

基于脉冲编码调制的 BOTDA 系统中的编码技术

王蔚蔚, 吴良英

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:布里渊光时域分析(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)的测量分辨率和可测量距离之间相互制约, 不能同时提高, 基于脉冲编码调制的 BOTDA 可解决此问题。介绍了基于脉冲编码调制的 BOTDA 系统的原理和优点, 重点讲述了该系统中脉冲编码技术的原理及其研究进展, 其编码技术包括 Golay 码、Simplex 码、Walsh 码、CCPON 码和单工循环编码。从编码增益、系统时间复杂度和空间分辨率 3 个角度对 5 种主要编码技术进行了分析比较, 得出基于 5 种编码方式的 BOTDA 的优缺点。

关键词:脉冲编码; 布里渊光时域分析

中图分类号: TN915.62 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)04-0029-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.008

Code technology applied to BOTDA system based on pulse coding modulation

WANG Weiwei, WU Liangying

(School of Electronic and Information Engineering,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The measurement resolution and the measurable distance of Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) are mutual restraint which can't be improved at the same time, BOTDA based on pulse coding modulation can solve this problem. This paper introduces the principle as well as advantages of BOTDA based on pulse coding modulation, explains the principle and research progress of the pulse coding technology including Golay coding, Simplex coding, Walsh coding, cyclic simplex coding and CCPON coding emphatically. The paper sets out an analysis from three perspectives as to the performance of the five pulse coding technology and the three perspectives include coding gain, timing complexity for system and spatial resolution. The paper obtains the advantages and disadvantages of BOTDA based on the five coding methods respectively.

Key words: pulse coding; BOTDA

0 引言

布里渊光时域分析(BOTDA)系统的原理是通过检测受激布里渊散射信号实现分布式光纤传感, 它可以准确地测量出光纤沿线上任一定点的应力、温度等信息^[1], 但其测量分辨率和可测量距离之间相互制约, 不能同时提高。基于脉冲编码调制 BOTDA 系统将泵浦光送入由编码脉冲驱动的电光调制器进行编码处理, 对得到的信号进行解码处理得到系统单脉冲响应, 能解决测量分辨率和可测量距离之间的矛盾^[2]。基

于脉冲编码调制 BOTDA 传感系统因其传感距离长、测量灵敏度高的优点, 已得到广泛的应用, 如监测输电线覆冰、检测油气管道泄漏、监测桥梁安全和火灾报警等^[3,4]。目前基于脉冲编码调制的 BOTDA 系统中的编码技术有格雷(Golay)码、辛普森(Simplex)码、Walsh 码、互补相关标准正交序列(CCPON)码和单工循环编码。本文介绍基于脉冲编码调制的 BOTDA 系统, 重点讲述该系统中脉冲编码技术的原理及其研究进展。

1 基于脉冲编码的 BOTDA 系统原理

基于脉冲编码的 BOTDA 系统框架如图 1 所示。

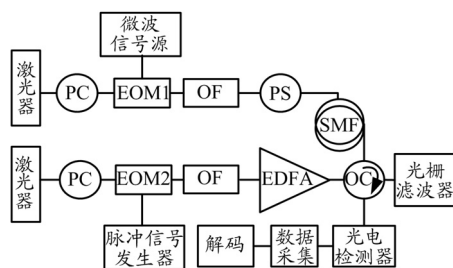
收稿日期: 2017-11-16。

作者简介: 王蔚蔚(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信与光纤传感方面。

该系统采用两个光纤激光器产生波长为 1550nm 的两路光。第一路作为探测光, 光信号首先进入偏振控制器 (PC),

PC 要保证其后所接的电光调制器 (EOM1) 的输入光偏振方向与其透光轴一致。信号从 PC 输出后通过微波信号源驱动的 EOM1, 产生频移双边带光信号, EOM1 后接光滤波器 (OF) 滤除双边带信号中的一个边带。为了降低由偏振不匹配引起的偏振衰落噪声, 我们在系统中加入了扰偏器 (PS), PS 输出的信号作为探测光进入传感光纤 (SMF)。第二路作为泵浦光, 先经过由脉冲信号发生器驱动的 EOM2, 再接入掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行放大, 最后接入光栅滤波器滤除由 EDFA 产生的自发辐射噪声。滤除噪声后的背向受激布里渊散射光信号先经光环行器 (OC) 进入光电检测器, 再将信号接入数据采集卡进行信号采集, 将采集到的数据通过解码程序以恢复系统的单脉冲响应^[5], 通过检测信号与温度或应变的线性关系, 实现沿线光纤温度或应变的测量。

图 1 基于脉冲编码 BOTDA 系统框架图



$\bar{W}$ 。A=1 时 $U=1, \bar{U}=0$; A=-1 时, $U=0, \bar{U}=1$; B=1 时, $W=1, \bar{W}=0$; B=-1 时, $W=0, \bar{W}=1$ 。信号的处理流程如图 2 所示。

Golay 互补相关序列的自相关函数只在零点位移不为零, 其余都为零, 即 $X_k + Y_k = h_k \otimes (A \times A + B \times B) = 2L\delta_k h_k$ 。其中, X_k, Y_k 为脉冲编码后的响应, h_k 为系统单脉冲响应, A 和 B 为 Golay 互补相关序列, 可利用此性质来恢复系统单脉冲响应。L 为序列长度, Golay 互补序列的编码增益为^[6]:

$$G_{\text{Golay}} = \frac{L/4}{\sqrt{L}/2} = \frac{\sqrt{L}}{2} \quad (1)$$

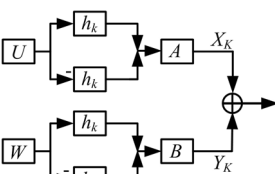
采用 Golay 互补相关序列的 BOTDA 系统的信噪比增益和其编码增益成正比, 因此采用 Golay 码脉冲编码方式可以改善系统的信噪比并提高空间分辨率。Golay 解码的时间复杂度用 $O(i)$ 表示, i 值越大表明解码时间越长, Golay 解码的时间复杂度为 $O(10^{11})$ ^[7]。

2013 年, Marcelo A. Soto 等人采用双极性 Golay 编码在 100km 的光纤上进行测温实验, 验证了双极性 Golay 编码是迄今为止所有应用于 BOTDA 系统的编码方式中信噪比最高的^[8]。2014 年, B. Srinivasan 等人通过实验证明, 在 50km 单模光纤上相关 Golay 编码有很好的空间分辨率并可实现远距离传感^[9]。2015 年, MSD Zan 等人采用 Golay 编码和 Walsh 编码的混合编码, 在 1ns 的脉冲宽度下, 实现了信噪比提升 6dB 并达到 10cm 的空间分辨率^[10]。2016 年, 罗源等人采用 Golay 编码与差分脉冲对 (DPP) 技术的混合编码方法, 在 25km 的光纤上实现了 1.6m 的空间分辨率并将系统信噪比提升了 4.08dB^[11]。2017 年, Qiao Sun 等人采用 128 位 Golay 编码结合预泵浦脉冲技术, 在 50km 的单模光纤上实现了 70cm 的空间分辨率和 1.5°C 的温度分辨率^[12]。

2.2 Simplex 编码

Simplex 码简称 S 码, 可通过 Hadamard 矩阵转化得到。先将经过编码后的脉冲序列输入到 BOTDA 系统中, 再将光纤输出端检测到的光信号进行解码分析, 即可得到系统的最终响应。例如, $r_1(t), r_2(t) \dots r_n(t)$ 分别为单脉冲光 $p_1(t), p_2(t) \dots p_n(t)$ 经过 BOTDA 系统后得到的理想检测信号, $e_1(t), e_2(t) \dots e_n(t)$ 为编码 BOTDA 的系统噪声, S 为 Simplex 矩阵, S^{-1} 为 S 的逆矩阵, 则

图 2 基于 Golay 编码的 BOTDA 系统信号处理流程



2 脉冲编码方式原理及研究进展

基于脉冲编码调制 BOTDA 系统的脉冲编码技术包括 Golay 码、Simplex 码、Walsh 码、CCPONS 码和单工循环编码, 本文对这些脉冲编码技术的原理及研究进展进行介绍, 并分析脉冲编码的编码增益、系统时间复杂度等特性。

2.1 Golay 编码

Golay 互补相关序列是由两个位数相同的序列构成的新数列。这两个位数相同的序列在相同位数的分割下, 满足一个序列中相同元素的对数和另一个序列中不同元素的对数相等。例如, 序列 $A=[001100011]$, $B=[110010100]$ 为 Golay 互补相关序列, 按照相邻两位元素分割, 序列 A 中有 5 对相同元素, 序列 B 中有 5 对不同元素。Golay 互补相关序列的构成办法是由低阶的序列形成高阶的序列 (附加法)。由于 Golay 互补相关序列是双极性的, 而传感光纤中只能传输单极性的脉冲, 因此可采用偏置的方法^[6], 将两组双极性脉冲改为 4 组单极性脉冲。将 A 分为 U 和 $\bar{U}$, B 分为 W 和

经编码 BOTDA 系统后检测到的信号为 $n_1(t), n_2(t) \dots n_n(t)$, 将检测到的信号 $n(t)$ 和 S^{-1} 进行运算处理, 最终得到 BOTDA 单脉冲响应, Simplex 解码的时间复杂度为 $O(10^8)^{[7]}$ 。S 码的编码增益为^[9]:

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

2011 年, Marcelo A. Soto 等人在基于 Simplex 编码的 BOTDA 系统中利用低噪音喇曼放大技术, 在 120km 的光纤中实现了 3m 的空间分辨率, 应力分辨率为 $60\mu\epsilon$, 温度分辨率为 $3.1^\circ\text{C}^{[13]}$ 。2012 年, Marcelo A. Soto 等人采用 Simplex 编码在 120km 的光纤中实现了 1m 的空间分辨率, 应力分辨率为 $26\mu\epsilon$, 温度分辨率为 $1.3^\circ\text{C}^{[14]}$ 。2013 年, Mohammad Taki 等人在基于 Simplex 编码的 DPP-BOTDA 系统中利用喇曼放大技术, 在 93km 的光纤中实现了 50cm 的空间分辨率, 应力分辨率为 $34\mu\epsilon$, 温度分辨率为 $1.7^\circ\text{C}^{[15]}$ 。2016 年, Qiao Sun 等人将 Simplex 编码应用在 PPP-BOTDA 系统中, 在 51km 的光纤中实现了 1m 的空间分辨率, 频率的精确度达到 0.4MHz, 并猜测如果引入喇曼放大技术, 会实现 100km 的传感距离^[16]。

2.3 Walsh 编码

Walsh 编码可由 Hadamard 矩阵构成, Hadamard 矩阵中的每一行 (或者每一列) 对应一个 Walsh 函数序列, 不同行的 Hadamard 矩阵都是正交的, 故 Walsh 编码是正交的。Walsh 解码的时间复杂度为 $O(10^{13})^{[7]}$ 。Walsh 编码的编码增益为^[9]:

$$G_{\text{Walsh}} = \frac{L^2}{(2L-1)\sqrt{L}} \quad (3)$$

2013 年, MSD Zan 等人采用 8 位 Walsh 编码脉冲, 脉冲宽度为 1ns, 实现了 10cm 的空间分辨率, 信噪比提升了 2dB。Walsh 编码脉冲布里渊增益谱 (BGS) 半峰宽度比 Golay 码窄, 更容易准确测量频谱偏移。同年, MSD Zan 等人将 Walsh 编码 NRZ 脉冲和 Golay 相结合应用在 PSP-BOTDA 系统中实现了 10cm 的空间分辨率, 发现当固定 Walsh 编码为 4 位时, 光纤中信噪比和 $N^{1/2}$ 成正比 (N 为 Golay 编码位数); 当 Golay 位数一定时, 信噪比先随着 Walsh 编码位数线性增加, 当 Walsh 编码位数达到 8 时, 系统信噪比最大, 即使再增加 Walsh 编码位数信噪比也不会增加。将 Walsh 编码应用在 PSP-BOTDA 系统中, 即使 Walsh 编码脉冲宽度大于声波的持续时间, 也可以实现良好的空间分辨率, 比之前将 Golay 应用在 PSP-BOTDA 系统中的最大信噪比提升了 5.4dB^[17,18]。2015 年, MSD Zan 等人采

用 Walsh 编码 RZ 脉冲和 Golay 编码 NRZ 脉冲, 在 PSP-BOTDA 系统中研究发现, 当固定 Golay 编码为 4 位, 将 Walsh 编码依次设定为 1、2、4、8 和 16 时, 布里渊散射光信号功率虽然基本不变, 但噪声信号功率随着 Walsh 编码的增加线性降低, 当 Walsh 编码为 16 位, Golay 编码为 2 位时, 相比传统的 PSP-BOTDA 系统的最大信噪比提升 8.8dB^[19,20]。

2.4 CCPON 编码

CCPON 编码过程是结合 Golay 编码的附加法和夏皮罗编码的树形编码思想, 先由一对互补序列构成 2×2 矩阵, 再经过行和列的附加得到 $2^n \times 2^n$ 的矩阵^[7]。CCPON 码是双极性码, 需将 4 组双极性脉冲改为 8 组单极性脉冲, CCPON 码的自相关函数特点和 Golay 编码相同只在零点位移不为零, 其余都为零, 故可采用和 Golay 编码类似的信号处理方式恢复系统单脉冲响应^[7]。CCPON 编码的编码增益为^[9]:

$$G_{\text{CCPON}} = \sqrt{L/2} \quad (4)$$

2008 年, PK Sahu 等人使用 64 位 CCPON 码, 其测量时间比使用 Hadamard 码时更短, 信噪比提升了 3.7dB^[21]。2013 年, 燕山大学张书国等人发现将 CCPON 码应用在 BOTDR 系统可增加单脉冲响应, 但是系统的空间分辨率并不发生改变^[7]。2015 年, 华北电力大学李永倩和李攀等人发现将 CCPON 码应用在 BOTDA 系统中可以实现比 Simplex 和 Golay 更大的增益^[9]。

2.5 单工循环编码

单工循环编码是向传感光纤发送 N 位循环的二进制编码光脉冲, 相邻的光脉冲间隔时间大于或等于光脉冲在传感光纤来回所需的时间, 从而使光脉冲均匀分布在传感光纤。测量的信号为多个脉冲信号的有机叠加, 因单工循环码具有相关性, 通过解码技术将单个光脉冲对应的背向散射曲线恢复出来。单工循环编码的编码增益和 Simplex 码相同。

连续编码光脉冲能大大提高光纤非线性峰值阈值光功率, 但信噪比改善量较小。因为单工循环编码相邻的光脉冲不连续, 所以脉冲编码调制 BOTDA 系统的光纤非线性峰值阈值光功率较低, 信噪比改善量较大。2014 年, 余向东等人利用 211 位单工循环编码在 25km 的光纤中实现了 3m 的空间分辨率和 1.5°C 的温度分辨率^[22]。

3 5 种编码方式的优缺点比较

本文从编码增益、系统处理时间和空间分辨率的角度分析了 Golay 码、Simplex 码、Walsh 码、CCPON 码

和单工循环编码这 5 种脉冲编码方式。由 5 种编码方式的编码增益可以看出, CCPON 码的编码增益 G_{CCPON} 最大, G_{Walsh} 次之, G_{Walsh} 大于 $G_{Simplex}$ 码, G_{cyclic} 等于 $G_{Simplex}$ 码, G_{Golay} 码最小。考虑系统处理时间, Walsh 解码的时间复杂度大于 Golay 解码的时间复杂度, Simplex 解码的时间复杂度最小。时间复杂度越大, 系统处理时间越长, 系统解调和数据处理越困难。从空间分辨率角度考虑, 由脉冲编码调制 BOTDA 系统研究进展得出, 相比采用其它编码方式, 单纯采用 Golay 编码是空间分辨率最高的。CCPON 码有其独特的优点, 它的波峰因素低 (其波峰因素为 2), 波峰因素高 (大于 3) 时容易引起显著的误差, 因此与其它的脉冲编码序列相比, CCPONS 码可采用更长的脉冲序列入射进 BOTDA 传感系统, 从而提高动态范围和信噪比。单工循环编码由于其非连续性, 相对于其它编码方式而言, 使得光纤非线性峰值阈值功率较单脉冲大大降低, 能够更好地改善系统信噪比。

4 结束语

本文先对基于脉冲编码调制的 BOTDA 传感系统原理进行了介绍, 重点阐述了现有的编码技术原理及其研究进展, 分析比较了 5 种编码方式的优缺点。本文介绍的几种编码方式都很好解决了 BOTDA 系统中空间分辨率和传感距离相互制约的矛盾, 从现在的研究进展得出不同编码方式的结合可以得到更高的空间分辨率。我们后续可以研究不同编码方式结合及其最佳编码位数, 实现最大的编码增益并得到最大信噪比。

参考文献:

- [1] 孙世林. 基于布里渊散射的温度应变同时传感技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [2] 孟祥腾. BOTDA 系统关键技术的理论和实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [3] 曹永兴, 张昌华. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状[J]. 华东电力大学, 2011, 39 (1): 39-43.
- [4] 茅志强. 基于 BOTDA 的光纤分布式传感研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [5] 梁浩. 基于序列编码探测脉冲的布里渊光纤传感器的研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [6] 李永倩, 李攀. 不同脉冲编码调制的 BOTDA 系统性能分析与比较[J]. 半导体光电, 2015, 36 (5): 780-786.
- [7] 张书国. BOTDR 传感系统信号处理技术的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [8] SOTO MA, LE FS, THÉVENAZ L. Bipolar optical pulse coding for performance enhancement in BOTDA sensors [J]. Optics Express, 2013, 21, (14): 21-28.
- [9] SILVA J E P D, TORRESI S I C D, TORRESI R M. Polyaniline/poly (methymethacrylate) blends for corrosion protection: The effect of passivating dopants on different metals [J]. Progress in Organic Coatings, 2007, 58(1): 33-39.
- [10] ZAN M S D B, HORIGUCHI T. A Dual Golay Complementary Pair of Sequences for Improving the Performance of Phase-Shift Pulse BOTDA Fiber Sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30 (21): 3338-3356.
- [11] 罗源, 闫连山, 邵理阳. 基于布里渊光时域分析传感系统的 Golay—差分脉冲混合编码技术[J]. 光学学报: 自然科学版, 2016, 36(8): 32-37.
- [12] SUN Q, TU X, SUN S, et al. Long-range BOTDA sensor over 50km distance employing pre-pumped Simplex coding [J]. Journal of Optics, 2016, 18(5): 055501-2-055501-3.
- [13] SOTO MA, BOLOGNINI G, PASQUALE FD. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification[J]. IEEE Photonics Technology Letters, Optics Letters, 2011, 36 (2): 232-234.
- [14] SOTO MA, TAKI M, KI BOLOGNINI G, et al. Simplex-Coded BOTDA Sensor Over 120km SMF With 1m Spatial Resolution Assisted by Optimized Bidirectional Raman Amplifications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24 (20): 1823-1826.
- [15] TAKI kiM, SOTO MA, BOLOGUNINI G. Study of Raman amplification in DPP-BOTDA sensing employing Simplex coding for sub-meter scale spatial resolution over long fiber distances [J]. IOPscience, 2013, 24 (9): 094018-3-094018-5.
- [16] SUNQ, TU X, SUN S. Long-range BOTDA sensor over 50 km distance employing pre-pumped Simplex codin [J]. IOP Publishing, 2016, 18(5): 055501-4-055501-5.
- [17] ZAN MSD, BAKAR AAA, TSUMURAYA T. The use of Walsh code in modulating the pump light of high spatial resolution phase-shift-pulse Brillouin optical time domain analysis with non-return-to-zero pulses [J]. Measurement Science & Technology, 2017, 22 (11): 31-35.
- [18] ZAN MSD, YOKOYAMA K, TSUMURAYA T. Combination of walsh and Golay codes in modulating the pump light of phase-shift pulse BOTDA sensor [J]. IEEE International Conference on Photonics, 2013, 12 (10): 160-162.
- [19] MUANENDA Y S, 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] SUN Shilin, CHEN Mo, WANG Jianfei, et al. Optimization of Raman-assisted wavelength-division-multiplexing system with arbitrary input signal power spectrum [J]. Optical Engineering, 2017, 56 (6): 066109-4-066109-6.
- [21] SAHU P K, GOWRE S C, MAHAPATRA S. Optical time-domain reflectometer performance improvement using complementary correlated Prometheus orthonormal sequence[J]. Iet Optoelectronics, 2008, 2(3): 128-133.
- [22] 余向东, 金尚忠, 张在宣. 采用单工循环编码解码的分布式光纤喇曼温度传感器[J]. 光子学报, 2014, 43 (7): 0706001-0706005.