

光学学报

基于光脉冲编码的相位敏感光时域反射仪研究进展

刘纯野¹, 万安池¹, 梁永鑫¹, 蒋家林¹, 吴悦¹, 张滨¹, 邓子文¹, 饶云江^{1,2}, 王子南^{1*}

¹电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731;

²之江实验室光纤传感研究中心, 浙江 杭州 311121

摘要 光脉冲编码(OPC)近年来在光纤声波传感领域备受关注,特别是将其与相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)相结合的技术。通过对注入光纤中的探测脉冲进行编码,可在不增加脉冲峰值功率的情况下大幅提高传感信号的信噪比,同时避免了非线性效应的影响;在接收端解码后可获得单脉冲响应,系统空间分辨率由单个脉冲而不是整个探测脉冲序列的长度决定,从而在获得高信噪比传感信号的同时保持了空间分辨率。本文首先回顾了OPC在光纤声波传感领域中的发展历程;然后,重点介绍了本课题组基于OPC的分布式和准分布式声波传感研究进展,特别是在传感带宽提升方面的成效;最后,对基于OPC的光纤声波传感技术未来发展方向进行了探讨。

关键词 光纤传感; 光脉冲编码; 分布式声波传感; 相位敏感光时域反射仪

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231531

1 引言

20世纪70年代,光纤传感技术随着光纤通信技术的发展而迅速兴起^[1],它以光纤为传感介质或光传输路径,通过光波特征的变化感知周围环境变化。随着社会对传感器需求增加以及光传感技术的不断成熟,光纤传感系统得到广泛应用,其中基于光散射原理的光纤传感系统能够在恶劣环境下进行长期监测,并通过光纤中的连续传感点实现对大空间尺度或高空间密度的物理量测量,已经成为边境线安防^[2]、消防预警^[3]、管道监控^[4]、交通线路监管^[5]、特高压直流控制保护^[6]和大型结构健康监测^[7]等领域的重要手段。基于拉曼散射、布里渊散射和瑞利散射,可以实现多种光纤传感方案。瑞利散射是一种由光纤的折射率变化引起的弹性散射,相对于其他两种散射方式,它具有更快的响应速度;此外,瑞利散射型光纤传感基于干涉效应,对所测参数的变化更加敏感。基于瑞利散射的相位敏感光时域反射仪(Φ -OTDR)是分布式光纤传感和准分布式光纤传感中的重要仪器,具有快速响应和高灵敏度等特点。

尽管 Φ -OTDR具有良好的性能,但它仍受到一些自身因素的影响,如信噪比(SNR)、空间分辨率、传输距离等。这些因素之间的相互制约会限制系统的综合性能。 Φ -OTDR解调扰动信噪比与散射信号的强度有

关,而散射信号的强度与探测光能量和传感距离有关。通过调整探测脉冲宽度和峰值功率,可以改善解调扰动信号的信噪比。然而,随着脉冲功率的升高,光纤内部的非线性现象也会增强,例如受激拉曼散射、受激布里渊散射、自相位调制、四波混频等^[8]。因此,脉冲功率的最大值受限于非线性效应的阈值。此外,调整脉冲的宽度也具有一定局限性。一方面,脉冲宽度增加虽然能提高散射信号的强度,从而提高解调信噪比,但会降低空间分辨率;另一方面,根据奈奎斯特采样定律,系统能够探测到的最大频率为测量速率的一半。为了避免信号混叠,测量速率的极限受传感距离的限制,这意味着系统的传感带宽和传感距离之间存在相互制约的关系,提高传感带宽将不得不牺牲传感距离。在大多数情况下,使用光脉冲编码(OPC)技术来实现高精度、长距离以及较高灵敏度的传感,因为它可以克服各种关键参数之间的限制。OPC技术最先被应用到基于拉曼散射、布里渊散射的分布式传感系统,近年来又成功应用到基于瑞利散射或散射增强阵列的传感系统中。

2 OPC在光纤(准)分布式传感中的发展历程

2.1 编码技术在基于拉曼散射的传感系统中的应用

拉曼散射是一种非弹性光散射,光子在与物质相

收稿日期: 2023-09-06; 修回日期: 2023-11-03; 录用日期: 2023-12-07; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(62075030, 41527805)

通信作者: *znwang@uestc.edu.cn

互作用的过程中进行能量转换,其波长相对于入射光子发生偏移,生成波长小于入射光波长的反斯托克斯光,以及波长大于入射光波长的斯托克斯光。利用拉曼散射光进行温度传感时,一般利用反斯托克斯光和斯托克斯光的强度比进行信号解调。为了提升系统的信噪比,OPC 技术被引入到基于单模^[9]或多模^[10]光纤的分布式测温(DTS)系统中。2006年,Bolognini等^[9]使用低功率激光二极管,采用63位 Simplex 循环码实现了17 km 以上的温度传感,空间分辨率和温度分辨率分别为15 m和5 K,动态范围增益为5.8 dB,与传统方案相比,在相同温度分辨率的情况下,该方案的传感距离延长了约12 km。2011年,Soto等^[11]利用高功率脉冲激光器和71位 Simplex 循环码在30 s内完成了26 km的传感实验,同时达到了1 m的空间分辨率,以及3 °C的温度分辨率,解决了在长距离传输上空间分辨率和信噪比降低的问题。接着,他们利用1023位

Simplex 循环码,在5 min内完成了58 km的传感实验,实现了2 m的空间分辨率和4 °C的温度分辨率^[12]。2017年,Rosolem等^[13]将传感距离延伸至62 km,采用127位 Simplex 码实现了10 m空间分辨率,并降低了系统的复杂性,缩短了处理时间。同年,Vazquez等^[14]在1 km的光纤长度下使用511位伪随机码,实现了空间分辨率为2 m、温度分辨率为1.5 °C的传感实验,测量时间为6 s。2018年,AP Sensing公司^[15]在50 km光纤长度下,采用512位 Golay 码完成了空间分辨率为1.6 m、温度分辨率为2 °C(单模光纤)/3.1 °C(多模光纤)的传感实验;在75 km光纤长度下,完成了空间分辨率为6.4 m、温度分辨率为2.3 °C(单模光纤)/1.5 °C(多模光纤)的传感实验^[15]。经过近些年的发展,多种编码技术在DTS领域取得了显著进展(表1),延长了传感距离、改进了温度分辨率,表明脉冲编码技术在DTS领域趋于成熟。

表1 基于拉曼散射的传感系统中的编码技术的应用

Table 1 Application of coding techniques in Raman scattering based on sensing systems

Encoding scheme	Code length	Sensing distance	Spatial resolution	Temperature resolution
Simplex code ^[9]	63 bit	17 km	15 m	5 K
Simplex code ^[11]	71 bit	26 km	1 m	3 °C
Simplex code ^[12]	1023 bit	58 km	2 m	4 °C
Simplex code ^[13]	127 bit	62 km	10 m	—
Pseudorandom code ^[14]	511 bit	1 km	2 m	1.5 °C
Golay code ^[15]	512 bit	50 km	1.6 m	2 °C(single-mode fiber) 3.1 °C(multimode fiber)
		75 km	6.4 m	2.3 °C(single-mode fiber) 1.5 °C(multimode fiber)

2.2 编码技术在基于布里渊散射的传感系统中的应用

由于布里渊散射的频移与外界温度和应变的变化呈线性关系,基于布里渊散射的分布式光纤传感系统应运而生。与DTS的信号解调方式类似,基于布里渊散射的分布式光纤传感一般仅需提取不同频率传感信号的强度,因此可以直接借鉴DTS与脉冲编码结合的成果经验。在基于OPC技术的布里渊时域反射仪(BOTDA)发展历程中,Soto等^[16]使用Simplex码,完成了50 km光纤长度下测量不确定度为2.2 MHz、空间分辨率为1 m、应变分辨率为44 $\mu\epsilon$ 的传感实验。该课题组^[17]还发现使用非归零码会使布里渊增益谱产生畸变,严重影响BOTDA的性能,而使用低占空比的归零码可以有效抑制布里渊增益谱中的失真,并充分利用提供的编码增益,实现高分辨率的应变和温度测量。随后,Liang等^[18]将差分脉冲对技术与BOTDA结合,在50 km传感距离下,采用512位编码实现了0.5 m空间分辨率、0.7 MHz测量不确定度和12 $\mu\epsilon$ 的应变分辨率。2011年,Soto等^[19]利用Simplex码,在120 km长的传感光纤上,实现了空间分辨率为3 m、测量不确定

度为3.1 MHz、应变分辨率为60 $\mu\epsilon$ 的传感。2012年,Mao等^[20]在50 km的传输距离下,使用0.1 ns脉冲宽度的互补码完成了1 cm空间分辨率的传感实验,并且其测量时间相较于使用单脉冲的情况缩短到1/10,这主要归功于编码技术对信噪比的提高。2013年,Soto等^[21]在BOTDA系统中引入双极性Golay码,他们利用两个不同的频率来描述码字的1和-1,使用512位双极性Golay码在100 km传输距离下实现了2 m的空间分辨率和0.8 MHz的测量不确定度,且该技术会产生增益谱和损失谱,从而显著提升了布里渊频移的强度与对比度,有效降低了泵浦光的消耗。2019年,本课题组^[22]采用127位Simplex码结合高阶随机光纤激光放大技术,实现了传感距离超过175 km、空间分辨率为8 m、测量不确定度为2.06 MHz的BOTDA,在报道当年为已知最长的无中继BOTDA系统。2020年,北京邮电大学团队^[23]提出了遗传优化码(GO-code),通过注入一组由遗传算法优化和符合最大去噪标准生成的编码,在接收端经过算法解码即可得到单脉冲响应。该方案在全部编码注入光纤前即可进行解码,且仅需在软件上进行相应调整来改善系统性能,既

节约了测量时间也节省了成本。利用该技术,在拉曼光时域反射(ROTD)系统中实现了 10 km 光纤长度下的实时温度测量;在 BOTDA 中采用 723 位编码,在 100 km 距离下实现了 1 m 的空间分辨率和 2.2 MHz 的测量不确定度,与单脉冲的 18.9 MHz 相比提升了 7.5 倍。在基于布里渊散射的传感系统中,编码技术的研究取得了显著的进展(表 2),包括实现长距离传感、改善空间分辨率和提高信噪比,从而有效提高了系统性能。近年来,许多先进的编码技术不断涌现,例如空时频分组码^[24]、彩色 Simplex 码^[25]等,研究人员也在持续探索不同类型的编码在 BOTDA 中的应用效果。

表 2 基于布里渊散射的传感系统中的编码技术的应用
Table 2 Application of coding techniques in sensing systems based on Raman scattering

Encoding scheme	Sensing distance	Spatial resolution	Measurement uncertainty
Simplex code ^[16]	50 km	1 m	2.2 MHz
Simplex code ^[18]	50 km	0.5 m	0.7 MHz
Simplex code ^[19]	120 km	3 m	3.1 MHz
Complementary code ^[20]	50 km	1 cm	—
Bipolar Golay code ^[21]	100 km	2 m	0.8 MHz
Simplex code ^[22]	175 km	8 m	2.06 MHz
GO-code ^[23]	100 km	1 m	2.2 MHz

2.3 编码技术在基于瑞利散射的传感系统中的应用

瑞利散射是一种由光纤的折射率变化引起的弹性散射,相对于拉曼散射和布里渊散射,具有更快的响应速度。此外,瑞利散射型光纤传感基于干涉效应,对测量的变化更加敏感。传统基于瑞利散射的光时域反射仪(OTDR)使用单个低相干脉冲和直接探测来接收后向瑞利散射信号,根据信号强度曲线进行断点定位。但是在长距离、高空间分辨率的需求下,接收端信号的信噪比往往很低,无法获得高质量的定位结果。因此,人们通过引入 OPC 技术,在不改变单个脉冲峰值功率的同时提升注入总功率,使得散射信号信噪比增大。1980 年,OPC 技术被引入到 OTDR 系统中^[26],以提升断点检测中的传感距离和信噪比。1989 年,科研人员研究并阐明了 Golay 互补码的使用方法以及工作原理,由于该编码自相关结果的叠加能够消除旁瓣,得到完美的互相关峰,因此该编码方式理论上可以得到更优的信噪比^[27]。1993 年, Jones^[28] 对 Simplex 码在 OTDR 系统中的使用进行了研究,发现其可以改善信噪比,还分析对比了 Simplex 码和 Golay 互补码的增益曲线。2004 年, Lee 等^[29] 在 OTDR 系统中采用 255 位 Simplex 码,实现了 4.5 dB 的信噪比提升。随后,该课题组^[30] 对不同编码位数的 Simplex 码增益进行分析,实验所得结果和理论结果相符。2008 年, Sahu 团队^[31] 发现,通过使用互补相关码(CCPONS)可以有效地改善信噪比,最终实现了 3.7 dB 的信噪比提升。2012

年, Muhammad 等^[32] 提出一种新的混合编码技术,混合方案中 Simplex 码和信号平均相结合,将 Simplex 码的码长保持在合理的范围内,并且通过相对较少的平均次数提取更高的增益,有效地减少了由编码造成的测量时间延长,同时也能够保证信噪比的提升,可用于更长距离的检测。

OTDR 直接获取散射信号的强度信息,根据扰动前后两条散射曲线强度的改变判断扰动发生的位置,进行光纤损耗和断点监测,但散射信号强度的改变和扰动大小不存在线性关系,所以不适用于针对温度和应变等物理量的分布式光纤传感。早期的 Φ -OTDR 将 OTDR 中的低相干光源换为高相干光源,可以获得散射信号的强度和相位信息,其中相位变化和应变呈线性关系,进而实现了分布式振动传感。

传统 Φ -OTDR 采用直接探测的形式,只能使用单极性码提升系统性能。2015 年, Muanenda 等^[33] 基于直接探测的 Φ -OTDR 系统,采用 256 位循环 Simplex 码完成了 5 km 光纤长度、5 m 空间分辨率的传感实验,其信噪比相较于单脉冲在特定位置提升了 9 dB。但是,由于该技术尚未实现对外界扰动的定量解调,这一信噪比的提升是在特定位置和特定时刻获得的,并不具有普遍参考意义,因此仍需要进一步改进,以提高系统性能。

OPC 与基于拉曼散射、布里渊散射的分布式传感技术结合得较早,这是因为这类系统的正确解调只依赖于强度信息,从编码脉冲序列的整体响应中恢复出单脉冲响应较为容易。但是,基于瑞利散射的分布式声波传感强烈依赖于散射信号的相位信息,而如何从编码脉冲序列的整体响应中恢复出单脉冲响应的相位信息是一个难题,前期进展较为缓慢。2016 年,西班牙马德里的 Martins 等^[34] 将伪随机二进制序列(PRBS)用于 500 m 的传感实验,实现了 2.5 cm 的空间分辨率。2018 年, Shiloh 等^[35] 在 1 km 长的传感光纤上,使用完全周期自相关(PPA)码获得了 14.7 cm 的空间分辨率。然而,由于需要抑制自相关的旁瓣,使用的编码长度比光纤长度更长,使得扫描速率降低。需要注意的是,上述两个方案都未对系统响应进行线性化,导致系统受到码间串扰的严重影响,无法明确展现出系统对外界扰动的线性解调能力。

2018 年,本课题组^[36] 系统地提出了将编码 Φ -OTDR 系统响应线性化的方法,有效抑制了码间串扰的影响,使得 Golay 编码可以真正有效地应用于 Φ -OTDR 系统,为后续 OPC 技术在 Φ -OTDR 中的发展打下了基础;在演示性实验验证中^[37],基于单极性 Golay 码的 Φ -OTDR 实现了空间分辨率为 0.92 m、传感长度为 10 km 的分布式声波传感。2019 年,西班牙纳瓦拉公立大学的 Mompó 等^[38] 利用脉冲编码在 144 m 长的保偏光纤上实现了空间分辨率为 10 cm、噪

声水平为 $1.1 \text{ mrad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分布式声波传感,但由于编码长度远大于光纤长度,传感带宽受到限制。2019年,本课题组^[39]又提出了基于双极性 Golay 互补码的 Φ -OTDR,并结合所提出的干涉衰落^[40]和频漂消除^[41]方案,在倍增脉冲编码 Φ -OTDR 传感带宽的同时提升了信噪比,并消除了干涉衰落^[42]。2020年,Guerrier等^[43]提出了极化复用的编码方式,虽然信噪比得到了提升,但是补充编码或者码长增加导致测量时间增加。2022年,太原理工大学 Li等^[44]提出一种不带光放大器的 Φ -OTDR,通过在光纤中注入一串随机编码调制的脉冲,无需经过任何光放大器,既可提高信号的信噪比、延长传感距离,又保持了原有带宽、避免了瞬态效应,最终的实验结果表明,在使用 128 位随机编码脉冲时,解调信号的信噪比提高了约 14 dB。瑞利散射相干探测 Φ -OTDR 系统中编码技术的应用如表 3 所示。

表 3 瑞利散射相干探测 Φ -OTDR 系统中编码技术的应用
Table 3 Application of coding techniques in Rayleigh scattering coherent detection Φ -OTDR systems

Encoding scheme	Code length	Sensing distance	Spatial resolution
PRBS ^[34]	19560 bit	500 m	2.5 cm
PPA ^[35]	61627 bit	1 km	14.7 cm
Unipolar Golay code ^[37]	2048 bit	10 km	0.92 m
PPA ^[38]	6211 bit	144 m	10 cm
Bipolar Golay code ^[39]	2048 bit	10 km	0.92 m
Random coding ^[44]	128 bit	42.338 km	—

2.4 编码技术在准分布式光纤传感系统中的应用

以瑞利散射为传感机制的 Φ -OTDR 已具有优秀的传感能力,并得到了广泛的应用,但是瑞利散射信号本身十分微弱的特点,使得 Φ -OTDR 的传感性能受到限制。近年来,在光纤中高质量写入弱反光栅阵列或缺陷点阵列的技术逐渐成熟,该技术通过增强局部反射/散射可将传感信号功率提高,从而发展出准分布式声波传感(Q-DAS)技术。

Q-DAS 的空间分辨率取决于反射/散射增强点的间距,信号强度则取决于探测脉冲强度和反馈增强点的反射率,这样就可以在保持固定空间分辨率的前提下获得更高的信噪比;Q-DAS 的传感带宽也是一个重要的性能指标,它决定了系统能够检测的外界扰动信号的频率范围,但传感距离和传感带宽之间存在相互制约,为了避免信号混叠,两个探测脉冲间需间隔一个往返时间,根据奈奎斯特采样定律,系统的测量带宽和扫描速率有关。因此,若要提升测量带宽,就必须牺牲其测量长度,这就需要一种技术来克服 Q-DAS 系统的传输距离和传输带宽之间的限制。虽然采用传统 FDM、OFDM 等方案可以提升系统的传感带宽,但均需占用额外的系统带宽,且所需带宽与复用通道数目成正比。受光电探测器等电学器件的限制,频域资

源一直以来都十分宝贵。为了进一步提升系统的传感带宽,本课题组首次将“同频正交”的概念引入 Φ -OTDR 领域,在实现不占用额外系统带宽的前提下,提升准分布式声波传感频谱利用率。

2019年,南京大学的 Zhang等^[45]利用频分复用技术(FDM)实现了 Q-DAS 传感带宽 3 倍的提升。频分复用方法可以产生多个时间间隔相同、频率不同的脉冲,将脉冲注入光纤,接收端通过相干探测和带通滤波即可分辨出不同频率的信号;使用该方法,可以提高系统的测量带宽,但同时也会额外消耗系统的带宽,而对于带宽有限的探测器而言,复用的频率数量是有限的。此外,调制多个不同的啁啾脉冲,需要高性能的调制器。2020年,上海交大课题组^[46]利用正交频分复用(OFDM)技术提高了 Q-DAS 的传感带宽。OFDM 技术与 FDM 技术相比具有正交性,这使得频谱能够更有效地被利用,从而增加可复用的信道数量;此外,通过结合游标效应,可以有效地抑制由欠采样引起的原始频率混淆,从而提高系统对窄带信号的测量带宽。但是,该方法的应用范围仅限于窄带信号或单频信号,而且要求欠采样后各频率成分不能互相重叠。2022年,Ogden等^[47]通过使用 FDM 来探测微加工的点反射器光纤,将传感带宽提高了 10 倍,但该方案需要占用额外的接收机带宽来实现信道复用,增加了系统对频谱资源的需求。

2019年,本课题组^[48]提出了间插啁啾脉冲(ICP)技术,它结合脉冲压缩技术,可以实现 3 倍传感带宽的提升^[49];在此基础上,提出了全间插啁啾脉冲(IICP)技术,它可以在提升 5 倍传感带宽的同时,对测量摆率(SR)实现 5 倍提升^[50]。2021年,本课题组^[51]引入多入多出(MIMO)技术,提出基于同频正交编码的 Q-DAS 系统,采用三组同频正交编码,可以在 860 m 的传感距离下,实现传感带宽为 166.7 kHz、空间分辨率为 5 m、应变底噪为 $4.6 \text{ } \mu\text{e}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的准分布式声波传感;在保持接收机带宽不变、同时充分考虑其他性能指标的前提下,可以成倍提高 Q-DAS 系统的测量重复率。2020年,Arbel等^[52-53]通过引入 PPA 码,在 Q-DAS 系统实现了编码阵列匹配解调(C-AMI),使得扫描速率提升了 20 倍。但是,FBG 的数量将受到扫描速度增强因子的显著影响。2022年,本课题组^[54]采取了一种新的方案,即使用同频正交编码(OCSC),将 20 组 OCSC 应用到 Q-DAS 系统中,该技术可以有效地提高传感性能,在不额外消耗频域资源的前提下,相比单脉冲 Q-DAS 系统,可将传感带宽提升 20 倍。在此基础上,通过引入经验模态分解(EMD)算法,成功地抑制了系统中包含激光器频率漂移在内的低频噪声,提升了 Q-DAS 系统探测低频扰动的能力^[55];在实验中,完成了数百千米光纤的末端 1 Hz~10 kHz 频段扰动的探测,在 20 Hz~10 kHz 探测范围内应变底噪均降低到

33 pε/√Hz。准分布式传感系统中编码技术的应用 见表 4。

表 4 准分布式传感系统中编码技术的应用
Table 4 Application of coding techniques in quasi-distributed sensing systems

Scheme	Sensing bandwidth improvement times	Advantage/cost
FDM ^[45]	440 kHz@330 m (3 times)	Using additional frequency-domain resource
Vernier & OFDM ^[46]	25 kHz@51 km (25 times)	Can only be used to detect narrowband signals
ICP ^[48]	166.6 kHz@860 m (3 times)	Using additional frequency-domain resource
IICP ^[49]	277 kHz@860 m (5 times)	System measurement swing rate can be simultaneously increased by a factor of 5; using additional frequency-domain resource
FDM ^[47]	50 kHz@10 km (10 times)	Using additional frequency-domain resource
OCSF ^[51]	166.7 kHz@860 m (3 times)	No additional frequency domain resources
PPA ^[52]	12.5 kHz@76 km (9 times)	The number of sensors requires rigorous design, and the complexity of realizing a multi-sensing point system is high
C-AMI ^[53]	1000 kHz@1.05 km (20 times)	The number of FBGs is limited, using additional frequency-domain resource
OCSC & EMD ^[54]	10 kHz@99.4 km (20 times)	No additional frequency domain resources, real-time demodulation, high strain resolution, high signal-to-noise ratio, low-frequency signals at the Hz level can be measured

3 基于 Golay 编码的 Φ-OTDR

3.1 Φ-OTDR 系统的线性化方式

基于脉冲编码的 Φ-OTDR 并不是一个天然的线性系统,这也是 OPC 技术和 Φ-OTDR 系统迟迟没有成功结合的原因^[56]。针对该问题,本课题组最先阐明了基于外差探测的 Φ-OTDR 线性化是可行的。

Φ-OTDR 的线性化技术可以理解为,若一段长度为 $M+1$ 的编码序列经过系统后所产生的响应是单个脉冲系统响应的延时相加,那么这些脉冲的响应通过后端数据处理,即可得到单个脉冲的系统响应。

假设调制后的脉冲序列为

$$C = [C_0 e^{j\varphi_0}, C_1 e^{j\varphi_1}, C_2 e^{j\varphi_2}, \dots, C_M e^{j\varphi_M}], \quad (1)$$

式中: $C_i, \varphi_i (i = 0, 1, 2, \dots, M)$ 为序列的强度,即 0 或者 1,以及初相位。在较短的时间内,光纤内部散射点的位置和散射强度保持不变,因此单脉冲的散射光也具有时不变特性。同时,脉冲序列是由同一光源产生的连续光经过调制器连续调制而成的,如果假定一个脉冲的初相位为 0,就可以计算出每个脉冲的初相位。连续打入 $M+1$ 个脉冲序列,经过系统后的散射光与本振光拍频,光电探测器探测到的 I 路信号为

$$I(t) = \sum_{i=0}^M C_i \cdot A(t - i\tau) \cdot \cos[\Delta\omega t + \varphi(t - i\tau) + \varphi_c] + \sum_{i=0}^M \sum_{j=i+1}^M 2 \cdot C_i C_j \cdot A(t - i\tau) \cdot A(t - j\tau) \cdot \left\{ \cos[\varphi(t - i\tau)] \cdot \cos[\varphi(t - j\tau)] \right\}, \quad (2)$$

式中: A 为散射光、本振光以及探测器响应系数以及耦合器带来的系数; t 为时间; τ 为两个相邻两个码字的时间间隔; $\Delta\omega$ 为拍频信号的频率; φ_c 为散射光与本振光的初始相位差; φ 为每个散射单元干涉的相位结果。式(2)等号右边第一项是各个码字散射光与本振光的拍频信号,由于探测器的带宽有限,不考虑其高频项;第二项是码字之间的拍频项,它会导致码间串

扰,使得系统的线性特性被破坏,因此必须采取措施来消除这一项。经过观察,这一项的频率处于低频范围,而且它没有本振信号参与,完全由散射信号构成,功率要比第一项低得多,因此在外差探测后,通过带通滤波即可滤除该项。最后得到一个位于中频的 I 路信号,并通过数字域的下变频将其转换为基带信号,即

$$I(t) = \sum_{i=0}^M C_i \cdot A(t - it) \cdot \cos[\varphi(t - it) + \varphi_c]. \quad (3)$$

根据式(3),长度为 $M+1$ 的序列系统响应为每个码字系统响应的线性相加,而单脉冲散射光具有时不变的特性。因此,基于I/Q相位解调的 Φ -OTDR系统可称为线性时不变(LTI)系统。

式(3)可以写成卷积的形式,即

$$I = C * h(t), \quad (4)$$

式中: $h(t) = A(t) \cdot \cos[\varphi(t) + \varphi_c]$; * 为卷积符号。 Φ -OTDR可视为一个LTI系统,它的单脉冲响应为 $h(t)$ 。采用外差探测和带通滤波技术可以有效地抑制码间串扰,再将中频信号转换到基带,进而获得一个完美的线性系统。

3.2 单极性 Golay 编码 Φ -OTDR 原理

Golay 编码最初由 Golay 等^[57]在 1961 年提出, Nazarathy 等^[27]在 1989 年第一次将其应用于 OTDR 系统,用于提升信号的信噪比。Golay 编码由两组互补的序列组成,每组序列的码字分别为 1 和 -1。这两组序列自相关的互补性见式(5),这使得采用 Golay 编码可以得到完美的冲激响应,而不受旁瓣的影响。

$$A_k \otimes A_k + B_k \otimes B_k = 2M\delta_k, \quad (5)$$

式中: M 表示码字长度; A_k 和 B_k 为 Golay 码一组两个长为 k 的码字; δ_k 为单位冲激响应函数。

$$\delta_k = \begin{cases} 1, & k=0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (6)$$

在仿真实验中,使用长度为 32 的 Golay 码,其仿真结果如图 1 所示。从仿真结果可以看到,A 组和 B 组码字的自相关均存在旁瓣,但由于旁瓣的互补性,其自相关之和并不存在旁瓣。

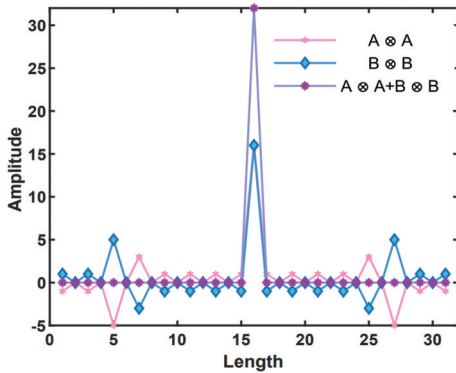


图 1 32 位 Golay 码自相关及相加结果^[41]

Fig. 1 Autocorrelation and summation results for 32-bit Golay code^[41]

由于 Golay 码的码字由 1 和 -1 组成,而光信号的强度不可能为负值,因此需要通过将 0 和 1 的电平相减计算出一 1,从而将 A 和 B 两组码字分割成 4 组:

$$\begin{cases} A_{1k} = \begin{cases} 1, & A_k = 1 \\ 0, & A_k = -1 \end{cases} \\ B_{1k} = \begin{cases} 1, & B_k = 1 \\ 0, & B_k = -1 \end{cases} \\ A_{2k} = \begin{cases} 0, & A_k = 1 \\ 1, & A_k = -1 \end{cases} \\ B_{2k} = \begin{cases} 0, & B_k = 1 \\ 1, & B_k = -1 \end{cases} \end{cases}. \quad (7)$$

如果 A_k 和 B_k 是长为 M 的一对互补序列,其中 h 表示系统的冲激响应,那么 Φ -OTDR系统在采用 Golay 编码时,接收到的拍频散射信号可以表示为

$$i_{A,B}(t) = h(t) * s(t) * A_k, \quad (8)$$

式中: $s(t)$ 为单脉冲所对应的调制后的光信号。可以将 $h(t) * s(t)$ 定义为单脉冲的系统响应 $i_0(t)$,当系统传输单极性 Golay 码时,对应的 Golay 码的单脉冲响应可以表示为

$$\hat{I}(t) = \frac{[I_{A1}(t) - I_{A2}(t)] \otimes A + [I_{B1}(t) - I_{B2}(t)] \otimes B}{2M} = I(t) + \frac{\sum_{k=1}^M [A_{1k}e_1(t) + A_{2k}e_2(t) + B_{1k}e_3(t) + B_{2k}e_3(t)]}{2M}, \quad (9)$$

式中: \otimes 为互相关计算符号; $e(t)$ 为系统中的白噪声。 M 位编码在强度上的增益为

$$G = \sqrt{\frac{\sigma^2}{4} / \frac{\sigma^2}{M}} = \frac{\sqrt{M}}{2}. \quad (10)$$

在进行实验验证时,单脉冲/编码脉冲的持续时间为 40 ns,采用 128 位 Golay 编码,施加 300 Hz 的正弦扰动,分别测试了单脉冲、单脉冲四次平均、Golay 编码情况下的系统响应,对散射信号进行相位解调得到的外部扰动信号如图 2 所示。图 2(a)所示为单脉冲的结果,图 2(b)所示为单脉冲四次平均的结果,图 2(c)所示为 128 位 Golay 编码的结果。直接平均和 Golay 编码都可以提高解调信号的信噪比,但 128 位 Golay 编码的信噪比改善效果更好。单脉冲、单脉冲四次平均和 128 位 Golay 编码的噪声方差分别为 0.0792 rad^{-2} 、 0.0210 rad^{-2} 和 $0.00009046 \text{ rad}^{-2}$, 128 位 Golay 编码的噪声方差与单脉冲四次平均相比减小了 13.7 dB。

为了进一步证明 OPC Φ -OTDR 的性能,使用频谱复杂的波形进行扰动实验,并施加从 100 Hz 到 1 kHz 的线性啁啾信号,图 3 所示为采用线性啁啾脉冲进行实验的结果。图 3(a)、(b)所示分别为单脉冲四次平均后和采用 128 位 Golay 编码的时域结果,图 3(c)、(d)所示为图 3(a)、(b)的短时傅里叶变换(STFT)结果。可以看到,128 位 Golay 编码在时域和频域上的解调结果都优于单脉冲经过四次平均处理的解调结果。

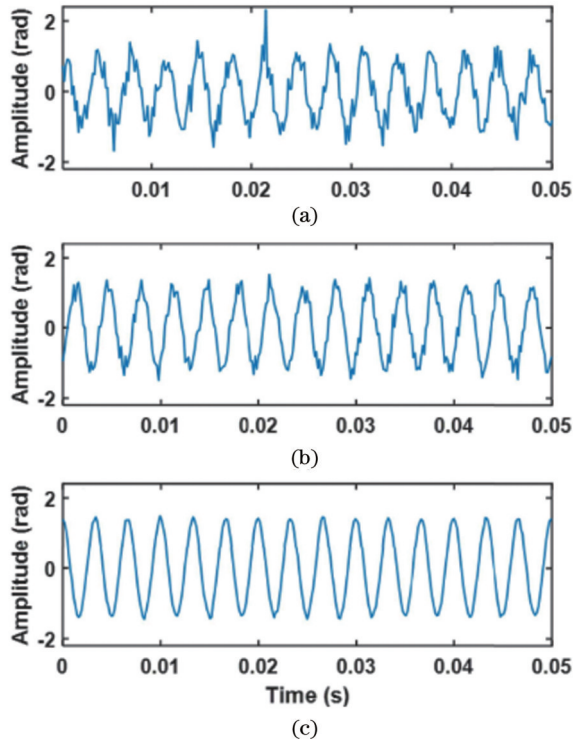


图 2 外部扰动的解调结果^[37]。(a)单脉冲结果;(b)单脉冲四次平均后的结果;(c)128位Golay编码结果

Fig. 2 Demodulation results for external perturbations^[37]. (a) Single-pulse result; (b) single pulse result after four times averaging; (c) 128-bit Golay coding result

3.3 双极性 Golay 编码 Φ -OTDR 原理

与单极性 Golay 码相比,双极性 Golay 码可缩短一半的测量时间,提高测量带宽;与四次打入脉冲相比,两次打入脉冲引入的不确定性相应减少。因此,本课题组对基于双极性 Golay 码的 Φ -OTDR 系统进行研究。

在 Φ -OTDR 系统中引入传统的相移键控技术,它可以通过改变相位实现双极性编码。此外,相干技术不仅可以接收光的强度,还可以获取光场的相位信息,因此,采用相移键控的调制方式和相干探测的接收方式,实现了双极性编码,提高了系统效率。经过调制的编码信号可表示为

$$s(t) = \sum_{i=1}^M \exp \left[j2\pi f_c (t - i\tau_p) + j \frac{C_i + 1}{2} \pi \right] \text{rect} \left(\frac{t - i\tau_p}{\tau_p} \right), \quad (11)$$

式中: τ_p 为码字的宽度; f_c 为调制频率; C_i 表示双极性 Golay 码的第 i 个码字。

单脉冲延迟叠加即是编码序列,双极性码的散射信号可以用光纤外差传递函数和调制编码序列的卷积形式来表示,则通过互相关解码可计算出单脉冲的响应:

$$\hat{I}(t) = \frac{I_A(t) \otimes A + I_B(t) \otimes B}{2M} = I(t) + \frac{\sum_{i=1}^M [A_i e_1(t) + B_i e_2(t)]}{2M}, \quad (12)$$

式中: e_1 和 e_2 分别为编码序列 A 和 B 对应的系统中白噪声; I_A 和 I_B 分别为编码序列 A 和 B 得到的单脉冲响应。经过计算, M 位双极性 Golay 码在强度上的增益为

$$G = \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} / \frac{\alpha^2}{2M}} = \sqrt{M}. \quad (13)$$

在 10 km 的传感光纤中进行实验验证,将 2048 位 8 ns 的双极性 Golay 码解码后的结果与单极性的结果进行对比。当进行扰动解调时,将差分距离设置为 0.92 m,结果如图 4 所示。可以看到,与单极性码相比,双极性码的解调信噪比提高了 7.1 dB。

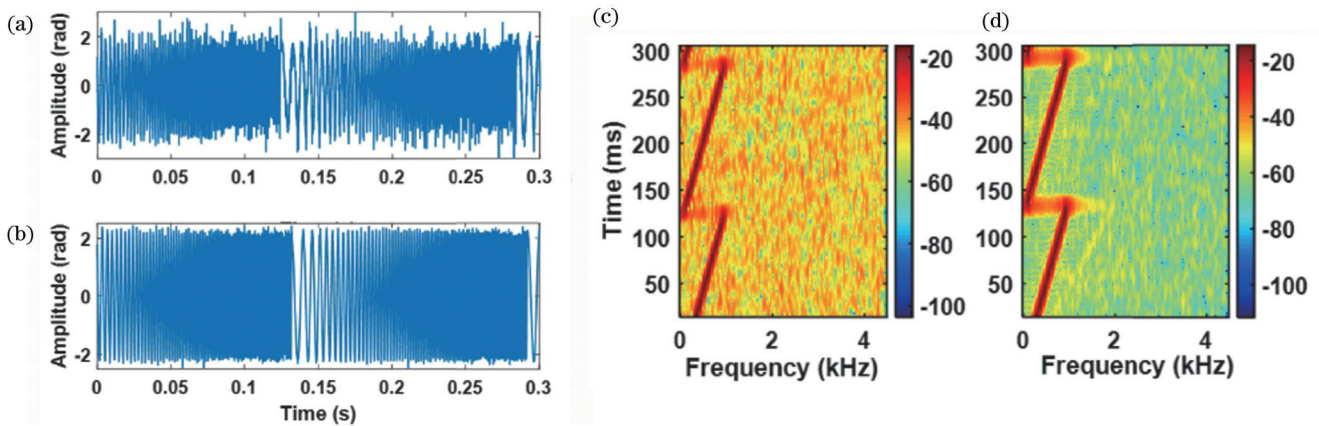


图 3 线性啁啾信号的解调结果^[37]。(a)(c)单脉冲平均四次的时域谱和 STFT 结果;(b)(d)128位Golay编码的时域谱和 STFT 结果

由此可见,与单极性码相比,双极性 Golay 码在提高 1 倍测量带宽的同时,解调扰动信号的信噪比也得

到了明显提升,这对探索 Golay 码在 Φ -OTDR 系统中的应用具有重大意义。

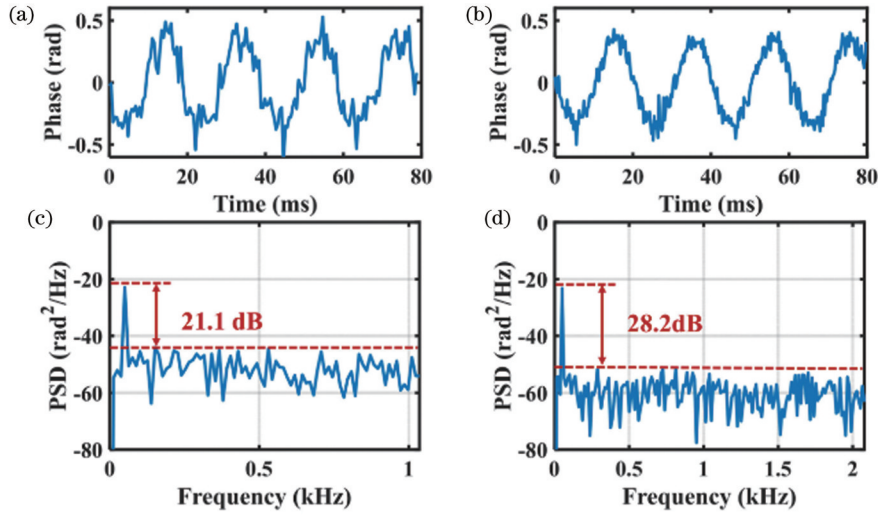


图 4 光纤尾端解调的外部扰动^[39]。(a)(c)单极性码解调的时域曲线和功率谱密度；(b)(d)双极性码解调的时域曲线和功率谱密度
Fig. 4 External perturbation of fiber tail demodulation^[39]. (a) (c) Time-domain profile and power spectral density of unipolar code demodulation; (b) (d) time-domain profile and power spectral density of bipolar code demodulation

3.4 干涉衰落和频率漂移抑制

3.4.1 干涉衰落抑制

编码系统受到干涉衰落和频率漂移影响时,性能会大幅下降。为了解决该问题,本课题组提出了频谱提取与组合技术和参考光纤分布式频率漂移补偿方案,分别补偿干涉衰落和频率漂移。

在对 Φ -OTDR 的干涉衰落抑制方法进行研究时发现,这些方法通常需要使用多种不同频率的光源或不同频率、相位的探测脉冲。但是编码系统本身就比较复杂,如果引入复杂的抑制方案,会增加系统的复杂度,因此,本课题组提出一种新的方案来解决这一难题,即通过频谱提取与组合 (SERM) 技术来实现干涉衰落的抑制。

散射信号的频谱在各个频率上是统计无关的,那么从中抽取两个不相邻的子带,其幅度的抖动也会是统计无关的。再根据傅里叶逆变换的正交性,其时域上强度抖动也是统计无关的。这说明,散射信号本身就存在可抑制干涉衰落的无数个自由度,但是并不能随意提取子带,因为这会导致空间分辨率恶化^[58]。

在单脉冲中,选择两个一阶旁瓣和一个主瓣,并通过傅里叶逆变换来获得 3 条具有不同强度抖动的时域曲线,并通过旋转矢量求和法将这 3 条曲线相加。

在实验中,采用线宽小于 100 Hz 的连续波激光器,其输出峰值功率高达 168 mW。激光经过一个 1:9 的耦合器后被分成两部分,10% 为本振光,90% 的光则进入声光调制器 (AOM),在信号生成器 (SG) 的驱

动下调制出一个脉宽为 100 ns、频率漂移为 300 MHz、重复频率为 43 kHz 的探测脉冲。通过将一个标准压电陶瓷器 (PZT) 连接到 2.1 km 的光纤上,模拟光纤在外部环境中的变化情况。通过对比 3 种不同的干涉衰落抑制方法——滤波法、傅里叶积分法以及频谱提取与组合技术,得出如图 5 所示的实验结果。图 5 上面一行为归一化的散射信号强度曲线,下面一行为 100 条差分相位曲线。

原始信号的强度曲线如图 5(a) 所示,其强度十分不稳定,存在许多干涉衰落点。Hartog 认为强度低于均值 20% 的点即为干涉衰落点,按照这种定义方式,原始强度曲线、使用滤波法后、使用傅里叶积分法后和使用频谱提取与组合技术之后,干涉衰落点的占比分别为 3.6%、2.7%、2.5% 和 0.04%,相比于前两种方法,频谱提取与组合技术抑制干涉衰落效果明显更好。

3.4.2 频率漂移抑制

为了抑制频率漂移的影响,采用参考光纤进行补偿,实验原理图如图 6 所示。由于参考路与传感路注入脉冲的时间完全相同,实验光路的长度也完全相同,在不考虑外界环境影响的前提下,由参考路获得的频率漂移与传感路获得的频率漂移是一致的。

对于 Golay 编码 Φ -OTDR 系统,获得序列 A 和 B 对应的参考路相位后,分别和传感路相位相减,再进行互相关解码操作,就可以提升解码的峰值旁瓣抑制比 (PSR)。序列 A 和 B 对应的参考路频率漂移为 Δf_{2m} 和 Δf_{2m+1} ,对传感路进行补偿,可以得到

$$\begin{cases} i_{A,b}(t+2mT) = \exp(j2\pi\Delta f_{2m}t) \cdot \exp(-j2\pi\Delta f_{2m}t) \cdot h(t) * m(t) * A = h(t) * m(t) * A \\ i_{B,b}(t+2mT+T) = \exp(j2\pi\Delta f_{2m+1}t) \cdot \exp(-j2\pi\Delta f_{2m+1}t) \cdot h(t) * m(t) * B = h(t) * m(t) * B \end{cases}, \quad (14)$$

对应解码可以得到解码后的脉冲响应:

$$i_c(t) = i_{A,b}(t+2mT) \otimes A + i_{B,b}(t+2mT+T) \otimes B = 2Mi_b(t). \quad (15)$$

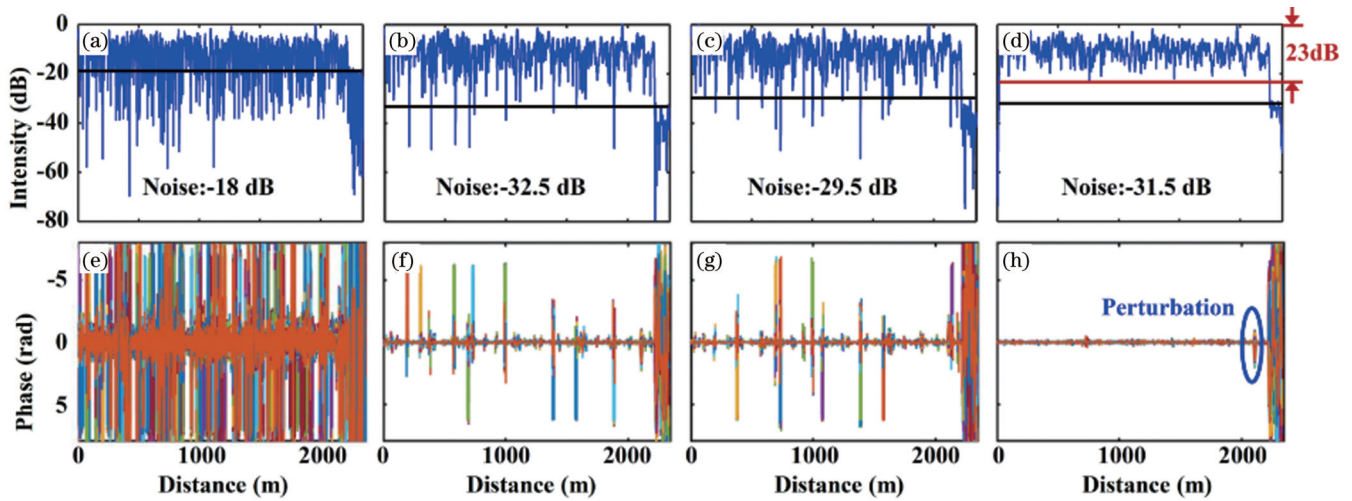


图 5 散射信号的强度和差分相位曲线^[40]。原始信号的(a)强度和(e)差分相位曲线;使用滤波法后的(b)强度和(f)差分相位曲线;使用傅里叶积分法后的(c)强度和(g)差分相位曲线;使用SERM法后的(d)强度和(h)差分相位曲线

Fig. 5 Intensity profiles and differential phase profiles of scattered signals^[40]. (a) Intensity profile and (e) differential phase profile of original signal; (b) intensity profile and (f) differential phase profile after using the filtering method; (c) intensity profile and (g) differential phase profile after using Fourier integration method; (d) intensity profile and (h) differential phase profile after using SERM method

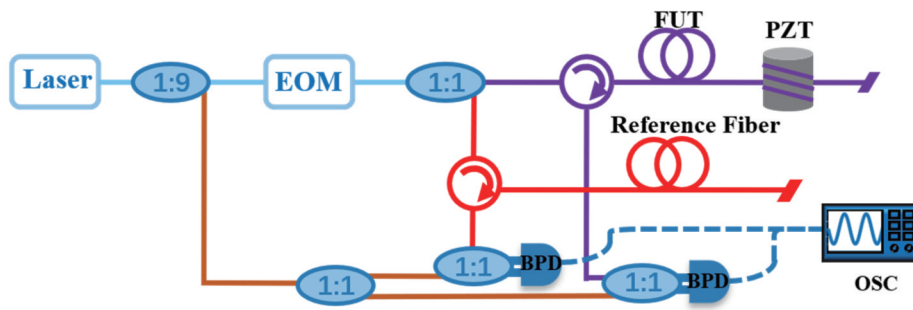


图 6 分布式频率漂移补偿原理图^[41]

Fig. 6 Schematic of distributed frequency drift compensation^[41]

此时,双极性 Golay 码解码后不再受频率漂移的影响,与理论脉冲响应吻合。为了验证频率漂移补偿方法对系统性能的提升效果,采用图 7 所示的装置进行实验。采用 9.7 km 的传感光纤和 10 km 的参考光纤,并将线宽为 100 Hz 的 X15 激光器作为光源。探测

脉冲是间隔为 8 ns、长度为 120 μs 的 2048 位 Golay 编码脉冲,这部分光被分成传感光和参考光两部分。采用掺铒光纤放大器(EDFA)保证脉冲的能量,两个 PZT 分别设置在 4.7 km 处和传感光纤末端。

数据处理过程如图 8 所示:首先通过 SERM 方法

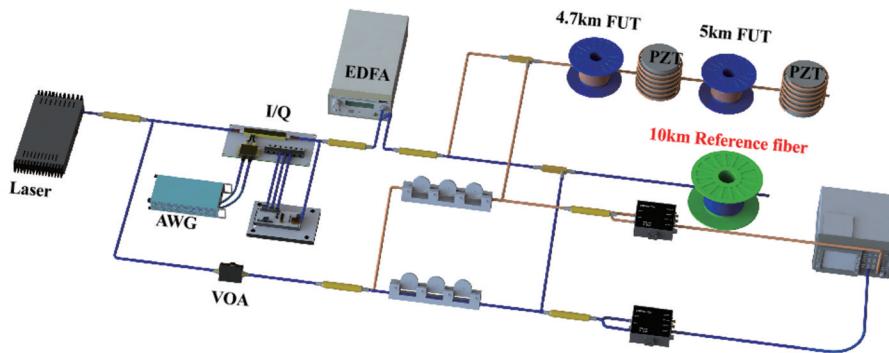


图 7 实验装置图^[41]

Fig. 7 Diagram of experimental setup^[41]

对原始散射信号中的干涉衰落进行抑制,计算出相应的频率漂移并进行抑制;然后,进行相应的解码处理,

解码后再次利用 SERM 进行干涉衰落抑制;最后,通过解调相位得到外部扰动信号。

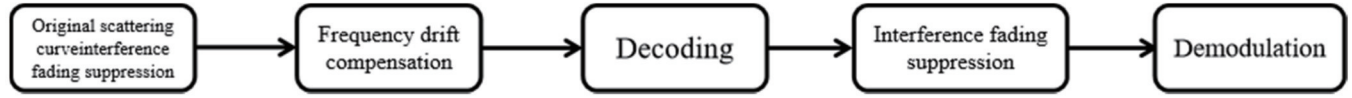


图 8 处理流程^[59]

Fig. 8 Processing flow^[59]

分别将两个频率为 200 Hz 和 100 Hz 的正弦扰动信号施加到 PZT 上,空间分辨率为 6 m。频率漂移补偿前后的信噪比分别如图 9 和图 10 所示。可以看到,

频率漂移补偿前后,时域和频域信号都发生了明显的改变,两个扰动信号的信噪比分别增加了 2.8 dB 和 18.9 dB。

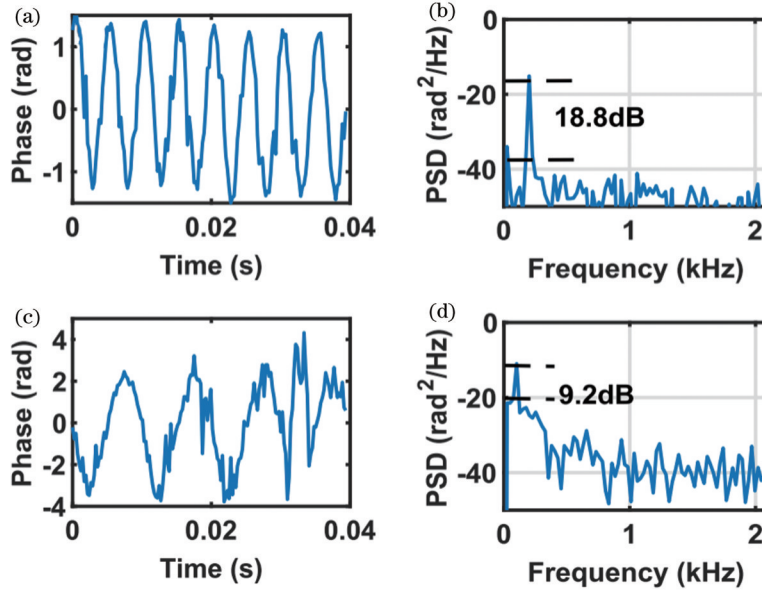


图 9 补偿前 PZT1 和 PZT2 的解调扰动^[59]。(a) PZT1 的时域谱;(b) PZT1 的频域谱;(c) PZT2 的时域谱;(d) PZT2 的频域谱

Fig. 9 Demodulation perturbation of PZT1 and PZT2 before compensation^[59]. (a) Time domain spectrum of PZT1; (b) frequency domain spectrum of PZT1; (c) time domain spectrum of PZT2; (d) frequency domain spectrum of PZT2

干涉衰落和频率漂移一直是限制编码在 Φ -OTDR 系统中应用的重要因素,编码自身会带来系统复杂度的提升,这使得无法使用传统的抑制手段来降低干涉衰落和频率漂移的影响,因此针对编码系统中干涉衰落和频率漂移抑制的探索尤为重要。本课题组提出的 SERM 方案和参考光纤补偿方案可以快速、有效地提升编码系统的性能。

$$C^i = G [\exp(j\varphi_1^i), \exp(j\varphi_2^i), \dots, \exp(j\varphi_n^i)], \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad (16)$$

式中: φ 表示相位; G 表示编码的幅值。

每组编码将被调制成一组脉冲序列,第 i 个序列的调制函数为

$$p^i(t) = G \exp(j2\pi ft) \cdot \text{rect}\left(\frac{t - k\tau}{\tau}\right) = G \sum_{k=1}^n \exp[j(2\pi ft + \varphi_k^i)] \cdot \text{rect}\left(\frac{t - k\tau}{\tau}\right), \quad (17)$$

式中: f 为外差探测的频移; τ 为脉冲宽度。

经过光载波完成调制过程,并且在重复周期 T_{rep} (略长于 $2nL/c$) 时间内,以等间隔注入传感光纤,则反射光经过相干探测和光场恢复之后可表示为

$$E'(t) = \sum_{i=1}^M p^i(t - iT_{\text{rep}}/M) * h(t). \quad (18)$$

随后的步骤是解码,通过将复原的光信号与编码脉冲序列进行互相关计算,经过解码的传感信号可表示为

4 基于正交多相码的准分布式声波传感原理

为了在长距离、大带宽环境下构建 Q-DAS 系统,本课题组引入了 MIMO 技术的理念,基于 OPC 技术开发了 OCSC 方案。该方案可在提高传感带宽的同时,改善解调扰动信号的质量,提高信噪比,为 Q-DAS 系统在长距离和大带宽条件下的应用奠定了基础。

在该方案中,所调制的脉冲具有相同的振幅和不同的相位,相位的取值范围为 $[0, 2\pi]$ 。采用的 M 组 n 比特编码为

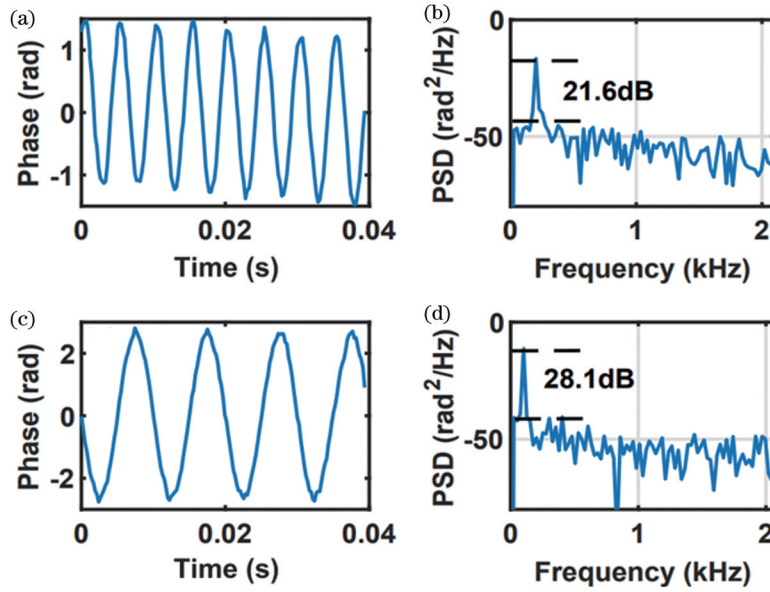


图 10 补偿后 PZT1 和 PZT2 的解调扰动^[59]。(a) PZT1 的时域谱; (b) PZT1 的频域谱; (c) PZT2 的时域谱; (d) PZT2 的频域谱
Fig. 10 Compensated demodulation perturbation of PZT1 and PZT2^[59]. (a) Time domain spectrum of PZT1; (b) frequency domain spectrum of PZT1; (c) time domain spectrum of PZT2; (d) frequency domain spectrum of PZT2

$$E'(t, i) = E(t) \otimes p^i(t) = h(t) * p^i(t - iT_{\text{rep}}/M) \otimes p^i(t) + \sum_{j=1, \dots, M, j \neq i} h(t) * p^j(t - jT_{\text{rep}}/M) \otimes p^i(t). \quad (19)$$

式(19)等号右边第一部分是所需的解码曲线,第二部分则是第 i 组编码与其他编码造成的串扰,这会对需要的解码信号产生干扰。正交编码的自相关和互相关函数的叠加过程如图 11 所示。鉴于需要尽量压制第二部分,选用的编码需要遵从以下两个原则:

1) 拥有较高的自相关旁瓣抑制比 (APSL), 即在

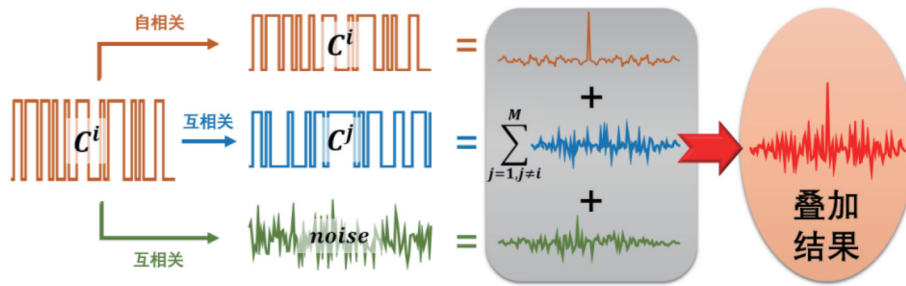


图 11 正交编码自相关解码原理^[60]

Fig. 11 Orthogonal coding autocorrelation decoding principle^[60]

通过选取合适的码组之后,式(19)可转化为

$$E'(t, i) \approx h(t) * P_{\text{main}}(t - iT_{\text{rep}}/M), \quad (20)$$

式中: P_{main} 表示 $p^i(t)$ 的自相关函数主瓣。

从式(20)中观察到,通过解码过程,散射的编码序列能够恢复为单脉冲的散射光,重复周期 T_{rep} 亦相应地缩短到 $1/M$ 这也使系统的测量带宽提高了相同的倍数。

图 12 展示了基于 OCSC 设计的 Q-DAS 系统。整

式(19)的第一项中,第 i 组编码的自相关计算结果增大。

2) 拥有较高的互相关旁瓣抑制比 (CCPL), 即第 i 组编码进行自相关后的峰值高于其与其他组编码互相关的值。

第一个原则保证 Q-DAS 系统的空间分辨率依然与 FBG 的距离相等,而不会增大;第二个原则确定是否能够从混杂的传感信号中确切地抽取出一条曲线,即所需的某条曲线的传感信号是否会遭受严重的干扰,这决定了解码信号的质量。

个系统的传感光纤由一段 99.4 km 长的 SMF 和 4 个 FBG 阵列构造而成。每个 FBG 的反射率都是 -10 dB, 并且每个 FBG 之间都间隔 10 m, 则其空间分辨率为 10 m。

在仿真、分析激光器频率漂移对 OCSC 方案的影响中,采用 20 组正交多相码型,其自相关函数和互相关函数如图 13 所示, APSL 与 CCPL 的数值都达到 -14.1 dB。

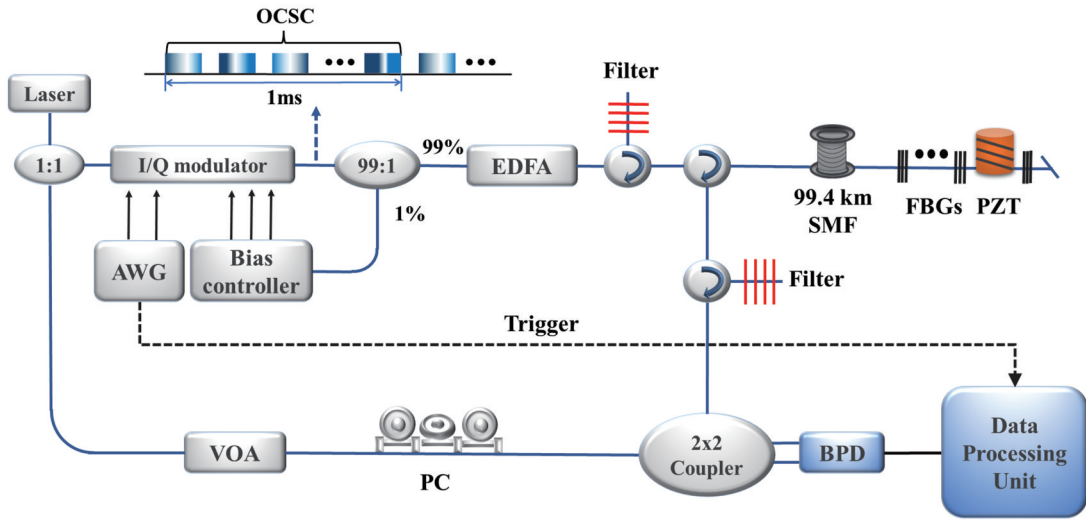


图 12 长距离、大带宽 Q-DAS 系统结构图^[54]

Fig. 12 Q-DAS system structure with long-range and large-bandwidth^[54]

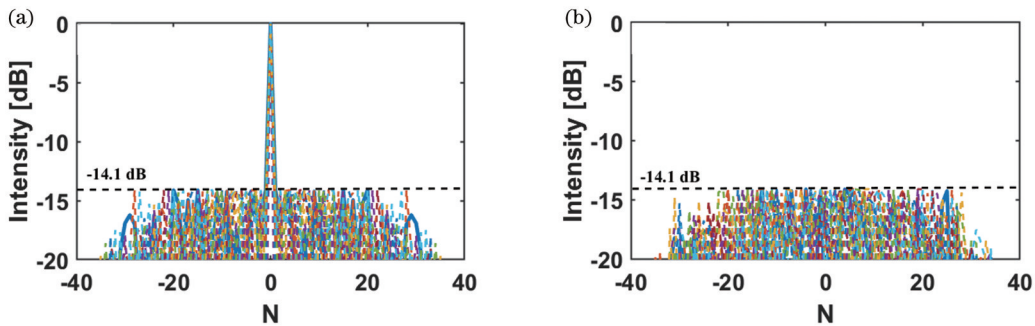


图 13 20 组正交多相码的自相关函数和互相关函数^[61]。(a) 自相关函数；(b) 互相关函数

Fig. 13 Autocorrelation function and cross-correlation function for 20 sets of orthogonal multicode^[61]. (a) Autocorrelation function; (b) cross-correlation function

为了确认使用 20 组正交多相码能够达到令系统传感带宽增大 20 倍的效果,在 PZT 上施加不同频率的正弦信号来模拟外部干扰,并对解调信号的时频域信号进行观察。为防止相邻瑞利散射信号曲线重叠,设置脉冲重复周期为 1 ms。在未经过信道复用的 Q-DAS 系统中,1 ms 的脉冲重复周期相当于系统 1 kHz 的测量重复频率及 500 Hz 的传感带宽。为了展示 OCSC 方案的效果,在 PZT 上分别施加 0.9、3.9、6.9、9.9 kHz 的正弦信号,并观察解调信号。

不同频率扰动信号在经过解调后,其 PSD 如图 14 所示。解调信号频率峰值和噪声基底之比的最小值达到 21.5 dB,这证明了该方法能够准确地检测每一个频率的扰动信号;最大的噪声基底为 $-50.6 \text{ dB} \cdot \text{rad}^2/\text{Hz}$,即在 10 m 的空间分辨率下,噪声水平降低到 $33 \text{ pe}/\sqrt{\text{Hz}}$,这也说明系统有良好的应变感知能力^[61]。

与未复用的 Q-DAS 系统相比,复用的 Q-DAS 系统在带宽上呈现出了 20 倍的提升效果。OPC 技术的引入也使得 OCSC 方案能够在空间分辨率不恶化的情况下,极大地提高系统的信噪比,从而实现长距离

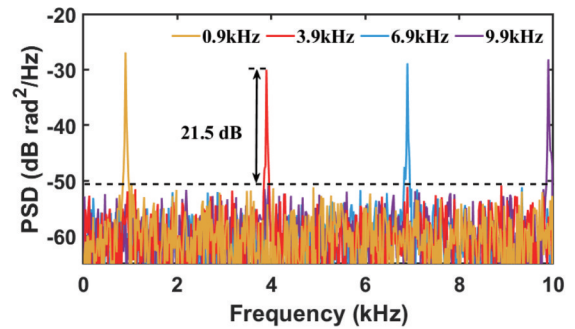


图 14 不同频率扰动信号的 PSD 图^[61]

Fig. 14 PSD plots of perturbed signals at different frequencies^[61]

测量。OCSC 方案利用了传感信道在数字领域的正交性,这与通过光纤光栅之间的空间距离来提升扫描频率的方案有着本质区别,因此不会受到特定的限制。另外,OCSC 采用的是同频载波,这也与 FDM 或脉冲压缩等需要额外占用频段的技术不同,OCSC 无需额外的频域资源,从而提高了系统的频谱使用效率。

5 总结与展望

近年来,在国内外多个研究团队的共同努力下,OPC 技术已经成功与光时域反射技术深度融合,使得基于光时域反射技术的光纤传感方向得到了显著的发展。本文首先回顾了 OPC 技术在光纤传感领域中的发展进程,介绍了国内外研究人员的代表性工作;然后,较为详细地介绍了本课题组提出的编码 Φ -OTDR 技术方案,包括基于单极性、双极性 Golay 编码的 Φ -OTDR,以及其中干涉衰落和频率漂移的抑制;最后,重点介绍了本课题组提出的基于同频正交编码的 Φ -OTDR 技术路线。

总之,通过 OPC 技术与 Φ -OTDR 各种创新性的结合方式,能够打破 Φ -OTDR 关键性能参数之间的制约关系。OPC 可以助力 Φ -OTDR 实现长距离、高信噪比、高空间分辨率的分布式光纤传感和长距离、高信噪比、大带宽的准分布式光纤传感。基于 OPC 的声波传感技术在工程应用上仍然可以进一步拓展,如在车辆定位、地震波探测、周界安防等,未来值得深入探索其在工程领域的高水平应用。

参 考 文 献

- [1] 苑立波,童维军,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.
- [2] Wu H J, Wang Z N, Peng F, et al. Field test of a fully distributed fiber optic intrusion detection system for long-distance security monitoring of national borderline[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9157: 915790.
- [3] Cram D, Hatch C E, Tyler S, et al. Use of distributed temperature sensing technology to characterize fire behavior[J]. Sensors, 2016, 16(10): 1712.
- [4] Tejedor J, Macias-Guarasa J, Martins H, et al. A novel fiber optic based surveillance system for prevention of pipeline integrity threats[J]. Sensors, 2017, 17(2): 355.
- [5] Kowarik S, Hussels M T, Chruscicki S, et al. Fiber optic train monitoring with distributed acoustic sensing: conventional and neural network data analysis[J]. Sensors, 2020, 20(2): 450.
- [6] 阮峻,朱志俊,孙豪,等.特高压直流控制保护系统相位光时域反射仪信噪比提升方法[J].中国激光,2022,49(9):0906005.
Ruan J, Zhu Z J, Sun H, et al. SNR improvement methods for phase-sensitive optical time-domain reflectometer for UHV DC control and protection system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0906005.
- [7] Barrias A, Casas J R, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. Sensors, 2016, 16(5): 748.
- [8] Agrawal G. 非线性光纤光学原理及应用[M].贾东方,葛凤春,王肇颖,等,译.5版.北京:电子工业出版社,2010:245-273.
Agrawal G. Nonlinear fiber optics[M]. Jia D F, Ge F C, Wang Z Y, et al, Transl. 5th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 245-273.
- [9] Bolognini G, Park J, Kim P, et al. Performance enhancement of Raman-based distributed temperature sensors using simplex codes[C]//2006 Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference, March 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2006.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Soto M A, Nannipieri T, Signorini A, et al. Advanced cyclic coding technique for long-range Raman DTS systems with meter-scale spatial resolution over standard SMF[C]// SENSORS, 2011 IEEE, October 28-31, 2011, Limerick, Ireland. New York: IEEE Press, 2012: 878-881.
- [13] 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.
- [14] Vazquez G D B, Martinez O E, Kunik D. Distributed temperature sensing using cyclic pseudorandom sequences[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(6): 1686-1691.
- [15] Lauber T, Cedilnik G, Lees G. Physical limits of Raman distributed temperature sensing-are we there yet? [C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne. Washington, DC: OSA, 2018: WF30.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Soto M A, Bolognini G, di Pasquale F. Long-range simplex-coded BOTDA sensor over 120 km distance employing optical preamplification[J]. Optics Letters, 2011, 36(2): 232-234.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] le Floch S, Sauser F, Soto M A, et al. Time/frequency coding for Brillouin distributed sensors[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8421: 84211J.
- [25] 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.
- [26] Okada K, Hashimoto K, Shibata T, et al. Optical cable fault location using correlation technique[J]. Electronics Letters, 1980, 16(16): 629.
- [27] 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.
- [28] Jones M D. Using simplex codes to improve OTDR sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1993, 5(7): 822-824.
- [29] 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 20-20, 2004, Palisades, NY, USA. New York: IEEE Press, 2004: 118-122.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Muhammad S S, Mehmood H, Naseem A, et al. Hybrid coding technique for pulse detection in an optical time domain reflectometer[J]. *Radio Engineering*, 2012, 21(2): 624-631.
- [33] Muanenda Y, Oton C J, Faralli S, et al. A cost-effective distributed acoustic sensor using a commercial off-the-shelf DFB laser and direct detection phase-OTDR[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 8(1): 6800210.
- [34] Martins H F, Shi K, Thomsen B C, et al. Real time dynamic strain monitoring of optical links using the backreflection of live PSK data[J]. *Optics Express*, 2016, 24(19): 22303-22318.
- [35] Shiloh L, Levanon N, Eyal A. Highly-sensitive distributed dynamic strain sensing via perfect periodic coherent codes[C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne. Washington, DC: OSA, 2018: TuE25.
- [36] Zhang B, Wang Z N, Lin S T, et al. Linearization and pulse-coding of phase-sensitive OTDR for distributed acoustic sensing [C]//26th International Conference on Optical Fiber Sensors, September 24-28, 2018, Lausanne. Washington, DC: OSA, 2018: TuE87.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Bipolar coding for phase-demodulated Φ -OTDR with coherent detection[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [40] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Interference fading elimination with single rectangular pulse in Φ -OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3381-3387.
- [41] 刘纯野. 双极性 Golay 编码 Φ -OTDR 的分布式频漂补偿技术 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- Liu C Y. Distributed frequency drift compensation technology for bipolar Golay coded Φ -OTDR[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [42] Wu Y, Wang Z N, Xiong J, et al. Bipolar-coding Φ -OTDR with interference fading elimination and frequency drift compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6121-6128.
- [43] Guerrier S, Dorize C, Awwad E, et al. Introducing coherent MIMO sensing, a fading-resilient, polarization-independent approach to Φ -OTDR[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21081-21094.
- [44] Li P H, Wang Y, Yin K, et al. Random coding method for coherent detection φ -OTDR without optical amplifier[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 161: 107318.
- [45] Zhang Y X, Fu S Y, Chen Y S, et al. A visibility enhanced broadband phase-sensitive OTDR based on the UWFBG array and frequency-division-multiplexing[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 101995.
- [46] Wu M S, Fan X Y, Zhang X P, et al. Frequency response enhancement of phase-sensitive OTDR for interrogating weak reflector array by using OFDM and Vernier effect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(17): 4874-4882.
- [47] Ogden H M, Beresna M, Lee T, et al. Enhanced bandwidth distributed acoustic sensing using a frequency multiplexed pulse train and micro-machined point reflector fiber[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 529-532.
- [48] Wang Z T, Jiang J L, Xiong J, et al. Fiber-optic quasi-distributed acoustic sensing system at doubled repetition rate [C]//2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), November 2-5, 2019, Chengdu, China. New York: IEEE Press, 2019.
- [49] Wang Z T, Jiang J L, Wang Z N, et al. Bandwidth-enhanced quasi-distributed acoustic sensing with interleaved chirped pulses [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(21): 12739-12743.
- [50] Wang Z T, Jiang J L, Wang Z N, et al. Quasi-distributed acoustic sensing with interleaved identical chirped pulses for multiplying the measurement slew-rate[J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 38465-38479.
- [51] Jiang J L, Xiong J, Wang Z N, et al. Quasi-distributed fiber-optic acoustic sensing with MIMO technology[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(20): 15284-15291.
- [52] Arbel N, Shiloh L, Levanon N, et al. Quasi-distributed fiber sensing via perfect periodic Legendre codes[C]//Optical Fiber Sensors Conference 2020 Special Edition, June 8-12, 2020, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021: T1.2.
- [53] Arbel N, Tomarov D, Abadi A, et al. Ultrahigh scan-rate quasi-distributed acoustic sensing system using array match interrogation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(7): 11647-11659.
- [54] Deng Z W, Xu R B, Wang Y Y, et al. Twenty-fold enlargement of QDAS bandwidth utilizing orthogonal codes on the same carrier[C]//27th International Conference on Optical Fiber Sensors, August 29-September 2, 2022, Alexandria, Virginia. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: F2.5.
- [55] Deng Z W, Wan A C, Xu R B, et al. Quasi-distributed acoustic sensing based on orthogonal codes and empirical mode decomposition[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(20): 24591-24600.
- [56] 张滨. 光脉冲编码技术在相位敏感光时域反射仪中的应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- Zhang B. Application of optical pulse coding technology in phase-sensitive optical time-domain reflectometer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [57] Golay M. Complementary series[J]. *IRE Transactions on Information Theory*, 1961, 7(2): 82-87.
- [58] 吴悦. 基于光脉冲编码的相位敏感光时域反射仪性能提升研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Wu Y. Research on performance improvement of phase-sensitive optical time-domain reflectometer based on optical pulse coding [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [59] Liu C Y, Deng Z W, Wang Y Y, et al. Golay coding Φ -OTDR with distributed frequency-drift compensation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 12894-12899.
- [60] 蒋家林. 基于新型正交信号的相位敏感光时域反射仪[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
- Jiang J L. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on new orthogonal signal[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [61] 邓子文. 基于正交多相码的准分布式声波传感技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- Deng Z W. Research on quasi-distributed acoustic wave sensing technology based on orthogonal polyphase code[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

Research Progress of Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry Based on Optical Pulse Coding Technique

Liu Chunye¹, Wan Anchi¹, Liang Yongxin¹, Jiang Jialin¹, Wu Yue¹, Zhang Bin¹,
Deng Ziwen¹, Rao Yunjiang^{1,2}, Wang Zinan^{1*}

¹Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China;

²Research Center for Optical Fiber Sensing, Zhejiang Lab, Hangzhou 311121, Zhejiang, China

Abstract

Significance Optical pulse coding (OPC) has caught much attention in optical fiber sensing in recent years, especially when combined with phase-sensitive optical time domain reflectometry (Φ -OTDR).

In the 1970s, optical fiber sensing technology emerged rapidly with the development of optical fiber communication technology, and it employs optical fiber as the sensing medium or optical transmission path to sense changes in the surrounding environment by the characteristic changes of light waves. With the increasing demand for sensors in society and the continuous maturation of optical sensing technology, optical fiber sensing systems have been widely adopted. These systems based on the light scattering principle can carry out long-term monitoring in harsh environments and achieve the measurement of physical quantities with large spatial scales or high spatial densities by continuous sensing points in optical fibers. Meanwhile, they have become a key component of borderline security, firefighting early warning, pipeline monitoring, transportation line supervising, and large-scale structural health monitoring among other fields.

Based on Raman scattering, Brillouin scattering, and Rayleigh scattering, a variety of optical fiber sensing schemes can be implemented. Rayleigh scattering is a kind of elastic scattering caused by refractive index changes in the optical fiber and has a faster response speed compared with the other two scattering methods. Additionally, based on the interference effect, Rayleigh scattering-based optical fiber sensing is more sensitive to the changes in the measured parameters. Φ -OTDR based on Rayleigh scattering is one of the most important applications of distributed acoustic sensing (DAS) and quasi-distributed acoustic sensing (Q-DAS), with fast response and high sensitivity. Despite the sound performance of Φ -OTDR, it is still affected by some of its factors, such as signal-to-noise ratio (SNR), spatial resolution, and transmission distance. The mutual constraints among these factors can limit the Φ -OTDR performance. By coding the probe pulses injected into the fiber, the SNR of the sensing signal can be significantly increased without increasing the peak power of the pulses, thus avoiding nonlinear effects. Meanwhile, the single-pulse response can be obtained after decoding at the receiving end, and the spatial resolution of the system is determined by the length of a single pulse rather than the entire probe pulse sequence, thus maintaining the spatial resolution and receiving a high-SNR sensing signal. In most cases, OPC is a viable solution to meet the demands of high accuracy, long distance, and high sensitivity sensing because it can overcome the limitations among various key parameters.

Progress Regarding the combined applications of OPC technology and Φ -OTDR, the development of optical pulse coding technology in optical fiber sensing is firstly reviewed, and its applications in sensing systems based on Raman scattering, Brillouin scattering, and Rayleigh scattering are introduced. Meanwhile, we present the representative studies of researchers in China and abroad and conduct a comparison of the performance enhancement brought by different coding schemes and traditional schemes. The development of the technique is summarized as shown in Tables 1-4, with the system performance of the different schemes compared. Then the coded Φ -OTDR technical schemes proposed by our group are presented in more detail, including Φ -OTDR based on unipolar and bipolar Golay coding, and the suppression of interference fading and frequency drift therein. Finally, the Φ -OTDR technical route based on orthogonal codes with the same carrier proposed by our group is highlighted.

Conclusions and Prospects In recent years, under the joint efforts of several research teams at home and abroad, optical pulse coding technology has been successfully integrated with optical time domain reflection technology in depth, which has led to remarkable development in the direction of optical fiber sensing based on optical time domain reflection technology. By various innovative ways of combining optical pulse coding technology with Φ -OTDR, the constraints among the key performance parameters of Φ -OTDR can be overcome. Optical pulse coding can help Φ -OTDR achieve distributed optical fiber sensing with long distance, high SNR, high spatial resolution, and quasi-distributed optical fiber sensing with long distance, high SNR, and large bandwidth. The acoustic wave sensing technology based on optical pulse coding can still be further extended to engineering applications, such as vehicle positioning, seismic wave detection, and perimeter security. It is worthwhile to deeply explore high-level applications of the technology in engineering fields in the future.

Key words optical fiber sensing; optical pulse coding; distributed acoustic sensing; phase-sensitive optical time-domain reflectometry