

基于光脉冲编码的布里渊光时域分析仪研究进展

靳思梦, 杨智生*, 洪小斌, 伍剑

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 布里渊光时域分析仪(BOTDA)因其长距离分布式传感的优势而得到学术界和产业界的广泛研究与应用,光脉冲编码技术可以在不牺牲空间分辨率和测量时间的前提下辅助BOTDA进一步实现可观的信噪比提升,被认为是最高效(高信噪比提升和低硬件成本)的性能提升方法之一,具有显著的优势和应用前景。本文围绕基于光脉冲编码技术的BOTDA,介绍了用于分布式光纤传感领域的几种主流的光脉冲编码技术的原理,综述了近些年基于光脉冲编码的BOTDA传感系统的研究进展。

关键词 光纤光学; 分布式传感器; 受激布里渊散射; 光脉冲编码

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS231420

1 引言

分布式光纤传感器(DOFS)集环境感知与信号传输于一根连续的光纤上,每个光纤段都充当一个独立的传感器节点以提供数万个分辨率点,可同时获得被测场随时间和空间变化的分布信息,具有低成本、长距离、连续分布式测量等优点^[1]。在众多DOFS中,基于受激布里渊散射(SBS)的布里渊光时域分析仪(BOTDA)具有长距离的优势,一直是科研界以及产业界关注的焦点^[2]。BOTDA系统中同时存在对向传播的泵浦脉冲光和连续探测光,当两者之间的频率差在一定范围内时会发生受激布里渊散射,两束光之间产生能量转移;当两束光之间的频率差等于光纤的布里渊频移(BFS)时,能量转移达到最高。典型BOTDA系统通过扫描两束光的频率差得到布里渊增益/损耗谱(BGS/BLS),并对BGS/BLS进行拟合得到其峰值对应频率(即BFS),根据光纤BFS的变化与外界温度和应变变化的对应关系,即可还原沿光纤的温度和应变分布^[3]。经典BOTDA为诸多领域的故障诊断及事故预警提供了技术支持,如电网线路损坏、油气管道泄漏预测、火灾、山体滑坡预警、桥梁和航天舱等建筑结构健康状态监控等。例如,2015年,Minardo等^[4]将BOTDA应用于在人工降雨干预下的仪器水槽中重建的小尺度边坡变形监测,证实了BOTDA技术能够定位出斜坡模型的不同位置并在雨水破坏前阶段检测到土壤的移动,使用户深入了解人工降雨下土壤

的动态;2019年,Oskoui等^[5]基于BOTDA技术提出了一种多跨连续桥梁沿长度分布的损伤检测方法,通过对一座五跨连续预制后张混凝土箱桥梁的荷载试验,成功将BOTDA技术用于监测沿桥梁长度方向的分布应变;同年,姜帅等^[6]采用BOTDA技术对建筑结构在荷载和温度影响下产生的应变进行监测,实现了建筑设计使用年限内的全过程动态实时监测,为建筑保护、建筑功能调整引起的结构加固提供了技术支持;2020年,何志文等^[7]研究了BOTDA系统在短距离内混凝土管出现多缝情况下的布里渊频移特征,验证了利用分布式光纤监测混凝土管裂缝的有效性;2023年,Gutiérrez等^[8]针对西班牙东北部埃布罗河谷蒸发岩岩溶破坏性地陷的经典案例,将BOTDA技术应用于对横向边缘不清晰、横向变形梯度低、沉降缓慢的凹陷天坑的活动监测,在这种具有挑战性的场景中,位移和应变数据之间展示出了相当好的时空相关性;同年,孔洋等^[9]针对砂土地基抗拔桩受力性能与荷载传递机理研究不足的问题,将BOTDA技术应用于长江下游地区厚层砂土地基预应力管桩原位抗拔静载试验研究,实现了预应力管桩在拉拔过程中桩身受力变形状态的分布式测量与数据精确定位等。以上关于经典BOTDA技术的应用研究表明,分布式光纤传感技术已经在诸多领域较好地实现了事故预警或者健康状态监测。

信噪比(SNR)是最终决定BOTDA系统综合传感性能的关键参数^[10]。对于给定的空间分辨率,典型BOTDA系统的信噪比与输入的泵浦脉冲光功率和探

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-09-19; 录用日期: 2023-10-21; 网络首发日期: 2023-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(62375023、62275028)、北京市科技新星计划(Z211100002121074)、中央高校基本科研业务费专项基金(2023RC51)

通信作者: *zhisheng.yang@bupt.edu.cn

测光功率呈正相关,这两者最终都受到传感光纤非线性效应的限制。其中,泵浦脉冲光功率受限于调制不稳定性(MI),通常在长度超过 20 km 的光纤中的最大输入脉冲功率为 $\sim 100 \text{ mW}$ ^[11-12];在典型的双边带探测光的系统中,为了减轻高阶非本地效应的影响,每个边带的探测光功率被限制在 -6 dBm 以下^[13-15]。为了克服上述限制,研究人员提出了若干技术路线,如分布式放大技术^[16-19]、先进信号调制解调技术^[15,20-25]、光脉冲编码技术^[26-42],以及它们的组合技术^[43-50],以进一步提高 BOTDA 分布式光纤传感器的综合性能。其中,光脉冲编码技术作为概念上最高效(高信噪比提升和低硬件成本)的方法之一,近年来得到了广泛研究。

基于光脉冲编码技术的 BOTDA 系统的基本原理,是将传统 BOTDA 中的单脉冲替换为一系列编码光脉冲序列发射到传感光纤中,以增加泵浦能量(每个脉冲的峰值功率严格限制在 MI 阈值以下);通过将采集的编码响应后处理(即解码),恢复单脉冲响应的同时压缩噪声,从而在不改变空间分辨率和测量时间的前提下达到提高系统 SNR 的目的。目前应用于 BOTDA 系统的几种主流的光脉冲编码技术主要有 Golay 编码^[38,49,51-61]、Simplex 编码^[35,37,39-40,43-47,50,62-65]、Cyclic 编码^[48,66-69]、基于解卷积的编码^[70-71],以及它们的

衍生方案(颜色编码、双极性编码、不同编码方案的组合等)^[72-81]。光脉冲编码技术实现的 SNR 提升被定义为编码增益^[82],它通常与码长的平方根成正比。本文围绕基于光脉冲编码技术的 BOTDA 系统,介绍用于分布式光纤传感领域几种主流的光脉冲编码技术的原理,综述近些年基于光脉冲编码的 BOTDA 传感系统的研究进展。

2 光脉冲编码技术基本原理

光时域分布式光纤传感器均基于光时域反射计(OTDR)的原理,如图 1 所示,其中采集到的后向散射光可表示为离散的时域信号 $r_s^m(n)$,该信号为理想单脉冲响应 $r_s(n)$ 和零均值加性噪声 $e_s(n)$ 的线性叠加。对于一个线性时不变系统,单脉冲响应 $r_s(n)$ 可以进一步表示为单脉冲信号 $p(n)$ 和光纤冲击响应 $h(n)$ 的卷积:

$$r_s^m(n) = r_s(n) + e_s(n) = p(n) \otimes h(n) + e_s(n), \quad (1)$$

式中: n 代表信号的时域采样点,可以通过采样率 f_s 与时间 t 互相换算: $t = n/f_s$;符号 \otimes 表示线性卷积。

该单脉冲系统的 SNR 为理想单脉冲响应 $r_s(n)$ 和噪声 $e_s(n)$ 标准差(STD) σ_e 的比值:

$$R_{\text{SN}} = \frac{r_s(n)}{\sigma_e}. \quad (2)$$

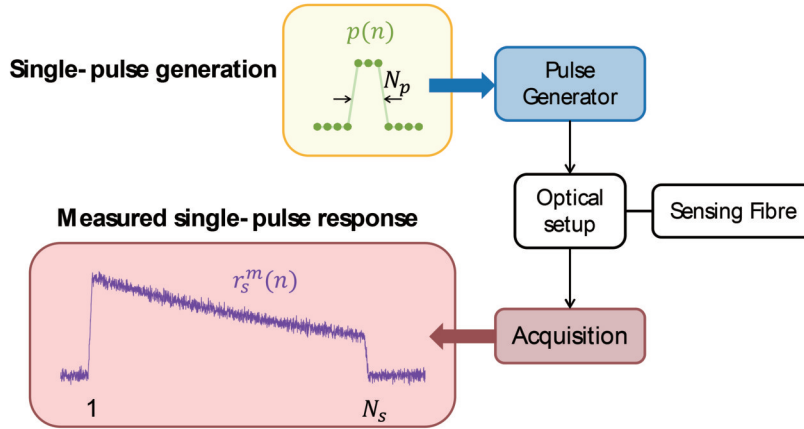


图 1 单脉冲 OTDR 系统原理示意图^[70]。 N_p 为单脉冲信号 $p(n)$ 的采样点数; N_s 为信号 $r_s^m(n)$ 、 $r_s(n)$ 和 $e_s(n)$ 的采样点数
Fig. 1 Principle of single-pulse OTDR system^[70]. N_p is sampling points of single-pulse signal $p(n)$; N_s is sampling points of $r_s^m(n)$, $r_s(n)$, and $e_s(n)$

光脉冲编码技术应用于分布式光纤传感系统的核心思想是,用按特定规律强度调制的编码脉冲序列来代替单脉冲发射进入传感光纤,然后通过对应的解码方式对编码脉冲响应进行解码,达到恢复单脉冲响应并压缩噪声的目的,即在不改变空间分辨率和测量时间的前提下实现系统 SNR 的提升(称为编码增益)。图 2 展示了向光纤注入“1”、“0”、“1”光编码脉冲序列的时域响应,其中编码脉冲响应是一系列单脉冲响应延迟后的线性叠加。

上述光脉冲编码系统的编码脉冲响应 $r_c(n)$ (采样

点数为 N_c)在数学上可以表示为编码脉冲序列 $c(n)$ 和光纤冲击响应 $h(n)$ 的线性卷积:

$$r_c(n) = c(n) \otimes h(n) + e_c(n), \quad (3)$$

式中: $c(n)$ 为编码脉冲信号,可表示为 $d(n) \otimes p(n)$, $d(n)$ 为代表编码脉冲排列的冲击序列信号; $e_c(n)$ 代表编码系统中的零均值加性噪声。因此,式(3)可进一步转换为

$$r_c(n) = d(n) \otimes p(n) \otimes h(n) + e_c(n). \quad (4)$$

光脉冲编码方案从码元序列在光纤内持续时间的角度可以分为循环码(如 Cyclic 循环码)和非循环码;

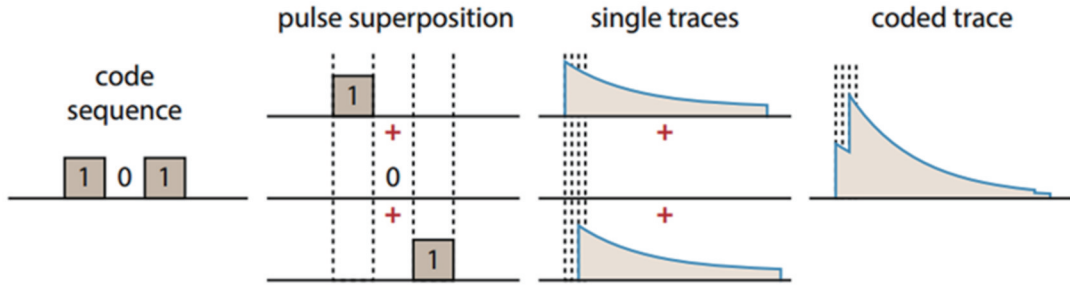


图 2 光脉冲编码技术原理示意图^[82]
Fig. 2 Principle of optical pulse coding^[82]

从极性的角度可以分为单极性码(包含码元“0”和“1”)和双极性码(包含码元“1”和“-1”);从脉冲序列各码元脉冲的载波频率是否单一的角度可以分为单色(单频)码和时频编码(也称为颜色编码)。本节将按照单色单极性编码、颜色编码、双极性编码的顺序,详细描述若干主流编码方案的编解码原理,旨在对不同光脉冲编码技术的基本原理进行系统性的回顾与综述,以及明确其相应的编码增益。本节的原理简述过程中将体现出部分衡量编码性能的标准,而对不同光脉冲编码技术的综合性能分析、比较与总结将在本文第 3 节展开描述。

2.1 单色单极性编码

单色单极性编码方案包括基于互补相关的 Golay 编码^[28]、Simplex 编码^[29]及其衍生的 Cyclic 编码^[83],以及基于解卷积的编码等^[70-71]。

2.1.1 Golay 编码方案

Golay 于 1961 年提出了任意码长的双极性(包含码元“1”和“-1”)互补序列 $A(n)$ 和 $B(n)$,并推导了双

极性互补码的迭代生成方式^[84]:

$$\begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} A|B \\ A|\bar{B} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

式中: \bar{B} 代表将 B 取反,即用“-1”替代 B 中“1”;符号 $|$ 表示序列的连接。按规律重复上述过程,即可得到长度为 2 次幂($N_u = 2^N, N$ 为整数)的双极性 Golay 码。双极性 Golay 码是一组自相关函数之和具有零自相关特性的序列^[26],即满足

$$A(n)*A(n) + B(n)*B(n) = 2N_u\delta(n), \quad (6)$$

式中: $*$ 表示相关运算符; N_u 是编码长度; $\delta(n)$ 表示单位冲击函数。

在传统分布式光纤传感器中,受到脉冲强度调制的物理限制,注入光纤的光脉冲编码序列需要为单极性码。1989 年, Nazarathy 等^[28]将双极性 Golay 码转化为单极性形式,应用于 OTDR 以增强其 SNR。在进行光脉冲的调制之前,对上述双极性 Golay 码的 $A(n)$ 和 $B(n)$ 进行如下转换,生成 4 组单极性 Golay 码 $A_1(n)$ 、 $A_2(n)$ 、 $B_1(n)$ 、 $B_2(n)$:

$$\begin{cases} A_1(n) = \begin{cases} 1, & A(n) = 1 \\ 0, & A(n) = -1 \end{cases} \\ B_1(n) = \begin{cases} 1, & B(n) = 1 \\ 0, & B(n) = -1 \end{cases} \end{cases}, \begin{cases} A_2(n) = \begin{cases} 1, & A(n) = -1 \\ 0, & A(n) = 1 \end{cases} \\ B_2(n) = \begin{cases} 1, & B(n) = -1 \\ 0, & B(n) = 1 \end{cases} \end{cases}, \quad (7)$$

即 $A(n) = A_1(n) - A_2(n)$, $B(n) = B_1(n) - B_2(n)$ 。

按照设计好的 4 组单极性 Golay 码字分别进行光脉冲强度调制,将调制好的编码光脉冲序列注入传感光纤,分别得到 4 组不同的光纤响应(编码响应)。将不同的响应分别与对应的原始编码序列进行相关,并将相关之后的两组响应求和,即可解码恢复光纤单脉冲响应 $r_s^d(n)$ 。考虑与单脉冲方案总测量次数相同(测量时间相同)的情况, Golay 编码方案最终的编码增益为

$$G_r = \frac{\sqrt{N_u}}{2} \approx \sqrt{\frac{N_1}{2}}, \quad (8)$$

式中, N_1 是单组编码中“1”的个数。在 Golay 编码中每

组编码均满足 $N_u \approx 2N_1$ 。

2.1.2 Simplex 编码

Simplex 编码是由“1”和“0”组成的单极性矩阵,码长为 $N_u = 2^N - 1$ ^[29]。将码长为 N_u 的 Simplex 编码脉冲序列注入传感光纤中,检测到的光纤时域响应信号(编码响应)为 $r_{c1}(n), r_{c2}(n), \dots, r_{cN_u}(n)$ ^[30],可以表示为

$$\begin{bmatrix} r_{c1}(n) \\ r_{c2}(n) \\ \vdots \\ r_{cN_u}(n) \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} r_{s1}(n) \\ r_{s2}(n) \\ \vdots \\ r_{sN_u}(n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(n) \\ e_1(n) \\ \vdots \\ e_{N_u}(n) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中, $e_1(n), e_2(n), \dots, e_{N_u}(n)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的不相关随机噪声。通过 S 的逆矩阵 S^{-1} 解码即可恢复

单脉冲响应。在相同的重复测量次数(测量时间相同)下,相较于单脉冲方案,Simplex 编码方案最终的编码增益^[30]为

$$G_r = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N_u} / \frac{4\sigma^2}{(N_u + 1)^2}} = \frac{N_u + 1}{2\sqrt{N_u}} \approx \frac{\sqrt{N_u}}{2} \approx \sqrt{\frac{N_1}{2}},$$

$N_u > 63$. (10)

当编码长度较短时,Simplex 码的编码增益略好于 Golay 码;当编码长度较长时(满足 $N_u > 63$),Simplex 码的编码增益与 Golay 编码方案近似相同。

2.1.3 Cyclic 编码方案

前文提到的 Golay 码和 Simplex 码是常规非循环码(非周期码),如图 3 左上方所示,需要依次向光纤打

入 N_m 组编码脉冲序列 p_1, p_2, \dots, p_{N_u} (n 为单组编码序列的码元个数),编码脉冲序列不会持续在整个光纤中来回传播的时间,根据测量得到的 N_m 组编码响应解码得到单脉冲响应 r_s^d ,其中 Golay 编码和 Simplex 编码方案分别需要测量 $N_m=4$ 组和 $N_m=2^N-1$ (N 为整数)组的编码响应。2010 年,Baronti 等^[83]提出并验证了一种循环的 Cyclic 码(周期码),如图 3 左下方所示,其基本原理是循环地向传感光纤发送一组编码光脉冲信号,相邻码字的光脉冲保持固定的时间间隔,整组编码光脉冲的循环周期约等于光在传感光纤中来回传播所需的时间,使得整个传感光纤中均匀分布着等间隔的光脉冲信号,Cyclic 码只需测量一组编码响应 r_c 即可实现解码恢复单脉冲响应 r_s^d 。

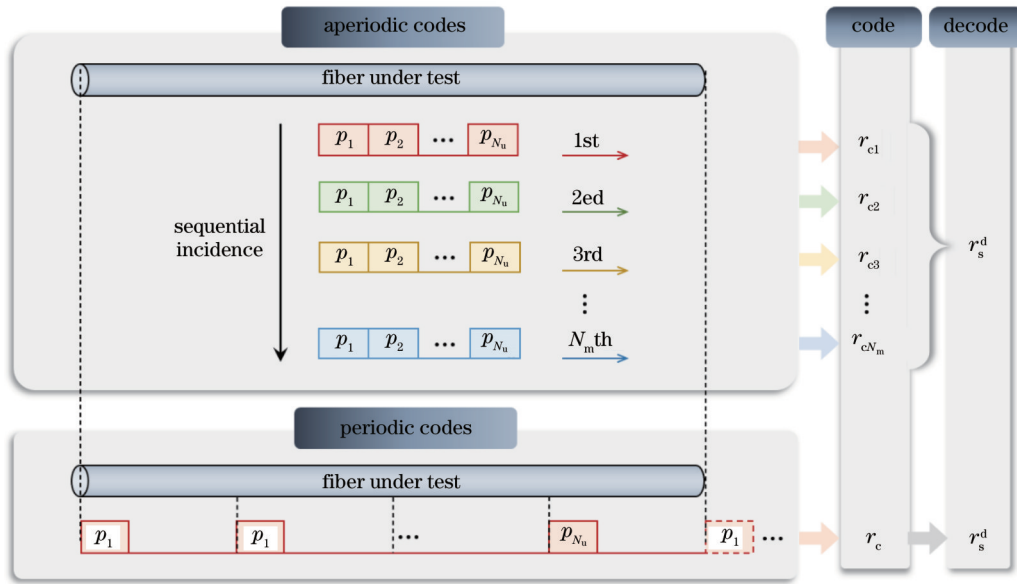


图 3 常规非循环码与循环码的编码原理

Fig. 3 Coding principle of conventional aperiodic codes and periodic codes

码长为 N_u 的 Cyclic 码的编码依赖于以下递归方程的解:

$$\begin{cases} p_1 = 0 \\ p_{n+1} = (p_n + n) \bmod N_u \end{cases}, \quad (11)$$

式中: mod 指模函数; $n \in [1, (N_u + 1)/2]$ 。Cyclic 码的码长为 $N_u = 4N - 1$, 其中 N 为整数。以 7 位 Cyclic 码为例,按式(11)可解出 7 位 Cyclic 码为 $[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1]$,如图 4 中虚线所示,实线为 7 位 Cyclic 码的光纤时域响应曲线。

Cyclic 编码也是通过 S 的逆矩阵 S^{-1} 解码来恢复单脉冲响应,其中 S 矩阵是以 $[p_0, p_{N_u}, \dots, p_2, p_1]$ 为第一行的循环右移矩阵。除此之外,受益于 Cyclic 码的循环性,可以利用快速傅里叶变换(FFT)进行快速解码^[74]。

根据相关文献的理论,Cyclic 码的理论编码增益与 Simplex 码相同^[83],即如式(10)所示。

2.1.4 基于解卷积的编码方案

单极性 Golay 码、Simplex 码以及 Cyclic 码应用在 BOTDA 系统中都会带来一些额外的代价,或无法实现光脉冲编码技术的理论性能极限(将在第 3 节详细论述)。2020 年,Sun 等^[85]提出了一种基于解卷积的单次非循环编码,该非循环编码通过专门设计的分布式遗传算法(DGA)搜索得到,被称为遗传优化码(GO 码)^[70]。GO 编码方案只需要一次性计算即可永久使用,其码长可以任意指定,且只需测量一组编码响应即可实现解码恢复单脉冲响应。

实际中,为了提高注入传感光纤的光脉冲功率,编码系统中通常会使用掺铒光纤放大器(EDFA)对光脉冲进行放大。由于 EDFA 的瞬态效应,编码光脉冲序列经过 EDFA 放大后, $c(n)$ 的幅度将呈衰减趋势(将在第 3 节详细论述),数学上可表示为 $c_i(n) = f(n)c(n)$, $f(n)$ 代表由 EDFA 导致的编码光脉冲序列功率的衰减。因此式(3)可改写为

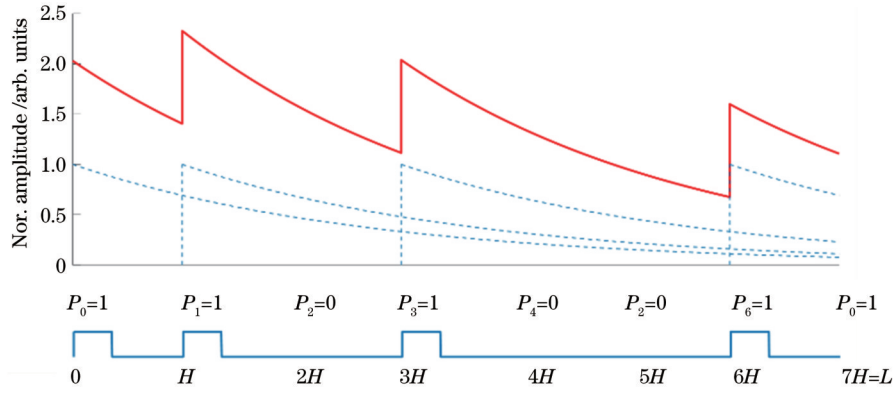


图 4 7 位 Cyclic 码及其光纤编码响应示意图^[83]
Fig. 4 7-bit Cyclic code and its coded response^[83]

$$r_c(n) = c_f(n) \otimes h(n) + e_c(n) = f(n)d(n) \otimes p(n) \otimes h(n) + e_c(n). \quad (12)$$

定义 $d_f(n) = f(n)d(n)$ 为解码函数, 式(12)可进一步表示成如下形式:

$$r_c(n) = d_f(n) \otimes p(n) \otimes h(n) + e_c(n) \xleftrightarrow{F} R_C(k) = D_F(k)P(k)H(k) + E_C(k), \quad (13)$$

式中: F 代表 N_c 个点的离散傅里叶变换(DFT); N_c 为编码脉冲响应的采样点数; 右式的 $D_F(k)$ 、 $P(k)$ 、 $H(k)$ 和 $E_C(k)$ 分别是 $d_f(n)$ 、 $p(n)$ 、 $h(n)$ 和 $e_c(n)$ 的离散频域信号。对式(13)右式进行离散傅里叶逆变换(IDFT), 即可解码恢复单脉冲响应:

$$r_s^d(n) = \text{IDFT} \begin{bmatrix} R_C(k) \\ D_F(k) \end{bmatrix} = \text{IDFT} \left[P(k)H(k) + \frac{E_C(k)}{D_F(k)} \right] = r_s(n) + \text{IDFT} \left[\frac{E_C(k)}{D_F(k)} \right]. \quad (14)$$

DFT 可以通过 FFT 实现, 因此本解码方案可以实现快速解码。基于解卷积的编码方案中, 解码后对噪声的压缩取决于解码函数 $D_F(k)$, 编码增益的理论最大值^[70]为

$$G_c < \sqrt{\frac{F_E(m-1)}{m}}, \quad (15)$$

式中: F_E 是能量增强因子, 为编码脉冲相对于单脉冲的能量提升倍数(脉冲序列功率平坦时, F_E 等于编码序列中 1 的个数 N_1); $m = N_u/F_E$ (N_u 是编码长度)。由第 2 节的讨论可知, 分布式光纤传感器所有现行单极单极性编码方案的理论编码增益为 $G_r = \sqrt{N_u}/2$ 。这些编码方案码字中“1”和“0”的位数相同且都要求 $f(n) = 1$, 则 $N_u = 2F_E$, 即 $G_r = \sqrt{F_E}/2$ 。

文献[70]中分析指出, m 的最佳值在 3~4 之间。固定 $m = 3$, 此时 DGA 搜索得到的 GO 码编码增益 G_c 和能量提升倍数 F_E 的关系如图 5 所示。当 $F_E = 20$ 时, GO 编码方案的编码增益优于另外三种单极性编码方案约 0.3 dB; 随着 F_E 的增大, GO 编码方案的编码增益略小于另外三种单极性编码方案, 但最大的差异也在 0.5 dB 以内, 在大多数应用中可以忽略不计, 因此可以认为 GO 编码方案的编码增益与另外三种单极性编码方案近似相同, 约为 $\sqrt{N_1}/2$ 。

值得注意的是, 虽然 DGA 搜索算法作为一种经典寻优算法比暴力搜索更有效, 但其搜索到的码字不一

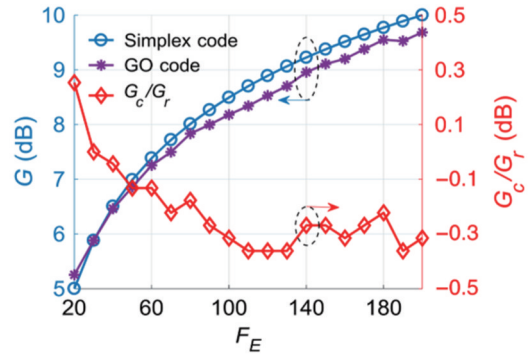


图 5 $m = 3$ 时, GO 码和 Simplex 码的编码增益(左侧纵坐标)以及它们的差异(右侧纵坐标)随能量增强因子 F_E 的变化^[70]
Fig. 5 Coding gains of GO code and Simplex code (left-hand side vertical axis) and their difference (right-hand side vertical axis) as a function of energy enhancement factor F_E for $m = 3$ ^[70]

定是最优解。2021 年, Zhou 等^[71]提出利用一种简单的学习(AL)算法快速生成非循环短码(SA 码), 再利用两组已经存在的非循环短码的卷积直接生成一组混合非周期长码(HA 码), 提高了基于解卷积的编码方案序列生成的效率。

2.2 颜色编码

2012 年, Le Floch 等^[72-76]提出了一种时频编码, 也叫颜色编码。颜色编码方案是对不同频率的泵浦脉冲施加强度调制, 本质上结合了强度调制编码和经典布

里渊时域传感器的频率扫描过程,每个扫描频率下独立实现编码和解码过程。编码长度 N_u 决定了扫频个数,即扫频个数为 N_u ,因此为了实现足够大的动态范围,颜色编码的码长必须足够大。

生成颜色编码序列的方法之一是使用具有循环块的分块循环矩阵(BMCB)^[72],每个码元的频率由码元本身决定,码长 N_u 对应 N_u^2 个脉冲序列。图 6(a) 为基于 BMCB 生成的码长 $N_u = 3$ 的时频编码示意图,白色方块表示“0”,即没有光脉冲,带有不同颜色的方块表

示不同频率的“1”,即不同频率的光脉冲。基于 BMCB 的颜色编码的编码增益与单色单极性编码增益相同。

另一种生成颜色编码的方法是基于 Simplex 编码原理,在每个码元间隙预定义不同的光频率^[73],码长 $N_u = 7$ bits 的颜色 Simplex 编码序列如图 6(b) 所示。颜色 Simplex 编码方案与经典 Simplex 编码方案的编码增益相同,即如式(10)所示。

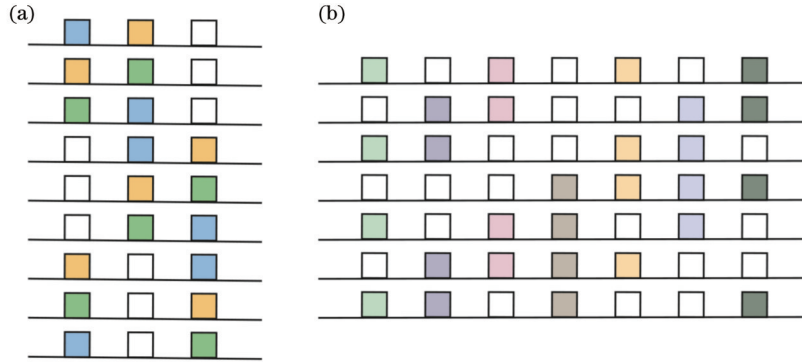


图 6 颜色编码序列示意图,其中不同颜色的色块表示不同频率的光脉冲,白色色块表示码元“0”^[82]。(a) 基于 BMCB 的 3 位时频码; (b) 7 位基于 Simplex 编码的颜色码
Fig. 6 Schematic diagram of colored codes. Colors represent optical pulses of different frequencies, while white color is for absence of intensity pulse^[82]. (a) 3-bit BMCB-based time-frequency code; (b) 7-bit colored Simplex codes

2.3 双极性编码

在传统的光脉冲编码系统中,由于脉冲强度调制过程中不能出现负值,通常只能使用单极性编码。然而,BOTDA 系统提供了一种独特的方法以扩展所使用的编码方案类型,即结合布里渊增益和布里渊损耗过程,实现双极性编码^[77]。双极性编码方案中,除了对

脉冲进行强度调制,还要将与每个码元相关的正负号与脉冲频率建立联系:连续探测光信号与泵浦光信号相互作用,泵浦光信号的频率位于探测信号频率两边,如图 7(a) 所示,将泵浦高频边带设置为“+1”,探测光产生布里渊增益,将泵浦低频边带设置为“-1”,探测光产生布里渊损耗,如图 7(b) 所示。

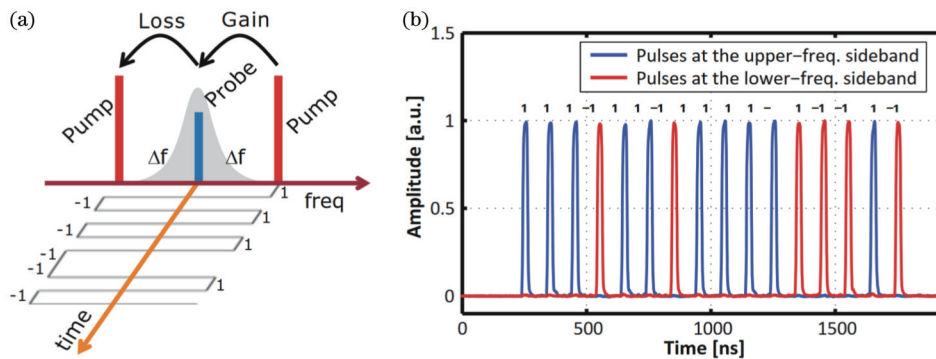


图 7 BOTDA 系统中的双极性编码示意图^[77]。(a) 基于双极性编码的 BOTDA 原理;(b) 双极性编码时域分布
Fig. 7 Schematic diagram of bipolar coding in BOTDA system^[77]. (a) BOTDA principle based on bipolar coding; (b) time domain distribution of bipolar coding

已有文献指出,双极性 Golay 码在 BOTDA 系统中可以表现出显著的 SNR 提升^[28]。与单极性 Golay 码相比,双极性 Golay 码只使用两个脉冲序列,其编码增益^[77]为

$$G_r = \sqrt{N_u} \approx \sqrt{2N_1} \quad (16)$$

可以发现,与相同码长的单极性 Golay 码相比,双极性 Golay 码带来了额外 3 dB 的 SNR 提升。值得注意的是,双极性编码需使用三频探测光技术^[78],否则非本地效应导致分别代表两个极性码字的脉冲功率失衡,造成系统误差。

3 光脉冲编码 BOTDA 系统性能优化

由于 BOTDA 系统中一些特有的非线性效应和后处理过程等因素,早期的光脉冲编码技术与 BOTDA 系统不完全适配,主要体现为两大问题:一是早期光脉冲编码 BOTDA 系统的 SNR 很差;二是容易产生解码畸变。在过去几十年的发展过程中,研究人员针对这两大问题展开了一系列的深入分析,研究发现,光脉冲编码 BOTDA 系统的 SNR 较差通常是因为:

- 1) 编码脉冲峰值功率未调整至调制不稳定性所决定的最大阈值;
- 2) 受限于高阶非本地效应与光噪声的最佳编码长度不明确。

而光脉冲编码 BOTDA 系统产生解码畸变通常是因为:

- 1) 常规的非归零 (NRZ) 编码脉冲调制格式在

SBS 过程中破坏了编码的线性度;

- 2) EDFA 瞬态效应造成编码脉冲功率放大不平坦,整体呈现明显的衰减趋势;

3) 大布里渊增益的编码 BOTDA 系统中不可忽略的偏振牵引效应;

4) 不鲁棒的后处理过程,即传统的线性归一化对于大布里渊增益场景的编码 BOTDA 系统不适用。

针对上述限制因素,研究人员对 1) 编码相关参数 (包括编码脉冲功率、编码长度、编码调制格式)、2) 编码系统设计 (分别针对 EDFA 瞬态效应和偏振牵引效应对系统硬件进行设计改进)、3) 后处理过程这三个方面提出了相应的优化方案,使得编码 BOTDA 系统的基础理论更加成熟和完善,为实现尽可能高性能的编码 BOTDA 传感提供了理论支撑。本节的前 3 小节将按照图 8 的优化框图所示,从以上三个方面对编码 BOTDA 系统的性能优化展开详细论述。

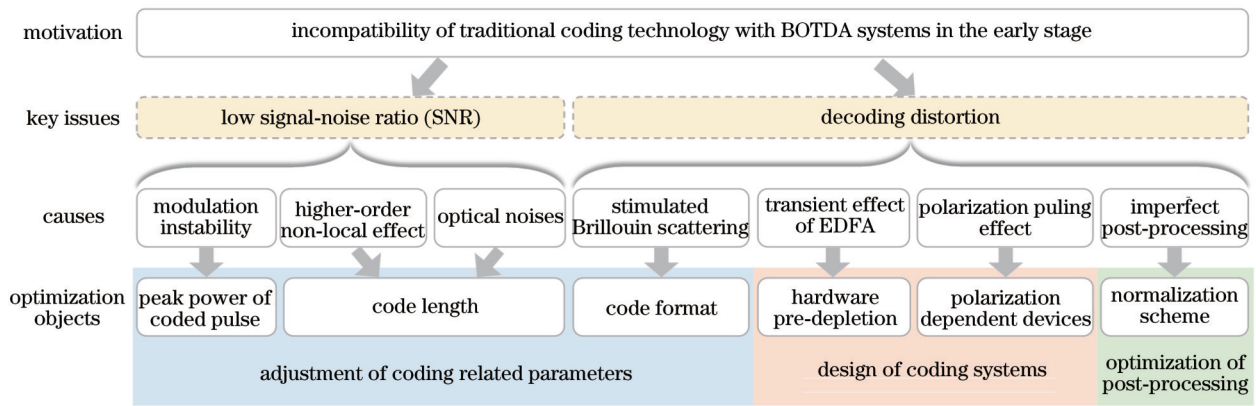


图 8 脉冲编码 BOTDA 系统优化框图

Fig. 8 Optimization block diagram of pulse-coded BOTDA system

除此之外,本节第 4 小节将阐述评估光脉冲编码性能的若干指标,并围绕性能评估指标对不同编码类型展开性能优劣的对比与总结。

3.1 编码相关参数优化

3.1.1 编码脉冲功率

基于本文第 2 节的编码基本原理阐述,所有编码技术与单脉冲 BOTDA 的 SNR 提升和码元个数的平方根正相关。而基于对 BOTDA SNR 研究文献的结论^[86],在给定空间分辨率的前提下,单脉冲 BOTDA 的 SNR 与脉冲峰值功率线性正相关。因此,对于未完全优化的低峰值功率单脉冲 BOTDA,提升脉冲峰值功率比基于低峰值功率的脉冲编码更高效。换言之,使用光脉冲编码技术的意义主要在于进一步提升最优单脉冲 BOTDA 的 SNR (已实现最大单脉冲布里渊增益)^[87]。对比“先优化脉冲峰值功率再优化编码长度”和“未优化脉冲峰值功率前提下优化编码长度”,前者的 SNR 更高,代表着编码技术相较于最优单脉冲 BOTDA 系统的理论极限。因此,虽然早期的基于光

脉冲编码技术的部分 BOTDA 系统在较长编码长度的条件下实现了理论编码增益 (如表 1 所示),但大多基于未优化的编码脉冲峰值功率,综合性能未达到编码技术相较于最优单脉冲 BOTDA 系统的理论极限。

3.1.2 编码长度

在光脉冲功率优化至非线性阈值的前提下,光脉冲编码 BOTDA 的最佳码长受到高阶非本地效应和光噪声的共同限制。对于循环码而言,光纤任何位置的编码增益都会因较大的光噪声而受到严重折损 (将在第 3.4.5 节说明),在任意码长下都无法实质性提升最优化的单脉冲 BOTDA 性能^[88],因此本节主要讨论高阶非本地效应和光噪声对非循环编码方案最佳码长的限制。

1) **高阶非本地效应**。与其他分布式光纤传感器不同,非本地效应是 BOTDA 系统中特有的一种导致测量系统误差的负面效应,造成探测光入纤功率受限。单脉冲 BOTDA 中的一阶非本地效应和高阶非本地效应可被双边带探测光结构克服^[89];然而,即便使用双边

表 1 早期的光脉冲编码 BOTDA 系统参数
Table 1 System parameters of early BOTDA system based on optical pulse coding

Reference	Coding scheme	Coding length / bit	Peak pulse power / dBm	Sensing distance / km	Coding gain / dB	
					Theoretical	Experimental
[37]	Simplex	511	15.0	50	10.5	~10.3
[38]	Golay	511	11.8	50	10.5	—
[39]	Simplex	127	15.0	10	7.5	~7.1
		511		50	10.5	~10.3
[40]	Simplex	511	15.5	120	10.5	~10.5
[62]	Simplex	511	16.0	60	10.5	~10.3

带探测光结构,2018年 Yang 等^[78]指出,编码 BOTDA 中长脉冲序列导致的高阶非本地效应对测量有不可忽略的影响。高阶非本地效应制衡入纤探测光功率和编码位数,而优先提升前者更有利于提升系统的 SNR。因此,首先保证入纤探测光功率达到上限(-6 dBm^[13-15])前提下,高阶非本地效应将最大可允许编码布里渊增益限制为 100%,使得最佳编码长度必须接近 $2/g_s^{\max}$ (g_s^{\max} 为单脉冲 BOTDA 系统的最大布里渊增益)。进而可推论出,可获得的最大编码增益为 $1/\sqrt{2g_s^{\max}}$ (最终由空间分辨率决定)^[87]。这意味着, $g_s^{\max} > 50\%$ (空间分辨率 ≥ 30 m) 时,可以认为单极性编码技术对于优化的单脉冲 BOTDA 没有任何 SNR 的提升。此外,对于编码位数不能灵活设计的单极性 Golay 码和 Simplex 码(编码长度分别为 2^N 和 $2^N - 1$, N 为整数),须优化 N 的值使编码长度接近最优值。值得一提的是,当使用颜色编码(时频编码)^[74-76]或双极性编码方案^[77-78]时,沿传感光纤的布里渊相互作用降低,减轻了高阶非本地效应的影响,从而可允许使用更长的编码长度^[87],然而该结论仍需要进一步的深入分析与验证。

2) 与布里渊增益相关的光噪声。除了高阶非本地效应的限制,光噪声也是限制编码长度的另一大因素。理想情况下,编码过程不影响噪声水平而仅增强泵浦光能量,在此前提下解码后可实现噪声压缩并恢复单脉冲响应。也就是说,编码技术提供的编码增益实际上是解码前后的噪声水平之比,如第 2 节所述,理论编码增益与编码位数的平方根成正比。但是,上述理论编码增益实现的条件是光脉冲编码方案和单脉冲方案的噪声水平相同,这一条件只有测量系统中探测器与布里渊增益无关的噪声(如热噪声、信号与放大自发辐射(ASE)的拍频噪声^[70])占主导的情况下才成立。2021年, Gao 等^[88]深入分析了光噪声对单脉冲以及编码 BOTDA 系统的影响,并建立了相应的噪声模型,明确指出由于脉冲编码后泵浦光能量的大幅增加,布里渊增益相关的光噪声如偏振噪声、自发布里渊散射(SpBS)与信号拍频噪声^[86,90]会显著增强,导致理论编码增益恶化^[88]。对于非循环单色单极性编码方案而言,光纤远端的 SNR 最弱,因此最值得关注的是光纤

远端的编码增益。编码长度越长,光纤远端的光噪声越大,为了从编码技术中充分受益,必须找到最优(最大可接受)的编码长度,以保证单脉冲和编码 BOTDA 方案之间的光纤远端的总噪声几乎保持不变(例如,二者噪声方差变化不超过 10%)。

以 2 m 空间分辨率、100 km 传感光纤长度的 GO 编码 BOTDA 系统为例,图 9(a)展示了在光纤远端的不同类型噪声的方差随能量增强因子 F_E 的变化曲线,可以看出,当 $F_E = 1$ (对应优化后的单脉冲布里渊增益为 2.5%) 时,信号-ASE 拍频噪声和光探测噪声(方差分别表示为 σ_{s-ASE}^2 和 σ_{PD}^2) 占主导地位,即对应的单脉冲 BOTDA 系统噪声方差为 $\sigma_{\text{single}}^2 = \sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{PD}^2$ 。随着 F_E 的增大,其他布里渊增益相关的光噪声,即 SpBS-信号拍频噪声和偏振噪声(方差表示为 σ_{s-SpBS}^2 和 σ_{pol}^2) 逐渐增大且不可忽略。图 9(b)为计算得到的编码 BOTDA (总噪声方差为 σ_{total}^2) 和单脉冲 BOTDA (总噪声方差为 σ_{single}^2) 方案中噪声方差的比值,可以发现, $F_E = 40$ 时可以保证两种噪声方差之间的最大差值为 10% (即单脉冲和编码 BOTDA 方案之间的噪声几乎保持不变),也就是说,上述实验场景下的最优编码长度对应的能量增强因子为 $F_E = 40$ 。

3.1.3 编码格式

在光脉冲编码技术应用于布里渊光时域传感器的早期阶段,研究人员借鉴了雷达领域所用的编码格式^[91],即使用 NRZ 编码脉冲调制格式实现了 1 m 及以上空间分辨率的编码系统^[33-35,37]。2010年, Liang 等指出,在使用较长 NRZ 编码序列时,编码中连续的码元“1”会形成宽脉冲,在 SBS 过程中引入非线性放大;而应用相关互补 Golay 编码方案时,解码过程中的相关操作对信号进行线性处理,该非线性放大引入误差并导致 BOTDA 的空间分辨率下降。为了克服这个问题, Liang 等^[38]建议使用归零(RZ)编码格式,每个码元都归零(即每个码元占空比小于 1),使解码过程中信号失真最小化。同年, Soto 等^[92]进一步对编码 BOTDA 中的脉冲调制格式进行了理论和实验分析。分析指出,给定脉冲产生的声波的弛豫效应通常会影响编码序列中其他脉冲产生的声场激发,因此传统的 NRZ 调制格式的脉冲编码在测量的 BGS 中会引起明

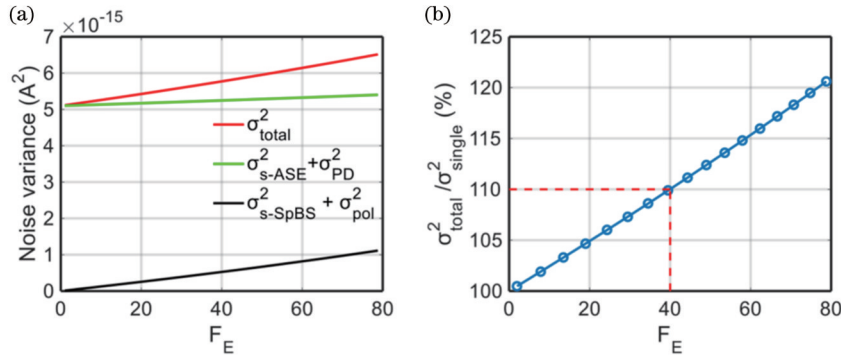


图 9 噪声特性随 F_E 的变化^[70]。(a) 光纤远端不同类型噪声方差随 F_E 的变化; (b) 编码和单脉冲 BOTDA 方案中噪声方差的比值随 F_E 的变化

Fig. 9 Noise behavior varying with F_E ^[70]. (a) $\sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{PD}^2$, $\sigma_{s-SpBS}^2 + \sigma_{pol}^2$, and their summation at fiber far end as a function of F_E ; (b) ratio between σ_{total}^2 and σ_{single}^2 as a function of F_E

显的畸变,特别是在光纤增益谱突变的区域附近^[92]。

图 10(a)展示了按照 3 位编码序列 {1, 0, 1} 调制的 NRZ 格式脉冲,每个脉冲的宽度为 10 ns。可以观察到,对于第 1 个脉冲(“1”),声波振幅从 0 电平上升到中间电平(声子未完全激发)。在第 2 个脉冲(“0”)持续期间,声波的激发停止,其振幅呈指数衰减。然而,

10 ns 的时间间隔不足以使声子完全湮灭,与第 1 个脉冲(“1”)相比,第 3 个脉冲(“1”)的声场从更高的水平开始激发上升。因此,由第 3 个脉冲引起的布里渊增益比由第 1 个脉冲引起的布里渊增益大。对于长的编码脉冲序列,声波的上述特性更明显地破坏了编码的线性度^[92]。

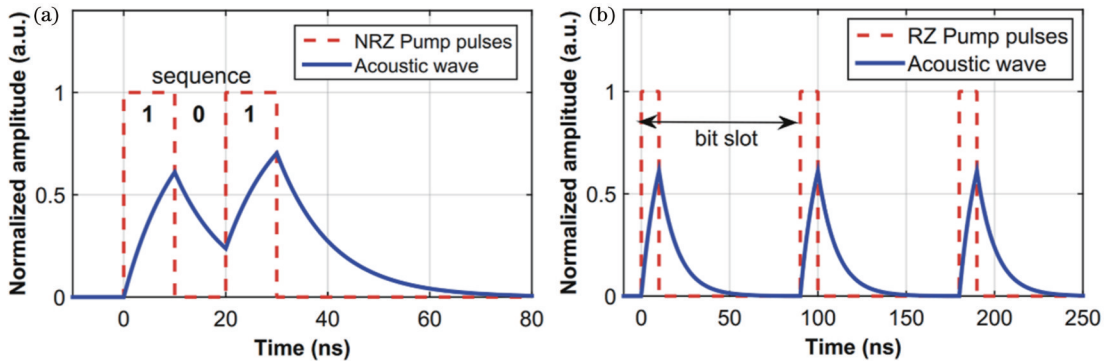


图 10 光脉冲编码序列^[82]。(a) NRZ 格式; (b) RZ 格式

Fig. 10 Pulse coding sequence^[82]. (a) NRZ format; (b) RZ format

为了解决这个问题,码元之间的时间间隔必须大于声子响应时间(12 ns)的 3~4 倍。图 10(b)展示了当码元之间的时间间隔为 90 ns 的编码序列 {1, 1, 1}, 这个时间间隔 (>50 ns) 可以确保在下一个脉冲引起新的声子激发之前,当前声子有足够的时间完全湮灭。因此,合理占空比的 RZ 编码格式对于保持 BOTDA 系统中编码的线性度至关重要^[92]。

3.2 系统设计优化

3.2.1 编码脉冲序列功率衰减趋势

编码泵浦序列的最大功率通常受到电光调制器最大输出功率的限制而远远低于 MI 决定的最佳功率 (~ 100 mW)^[11-12],为了在完全优化的条件下对光脉冲编码技术进行研究和验证,通常采用 EDFA 来提高编码光脉冲序列的峰值功率。然而在光脉冲编码技术实现的早期阶段^[37, 39-40, 92],这是保持编码线性度的最具挑战性的问题之一。因为 EDFA 的瞬态效应,即其缓慢

的增益恢复(重建粒子数反转)通常会导致编码序列内的脉冲放大不平坦,整体呈现明显的衰减趋势^[39],如图 11 所示,编码线性度被严重破坏。式(14)表明,基于解卷积的编码方案采用畸变后的真实脉冲序列产生解码信号 $D_f(k)$,来求解单脉冲响应,因此可以克服由 EDFA 瞬态效应导致的编码光脉冲序列功率衰减的问题。而 Golay 码、Simplex 码和 Cyclic 码要求编码脉冲序列中每个脉冲功率一致,即 $f(n) = 1$,所以 EDFA 瞬态效应会导致严重的解码畸变。

为了降低 EDFA 瞬态效应对编码脉冲功率的影响,2010 年, Soto 等^[39]考虑在 EDFA 之后产生编码光脉冲序列,然而,由于脉冲发生器具有最大输入功率的限制和不可忽略的插入损耗,这种方法会一定程度上降低编码光脉冲的峰值功率,从而导致 SNR 降低; 2016 年,研究人员提出通过减小占空比的方式来减小

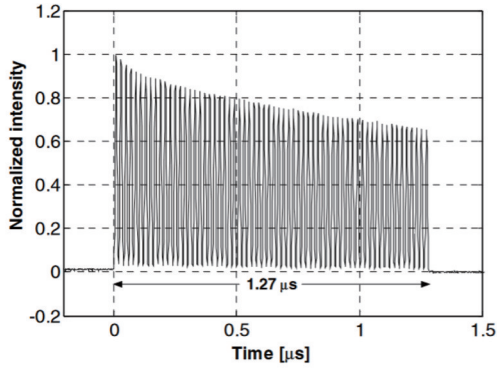


图 11 EDFA 放大后的 127 位脉冲编码序列的整体衰减趋势示意图^[39]

Fig. 11 Overall power attenuation trend of 127-bit pulse code sequence after EDFA amplification^[39]

EDFA 瞬态效应的影响^[54,93],但由于整个编码脉冲持续时间较长,无法彻底消除 EDFA 后编码脉冲的畸

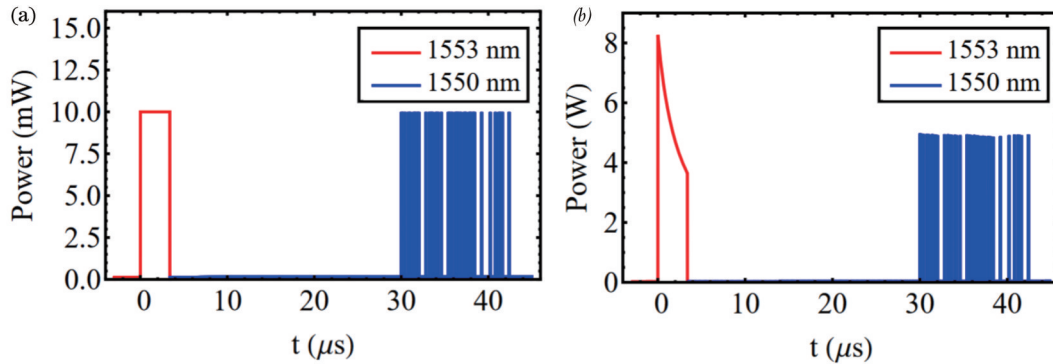


图 12 不同波长的光脉冲的功率表现^[41]。(a) 输入 EDFA 前;(b) 输入 EDFA 后

Fig. 12 Power performance of optical pulses of different wavelengths^[41]. (a) Before amplified by EDFA; (b) after amplified by EDFA

当使用基于解卷积的编码类型(如 GO 码^[70])时,无需优化上述 EDFA 导致的编码脉冲序列功率衰减趋势。此外,编码脉冲序列功率衰减趋势对于颜色编码或双极性编码的影响仍需要进一步的分析与验证。

3.2.2 偏振牵引

在存在双折射的情况下,BOTDA 系统中沿光纤的布里渊信号增益(或损耗)取决于光纤的双折射特性,以及泵谱光与信号的输入偏振态(SOP)^[96-97]。无外部干预的情况下,布里渊信号会沿光纤呈现出幅度的剧烈抖动^[97](此现象称作偏振衰落^[96]),从而降低传感器的 SNR,通常可以使用扰偏仪或偏振开关来抑制偏振衰落。然而,泵浦光与探测光之间的相互作用会导致偏振牵引现象^[98]。在单脉冲 BOTDA 系统中,由于光纤中允许的最大探测功率被限制在 -6 dBm 左右以避免 BGS 失真^[13-14],且布里渊增益较小,探测光 SOP 仅有轻微改变,偏振牵引的影响通常可忽略^[87]。然而在编码 BOTDA 系统中,编码脉冲序列的累积的大布里渊增益使探测光的 SOP 发生极大的改变,偏振牵引的影响变得尤为显著。在光纤的前端编码脉冲功

变,且这种方法增加了测量时间。此外,有文献提出了复杂的解决方案来实现编码脉冲序列的平坦放大^[94,41,68,95],从而优化编码脉冲的功率,这有利于将编码 BOTDA 方案与完全优化的标准单脉冲 BOTDA 系统进行性能比较,并对其局限性和实际优势进行全面评估。例如,在编码脉冲序列前面发射一个不同波长的额外长脉冲(来自另一个光源),预先消耗 EDFA 载流子使其饱和,通过适当调整该额外光脉冲的峰值功率、消光比、宽度以及与编码脉冲序列之间的时间间隔,可以大大提高编码脉冲序列的平坦度^[41]。光纤中可以同时存在编码脉冲序列和额外的光脉冲,由于波长不同,这个额外的光脉冲产生的布里渊散射可由 EDFA 后的光纤布拉格光栅滤除,因此测量时间与常规 BOTDA 测量时间相同。图 12 展示了两种波长的光脉冲在 EDFA 之前和之后的功率表现,可以发现 EDFA 之后的编码脉冲序列基本没有畸变。

率最高,偏振牵引现象最明显,这意味着当使用偏振开关时,两个连续入射光纤的、正交 SOP 的探测光上产生的布里渊增益之和无法完全补偿偏振衰落。

缓解这种不利影响的一个解决方案是使每个编码脉冲的 SOP 完全不相关,例如在泵浦脉冲分支上使用偏振扰偏仪(PSc)可以极大地缓解编码脉冲序列产生的偏振牵引现象^[87]。2019 年,Zhou 等^[55]提出利用基于 PSw 的偏振分复用(PDM)脉冲编码消除 Golay 编码 BOTDA 的偏振牵引效应。2019 年,Zhou 等^[57]提出一种基于混合偏振牵引效应(HPPP)的布里渊增益波动消除方案,与基于 PSw 的 PDM 方案相比,HPPP 是一种消除增益波动的被动方法,其实现更容易、更灵活,且具有通用性,可以适用于各种单色单极性编码方案。

3.3 后处理优化

BOTDA 传感系统接收端($z=0$)探测到的时域信号 $P_s^0(z)$ 由探测光携带的布里渊增益信号 $G(z)$ 以及没有经历放大作用的直流量 $P_s^{0,DC}$ 组成,如图 13 左边和中间所示,因此线性解码之前需要使用归一化计算来提取线性累积的编码布里渊增益信号 $G(z)$ 。

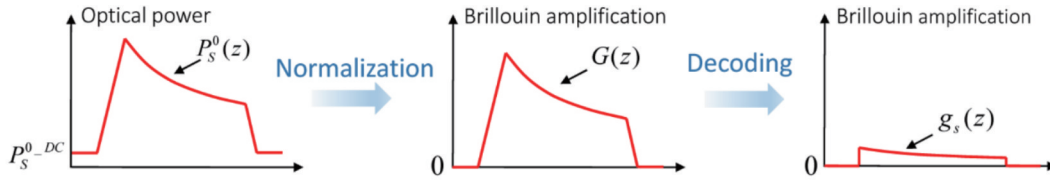


图 13 光脉冲编码 BOTDA 信号处理过程^[87]

Fig. 13 Schematic illustration of signal processing in pulse-coded BOTDA^[87]

在 BOTDA 系统中,对于给定的脉冲-探测光频率差 ν ,且假设脉冲与探测光偏振态一致,在接收端探测到的光功率^[10]为

$$P_s^0(z, \nu) = P_{is} e^{-\alpha L} e^{G(z, \nu)} = P_s^{0,DC} e^{G(z, \nu)}, \quad (17)$$

式中: P_{is} 表示探测光的输入功率; α 和 L 分别表示光纤的衰减系数和光纤长度; $P_{is} \exp(-\alpha L)$ 即为接收端探测到的直流量 $P_s^{0,DC}$; $G(z, \nu)$ 表示脉冲的布里渊增益。 $G(z, \nu) \ll 1$ 时,通常使用传统的线性归一化来提取布里渊增益^[10],可以表示为

$$G(z, \nu) \approx \frac{P_s^0(z, \nu) - P_s^{0,DC}}{P_s^{0,DC}} = \exp[G(z, \nu)] - 1. \quad (18)$$

上述小增益条件 [$G(z, \nu) \ll 1$] 通常可以在米量级空间分辨率的单脉冲 BOTDA 系统和一些峰值脉冲功率较低或编码位数较少的单极性编码 BOTDA 系统(系统性能没有得到完全优化)中实现^[37,39-40,92]。在峰值功率优化至最佳且使用较长编码序列的情况下,光纤输入端和泵浦-探测频率差等于 BFS 处的 $G(z, \nu)$ 甚至会大于 100%, 此时违背了上述提到的小增益条件, 式(17)中指数项的非线性贡献变得不可忽略, 这将导致传统线性归一化过程中提取的 $G(z, \nu)$ 出现误差, 解码后的本征布里渊增益分布失真。针对这一问题, 2018 年, Yang 等^[87] 指出, BOTDA 系统探测信号上的总布里渊增益实际上为指数形式, 因此更适合使用对数归一化来提取线性布里渊放大 $G(z, \nu)$, 可表示为

$$G(z, \nu) = \ln \left[\frac{P_s^0(z, \nu)}{P_s^{0,DC}} \right]. \quad (19)$$

式(19)所示的对数归一化对任何水平的布里渊增益(包括小增益和大增益)都是完全通用的。归一化处理提取编码脉冲增益信号之后,再使用对应的解码方式进行解码即可恢复单脉冲增益信号,过程如图 13 右边所示。

3.4 不同编码的性能优劣对比

文献[70]指出,衡量光脉冲编码性能的标准主要有以下 7 个方面: 1) 码字转换时间; 2) 数据存储量; 3) 解码复杂度; 4) 受直流功率漂移的影响程度; 5) 受编码脉冲功率不一致的影响程度; 6) 受布里渊增益相关光噪声的影响程度; 7) 编码长度的灵活度。为了更加清晰地展示不同编码类型的优势与劣势,以期在不同应用场景下选择最优编码类型,本节将从以上 7 个方面对不同编码类型的优劣进行对比。由于颜色编码和双

极性编码的相关分析还不完善,本节主要对目前主流的单色单极性编码性能进行分析与比较,并将不同光脉冲编码技术的特点与区别总结于第 3.4.7 节的表 2 中。

3.4.1 码字转换时间及数据存储量

1) 单色单极性 Golay 编码方案需要测量 4 组编码响应,传感系统中生成编码序列的硬件(如可编程脉冲发生器)需要进行 3 次码字转换操作,带来了额外的资源消耗,不可避免地耗费了额外的时间。存储数据占用的内存是单脉冲方案的 4 倍,即数据存储量为 $4N_c$ (N_c 为单组光纤编码时域响应的采样点数)。

2) 单色单极性 Simplex 编码方案需要测量 N_u 组编码响应,传感系统中生成编码序列的硬件(如可编程脉冲发生器)将进行 $N_u - 1$ 次码字转换操作,因此引入了比单色单极性 Golay 编码更大的资源消耗,存储 N_u 组数据占用了大量的内存(数据存储量为 $N_u N_c$)。

3) 单色单极性 Cyclic 编码方案在实际操作中只需要测量一组编码响应即可实现解码恢复单脉冲响应,不需要进行码字转换操作,操作简单且解码快速,可以实现实时传感。存储数据占用的内存与单脉冲方案几乎相同(N_c)。

4) 基于解卷积的编码方案与单色单极性 Cyclic 编码方案相同,只需向光纤注入一组编码脉冲序列,操作简单且解码快速,可以实现实时传感,数据存储量为 N_c 。在常规单脉冲传感系统基础上,无须添加任何额外的硬件,只须改动有关编码脉冲电信号和解码处理的软件设置即可实现。

3.4.2 解码复杂度

单色单极性编码方案中, Golay 编码方案的解码计算复杂度为 $O(4N_c \log_2 N_c)$; Simplex 编码方案的解码计算复杂度为 $O(N_u^2 N_c)$, 随码长 N_u 增加, 解码复杂度成 N_u^2 倍增长, 计算时间大为增加; Cyclic 编码方案常规解码的计算复杂度为 $O(N_u N_c)$, 仅为 Simplex 解码计算复杂度的 $1/N_u$, 而利用 FFT 的解码计算复杂度仅为 $O(2N_c \log_2 N_u)$, 远低于 Golay 码和 Simplex 码; 基于解卷积的编码方案(GO 编码)的计算复杂度为 $O(2N_c \log_2 N_c)$ 。可以看出,解码耗时的排序为: Cyclic 编码方案 < GO 编码方案 < Golay 编码方案 < Simplex 编码方案。只要解码耗时小于总测量时间,则其影响可忽略不计。

3.4.3 直流功率漂移的影响

由于单色单极性 Cyclic 编码方案的循环特性,使得 Cyclic 码的光纤时域响应是直流信号和脉冲响应信号的混叠,并没有单独的直流信号,而解码之前必须利用直流量进行归一化提取脉冲响应信号。尽管可以提前标定系统直流量,但是在测量过程中一旦直流功率发生漂移(光源不稳定),就会造成归一化结果错误,进而导致解码畸变。而单色单极性 Golay 编码、Simplex 编码、基于解卷积的编码方案的非循环结构则可以避免这个问题。

3.4.4 编码脉冲功率不一致的影响

基于解卷积的编码方案(GO 编码)可以在常规单脉冲传感系统中实现,不需要对硬件配置进行任何改动。单色单极性 Golay 编码和 Simplex 编码方案不得

不如第 3.3.1 节所述,额外添加辅助器件(系统成本增加)用以缓解 EDFA 增益饱和引起的编码脉冲功率衰减,以期克服解码畸变。

然而,即使采用 3.3.1 节所述的解决方案大大提高了编码脉冲序列的平坦度,但是放大的编码脉冲功率仍然会表现出轻微的不均匀性。对于单色单极性编码(Golay 码、Simplex 码、解卷积码)而言,这种功率不均匀性是由于码元“1”和“0”在不同的编码序列上的特定分布造成的。每个脉冲的功率实际取决于编码脉冲之间的时间间隔。两个连续的码元“1”的间隔越长,EDFA 中重建粒子数反转的时间就越长,因此后一个码元脉冲的放大也就越大^[87]。图 14 展示了采用额外光脉冲使 EDFA 饱和后,512 位 Golay 编码序列在输入 EDFA 之前和输出 EDFA 之后的功率表现。

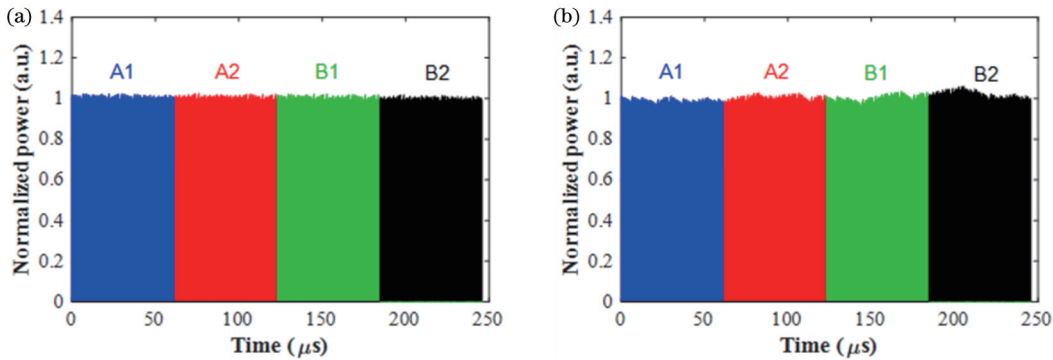


图 14 512 位 Golay 编码脉冲序列的归一化功率^[87]。(a) 输入 EDFA 前;(b) 输出 EDFA 后

Fig. 14 Normalized power of 512-bit Golay coded optical pulse sequence^[87]. (a) At EDFA input; (b) at EDFA output

这种轻微的功率不均匀性可能会破坏编码的线性,从而造成解码畸变,畸变程度高度依赖于编码的特性,因此不同编码方案的表现不同。

1) Golay 编码的解码过程依赖于互补码序列的自相关特性,只有当 $A(n)$ 和 $B(n)$ 序列严格满足自相关函数之和具有零自相关特性,才能正确解码,这要求编码序列中每个脉冲功率保持一致。因此 Golay 编码对光脉冲编码序列峰值功率的平坦度有严格的要求,原始 Golay 码幅值的任何扰动都可能造成解码失真。失真程度主要与码长有关,与脉冲峰值功率没有明显的关系。在 Golay 编码中克服这种不利影响的关键是使每个码元都是非零的,也就是说,双极性 Golay 编码可以避免 EDFA 瞬态效应造成的编码脉冲功率轻微波动,从而避免解码性能的恶化。

2) Simplex 编码的情况有所不同,根据 Simplex 的解码原理,其不依赖于编码序列的相关特性,译码过程是基于矩阵求逆和线性平均,即完全是线性的。只有注入光纤的编码脉冲严格满足 $SS^{-1} = I$ 时才能准确解码,因此理论上 EDFA 瞬态效应破坏编码脉冲功率的线性度也会造成解码畸变。但由于 Simplex 解码后的布里渊增益是所有脉冲产生的布里渊增益的平均值,因此,脉冲功率不均匀性的影响得到了高度平均,从而

被大大缓解。

3) Cyclic 编码和 Simplex 码相同,要求编码序列中每个脉冲功率一致,解码无畸变的前提是注入光纤的编码脉冲功率严格满足 $SS^{-1} = I$,所以 Cyclic 码也无法克服编码脉冲之间功率不平坦导致的解码畸变。但是,由于 Cyclic 编码序列中每个脉冲之间的间隔($=L/N_s$, L 为传感光纤长度)很长,EDFA 有足够的时间恢复亚稳态的铒离子,从而可以几乎同等程度地放大每个脉冲,使得使用该技术时不存在解码畸变问题。

4) 由于解码过程使用的是真实的原始码字,GO 编码可以完全克服 EDFA 增益饱和导致的编码光脉冲序列功率衰减以及轻微的功率波动的影响,不需要额外增加辅助器件即可成功解码得到单脉冲响应,对编码脉冲功率不一致的容忍度极高。

3.4.5 布里渊增益相关光噪声的影响

第 3.1.3 节提到的若干种光噪声的特性及其影响因编码类型和光纤位置而异^[88],如图 15 所示。

1) 对于非循环单色单极性编码(Golay 码、Simplex 码、解卷积码等),光纤近端布里渊增益较大,光噪声占主导地位,理论编码增益在很大程度上受到折损;而在光纤远端,布里渊增益由于光纤的衰减而减小,因此光噪声对理论编码增益的折损随光纤长度的增加而部分

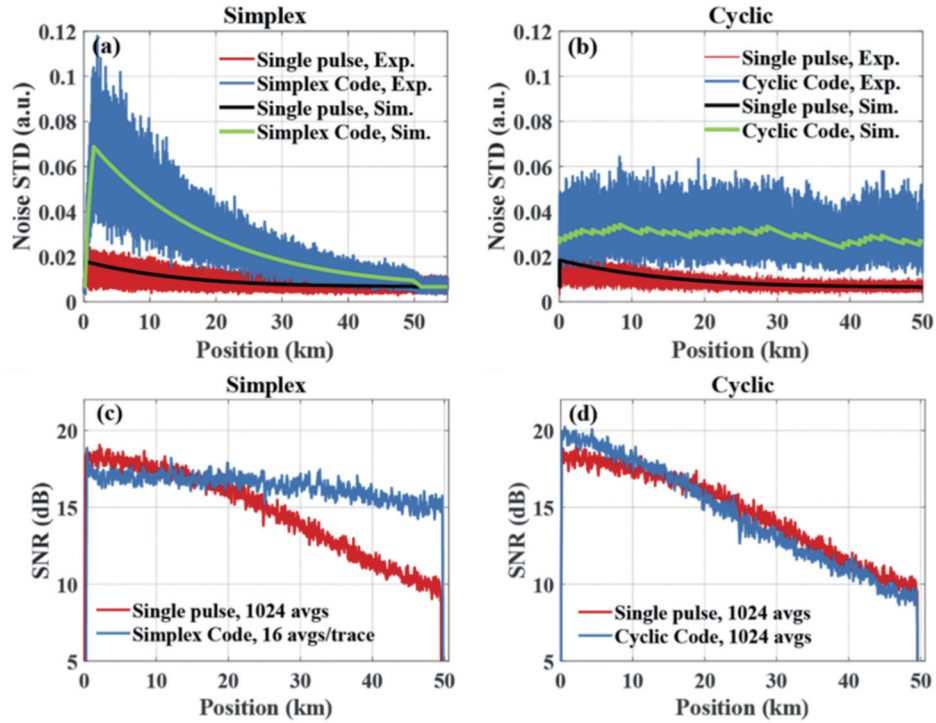


图 15 优化的单脉冲 BOTDA 和编码 BOTDA 的对比^[88]。20 组连续测量且不平均的时域曲线的噪声 STD: (a) 63 位 Simplex 编码系统; (b) 67 位 Cyclic 编码系统; 布里渊谐振频率处的 SNR: (c) 63 位 Simplex 编码系统; (d) 67 位 Cyclic 编码系统
Fig. 15 Comparison between optimized single-pulse BOTDA and coded BOTDA^[88]. Noise STD of time domain curve obtained by 20 consecutive measurements without averaging for (a) 63 bits Simplex coded system and (b) 67 bits Cyclic coded system. SNR profiles at Brillouin resonance peak for (c) 63 bits Simplex coded system and (d) 67 bits Cyclic coded system

或完全消失。这种特性使得非循环单色单极性编码有效地提高了远距离 BOTDA 系统的性能,特别是在长光纤的尾端,因为此时通常是热噪声或信号-ASE 拍频噪声占主导地位,可以基本实现理论编码增益。

2) 对于单色单极性循环编码(单极性 Cyclic 码),布里渊增益信号沿着整个光纤几乎相同,这使得光噪声沿着整个光纤都保持着较强的水平,导致光纤任何位置的编码增益都会受到折损,甚至会完全抵消编码增益,这使得 Cyclic 码完全失去了应用意义。需要说明的是,对于非优化的泵浦脉冲功率,周期性单色单极性编码可提供编码增益^[48],但在实际系统中并不能实现真正意义上传感性能的提升。

基于文献^[88]所建立的噪声模型,还可以对其他编码类型进行预测:在颜色编码的 BOTDA 系统中^[74],偏振噪声会小得多,因为此时累积的布里渊增益是不同频率下的编码脉冲的贡献,平均布里渊增益会比单一频率且相同编码类型下的增益小;在双极编码的 BOTDA 系统中^[77-78],偏振噪声非常小,因为码元“+1”和“-1”会导致其等效编码增益类似于单个脉冲的增益,因此会产生比单极性编码更高的 SNR 提升。

3.4.6 编码长度的灵活度

光脉冲编码技术中的码长除了受限 3.1.3 节所述的高阶非本地效应和光噪声之外,还因编码类型而有所区别。Golay 编码、Simplex 编码和 Cyclic 编码的

码长分别为固定值 2^N 、 $2^N - 1$ 和 $4N - 1$ (N 为整数),无法指定任意的能量提升倍数 F_E 。基于解卷积的编码方案(GO 编码)的码长可以任意指定,能够提供任意大小的码字能量提升倍数 F_E ,从而保证给定测量条件下最高的编码效率。

3.4.7 不同编码方案性能总结

4 种主流的单色单极性编码方案的性能对比与总结结果见表 2。

4 光脉冲编码 BOTDA 系统性能统计

基于光脉冲编码技术的 BOTDA 系统历经几十年的发展,已经成为了一项分布式检测温度应变的成熟技术^[99]。衡量 BOTDA 系统性能的四大指标分别是空间分辨率、传感距离、测量时间和频率精度,这四个指标彼此之间存在复杂的制衡关系。为了能够综合评估 BOTDA 系统性能,Soto 等^[10]提出了品质因数(FoM)的概念,FoM 的计算方法为

$$F_{\text{oM}} = \frac{(\alpha L_{\text{eff}})^2 e^{(2+f)\alpha L} \delta \Delta \nu_{\text{B}}^{\text{pulse}}}{\Delta z \sqrt{N_{\text{Tr}} N_{\text{avg}}} \sigma_{\nu}}, \quad (20)$$

式中: α 为光纤衰减系数; L 为传感光纤长度; $L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$ 为传感光纤有效非线性长度; Δz 是系统空间分辨率; N_{avg} 表示测量单个时域响应曲线的平均次数; $\Delta \nu_{\text{B}}^{\text{pulse}}$ 代表 BGS 的半峰全宽(FWHM); δ

表 2 单色单极性编码方案性能对比

Table 2 Performance comparison of unicolor unipolar coding schemes

Coding scheme	Cyclic	Golay	Simplex	Deconvolution
† Codeword switching time	0	$3t_{cs}$	$(N_u - 1)t_{cs}$	0
Data storage	N_c	$4N_c$	$N_u N_c$	N_c
Decoding complexity	$O(2N_c \log_2 N_u)$	$O(4N_c \log_2 N_c)$	$O(N_u^2 N_c)$	$O(2N_c \log_2 N_c)$
Robustness to baseline fluctuations	×	✓	✓	✓
Tolerance to signal-dependent noises	×	✓	✓	✓
Tolerance to non-uniform code envelop	×	×	×	✓
Arbitrary F_E required by a given system	×	×	×	✓

† t_{cs} is time taken by hardware to switch a code sequence to another when using a code type containing multiple coding sequences, which is determined by response time of programmable pulse generator, electro-optic modulator, and other devices.

代表测量 BGS 时的频率间隔 (扫频间隔); σ_v 为测量得到的频率精度。在差分脉冲对或者编码方案里, 需要测量多个曲线并进行差分或解码运算才能得到最终的时域响应; N_{Tr} 表示得到脉冲响应曲线需要测量的曲线数量, 例如, 对于常规单脉冲 BOTDA 系统 $N_{Tr} = 1$, 差分脉冲对方案 $N_{Tr} = 2$, 格雷编码方案 $N_{Tr} = 4$, Simplex 编码方案中 N_{Tr} 等于码字长度; f_1 是不同光纤铺设方案系数, 在常规方案中, 光纤总长度等于传感光纤长度, $f_1 = 0$; 在环路结构方案中, 光纤被分为等长的两部分, 一半光纤用于将探测光传输到远端, 另一半光纤用于传感, $f_1 = 1$ 。FoM 综合考虑了影响四个性能指标的所有因素, FoM 值越大, 说明 BOTDA 系统的综合性能越高。

研究人员对光脉冲编码 BOTDA 系统进行分析和优化 (如第 3 节所述), 并提出将光脉冲编码技术与差分脉冲对 (DPP) 技术^[100-102]、光学预放大技术^[86]、声波预泵浦 (PPP) 技术^[103]、分布式光放大技术^[16-19]、数字信号处理技术^[15, 20-25]等先进技术相结合, 以实现更高性能的 BOTDA 系统, 不断提高编码 BOTDA 的综合性能。研究人员已经报道了一系列基于光脉冲编码技术的 BOTDA 系统, 本节将按照时间顺序对光脉冲编码 BOTDA 系统的性能发展关键历程进行梳理和统计。

2009 年, Linze 等^[35]首次将 7 位 Simplex 编码应用于 DPP-BOTDA 系统, 在 185 m 的传感光纤上实现了 0.6 m 的空间分辨率, 并成功验证了 3.8 dB 的编码增益。2010 年, Soto 等^[37, 39]利用 511 位 Simplex 编码首次将 BOTDA 系统的传感距离延长至 50 km, 空间分辨率为 1 m, 频率精度为 2.2 MHz。2011 年, Soto 等^[40]将 511 位 Simplex 编码与光学预放大相结合, 并应用优化的 RZ 编码格式, 首次展示了一个传感距离为 120 km、空间分辨率为 3 m 的 BOTDA 系统, 光纤远端的温度和应变精度分别为 3.1 °C 和 60 $\mu\epsilon$ 。同年, Jia 等^[43]将 Simplex 编码技术与一阶拉曼放大相结合, 实现了传感距离为 75 km、空间分辨率为 2.5 m、频率精度为

1 MHz 的性能指标。2012 年, Soto 等^[62]将光脉冲编码技术与光学预放大结合的思想应用于 DPP-BOTDA 系统, 在 60 km 的传感光纤上实现了亚米量级的空间分辨率 (0.25 m), 光纤远端的温度和应变精度分别为 1.2 °C 和 24 $\mu\epsilon$ 。同年, Soto 等进一步优化了一阶拉曼放大技术的相关参数, 将 Simplex 编码技术与双向低 RIN 噪声的一阶拉曼放大相结合, 首次实现了传感距离为 120 km、空间分辨率为 1 m、频率精度为 1.3 MHz 的高性能 BOTDA 系统。2013 年, Le Floch 等^[73]通过在频域对编码序列进行“着色”, 首次在 100 km 环路距离 (50 km 传感距离) 的 BOTDA 系统上对颜色 Simplex 编码进行了实验验证。同年, Soto 等^[77]基于布里渊增益谱和布里渊损耗谱成功将双极性脉冲编码应用于 BOTDA 系统, 证明了双极性编码技术可以提供更高的编码增益。同年, Taki 等^[48]基于 Simplex 编码原理, 首次提出循环脉冲编码方案 (Cyclic 编码) 并在混合拉曼/BOTDA 系统中进行了实验验证, 该方案只须向光纤打入一次编码序列, 可以实现实时解码, 极大地改善了编码 BOTDA 系统的测量时间。2014 年, Soto 等^[46]将 127 位 Simplex 编码融入基于二阶拉曼放大的 BOTDA 系统, 可达到环路距离为 240 km (传感距离为 120 km)、空间分辨率为 5 m、频率精度为 1.9 MHz 的性能指标。2015 年, Le Floch 等^[74]将双泵浦与颜色编码相结合, 在 200 km 的光纤环路上实现了传感距离为 100 km、空间分辨率为 3 m、测量精度为 2.5 MHz 的性能。2016 年, Yang 等^[78]从理论上和实验上研究了 BOTDA 系统中双极性脉冲编码对泵浦耗尽问题的鲁棒性, 提出了一种基于三频探测光的技术, 利用 512 位双极性 Golay 编码在 200 km 的光纤环路上实现了传感距离为 100 km、空间分辨率为 2 m、频率精度为 0.9 MHz 的高性能传感。同年, Sun 等^[64]将 Simplex 编码技术与预泵浦技术相结合, 与广泛使用的差分脉宽对技术相比, 该技术在测量时间缩短一半的情况下, 可以实现与差分脉宽对技术相当的性能, 在大于 50

km 的传感光纤上实现了 1 m 空间分辨率、0.4 MHz 频率精度的 BOTDA 系统。此外, Sun 等^[54]进一步对 Golay 编码技术与预泵浦技术的结合进行了实验验证。同年, Qian 等^[47]将非局部均值(NLM)滤波技术与分布式放大和脉冲编码技术进行结合, 提出基于主成分分析的 BOTDA 噪声分析技术, 提升了 NLM 方法的适应性和降噪性能, 实现了 157.68 km 无中继 BOTDA。同年, 罗源等^[101]针对直接结合 Golay 编码与 DPP 技术的 BOTDA 系统所存在的 SNR 降低和采样时间变长的问题, 提出了一种新型的结合上述两种技术的混合编码方法, 在 25 km 的光纤末端实现了 1.6 m 的空间分辨率, 与直接结合相比, 在相同的采样次数下系统的 SNR 提升了 4.08 dB。2017 年, Iribas 等^[68]提出一种单色 Cyclic 编码与多频探测光相结合的 BOTDA 系统, 实现了 164 km 环路距离(82 km 传感距离)、1 m 空间分辨率、3 MHz 频率精度的性能, 这是当时使用单色 Cyclic 编码的 BOTDA 系统实现的最长传

感距离。2019 年, Lu 等^[49]将 512 位 Golay 编码与分布式拉曼放大技术相结合, 实现了大动态范围、高 SNR 的矢量 BOTDA 系统。同年, Fu 等^[50]将混合拉曼放大技术与 Simplex 编码技术进行结合, 实现了传感距离为 175 km、空间分辨率为 8 m、频率精度为 2 MHz 的超远程 BOTDA 传感性能。2023 年, 刘钦等^[102]提出一种基于布里渊增益-损耗效应的编码 DPP-BOTDA 系统, 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, 实现了 50 cm 的空间分辨率, 与传统的单脉冲 DPP-BOTDA 系统相比, SNR 提高了 3 dB。

以式(20)为依据, 表 3 列举了从光脉冲编码技术应用到 BOTDA 系统初期至今的二十余年中, 有代表性成果的各项指标以及对应的 FoM。其中, 基于三频探测光的双极性互补格雷编码因其高编码增益、低光学噪声和高鲁棒性, 获得了编码技术横向对比中最高

表 3 编码 BOTDA 系统综合性能汇总

Table 3 Summary of comprehensive performance of coded BOTDA systems

Reference	Year	Nation	Code type	Sensing distance /km	Spatial resolution /m	Frequency accuracy /MHz	FoM
[37]	2010	Switzerland	Simplex code	50	1.00	5.0	14.0
[38]	2010	Canada	Golay code	50	0.50	0.7	45.0
#[39]	2010	Switzerland	Simplex code	50	1.00	2.2	—
[40]	2011	Italy	Simplex code	120	3.00	3.1	1800.0
#[43]	2011	China	Simplex code	75	2.50	1.0	—
[62]	2012	Italy	Simplex code	60	0.25	1.2	39.0
[44]	2012	Italy	Simplex code	120	1.00	1.3	12000.0
*[73]	2013	Switzerland	Color code	50	2.00	1.0	99.0
[77]	2013	Switzerland	Bipolar code	100	2.00	0.8	1100.0
[63]	2013	Italy	Simplex code	93	0.50	1.7	350.0
*[46]	2014	Switzerland	Simplex code	100	3.00	1.5	48000.0
				120	5.00	1.9	300000.0
*[74]	2015	Switzerland	Color code	100	3.00	2.5	1600.0
*[78]	2016	Switzerland	Bipolar code	100	2.00	0.9	380000.0
#[64]	2016	China	Simplex code	51	1.00	0.4	—
[47]	2016	China	Simplex code	157	8.00	0.7	26000.0
[101]	2016	China	Golay code	25	1.60	—	—
*[68]	2017	Switzerland	Cyclic code	82	1.00	3.0	7100.0
#[49]	2019	America	Golay code	100	2.00	—	—
[50]	2019	China	Simplex code	175	8.00	2.0	200000.0
[102]	2023	China	Simplex code	1	0.50	0.5	—

Notes: *Experimental configuration in literature is a loop structure. #Parameters in literatures are incomplete, and FoM values cannot be calculated. Refs. [40, 62] represent BOTDA system combining optical pulse coding technology and optical pre-amplification technology. Refs. [43-44, 46, 49-50] represent BOTDA system combining optical pulse coding technology with distributed optical amplification technology. Ref. [64] represents BOTDA system combining optical pulse coding technology with pulse pre-pump technology. Ref. [47] represents BOTDA system combining optical pulse coding technology and digital signal processing technology.

5 总结与展望

基于光脉冲编码技术的 BOTDA 系统经过几十年的研究,被充分证明在较长的传感距离(>25 km)、保持较高的空间分辨率(<5 m)、不影响或者部分牺牲测量时间的情况下,经系统参数优化和使用恰当的后处理算法,能够有效提升最优化单脉冲 BOTDA 系统的频率精度。因此,光脉冲编码技术被认为是一种低成本、高效率的大幅提升 BOTDA 系统综合性能的方法之一。目前应用于分布式光纤传感器的主流编码方案有单色单极性编码、颜色编码和双极性编码等,在一定的近似条件下,这些编码方案的理论编码增益均可以看作与码长的平方根成正比。业界对于单色单极性编码方案的分析已经相对成熟,经过优化,单色单极性编码 BOTDA 系统性能已经可以达到理论极限。综合考虑软硬件成本(测量时间、数据存储量、解码复杂度等)、对直流功率漂移、光噪声、脉冲功率不一致等因素的鲁棒性,以及实现任意能量提升倍数的能力等方面,基于解卷积的编码技术展现出了全方位的性能优势,在无任何辅助硬件、不增加测量时间的前提下可以为任何给定的传感装置提供一个完全兼容且经济有效的性能提升方案。在已有研究的基础上,如何克服光噪声以及高阶非本地效应来获得更长的编码长度,以进一步提升 SNR 成为当前面临的挑战性课题之一。

相对于单色单极性编码而言,颜色编码和双极性编码的研究起步较晚。当使用这两种编码方案时,BOTDA 系统中沿传感光纤的布里渊相互作用降低,减轻了高阶非本地效应的影响,从而允许使用更长的编码长度。此外,在颜色编码或双极性编码 BOTDA 系统中,较小的平均布里渊增益导致系统的偏振噪声相对于常规单极性编码系统而言小得多,因此会产生比单极性编码更高的 SNR 提升。目前的高性能颜色及双极性编码技术的实现仍需要较高成本,如何在折中编码性能的前提下降低其成本也是当前面临的挑战性课题之一。对颜色编码和双极性编码的进一步深入分析和探究有助于更加全面且严谨地评估和对比不同编码方案的性能,以适应不同的应用需求,因此可以成为当前基于光脉冲编码的分布式光纤传感领域的潜在发展方向之一。

此外,将光脉冲编码技术和其他先进技术(如分布式放大技术)结合是常见的系统性能提升方案。以分布式拉曼放大技术为例,基于分布式拉曼放大技术的 BOTDA 系统的布里渊增益与单脉冲布里渊增益为同一水平,如果能够有效消除拉曼放大产生的相对强度噪声(RIN)^[105-106],分布式拉曼放大技术将是提高 BOTDA 系统性能的良好途径。然而,在单独利用光脉冲编码技术与分布式拉曼放大技术时分别存在两种不同的优化标准与方案,同时使用两种技术时直接叠加各自的优化方案并不意味着系统性能的最优化,极有

可能得不偿失,目前仍缺乏具体的优化标准。对于光脉冲编码技术和其他先进技术相结合的方案,针对性地探究其优化措施以实现系统性能的最大化提升,对于进一步提升分布式传感器的性能具有重要意义,这一问题是当前基于光脉冲编码的分布式光纤传感领域的挑战性课题之一,也成为其潜在发展方向之一。

参 考 文 献

- [1] Hartog A H. An introduction to distributed optical fibre sensors [M]. Boston: CRC press, 2017.
- [2] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [3] 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.
- [4] Minardo A, Damiano E, Olivares L, et al. Soil slope monitoring by use of a Brillouin distributed sensor[C]//2015 Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies, May 6-8, 2015, Turin, Italy. New York: Institution of Engineering and Technology, 2015: 4.
- [5] Oskoui E A, Taylor T, Ansari F. Method and monitoring approach for distributed detection of damage in multi-span continuous bridges[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 385-395.
- [6] 姜帅, 李勋峰, 张竞男. 基于 BOTDA 的民用建筑全寿命健康监测研究[J]. 建筑与文化, 2019(3): 175-176.
Jiang S, Li X F, Zhang J N. Life-cycle health monitoring in civil architecture based on BOTDA[J]. Architecture & Culture, 2019 (3): 175-176.
- [7] 何志文, 赵新铭, 叶宇霄, 等. 基于 BOTDA 的混凝土管双裂缝监测试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(7): 43-46.
He Z W, Zhao X M, Ye Y X, et al. Experimental study on double crack monitoring of concrete pipe based on BOTDA[J]. China Concrete and Cement Products, 2020(7): 43-46.
- [8] Gutiérrez F, Sevil J, Sevillano P, et al. The application of distributed optical fiber sensors (BOTDA) to sinkhole monitoring. Review and the case of a damaging sinkhole in the Ebro Valley evaporite Karst (NE Spain) [J]. Engineering Geology, 2023, 325: 107289.
- [9] 孔洋, 汪璋淳, 何宁, 等. 基于 BOTDA 的砂土地基预应力管桩抗拔静载试验研究[J/OL]. 水利水电工程学报: 1-8[2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20230904.1334.006.html>.
Kong Y, Wang Z C, He N, et al. Study on uplift static load test of prestressed pipe piles on sand ground based on the BOTDA technique[J/OL]. Hydro-Science and Engineering: 1-8[2023-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1613.TV.20230904.1334.006.html>.
- [10] Soto M A, Thévenaz L. Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31347-31366.
- [11] Foaleng S M, Thévenaz L. Impact of Raman scattering and modulation instability on the performances of Brillouin sensors [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7753: 77539V.
- [12] Alem M, Soto M A, Thévenaz L. Analytical model and experimental verification of the critical power for modulation instability in optical fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 29514-29532.
- [13] Dominguez-Lopez A, Angulo-Vinuesa X, Lopez-Gil A, et al. Non-local effects in dual-probe-sideband Brillouin optical time domain analysis[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10341-10352.
- [14] Dominguez-Lopez A, Yang Z S, Soto M A, et al. Novel scanning method for distortion-free BOTDA measurements[J].

- Optics Express, 2016, 24(10): 10188-10204.
- [15] Ruiz-Lombera R, Urricelqui J, Sagues M, et al. Overcoming nonlocal effects and Brillouin threshold limitations in Brillouin optical time-domain sensors[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 6803609.
- [16] Rodriguez-Barrios F, Martin-Lopez S, Carrasco-Sanz A, et al. Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(15): 2162-2172.
- [17] Jia X H, Rao Y J, Yuan C X, et al. Hybrid distributed Raman amplification combining random fiber laser based 2nd-order and low-noise LD based 1st-order pumping[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24611-24619.
- [18] Gyger F, Rochat E, Chin S, et al. Extending the sensing range of Brillouin optical time-domain analysis up to 325 km combining four optical repeaters[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 91576Q.
- [19] Urricelqui J, Sagues M, Loayssa A. Brillouin optical time domain analysis sensor assisted by Brillouin distributed amplification of pump pulses[J]. Optics Express, 23(23): 30448-30458.
- [20] Soto M A, Ricchiuti A L, Zhang L, et al. Time and frequency pump-probe multiplexing to enhance the signal response of Brillouin optical time-domain analyzers[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28584-28595.
- [21] Chen D, Liu Q W, Fan X Y, et al. Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35: 2037-2043.
- [22] Yang Z S, Soto M A, Chow D M, et al. Brillouin distributed optical fiber sensor based on a closed-loop configuration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 36(5): 1239-1248.
- [23] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, et al. Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 32.
- [24] Williams E F, Fernández-Ruiz M R, Magalhaes R, et al. Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers[J]. Nature Communications, 2019, 10: 5778.
- [25] 张倩, 王涛, 赵婕茹, 等. 基于局部均值分解的布里渊光时域分析传感系统降噪算法[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306009. Zhang Q, Wang T, Zhao J R, et al. Denoising algorithm for Brillouin optical time-domain analysis sensing systems based on local mean decomposition[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306009.
- [26] Golay M J E. Sieves for low autocorrelation binary sequences[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1977, 23(1): 43-51.
- [27] Everard J K A. Novel signal processing techniques for enhanced OTDR sensors[J]. Proceedings of SPIE, 1987, 0798: 42-47.
- [28] 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.
- [29] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
- [30] Lee D, Yoon H, Kim N Y, et al. Analysis and experimental demonstration of simplex coding technique for SNR enhancement of OTDR[C]//Proceedings of the Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference, October 20, 2004, Palisades, NY, USA. New York: IEEE Press, 2004: 118-122.
- [31] Soto M A, Sahu P K, Faralli S, et al. Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes [J]. Electronics Letters, 2007, 43(16): 862-864.
- [32] 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.
- [33] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Analysis of optical pulse coding in spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensors[J]. Optics Express, 2008, 16(23): 19097-19111.
- [34] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(7): 450-452.
- [35] Linze N, Li W H, Bao X Y. Signal-to-noise ratio improvement in Brillouin sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 923-926.
- [36] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, et al. Distributed strain and temperature sensing over 50 km of SMF with 1 m spatial resolution employing BOTDA and optical pulse coding[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7503: 750383.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F, et al. Long-range Brillouin optical time-domain analysis sensor employing pulse coding techniques[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(9): 094024.
- [40] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120km distance employing optical preamplification[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 232-234.
- [41] Wang F, Zhu C H, Cao C Q, et al. Enhancing the performance of BOTDR based on the combination of FFT technique and complementary coding[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3504-3513.
- [42] Le Floch S, Sauser F. New improvements for Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103230L.
- [43] 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.
- [44] Soto M A, Taki M, Bolognini G, et al. Simplex-coded BOTDA sensor over 120-km SMF with 1-m spatial resolution assisted by optimized bidirectional Raman amplification[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(20): 1823-1826.
- [45] Angulo-Vinuesa X, Soto M A, Martin-Lopez S, et al. Brillouin optical time-domain analysis over a 240 km-long fiber loop with no repeater[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 8421C9.
- [46] Soto M A, Angulo-Vinuesa X, Martin-Lopez S, et al. Extending the real remoteness of long-range Brillouin optical time-domain fiber analyzers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(1): 152-162.
- [47] Qian X Y, Wang Z N, Wang S, et al. 157 km BOTDA with pulse coding and image processing[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9916: 99162S.
- [48] Taki M, Muanenda Y, Oton C J, et al. Cyclic pulse coding for fast BOTDA fiber sensors[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2877-2880.
- [49] Lu P, Lalam N, Liu B, et al. Vector Brillouin optical time-domain analysis with Raman amplification and optical pulse coding[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10925: 1092512.
- [50] Fu Y, Zhu R C, Han B, et al. 175-km repeaterless BOTDA with hybrid high-order random fiber laser amplification[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4680-4686.
- [51] Bin Zan M S D, Sasaki T, Horiguchi T, et al. Phase shift pulse Brillouin optical time domain analysis (PSP-BOTDA) employing dual Golay codes[C]//International Conference on Computer

- and Communication Engineering (ICCCE'10), May 11-12, 2010, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2010.
- [52] Bin Zan M S D, 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.
- [53] Mao Y, Guo N, Yu K L, et al. 1-cm-spatial-resolution Brillouin optical time-domain analysis based on bright pulse Brillouin gain and complementary code[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(6): 2243-2248.
- [54] Sun Q, Tu X B, Lu Y, et al. High-accuracy and long-range Brillouin optical time-domain analysis sensor based on the combination of pulse prepump technique and complementary coding[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(6): 066125.
- [55] Zhou Y, Yan L S, Li Z L, et al. Polarization division multiplexing pulse coding for eliminating the effect of polarization pulling in Golay-coded BOTDA fiber sensor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19686-19693.
- [56] Li Z L, Yang Z S, Yan L S, et al. Hybrid Golay-coded Brillouin optical time-domain analysis based on differential pulses [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4574-4577.
- [57] Zhou Y, Yan L S, Li Z L, et al. Polarization push-pull effect-based gain fluctuation elimination in Golay-BOTDA[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29439-29447.
- [58] Liu C, Yan L S, Li Z L, et al. Overcoming EDFA slow transient effects in a combined Golay coding and coherent detection BOTDA sensor[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38220-38228.
- [59] Zan M D, Elgaud M M, Zainuddin A R, et al. Simulation analysis on the simultaneous deployment of Brillouin gain and loss in coded Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) fiber sensor[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1892(1): 012034.
- [60] Liu S S, Zhang X C, Zhang Y T, et al. Numerical investigation of Golay coding Brillouin optical time-domain analysis system based on π -phase pulse[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 2190-2197.
- [61] Wei W L, Shen L, Zhao Z Y, et al. BOTDA sensing system based on differential Golay coding and deconvolution algorithm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(16): 5475-5484.
- [62] Soto M A, Taki M, Bolognini G, et al. Optimization of a DPP-BOTDA sensor with 25 cm spatial resolution over 60 km standard single-mode fiber using Simplex codes and optical pre-amplification[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 6860-6869.
- [63] Taki M, Soto M A, Bolognini G, et al. Study of Raman amplification in DPP-BOTDA sensing employing Simplex coding for sub-meter scale spatial resolution over long fiber distances[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(9): 094018.
- [64] Sun Q, Tu X B, Sun S L, et al. Long-range BOTDA sensor over 50 km distance employing pre-pumped Simplex coding[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055501.
- [65] Qian X Y, Jia X H, Wang Z N, et al. Noise level estimation of BOTDA for optimal non-local means denoising[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4727-4734.
- [66] Taki M, Signorini A, Oton C J, et al. Hybrid Raman/Brillouin-optical-time-domain-analysis-distributed optical fiber sensors based on cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4162-4165.
- [67] 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.
- [68] Iribas H, Loayssa A, Sauser F, et al. Cyclic coding for Brillouin optical time-domain analyzers using probe dithering[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8787-8800.
- [69] Xu S R, Ma H L, Jia X H, et al. Long-distance vector Brillouin optical time-domain analysis sensors using distributed Brillouin amplification with frequency-comb pump parallel demodulation [J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(11): 112004.
- [70] 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.
- [71] Zhou Y, Yan L S, Liu C, et al. Hybrid aperiodic coding for SNR improvement in a BOTDA fiber sensor[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 33926-33936.
- [72] Le Floch S, Sauser F, Soto M A, et al. Time/frequency coding for Brillouin distributed sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84211J.
- [73] Le Floch S, Sauser F, Llera M, et al. Colour simplex coding for Brillouin distributed sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8794: 879437.
- [74] Le Floch S, Sauser F, Llera M, et al. Novel Brillouin optical time-domain analyzer for extreme sensing range using high-power flat frequency-coded pump pulses[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2623-2627.
- [75] Le Floch S, Sauser F, Llera M, et al. Colour cyclic code for Brillouin distributed sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 963431.
- [76] Le Floch S, Llera M, Gloriod O, et al. Unique coded sequence for fast Brillouin distributed sensors[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne. Washington, DC: OSA, 2018: WF20.
- [77] 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.
- [78] Yang Z S, Soto M A, Thévenaz L. Increasing robustness of bipolar pulse coding in Brillouin distributed fiber sensors[J]. *Optics Express*, 2015, 24(1): 586-597.
- [79] Bin Zan M S D, Tsumuraya T, Horiguchi 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 and Technology*, 2013, 24(9): 094025.
- [80] Zan M S D B, Yokoyama K, Horiguchi T. Combination of Walsh and Golay codes in modulating the pump light of phase-shift pulse BOTDA sensor[C]//2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP), October 28-30, 2013, Melaka, Malaysia. New York: IEEE Press, 2013: 160-162.
- [81] Zan M S D, Bakar A A A, Horiguchi T. Improvement of signal-to-noise-ratio by combining Walsh and Golay codes in modulating the pump light of phase-shift pulse BOTDA fiber sensor[C]//2015 9th International Conference on Sensing Technology (ICST), December 8-10, 2015, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2016: 269-273.
- [82] Soto M A. Distributed Brillouin sensing: time-domain techniques [M]//Peng G D. Handbook of optical fibers. Singapore: Springer, 2019: 1663-1753.
- [83] Baronti F, Lazzeri A, Roncella R, et al. SNR enhancement of Raman-based long-range distributed temperature sensors using cyclic Simplex codes[J]. *Electronics Letters*, 2010, 46(17): 1221.
- [84] Golay M. Complementary series[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1961, 7(2): 82-87.
- [85] Sivanandam S N, Deepa S N. Genetic algorithms[M]//Sivanandam S N, Deepa S N. Introduction to genetic algorithms. Heidelberg: Springer, 2008: 15-37.
- [86] 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.
- [87] Yang Z S, Li Z L, Zaslowski S, et al. Design rules for optimizing unipolar coded Brillouin optical time-domain analyzers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16505-16523.
- [88] Gao X, Yang Z S, Wang S, et al. Impact of optical noises on unipolar-coded Brillouin optical time-domain analyzers[J]. *Optics*

- Express, 2021, 29(14): 22146-22158.
- [89] Thévenaz L, Mafang S F, Lin J. Effect of pulse depletion in a Brillouin optical time-domain analysis system[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14017-14035.
- [90] Urricelqui J, Soto M A, Thévenaz L. Sources of noise in Brillouin optical time-domain analyzers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9634: 963434.
- [91] Barton D K. Radars. Volume 3-pulse compression[M]. Mass: Dedham, 1975.
- [92] Soto Marcelo A, Gabriele B, Fabrizio D P. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14878-14892.
- [93] Chang H Q, Jia X H, Ji X L, et al. DBA-based BOTDA using optical comb pump and pulse coding with a single laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(10): 1142-1145.
- [94] Bolognini G, Park J, Soto M A, et al. Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification[J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(10): 3211-3218.
- [95] Rosolem J B, Bassan F R, de Freitas D E, 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.
- [96] van Deventer M O, Boot A J. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(4): 585-590.
- [97] Zadok A, Zilka E, Eyal A, et al. Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers [J]. Optics Express, 2008, 16(26): 21692-21707.
- [98] Soto M A, Tur M, Lopez-Gil A, et al. Polarisation pulling in Brillouin optical time-domain analysers[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 103239L.
- [99] 苑立波, 董维军, 江山, 等. 我国光纤传感技术发展路线图[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0100001.
- Yuan L B, Tong W J, Jiang S, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0100001.
- [100] 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.
- [101] 罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806002.
- Luo Y, Yan L S, Shao L Y, et al. Golay-differential pulse hybrid coding technology based on Brillouin optical time domain analysis sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806002.
- [102] 刘钦, 黄劲, 梁浩, 等. 基于布里渊增益-损耗效应的编码 DPP-BOTDA 传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0928005.
- Liu Q, Huang J, Liang H, et al. Coded DPP-BOTDA sensor based on Brillouin gain-loss effect[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0928005.
- [103] Kishida K, Li C H, Nishiguchi K. Pulse pre-pump method for cm-order spatial resolution of BOTDA[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5855: 559-562.
- [104] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4444-4457.
- [105] Dominguez-Lopez A, Lopez-Gil A, Martín-López S, et al. Strong cancellation of RIN transfer in a Raman-assisted BOTDA using balanced detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(18): 1817-1820.
- [106] Angulo-Vinuesa X, Dominguez-Lopez A, Lopez-Gil A, et al. Limits of BOTDA range extension techniques[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(10): 3387-3395.

Research Progress of Brillouin Optical Time-Domain Analyzers Based on Optical Pulse Coding

Jin Simeng, Yang Zhisheng*, Hong Xiaobin, Wu Jian

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract

Significance Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA) has been widely studied and employed in academia and industry due to its capability of providing information about the spatial distribution of targeted quantities over a long optical fiber. Several advanced techniques have been proposed during the last decade to further enhance the signal-to-noise ratio (SNR) beyond the conventional single-pulse BOTDA. As one of the most efficient approaches, optical pulse coding technology has been extensively developed, and it launches one or several trains of pulses into the sensing fiber, with the exploitation of code types such as Golay, Simplex, Cyclic, genetic-optimized codes, and their derivatives. Meanwhile, this technology can assist BOTDA to further achieve considerable SNR improvement without compromising the spatial resolution and measurement time and thus has significant superiority and application prospects. Despite many corresponding advances, there are still a series of challenges in cost reduction and performance improvement. Therefore, it is important and necessary to summarize the existing research to inspire the future development of this field more rationally. Focusing on the BOTDA sensors based on optical pulse coding, we introduce the principle of several mainstream optical pulse coding technologies employed in distributed fiber sensors, and discuss the research progress of BOTDA sensors based on optical pulse coding in recent years.

Progress The fundamentals of conventional optical pulse coding technologies applied in BOTDA sensors are reviewed in detail, including unicolor unipolar codes (Golay, Simplex, Cyclic, and deconvolution-based codes), color codes, and bipolar codes. The theoretical coding gain of such present mainstream coding schemes is also summarized, all of which can be approximately regarded as proportional to the square root of the code length.

It is significant and necessary to improve and optimize the coding system for reducing the influence of system imperfections and get as close as possible to the theoretical coding gain. With the development of BOTDA sensors based on optical pulse coding technology in the past decades, a series of optimization schemes have been proposed in coding parameters, post-processing algorithms, coding system designs, and coding types (Fig. 8). This makes the basic theory of pulse-coded BOTDA more mature and complete, and provides theoretical guidance for realizing the highest possible sensing performance of pulse-coded BOTDA. The performance optimization of pulse-coded BOTDA sensors from the above four aspects is discussed in detail. Additionally, the analysis results of performance and shortcomings of different mainstream unicolor unipolar coding schemes in practical applications are summarized in Table 2, which demonstrates the comparative application advantages of the deconvolution-based optical pulse codes over the other current codes.

In addition to the optimization measures of BOTDA sensors based on optical pulse coding, the combination of optical pulse coding technology and other advanced technologies such as differential pulse-width pair, optical pre-amplification, pulse pre-pump, distributed optical amplification, and digital signal processing has been put forward to further enhance the comprehensive performance of pulse-coded BOTDA sensors. The performance of reported BOTDA sensors based on optical pulse coding is sorted chronologically and several representative results are summarized in Table 3. The bipolar complementary Golay code based on a three-tone probe yields the highest overall performance thanks to its high coding gain, low optical noise, and high robustness.

Conclusions and Prospects Optical pulse coding technology has been studied for decades and has fully proven to work well in BOTDA sensors with long sensing distance (> 25 km) and high spatial resolution (< 5 m). Compared with the optimized single-pulse BOTDA sensors, the overall performance of pulse-coded BOTDA sensors with a proper code type is greatly improved with the assistance of optimized system parameters and post-processing algorithms. The present mainstream coding schemes adopted in distributed optical fiber sensors include unicolor unipolar coding, color coding, and bipolar coding, whose theoretical coding gain can all be approximately proportional to the square root of the code length. The analysis of unicolor unipolar coding schemes is relatively mature. With the aspects of hardware and software costs, robustness to baseline fluctuations, tolerance to signal-dependent noises, tolerance to non-uniform code envelop, and ability of arbitrary energy boost considered, the deconvolution-based code exhibits performance advantages in nearly all aspects. This provides an economical and effective solution to sensing performance improvement for any given sensing device, without any auxiliary hardware or additional measurement time. Based on the existing research results, how to overcome the optical noises and the higher-order non-local effects to obtain a longer coding length to further improve the SNR has become a current challenge.

As opposed to unicolor unipolar coding, since color coding and bipolar coding are researched at a later stage and are more costly in practical applications, the solution of reducing the cost of coding without compromising its performance is a current challenge. Further in-depth analysis and exploration of color coding and bipolar coding will help evaluate and compare the performance of different coding schemes more comprehensively and rigorously for adapting to different application requirements.

Furthermore, the combination of optical pulse coding technology and other advanced technologies such as distributed amplification technology is a common strategy for performance enhancement. By taking distributed Raman amplification technology as an example, the optimization standards of optical pulse coding technology and distributed Raman amplification technology are different, and the direct superposition of their respective optimization schemes when such two technologies are applied simultaneously may cancel out the benefit. Till now, there is still a lack of specific optimization standards and targeted optimization schemes for the combination of such two technologies. Therefore, it is of significance for further improving the performance of distributed sensors to conduct in-depth investigations on their targeted optimization schemes when the optical pulse coding technology and other advanced technologies are adopted simultaneously.

Key words fiber optics; distributed sensor; stimulated Brillouin scattering; optical pulse coding