



DOI: 10.12086/oe.2018.170669

超高空间分辨率光反射仪关键技术进展

汪 帅, 王 彬, 刘庆文, 杜江兵, 樊昕昱*, 何祖源

上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要: 作为分布式光纤传感器核心技术, 光反射仪能够对光纤进行非破坏性检测, 获取沿光纤长度的反射率、折射率和偏振态等分布信息来判断光纤链路各类异常“事件”。在一些高端监测领域, 例如光纤到户(fiber-to-the-home, FTTH)接入网的故障诊断、大型发电机组和大型变压器内部的热点和形变监测以及大飞机的机翼结构安全监测等应用, 对传感器空间分辨率、测量距离等性能提出了非常高的要求。本文总结了光反射仪技术国内外的研究现状, 并针对应用需求, 回顾了三种实现长距离高空间分辨率光反射仪的关键技术及其在实现更高性能时所面临的技术难点。针对各类技术难点, 分别提出三种创新性方案, 从三种不同角度加以改善, 推动光反射仪技术在分布式传感系统中的应用。

关键词: 分布式光纤传感; 光反射仪技术; 线性光采样技术; 空间分辨率

中图分类号: O436.3; TN253

文献标志码: A

引用格式: 汪帅, 王彬, 刘庆文, 等. 超高空间分辨率光反射仪关键技术进展[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 170669

Advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution

Wang Shuai, Wang Bin, Liu Qingwen, Du Jiangbing, Fan Xinyu*, He Zuyuan

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: As the core technology of distributed fiber-optic sensing, optical reflectometry may realize the non-destructive measurement at a remote position. It can be used to retrieve the distributed information such as reflectance, refractive index, polarization state along the optical fiber, and to diagnose the irregular “event” on fiber-optic links. For some high-end fields, such as the fault diagnosis on the fiber-to-the-home (FTTH) access network, the deformation monitoring on large generating units and large transformers, and the security monitoring on structures of airplane wings, the requirements on spatial resolution and measurement range of the sensing technologies are very high. In this paper, we summarized the research status on state-of-art optical reflectometry technologies, and reviewed the advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution and long measurement range. We proposed three different methods to improve the performance, and tried to promote their applications on distributed fiber-optic sensing systems.

Keywords: distributed optical fiber sensing; optical reflectometry; linear optical sampling; spatial resolution

Citation: Wang S, Wang B, Liu Q W, *et al.* Advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170669

收稿日期: 2017-09-21; 收到修改稿日期: 2018-02-13

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目(2017YFB0405500)

作者简介: 汪帅(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事光采样的研究。E-mail: edwardws@sjtu.edu.cn

通信作者: 樊昕昱(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事光纤传感和光信号处理的研究。E-mail: fan.xinyu@sjtu.edu.cn

1 引言

因光纤相对于传统媒介具有成本低、体积小、重量轻、抗腐蚀、抗电磁干扰等优势, 光纤传感器已成为最重要的一种智能监测手段, 在很多战略领域产生了重要应用。分布式光纤传感器因其便于铺设、特别适合于分布式以及多点式网络化应用等特点, 已经被应用于桥梁、飞机和输油管道等大型关键性基础设施的连续监测。经历 40 余年发展, 目前分布式光纤传感技术在探测范围、灵敏度和空间分辨率等性能指标上均已取得长足进步。

作为分布式光纤传感器核心技术, 光反射仪能够对光纤进行非破坏性检测, 通常通过测试光纤中瑞利散射、拉曼散射、布里渊散射等背向散射信号, 获取沿光纤长度的反射率、折射率和偏振态等分布信息来判断光纤链路各类异常“事件”, 例如光纤链路中熔接点、弯曲、断裂、腐蚀等影响光信号传输的缺陷。其中比较有代表性的传统光时域反射仪(optical time domain reflectometer, OTDR)^[1-4]能够实现数米空间分辨率、上百千米探测范围的故障检测; 光频域反射仪(optical frequency domain reflectometer, OFDR)^[5]则能够实现厘米级空间分辨率、数千米的故障检测。然而在一些高端监测领域, 例如光纤到户(fiber-to-the-home, FTTH)接入网的故障诊断、大型发电机组和大型变压器内部的热点和形变监测以及大飞机的机翼结构安全监测等应用, 对传感器空间分辨率、测量距离等性能提出了更高的要求, 使得已有的故障检测技术不能满足现有以及未来应用的需求。尤其是在 FTTH 接入网故障诊断和管理应用方面, 随着我国光纤到户技术的全面发展和光集成技术的成熟, 光网络中光器件分布日益密集, 大量光纤线路和网络器件面临即将进入的维护期压力, 相应的远程在线光纤线路检测系统需要具备对光网络中数以万计的光器件进行分布测试和故障分析能力。

国内外电信公司的愿景是建立一套远程在线光纤线路检测系统。为实现管理, 在光纤接头内或光网络中器件的不同位置刻上独一无二的光学识别码, 当光器件的内部异常时, 能够利用光反射仪在局端远程检测出相应位置处的内部故障、潜在损伤等异常变化, 同时通过读取光学识别码来定位受损器件。光学识别码的比特数根据需要设置为 8 比特(管理 256 个识别码)至 16 比特(管理 65536 个识别码), 有些应用甚至需要更多。空间复用、波长复用技术均为光学识别码设计

制造的代表技术, 但波长复用技术由于制作困难目前仅处于科研尝试阶段。由于在小于接头长度的有限空间内写入多位比特, 空间复用技术影响并制约每位比特长度, 局端配备的光反射仪需要具备十千米以上甚至几十千米的测量距离和毫米甚至亚毫米级别的空间分辨率。

因此, 为了满足日益增长的长距离高空间分辨率传感网络监测需求, 需要针对传统光反射仪存在的技术瓶颈进行研究并提出有效的长距离高空间分辨率光反射仪技术方案, 突破其性能极限。本文将针对长距离高空间分辨率光反射仪的核心关键技术进行详细的介绍。第 2 部分为国内外研究现状, 第 3 部分介绍我们提出的几种实现长距离高空间分辨率反射仪的方案, 第 4 部分是总结和展望。

2 国内外研究现状

高空间分辨率光反射仪技术之前主要是用于对光器件内部强反射点进行检测, 以防止较强反射信号影响激光器工作稳定性, 早期的高空间分辨率光反射仪大多指的是基于宽谱光源的低相干光反射仪(optical low-coherence domain reflectometer, OLCR)。1987 年日本 NTT 研究所 Takada 等人提出 OLCR^[6]概念后, 因为其微米级别的空间分辨率及超高灵敏度, OLCR 技术得到快速发展。但其受限于所需的机械扫描装置, 测量距离较短, 通常只有几米, 无法应用于光纤网络测试中。如何实现高空间分辨率并进行长距离测量, 一直是光反射仪技术研究面临的重大挑战。长久以来, 国内外研究人员为此做出了许多有意义的尝试。

在超高空间分辨率指标上, OFDR 技术有着极大优势, 其空间分辨率取决于光源波长调谐范围, 若光源具有足够宽的调谐范围, 则能够实现非常高的空间分辨率。2005 年美国 Luna 公司 Soller 等人采用 40 nm 宽度的可调谐光源, 通过辅助干涉仪补偿扫频非线性, 最终在 35 m 测量范围内实现 22 μm 超高空间分辨率, 系统灵敏度达到 -97 dB^[7]。但因为可调谐光源相干性较差, 无法实现更长范围测量。OFDR 技术测量范围受限于激光器相干长度, 如何在保持较高空间分辨率的同时延长 OFDR 测量距离一直是相关领域专家学者的研究热点。

OTDR 技术在长距离测量上有着极大优势, 但其空间分辨率的提高始终是个大问题。最早研究人员为了提高 OTDR 空间分辨率, 采用锁模激光器作为信号光源, 但受限于光电探测器探测带宽, 只能检测脉冲

宽度大于 10 ps 的信号, 最终仅能够实现毫米级空间分辨率。由于高带宽光电探测器响应度很低, 噪声基底较高, 再加上短脉冲对应的平均功率很低, 这种高空间分辨 OTDR 的瑞利信号仍然在噪声基底之下 45 dB, 极大限制了 OTDR 的应用。1988 年, Bethea 等人提出基于工作在盖革模式下单光子探测器的 OTDR (photon-counting OTDR, ν -OTDR), 实现了 1.5 cm 空间分辨率^[8]。随着单光子探测器研究不断发展, 2007 年瑞士日内瓦大学 Legré 通过该方法实现了 50 km 测量范围内 5 cm 空间分辨率^[9]。2013 年中国科学技术大学潘建伟课题组利用波长转换技术, 将 1.5 μm 光信号转换到单光子探测器工作的 875 nm, 实现了 42.19 dB 超大动态范围, 空间分辨率 10 cm, 测量长度达到 217 km^[10]。同年, 南京大学的吴培亨课题组利用微纳线制作工作于 1.5 μm 的单光子探测器, 并以此实现了纪录性的 4.0 mm 空间分辨率^[11]。受限于单光子探测系统 42 ps 的时序抖动, ν -OTDR 空间分辨率无法进一步提升。此外, 因为超短脉冲信号带宽较大, 在传播中会受光纤色散影响导致脉冲展宽, 因而还受到色散瓶颈的限制。

为摆脱长距离测量时 OFDR 技术对激光器相干性的严格要求和克服 OTDR 技术存在的动态范围不足的问题, 近年国内外研究人员进行了新的系统方案探讨和尝试。2008 年太原理工大学王云才课题组提出用混沌激光器作为信号光源, 可以实现高空间分辨率和较大动态范围^[12]。2015 年电子科技大学饶云江课题组采用全光纤混沌激光器, 实现 100 km 测量范围内 8.2 cm 空间分辨率^[13]。2017 年中国科学院北京半导体研究所赵玲娟课题组使用 40 GHz 带宽的混沌激光器, 在 47 km 测量范围内实现 2.6 mm 空间分辨率^[14]。另外, 本文作者在对 OFDR 相位噪声信息进行研究后, 发现加快 OFDR 扫频速度可以大幅降低相位噪声影响, 于 2015 年提出时间门数字域 OFDR (time-gated digital OFDR, TGD-OFDR), 在 110 km 探测范围实现 1.6 m 空间分辨率^[15-16]。以上的混沌激光器方案和 TGD-OFDR 方案都可以看作是脉冲压缩技术, 对激光器相干性没有很高的要求, 应用于长距离测量非常有前景, 但是毫米级别的空间分辨率需要接近 100 GHz 的探测和接收系统, 高空间分辨率和大动态范围这两个性能之间相互制约, 空间分辨率最终受限于接收系统的电子瓶颈。

综上所述, 我们发现光反射仪的空间分辨率和探

测距离主要受限于光源和光纤的相位噪声、光纤色散以及接收系统的探测带宽等因素。要实现高空间分辨率, 在 OTDR 系统中超短探测脉冲对接收带宽和灵敏度有非常高的要求, 而且在长距离探测中还会受到色散效应的影响; OFDR 相较于 OTDR 在灵敏度上有非常大的优势, 而且对接收系统的带宽没有很高的要求, 但是在长距离探测中非常容易受到相位噪声的影响; 脉冲压缩技术相较于 OTDR 技术有较高灵敏度, 相较于 OFDR 其抗相位噪声能力更强, 但是同样对接收系统带宽有非常高的要求。针对以上三种常见光反射仪在长距离高空间分辨率应用中存在的问题, 我们分别提出了三种方案, 从三种不同角度加以改善: 1) 基于高线性度外调制扫频光源和相位噪声补偿的 OFDR 技术^[17]; 2) 基于光采样和色散补偿的 OTDR 技术^[18]; 3) 基于光采样和相位编码的脉冲压缩技术^[19]。

3 极限性能光反射仪方案

3.1 基于高线性度外调制扫频光源和相位噪声补偿的 OFDR 技术

采用基于内部调制实现光源扫频的 OFDR 技术能够实现微米量级空间分辨率, 但是测量距离受限于扫频光源的相位噪声以及扫频线性度, 测量距离仅能达到数十米。针对该技术扫频线性度太差的缺点, Koshikiya 等提出基于外部调制实现扫频的 OFDR 技术, 实现 5 km 测量范围内厘米量级空间分辨率^[20]。外部调制技术的扫频范围对应于射频信号扫频范围, 一般为几 GHz。为实现更大范围扫频, 我们提出基于高阶边带调制的大范围光源线性扫频技术。

如图 1 所示, 利用强度调制器(intensity modulator, IM)实现光扫频到电扫频的转化, 产生的高阶边带具有更大扫频范围。OFDR 系统空间分辨率可以表示为

$$\Delta z = \frac{c}{2n\Delta F}, \quad (1)$$

其中: c 和 n 分别为真空中光速和光纤纤芯有效折射率, ΔF 为光源扫频范围。由于空间分辨率 Δz 与扫频范围 ΔF 成反比, 因此基于高阶边带调制的 OFDR 技术, 能够使用较窄范围的扫频射频信号, 实现较高的空间分辨率和较长的探测距离。该技术能够实现的最大扫频范围(~ 10 GHz, 对应于 OFDR 空间分辨率 1 cm)受限于高阶边带之间的混叠, 当扫频范围太大, 无法用光滤波器将有效的扫频光滤出。为解决该问题, 我们采用注入锁定技术达到快速滤波效果。

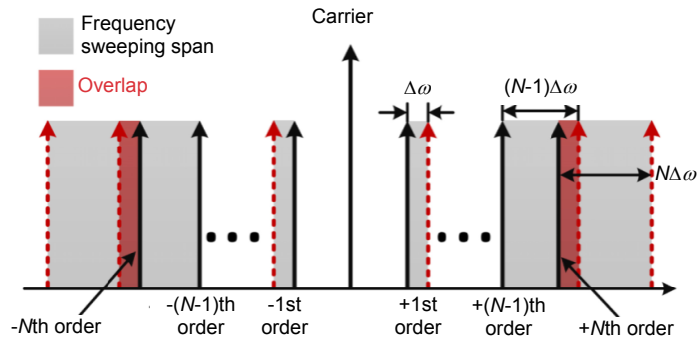


图 1 高阶边带调制技术原理图^[17]

Fig. 1 The schematic illustration of the spectrum for the frequency sweep with high-order sidebands of external modulation^[17]

上述实验系统框图如图 2 所示，窄线宽激光器经过强度调制器后产生高阶边带，高阶边带通过环形器注入到从激光器中。通过调节从激光器的温度，将其锁定到某一高阶边带，通过偏振控制器(polarization controller, PC)改变注入光偏振态，实现最大的边带抑制比。为了实现大范围锁定，从激光器的注入电流需跟随射频扫频信号进行同步调节。在该实验系统中，射频信号扫频范围为 16 GHz~19.3 GHz，从激光器锁定在第 8 阶边带，实现扫频范围为 25 GHz。注入锁定后光谱和扫频范围如图 3 所示。基于该扫频光源，我们进行了 OFDR 实验。待测光纤为 10 km 单模光纤，实验结果如图 4 所示。将光纤末端反射点放大，可以

看到其空间分辨率为 4.2 mm，和理论分辨率 4 mm 基本一致。

注入锁定技术能够很好地解决高阶边带调制中存在的边带混叠问题，从而实现数十 GHz 扫频。然而，其扫频范围受限于调制器带宽、射频源和射频放大器带宽等因素，一般难以实现超过 40 GHz 的扫频。为了进一步实现大范围扫频，我们提出了基于四波混频(four-wave mixing, FWM)效应的频率啁啾放大技术，其原理如图 5 所示。将单频种子光和扫频的泵浦光入射到高非线性光纤(high non-linear fiber, HNLF)中，产生的闲频光电场可以表示为

$$E_i = CA_p^2 A_s \exp[j2(\omega_p - \omega_s)t + 2(\phi_p - \phi_s)] \quad (2)$$

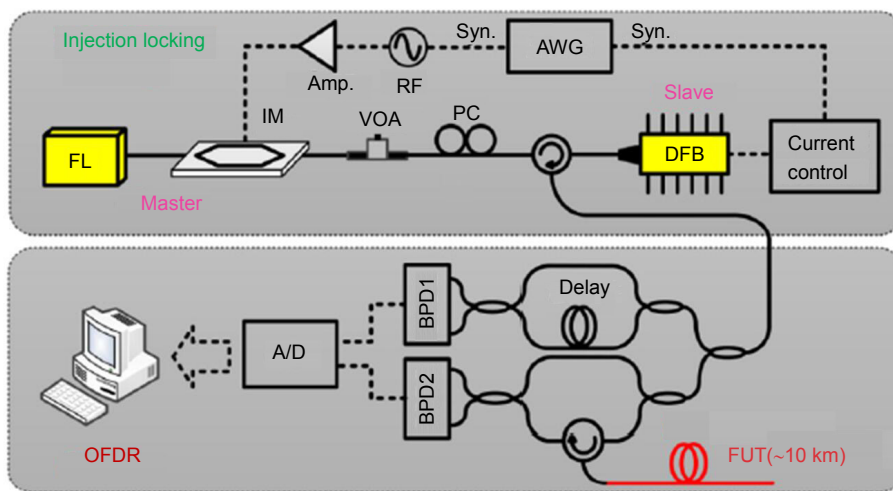


图 2 基于注入锁定的 OFDR 系统实验框图^[17]

Fig. 2 Experimental setup of the injection-locking scheme. FL: fiber laser; IM: intensity modulator; VOA: variable optical attenuator; PC: polarization controller; DFB: distributed feedback diode laser; Amp: RF amplifier; AWG: arbitrary wave-form generator; FUT: fiber under test; BPD: balanced photodetector; A/D: analog-to-digital converter^[17]

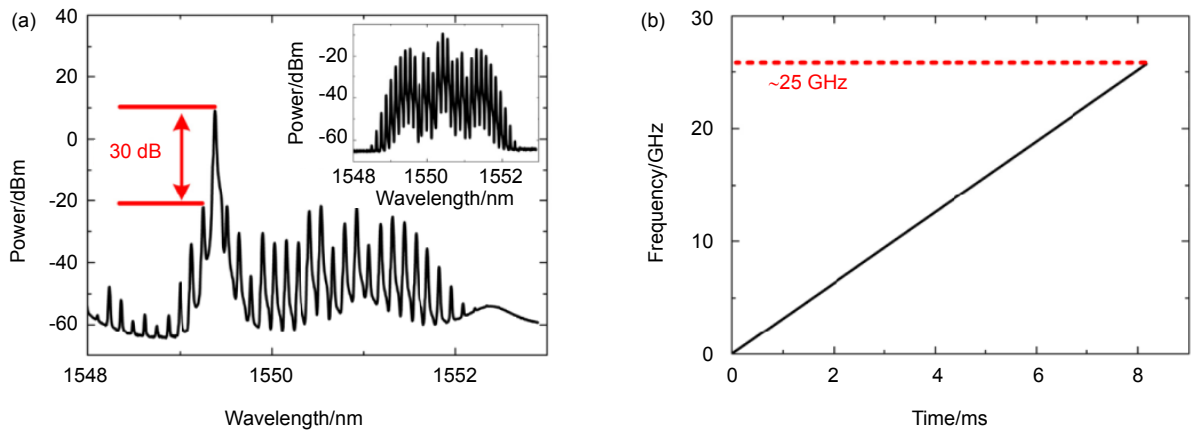


图 3 (a) 注入锁定后的光谱图; (b) 扫频信号时频关系^[17]

Fig. 3 (a) Optical spectrum of the slave laser which is injection locked to the 8th-order sideband of the master laser, and the inset is spectrum of the generated optical comb after IM; (b) Relative optical frequency as a function of time after the injection-locking^[17]

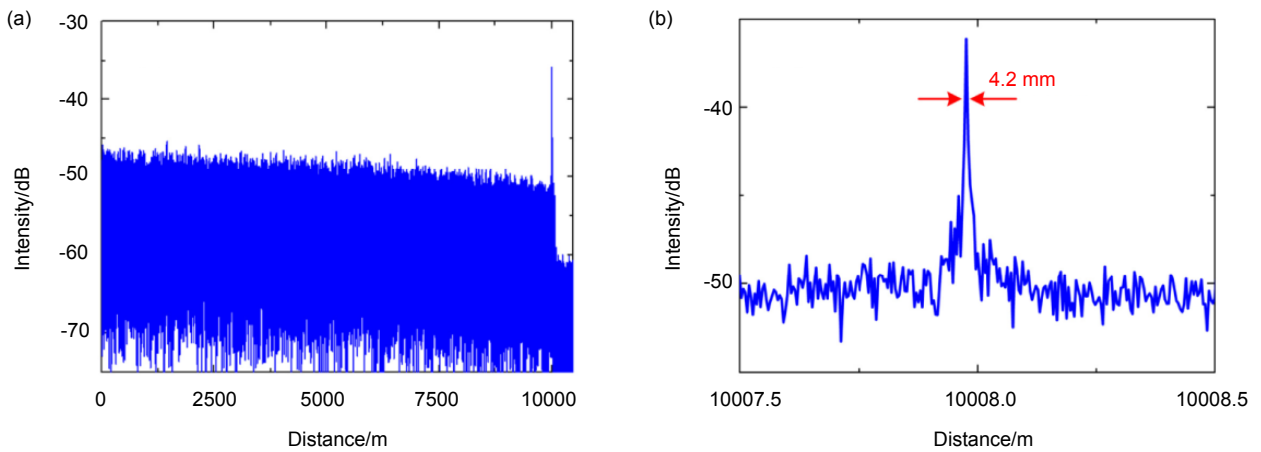


图 4 OFDR 系统实验结果。(a) 反射强度曲线; (b) 10 km 附近反射峰^[17]

Fig. 4 Experimental result of OFDR system. (a) Reflection trace; (b) Details of reflection peak around 10 km after using phase noise compensation (PNC) algorithm^[17]

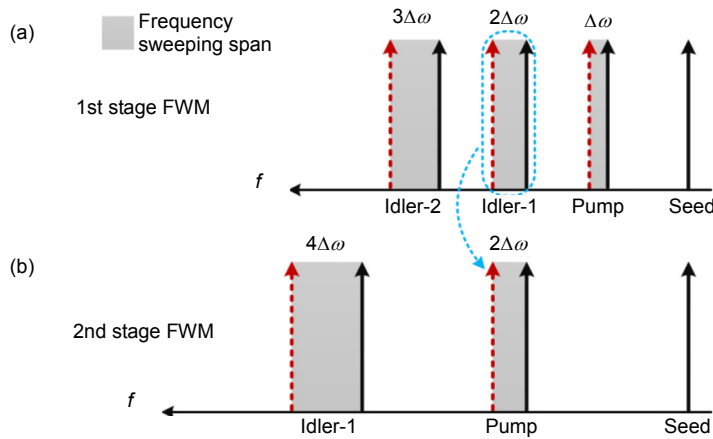


图 5 级联四波混频(FWM)原理图^[17]

Fig. 5 Schematic of FWM^[17]

其中： ω_p 、 ϕ_p 和 A_p 分别为泵浦光频率、相位和幅度， ω_s 、 ϕ_s 和 A_s 分别为种子光频率、相位和幅度， C 为与四波混频效率相关的常数。经过四波混频效应后产生的闲频光频率可以表示为 $\omega_1 = 2\omega_p - \omega_s$ ，如果泵浦光为扫频范围 $\Delta\omega$ 的线性扫频光，那么产生的一阶闲频光也为线性扫频光，扫频范围为 $2\Delta\omega$ ，因此可以通过FWM效应来实现频率啁啾放大。实验中，我们将注入锁定后的扫频光(扫频范围 25 GHz)作为泵浦光，产生的一阶闲频光扫频范围为 50 GHz。将一阶闲频光滤出作为二阶 FWM 效应的泵浦光，我们实现 100 GHz 范围的扫频。三种扫频的时频关系如图 6 所示，其中 100 GHz 扫频范围频率误差为 160 kHz。基于该 100 GHz 线性扫频光源，我们进行了 OFDR 实验，待测光纤为 2 km 单模光纤，测量结果如图 7 所示。2 km 末端空间分辨率为 1.1 mm。实验中为消除光源相位噪声

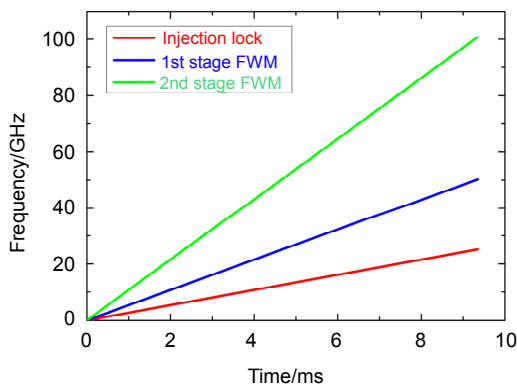


图 6 扫频光源的时频关系^[17]

Fig. 6 Relative optical frequency changes as a function of time^[17]

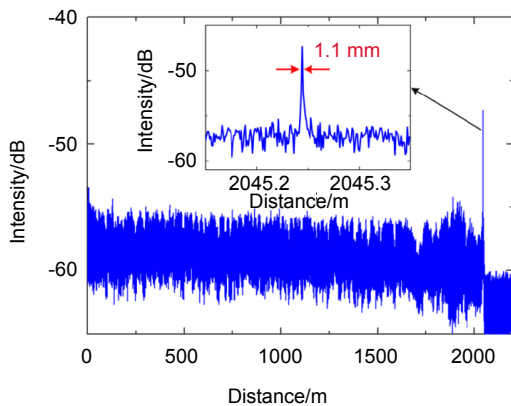


图 7 待测光纤(2 km)的 OFDR 测量结果^[17]

Fig. 7 Measured reflection trace, and the inset shows the details of reflection peak at the end of the fiber under test (FUT)^[17]

的影响，我们采用了相位噪声补偿技术^[21]。该系统的测量距离目前受限于接收模块的带宽和内存限制，可以通过使用更高性能接收模块，实现数十千米测量范围内，毫米量级空间分辨率。

3.2 基于光采样和色散补偿的 OTDR 技术

用于超大带宽信号接收的线性光采样技术，为实现超高空间分辨率的 OTDR 提供了可能。线性光采样技术最早于 2003 年由美国贝尔实验室的 Dorrer 等人提出^[22]，在接收高速信号时，本地路使用一个稳定的短脉冲锁模激光器。通过控制锁模激光器重频和待测信号码率之间微小的差别进行采样，在这个过程中短脉冲充当采样门的作用。采用的光电探测器带宽仅需稍大于锁模激光器重复频率就可以实现对超大带宽待测信号的测量。

基于线性光采样技术的光反射仪实验装置如图 8 所示，其中用于发射探测短信号的激光器可以产生宽度为皮秒级别的高消光比短脉冲，探测信号在被测光纤中的异常反射点背向传输回来后，利用另一台重复频率和探测激光器重频有极小差异的短脉冲激光器进行干涉，干涉信号被低带宽(<1 GHz)光电探测器接收。光采样技术采用的是时间换取带宽的思路，所以尽管超短脉冲平均功率非常小，但因为使用的低带宽探测器灵敏度非常高，而且较长积分时间进一步提高了接收到的信号功率，从而有效提高整个系统的动态范围。

在发射宽度为 6 ps 短脉冲作为探测信号的实验中，分别测量了 100 m、1 km 和 10 km 光纤的弱反射点。如图 9 所示，实验中发现 100 m 的位置空间分辨率为 620 μm ，但是探测距离增加时，由于色散效应

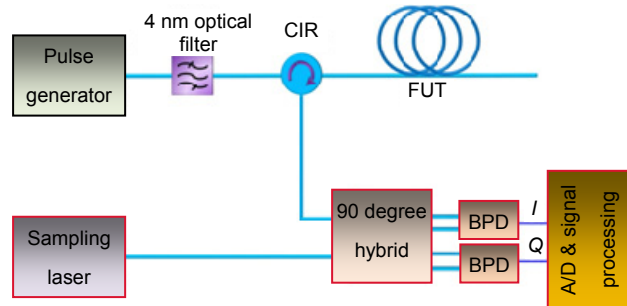


图 8 基于线性光采样光反射仪的试验装置图^[18]

Fig. 8 Experimental illustration of linear optical sampling^[18]

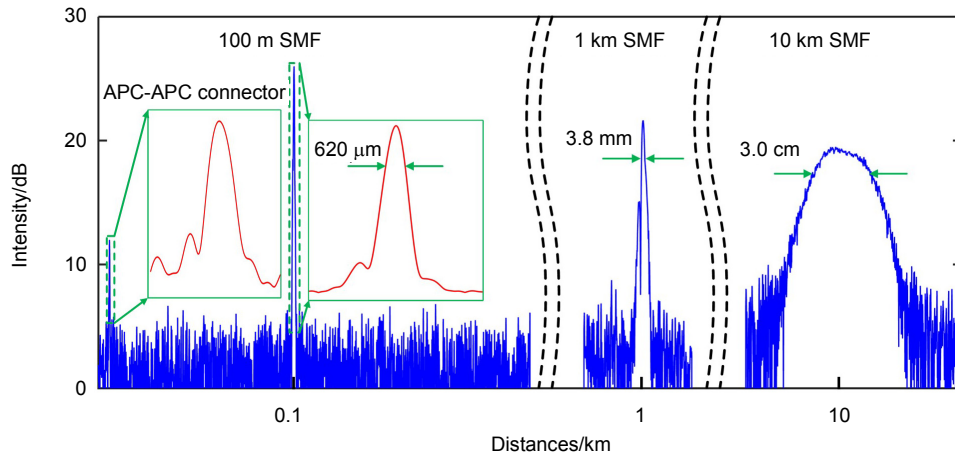


图 9 不同距离反射点的空间分辨率^[18]

Fig. 9 Spatial resolution at different distances^[18]

的影响,短脉冲会逐渐变宽。在 1 km 的位置空间分辨率劣化为 3.8 mm,而当探测距离达到 10 km 时,空间分辨率劣化为 3 cm。相同的情况也发生在使用单光子探测器的v-OTDR 系统和 OLCR 系统中。在 OLCR 中,为了补偿色散造成的空间分辨率劣化,通用的方法是在本地路增加一段补偿光纤,但是在 OTDR 中这种思路并不可行。

由于色散原因造成传输信号劣化的问题在现代高速传输系统中普遍存在,因为色散效应模型比较简单,所以使用数字信号处理即可消除色散影响。由于线性光采样技术同时能提供光信号的相位信息,使得本方案中数字信号处理补偿色散影响成为可能。

当色散介质的色散系数 Φ'' 和超短脉冲宽度 τ_p 满足空间弗朗霍夫条件 $|\tau_p^2 / (2\pi\Phi'')| \ll 1$ 时,色散介质可以看作是一个线性时不变系统,其传递函数可表示为 $H(\omega) = |H(\omega)| \exp[j\Phi(\omega)]$ 。在各阶色散存在的色散介质中,有:

$$\Phi(\omega) = \Phi + \Phi'\omega + \frac{1}{2}\Phi''\omega^2 + \frac{1}{6}\Phi'''\omega^3 + \dots + \frac{1}{n!}\Phi^{(n)}\omega^n, \quad (3)$$

其中: $\omega = \Omega - \omega_c$, ω_c 是中心波长, Ω 是绝对频率。实际上,我们常用的色散介质有线性啁啾光栅或色散补偿光纤等,它们高阶色散系数都非常小。在本文中,我们只考虑二阶色散系数。

线性啁啾光栅的冲激响应可以描述为

$$h(t) \propto \exp\left(j\frac{\pi}{2\Phi''}t^2\right), \quad (4)$$

其中 t 表示时间。那么短脉冲信号经过色散介质后,脉冲光的电场表示为

$$E_{out}(t) = \int E_{in}(\tau)h(\tau-t)d\tau. \quad (5)$$

当我们大致确定异常反射点位置和待测光纤色散系数就可以计算出 Φ'' , 反射点实际电场则可计算为

$$E_{in}(t) = F^{-1}\{F[E_{out}(t)]F^*[h(t)]\}. \quad (6)$$

基于以上方法,原始探测脉冲宽度为 3 ps,由于色散效应,10 km 处反射信号展宽为 300 ps 左右,如图 10(a)和 10(b)所示。实验中还发现色散效应不只展宽了脉冲,还将短脉冲变成了线性啁啾信号。在使用上述数字域色散补偿处理之后,脉冲被“压缩”为 3.4 ps,而且原有频率啁啾效应也均消失,如图 10(c)和 10(d)所示,对应空间分辨率为 340 μm 。

值得注意的是,虽然系统动态范围非常高,达到 54 dB,但由于短脉冲平均功率非常低,所以此空间分辨率下瑞利信号仍然淹没在噪声以下。

3.3 基于光采样和相位编码的脉冲压缩技术

脉冲压缩技术能够在保持高空间分辨率的情况下,获得比 OTDR 更大的动态范围,在这一节里我们把线性光采样技术引入到对产生的超大带宽线性扫频信号的测量。在上一节内容中,因为色散效应会导致短脉冲被拉伸,使空间分辨率劣化。而在这一节中,我们利用色散效应来拉伸短脉冲从而获得线性扫频信号。这种色散介质用于短脉冲拉伸的方法常见于利用色散效应进行光信号傅里叶变换的应用中。

假设入射脉冲为 sinc 函数形状,可以表示为

$$E_{in}(t) = \frac{\sin(\pi t / \tau_p^2)}{\pi t / \tau_p^2} \exp(j\omega_0 t).$$

那么经过短脉冲拉伸之后,色散介质对脉冲形状相当于做了傅里叶变换,而对脉冲相位则相当于做了二次调制,短脉冲在长度被拉伸的同时频率也会被线

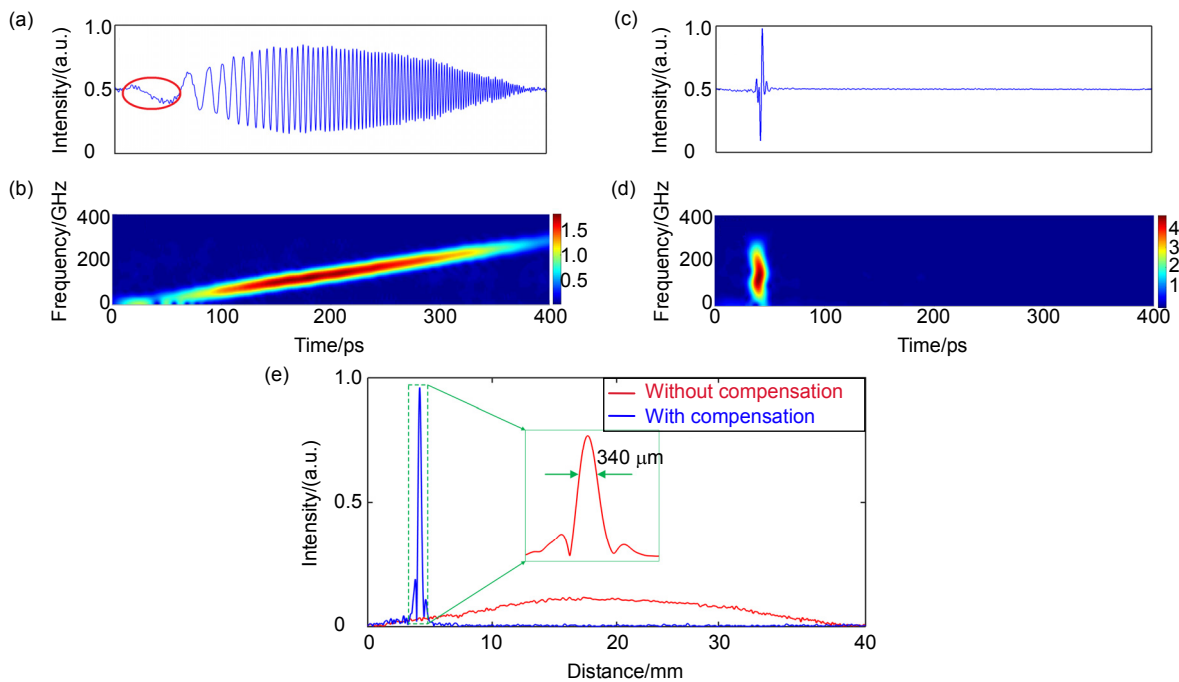


图 10 (a)~(b) 分别是补偿前 10 km 处反射点的时域信号和时频图; (c)~(d) 分别是补偿后 10 km 处反射点的时域信号和时频图; (e) 补偿前后反射点对比图^[18]

Fig. 10 (a) Reflection peak without chromatic dispersion (CD) compensation; (b) Time-frequency map of the reflection peak without CD compensation; (c) Reflection peak with CD compensation; (d) Time-frequency map of the reflection peak with CD; (e) Details of the reflection peak at 10 km with/without CD compensation^[18]

性调制。

实验中脉冲重复频率为 250 MHz 的飞秒激光器产生用于探测的超短脉冲, 马赫曾德型强度调制器充当脉冲选择器, 将脉冲重复频率降低到 50 MHz。带宽为 6 nm 的矩形光带通滤波器将脉冲整形为 sinc 函数形状, 此时脉冲宽度为 2 ps, 此后短脉冲被二阶色散系数为 -2568 ps^2 的线性啁啾光栅拉伸成 10 ns 方波形状的线性扫频脉冲。实验中另一台重复频率为 50 MHz 的飞秒激光器充当采样激光器, 两台激光器的重复频率偏差为 100 Hz, 这决定了系统等效采样率为 25 TS/s。两个脉冲序列的干涉拍频信号最后被平衡光电探测器接收, 然后我们利用相应的匹配滤波器对该脉冲进行解调。

实验结果如图 11 所示, 产生的脉冲宽度大约为 10 ns, 通过线性光采样技术接收后的信号动态范围测得是 27 dB。在图 11(a) 的左边放大图中看到, 尽管产生脉冲信号带宽达到数百 GHz, 使用线性光采样技术后还是能够非常精细地恢复信号波形。而在图 11(a) 的右边放大图中可以看到, 由于实验中充当脉冲选择器的强度调制器消光比限制, 主脉冲相对于旁瓣信号的消光比有限, 计算后可知仅为 12 dB。为了展示产

生线性扫频信号的质量, 我们对线性扫频脉冲做短时傅里叶变换, 如图 11(b) 所示, 可以看到扫频带宽为 450 GHz。但由于线性啁啾光栅的色散系数在不同波长上不太平坦, 导致扫频线性度不高。不同于 OFDR 方案的是, 脉冲压缩系统的空间分辨率只和产生信号的带宽相关, 不受限于扫频信号的线性度。在对线性扫频脉冲进行匹配滤波后, 得到的压缩脉冲如图 11(c) 所示, 脉冲宽度为 2.4 ps, 脉冲压缩比为 4167。更大扫频范围的线性扫频信号可以通过增大探测脉冲光谱范围实现。

由于本实验中产生探测脉冲的锁模激光器重复频率为 250 MHz, 即使使用脉冲选择器将之降为 50 MHz, 对应的探测距离仍然只有 2 m。而且, 脉冲选择的方法会损失平均功率, 降低系统信噪比。此外, 在前述实验中我们发现, 脉冲选择方案的动态范围受限于使用强度调制器的消光比。为了实现长距离探测, 需要在降低探测脉冲重复频率的同时, 仍然保证信号平均功率, 我们提出对线性扫频脉冲序列进行第二级脉冲压缩。

为了提高系统的探测距离, 常用思路是降低发射脉冲信号的重复频率。例如前面提到的使用选脉冲的

方法。在一些微波光子雷达和分布式传感系统中，对压缩脉冲做随机相位调制，从而通过降低压缩脉冲之间的相关性来降低脉冲重复频率。只要选取的随机相位序列合适，可以既保留信号的平均功率，又保证相当大的动态范围。在本实验中，采用的是简单易行的 pseudo-random binary sequence (PRBS) 归零码进行调制。在后续的相位编码实验中，首先把可编程脉冲发生器(pulse pattern generator, PPG)的时钟同步到发射

探测脉冲的锁模激光器上，发射脉冲码型的码率为 10 Gb/s。为了实现相位调制效果，我们让原来用作脉冲选择的强度调制器工作在 NULL 点，以实现脉冲码型的相位翻转。如图 12(a)所示，当码片长度为 40 时，原来的探测信号重频降到 50 MHz，同时并没有损失其他四个脉冲的功率。从图 12(b)的时频图上能清楚地看出，这种相位调制的方法能够非常有效地降低这五个脉冲之间的相关性。在进行匹配滤波之后，在这五个

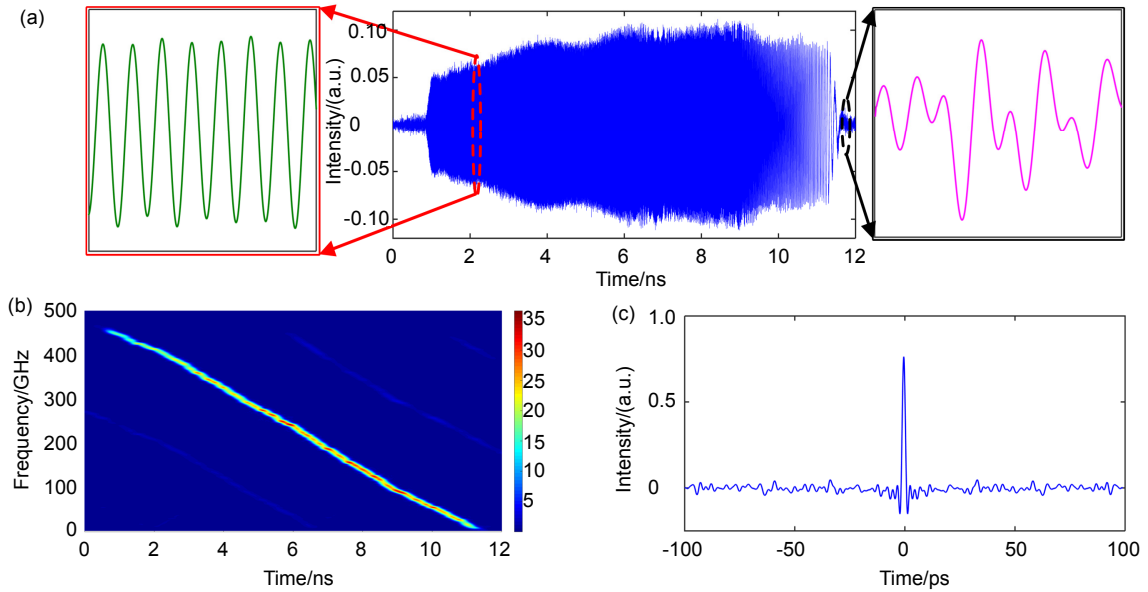


图 11 脉冲压缩方案实验结果。(a) 产生并被接收到的线性扫频信号，脉冲宽度为 10 ns，左边图是在 25 TS/s 采样率下采集信号的放大展示，右边图展示的残余信号是由于脉冲选择器消光比较低留下的旁瓣；(b) 线性扫频信号的时频展示，产生扫频信号带宽为 450 GHz；(c) 实行匹配滤波之后的压缩脉冲^[19]

Fig. 11 Experimental results. (a) A temporal frame of 10 ns linearly chirped pulse; (b) Shot time Fourier transformation (STFT) analysis of the linearly chirped pulse; (c) Calculated autocorrelation of the linearly chirped pulse^[19]

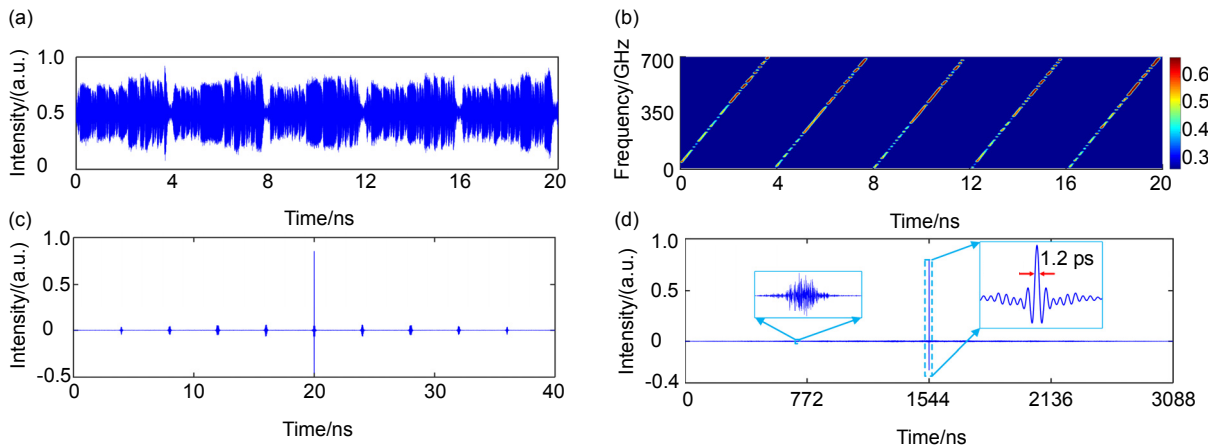


图 12 相位编码的实验结果。(a) 5 个周期脉冲编码后的时域图；(b) 相位编码后脉冲的时频图；(c) 5 个脉冲的压缩结果；(d) 386 个脉冲的压缩结果^[19]

Fig. 12 Experimental results. (a) 20 ns measurement of linearly chirped pulse with phase modulation; (b) STFT analysis of the linearly chirped pulse with phase modulation; (c) Calculated autocorrelation of the 20 ns linearly chirped pulse with phase modulation; (d) Autocorrelation of the 1544 ns time-aperture pulse^[19]

周期的信号中,我们只看到一个主峰脉冲,相对于其他旁瓣脉冲的旁瓣抑制比为 11.4 dB,见图 12(c)。为了进一步提高旁瓣抑制比和探测距离,我们增加了码片的长度,使得参与相位编码的脉冲数达到 386 个。压缩信号长度为 1544 ns,对应 154.4 m 探测距离。在这个实验中,使用了 5 km 色散补偿光纤作为色散介质,产生线性扫频频谱范围达到 700 GHz。最终在 154.4 m 测量距离上,脉冲压缩后实现空间分辨率 120 μm ,旁瓣抑制比为 20.4 dB。

4 总结与展望

本文总结了光反射仪技术国内外的研究现状,针对应用需求,回顾了实现长距离高空间分辨率光反射仪的关键技术及其在实现更高性能时所面临的技术难点。长距离高空间分辨率光反射仪系统中,需要探测信号发生端产生大带宽高质量调制信号或者信号接收端具备高灵敏度大带宽的光电转换和数据采集处理能力。

基于以上考虑,我们针对探测信号发生部分提出了高线性度外调制扫频信号产生的相位噪声补偿 OFDR 方案;针对大带宽信号接收部分提出结合光采样技术的 OTDR 和脉冲压缩方案。以上技术的实现将推动长距离超高空间分辨率光反射仪在分布式传感系统中的应用。

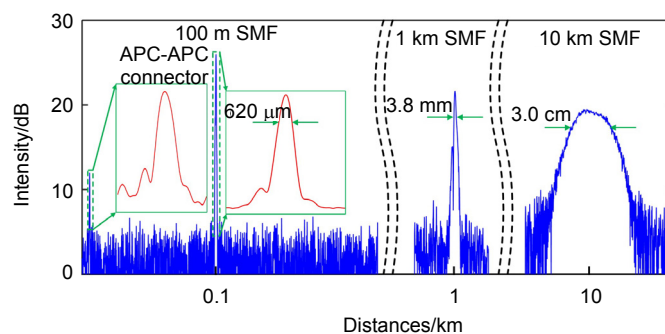
参考文献

- [1] Barnoski M K, Jensen S M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(9): 2112–2115.
- [2] Liokumovich L B, Ushakov N A, Kotov O I, et al. Fundamentals of optical fiber sensing schemes based on coherent optical time domain reflectometry: signal model under static fiber conditions[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(17): 3660–3671.
- [3] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer assisted by first-order Raman amplification for distributed vibration sensing over > 100 km[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(8): 1510–1518.
- [4] Martins H F, Martín-López S, Corredera P, et al. Coherent noise reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(23): 3631–3637.
- [5] Eickhoff W, Ulrich R. Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 1981, **39**(9): 693–695.
- [6] Takada K, Yokohama I, Chida K, et al. New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique[J]. *Applied Optics*, 1987, **26**(9): 1603–1606.
- [7] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(2): 666–674.
- [8] Bethea C G, Levine B F, Cova S, et al. High-resolution and high-sensitivity optical-time-domain reflectometer[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(3): 233–235.
- [9] Legré M, Thew R, Zbinden H, et al. High resolution optical time domain reflectometer based on 1.55 μm up-conversion photon-counting module[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13): 8237–8242.
- [10] Shentu G L, Sun Q C, Jiang X, et al. 217 km long distance photon-counting optical time-domain reflectometry based on ultra-low noise up-conversion single photon detector[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 24674–24679.
- [11] Zhao Q Y, Hu J H, Zhang X P, et al. Photon-counting optical time-domain reflectometry with superconducting nanowire single-photon detectors[C]//*Proceedings of the IEEE 14th International Superconductive Electronics Conference (ISEC)*, 2013: 1–3.
- [12] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(19): 1636–1638.
- [13] Wang Z N, Fan M Q, Zhang L, et al. Long-range and high-precision correlation optical time-domain reflectometry utilizing an all-fiber chaotic source[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(12): 15514–15520.
- [14] Zhang L M, Pan B W, Chen G C, et al. Long-range and high-resolution correlation optical time-domain reflectometry using a monolithic integrated broadband chaotic laser[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(4): 1253–1256.
- [15] Wang S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(26): 33301–33309.
- [16] Liu Q W, Fan X Y, He Z Y. Time-gated digital optical frequency domain reflectometry with 1.6-m spatial resolution over entire 110-km range[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(20): 25988–25995.
- [17] Wang B, Fan X Y, Wang S, et al. Millimeter-resolution long-range OFDR using ultra-linearly 100 GHz-swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded FWM process[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 3514–3524.
- [18] Wang S, Fan X Y, He Z Y. Ultrahigh resolution optical reflectometry based on linear optical sampling technique with digital dispersion compensation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, **9**(6): 6804710.
- [19] Wang S, Fan X Y, Wang B, et al. Sub-THz-range linearly chirped signals characterized using linear optical sampling technique to enable sub-millimeter resolution for optical sensing applications[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(9): 10224–10233.
- [20] Koshikiya Y, Fan X Y, Ito F. Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(18): 3287–3294.
- [21] Fan X Y, Koshikiya Y, Ito F. Phase-noise-compensated optical frequency-domain reflectometry[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, **45**(6): 594–602.
- [22] Dorrer C, Kilper D C, Stuart H R, et al. Linear optical sampling[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, **15**(12): 1746–1748.

Advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution

Wang Shuai, Wang Bin, Liu Qingwen, Du Jiangbing, Fan Xinyu*, He Zuyuan

State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China



Spatial resolution at different distances

Overview: As the core technology of distributed fiber-optic sensing, optical reflectometry may realize the non-destructive measurement at a remote position. It can be used to retrieve the distributed information such as reflectance, refractive index, polarization state along the optical fiber, and to diagnose the irregular “event” on fiber-optic links. In this paper, we summarized the research status on state-of-art optical reflectometry technologies, and reviewed the advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution and long measurement range. We proposed three different methods to improve the performance, and tried to promote their applications on distributed fiber-optic sensing systems.

Firstly, we propose and demonstrate a millimeter-resolution long-range optical frequency domain reflectometry (OFDR) using an ultra-linearly 100 GHz swept optical source realized by injection-locking technique and cascaded four-wave-mixing (FWM) process. The ultra-linear swept source is realized using an external modulation method with a linearly swept radio frequency (RF) signal. By using the injection-locked frequency swept laser as the optical source of OFDR, we obtain a spatial resolution of 4.2 mm over 10 km measurement range. To further improve the spatial resolution, FWM process is used to broaden the frequency sweeping span. A frequency sweeping span of ~ 100 GHz is achieved with cascaded FWM. We demonstrate a 1.1 mm spatial resolution over 2 km measurement range with the proposed ultra-linearly swept optical source.

Then, we demonstrate an ultra-high-resolution optical time domain reflectometry (OTDR) system by using a mode-locked laser as the pulse source and a linear optical sampling technique to detect the reflected signals. Taking advantage of the ultrashort input pulse, the large detection-bandwidth, as well as the low timing jitter of linear optical sampling system, a sub-mm spatial resolution is achieved. As the pulse-width is broadened with the increase of distance due to the chromatic dispersion and the large bandwidth of the ultrashort pulse, by adopting digital chromatic dispersion compensation, we achieved a spatial resolution of 340 μm when measuring the reflector at 10 km.

The final method is based on linear optical sampling and pulse compression method. We propose an all-optic sub-THz-range linearly chirped optical source and a high-bandwidth detection system to characterize it. Taking advantage of the chromatic dispersion effect, ultrashort optical pulses are stretched to be ~ 10 -ns linearly chirped pulses with sub-THz range, which yields a large time-bandwidth product of 4500, a high compression ratio of 4167 and a chirp rate of 45 GHz/ns. A ultra-high spatial resolution of 120 μm with 150 m measurement range and 20.4 dB extinction ration is finally demonstrated.

Citation: Wang S, Wang B, Liu Q W, *et al.* Advances of key technologies on optical reflectometry with ultra-high spatial resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 170669

Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0405500)

* E-mail: fan.xinyu@sjtu.edu.cn