

激光与光电子学进展

基于布里渊增益-损耗效应的编码 DPP-BOTDA 传感器

刘钦, 黄劲, 梁浩*, 程凌浩

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

摘要 受光纤中声学声子 10 ns 的寿命的影响, 传统布里渊光时域分析 (BOTDA) 传感器往往不能做到 1 m 以内的空间分辨率。利用差分脉冲对 (DPP) 技术可以突破该限制, 实现更高的空间分辨率。但是传统的 DPP 技术存在测量时间长、差分信号间同步难度高和信噪比低等问题。本文提出一种基于布里渊增益-损耗效应的编码 DPP-BOTDA 系统, 通过将处于斯托克斯频率和反斯托克斯频率的泵浦脉冲光同步注入光纤, 利用散射光的布里渊增益-损耗效应在光路上差分, 解决了信号间的同步问题, 并且测量时间只需要传统 DPP 技术的一半。还分析了传感系统中掺铒光纤放大器增益特性对脉冲序列解码结果的影响, 对增益不均匀条件下的编码增益进行了理论计算。实验结果表明, 该系统可以实现 50 cm 的空间分辨率, 与传统的单脉冲 DPP-BOTDA 系统相比, 信噪比提高了 3 dB。

关键词 传感器; 光纤传感器; 布里渊散射; 差分脉冲对; 光脉冲编码

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221263

Coded DPP-BOTDA Sensor Based on Brillouin Gain-Loss Effect

Liu Qin, Huang Jin, Liang Hao*, Cheng Linghao

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China

Abstract The spatial resolution of traditional Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) sensor is often unable to achieve the spatial resolution within 1 m due to the influence of 10 ns acoustic phonon lifetime in optical fibers. The differential pulse pair (DPP) technique can avoid this limitation and obtain higher spatial resolution. However, the traditional DPP technique has problems, such as long measurement time, high difficulty in synchronization, and low signal-to-noise ratio. In this paper, we propose a coded DPP-BOTDA system based on the Brillouin gain-loss effect. The pump pulse light at Stokes frequency and anti-Stokes frequency is synchronously injected into the optical fiber, and the Brillouin gain loss effect of the scattered light is used to differentiate on the optical path to solve the synchronization problem between signals, and the measurement time is half of the traditional DPP method. The influence of the gain characteristics of an erbium-doped fiber amplifier in the sensing system on the decoding results of pulse sequences is analyzed, and the coding gain under the condition of uneven gain is calculated theoretically. The experimental results show that the system can obtain a spatial resolution of 50 cm with a signal-to-noise ratio improvement of 3 dB compared with the traditional single-pulse DPP-BOTDA system.

Key words sensors; fiber sensor; Brillouin scattering; differential pulse-width pair; optical pulse coding

1 引言

基于布里渊散射的分布式传感器在温度和应变测量方面具有独特的优势, 并在结构健康监测领域得到了广泛的研究。在现有的众多研究技术中, 布里渊光时域分析 (BOTDA) 技术由于其检测信号强、空间分

辨率高、传感距离远等优点, 在电力工业、铁路轨道和石油管道监测方面有很大的应用前景^[1-8]。

传统 BOTDA 系统受到 10 ns 的声子寿命的限制, 空间分辨率无法优于 1 m^[9-13]。采用差分脉冲对 (DPP) 技术, 对两个脉宽相差几纳秒的长脉冲布里渊时域信号进行差分^[14-15], 可以实现厘米级的空间分辨

收稿日期: 2022-04-08; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-17; 网络首发日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金 (61875246、62075086)

通信作者: *lianghao@jnu.edu.cn

率。并且,使用两束长脉冲作为泵浦脉冲,获得的采样谱宽度接近布里渊本征谱宽度,因此可以获得更好的频率分辨率。传统的差分传感系统需分两次入射不同宽度的脉冲光:一方面比传统 BOTDA 系统耗费了更多的数据采集时间,并且引入了额外的噪声;另一方面,先对时域信号进行同步再差分,增加了数据处理的复杂度。采用布里渊增益-损耗相互抵消的 DPP-BOTDA 方案^[16],可以有效解决这两个方面的问题。时域差分的过程会一定程度上降低系统的信噪比(SNR),采用编码技术可以在不牺牲空间分辨率的情况下提高传感系统的信噪比,从而获得更大的传输距离和频率测量精度^[17-21]。目前,基于编码技术的分布式传感器的研究都是在脉冲序列功率均匀分布的情况下进行的,然而在实际应用场景中,需要利用光放大器对脉冲光进行放大,例如掺铒光纤放大器(EDFA)。EDFA 对低占空比的长脉冲序列进行放大时,会引起脉冲序列在时域上的畸变,从而导致解码结果出现误差。

本文研究了 EDFA 增益特性对基于 Golay 码和 Simplex 码序列的 BOTDA 系统的解码结果的影响,重新计算了增益不均匀条件下的编码增益,提出基于 Simplex 编码的增益-损耗 DPP-BOTDA 的实验方案。实验利用 32 位 55/50 ns 差分脉冲序列获得了 50 cm 的空间分辨率。

2 基本原理

采用基于增益-损耗的差分脉冲对技术,可以有效抑制受激布里渊散射(SBS)造成的泵浦消耗,同时通过相干反斯托克斯效应获得更窄的布里渊谱^[16]。基于增益-损耗的差分脉冲对传感系统原理图如图 1 所示。将两个分别位于斯托克斯和反斯托克斯频率范围的不同长度探测脉冲在时域上同步后输入光纤,与频率为 f_0 的反向传输连续波(CW)泵浦进行相互作用,使得连续波在脉冲重叠处的增益为零,从而在光路上实现信号的差分,相比于传统的 DPP 技术,测量时间减少了一半。传感系统的空间分辨率由两个脉冲的宽度差 $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ 决定。这种差分的方式在一定程度上会降低系统的 SNR,因此需要引入编码技术,利用编码增益来提升传感器的性能。

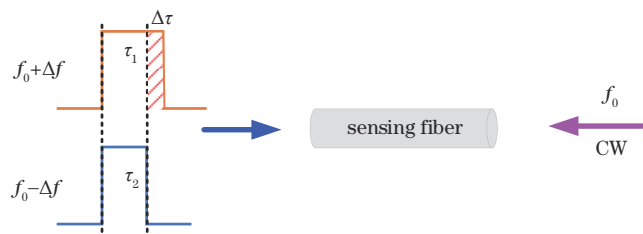


图 1 基于增益和损耗的 DPP-BOTDA 的原理示意图
Fig. 1 Diagram of DPP-BOTDA based on gain and loss

基于编码技术的分布式传感中,常用的码型有互相关运算的编码 Golay 码以及线性组合编码 Simplex 码。Golay 码由一对自相关函数之和为冲击函数的序列组成^[17]。其理论上的编码增益为

$$G_{\text{Golay}} = \frac{\sqrt{L}}{2}, \quad (1)$$

式中: L 表示编码序列的长度。Simplex 码由 Hadamard 矩阵经过转化的单极性矩阵的行向量组成^[20],其理论上的编码增益为

$$G_s = \frac{L+1}{2\sqrt{L}}. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知, L 越大,两种编码方式的编码增益也都越大,增大编码序列的长度可以提高系统的信噪比^[21-22]。

事实上,式(1)和式(2)只有在编码序列的每个单位脉冲功率相同时才成立。在传感系统中,为了获得更高的散射光强度,通常需要引入 EDFA 来尽可能增大传输光的功率。由于 EDFA 的瞬态效应,低占空比矩形长脉冲经过 EDFA 放大后,脉冲序列会发生增益不均匀的现象^[23]。编码后的脉冲序列可以等效为一个低占空比的周期信号,经过 EDFA 放大之后,每个脉冲比特获得的增益呈递减的关系^[24],如图 2 所示。因此,经过解码后,原先的编码增益公式不再适用。

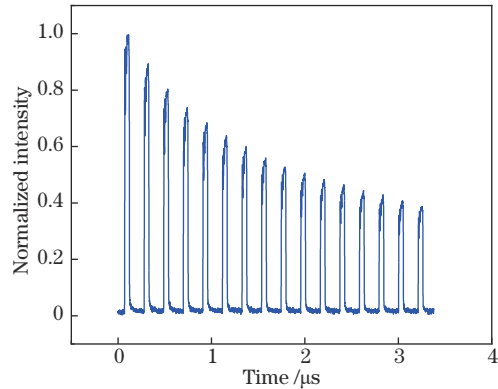


图 2 经 EDFA 放大后的脉冲序列
Fig. 2 Pulse sequence amplified by EDFA

以 32 位 Golay 码为例,当脉冲序列强度呈指数递减时,其互相关函数如图 3(a)中的虚线所示, Golay 编码互相关结果出现了旁瓣,不再是一个冲激响应。假设系统响应为矩形信号,其解码后的结果在上升沿和下降沿出现了较大的畸变,如图 3(b)中的虚线所示,并且编码长度越长,互相关结果产生的误差也越大。由此可以判断,EDFA 对 Golay 码序列脉冲在时域上的不均衡放大大会导致传感系统的解码结果发生较为严重的畸变。当 Golay 码用于传感器时,会对传感器时域上的分辨率造成很大影响。

Simplex 码的解码方式在时域上具有较好的抗畸

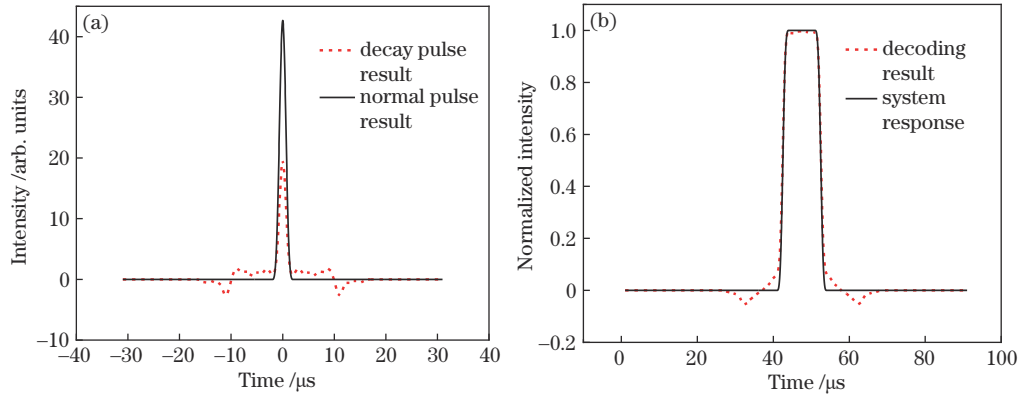


图3 32位Golay码。(a)互相关结果;(b)解码结果

Fig. 3 32-bit Golay code. (a) Cross-correlation result; (b) decoding result

变能力。以长度为 N 的 Simplex 码为例, 实验中需要向系统先输入 N 个序列, 假设第 i 个脉冲序列在系统的中的响应为 $S_i(t)$, 则 $S_i(t)$ 满足

$$\begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{bmatrix} = \mathbf{MG} \begin{bmatrix} S(t) \\ S(t-\tau) \\ \vdots \\ S(t-n\tau) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{M} 为 N 阶 Simplex 矩阵; τ 为单个比特的宽度; \mathbf{G} 为序列脉冲的增益; g_i 为第 i 个脉冲单元经 EDFA 放大后获得的增益; $e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)$ 为系统不相关零均值噪声; $S(t), S(t-\tau), \dots, S(t-n\tau)$ 为时移后的单脉冲信号。 \mathbf{G} 的具体表达式为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & g_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: g_i 为第 i 个脉冲单元经 EDFA 放大后获得的增益。对式(4)两边乘 Simplex 矩阵的逆矩阵 \mathbf{M}^{-1} , 可以推导出

$$\mathbf{G} \begin{bmatrix} \hat{S}_1(t) \\ \hat{S}_2(t-\tau) \\ \vdots \\ \hat{S}_n(t-n\tau) \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ \vdots \\ S_n(t) \end{bmatrix} + \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\hat{S}_1(t), \hat{S}_2(t-\tau), \dots, \hat{S}_n(t-n\tau)$ 为 $S(t), S(t-\tau), \dots, S(t-n\tau)$ 的估计值。将(5)式左边矩阵各行进行位移叠加平均, 得到最终解码后的系统响应

$$\hat{S}(t) =$$

$$\sum_{i=1}^N g_i [\hat{S}_1(t) + \hat{S}_2(t-\tau) + \dots + \hat{S}_n(t-n\tau)], \quad (6)$$

其均方差 E 为

$$E = \frac{\sigma^2}{N \left(\sum_{i=0}^{N-1} g_i \right)^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (m_{ij})^2, \quad (7)$$

式中: m_{ij} 为 \mathbf{M}^{-1} 矩阵中 (i, j) 位置处的元素。由式(3)~(7)可知, 采用 Simplex 码编解码的系统, 经过解码后, 系统响应不受 EDFA 增益不均匀的影响, 即采用 Simplex 码可以有效还原单脉冲的系统响应。但是 Simplex 码的编码增益需要重新定义, 修正后的编码增益为

$$G' = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} g_i}{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (m_{ij})^2}}. \quad (8)$$

当 $G' > 1$ 时, 理论上系统仍然可以有效还原单脉冲的系统响应, 并且获得增益。当每个脉冲序列比特从 EDFA 获得的归一化增益为指数递减函数 $g_i = \exp(-i \cdot \tau)$ 时, 编码增益随序列个数的变化如图 4 所示。

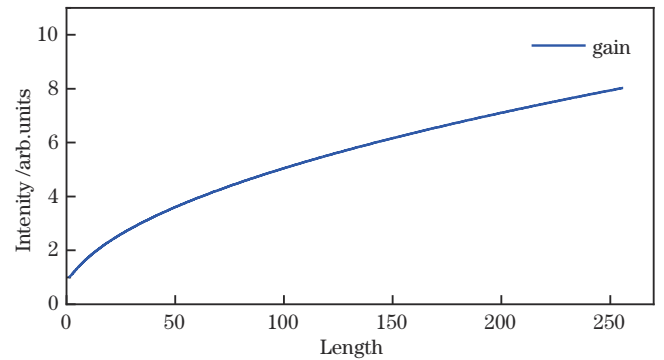


图4 Simplex码编码增益与码长的关系

Fig. 4 Coding gain of the Simplex code as a function of code length

3 实验过程与结果分析

基于增益-损耗 DPP-BOTDA 的系统如图 5 所示。采用 1550.12 nm 的窄线宽激光器模块光源作为系统

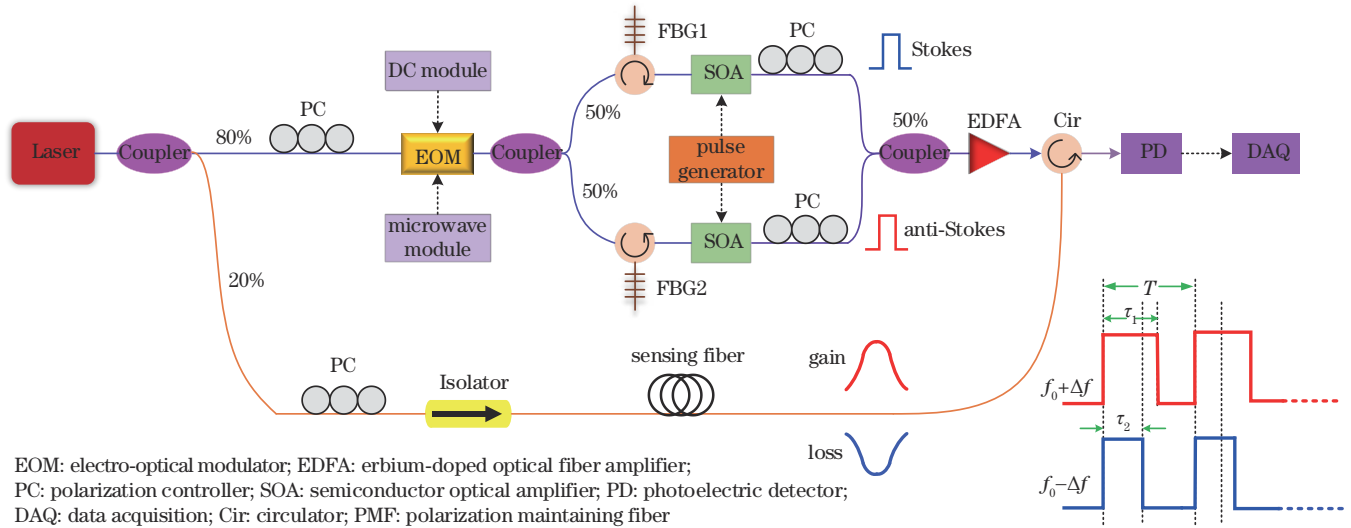


图 5 增益-损耗 DPP-BOTDA 系统图

Fig. 5 Diagram of gain-loss DPP-BOTDA system

光源,激光器的输出功率为 14.5 mW。激光器的输出被 80:20 的耦合器分成两部分,分别作为泵浦和探测光。泵浦光通过电光调制器进行调制,产生两个边带。再利用两个光纤布拉格光栅(FBG)进行滤波,将两个边带分离。两个边带分别由半导体光放大器(SOA)进行幅度调制。SOA 由码型发生器驱动,将两束光分别调制为周期相同、占空比不同的序列脉冲信号,单位脉冲比特周期为 T ,占空比为 τ/T 。

序列探测脉冲光由 EDFA 放大后经环形器输入光纤,在光纤中与反向传输的连续波进行相互作用。SBS 对连续波产生增益和损耗,实现光路上差分的效果。使用码型发生器的触发信号触发采集卡以保证信号同步,采集卡的采样率为 1.25 GHz。传感光纤

长度为 1 km,在室温下的布里渊散射中心频率约为 10.87 GHz。

编码后的脉冲序列,经过 EDFA 放大后的采样结果如图 6(a)所示。当 EDFA 增益固定时,脉冲序列获得的增益随序列长度的增加而减小。图 6(b)为在频率 10.904 GHz 处获得的时域信号。在编码长度为 16、32 和 64 位时,光纤末端噪声信号的标准差分别为 0.057、0.014 和 0.012。由此可见,当编码长度从 16 位增加到 32 位时,光纤末端噪声指数减小,信噪比增加。但当编码长度进一步增加到 64 位时,信噪比改变不明显,这是因为 64 位以上的长脉冲序列经 EDFA 放大后获得的增益较小,探测脉冲光的峰值功率降低造成 SBS 过程能量交换减小。

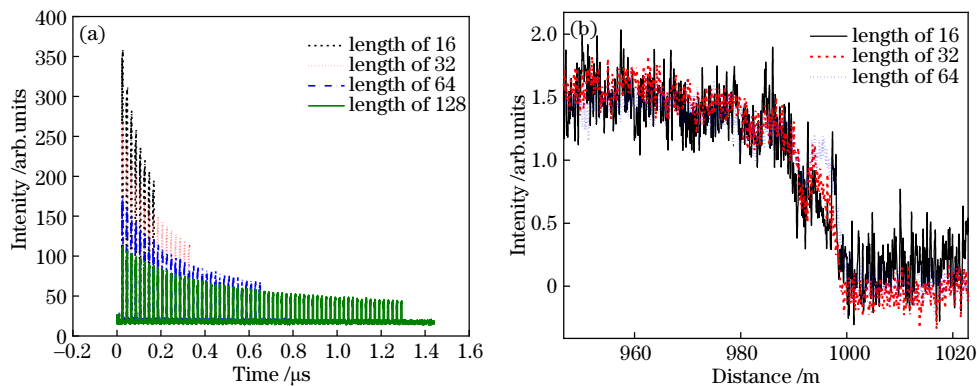


图 6 实验结果。(a)EDFA 对不同码长序列的放大情况;(b)不同码长序列下光纤末端的时域信号

Fig. 6 Experimental results. (a) Amplification of EDFA for different code length sequences; (b) time-domain signal at the end of the fiber for different code length sequences

图 7 对比了使用 5 ns 脉冲、50 ns 脉冲、55/50 ns 差分脉冲对以及 32 位 55/50 ns 差分脉冲序列获得的布里渊频谱。从图中可以看出:5 ns 脉冲由于持续时间小于声子的弛豫时间,几乎不能有效激发布里渊效应;50 ns 单脉冲的信噪比最好,但是其理论空间分辨率只

能达到 5 m;另外两种方式均可以实现 50 cm 的空间分辨率,使用传统 55/50 ns 差分脉冲对获得的频率功率较低,32 位 50/55 ns 差分脉冲序列获得的布里渊频谱峰值功率是单脉冲 DPP 技术的 2 倍,信噪比增加约 3 dB,频谱线宽约为 34 MHz,接近光纤布里渊本征频

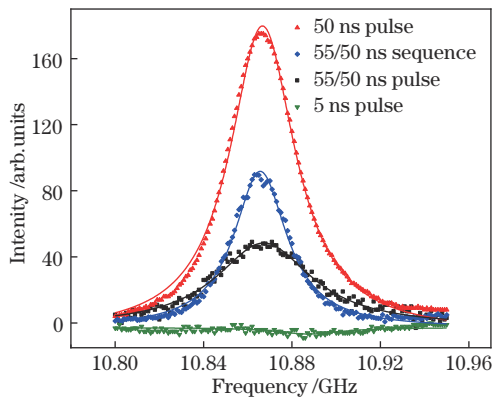


图 7 不同探测脉冲得到的布里渊频谱

Fig. 7 Brillouin spectrum obtained with different probing pulses 谱宽度,与短脉冲获得的频谱相比具有更高的频率分辨率。

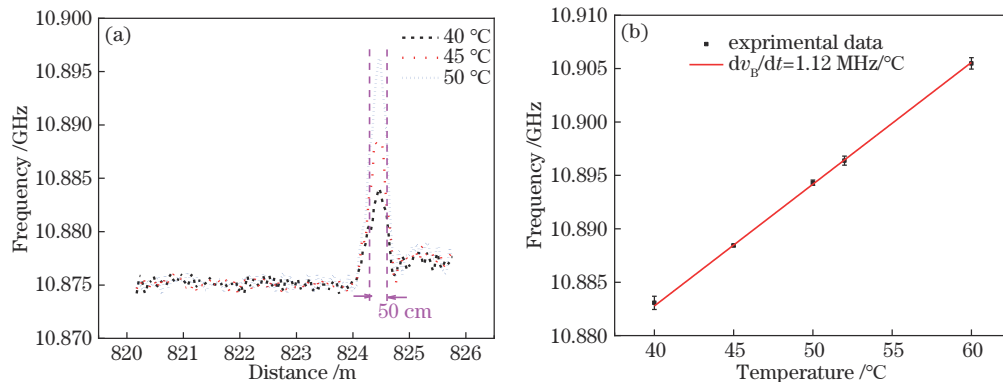


图 8 实验结果。(a)32位 Simplex 脉冲序列在不同温度下得到的加热段时域信号;(b)布里渊频谱随温度变化情况

Fig. 8 Experimental results. (a) Time-domain signal of the heated segment for utilizing 32-bit Simplex pulse sequences at different temperatures; (b) Brillouin spectrum varies with temperature

4 结 论

本文研究了 Simplex 编码技术与布里渊增益-损耗效应结合的光差分技术,该技术能提高 BOTDA 系统的空间分辨率和信噪比。并理论研究了 EDFA 增益特性对 Golay 码和 Simplex 码的影响。在增益不均匀的情况下,对两种编码的解码结果进行了仿真,仿真结果表明,相比于 Golay 码序列,Simplex 码序列的时域解码信号受 EDFA 增益影响较小。实验结果表明,利用编码脉冲光差分技术可以有效提高系统的信噪比。实验利用 32 位 Simplex 码对脉冲进行编码,在 1 km 的传感光纤上进行了温度传感实验,实现了 50 cm 的空间分辨率,温度系数为 1.12 MHz/°C,最大测量误差为 0.5 MHz。在实验过程中,由于受到系统中 EDFA 增益的限制,32 位以上输入光纤的脉冲序列峰值功率有所减小,因此信噪比没有进一步增加。理论上在探测光峰值功率相同的情况下,系统的信噪比随编码长度的增加而增大,可利用长

将测试光纤的一部分放入水浴锅加热,该部分长 50 cm,水浴锅的温度从 40 °C 开始升高到 60 °C,在不同温度下采集光纤的布里渊散射信号。实验中采用 32 位 Simplex 码序列脉冲光作为探测光,两种脉冲的比特周期均为 100 ns,而脉冲宽度分别为 50 ns 和 55 ns。调节两个序列脉冲的功率,可以控制连续波获得的增益/损耗的大小。为了确保系统增益-损耗能相互抵消,需要调节两路序列脉冲的功率至相等,再进行扫频采样。

图 8(a)为加热段光纤的温度测量结果。从图中可以看到,传感系统能明显区分出 50 cm 光纤,其布里渊频移随温度的升高而增加。图 8(b)为布里渊中心频率与光纤温度的对应关系,线性拟合得到的温度系数为 1.12 MHz/°C,传感器的最大测量误差约为 ± 0.5 MHz。

编码实现长距离的高空间分辨率,该传感方案为提高 BOTDA 系统信噪比和空间分辨率提供了新的技术方向。

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] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [3] Luo J B, Hao Y P, Ye Q, et al. Development of optical fiber sensors based on Brillouin scattering and FBG for on-line monitoring in overhead transmission lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(10): 1559-1565.
- [4] Meng D W, Ansari F. Interference and differentiation of the neighboring surface microcracks in distributed sensing with PPP-BOTDA[J]. Applied Optics, 2016, 55(34): 9782-9790.

- [5] Peng J Q, Lu Y G, Zhang Y Y, et al. Distributed strain and temperature fast measurement in Brillouin optical time-domain reflectometry based on double-sideband modulation[J]. *Optics Express*, 2021, 30(2): 1511-1520.
- [6] Kurashima T, Horiguchi T, Tateda M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(18): 1038-1040.
- [7] Wang Y J, Yao H P, Wang J J, et al. Distributed optical fiber sensing system for large infrastructure temperature monitoring[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(5): 3333-3345.
- [8] Horiguchi T, Kurashima T, Tateda M, et al. Brillouin characterization of fiber strain in bent slot-type optical-fiber cables[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, 10(9): 1196-1201.
- [9] Rogers A J. Distributed optical-fibre sensors[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1986, 19(12): 2237-2255.
- [10] Wang S, Yang Z S, Soto M A, et al. Study on the signal-to-noise ratio of Brillouin optical-time domain analyzers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19864-19876.
- [11] 夏猛, 汤晓惠, 王颖, 等. 基于布里渊频移特征的 OPGW 光缆接续杆塔与断纤定位方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(19): 1906003.
Xia M, Tang X H, Wang Y, et al. Connection tower and fiber breakpoint location method for OPGW based on Brillouin frequency shift characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 1906003.
- [12] Liang H, Li W H, Linze N, et al. High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1503-1505.
- [13] 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.
- [14] Li W H, 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.
- [15] Jiang T F, Ba D X, Dong Y K. Online distributed strain measurement of fiber Michelson hydrophones based on DPP-BOTDA with a pulsed-probe wave[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22375-22384.
- [16] Li Y, Bao X Y, Dong Y K, et al. A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2621-2626.
- [17] Nazarathy M, Newton S A, Giffard R P, et al. Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(1): 24-38.
- [18] Jia X H, Rao Y J, Deng K, et al. Experimental demonstration on 2.5-m spatial resolution and 1 °C temperature uncertainty over long-distance BOTDA with combined Raman amplification and optical pulse coding [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 435-437.
- [19] Muanenda Y, Taki M, Nannipieri T, et al. Advanced coding techniques for long-range Raman/BOTDA distributed strain and temperature measurements[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2): 342-350.
- [20] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(7): 822-824.
- [21] Soto M A, Sahu P K, Bolognini G, et al. Brillouin-based distributed temperature sensor employing pulse coding[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(3): 225-226.
- [22] 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.
- [23] 由旭家, 田小建. 增益平坦型掺铒光纤放大器研究[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(4): 104-107.
You X J, Tian X J. Research on erbium-doped fiber amplifier with gain flattening type[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(4): 104-107.
- [24] Sun X Z, Yang Z S, Hong X B, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical fibre sensors[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5774.