

光学学报

分布式光纤传感器的编码技术研究

林全聪, 程凌浩*, 吕杰, 张天放, 梁浩**, 关柏鸥

暨南大学光子技术研究院广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 基于光纤中的瑞利、布里渊、拉曼等散射效应以及弱反射阵列的分布式光纤传感(DOFS)能够对光纤损耗、温度、应变、振动、声音等多种参量实现长距离、高空间分辨率的实时监测,受到了越来越多的关注,具有非常广阔的应用。在 DOFS 中使用编码脉冲序列增加 DOFS 的信号能量,是提高传感性能的一个重要技术途径。因此,编码技术的应用一直是 DOFS 研究的一个重要领域。综述了 DOFS 中编码技术的研究进展,阐述了编码技术提高传感性能的技术原理,归纳了不同编码方案的设计和实现方法,分析了不同类型 DOFS 的技术特征及其相应的编码技术应用方法。最后,对 DOFS 中的编码技术的发展进行了展望。

关键词 传感器; 分布式光纤传感器; 编码技术; 光纤瑞利传感器; 光纤布里渊传感器; 光纤拉曼传感器; 光纤弱光栅阵列传感器

中图分类号 TP212 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231418

1 引言

近些年来,分布式光纤传感(DOFS)技术获得了蓬勃的发展,受到越来越多的关注。光纤的超低损耗和本质绝缘等特性,使得 DOFS 能够实现 10~100 km 量级的传感监测,并且其能够在电磁环境复杂、环境恶劣的条件下正常工作。DOFS 让许多传统监测手段难以覆盖的区域被感知,为大型基础设施和结构的智慧化奠定了基础^[1-7]。

目前,DOFS 主要是利用光纤中瑞利、布里渊和拉曼三种散射效应来实现分布式的传感。除此之外,在光纤中引入离散的弱反射点阵列以增强传感信号的信噪比、提高传感性能,也日益受到关注。无论基于哪种物理机理,DOFS 首先要面对的一个重要问题是接收到的信号功率非常低。例如:对于 10 ns 宽度的泵浦光脉冲,瑞利散射要比泵浦光脉冲的功率低 70 dB 以上,布里渊散射和拉曼散射又分别比瑞利散射低 20 dB 和 40 dB 左右^[8]。因此,DOFS 一般需要很高的泵浦光脉冲功率来提高接收信号的信噪比(SNR)。例如:对于光纤拉曼传感器,泵浦光脉冲一般在 10 W 以上的水平,光纤瑞利和布里渊传感器的脉冲发射功率也在百毫瓦的量级。更进一步地提高脉冲发射功率会受到自相位调制等光纤非线性效应的制约,这引起脉冲的过度衰减和波形的畸变,缩短传感距离,造成测量误差^[9]。因此,在 DOFS 中,提高脉冲发射功率始终存在

一个上限。另一方面,可以通过选择或者改造光纤来增强某种散射效应,或者通过提高对发射功率的容纳上限来提高接收到的信号的信噪比。例如:通过使用多模光纤来容纳更高的光功率以实现光纤拉曼传感器^[10],使用散射增强光纤来提高光纤瑞利传感器的性能^[11-13]。但这些方案需要使用定制的光纤,无法利用已有的规模化应用的通信光纤,成本较高,因此在实际工程应用中受到一定的限制。

接收信号的信噪比与信号的总能量成正比。因此,当信号功率受限时,可以通过增加信号的时间长度来提高信噪比。为此,在 DOFS 中需要增加泵浦光脉冲的脉冲宽度,这会导致空间分辨率降低。因此,仅依靠单一脉冲,DOFS 的测量精度和空间分辨率往往相互制约,难以兼得。为解决这一矛盾,基于编码脉冲序列的方法应运而生。编码脉冲序列具有很高的总能量,可以有效地提高接收信号的信噪比。同时,传感器的空间分辨率仅决定于脉冲序列中单个码元脉冲的宽度,保证了高的空间分辨率。因此,利用编码方案来提高 DOFS 的传感性能,是一种非常有效且成本低廉的方法,在 DOFS 中受到了广泛的关注。

基于编码的 DOFS 系统,其关键在于构造具有良好非周期自相关特性的编码序列。构造这样的序列不可避免地受到 DOFS 系统的物理特性和技术特征的影响。因此,近年来,针对不同 DOFS 的特点,不同的编码方案被设计出来并被应用在各种 DOFS 系统中,以

收稿日期: 2023-08-15; 修回日期: 2023-09-17; 录用日期: 2023-09-28; 网络首发日期: 2023-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075086)

通信作者: *chenglh@ieee.org; **tlianghao@jnu.edu.cn

提高 DOFS 的传感性能。本文对编码技术在 DOFS 领域的发展和进行了梳理和总结。首先简要阐述了编码 DOFS 技术的主要原理,并对编码序列的一些重要的性能指标进行了分析;随后对当前各类 DOFS 系统所使用的编码序列分类进行了归纳,总结了这些编码的主要技术特点和实现方案;然后对近年来编码技术在瑞利、拉曼、布里渊、弱光栅等 DOFS 系统中的应用及其进展进行了总结。最后,本文展望了编码技

术在 DOFS 领域的发展趋势。

2 编码技术原理

图 1 是一个典型的应用编码脉冲序列的 DOFS 系统。单一的长脉冲被替换成一串宽度很窄的、按一定规则编码而成的脉冲序列。利用编码的相关特性,在接收后的数字域上通过编码序列的相关操作来构造一个具有很高增益的冲激函数,从而解调出传感光纤的响应。

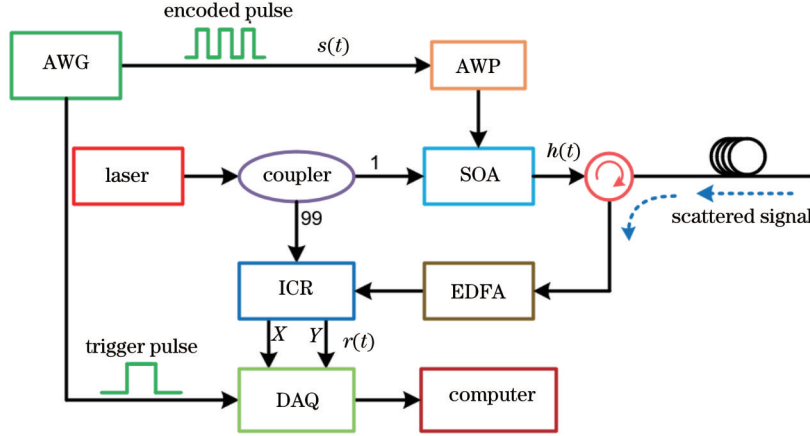


图 1 基于编码脉冲序列的 DOFS 系统(AWG:任意波形发生器;AMP:放大器;SOA:半导体光开关;EDFA:掺铒光纤放大器;ICR:集成相干接收机;DAQ:数据采集器)

Fig. 1 DOFS system based on coding pulse sequence (AWG: arbitrary waveform generator; AMP: amplifier; SOA: semiconductor amplifier; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; ICR: integrated coherent receiver; DAQ: data acquisition)

DOFS 系统的输出可被看作是传感光纤在输入光脉冲信号激励下的响应,可以表示为

$$i(t) = h(t) \otimes s(t), \quad (1)$$

式中: $s(t)$ 是传感系统的输入光脉冲信号; $i(t)$ 是系统输出; $h(t)$ 是传感光纤的冲激响应; \otimes 代表卷积。 $h(t)$ 表征了传感光纤的传递函数,也代表了传感光纤状态。该状态与传感光纤所处的环境和受到的扰动,如温度、应变、振动等参量有关。同时光脉冲在光纤中传播时,其空间位置 z 与时间 t 通过群速度 v_g 相联系,即 $t = 2z/v_g$ 。因此,通过测量得到的 $i(t)$ 反演出 $h(t)$,就可以得到传感光纤的状态信息,通常所采用的 $s(t)$ 是脉宽尽可能窄的脉冲,则在传感系统的接收端可以采用匹配滤波来获得最优信噪比的接收信号,即

$$r(t) = h(t) \otimes p(t), \quad (2)$$

$$p(t) = s(t) \otimes s^*(-t), \quad (3)$$

式中: $p(t)$ 为输入光脉冲信号经过匹配滤波之后的结果,脉冲的宽度越窄, $p(t)$ 就越接近理想冲激函数,对 $h(t)$ 的解析也就越精细,即空间分辨率越高; $r(t)$ 为传感系统所接收到的信号,其能量正比于 $p(t)$ 的能量。因此,要提高信噪比进而提高测量精度,就需要尽可能地提高 $p(t)$ 或者 $s(t)$ 的能量。但当 $s(t)$ 的脉宽越窄而总能量越高时,脉冲的峰值功率也越高,其在光纤中传播时会引起自相位调制等非线性效应,导致脉冲波形

失真,使得 $p(t)$ 偏离冲激函数,最终使得传感距离受限。因此当 $s(t)$ 仅是单一脉冲时,DOFS 系统存在空间分辨率与测量距离和传感精度之间的矛盾。

为解决此矛盾,对 $s(t)$ 进行编码,即采用编码脉冲序列。 $s(t)$ 是经编码的光脉冲序列。在传感系统的接收端,由式(3)所表达的匹配滤波则由编码的非周期自相关来实现。因此,只要编码的非周期自相关函数是理想冲激函数,则由式(2)便能得到传感光纤的无失真冲激响应。同时, $p(t)$ 的总能量正比于整个光脉冲序列总能量。因此可以采用长编码序列,以较低的光脉冲峰值功率得到能量较高的接收信号,从而大幅度提高信噪比,并避免高功率光脉冲所带来的非线性效应,使传感系统在保证高空间分辨率的条件下,实现长距离传感和高精度测量。

对于采用编码脉冲的 DOFS 系统,编码序列的非周期自相关特性对系统传感性能非常关键,主要表现在以下几方面。

1) 编码增益

编码增益表征了编码方案对噪声的抑制能力和对信噪比的提升能力。基于编码序列的传感系统有多个探测光脉冲,相比于单探测光脉冲,其探测光总能量更大,接收到的信号幅度也更大,或者等效为在相同的信号幅度情况下具有更小的噪声幅度。因此采用编码可以抑制噪声。编码增益与编码长度 L 密切相关,一般

来说是正比于 \sqrt{L} ,因此编码序列越长,序列编码增益也越高^[14]。

2) 空间分辨率

由式(2)、(3)可知, $p(t)$ 具有一定宽度,会对传感光纤的响应 $h(t)$ 带来滤波效果,使传感系统检测到的结果 $r(t)$ 是 $h(t)$ 因滤波而被一定程度模糊后的结果。近似地,可以把 $p(t)$ 表达成方波形态,即 $p(t)=\text{rect}(t/W)\otimes\delta(t)$,其中 $\text{rect}(t/W)$ 代表宽为 W 的方波函数, $\delta(t)$ 代表了理想冲激函数。则由式(2)可知, $r(t)$ 可表示为

$$r(t)=h(t)\otimes\text{rect}(t/W)。(4)$$

式(4)可以被看作是对 $h(t)$ 做宽为 W 的移动平均,起到了平滑传感光纤理想响应的效果。由于在 DOFS 系统中,单次测量结果的时间变化表征了传感信息在空间上的分布,由式(4)可知,脉宽决定空间分辨率。根据时间与空间的对应关系,可以得到系统的空间分辨率为

$$\Delta z=\frac{W\cdot v_t}{2},(5)$$

式中: v_t 为传感光纤中的光速。因此,对于采用编码的传感系统,其空间分辨率由单个码元的脉冲宽度来决定。编码序列的每个码元的脉宽越窄,非周期自相关函数的主瓣宽度也越窄,空间分辨率也就越高。

3) 串扰抑制

在多数基于光纤散射效应的 DOFS 系统中,光的散射在光纤中无处不在。若忽略光纤损耗,则由于编码序列非周期相关函数旁瓣的影响,某一特定位置处的传感会受到两倍编码序列长度范围内的测量干扰。因此,尽管编码序列的非周期自相关函数的主瓣提升了编码增益,若旁瓣总和干扰也接近于主瓣带来的增益水平,则编码序列所带来的实际性能改善会非常有限。因此串扰抑制能力是衡量编码序列优劣的关键指标。为此,可以定义优度指标(M_F)来量化编码序列的串扰抑制能力。 M_F 可以表示为

$$M_F=\frac{|r_0|^2}{2\sum_{k=1}^{N-1}|r_k|^2},(6)$$

$$r_k=\sum_{n=1}^N x_n x_{n+k}^*=r_{-k}^*, k=0, \dots, N-1,(7)$$

式中: x_n 是编码序列的第 n 个码元; r_0 是主峰值; r_k 是序列间隔为 k 的非周期自相关系数。 M_F 越大,表明该编码序列的串扰抑制能力越强。

截至目前,尚未发现具有理想非周期自相关函数的单一编码序列。就常用的二进制编码序列而言,目前已发现的具有最高 M_F 的序列是13位码元的 Barker 序列,其 M_F 为14.08。而要找到 M_F 大于10且序列长度大于13的二进制序列,目前依然是一个极具挑战性的问题^[15]。因此,采用多组编码序列的组合来实现理

想的非周期自相关函数成为一种解决方案,典型代表是各类互补序列,如 Golay 互补序列等。

3 编码方案

根据编码序列中码元的取值,可将各类编码序列分为三大类。第一类是单极性编码,码元取值为0或者1。第二类是双极性编码,码元取值为1或者-1。第三类为多极性编码,是码元取值为两种以上数值的编码序列,在传感系统中,一般此类编码序列多采用模为1的复数序列,也被称为多相位恒模编码序列。

3.1 单极性编码

单极性编码由于只有0和1两种取值,因此适用于基于强度检测的 DOFS 系统,其调制方案也比较简单,使用开关激光器或者使用电光调制器等外调制器都能实现编码调制。

Simplex 编码是一种典型的单极性编码,在 DOFS 中应用广泛。Simplex 编码是根据单极性的 S 矩阵来进行编码。S 矩阵可由双极性的 Hadamard 矩阵通过 Hadamard 变换来生成。S 矩阵中的每一行都是一组编码序列。因此,基于 Simplex 编码的 DOFS 系统需要依次发射 S 矩阵中的每一行编码序列,从而得到结果矩阵。再将 S 矩阵进行逆 Hadamard 变换得到的矩阵乘以该结果矩阵,就可以反演出传感光纤的响应。由于 S 矩阵的逆 Hadamard 变换矩阵与 S 矩阵的乘积是单位矩阵,因此,基于 Simplex 编码的传感系统在理论上没有串扰的问题。图 2 展示了 Simplex 编码技术的原理及其过程。可以看出,基于 Simplex 编码技术的 DOFS 可以被看成是将多个基于单脉冲形式的测量延迟叠加起来。在发射端,单脉冲经过延迟叠加形成了一系列不同的编码脉冲序列,在接收端就得到了一系列不同的测量结果曲线。单脉冲的测量结果与编码脉冲序列的测量结果之间则通过 Hadamard 变换相联系。2006 年, Lee 等^[16]使用 Simplex 编码来提高光时域反射仪(OTDR)的信噪比,使用 255 bit 的序列可以将信噪比提高到 9.2 dB。Simplex 编码在光纤拉曼传感器中也获得了较多的研究^[17-20],对延长光纤拉曼传感器的传感距离起到了重要的作用。目前,Simplex 编码在各种类型的 DOFS 中都获得了广泛应用。

利用随机数序列的非相关性也能构造近似理想的非周期自相关特性。采用 0 和 1 在时间上随机分布的单极性二进制序列,可以实现基于随机编码的 DOFS 系统。例如:采用 512 码元长度的随机编码在布里渊光时域反射仪(BOTDR)中实现了 11.93 dB 的编码增益,其较同长度的 Simplex 编码具有更高的增益^[21]。

单极性编码序列因为没有负值,往往需要应用多组编码序列来共同完成一次测量,因此在数据处理方面会增加一些复杂度。为了减少编码序列的应用数量,可以将双极性编码序列转换成单极性编码序列来使用。这方面的代表是基于互补 Golay 序列的编码方

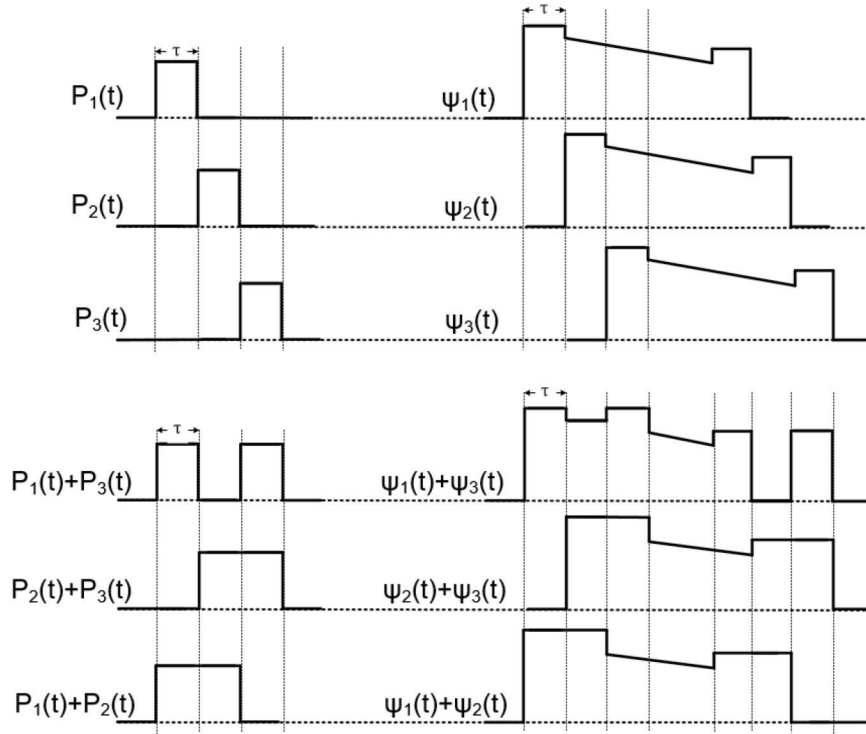


图 2 Simplex 编码技术原理^[16]

Fig. 2 Principle of Simplex coding technique^[16]

案,通过偏置的方法将双极性 Golay 码转化为单极性码。设互补序列 $A=(a_0, a_1, \dots, a_{L-1})$, $B=(b_0, b_1, \dots, b_{L-1})$ 是长度为 L 的 Golay 互补序列,将 A 、 B 按照一定的偏置规律分解成 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 4 组序列。当序列的元素构成为“1”和“-1”时,取偏置常数为 $1/2$,则有以下表达式:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1+A}{2} \\ A_2 = \frac{1-A}{2} \\ B_1 = \frac{1+B}{2} \\ B_2 = \frac{1-B}{2} \end{cases} \quad (8)$$

双极性的互补 Golay 序列经偏置后将生成 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 4 组序列,且这 4 组序列的元素取值均为 0 或者 1,因此是单极性编码。同时,因为 $A=A_1-A_2$ 且 $B=B_1-B_2$, A_1 和 A_2 序列结果的差代表了双极性编码序列 A 的结果, B_1 和 B_2 序列结果的差代表了双极性编码序列 B 的结果,二者分别与 A 和 B 序列做相关运算后即可得到等效于原始双极性编码的结果。此类双极性转单极性编码的方法在 DOFS 中得到了广泛应用^[22-24]。

将双极性编码序列改造成单极性编码序列虽然减少了编码序列的使用数量,但仍然需要使用多组编码序列。近年来,一种新的编码思路被提出,即采用非周

期的编码方法,结合解卷积的方法来实现解码。该方法不再受编码周期的限制,提高了编码的自由度。因为需要使用基因算法等优化算法来进行编码设计,这种非周期的编码方案也被称为 GO-Code 编码,可以仅用单一编码序列就可以完成分布式传感测量。该方案的优异性能在布里渊和拉曼传感器中得到了验证^[25]。

3.2 双极性编码

DOFS 中,最广泛使用的编码是各类二进制编码。一般而言,这些二进制编码都需要基于双极性编码来实现,此时可以通过对激光的相位进行调制来实现编码。常用的相位调制方法包括基于电光调制器(EOM)和基于声光调制器(AOM)两类。

基于 EOM 的方案多用于相移键控(PSK)的调制格式^[26]。如图 3 所示,此方案的核心器件为一个马赫-曾德尔(M-Z)强度干涉调制器,且被偏置在最小光功率输出的工作点,以保证无编码时没有输出光,提高消光比。代表编码序列信息的射频信号同时调制 M-Z 干涉仪两臂的相位,使得两臂从干涉相消转变成干涉增强的状态,输出最高的光功率。而编码序列的极性则使得 M-Z 干涉结果的相位超前或者滞后,二者相差 π 相位,从而实现了双极性的 BPSK 编码^[27]。基于这样的方案,通过增加 M-Z 干涉仪,还可以实现更多相位点的调制,比如 4 相位点的 QPSK 调制被用于编码相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)^[28-29]。此外,一些近似于二进制编码的双相编码序列也可以基于 EOM 的方案来实现,比如双相勒让德序列^[30]。

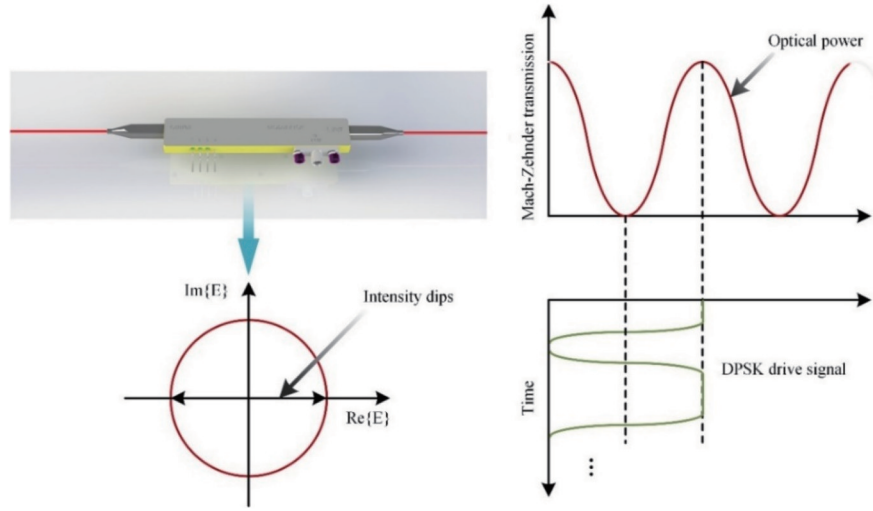


图 3 基于 EOM 实现双相相移键控(BPSK)调制^[27]

Fig. 3 Binary phase shift keying (BPSK) modulation realized through EOM^[27]

采用 AOM 进行编码调制时,所需要表达的相位码元以射频电信号幅值的形式作用于调制器,产生相应的超声场,进而改变在超声场中传播的光信号相位。这种方式可以实现任意相位的调制,而不用

像 EOM 那样,局限于某些特定相位点。Liu 等^[31]利用 AOM 实现了基于相移双脉冲的 Φ -OTDR 系统。图 4 展示了该系统利用 AOM 实现光源相位调制的原理。

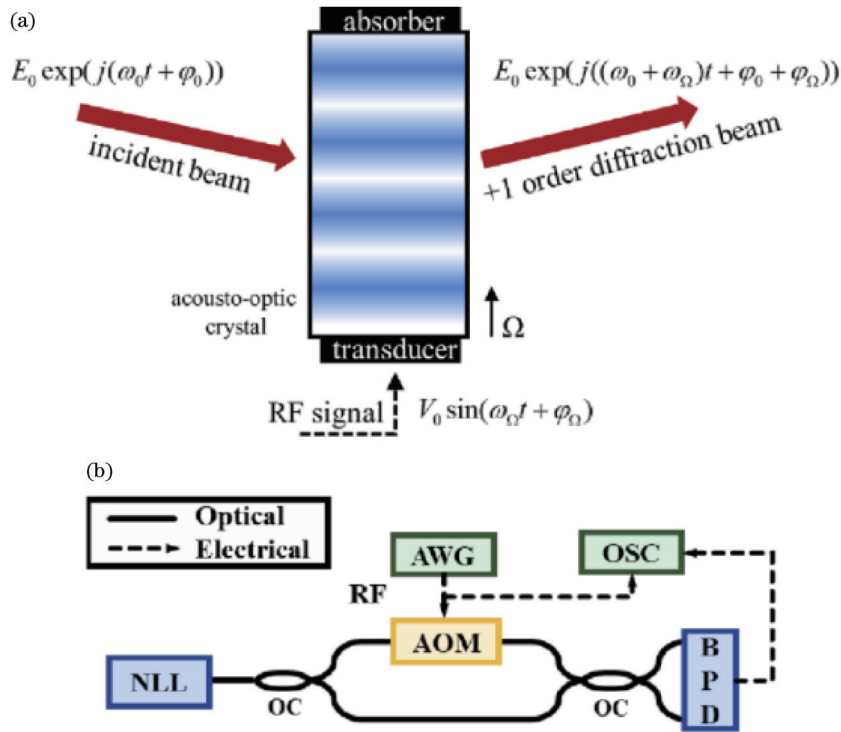


图 4 AOM 工作原理和实验装置图^[31]。(a)AOM 工作原理示意图;(b)测试基于 AOM 的相移脉冲方法的实验装置

Fig. 4 AOM working principle and experimental device diagram^[31]. (a) Schematic diagram of basic working principle of AOM; (b) experimental setup for testing phase shifted pulsing method based on AOM

在编码序列的选择方面,一种常用的二进制编码序列是伪随机二进制序列(PRBS),它是一种特别的二进制序列,虽然它是使用确定的算法生成的,但是它可以表现出类似于真正随机数列的统计学特征,所以称之为伪随机码。生成 PRBS 最常见的方式是由线性

反馈移位寄存器(LFSR)^[32]生成,此外,基于 LFSR 还衍生出了一系列不同的伪随机序列,如 Gold 序列^[33]、Kasami 序列^[34]和 JPL 序列^[35]等。

单一的二进制编码序列的串扰抑制能力都不高。为此,可以采用多个编码序列的组合来实现高 M_F ,从

而提高串扰抑制能力。互补 Golay 序列^[36]就是这样一类二进制编码序列组合,它是由 Golay 在 1972 年提出的一对互补二进制序列,这一对二进制编码序列的非周期自相关函数构成互补关系,因此同时使用两组编码序列,再对两组二进制序列的非周期自相关函数进行求和之后便可以获得一个完美的冲激函数。不过,由于互补 Golay 序列是由两组编码序列组成,所以使用互补 Golay 序列往往会增加 DOFS 系统复杂度或者减少响应时间。

3.3 多相位恒模编码

为了解决单一的二进制编码序列的串扰抑制能力不强的问题,研究者们提出了多相位恒模编码序列,即恒包络零自相关序列(CAZAC)。这类编码都是由幅度相同的一组复数值组成的数学序列,而序列的非周期自相关也非常近似于一个冲激函数。相较于二进制编码序列,如 PRBS,多相位恒模编码序列大多具有更低的非周期自相关旁瓣。目前 CAZAC 主要应用于无

线电领域和雷达领域,在 DOFS 领域的应用还较为少见。常用的多相位恒模编码序列主要有 Frank 序列、Zadoff-Chu 序列、Golomb 序列等。

Frank 序列^[37-39]可表示为

$$x(m+nN+1)=\exp\left(-j\frac{2\pi mn}{N}\right),$$

$$m=0, \dots, N-1, n=0, \dots, N-1, \quad (9)$$

式中: N 为编码长度; x 为 Frank 序列,它的编码长度只能为 N^2 。Zadoff-Chu 序列^[40-41]则可以表示为

$$x(n)=\exp\left(-j\frac{\pi n^2}{N}\right), n=1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

相较于 Frank 序列,Zadoff-Chu 序列去除了编码长度的限制,能够生成任意长度的多相位恒模编码序列,但是 Frank 序列有着比 Zadoff-Chu 序列更低的非周期自相关旁瓣水平。图 5 给出了 64 bit Frank 码的相位波形图、星座图以及非周期自相关函数。

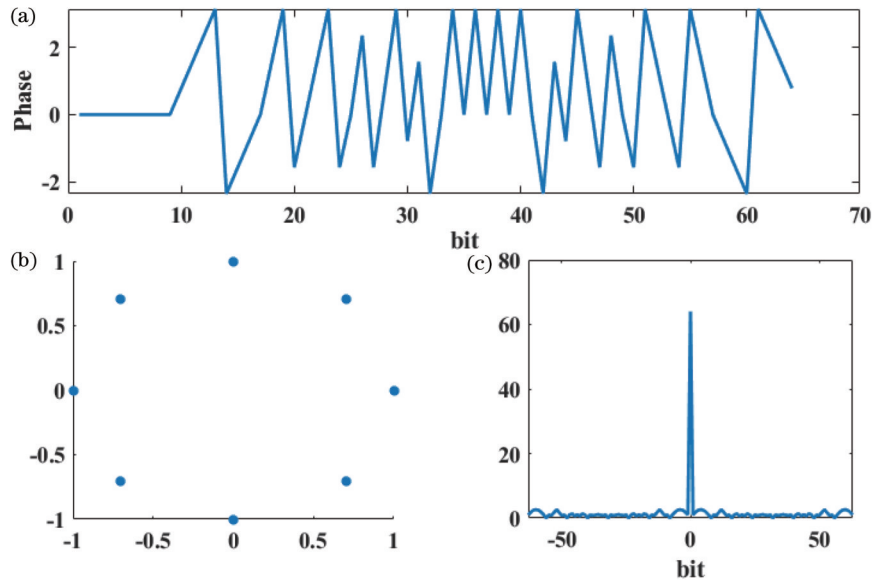


图 5 64 位 Frank 序列相位、星座和非周期自相关函数^[45]。(a) 64 位 Frank 序列的相位;(b) 64 位 Frank 序列的星座图;(c) 64 位 Frank 序列的非周期自相关函数

Fig. 5 64-element Frank sequence phase, constellation, and aperiodic autocorrelation functions^[45]. (a) Phase of 64-element Frank sequence; (b) constellation of 64-element Frank sequence; (c) aperiodic autocorrelation function of 64-element Frank sequence

Frank 和 Zadoff-Chu 序列的相位分布遵循某种特定规律。如果允许序列的相位分布更具一般性和随机性,则可以有更大的自由度去设计序列,寻找到具有更低非周期自相关旁瓣水平和更高串扰抑制能力的序列。因此,自 1950 年以来,数字通信工程师们都一直在寻找根据某种合适的优度衡量标准来降低多相位恒模编码序列的整体非周期自相关旁瓣水平的方法。研究者除了提出更复杂的编码序列来降低非周期自相关旁瓣水平之外,还提出了一些算法来降低当前已知恒模编码序列的非周期自相关旁瓣水平。2009 年,Stoica 等^[42]提出了一种名为新循环(CAN)的算法来对

现有的多相位恒模编码序列进行优化,该算法能够在一定程度上降低编码序列的非周期自相关旁瓣水平,从而提高编码序列的 M_F 值。2015 年,Song 等^[43]提出了一种基于主要值最小化(MM)的旁瓣积分水平单调最小化(MISL)算法来进一步降低现有多相位恒模编码序列的非周期自相关旁瓣水平,提升编码序列的 M_F 值。2022 年,吕杰^[44]提出了一种基于梯度下降的序列搜索优化算法,该算法在编码序列的搜寻效率上具有一定优势。这些算法都可以寻找到具有很高 M_F 的序列,且 M_F 值一般随着序列长度的 0.677 次方增大^[45],非周期自相关旁瓣水平可以达到 -50 dB 以下的水

平。图 6 对比了 256 bit 码元的一些序列的 M_F 水平,可以看到,PRBS 和单一的 Golay 序列的 M_F 均低于 3, Frank 和 Golomb 序列的 M_F 值则有 10 倍左右的提高,在 Frank 和 Golomb 序列基础上,通过算法搜寻到的优化序列, M_F 均可以达到最高 87.1 的水平,是 PRBS 和单一 Golay 序列的 30 多倍。

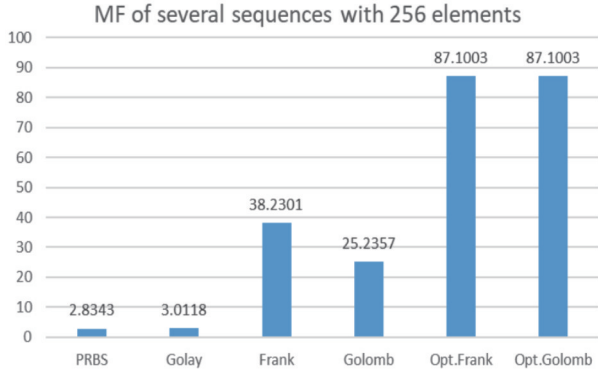


图 6 一些 256 bit 码元编码序列的 M_F [45]

Fig. 6 M_F of some coding sequences with 256 bit [45]

多相位恒模编码序列的调制可以通过 AOM 来实现。首先在数字域将编码序列调制到射频载波波形上,然后由任意波形发生器(AWG)产生加载了编码序列的射频载波,并驱动 AOM,就可以将编码序列调制到光源的相位上 [45]。也可以在射频域通过正交调制的方式将相位信息调制到射频载波上,然后通过副载波调制的方式将携带了多相位恒模编码序列的射频载波调制到光源上。图 7 是一个 256 bit 码元的 Frank 序列及其优化序列的星座图。原始的 Frank 序列的相位点分布在一些等间隔的离散相位点上,而优化后序列的相位分布则更加随机,间隔也更加密集。图 8 是携带优化 Frank 序列的 200 MHz 载波波形及其对应的相位,分别展示了由 AWG 产生和经过 AOM 后形成的波形,可以清晰地看到载波的相位在码元的相位跳变处发生改变。

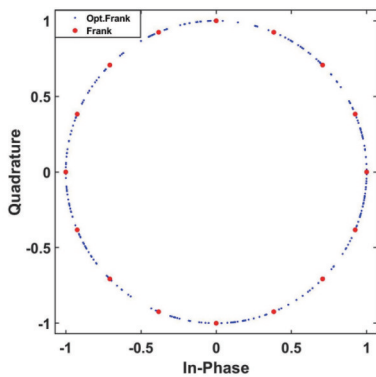


图 7 256 bit 码元的 Frank 序列及其优化序列的星座图 [45]

Fig. 7 Constellations of 256-bit Frank sequence and its optimized sequence [45]

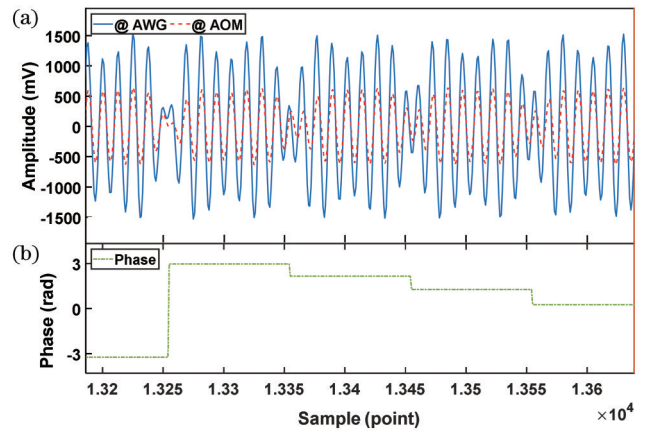


图 8 Frank 序列波形及相位图 [45]。(a)由 AWG 产生和经 AOM 后携带优化 Frank 序列的 200 MHz 的波形;(b)在图 8(a)中波形携带的优化 Frank 序列的相位

Fig. 8 Frank sequence waveform and phase diagram [45]. (a) 200 MHz waveform carrying optimized Frank sequence generated by AWG and after AOM modulation; (b) phases carried by optimized Frank sequence in Fig. 8(a)

4 基于编码技术的分布式光纤传感器

4.1 光纤瑞利传感器

光纤中的瑞利散射作为一种弹性散射,可以用来实现多种物理量的传感。基于非相干光源的瑞利散射可以用来测量光纤中的损耗、反射点等的分布。利用相干光源的瑞利散射,可以测量振动、声音等动态量,也可以测量温度、应变等静态量,且灵敏度非常高,应用日益广泛。因此,基于相干光源的光纤瑞利传感器成为了当前研究的一个热点,表 1 总结了近年来的一些基于编码技术的光纤瑞利传感器的工作。

基于非相干光源的光纤瑞利传感器,即目前广泛使用的 OTDR,是最早发展起来的一类 DOFS,也是最早开始应用编码技术的。互补 Golay 序列等编码是最早应用的一类编码技术。Jones 等 [46] 在 1993 年就提出了使用 Simplex 编码提升 OTDR 的灵敏度的方法。这些工作为编码技术在 DOFS 领域的应用奠定了基础。近年来,研究者们提出了更多的创新方案来提高编码 OTDR 系统的编码效率和性能。Lee 等 [16, 47] 深入研究了 Simplex、双正交等编码方案及其优化问题,相比于基于互补 Golay 序列的编码方案,Simplex、双正交等编码方案可以实现更高的编码增益。Sahu 等 [48] 则提出了基于互补相关普罗米修斯标准正交序列 (CCPONS) 的 OTDR 方案,可以实现较 Hadamard 及其衍生编码方案更快的测量速度。2019 年, Zhang 等 [49] 提出了一种基于数字线性频率调制的脉冲编码新方案,结合了传统 OTDR 和 OFDR 的优点,实现了同时将动态范围增大 7 dB 和将空间分辨率提高约 10 倍的效果。Liao 等 [50] 提出了基于过采样技术来提高编码

表 1 基于编码技术的光纤瑞利传感器性能总结

Table 1 Summary of performance of fiber optic Rayleigh sensors based on coding technology

Year	Author	Encoding type	Performance	Ref. No
1993	Jones M D	Simplex	Code length: 4 bit; relative to Golay code or single pulse OTDR, noise power is reduced by 1.9 dB	[46]
2005	Lee <i>et al.</i>	Simplex	Sensing distance: 20 km; compared with the traditional OTDR, coding gain is improved by 9.04 dB	[47]
2006	Lee <i>et al.</i>	Simplex	Code length: 255 bit; SNR: 9.2 dB	[16]
2008	Sahu <i>et al.</i>	CCPONS	Same measurement time and peak value; SNR is improved by 0.1 dB	[48]
2019	Zhang <i>et al.</i>	Digital linear frequency modulation (LFM)	Sensing distance: 100 km; dynamic range is improved by 7 dB; spatial resolution is improved by 10 times	[49]
2019	Liao <i>et al.</i>	Golay	Sensing distance: 23.8 km; sampling rate: 4000 MHz; SNR: 3 dB; coding gain: 20 dB	[50]
2019	Wang <i>et al.</i>	Golay	Sensing distance: 10 km; submeter gauge length and nanostrain resolution	[51]
2019	Mompó <i>et al.</i>	Biphase Legendre sequence	Scan rate: 107 kHz; spatial resolution: 10 cm; sensitivity: 1.1 mrad/ $\sqrt{\text{Hz}}$	[30]
2021	Tomboza <i>et al.</i>	Golay	Detection distance: 1 km; good tracking ability	[52]
2023	Li <i>et al.</i>	Random sequence CPP	Distortion coefficient: 9.23%; SIR (signal-to-interference ratio): 16.67 dB; SNR: 21.99 dB	[29]

技术的性能的方法,并以编码 OTDR 系统为例,验证了在不增加测量时间和不改变发送信号波形的前提下可以获取额外的编码增益,还可以利用光探测器的带限效应来优化采样率以进一步获得额外的编码增益。

基于相干光源的光纤瑞利传感器利用了瑞利散射的相位对光纤中光程变化的敏感性进行传感,因此被称为相敏光时域反射仪(Φ -OTDR),其主要性能参数包括传感带宽、灵敏度和空间分辨率等,参数之间相互制约。灵敏度在很大程度上取决于传感系统的信噪比,传感带宽是传感单元可以测量的最大声信号频率,受探测脉冲重复频率的限制;空间分辨率则受脉冲宽度和用于获取差分相位的虚拟标距长度的限制。编码的引入可以缓解灵敏度和空间分辨率之间相互制约的问题。2019年,Wang等^[51]基于单极性互补 Golay 序列和外差接收机架构,实现了编码 Φ -OTDR 系统,在 10 km 测距上实现了亚米级标距和纳应变级的分辨率。

Φ -OTDR 需要对振动、声音等动态信号做出快速的响应。而 Simplex、互补 Golay 序列编码等需要多组序列完成一次测量的编码方案会降低测量的重复频

率,减小传感带宽。为解决这一问题,2019年,Mompó等^[30]提出了基于双相勒让德序列的 Φ -OTDR 方案。双相勒让德序列有近乎完美的自相关特性,因此仅需单一序列即可完成测量。2021年,Tomboza等^[52]提出了一种基于偏振多路复用差分相位编码的 Φ -OTDR 方案,利用偏振复用将多组互补 Golay 序列同时调制到光脉冲上,在接收端通过多入多出(MIMO)技术求解琼斯矩阵并进行解偏振复用,从而同时获得传感光纤对多组互补 Golay 序列的响应,避免了依次发送和接收编码序列,以及降低测量频率的问题。该方案在 1 km 的测距上展现出对脚步声良好的跟踪能力。2023年,Li等^[29]提出一种基于四相移键控(QPSK)调制和随机序列编码的 Φ -OTDR。随机序列编码无需多组序列来完成一次测量,因此不会因编码而减小传感带宽。该系统以 40 ns 的脉冲宽度在 85.652 km 末端检测到了振动信号,验证了良好的传感性能。

4.2 光纤拉曼传感器

基于 OTDR 方案,光纤拉曼传感器利用自发拉曼背向散射可以获得光纤沿线的温度分布结果,目前

已经在电力、通信、火灾探测等多个领域得到了广泛应用。在光纤拉曼传感系统中,拉曼散射光,无论是斯托克斯光还是反斯托克斯光,都非常微弱。因此,通常采用高功率激光器或 EDFA 来提高发射到光纤中的脉冲光功率。但是,光纤非线性效应的存在使得最高光功率受到限制,也制约了光纤拉曼传感器的传感距离。因此,通过对发射脉冲进行编码来提高光纤拉曼传感器的性能获得了较多研究。表 2 总结了部分近年来基于编码技术的光纤拉曼传感器的研究工作。由于多数光纤拉曼传感器都是基于强度检测的

系统,因此基于 Simplex 编码的方案得到了较多的应用。Simplex 编码的引入可以降低发射脉冲的峰值功率,避免非线性,从而有效增加传感距离,提高测量精度和空间分辨率^[53]。2018 年, Wang 等^[17]将 Simplex 编码技术应用于纤维折叠结构分布式光纤拉曼温度传感系统,通过对测量的反斯托克斯信号进行处理,得到整个纤维长度的温度信息。他们研究了 Simplex 编码长度对系统误差的影响,分析表明,在一定噪声水平下,通过增加编码长度,可以大大减小测温误差,但系统空间分辨率保持不变。

表 2 基于编码技术的光纤拉曼传感器性能总结

Table 2 Summary of performance of fiber optic Raman sensors based on coding technology

Year	Author	Encoding type	Performance	Ref. No
2018	Wang <i>et al.</i>	Simplex	By increasing the code length, the temperature measurement error is reduced while maintaining the same spatial resolution	[17]
2018	Dai <i>et al.</i>	RZ Simplex and complementary RZ Simplex	Sensing distance: 56 km; spatial resolution: 10 m; sensing distance: 50 km; temperature resolution: 1.8 °C	[18]
2020	Sun <i>et al.</i>	GO-code	Sensing distance: 10.2 km; spatial resolution: 2 m; measurement time: 1 s; decoding time: 1.6 ms	[25]
2023	Faralli <i>et al.</i>	Cyclic-Simplex and Simplex binary codes	Avoid performance degradation due to nonlinear effects and code word distortion	[19]

引入 Simplex 编码使得脉冲发射的持续时间大大延长。这种持续时间较长的脉冲序列在经过 EDFA 时,由于 EDFA 瞬态效应的存在,脉冲编码序列会有较严重的失真,使得实际的编码序列在经过自相关后与理想的冲激函数相差较大,导致编码增益、串扰抑制等性能下降。在光纤拉曼传感器中,EDFA 增益较大,瞬态效应更加明显,如何避免 EDFA 等器件带来的波形失真成为提高传感性能的一个关键。2018 年, Dai 等^[18]分别通过 Simplex 编码序列和互补 Simplex 编码序列调制了两个直接调制的分布式反馈(DFB)半导体激光管,使其可以一起形成重复脉冲,即使 EDFA 增益非常高,也可以消除没有自动增益控制(AGC)的 EDFA 的瞬态效应。通过使用归零(RZ)Simplex 编码序列,可以实现更高的脉冲峰值功率,从而提高系统性能。系统在 56 km 距离上的空间分辨率为 10 m,在 50 km 距离上的温度分辨率为 1.8 °C。2020 年 Sun 等^[25]提出了一种基于解卷积概念的方法,将时域上的各种失真通过解卷积的方法在频域进行均衡和补偿。该方法提出了一种基于遗传算法优化的强度编码(GO-code),能提供与传统编码相当的编码增益,并且编码长度的灵活性和对脉冲序列上非均匀幅度的适应性确保了编码效率。2023 年 Faralli 等^[19]提出了一种新颖的放大时空编码技术,该技术结合了循环 Simplex

和 Simplex 二进制编码,以克服超长距离光纤拉曼传感器在应用传统编码时的局限性。该方案提出了一种链路控制技术来抑制 EDFA 瞬态效应引起的增益演变,避免非线性效应和码字失真导致的性能下降。

4.3 光纤布里渊传感器

光纤中的布里渊散射对温度和应变都敏感,因此光纤布里渊传感器在工程结构的形变和温度监测领域应用广泛。光纤布里渊传感器需要测量光纤中布里渊增益谱的中心频率的变化,通过获取布里渊频移(BFS)来解调传感信息,因此其解调过程本质上是进行高分辨率的光谱分析,需要较高的信噪比来提高频谱解析的分辨率。在这方面,编码带来的高增益可以发挥较大作用^[22],表 3 总结了近年来基于编码技术的光纤布里渊传感器的研究工作。

光纤中的布里渊散射需要光纤中声子的参与,而声子寿命在 10 ns 左右,这就限制了光纤布里渊传感器的空间分辨率一般在米量级。实现亚米量级空间分辨率的方法主要有三种。

1)通过缩短泵浦脉冲可以提高空间分辨率。2016 年, Denisov 等使用 140 ps 码元宽度、相位调制的 PRBS,在 17.5 km 的传感距离上实现了 8 mm 的空间分辨率。但是,窄泵浦脉冲会引起布里渊增益谱(BGS)展宽,降低光纤布里渊传感器的测量精度,具

表 3 基于编码技术的光纤布里渊传感器性能总结
Table 3 Summary of performance of fiber optic Brillouin sensors based on coding technology

Year	Author	Encoding type	Performance	Ref. No
2010	Soto <i>et al.</i>	Coding technique with RZ modulation format	Sensing distance: 25 km; spatial resolution: 1 m; coding gain: 7.2 dB	[54]
2016	Denisov <i>et al.</i>	PRBS	Sensing distance: 17.5 km; spatial resolution: 8.3 mm	[55]
2017	Sun <i>et al.</i>	Rre-pumped Golay	Sensing distance: 50 km; spatial resolution: 70 cm; temperature resolution: <1.5 °C	[56]
2017	Wang <i>et al.</i>	Rre-depletion two-wavelength probe pulse	Sensing distance: 10.164 km; spatial resolution: 2 m; frequency instability of measurement: 0.37 MHz	[23]
2018	Zan <i>et al.</i>	A pair of detection pulses of different durations	Sensing distance: 350 m; spatial resolution: 0.2 m; Brillouin frequency accuracy: 3.2 MHz	[57]
2018	Li <i>et al.</i>	Golay-DPP	Sensing distance: 10.164 km; spatial resolution: 50 cm; frequency uncertainty: 1.4 MHz	[58]
2020	Zan <i>et al.</i>	Golay	Sensing distance: 1280 m; spatial resolution: 40 cm; Brillouin frequency accuracy: 3.47 MHz	[59]
2021	Zhou <i>et al.</i>	Hybrid aperiodic (HA) coding	Sensing distance: 117.46 km; SNR: 8 dB; measurement certainty: 1.67 MHz	[60]
2022	Li <i>et al.</i>	Golay code under oversampling	Sensing distance: 64 km; spatial resolution: 6 m	[61]
2022	Wei <i>et al.</i>	Golay	Sensing distance: 9.63 km; spatial resolution: 0.5 m	[62]
2022	Wang <i>et al.</i>	Random coding	Code length: 512 bit; coding gain: 11.93 dB	[21]

有亚米空间分辨率的光纤布里渊传感器更是如此。为了克服空间分辨率和测量精度之间的相互制约关系,2017年Sun等^[56]实现了采用预泵浦Golay编码的光纤布里渊传感器。通过优化预泵浦脉冲功率,基于Golay互补码编码技术实现了约50 km光纤上空间分辨率为70 cm、温度测量精度为1.5 °C的分布式温度传感,并将测量时间缩短为同等测量条件下预泵浦Simplex码编码系统的约1/30。

2)使用差分脉冲对及其各种演变也能提高空间分辨率^[63-65]。此时,差分之后的信号更加微弱,引入脉冲编码可以有效地提高信噪比,进而提高传感性能。2018年,Zan等^[57]在DCS-BOTDR技术中部署Golay编码。DCS-BOTDR利用一对脉冲持续时间略有不同的探测脉冲来测量布里渊信号,基于两个脉冲之间持续时间的差异实现了亚米量级的空间分辨率。2020年,他们又使用Golay编码对这种窄脉冲进行编码,以

便可以使用一系列编码脉冲来测量光纤,从而使BFS分辨率高于传统的DCS-BOTDR。概念验证实验使用8 bit Golay编码序列,在测量1280 m光纤时实现了0.4 m的空间分辨率和2.7 MHz的布里渊频率解析精度^[59]。2018年Li等^[58]提出了一种结合Golay编码和差分脉冲对的BOTDA传感器,提出了一种混合编码方法,该方法结合了单极Golay编码的特点,可获得与差分脉冲相当的响应。

3)提高空间分辨率的另外一个思路是采用解卷积的方法。由于传感系统的输出是泵浦脉冲与传感光纤的冲激响应的卷积,而发射的泵浦脉冲是已知的,因此可以通过解卷积来反演出传感光纤的冲激响应,获得高空间分辨率。2022年,Li等^[61]利用共同传播的拉曼放大,在过采样条件下引入Golay编码,提出基于全变分正则化的解卷积算法来解决直接译码导致空间分辨率劣化的问题。Wei等^[62]基于解卷积算法后处理技术

来提高差分 Golay 编码光纤布里渊传感器的空间分辨率,并且使用差分脉冲对(DPP)可避免由解卷积引起的布里渊频移(BFS)失真问题,最终在 9.63 km 的传感距离上实现了 0.5 m 的空间分辨率。

通过编码带来的增益,也可以大大延长光纤布里渊传感器的传感距离,提高测量精度。2021 年, Zhou 等^[60]提出了一种新的混合非周期编码方法来改善信噪比。在该方法中,使用两个非周期码(SA 码)以嵌套方式构造新的混合非周期码(HA 码)。HA 码有着两个 SA 码的良好去噪能力,并具有高编码增益。在概念验证实验中,在 2.6 m 的空间分辨率下,SNR 提高了 8 dB,在 117.46 km 的传感范围内,BFS 不确定度改善至 1.67 MHz,有着较大的动态范围提升。2022 年, Wang 等^[21]提出了一种用于 BOTDR 光纤传感器的随机编码方法,该方法将随机码调制的脉冲注入光纤中,以提高信噪比,进一步提高测量精度。与峰值功率为 10 mW 的单脉冲相比,当使用具有相同峰值功率的 512 bit 随机编码脉冲时,在 4.93 km 传感光纤上测量的 BFS 不确定度从 5.34 MHz 降低到 0.38 MHz。实验结果表明,512 bit 随机编码获得了 11.93 dB 的编码增益,进而增大了动态范围。

在光纤布里渊传感器中采用编码脉冲序列,也不可避免地会遇到一些非线性效应带来的失真。Soto 等^[54]分析了编码 BOTDA 传感器中脉冲码型对传感性能的影响,结果表明具有更低占空比的 RZ 码型能够更有效地抑制光纤非线性效应导致的 BGS 畸变,从而充分利用编码带来的增益。Wang 等^[23]则在编码 BOTDR 系统中提出了预消耗双波长探测脉冲的方

法,以抑制 EDFA 瞬态效应导致的编码脉冲序列的波形畸变,提高了对互补 Golay 序列编码增益的利用效率,在 10 km 的测距上实现了 2 m 的空间分辨率和 0.37 MHz 的 BFS 不确定度。

研究者们研究和设计了多种方法来利用各种物理或信号处理方面的机制,以充分利用编码所带来的增益,比如同时利用布里渊增益和损耗来实现双极性 Golay 编码^[66]、为编码增加频域维度的颜色编码^[67]、采用对数归一化数据处理方法^[68]、使用三个频率的探测光来提高双极性编码序列的性能^[69]等。而在具体实现方面,由于光纤布里渊传感器需要解析光谱,计算复杂度比较高,相应的测量时间也较长。引入编码机制虽然提高了信噪比等性能,但进一步增加了光谱解析的计算复杂度,使得测量速度降低。为了提高测量速度,2023 年, Wu 等^[70]提出一种基于 FPGA 的脉冲编解码技术,通过并行化和流水线加速解码过程,在 100 km 测量距离、250 MHz 采样率和 255 bit Simplex 编码的 BOTDA 系统中进行了测试,实现了低至 72 ns 的解码延迟。

4.4 光纤弱光栅阵列传感器

光纤的瑞利散射很弱,且 Φ -OTDR 存在偏振衰落、相干衰落等现象,这劣化了光纤瑞利传感器的性能。在光纤中引入阵列的低反射点,如刻写入弱反射光栅(WFBG),人为地造成光纤中某些位置处产生高于瑞利散射强度的反射点,就可以增强传感信号,提高传感性能。同时,由于这些反射点的反射率很低,因此该方法同样能够支持长距离的传感,成为当前的一个研究热点,表 4 总结了近几年基于编码技术的光纤弱光栅阵列传感器的工作。

表 4 基于编码技术的光纤弱光栅阵列传感器的性能总结

Table 4 Summary of performance of fiber weak grating array sensors based on coding technology

Year	Author	Encoding type	Performance	Ref. No
2018	Dorize <i>et al.</i>	Two mutually orthogonal complementary Golay sequence pairs	Number of fiber Bragg gratings: 10; bandwidth coverage: 18 kHz	[71]
2019	Fu <i>et al.</i>	Interferometric-noise-suppressing Golay	In the case of similar SNR; acquisition time is reduced to 1/8; temperature sensitivity linearity: 0.9986; wavelength demodulation error: ± 5 pm	[72]
2022	Tang <i>et al.</i>	Golay	Sensing distance: 1.5 km ultra-weak fiber Bragg grating (UWFBG); Compared with the individual pulse system, SNR is improved by 4.6 dB	[73]
2023	Zhang <i>et al.</i>	PRBS	Crosstalk rejection ratio: 50 dB; dynamic range: 30 dB	[74]
2023	Zhang <i>et al.</i>	Polyphase unimodular sequence	Sensing distance: 50 km; crosstalk rejection ratio can be enhanced by more than 10 dB over that of PRBS	[45]

光纤弱光栅阵列传感器可用于温度和应变等静态量的测量,此时一般采用强度检测的方式进行接收。

为提高信噪比,扫频激光器往往用于这类传感器来实现波长解调,而编码序列则可以用于解析和定位所需

要解调的某个特定光栅。当采用较长的编码脉冲序列时,脉冲序列会覆盖多个弱光栅,使得这些弱光栅的反射脉冲序列重叠在一起。由于扫频激光源的相干性较强,这些重叠的反射脉冲序列会引起较强的干涉。而强度检测本质上是一种非线性的平方律检波器,接收端的编码序列的相关操作无法消除这类干涉带来的干扰。针对这一问题,2019年,Fu等^[72]将RZ码型的Golay序列用于弱光栅阵列传感器,利用RZ码型较低的占空比,降低脉冲的重叠率,从而提高编码脉冲序列的抗相干噪声能力。结合中等相干光源,基于32 bit编码脉冲序列的系统较未采用编码的系统,实现了5.6 dB的信噪比改善,且在信噪比相似的情况下,信号采集所需的时间减少为未采用编码的系统的1/8,温度传感的线性度高达0.9986,波长解调误差为±5 pm,该系统有效缓了解调精度和速度之间的矛盾。

光纤弱光栅阵列传感器也可以利用光栅反射光场的相位变化来实现高灵敏度振动和声音等动态量的传感,因为其采用OTDR的系统架构,因此也是一种 Φ -OTDR技术。此类系统一般采用相干接收的方式,也就没有强度检测时的相干噪声问题。Tang等^[73]在2022年将单极性互补Golay序列用于光纤弱光栅阵列传感器以实现分布式声学传感(DAS)。系统使用1.5 km WFBG阵列作为传感光纤,通过外差检测和正交解调提取相位信息。得益于互补Golay序列良好的自相关特性,与单个脉冲系统相比,采用互补Golay序列的系统的信噪比提高了4.6 dB。方案更进一步提出在每一个序列码元后插入一个0,等效于将NRZ码型转换为RZ码型,提高序列抗码间干扰的能力,并因

此额外带来了2.7 dB的信噪比增益。

与瑞利散射型 Φ -OTDR系统一样,WFBG型的 Φ -OTDR系统也有偏振衰落的问题。针对该问题,2018年Dorize和Awwad^[71]使用两个相互正交的互补Golay序列对,将这些序列通过偏振复用的方式调制到光脉冲的相位上,然后采用MIMO技术从接收到的信号中恢复出传感光纤的响应。并且该方案可以解析出传感光纤的琼斯矩阵,从而可以从矩阵中消除偏振态变化引起的相位干扰,避免了偏振衰落的问题。Zhang等^[74]则进一步提出了基于延迟偏振复用的方案来解决偏振衰落的问题,通过将一个PRBS序列延迟后形成的两个序列以偏振复用的形式调制到光脉冲上,利用PRBS的自相关特性在接收端解析出两个延迟的序列,从而实现解偏振复用,进而解析出传感光纤的琼斯矩阵和不受偏振态干扰的相位变化信息。该方案具有复杂度低的优点。但PRBS序列的自相关旁瓣水平较高,会引起较大的通道间串扰。随后,Zhang等^[45]提出了基于多相位恒模编码序列的方案,并在WFBG型的 Φ -OTDR系统中进行验证,实验系统装置图如图9所示,采用了AOM来实现对多相位恒模编码序列的调制。图10显示了编码序列在50 km光纤传输前后的非周期自相关函数曲线,多相位恒模编码序列的非周期自相关旁瓣水平显著低于传统二进制编码序列(如PRBS),在多数位置达到-50 dB以下的水平,其总体串扰抑制比PRBS提高了10 dB以上。此外,多相位恒模编码序列虽然码元相位间隔较小,但经过50 km的光纤传输后,其非周期自相关函数曲线较传输前劣化很小,因此基于多相位恒模编码序列的DOFS能够支持长距离的传感。

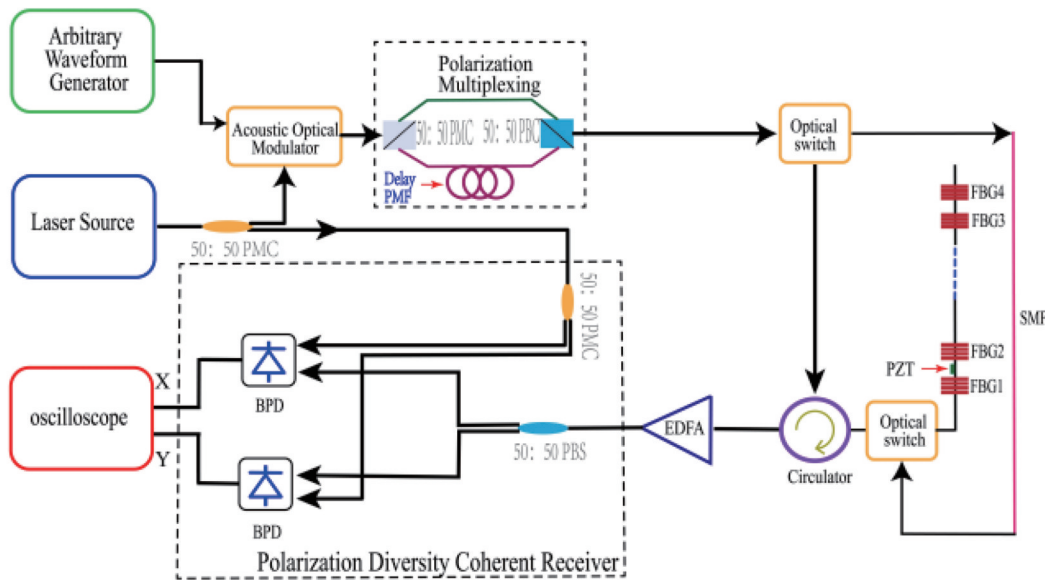


图9 WFBG阵列多相位恒模编码 Φ -OTDR实验装置^[45]

Fig. 9 Φ -OTDR experimental setup of WFBG array with polyphase unimodal coding^[45]

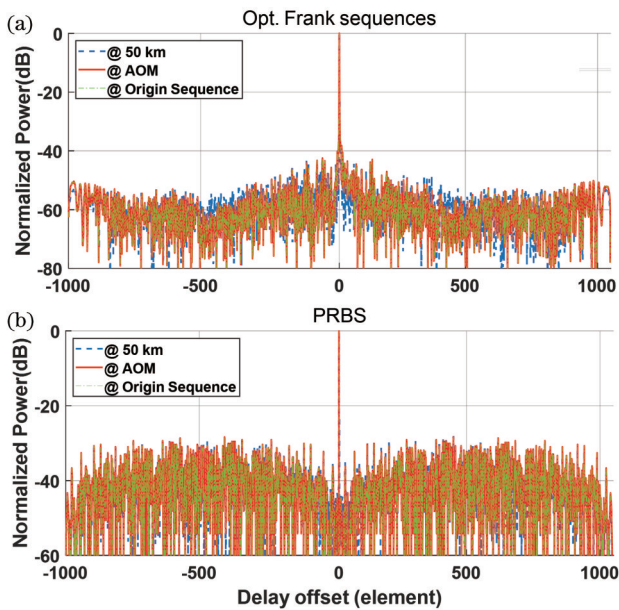


图 10 50 km 光纤传输后两个序列的归一化非周期自相关图^[45]。(a) 1024 bit 码元的优化 Frank 序列;(b) 1023 bit 码元的 PRBS 序列

Fig. 10 Aperiodic autocorrelations of two sequences after 50 km fiber transmission^[45]. (a) Optimized Frank sequence with 1024 bit; (b) PRBS sequence with 1023 bit

5 总 结

经过几十年的发展,分布式光纤传感技术正迎来高速发展的时期,也越来越多地受到各行各业的重视,开辟出更加广泛、更加新颖的应用领域。应用的多样化对 DOFS 的各项性能指标也提出了越来越高的要求。而编码技术在提高 DOFS 性能方面,是一条重要的技术途径。分析了编码技术的基本原理,阐述了编码序列特性与传感性能之间的关系,总结了在 DOFS 领域广泛应用的几类编码方案的特点、性能和实现方案。针对当前主要的 4 类 DOFS,即光纤瑞利传感器、光纤拉曼传感器、光纤布里渊传感器和光纤弱光栅阵列传感器,分析了各类传感器的技术特征及其可采用的编码方案,总结了这些编码方案在提高 DOFS 的信噪比、空间分辨率以及增大传感带宽、传感距离等指标方面所取得的进展。随着分布式光纤传感技术的持续进步,编码技术也会进一步发展,需要研究具有更高性能的编码序列及其实现方案。同时,编码技术还将和其他技术,如频分复用、波分复用、空分复用、信道均衡等技术一起,相互配合应用,以充分利用光纤低损耗、大带宽的特点,为 DOFS 的性能提升开辟出更加广阔的空间。

参 考 文 献

[1] Lu P, Lalam N, Badar M, et al. Distributed optical fiber sensing: review and perspective[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4): 041302.

[2] Liu S Q, Yu F H, Hong R, et al. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(3): 200078.

[3] Li J, Zhang M J. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing[J]. Light: Science & Applications, 2022, 11: 128.

[4] Dong Y K. High-performance distributed Brillouin optical fiber sensing[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 69-90.

[5] Li C L, Tang J G, Cheng C, et al. FBG arrays for quasi-distributed sensing: a review[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(1): 91-108.

[6] 包宇奔, 孙军强, 黄强. 布里渊光时域反射仪分布式光纤传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 210002. Bao Y B, Sun J Q, Huang Q. Distributed fiber sensor based on Brillouin optical time domain reflection technique[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 210002.

[7] 张旭苹, 丁哲文, 洪瑞, 等. 相位敏感光时域反射分布式光纤传感技术[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0106004. Zhang X P, Ding Z W, Hong R, et al. Phase sensitive optical time-domain reflective distributed optical fiber sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0106004.

[8] Karladani A, Mehdi M. Impact of modulation instability on distributed optical fiber sensors[R]. Lausanne: EPFL, 2016: 138.

[9] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296-1302.

[10] 何祖源, 刘银萍, 马麟, 等. 小芯径多模光纤拉曼分布式温度传感器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 0422002. He Z Y, Liu Y P, Ma L, et al. Raman distributed temperature sensor using multimode fiber with reduced core size[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 0422002.

[11] Chen J F, Li H, Liu T, et al. Fully distributed hydroacoustic sensing based on lightweight optical cable assisted with scattering enhanced fiber[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.

[12] Lu P, Mihailov S, Coulas D, et al. Low-loss random fiber gratings made with an fs-IR laser for distributed fiber sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37: 4697-4702.

[13] Westbrook P S, Feder K S, Kremp T, et al. Enhanced optical fiber for distributed acoustic sensing beyond the limits of Rayleigh backscattering[J]. iScience, 2020, 23(6): 101137.

[14] 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.

[15] Jedwab J. A survey of the merit factor problem for binary sequences[M]//Hellesteth T, Sarwate D, Song H Y, et al. Sequences and their applications-SETA 2004. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, 3486: 30-55.

[16] Lee D, Yoon H, Kim P, et al. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on simplex codes [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(1): 322-328.

[17] Wang Y P, Sun X H, Xue Q, et al. The study of the Raman-based optical fiber-folded distributed temperature sensing system with simplex code[J]. Optics Communications, 2018, 420: 200-204.

[18] Dai G Y, Fan X Y, He Z Y. A long-range fiber-optic Raman distributed temperature sensor based on dual-source scheme and RZ simplex coding[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018.

[19] Faralli S, Nannipieri T, Signorini A, et al. Amplified space-time coding for ultra-long-distance Raman distributed temperature sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2023, 12643:

- 1264320.
- [20] 宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射分布式光纤传感器[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1462-1466.
- Song M P, Bao C, Ye X F. Raman distributed optical fiber sensor with simplex coding optical external modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(6): 1462-1466.
- [21] Wang Q L, Bai Q, Liang C S, et al. Random coding method for SNR enhancement of BOTDR[J]. Optics Express, 2022, 30(7): 11604-11618.
- [22] Wan S P, Xiong Y H, He X D. The theoretical analysis and design of coding BOTDR system with APD detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(8): 2626-2632.
- [23] 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.
- [24] Li Y Q, Li X J, Fan H B, et al. SNR improvement in self-heterodyne detection Brillouin optical time domain reflectometer using Golay pulse codes[J]. Optoelectronics Letters, 2017, 13(6): 414-418.
- [25] 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.
- [26] Gnauck A H, Winzer P J. Optical phase-shift-keyed transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 115-130.
- [27] 马祥杰. 超高空间分辨率的布里渊光时域反射仪[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- Ma X J. Brillouin optical time-domain reflectometer with ultra-high spatial resolution[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
- [28] Dorize C, Awwad E, Renaudier J. High sensitivity Φ -OTDR over long distance with polarization multiplexed codes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(20): 1654-1657.
- [29] Li P H, Wang Y, Liu X, et al. Quadrature phase-shift keying modulation with random coding pulse for long-range Φ -OTDR [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(10): 3225-3233.
- [30] Mompó J J, Shiloh L, Arbel N, et al. Distributed dynamic strain sensing via perfect periodic coherent codes and a polarization diversity receiver[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4597-4602.
- [31] Liu S Q, Shao L Y, Yu F H, et al. Quantitative demodulation of distributed low-frequency vibration based on phase-shifted dual-pulse phase-sensitive OTDR with direct detection[J]. Optics Express, 2022, 30(6): 10096-10109.
- [32] Ahmad A, Al-Maashri A. Investigating some special sequence lengths generated in an external exclusive-NOR type LFSR[J]. Computers & Electrical Engineering, 2008, 34(4): 270-280.
- [33] Gold R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1967, 13(4): 619-621.
- [34] Welch L. Lower bounds on the maximum cross correlation of signals[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1974, 20(3): 397-399.
- [35] Goiser A M J. Handbuch der spread-spectrum technik[M]. Vienna: Springer-Verlag, 2013.
- [36] Golay M. A class of finite binary sequences with alternate autocorrelation values equal to zero[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(3): 449-450.
- [37] Frank R. Polyphase codes with good nonperiodic correlation properties[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1963, 9(1): 43-45.
- [38] Frank R. Polyphase complementary codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1980, 26(6): 641-647.
- [39] Zepernick H J, Finger A. Pseudo random signal processing: theory and application[M]. Hoboken: Hans-Jurgen Zepernick, 2013.
- [40] Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(4): 531-532.
- [41] Zhang N, Golomb S W. Polyphase sequence with low autocorrelations[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1993, 39(3): 1085-1089.
- [42] Stoica P, He H, Li J. New algorithms for designing unimodular sequences with good correlation properties[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4): 1415-1425.
- [43] Song J X, Babu P, Palomar D P. Optimization methods for designing sequences with low autocorrelation sidelobes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(15): 3998-4009.
- [44] 吕杰. 基于编码相关的分布式光纤声学传感器[D]. 广州: 暨南大学, 2023.
- Lü J. Distributed optical fiber acoustic sensor based on coding correlation[D]. Guangzhou: Jinan University, 2023.
- [45] Zhang T F, Lin Q C, Lü J, et al. Polyphase unimodular coding in phase-sensitive OTDR for low crosstalk[J/OL]. Journal of Lightwave Technology: 1-8[2023-03-06]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10209151>.
- [46] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
- [47] Lee D, Yoon H, Kim P, et al. SNR enhancement of OTDR using biorthogonal codes and generalized inverses[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 163-165.
- [48] 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.
- [49] Zhang P, Feng Q G, Li W, et al. Simultaneous OTDR dynamic range and spatial resolution enhancement by digital LFM pulse and short-time FrFT[J]. Applied Sciences, 2019, 9(4): 668.
- [50] Liao R L, Tang M, Zhao C, et al. Harnessing oversampling in correlation-coded OTDR[J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1693-1705.
- [51] Wang Z N, Zhang B, Xiong J, et al. Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 6117-6124.
- [52] Tomboza W, Guerrier S, Awwad E, et al. High sensitivity differential phase OTDR for acoustic signals detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(13): 645-648.
- [53] Soto M A, Nannipieri T, Signorini A, et al. Raman-based distributed temperature sensor with 1 m spatial resolution over 26 km SMF using low-repetition-rate cyclic pulse coding[J]. Optics Letters, 2011, 36(13): 2557-2559.
- [54] Soto M A, Bolognini G, Di Pasquale F. Analysis of pulse modulation format in coded BOTDA sensors[J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14878-14892.
- [55] Denisov A, Soto M A, Thévenaz L. Going beyond 1000000 resolved points in a Brillouin distributed fiber sensor: theoretical analysis and experimental demonstration[J]. Light: Science & Applications, 2016, 5(5): e16074.
- [56] Sun Q, Sun S L, Wang J F, et al. Long-range distributed temperature sensing with sub-meter scale spatial resolution based on BOTDA employing pre-pumped Golay coding[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10323: 1032386.
- [57] Zan M S D, Masui Y, Horiguchi T. Differential cross spectrum technique for improving the spatial resolution of BOTDR sensor [C]//2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), April 9-11, 2018, Langkawi, Malaysia. New York: IEEE Press, 2018.
- [58] 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.
- [59] Zan M S D, Mokhtar M H H, Elgaud M M, et al. Pulse coding technique in differential cross-spectrum BOTDR for improving the Brillouin frequency accuracy and spatial resolution[C]//2020 IEEE 8th International Conference on Photonics (ICP), May 12-

- June 30, 2020, Kota Bharu, Malaysia. New York: IEEE Press, 2020: 11-12.
- [60] 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.
- [61] Li Y Q, Zhao C, Wu H, et al. Long-range and high spatial resolution Brillouin time domain sensor using oversampling coding and deconvolution algorithm[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(15): 14883-14891.
- [62] Wei W L, Shen L, Zhao Z Y, et al. Performance enhanced BOTDA sensor using differential Golay coding and deconvolution algorithm[C]//*Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022*, March 6-10, 2022, San Diego, California. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: 1-3.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] 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: 2623-2627.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] Wu F, Li D M, Zhong Y B, et al. FPGA-based fast pulse coding and decoding technique for Brillouin optical time domain analyzer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12605: 126050T.
- [71] Dorize C, Awwad E. Enhancing the performance of coherent OTDR systems with polarization diversity complementary codes [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12878-12890.
- [72] Fu X L, Yang W, Wang J Q, et al. Noise resilient quasi-distributed sensing with an interferometric-noise-suppressing Golay coded optical source[J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25330-25341.
- [73] Tang J G, Wang G D, Lü W H, et al. Distributed acoustic sensing system based on inserting-zero Golay coding with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22 (16): 15985-15990.
- [74] Zhang T F, Lü J, Li W, et al. Coded phase-sensitive OTDR with delayed polarization multiplexing for a WFBG array[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 3708-3718.

Coding Technique for Distributed Fiber Sensors

Lin Quancong, Cheng Linghao*, Lü Jie, Zhang Tianfang, Liang Hao**, Guan Baiou

Guangdong Key Laboratory of Fiber Sensing and Communication Technology, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China

Abstract

Significance Based on Rayleigh, Brillouin, and Raman scattering, and weak reflection arrays in optical fiber, distributed optical fiber sensors (DOFSs) can achieve real-time monitoring with long range and high spatial resolution for multiple parameters such as optical fiber loss, temperature, strain, vibration, and sound. As a result, DOFSs catch more and more attention. The received signals from the sensing fiber of a DOFS are normally very weak and thus the received signal-to-noise ratio (SNR) is quite small. Although the SNR can be enhanced by increasing the optical pulse power launched into the sensing fiber, it is generally limited by fiber nonlinearity and then is upperbounded. A pulse with long duration can also be employed to improve the SNR but the spatial resolution is sacrificed. A better alternative to enhance the SNR without spatial resolution loss is to adopt an optical pulse sequence with some coding at a fairly low power to avoid fiber nonlinearity. Therefore, it has become an essential technique to enhance the performance of a DOFS by a long coded pulse train in DOFS. As technical characteristics of various DOFSs are different, applicable coding scheme has to be carefully designed for a particular DOFS. Design considerations may include several aspects such as code sequence, modulation format, detection scheme, and decoding methods. Hence, it is important and necessary to summarize the existing research on DOFS coding techniques for performance enhancement to guide the future development of this field.

Progress In principle, the response of a DOFS with coding can be considered as the convolution of the coding sequence with the impulse response of the sensing fiber. The aperiodic autocorrelation of the coding sequence is utilized to construct an impulse function, and the impulse response of the sensing fiber can be recovered by correlating the DOFS response with the coding sequence itself at the receiver site. Therefore, the aperiodic autocorrelation characteristics of the coding sequence are critical, which can be evaluated from three aspects of coding gain, spatial resolution, and crosstalk suppression. A sequence with better aperiodic autocorrelation performance is always pursued. The sensing principle of a

DOFS also exerts some effects on coding sequence selection. Unipolar sequences are frequently employed in DOFSs with intensity detection. A typical unipolar sequence is Simplex sequence. Bipolar sequences such as Golay complementary sequences can also be converted to unipolar sequences, and they are popular in DOFSs with phase detection and can be implemented by binary phase shift keying modulation via Mach-Zehnder modulator (MZM) (Fig. 3). A widely employed bipolar sequence is Golay complementary sequence. Polyphase unimodular sequences have also been proposed recently in DOFSs with phase detection for much better crosstalk suppression capability (Figs. 5–8). Such sequences have been realized via modulation by an acoustic-optical modulator (AOM) (Fig. 4).

Various DOFSs with coding techniques have been proposed. For Rayleigh scattering sensors with incoherent optical sources, Simplex sequence, Golay complementary sequences, CCPONS, and other unipolar sequences have been put forward to improve performance such as dynamic range, spatial resolution, and measurement speed. For Rayleigh scattering sensors with coherent optical sources, both unipolar and bipolar sequences have been proposed. Multi-input-multi-output (MIMO) technique has also been demonstrated in a Rayleigh scattering DOFS with polarization multiplexing and coding to increase measurement bandwidth. For Raman scattering sensors, Simplex sequences and other unipolar sequences are popular. The coding sequence performance is frequently degraded by the transient effect of erbium-doped fiber amplifier (EDFA). Many schemes have been proposed to demonstrate their anti-degradation capability. Coding techniques have also long been explored in Brillouin scattering sensors to improve the performance in measurement accuracy, spatial resolution, and measurement speed. In addition to conventional correlation based decoding schemes, deconvolution-based decoding techniques have also been presented. Weak fiber Bragg grating array (WFBGA) is an emerging DOFS, with coding techniques explored in such a DOFS. For WFBGA with interrogation based on intensity, Golay complementary sequences with return zero (RZ) code format have been discussed. For WFBGA with interrogation based on phase, MIMO techniques with Golay complementary sequence and polyphase unimodular sequence using polarization multiplexing have been demonstrated, with much better crosstalk suppression performance (Figs. 9–10).

Conclusions and Prospects After decades of development, DOFSs have been widely employed in various areas and a lot of applications have been developed based on DOFSs. Those applications have raised increasingly higher requirements for DOFS performance. Coding technique is an important technical method to enhance the performance. We analyze the underlying principle of coding technique and manifest the connection between sensing performance and characteristics of coding sequences. Meanwhile, features, performance, and implementation of some widely used sequences in DOFSs are summarized. We analyze the technical characteristics and applicable coding schemes of DOFSs based on Rayleigh scattering, Raman scattering, Brillouin scattering, and WFBGA, and summarize the improvement of SNR, spatial resolution, sensing bandwidth, and sensing range by employing the coding techniques. As the DOFS technology is advancing, coding techniques will be further developed, which calls for the research on higher-performance coding sequences and their implementation schemes. Additionally, coding techniques will also integrate other techniques such as frequency division multiplexing, wavelength division multiplexing, spatial division multiplexing, and channel equalization to explore the fiber characteristics of low loss and high bandwidth. Finally, the space for DOFS performance improvement will be expanded.

Key words sensors; distributed optical fiber sensor; coding technique; fiber Rayleigh sensor; fiber Brillouin sensor; fiber Raman sensor; weak fiber Bragg grating array sensor