

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407703

基于 G-S 混合编码的分布式单模光纤测温方法研究*

李昭旭¹ 王 宇¹ 郭欣明¹ 刘 昕^{2,3} 白 清³ 靳宝全^{2,3}

(1. 太原理工大学物理与光电工程学院 太原 030024; 2. 太原理工大学电子信息工程学院 太原 030024;
3. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室 太原 030024)

摘 要: 为了减少分布式单模光纤温度传感系统的测温误差, 文中提出了一种基于 Golay-Simplex 混合编码的单模光纤温度测量方法。首先将 4 路 G 码进行 S 码变换实现了 12 路 G-S 混合编码调制, 再依次对 12 路编码输出信号进行 S 码解码处理与 G 码解码处理, 并采用累加平均与小波变换进行了测温曲线降噪, 验证了 G-S 混合编码的编码增益为 G 码与 S 码的编码增益乘积。对比实验结果表明, 在 30 km 单模光纤长度、50 ns 脉宽与 64 bit 编码长度的条件下, G-S 混合编码测温系统的反斯托克斯信号幅值曲线波动范围较小, 且在整个光纤长度内信噪比较大, 信噪比高于 Golay 码编码测温系统和单脉冲测温系统。G-S 混合编码的稳态测温误差可从单脉冲系统的 $\pm 7.3^{\circ}\text{C}$ 优化至 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, 优于 Golay 编码分布式拉曼光纤测温系统的测温误差 $\pm 3.9^{\circ}\text{C}$ 。而空间分辨率可保持为 5 m, 证明了 G-S 混合编码在长距离单模光纤测温方面的有效性, 有望为水利大坝渗漏温变等基础设施状态的融合感知提供有效的技术解决方案。

关键词: 光纤温度传感; 拉曼光时域反射; 脉冲编码; G-S 混合编码; 测温误差

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5020

Research on distributed single-mode fiber temperature measurement method based on G-S hybrid coding

Li Zhaoxu¹ Wang Yu¹ Guo Xinming¹ Liu Xin^{2,3} Bai Qing³ Jin Baoquan^{2,3}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To reduce the temperature measurement error of distributed single-mode fiber temperature sensing systems, the paper proposes a temperature measurement method based on Golay-Simplex hybrid coding. First, four G codes are transformed into S codes to achieve 12-channel G-S hybrid coding modulation. Then, the output signals of the 12 channels are processed through S code decoding and G code decoding sequentially, employing cumulative averaging and wavelet transformation for temperature curve denoising. This verifies that the coding gain of the G-S hybrid coding is the product of the coding gains of the G and S codes. Comparative experimental results show that under conditions of 30 km fiber length, 50 ns pulse width, and 64 bit coding length, the amplitude fluctuation range of the anti-Stokes signal curve in the G-S hybrid coding temperature measurement system is smaller and has a higher signal-to-noise ratio across the fiber length compared to the Golay code-based temperature measurement system and the single-pulse temperature measurement system. The steady-state temperature measurement error of the G-S hybrid coding can be optimized from $\pm 7.3^{\circ}\text{C}$ in the single-pulse system to $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, outperforming the measurement error of $\pm 3.9^{\circ}\text{C}$ in the distributed Raman fiber temperature measurement system based on Golay codes. Additionally, the spatial resolution can be maintained at 5 m, demonstrating the effectiveness of G-S hybrid coding for long-distance single-mode fiber temperature measurement, potentially providing effective technical solutions for the integrated

收稿日期: 2024-07-21 Received Date: 2024-07-21

* 基金项目: 山西省水利科学技术研究与推广项目(2024GM18)、山西省重点研发计划项目(202102130501021)、中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231B004)资助

perception of infrastructure conditions such as temperature changes due to leakage in hydraulic dams.

Keywords: fiber optic temperature sensing; raman optical time domain reflectometry; pulse coding; G-S hybrid coding; temperature measurement error

0 引言

分布式拉曼测温系统利用光时域反射技术获取位置信息,用拉曼散射效应获得温度信息,实现了对光纤沿线温度的实时测量^[1-3]。与传统温度传感器相比,分布式单模光纤测温系统具有测量距离长^[4]、灵敏度高^[5]、强抗干扰能力^[6]和快速响应等优点^[7]。因此,在长距离隧道^[8]、电力电缆^[9]、井下煤矿^[10]、油气管道^[11]、核电站^[12]、航天^[13]和大型建筑等传统设备无法有效测温的场景中得到了广泛应用。

然而,分布式单模拉曼测温系统的信噪比较低,且空间分辨率与传感距离、测温精度相互制约,从而增加了系统性能提升的难度。传统的单模拉曼测温系统往往有空间分辨率和信噪比的局限性,而脉冲编码技术则解决了信噪比和空间分辨率的矛盾^[14-15]。

针对脉冲编码在光纤传感中的应用,研究学者进行了诸多研究。1993 年,Michael 首次提出用 Simplex 脉冲编码提升光时域反射仪(optical time-domain reflectometer, OTDR)灵敏度和动态范围的概念^[16]。他们对引入 Simplex 脉冲编码实现的信噪比和动态范围提升进行了分析,并和 Golay 码的效果进行了比较。研究表明,如果编码长度较短,Simplex 脉冲编码的增益高于 Golay 码的编码增益。2004 年,靳思梦等^[17]将 Simplex 算法应用于系统中,即减少了信号叠加的次数,又提高了一定的系统性能。这为在分布式光纤测温(distributed temperature sensing, DTS)系统中脉冲编码的使用提供了新的思路。2014 年,曹文峰等^[18]提出了一种实时有效的解码算法,来提高传统解码运算计算效率和降低存储空间。他们使用 Golay 码,在长度 512 位、距离 20 km 条件下对分布式拉曼测温系统进行仿真,将 0.228 s 的解码时间减少到 0.025 s,需要的 1 280 000 位存储空间降至 65 536 位,极大降低了存储空间需求。2016 年,程炜^[19]对 G-S 混合码在 OTDR 中的应用进行了仿真研究,目前并无对此种编码在分布式拉曼测温系统中的应用情况的研究。2017 年,Batista 等^[20]预先失真处理 Simplex 脉冲编码,用掺铒光纤放大器(erbium doped fiber amplifier, EDFA)放大编码后的 Simplex 脉冲序列,并控制其增益,避免了放大 Simplex 脉冲编码序列的波形失真问题,实现了更长的传感距离。2020 年,Sun 等^[21]提出了遗传优化非周期编码技术,利用单序列非周期码对探测信号进行编码,再经过一系列处理解析不同空间上光纤的信息。

该码序列由专门开发的遗传算法计算得出,使得光纤传感器的性能在不提升其他配置的情况下得到提升,在不恶化系统噪声的情况下获得最大的编码增益。在 39 km 的测温距离下,和单脉冲系统相比,使用该单序列非周期码编码的分布式拉曼测温系统提高了 6.33 dB 的信噪比和 7.24 倍的温度分辨率,测温时间约 1 s。常见的单脉冲分布式拉曼测温方法虽然实现简单,但仍存在测温误差大和测温距离小的缺点。当测温距离大于 15 km 时,单脉冲系统测温中获得的斯托克斯信号和反斯托克斯信号的相关数据就会存在较大出入,严重削弱系统的测温精度,导致测温误差偏大。G-S 混合编码是一种 Golay 码编码与 Simplex 编码结合的一种脉冲编码方式,应用该脉冲编码的分布式拉曼测温系统对测温精度的提升较 Golay 码编码系统更为优秀。上述方法可以在保证较好的空间分辨率的基础上,有效减小测温距离的增加对测温精度带来的影响,从而减少了系统的测温误差,降低噪声带来的影响。

文中将格雷编码-简单编码(Golay-simplex, G-S)混合码应用于拉曼光时域反射(Raman optical time-domain reflectometer, ROTDR)系统,由于两种编码方案的互补特性,Golay-Simplex 混合码在系统中具有更好的效果。具体内容如下:

1) 分别阐述 Golay 码和 Simplex 码二者的产生过程,并进一步阐述这两种编码是如何结合生成 G-S 混合码的。从理论上分析了引入 G-S 混合码的拉曼测温系统的优越性。

2) 通过总结前述理论以及合适的器件选型,辅以上位机程序,完成基于 G-S 混合编码的单模分布式拉曼测温系统的研究。实验表明,与未引入脉冲调制的系统相比,基于 G-S 混合编码的 ROTDR 系统可以得到更高的信噪比,证明了 G-S 混合码的有效性和优异性。

1 原理与改进

1.1 脉冲编码技术原理

基于 ROTDR 的光纤温度传感系统中,光纤中的脉冲光 $M(t)$ 和产生的后向散射信号 $H(t)$ 的表达式为:

$$H(t) = M(t) * X(t) \quad (1)$$

其中, $*$ 表示卷积运算, $X(t)$ 为脉冲响应函数。通过按一定规则编码单脉冲光,得到若干个脉冲序列,再将这些编码后的脉冲光注入被测光纤,最终解码获得输出响应,脉冲编码技术的基本原理如图 1 所示。

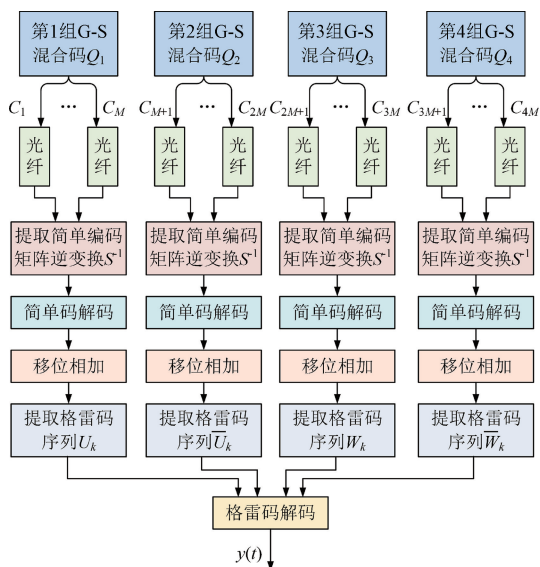


图 1 G-S 混合码脉冲编码基本原理

Fig. 1 Basic principle of G-S composite code pulse coding technology

1.2 G-S 混合码相关编码技术

G-S 混合码基于 S 编码和 Golay 码,继承了两种编码的优点,其信噪比改善效果比单独使用其中一种编码更为显著。现有两组双极性 Golay 码 A 和 B ,取 $1/2$ 偏置,两组双极性码变换构造造成 4 组单极性 Golay 码,具体构造方式如图 2 所示。

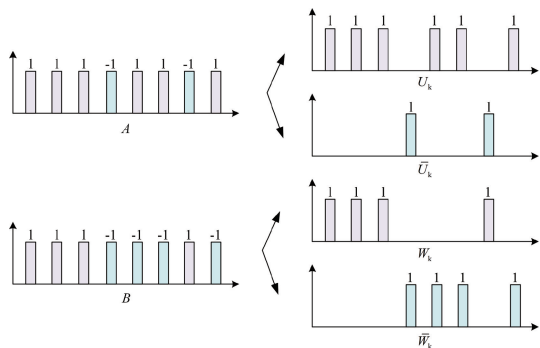


图 2 双极序列的 8 位 Golay 码转换成单极序列

Fig. 2 8-bit Golay code of a bipolar sequence is converted to a unipolar sequence

图 2 中 U_k 和 W_k 分别表示一对 Golay 互补序列, U_k 表示序列 U_k 取反。G-S 码的基本思路可以理解成 Golay 码和 Simplex 码的生成方式的结合,可由 4 组单极性 Golay 序列与 Simplex 矩阵结合生成,具体生成方式如图 3 所示。

$$U_k = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1]$$

$$\bar{U}_k = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

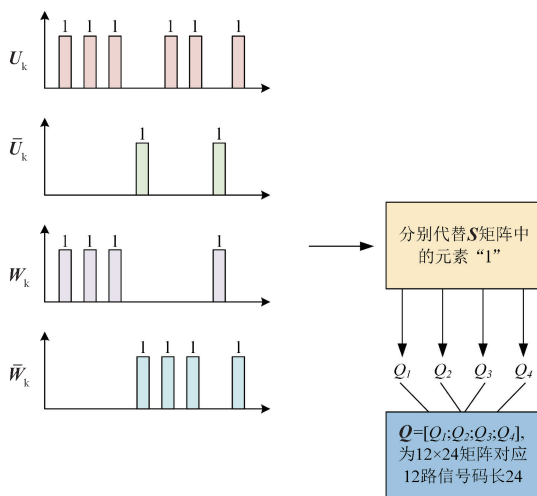


图 3 Golay 码经过变换生成 G-S 码

Fig. 3 Golay code is transformed to generate G-S code

$$W_k = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$\bar{W}_k = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1] \quad (2)$$

三阶 S 矩阵可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

S 矩阵的阶数为 $M = 3$ 阶,将 S 矩阵中的每个元素“1”用一路 Golay 码 U_k 替换,每个“0”也补全为对应的 8 个“0”,这样, S 矩阵的每一位都被 8 位 Golay 码替代,生成的新矩阵 Q_1 为:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理, S 矩阵中的元素“1”用第 2 组单极性 Golay 编码替换,用 8 个全为“0”的码字取代 S 矩阵中的元素“0”,得到的新矩阵 Q_2 。以此类推,可得到矩阵 Q_3 、 Q_4 。矩阵 $Q = [Q_1; Q_2; Q_3; Q_4]$ 的一行就是一路 G-S 混合码。例如 S 编码的阶数 $M = 3$,Golay 码的长度 $L = 8$,G-S 混合码的码长即为 24,共 12 路。编码长度 64 bit、脉宽为 50 ns 的 Golay 编码经过转换后的 12 组单极性码时域曲线如图 4 所示。

将 12 组单极性编码序列调制成单极性光脉冲注入光纤,光电探测器分别探测各组单极性编码脉冲后向斯托克斯和反斯托克斯散射光,这样得到 12 组拉曼后向散射信号,对这 12 组信号进行解码,即可得到可用于拉曼解调的斯托克斯和反斯托克斯信号数据,最终代入拉曼测温系统解调算法计算出待测温度。其中,解码过程如

下所述。

首先将探测到信号每 3 路为一组分组,每组分别用 Simplex 码解码,即用每组信号去乘 S 矩阵的逆矩阵,得到对应的输出响应,以第 1 组为例,具体公式为:

$$\begin{bmatrix} r_{o1}(t) \\ r_{o2}(t) \\ \dots \\ r_{oM}(t) \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_{i1}(t) \\ \varphi_{i2}(t) \\ \dots \\ \varphi_{iM}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, $\varphi_i(t)$ 为接收到的信号, $r_{o1}(t)$ 为经过 S 码解码

后的编码输出信号。然后对上述输出的信号时延平均处理。

$$\gamma_{o1}(t) = \frac{r_{o1}(t) + r_{o2}(t) + \dots + r_{oM}[t + (M-1)\tau]}{M} \quad (6)$$

其中, M 为 S 矩阵的阶数,再进行 4 次对每 3 路信号的 S 码解码,得到 4 组输出矩阵 $\gamma_{o1}(t)$ 、 $\gamma_{o2}(t)$ 、 $\gamma_{o3}(t)$ 、 $\gamma_{o4}(t)$ 。这 4 组矩阵即为 4 路 Golay 码编码输出信号,对其进行 Golay 码解码。解码过程为:

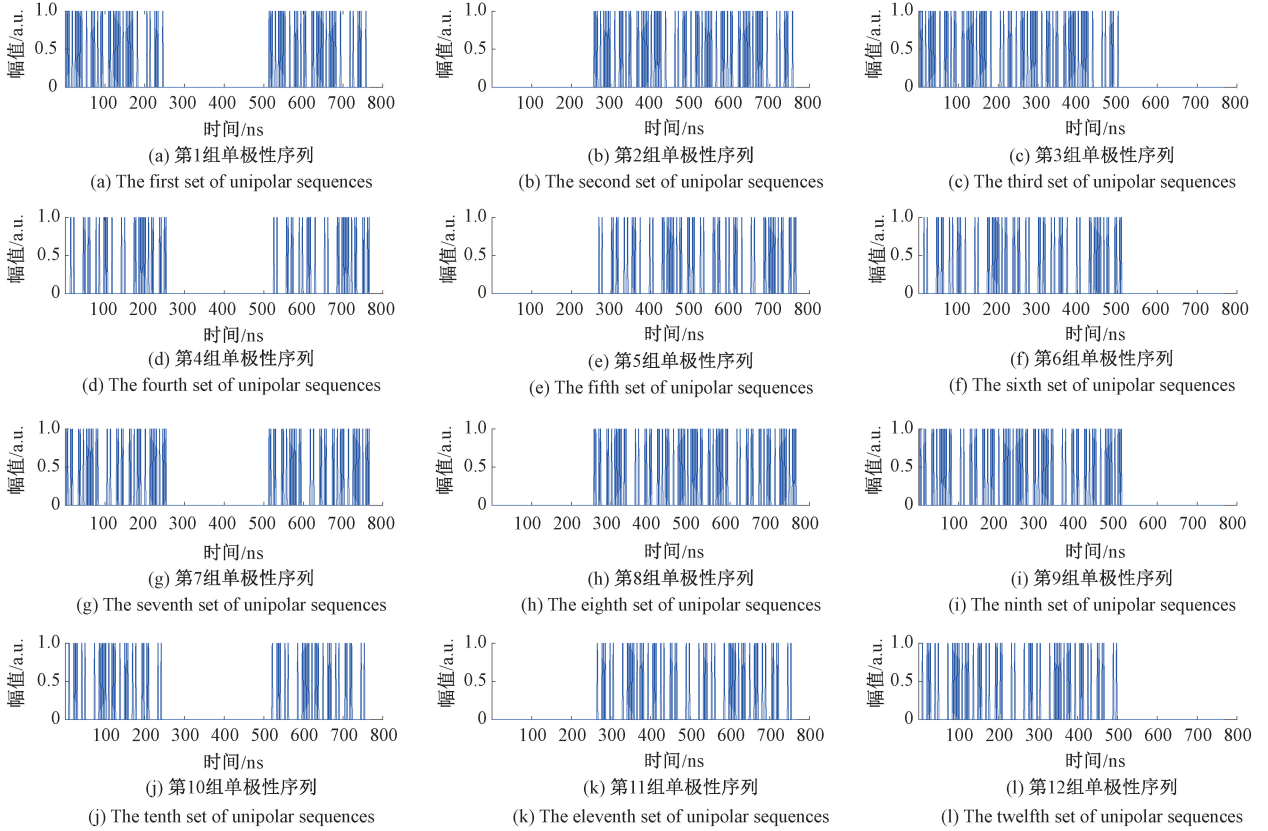


图 4 单极性 G-S 混合码的时域曲线

Fig. 4 Time domain curves of unipolar G-S coding

$$(\gamma_{o1}(t) - \gamma_{o2}(t)) * A_K + (\gamma_{o3}(t) - \gamma_{o4}(t)) * B_K = 2Ly(t) \quad (7)$$

其中, L 为 Golay 码的位数,将 4 组信号都用上式完成 Golay 码解码后,即可得到最终的响应结果。流程框图如图 5 所示。

因为该系统相当于进行了一次 S 编码解码与一次 Golay 编码解码的双重信噪比提升,所以 G-S 混合码将会拥有比传统编码技术更大的信噪比增益,如图 6 所示。

Golay 码和 G-S 码都能应用于 ROTDR 系统,二者的编码增益公式分别为:

$$CG_G = \frac{\sqrt{N}}{2} \quad (8)$$

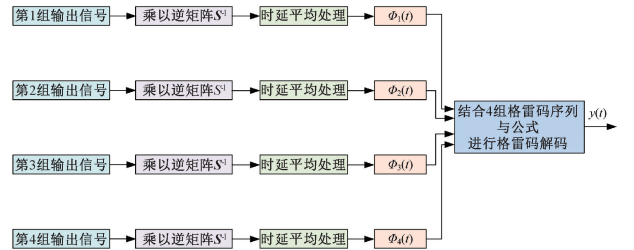


图 5 G-S 混合码的解码流程图

Fig. 5 Flowchart of G-S code decoding

$$CG_{G-S} = CG_G CG_S = \frac{(M+1)\sqrt{L}}{4\sqrt{M}} \quad (9)$$

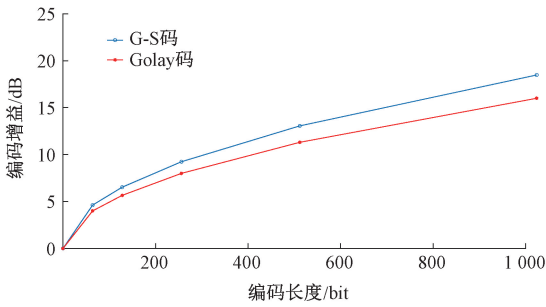


图 6 两种编码方式增益仿真对比

Fig. 6 Comparison of gain simulation between two coding methods

G-S 码和 Golay 码的编码增益对比如图 6 所示,其中,蓝色空圆折线表示 G-S 码编码增益与编码长度的关系,红色实圆折线表示 Golay 码编码增益与编码长度的关系,G-S 码的编码增益明显优于 Golay 码的编码增益。而从图 6 中可以分析出,在码长较小时,G-S 码的编码增益曲线稍稍高于 Golay 码,码长较大时,G-S 码的编码增益曲线明显高于 Golay 码,可以预见,随着码长的增大,G-S 码的编码增益优势会越来越明显。

2 基于 G-S 编码的 ROTDR 结构设计

2.1 系统结构设计

基于 G-S 编码的单模光纤拉曼测温系统的硬件结构主要包括编码调制和数据采集两大部分。编码调制部分由中心波长为 1 550 nm 的连续光激光器、任意波形发生器 (arbitrary waveform generator, AWG)、掺铒光纤放大器、输出为 1 450 nm 和 1 660 nm 的 1×3 波分复用器 (wavelength division multiplexing, WDM) 以及光谱响应范围为 900 ~ 1 700 nm 的双通道雪崩光电探测器 (avalanche photo diode, APD) 和 30 km 的单模光纤组成。数据采集和解调部分则包含采样率为 100 M/s 的数据采集卡 (data acquisition, DAQ) 和系统上位机。系统的硬件结构如图 7 所示。

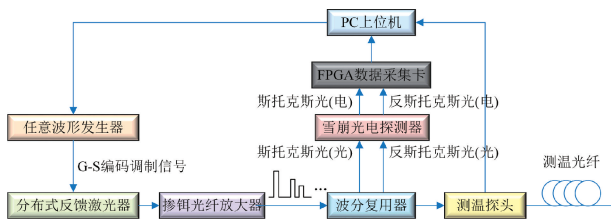


图 7 系统硬件结构图

Fig. 7 System hardware structure diagram

采用波长为 1 550 nm 的分布反馈激光器作为光源。

DFB 激光由任意波形发生器产生的 12 组 G-S 码序列直接调制,输出的脉冲序列经 EDFA 放大,放大后的编码脉冲序列通过 1×3 波分复用器传输到 30 km 长的光纤中。由于单模光纤的模态色散和码间串扰较小,因此选择单模光纤作为传感光纤。斯托克斯光和反斯托克斯光返回到 WDM 中完成滤波和分离,随后将斯托克斯和反斯托克斯光分别送入 APD,实现光电转换和放大。最后,通过数据采集卡获得后向散射拉曼信号曲线,最后传回上位机进行后续数据解调。

将雪崩探测器 3 个接口 1 450、1 550、1 660 nm 用光纤分别连接波分复用器的 3 个对应接口,其他硬件按图 7 依次接好,打开雪崩光电探测器,启动上位机系统。完成定标过程和测温过程后,观察斯托克斯信号和反斯托克斯信号原始曲线,调整激光器电流和泵浦光电流。在二者曲线不失真的情况下,使其峰值达到最大,此时系统的信噪比达到最大,测温误差最小。完成硬件搭建和参数设置后,使用任意波形生成器生成 G-S 码、Golay 码和单脉冲信号,分别获得 G-S 编码调制信号、Golay 码编码调制信号和单脉冲调制信号。针对这 3 种信号在上位机经过定标测量获得对应的温度曲线,保存数据即可从曲线和数据中获得不同脉冲编码方式的分布式测温系统在不同测温距离下的温度、测温误差和空间分辨率等数据。

2.2 系统原理

在 ROTDR 系统中,斯托克斯信号温度灵敏度低,而反斯托克斯信号稳定性差。本研究通过斯托克斯信号与反斯托克斯信号的比值来获得光纤的温度信息。当温度为 T_X 时,斯托克斯光功率 P_S 与反斯托克斯光功率 P_{AS} 为:

$$P_S = K_S P_0 V_S^4 R_S(T_X) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_S)L] \quad (10)$$

$$P_{AS} = K_{AS} P_0 V_{AS}^4 R_{AS}(T_X) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_{AS})L] \quad (11)$$

其中, K_S 和 K_{AS} 分别表示为散射截面斯托克斯和反斯托克斯的相关系数, P_0 表示入射光的光功率, V_S 和 V_{AS} 表示斯托克斯和反斯托克斯的光频率, α_0 、 α_S 和 α_{AS} 表示入射光、斯托克斯光和反斯托克斯光在传感光纤中的损耗系数, L 为光纤长度。 $R_S(T_X)$ 和 $R_{AS}(T_X)$ 分别是斯托克斯和反斯托克斯的温度调制函数,两项的比值为:

$$\frac{R_S(T_X)}{R_{AS}(T_X)} = \exp\left(\frac{h\Delta v}{kT_X}\right) \quad (12)$$

其中, h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, Δv 为拉曼频移,约等于 13.2 THz, $k = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$,表示玻尔兹曼常数。在已知温度 T_0 下,对待测光纤定标,整个光纤的功率信息为:

$$F(T_0) = \frac{P_S}{P_{AS}} = \frac{K_S}{K_{AS}} \cdot \frac{V_S^4}{V_{AS}^4} \cdot \frac{R_S(T_0)}{R_{AS}(T_0)} \cdot \exp((\alpha_{AS} - \alpha_S) \cdot L) \quad (13)$$

由式(13)可得,在任意温度下,整条待测光纤的功率信息为:

$$F(T_X) = \frac{P_s}{P_{AS}} = \frac{K_s}{K_{AS}} \cdot \frac{V_s^4}{V_{AS}^4} \cdot \frac{R_s(T_X)}{R_{AS}(T_X)} \cdot \exp((\alpha_{AS} - \alpha_s) \cdot L) \quad (14)$$

根据式(11)和(12),可以得到解调后的温度为:

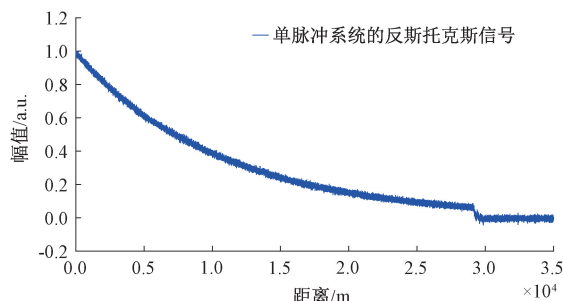
$$T_X = \frac{1}{\frac{1}{T_0} + \frac{k}{h\Delta v} \cdot \ln\left(\frac{F(T_X)}{F(T_0)}\right)} \quad (15)$$

3 实验结果及分析

首先,将单脉冲拉曼测温系统得到的反斯托克斯信号与 Golay 码和 G-S 码拉曼测温系统解调后得到的反斯托克斯信号进行对比,分析 3 种系统的信噪比差异。实验使用的所有信号脉宽为 50 ns,且 Golay 码和 G-S 码的编码长度均为 64 bit。将单脉冲光和两种编码脉冲光依次注入待测光纤进行实验,实验结果如图 8 所示。图 8(a)~(c)中曲线分别代表单脉冲、Golay 码和 G-S 码拉曼测温系统采集到的反斯托克斯信号幅值曲线。在 30 km 处,单脉冲拉曼测温系统的反斯托克斯信号幅值波动范围为 0.069 0, Golay 码拉曼测温系统的反斯托克斯信号幅值波动范围为 0.023 1, G-S 码拉曼测温系统的反斯托克斯信号幅值波动范围为 0.011 7,三者的幅值波动范围单脉冲最大, Golay 码次之, G-S 码最小。Golay 码和 G-S 码拉曼测温系统的信噪比相比于单脉冲拉曼测温系统有明显提升,尤其是 G-S 码拉曼测温系统的信噪比提升更为明显。

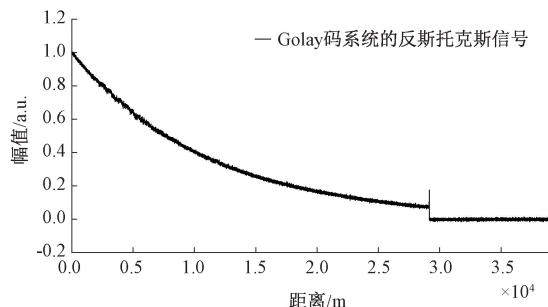
将单脉冲拉曼测温系统得到的温度信号与 Golay 码和 G-S 码拉曼测温系统解调后得到的温度信号进行对比,分别测出其测温误差并对比。实验采用采样率为 100 M/s 的采集卡,选用 30 km 的单模光纤作为传感光纤,将 3 种不同的拉曼测温系统放置在 25 ℃ 的室温环境中,均采用累加平均和小波变换去噪,获得实验结果如图 9 所示。图 9(a)中曲线代表单脉冲拉曼测温系统的测温曲线,稳态测温误差为 ± 7.3 ℃;图 9(b)中曲线代表 Golay 码拉曼测温系统的测温曲线,稳态测温误差为 ± 3.9 ℃;图 9(c)中曲线代表 G-S 码拉曼测温系统的测温曲线,稳态测温误差为 ± 2.5 ℃。由图可知,当传感光纤的长度为 30 km 时, G-S 码拉曼测温系统的信噪比最高,稳态测温误差最小, Golay 码拉曼测温系统相比于传统单脉冲分布式拉曼测温系统稳态测温误差增大,单脉冲拉曼测温系统的稳态测温误差远远大于另外两种系统。

另外,调整合适的激光器电流和泵浦光电流参数,分别将放大后的 G-S 脉冲编码调制信号、Golay 码脉冲编码



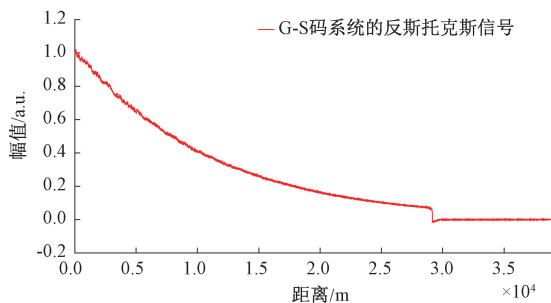
(a) 单脉冲系统反斯托克斯信号

(a) Anti-Stokes signal of single-pulse system



(b) Golay码系统反斯托克斯信号

(b) Anti-Stokes signal of Golay code system



(c) G-S码系统反斯托克斯信号

(c) Anti-Stokes signal of G-S code system

图 8 3 种系统反斯托克斯信号信噪比实验对比图

Fig. 8 Comparison diagram of anti-Stokes signal SNR experiment of three systems

调制信号、单脉冲调制信号输入波分复用器,经过定标测温获得 3 组温度数据。采集不同距离下 3 种拉曼系统的稳态测温误差如表 1 所示,经对比得出结论,随着测温距离的增加,3 种系统的测温误差均有不同程度的增大。在各个距离下, Golay 码和 G-S 码系统的测温误差均小于单脉冲系统;在 15 km 内 Golay 码与 G-S 码系统测温误差相差不大,距离超过 15 km, G-S 码拉曼测温系统的测温误差明显小于 Golay 码。如果以保证测温误差在 ± 2.5 ℃ 及以下的光纤长度为分布式测温系统的测温距离,单脉冲系统的测温距离为 15 km, Golay 码编码系统的测温距离为 20 km, G-S 编码分布式拉曼测温系统的测温距离为 30 km。

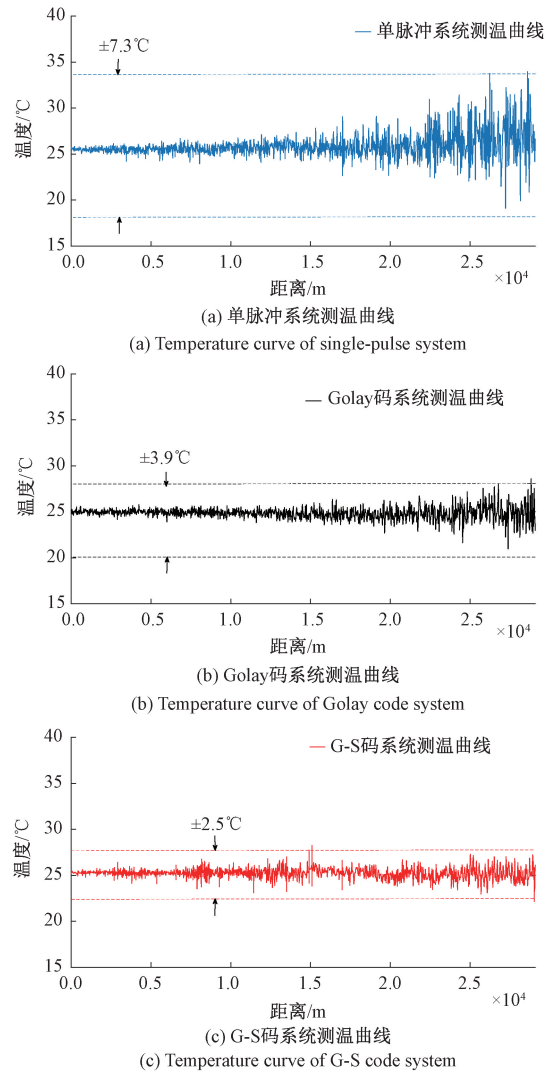


图 9 3 种拉曼系统稳态测温误差实验对比图

Fig. 9 Comparison diagram of steady-state temperature measurement error of three Raman systems

表 1 3 种拉曼系统不同距离稳态测温误差

Table 1 Steady-state temperature measurement error of three Raman systems at different distances

距离/km	单脉冲误差/℃	Golay 码误差/℃	G-S 码误差/℃
5	±0.765	±0.575	±0.575
10	±1.055	±0.745	±0.97
15	±1.66	±1.06	±1.1
20	±3.5	±1.795	±1.445
25	±4.68	±2.76	±1.75
30	±7.3	±3.9	±2.5

最后测试 G-S 码单模拉曼测温系统的空间分辨率,仍使用 30 km 的光纤作为测试光纤。在光纤末端设置一个约为 60 m 的光纤环,将光纤末端的光纤环放入 65 ℃ 的高精度恒温水箱中进行升温实验。实验结果如图 10

所示,光纤末端有明显的升温现象,在光纤环处温度约为 65 ℃ 且温度在 65 ℃ 附近小范围波动,证明本系统对温度变化较为敏感。放大光纤环附近的温度曲线,观察曲线中的升温过程,其幅度的 10% 处和 90% 处对应测温距离差值即为 G-S 编码测温系统的空间分辨率。对应的空间分辨率约为 5 m, G-S 脉冲编码单模拉曼测温系统能保持一个较好的空间分辨率。

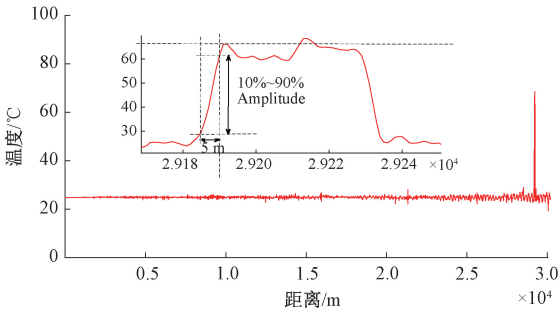


图 10 G-S 混合码测温空间分辨率实验结果

Fig. 10 Temperature rise experiment of G-S code Raman temperature measuring system

4 结 论

综上所述,针对单模拉曼测温系统,将 Golay 码与 Simplex 码相结合,引入了 G-S 混合码脉冲编码,两种编码的互补特性使 G-S 混合码在系统中具有比单一编码更好的效果,一定程度上改善了拉曼测温系统的测温距离和测温精度问题。在不改变系统结构的情况下,为改善脉冲编码拉曼测温系统提供了一种解决方案。实验表明,相对于单脉冲和基于 Golay 码编码的拉曼测温系统, G-S 混合码拉曼测温系统具有更好的稳态测温误差,在 64 bit、50 ns 的条件下误差为 ±2.5 ℃,且空间分辨率可保持为 5 m,对水利大坝渗漏温变等基础设施状态的融合感知有望提供有效的技术解决方案,有望在未来继续完善 G-S 混合码拉曼测温系统以获得更好的各项指标和在更多领域内进行应用。

参考文献

[1] 陈洋, 乔丽君, 曹康怡, 等. 基于 FPGA 的拉曼分布式光纤测温系统数据采集处理模块设计[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(17): 117-125.
CHEN Y, QIAO L J, CAO K Y, et al. Design of data acquisition and processing module of raman distributed optical fiber temperature measurement system based on FPGA [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(17): 117-125.

[2] 李硕, 王纪强, 高忠国, 等. 基于拉曼信号分段重构的分布式光纤测温空间分辨率提升研究[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(10): 293-298.

- LI SH, WANG J Q, GAO ZH G, et al. Research on improving spatial resolution of distributed fiber optic temperature measurement based on raman signal segment reconstruction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(10): 293-298.
- [3] 王华阳, 王宇, 杨佳沛, 等. 基于伯格算法的双马赫-曾德干涉光纤传感系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 183-191.
- WANG H Y, WANG Y, YANG J P, et al. Dual mach-zender interference optical fiber sensing system based on Berger algorithm [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 183-191.
- [4] 白亮, 张红娟, 高妍, 等. 基于时分复用的长距离 R-OTDR 分布式光纤测温系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(10): 61-65.
- BAI L, ZHANG H J, GAO Y, et al. Long distance R-OTDR distributed fiber temperature measurement system based on time division multiplexing [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(10): 61-65.
- [5] 周龙, 宋树祥, 杨军, 等. 基于 VMD-SVD 的拉曼分布式光纤测温系统降噪方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 172-177.
- ZHOU L, SONG SH X, YANG J, et al. Noise reduction method of raman distributed fiber temperature measurement system based on VMD-SVD [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 172-177.
- [6] 徐隆, 杨军, 周龙, 等. PE-VMD 与小波阈值的干涉型光纤联合去噪方法[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(10): 39-46.
- XU L, YANG J, ZHOU L, et al. Interferometric fiber denoising method based on PE-VMD and wavelet threshold[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(10): 39-46.
- [7] 鲁佳慧, 万成功, 金恺, 等. 分布式光纤测温系统精度和实时性优化研究[J]. 激光杂志, 2023, 44(1): 62-67.
- LU J H, WAN CH G, JIN K, et al. Research on accuracy and real-time optimization of distributed fiber temperature measurement system [J]. Laser Journal, 2023, 44(1): 62-67.
- [8] 曹桂芳. 双头结构 RDTS 隧道火灾报警系统的研究[J]. 电子技术, 2020, 49(6): 44-45.
- CAO G F. Research on fire alarm system of RDTS tunnel with double head structure [J]. Electronic Technology, 2019, 49(6): 44-45.
- [9] 许扬, 李健, 张明江. 拉曼分布式光纤温度传感仪的研究进展[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 713-732.
- XU Y, LI J, ZHANG M J. Research progress of raman distributed fiber optic temperature sensor [J]. Chinese Journal of Applied Sciences, 2019, 39(5): 713-732.
- [10] 单亚锋, 马艳娟, 付华, 等. 分布式光纤测温系统在煤矿火灾监测中的应用[J]. 传感技术学报, 2014, 27(5): 704-708.
- SHAN Y F, MA Y J, FU H, et al. Application of distributed optical fiber temperature measurement system in coal mine fire monitoring [J]. Journal of Sensing Technology, 2014, 27(5): 704-708.
- [11] 赵越, 赵英亮, 王黎明, 等. 基于 EEMD 的压力管道泄漏声源定位[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(7): 128-132.
- ZHAO Y, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Sound source location of pressure pipeline leakage based on EEMD [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(7): 128-132.
- [12] 邢豪健, 乔秋晓, 金钟燮. 基于分布式光纤拉曼测温系统的核电一回路泄漏点监测技术[J]. 光子学报, 2019, 48(5): 167-173.
- XING H J, QIAO Q X, JIN ZH X. Primary leakage monitoring technology for nuclear power based on distributed fiber Raman temperature measurement system [J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 167-173.
- [13] 韩国庆, 刘显明, 雷小华, 等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 145-164.
- HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. Application of optical fiber sensing technology in aero engine temperature measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 145-164.
- [14] 张旭苹, 张益昕, 王亮, 等. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 11-73.
- ZHANG X P, ZHANG Y X, WANG L, et al. Present situation and future of research and application of distributed optical fiber sensing technology [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 11-73.
- [15] 刘纯野, 万安池, 梁永鑫, 等. 基于光脉冲编码的相位敏感光时域反射仪研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 248-262.
- LIU CH Y, WAN AN CH, LIANG Y X. Research progress of phase-sensitive optical time domain reflectometer based on optical pulse coding [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 248-262.
- [16] 介瑞敏, 肖春, 刘旭, 等. 拉曼分布式光纤温度传感: 技术发展与应用综述[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 222-247.

- JIE R M, XIAO CH, LIU X, et al. Raman distributed optical fiber temperature sensing: A review of technology development and application [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 222-247.
- [17] 靳思梦, 杨智生, 洪小斌, 等. 基于光脉冲编码的布里渊光时域分析仪研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(1): 279-298.
- JIN S M, YANG ZH SH, HONG X B, et al. Research progress on Brillouin optical time-domain analyzer based on optical pulse coding[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(1): 279-298.
- [18] 曹文峰, 姜海明, 谢康, 等. 基于相关编码的光纤拉曼温度传感系统的解码算法研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(11): 2079-2084.
- CAO W F, JIANG H M, XIE K, et al. Research on decoding algorithm of fiber raman temperature sensing system based on correlation coding [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(11): 2079-2084.
- [19] 程炜. 基于 G-S 复合码与小波变换的 OTDR 关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- CHENG W. Research on key technologies of OTDR based on G-S composite code and wavelet transform[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [20] BATISTA J R, RENATO F B, ELIENE D F 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.

- [21] SUN X Z, YANG ZH SH, HONG X B, et al. Genetic-optimised aperiodic code for distributed optical fibre sensors[J]. Nature Communications, 2020, 11: 5774.

作者简介



李昭旭, 2020 年于大连理工大学获得学士学位, 现为太原理工大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: 2223590542@qq.com

Li Zhaoxu received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2020.

Now he is a M. Sc. candidate in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.



王宇(通信作者), 2014 年于法国塞吉-蓬图瓦兹大学获得博士学位, 现为太原理工大学副教授, 主要研究方向为光纤传感器。

E-mail: wangyu@tyut.edu.cn

Wang Yu (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2014 from Cergy-Pontoise University. Now he is an associate professor in Taiyuan University of Technology. His main research interest includes fiber optic sensors.