

基于强度调制型啾啾脉冲压缩法的分布式喇曼温度传感器

周铂承,樊昕昱*,何祖源

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)

摘要:为实现低成本、长距离的高精度分布式温度测量,提升分布式喇曼光纤温度传感器(RDTS)系统的性价比,提出了一种基于强度调制型啾啾脉冲压缩技术的新型 RDTS 系统,描述了新型系统的结构及相应信号调制/解调方法,并通过实验验证了系统性能。实验结果表明:所提出的新型 RDTS 系统在 35 km 的传感距离获得了 1.6 m 的空间分辨率和 1.8 °C 的温度分辨率,解决了传统 RDTS 系统中空间分辨率与温度分辨率相互制约的问题。

关键词:强度调制;脉冲压缩技术;分布式喇曼光纤温度传感器

中图分类号:TN256 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)10-0030-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Raman distributed temperature sensor based on intensity modulated chirped pulse compression

ZHOU Bocheng, FAN Xinyu*, HE Zuyuan

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to achieve low-cost, long-distance high-precision distributed temperature measurement and improve the cost-effectiveness of the Raman distributed temperature sensor (RDTS) system, a novel Raman distributed temperature sensor based on chirp pulse compression technique using intensity-modulated is proposed. The system structure and corresponding signal modulation and demodulation methods are described, and the performance of the system is verified by experiments. The experimental results show that the new RDTS system achieves 1.6 m spatial resolution and 1.8 °C temperature resolution at 35 km sensing distance, which solves the problem of mutual restriction between spatial resolution and temperature resolution in traditional RDTS system.

Key words: intensity modulated; pulse compression technique; Raman distributed temperature sensor

0 引言

分布式喇曼光纤温度传感器(RDTS)在各种工业领域都有广泛的应用,其定位原理通常基于光时域反射仪(OTDR)技术^[1]。RDTS 系统中的背向散射光由斯托克斯光、反斯托克斯光以及瑞利散射光组成。其中,

反斯托克斯光强度受温度影响较大,而斯托克斯光强度则几乎不受影响。因此,计算反斯托克斯光和斯托克斯光的比值,不仅可以获得沿光纤分布的温度信息,还可以消除光纤损耗和激光器功率波动对系统稳定性带来的影响^[2]。

在 RDTS 系统中,反斯托克斯光和斯托克斯光强度都非常弱。为了提高系统测温精度和延长测量距离,通常会采用高功率激光器或掺铒光纤放大器(EDFA)来增加光纤中的光功率。然而,发射到光纤中的最大光功率会受到非线性效应的限制,例如受激喇曼散射(SRS)效应和受激布里渊散射(SBS)效应^[3]。因此,Simplex 编码脉冲压缩技术被引入到 RDTS 系统中^[4]。但是,在使用 EDFA 放大 Simplex 编码的光脉冲序列时,EDFA 瞬态效应会使 Simplex 编码序列发生严重

收稿日期:2020-12-16。

基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0405500)资助;国家自然科学基金(61775132、61735015、61620106015)资助。

作者简介:周铂承(1996—),男,硕士生,现就读于上海交通大学电子信息与电气工程学院电子工程系,电子与通信工程专业,主要从事分布式光纤温度传感器、OTDR 事件检测算法、结合机器学习的分布式振动传感以及光传感中的信号处理等方向的研究工作。

*通信作者:樊昕昱(1978—)男,博士,研究方向为光纤传感、特种光纤、光纤器件及系统和光信息处理。



失真,从而无法正确解调出光纤的温度曲线。许多研究者针对该问题提出了各种解决方法^[5-7]。2011年,SOTO M A等人^[5]使用马赫-曾德尔调制器(MZM)生成均匀的脉冲序列,再通过EDFA无失真地放大,最后由声光调制器(AOM)生成Simplex编码序列,但该方案中使用了2个调制器,系统复杂且成本较高。2017年,ROSOLEM J B等人^[6]对Simplex代码序列进行预失真以补偿EDFA的瞬态效应,但是这种方法对EDFA稳定性要求很高,而且在EDFA增益较高时会失去作用。2018年,戴高宇等人^[7]在2个具有不同波长的直接调制的分布式反馈(DFB)激光器上分别调制了归零(RZ)Simplex编码脉冲序列和互补序列,从而避免瞬态效应,互补部分被带通滤波器(BPF)滤除,从而将未失真的Simplex编码光信号入射至传感光纤,但该方案中使用了2个激光器和1个BPF,增加了系统复杂性和成本。

本文提出一种基于强度调制型啁啾脉冲压缩技术的新型RDTS系统,以解决传统RDTS中空间分辨率和温度分辨率相互制约的问题。

1 新型 RDTS 系统基本原理

基于强度调制型啁啾脉冲压缩技术的RDTS系统如图1所示。分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)为光源,其中心波长为1550 nm。激光器的输出光经强度调制成线性调频(LFM)脉冲光,强度调制器则由任意波形发生器所产生的电信号驱动。LFM脉冲光被EDFA放大到非线性效应阈值以下,再用BPF滤除EDFA所产生的自发辐射噪声。经过BPF后,探测光脉冲通过波分复用器注入到传感光纤中,其产生的自发喇曼背向散射光被波分复用器分为斯托克斯光和反斯托克斯光,并由双通道的雪崩光电探测器接收。数据采集卡采集接收后的电信号,由计算机进行信号处理,得到沿光纤长度分布的温度曲线后,采用小波去噪法进一步提升系统性能。

新型RDTS系统所涉及的基本理论,包括LFM脉

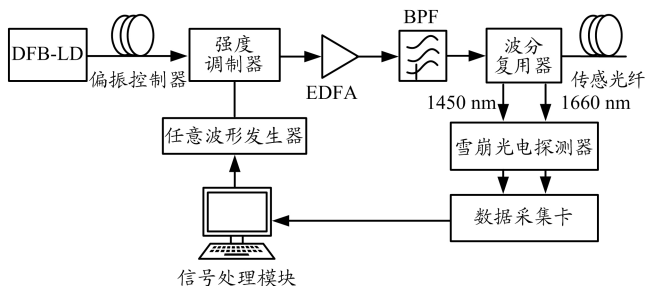


图1 基于强度调制型啁啾脉冲压缩技术的RDTS系统实验框图

脉冲压缩技术、EDFA瞬态效应、光纤中的非线性效应以及小波去噪技术。

1.1 LFM 脉冲压缩技术

LFM脉冲的解析信号表达式为:

$$I(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\exp(j2\pi f_0 t+j\pi k t^2) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(\frac{t}{\tau_p})$ 是 $t \in [0, \tau_p]$ 范围内的矩形窗函数, t 是时间, τ_p 是脉冲宽度, f_0 是扫频初始频率, k 是LFM信号扫频速率。

当光入射至光纤,其产生的喇曼散射光具有约10 nm的光谱宽度,扫频信息将会淹没于整个光谱宽度中,喇曼散射光不再具有入射光的扫频信息,因此不能在RDTS系统中使用频率调制方法。然而,式(1)中的信号可以通过使用强度调制法实现。

由于光的强度不能为负,而实际产生的光强度信号必须是正的实信号,因此本文将式(1)中的解析信号用以下4个实正信号的代数运算表示:

$$I_1(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\{1+\cos(2\pi f_0 t+\pi k t^2)\} \quad (2)$$

$$I_2(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\{1-\cos(2\pi f_0 t+\pi k t^2)\} \quad (3)$$

$$I_3(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\{1+\sin(2\pi f_0 t+\pi k t^2)\} \quad (4)$$

$$I_4(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{\tau_p}\right)\{1-\sin(2\pi f_0 t+\pi k t^2)\} \quad (5)$$

$I(t)$ 可以由 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 、 $I_3(t)$ 、 $I_4(t)$ 这4个实正信号通过以下代数运算得到:

$$I(t)=\frac{1}{2}[I_1(t)-I_2(t)]+\frac{j}{2}[I_3(t)-I_4(t)] \quad (6)$$

由于自发喇曼散射是线性效应^[2],所以可以假设光纤自发喇曼散射效应的单位冲激响应为 $h(t)$ 。相应地, $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ 、 $I_3(t)$ 、 $I_4(t)$ 这4个实正信号的喇曼背向散射信号 $Y_1(t)$ 、 $Y_2(t)$ 、 $Y_3(t)$ 、 $Y_4(t)$ 可以表示为:

$$Y_k(t)=I_k(t)\otimes h(t) \quad (7)$$

其中, $k=1,2,3,4$; $\otimes$ 表示卷积运算。 $I(t)$ 的等效喇曼背向散射曲线 $Y(t)$ 可以由 $Y_k(t)$ 经如下代数运算得到:

$$Y(t)=I(t)\otimes h(t)=\frac{1}{2}[Y_1(t)-Y_2(t)]+\frac{j}{2}[Y_3(t)-Y_4(t)] \quad (8)$$

对 $Y(t)$ 进行匹配滤波,输出光纤中的背向散射信号可表示为:

$$r_c(t)=I(t)\otimes h(t)\otimes I^*(-t)=h(t)\otimes R(t) \quad (9)$$

其中, $R(t)$ 是LFM信号经过脉冲压缩后得到的窄脉冲信号,其一般形式 $f_0=-\frac{k\tau_p}{2}$ 时的恒定相位谱分别表示为:

$$R(t)=I(t)\otimes I^*(-t)=\text{rect}\left(\frac{t}{2\tau_p}\right)\frac{\sin\left[\pi k\left(1-\frac{|t|}{\tau_p}\right)\tau_p\right]}{\pi kt}\times \exp\left[-j2\pi\left(f_0+\frac{k\tau_p}{2}\right)t\right] \quad (10)$$

$$R(t)=\text{rect}\left(\frac{t}{2\tau_p}\right)\frac{\sin\left[\pi k\left(1-\frac{|t|}{\tau_p}\right)\tau_p\right]}{\pi kt} \quad (11)$$

当扫频的起始频率 $f_0=-\frac{k\tau_p}{2}$ 时, $R(t)$ 即为系统中有效的入射光脉冲。系统的空间分辨率 ΔZ 由 $R(t)$ 主瓣部分的半高全宽(FWHM)决定^[8],可由式(12)计算得到:

$$\Delta Z=\frac{v_g}{2\Delta F} \quad (12)$$

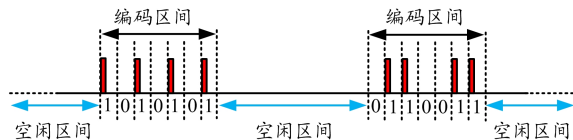
其中, v_g 为光纤中的光速, $\Delta F=k\tau_p$ 是 LFM 信号的扫频范围。

采用上述方法可以分别得到反斯托克斯信号和斯托克斯信号,从而计算反斯托克斯信号与斯托克斯信号的比值,即可得到沿光纤的温度曲线。

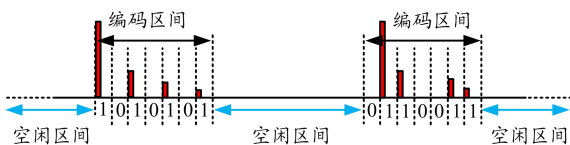
在传统 RDTS 系统中,空间分辨率由入射光脉宽决定,脉宽越小系统空间分辨率性能越好。然而,脉宽的减小会使入射光总功率也减小,从而对 RDTS 系统信噪比造成影响,损害系统温度分辨率性能。由式(12)可知,本文设计的系统空间分辨率由 LFM 信号扫频范围决定,与脉宽无关,故本方案可解决传统 RDTS 系统中空间分辨率和温度分辨率相互制约的问题。

1.2 EDFA 瞬态效应

EDFA 放大长脉冲光或者非均匀间隔脉冲序列时,其瞬态效应会使得脉冲前端比后端具有更高的增益,导致光信号波形严重失真,从而无法解调出原始信号。7 位 Simplex 编码输入信号经 EDFA 放大前后对比情况如图 2 所示。可以看出,EDFA 对序列前端码元的放大增益显著大于后端码元,故 Simplex 编码的光信号序列被放大后发生严重失真。失真的 Simplex 编



(a) 7 位 Simplex 编码输入信号

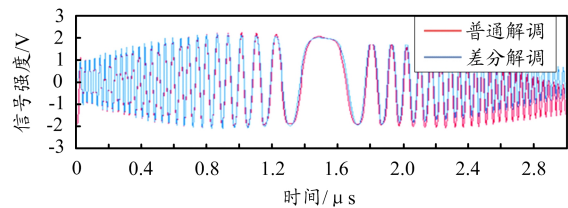


(b) 7 位 Simplex 编码经 EDFA 放大后的输出信号

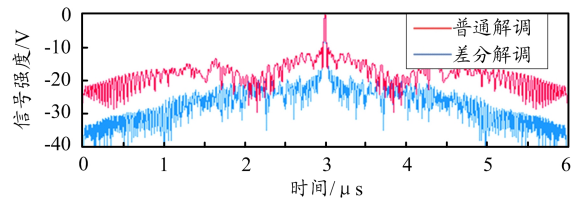
图 2 7 位 Simplex 编码输入信号经 EDFA 放大前后对比情况

码信号会使背向散射曲线产生扭曲,无法正确地解调出沿着光纤的温度曲线^[9]。

当 EDFA 放大强度调制 LFM 信号时,其瞬态效应也会导致信号失真,光脉冲前端放大增益显著高于脉冲后端,而式(8)所给出的差分解调算法较好地解决了该问题。LFM 信号加载了窗函数且经匹配滤波后的窄脉冲信号如图 3 所示(LFM 信号加载了窗函数以抑制旁瓣的影响^[10])。可以看出,差分解调法显著降低了 EDFA 瞬态效应对波形的影响,EDFA 放大后的波形经过匹配滤波后,仍旧可以较好地得到预期的窄脉冲信号,即在 EDFA 瞬态效应影响下,系统仍可以稳定工作。



(a) 经 EDFA 放大后的强度调制 LFM 光脉冲波形



(b) 波形经匹配滤波后解调出的窄脉冲信号

图 3 放大后的光脉冲波形和滤波后的窄脉冲信号

1.3 光纤中的非线性效应

根据式(11)可知,入射到光纤中的有效信号强度与 LFM 脉冲长度成正比。然而,当脉冲宽度较大时,RDTS 系统最大入射功率会受到 SBS 阈值的限制^[11],其随着入射光脉冲宽度的增大而减小,所以当光脉冲长度较长而入射功率又较高时,SBS 效应会使得脉冲后端发生较大能量损耗,导致波形严重失真,如图 4 所示。经过实验,本文最终在系统中选择了 3 μs 脉冲宽度,以达到入射功率与波形完整性的较好权衡。

1.4 小波去噪技术

RDTS 系统中的主要噪声是热噪声,属于高斯白噪声

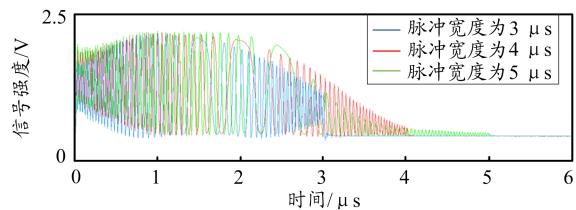


图 4 被受激布里渊散射效应影响的光脉冲波形

声,其方差和幅度会随着小波变换尺度的增加而减小,而有用信号的方差和幅度与小波变换的尺度无关^[12]。因此,可用小波去噪法对 RDTS 系统信号进行去噪,以提升系统信噪比。

小波去噪过程主要包含以下步骤:

①选择合适的小波基函数并确定分解层次;

②对小波分解各个尺度的高频系数进行阈值量化,抑制噪声的小波系数;

③采用经阈值处理后的小波系数进行信号重构,得到去噪后的信号曲线。

实验结果表明:在本系统中采用 db4 小波进行 7 层分解处理的去噪效果最好。小波去噪法对温度分辨率的提升曲线图如图 5 所示。可以看出,小波去噪法显著地提升了 RDTS 系统的温度分辨率。

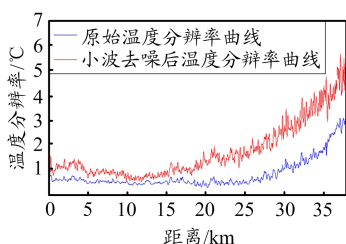
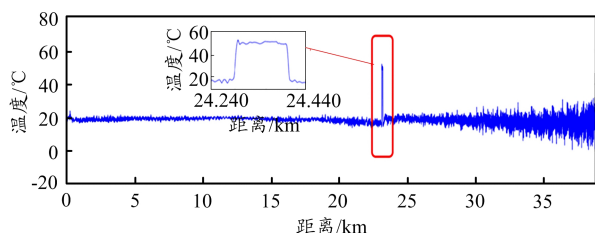


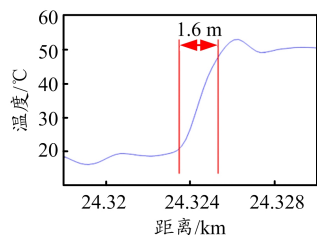
图 5 小波去噪法对温度分辨率的提升

2 实验结果

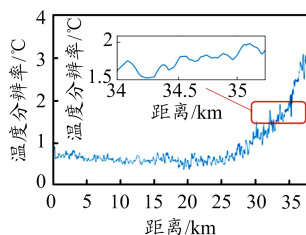
实验中,光脉冲宽度设置为 $3\ \mu\text{s}$,扫频范围为 70 MHz,传感光纤为标准单模光纤,其中一段距离光纤首端约 24 km 的 100 m 光纤段被放置在恒温水槽中。实验结果如图 6 所示,系统成功测出了沿着光纤的温度曲线,系统空间分辨率约为 1.6 m,在 35 km 的传感距离获得的温度分辨率约为 $1.8\ ^\circ\text{C}$ 。根据式(12)计算出的系统理论空间分辨率约为 1.43 m,但由于加载



(a) 沿着光纤的温度分布曲线



(b) 本文所提出 RDTS 系统的空间分辨率



(c) 温度分辨率

图 6 实验结果

到信号上窗函数的影响,系统实际测得的空间分辨率比理论值略高^[10]。

3 结束语

本文提出了一种基于强度调制型啁啾脉冲压缩技术的新型 RDTS 系统。该系统引入了 LFM 脉冲压缩技术和小波去噪技术,解决了传统 RDTS 系统中空间分辨率与温度分辨率性能互相制约的问题,具有同时实现高空间分辨率及高温分辨率测量的潜力;此外,本系统所采用的光信号调制方式不受 EDFA 瞬态效应影响,可以采用先调制后放大的硬件结构,系统中仅使用了 1 个波长为 1550 nm 的 DFB 激光器和 1 个强度调制器,性价比高且成本低。实验结果表明:本文提出的新型 RDTS 系统在 35 km 的传感距离获得了 1.6 m 的空间分辨率和 $1.8\ ^\circ\text{C}$ 的温度分辨率,具有良好的性能。

参考文献:

- [1] HARTOG H. An introduction to distributed optical fibre sensors[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [2] DAKIN J P, PRATT D J, BIBBY G W, et al. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor lightwave source and detector. Electronics letters[J]. 1985, 13(1): 569-570.
- [3] AGRAWAL G P. 光纤通信系统[M]. 北京:电子工业出版社,2016.
- [4] BOLOGNINI G, PARK J, KIM P, et al. Performance enhancement of Raman-based distributed temperature sensors using simplex codes[EB/OL]. [2020-12-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1636443>.
- [5] SOTO M A, NANNIPIERI T, SIGNORINI A, et al. Advanced cyclic coding technique for long-range Raman DTS systems with meter-scale spatial resolution over standard SMF[EB/OL]. [2020-12-16]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=a98718978f7c7149f2a3819d80-d525e4>.
- [6] ROSOLEM J B, BASSAN F R, FREITAS D, et al. Raman DTS based on OTDR improved by using gain-controlled EDFA and pre-shaped simplex code[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(11): 3346-3353.
- [7] DAI G, FAN X, HE Z. A long-range fiber-optic raman distributed temperature sensor based on dual-source scheme and RZ simplex coding [EB/OL]. [2020-12-16]. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1d2706b0pt1q0a80at0k0je04d518938>.
- [8] CHEN D, LIU Q W, HE Z Y. Phase-detection distributed fiber-optic vibration sensor without fading-noise based on time-gated digital OFDR[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8315-8325.
- [9] 戴高宇. 基于脉冲编码技术的喇曼分布式光纤温度传感器[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [10] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W, BUCK J R. Discrete-time signal processing[M]. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.
- [11] KOPYAKOV A, SAUER M, CHOWDHURY D. Stimulated brillouin scattering in optical fibers [J]. Adv. Opt. Photonics, 2009, 2(1): 1-59.
- [12] 孔玲军. MATLAB 小波分析超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.