gamma_i \bar{A}_i$ 分别表示斯托克斯光脉冲 ($i=2$) 和反斯托克斯光脉冲 ($i=3$) 三组成部分的幅值, 上标 “-” 表示平均值; $T_0 = t_0 + z/v_g, T_1 = t_0 + z/v_g + \tau + \Delta\tau, T_2 = t_0 + z/v_g + \tau$, 满足 $z/v_g \leq T_0 \leq T_2 \leq T_1$, 其中, t_0 为 β 脉冲的初始时间, $\tau + \Delta\tau$ 为斯托克斯光 β 脉冲持续时间, τ 为反斯托克斯光 β 脉冲持续时间, v_g 为光脉冲在传感光纤中的群速度。上述两式中, α 和 γ 取值范围为 $0 \sim 1$ 且两者相等; β 取 $-1, 0$ 或 1 。不同取值表示不同脉冲编码形式^[13-14]: $\alpha = \gamma = 0, \beta = 1$ 为强度脉冲; $\alpha = \gamma \in (0, 1), \beta = 1$ 为亮脉冲; $\alpha = \gamma = 1, \beta = 0$ 为暗脉冲; $\alpha = \gamma = 1, \beta = -1$ 为 π 相位脉冲。 β 脉冲为传感脉冲, 宽度越窄空间分辨率越好。为使 ODPA-BOTDA 空间分辨率小于 1m, 则斯托克斯光与反斯托克斯光 β 脉冲宽度差 $\Delta\tau$ 应小于光纤声子寿命 τ_f 。

为了对图 1 所示的 ODPA-BOTDA 性能进行优化设计, 首先忽略斯托克斯光和反斯托克斯光间的群速度失配影响 (两者波长间距约 0.16nm, 该近似是合理的)。根据传感光纤中探测光、斯托克斯光和反斯托克斯光三者间的受激布里渊散射理论, 它们的幅值随时间 t 、空间 z 演化的耦合波方程可如下表示^[4,12]:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_1}{\partial t} &= \frac{i\omega_1 \gamma_e}{2nc\epsilon_0} \rho_1 A_2 + \frac{i\omega_1 \gamma_e}{2nc\epsilon_0} \rho_2^* A_3 - \frac{1}{2} \alpha_f A_1, \\ \frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_2}{\partial t} &= \frac{i\omega_2 \gamma_e}{2nc\epsilon_0} \rho_1^* A_1 - \frac{1}{2} \alpha_f A_2, \\ \frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_3}{\partial t} &= \frac{i\omega_3 \gamma_e}{2nc\epsilon_0} \rho_2 A_1 - \frac{1}{2} \alpha_f A_3, \\ (-2i\Omega_1 + \Gamma_B) \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + (\Omega_B^2 - \Omega_1^2 - i\Omega_1 \Gamma_B) \rho_1 &= \end{aligned}$$

$$\frac{\gamma_e q_1^2}{4\pi} A_1 A_2^* \cdot (-2i\Omega_2 + \Gamma_B) \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + (\Omega_B^2 - \Omega_2^2 - i\Omega_2 \Gamma_B) \rho_2 = \frac{\gamma_e q_2^2}{4\pi} A_3 A_1^* \quad (2)$$

式中, * 表示共轭, α_f 为光纤衰减系数; ρ_0 为光纤密度; $\Gamma_B = 1/\tau_f$ 为传感光纤布里渊线宽; n 为光纤折射率, c 为真空光速; γ_e 是电致伸缩系数; $\Omega_B/(2\pi)$ 为布里渊频移; $\Omega_1 = \omega_1 - \omega_2$, $\Omega_2 = \omega_3 - \omega_1$; ω_1 为探测光频率, ω_2 为斯托克斯光频率, ω_3 为反斯托克斯光角频率; $q_1 = k_1 + k_2$, $q_2 = k_3 + k_1$, 其中 k_1, k_2, k_3 分别为探测光、斯托克斯光和反斯托克斯光波数。

为通过解析方式优化 ODPa-BOTDA 性能, 考虑到探测光与斯托克斯光脉冲、反斯托克斯光脉冲的作用时间与声子寿命相当或更小, 首先在三者相互作用区域, 对(2)式做以下合理处理^[15]: 忽略光纤的衰减损耗; 光波间受激布里渊散射作用较弱, 忽略斯托克斯脉冲和反斯托克斯脉冲的布里渊增益和损耗, 即 A_2, A_3 为常数; A_2 和 A_3 对 A_1 的综合增益为小信号增益。基于以上近似, 可将探测光表示为微扰形式, 即 $A_1(z, t) = \bar{A}_1 + a_1(z, t)$, 其中 \bar{A}_1 为探测光平均幅值, $a_1(z, t)$ 为 A_2 和 A_3 产生的布里渊损耗和布里渊增益共同作用引起的探测光幅度波动。根据上述近似及 A_1 的微扰形式, 代入(2)式, 经过一系列繁杂推导可得探测光与斯托克斯光脉冲、反斯托克斯光脉冲在较小相互作用区域内(设为 Δz)探测光信号的脉冲响应:

$$\begin{aligned} a_{1, \text{short}}(z, t) = & i\Delta z g_0 \bar{g}_1 |\bar{A}_2|^2 \bar{A}_1 \times \\ & \left\{ \alpha^2 \left[u\left(t - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) - u\left(t - T_0' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right] + \right. \\ & \beta [\beta - (\beta - \alpha) \exp[-\Gamma_1(t - T_0' - (2z_0 - z)/v_g)]] \times \\ & \left. \left[u\left(t - T_0' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) - u\left(t - T_1' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right] + \right. \\ & \gamma [\gamma - [\beta(1 - e^{\Gamma_1(\tau + \Delta\tau)}) - (\alpha - \gamma e^{\Gamma_1(\tau + \Delta\tau)})]] \times \\ & \exp[-\Gamma_1(t - T_0' - (2z_0 - z)/v_g)] \times \\ & \left. u\left(t - T_1' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right\} + i\Delta z g_0 \bar{g}_2 |\bar{A}_3|^2 \bar{A}_1 \times \\ & \left\{ \alpha^2 \left[u\left(t - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) - u\left(t - T_0' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right] + \right. \\ & \beta [\beta - (\beta - \alpha) \exp[-\Gamma_2(t - T_0' - (2z_0 - z)/v_g)]] \times \\ & \left. \left[u\left(t - T_0' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) - u\left(t - T_2' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right] + \right. \\ & \gamma [\gamma - [\beta(1 - e^{\Gamma_2\tau}) - (\alpha - \gamma e^{\Gamma_2\tau})]] \times \\ & \exp[-\Gamma_2(t - T_0' - (2z_0 - z)/v_g)] \times \\ & \left. u\left(t - T_2' - \frac{2z_0 - z}{v_g}\right) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

式中, $T_0' = t_0$, $g_0 = \omega_1 \gamma_e / (2nc\rho_0)$; $T_1' = t_0 + \tau + \Delta\tau$,

$\bar{g}_1 = \gamma_e q_1^2 / [4\pi(\Omega_B^2 - \Omega_1^2 - i\Omega_1 \Gamma_B)]$, $\Gamma_1 = (\Omega_B^2 - \Omega_1^2 - i\Omega_1 \Gamma_B) / (-2i\Omega_1 + \Gamma_B)$; $T_2' = t_0 + \tau$, $\bar{g}_2 = \gamma_e q_2^2 / [4\pi \times (\Omega_B^2 - \Omega_2^2 + i\Omega_2 \Gamma_B)]$, $\Gamma_2 = (\Omega_B^2 - \Omega_2^2 + i\Omega_2 \Gamma_B) / (2i\Omega_2 + \Gamma_B)$; z_0 为初始测量位置。(3)式包含两项, 其中第1项表示 A_1 对 A_2 产生布里渊损耗, 第2项表示 A_3 对 A_1 的布里渊放大, 两项均包含3个作用过程: 持续时间较长的预抽运脉冲(α 脉冲)首先进入光纤, 产生预激发声波; 经一段时间后, 传感脉冲(β 脉冲)开始作用, 探测光幅度发生变化; β 脉冲停止作用后, γ 脉冲开始作用, 逐渐恢复预激发声波。根据上述解析模型即可对 ODPa-BOTDA 性能进行优化设计。

2 结果讨论与分析

2.1 不同斯托克斯光脉冲编码对布里渊增益的影响

由图1可知, ODPa-BOTDA 所激发的声波(ρ_1 和 ρ_2)方向相反。为了充分利用 α 脉冲的预激发声波, 将反斯托克斯光脉冲 A_3 固定为强度脉冲, 斯托克斯光脉冲 A_2 取强度脉冲、亮脉冲、暗脉冲和 π 相位脉冲等不同的脉冲形式。考虑布里渊共振情况(即 $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_B$), 设初始位置作用时间为 $2z_0/v_g = 20\text{ns}$, 反斯托克斯光和斯托克斯光的 β 脉冲持续时间分别为 5ns 和 8ns。图2为不同斯托克斯光脉冲编码时探测光布里渊增益随时间变化关系。当反斯托克斯光脉冲和斯托克斯光脉冲均为强度脉冲时(如图2a所示), 由于缺乏 α 脉冲作用, 预激发声波场无法建立, 在反斯托克斯光脉冲持续时间 τ (5ns) 内布里渊增益和损耗过程同时发生, 相互抵消; 在后续 $\Delta\tau$ (3ns) 时间内仅存在 A_1 与 A_2 间的布里渊损耗过程, 此时布里渊信号损耗幅值较小。图2b~图2d中, 斯托克斯光的 α 脉冲均首先作用并产生预激发声波场。当 β 脉冲到来时, 若 A_2 为亮脉冲(如图2b所示), 其产生的布里渊损耗在 τ 时间内比 A_3 产生的布里渊增益大; 在后续 $\Delta\tau$ 时间内 A_3 停止作用, A_2 产生的布里渊损耗作用仍继续; 若 A_2 为暗脉冲(如图2c所示), A_2 在 $\tau + \Delta\tau$ 时间内关闭, 无布里渊损耗产生, 仅 A_3 在 τ 时间内与 A_1 发生受激布里渊散射对其放大。由图可知, 相比于图2a和2b, 图2c中所示暗脉冲布里渊增益幅值远大于强度脉冲和亮脉冲产生的损耗幅值。图2d表示 A_2 为 π 相位脉冲时的布里渊信号增益, 斯托克斯光 β 脉冲在 $\tau + \Delta\tau$ 时间内发生 180° 相移, 此时 A_1 和 A_2 间的布里渊散射作用等效为布里渊增益过程, 因此布里渊增益大大增强, 约为暗脉冲的 1.5 倍。此外, 图2b~图2d中的斯托克斯光和反斯托克斯光 β 脉冲持续时间均较短, 当 γ 脉冲到来时, 预激发声波经轻微衰减后恢复初始

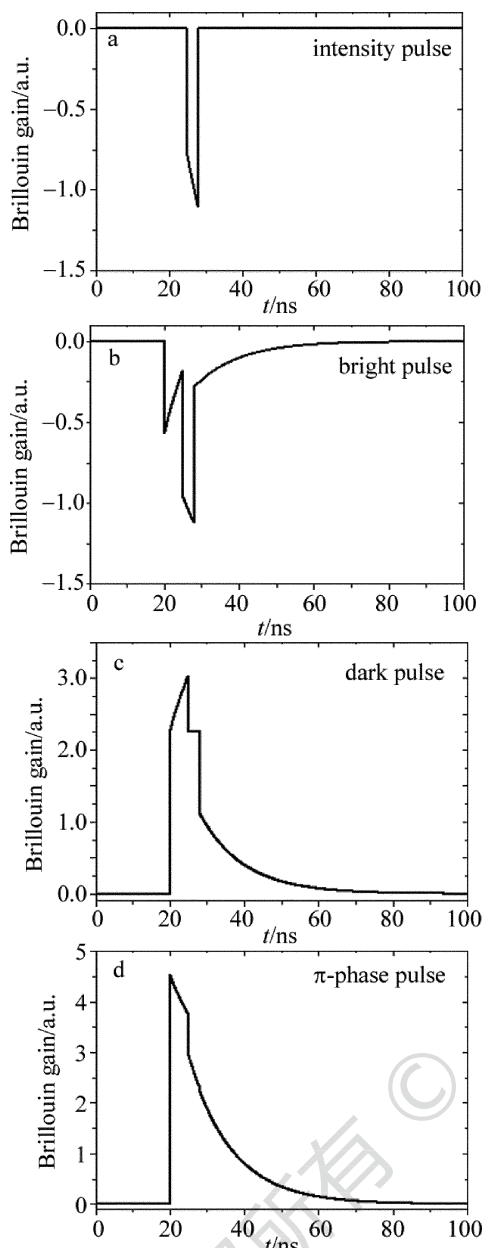


Fig. 2 Brillouin gain obtained by different Stokes pulse formats

状态,保证了预激发声波场的稳定。

2.2 不同斯托克斯光脉冲编码的布里渊增益谱分析

布里渊增益谱(为方便比较,将布里渊损耗谱取绝对值并统一称为布里渊增益谱)对 BOTDA 物理量测量精度至关重要。本节中将分析不同脉冲编码形式对布里渊增益谱的影响。同样地,为了充分利用 α 脉冲的预激发声波,将反斯托克斯光脉冲 A_3 固定为强度脉冲,斯托克斯光脉冲 A_2 取不同编码形式。设传感光纤布里渊频移 $\Omega_B/(2\pi) \approx 11.15\text{GHz}$,布里渊线宽为 45MHz ,扫频范围为 $10.65\text{GHz} \sim 11.65\text{GHz}$,扫描的频率间隔为 5MHz ,反斯托克斯光 β 脉冲持续时间 $\tau = 2\text{ns}$,斯托克斯光 β 脉冲持续时间 $\tau + \Delta\tau = 3\text{ns}$;取布里渊作用区域 $\Delta z = 1\text{m}$ 。图 3 为 $t = 13\text{ns}$ 时,不同 α 值 ($\alpha \in (0 \sim 1)$) 斯托克斯光亮脉冲对应的布里渊增益

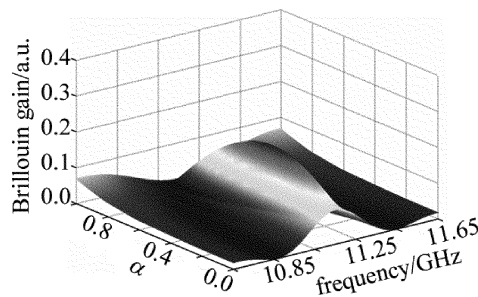


Fig. 3 Brillouin gain spectrum obtained by different bright pulse formats
谱。为了对比分析,同时也计算了斯托克斯光脉冲为强度脉冲($\alpha = 0$)时的布里渊增益谱。分析可知,相对于强度脉冲,预抽运 α 脉冲产生的预激发声波对抑制布里渊增益谱展宽具有明显效果;但 α 值过大,布里渊增益将降低,影响布里渊信号信噪比。因此, α 脉冲幅度需优化设计,以保证获取较窄的布里渊增益谱的同时获得较高的布里渊增益。由图 3 可知,在上述参量条件下,当 $\alpha = 0.40$ 时,亮脉冲预激发声波效果最佳。

为了设计最佳脉冲编码形式优化 ODPa-BOTDA 性能,图 4 中比较分析了不同斯托克斯光脉冲编码对应的布里渊增益谱,其中亮脉冲的 α 脉冲由图 3 优化确定 ($\alpha = 0.40$)。由图可知,由于亮脉冲、暗脉冲和 π 相位脉冲的 α 脉冲均产生预激发声波,布里渊增益谱宽均远比强度脉冲的谱宽更窄;在亮脉冲、暗脉冲和 π 相位脉冲 3 种不同斯托克斯光脉冲编码中, π 相位脉冲预激发声波效果最佳,即布里渊谱宽最窄、布里渊增益最大。

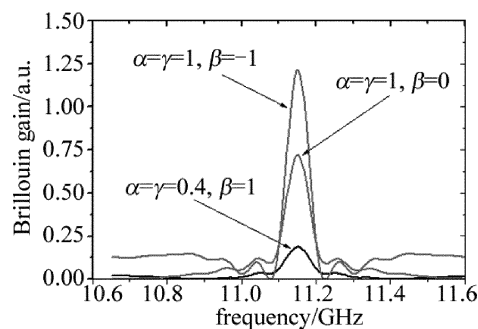


Fig. 4 Brillouin gain spectrum obtained by different Stokes pulse formats

图 5 中对比分析了 3 种结构 BOTDA 的布里渊增益谱,包括基于 π 相位斯托克斯光脉冲的 ODPa-BOTDA (1[#])、基于强度脉冲的传统 ODPa-BOTDA (2[#])^[3] 和基于 π 相位脉冲的传统 BOTDA (3[#])^[8]。3 种 BOTDA 结构的分辨率均与 1ns 对应,其中:1[#] BOTDA 斯托克斯光和反斯托克斯光 β 脉冲持续时间分别设为 3ns 和 2ns (同样地,设反斯托克斯光为强度脉冲);2[#] BOTDA 选择 $19\text{ns}/20\text{ns}$ 的光学强度脉冲对^[3];3[#] BOTDA 中 π 相位脉冲的 β 脉冲持续时间为

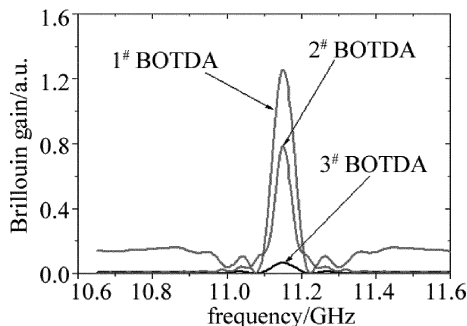


Fig. 5 Comparison among Brillouin gains of three different BOTDAs

1ns。由图可知,1# BOTDA 比传统强度脉冲 ODPA-BOTDA 和 π 相位脉冲 BOTDA 具有更高的布里渊增益和更窄的布里渊增益谱。上述结果说明, π 相位脉冲可有效提高探测光信噪比和减小布里渊频移测量的不确定度。

2.3 脉宽差 $\Delta\tau$ 对 ODPA-BOTDA 性能的影响

数值分析表明,斯托克斯与反斯托克斯脉冲对的脉宽差 $\Delta\tau$ 对 ODPA-BOTDA 的性能有重要影响。图 6 中给出了斯托克斯光为 π 相位脉冲的 ODPA-BOTDA 布里渊增益随 $\Delta\tau$ 的变化关系。由图可知,存在最佳脉宽差 $\Delta\tau$,使布里渊增益达到最大值。具体地,布里渊增益先随脉宽差的增加而增加,在 8ns 时获得最大值(此时对应 0.8m 空间分辨率);然后随着脉宽差的继续增大,布里渊增益逐渐减小。需要注意的是,脉宽差 $\Delta\tau$ 增大,也将导致 ODPA-BOTDA 空间分辨率下降,因此,需合理设计斯托克斯和反斯托克斯脉冲对的脉宽差。

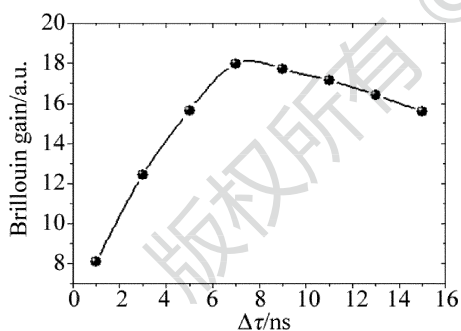


Fig. 6 Brillouin gain vs. $\Delta\tau$

3 结论

基于 ODPA-BOTDA 耦合波方程,采用微扰法和小信号近似法获得了其解析解。依据该解析模型研究了不同脉冲编码形式的 ODPA-BOTDA 较小作用区域布里渊增益及布里渊增益谱。结果表明, π 相位脉冲编码可有效改善 ODPA-BOTDA 的频谱分辨率和提高布里渊信号信噪比。分析了光学差分脉冲对脉宽差对布

里渊增益的影响,可知布里渊增益随脉宽差先增大后减小(本文中脉宽差为 8ns 时,布里渊增益达到最大值,对应 0.8m 空间分辨率)。本文中的成果将为进一步分析 ODPA-BOTDA 系统及以此为基础的实验奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1] LI H, LI Y Q, WANG H, *et al.* Advances in the research on Brillouin-based optical fiber sensors with centimeter resolution[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(6): 10-13 (in Chinese).
- [2] KE T B, LIN L, LI Y Q, *et al.* Study on denoising method of Brillouin optical time domain reflectometry signal of submarine cable[J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 311-315 (in Chinese).
- [3] SOTO M A, CHIN S, THEVENAZ L. Double-pulse Brillouin distributed optical fiber sensors: analytical model and experimental validation[C]//OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor. Edinburgh, UK: International Society for Optics and Photonics, 2012: 842124.
- [4] LI Y, BAO X Y, 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.
- [5] YIN C Q, TIAN H, LI Y Q, *et al.* Design of ultrahigh-speed square wave pulser in a Brillouin sensing system[J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 679-683 (in Chinese).
- [6] FOALENG S M, TUR M, BEUGNOT J C, *et al.* High spatial and spectral resolution long-range echoes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(20): 2993-3003.
- [7] KALOSHA V P, PONOMATEV E A, CHEN L, *et al.* How to obtain high spectral resolution of SBS-based distributed sensing by using nanosecond pulses[J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2071-2078.
- [8] MIZUNO Y, ZOU W, HE Z, *et al.* Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry[J]. Optics Express, 2008, 16(16): 12148-12153.
- [9] KISHIDA K, LI C H, MIZUTANI T. 2cm spatial resolution Brillouin distributed sensing system using PPP-BOTDA method[J]. Institute of Materials Engineering, 2009, 33(3): 23-26.
- [10] LI W, BAO X Y, LI Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing[J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [11] SOTO M A, TAKI M, BOLOGNINI G, *et al.* Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25cm spatial resolution over 60km standard single-mode fiber using Simplex codes and optical pre-amplification [J]. Optics Express, 2012, 20(7): 6860-6869.
- [12] BAO X Y, CHEN L. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. Sensors, 2011, 11(4): 4152-4187.
- [13] CHARLES J B, TUR M, FOALENG S M, *et al.* Distributed Brillouin sensing with sub-meter spatial resolution- modeling and processing[J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7381-7397.
- [14] THEVENAZ L, BEUGNOT J C. General analytical model for distributed Brillouin sensors with sub-meter spatial resolution [C]// 20th International Conference on Optical Fibre Sensors. Edinburgh, UK: International Society for Optics and Photonics, 2009: 75036A.
- [15] FOALENG S M. Brillouin echoes for advanced distributed sensing in optical fibres [D]. Lausanne, Switzerland: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2011: 97-120.