

光频域反射技术中激光相位噪声影响分析

谢玮霖 董毅 周潜 常乐 何浩 胡卫生

(上海交通大学电子信息与电气工程学院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 研究了光频域反射技术(OFDR)中因激光线宽有限而造成的激光相位噪声对系统性能的影响。理论推导了相位噪声的分布函数, 仿真分析和实验测试了激光相位噪声与激光相干长度、反射信号强度之间的内在关联性。研究表明, 激光相位噪声是 OFDR 中的重要噪声来源, 影响着系统的测试精度和可测距离, 当测试距离接近相干长度、链路中存在强的反射信号时, 激光相位噪声的影响将更加严重、影响范围也将增加。因此, 在 OFDR 的设计和应用中必须对激光相位噪声问题予以高度关注和设计考虑。

关键词 散射; 后向散射; 光频域反射测量术; 迈克耳孙干涉仪; 激光线宽; 激光相位噪声

中图分类号 TN913.33 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0706003

Phase Noise Analysis of Optical Frequency Domain Reflectometry

Xie Weilin Dong Yi Zhou Qian Chang Le He Hao Hu Weisheng

(National Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract The analysis of the phase noise effect in the optical frequency domain reflectometry (OFDR) is presented. A model of distribution function of phase noise is built. Simulations and further experiments demonstrate the effect of phase noise on the measurement of reflection signal and Rayleigh backscattering signal due to the finite laser linewidth and the influence of phase noise under different reflectivities. The results show the phase noise is the main issue which limits the resolution and measurement range. Under condition of the measurement range reaching the coherent length or strong reflection in fiber links, the much more significant phase noise will affect reflection signal of a longer range. According to the analysis, we should pay much more attention to the phase noise of laser while designing OFDR systems.

Key words scattering; backscattering; optical frequency domain reflectometry; Michelson interferometer; laser linewidth; laser phase noise

OCIS codes 060.2370; 030.1640; 120.3688; 290.5820

1 引言

近年来, 以光时域反射技术(OTDR)、光频域反射技术(OFDR)、低相干光反射技术(OLCR)为代表的光纤后向反射散射技术被广泛应用于分布式光纤传感^[1]。OTDR 通过对待测光纤注入光脉冲, 测量光纤中的后向散射的时域信号, 从而获得光纤链路的信息, 其较大的动态范围适用于长距离分布式测

量, 但其距离分辨率只能到米量级, 无法精确测量和定位事故点位置; OLCR 则采用低相干光源的相干检测技术, 具有微米量级的超高分辨能力, 但其测量范围只能达到米量级, 主要用于光学相干层析成像(OCT)等领域; OFDR^[2-7]通过相干检测技术对光纤的后向散射信号进行频域分析, 兼具毫米量级的距离分辨率、数千米的覆盖范围和可达 -100 dBm

收稿日期: 2010-11-23; 收到修改稿日期: 2011-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61027007)资助课题。

作者简介: 谢玮霖(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信系统和光纤测量等方面的研究。

E-mail: xilloyuy@hotmail.com

导师简介: 董毅(1967—), 男, 教授, 主要从事光传输、光接入及光电测量等方面的研究。E-mail: yidong@sytu.edu.cn (通信联系人)

的灵敏度,兼顾和弥补了其他光纤分布式测试技术的特性和缺陷,其性能的特殊性使得其中短距离的光纤接入网的故障维护、大型建筑设施的健康状况监测、地质灾害的监控等方面应用前景非常广泛。

OFDR 采用了调频连续波(FMCW)^[8]技术和迈克耳孙干涉仪进行相干检测,从而获得高灵敏度和高距离分辨率^[9~13]。除了相干检测技术,扫频激光器的性能是决定 OFDR 距离范围、距离分辨率以及灵敏度的关键因素^[14]。为了在较大的距离范围内获得足够分辨率和灵敏度,需要有一个能够在宽的频率范围内保持连续相位的、线性扫频的窄线宽激光源^[7]。由于激光的相干长度有限,当测试距离接近相干长度时,激光器的相位噪声的影响会变得越加严重^[4,10],直接影响到检测灵敏度和分辨率,从而限制了 OFDR 所能支持的测量距离、分辨率和精度。

本文对 OFDR 系统中激光器相位噪声的影响进行了理论分析和实验验证,从而对 OFDR 的研究和设计提供指导。

2 理论分析

OFDR 的系统结构如图 1 所示。OFDR 的光路是迈克耳孙干涉仪结构。其工作原理是将光频周期

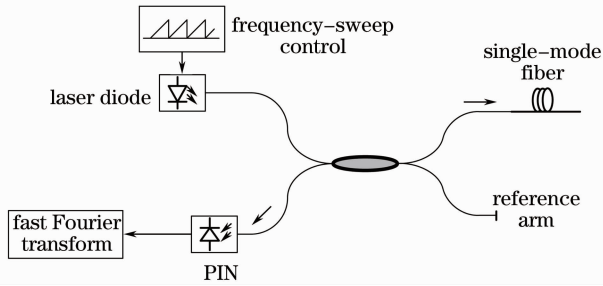


图 1 OFDR 系统结构图

Fig. 1 Structural scheme of OFDR system

性、线性扫描的激光,经 2×2 光耦合器分别送入干涉仪的参考臂和信号臂,信号臂(即待测光纤)中的瑞利后向散射信号和非涅耳反射信号与参考臂的端面反射信号经光耦合器在光电检测器(PIN)中进行相干混频。由于两者之间存在光程差,将产生拍频信号,通过检测该拍频信号来获得发射点的信息。

假设激光源在一个扫频周期内的瞬时频率为

$$\nu = \nu_0 + \gamma t,$$

式中 ν_0 为起始光频, γ 为扫频斜率,其发出的光信号可表示为

$$E(t) = E_0 \exp[j(2\pi\nu_0 t + \pi\gamma t^2 + \varphi_t)], \quad (1)$$

式中 φ_t 为光源在 t 时刻的瞬时相位。

参考臂反射信号与相对参考臂距离 x_0 处的信号臂反射信号之间的光载波的瞬时频率关系分别如图 2 中的实线和虚线所示,两个光信号间的延时差为

$$\tau = 2\left(\frac{x_0}{c/n}\right),$$

式中 c 为真空中的光速, n 为待测光纤的折射率,于是得到对应的拍频信号频率为

$$f_b = \gamma\tau = \frac{2n\gamma x_0}{c}.$$

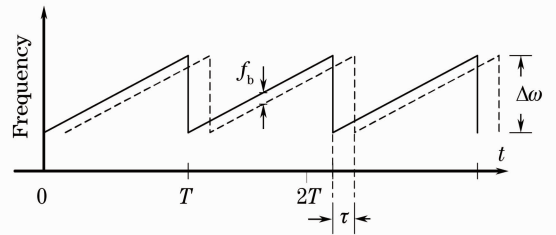


图 2 OFDR 拍频信号产生原理示意图

Fig. 2 Beat-frequency-signal generation of OFDR

设在 x_0 处的反射系数为 R_0 ,只考虑链路的非涅耳反射时,反射信号和参考信号在 PIN 处检测到的输出电流为

$$I(t) = |E(t) + \sqrt{R_0}E(t - \tau_0)|^2 = E_0^2 [1 + R_0 + 2\sqrt{R_0} \cos(2\pi f_b t + 2\pi\nu_0 \tau - \pi f_b \tau + \varphi_t - \varphi_{t-\tau})] = E_0^2 \{1 + R_0 + 2\sqrt{R_0} \cos[2\pi f_b t + \pi(2\nu_0 - f_b)\tau + \varphi_t - \varphi_{t-\tau}]\}, \quad (2)$$

由(2)式可见,拍频信号的频率由反射信号和参考信号的光程差(即待测光纤的相对距离)决定,而其强度则正比于反射信号的强度。因此,根据拍频信号的频谱特性即可获得被测光纤回波信号的强度和位置信息。

激光器因线宽有限而产生的相位噪声,将直接体

现在相干检测信号的功率谱中。令 $\Delta\varphi_\tau = \varphi_t - \varphi_{t-\tau}$,激光相位噪声导致 $\Delta\varphi_\tau \neq 0$ 。考虑到激光器线宽具有洛伦兹函数的特性,相位噪声方差可表示为

$$\Delta\varphi_\tau^2 = \langle(\varphi_t - \varphi_{t-\tau})^2\rangle = 2\pi|\tau|\Delta\nu_0,$$

式中 $\Delta\nu_0$ 为激光线宽。对检测到的拍频信号的自相关函数进行傅里叶变换可得信号的功率谱密度

$$S_I(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_1(T) \exp(-2\pi j f T) dT = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\left(\frac{1}{E_0^2} \right) \langle I(t) I(t+T) \rangle \right] \exp(-2\pi j f T) dT =$$

$$(1 + R_0)^2 \delta(f) + 2R_0 \exp(-2\tau/\tau_c) \delta(f - f_b) +$$

$$\frac{2R_0 \tau_c}{1 + \pi^2 \tau_c^2 (f - f_b)^2} \left\{ 1 - \exp(-2\tau/\tau_c) \left\{ \cos[2\pi(f - f_b)\tau] + \frac{\sin[2\pi(f - f_b)\tau]}{\pi(f - f_b)\tau_c} \right\} \right\}, \quad (3)$$

式中 $\tau_c = 1/(\pi\Delta\nu_0)$ 为激光器的相干时间,取决于激光的线宽 $\Delta\nu_0$ 。(3)式功率谱密度函数中的第一项冲击响应为平均光功率,对应混频后的直流信号。第二项冲击响应是拍频信号,信号峰值由反射系数决定,并且以系数 τ/τ_c 呈指数衰减。第三项呈现为连续谱特性,表征了激光相位噪声的影响。

由(3)式可知,有限的激光器线宽(即相干长度)的影响体现在两方面:1)影响拍频信号的强度。随着反射点距离接近相干长度,拍频信号强度以系数 τ/τ_c 呈指数衰减[(3)式中第二项];2)以拍频分量为中心,相位噪声以洛伦兹函数形式叠加在回波信号上,从而对整个测试数据产生影响,而且越接近相干长度、回波信号强度越大,噪声功率越大、影响范围越宽[(3)式第三项]。

为进一步分析相位噪声的影响,对(3)式进行了仿真计算。选取激光器扫频的范围为 100 GHz,扫频速率为 100 GHz/s,激光器相干长度分别取 2, 10 和 20 km,研究被测光纤链路中距始端 1 km 处光纤连接点的菲涅耳反射信号,取该连接器的反射率为 -40 dB (PC 型光纤连接器的典型值),为比较起见,计算结果中加入了归一化的瑞利散射,并取其功率谱密度为 -100 dB(1 mm 分辨率下典型的瑞利散射值)。仿真结果如图 3 所示。

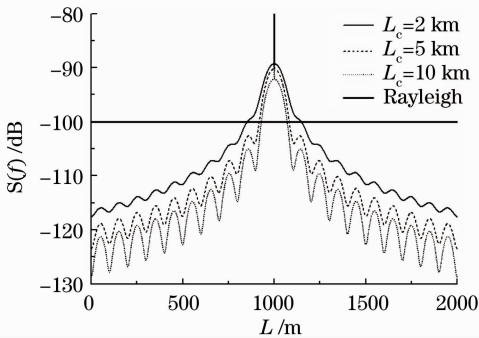


图 3 不同相干长度对相位噪声的影响

Fig. 3 Phase noise versus coherent length

图 3 结果表明,激光相位噪声呈现为洛伦兹函数的分布特性。随着测量距离接近激光的相干长度,相位噪声逐渐增大,超过瑞利散射信号功率的范围和幅度随之增加,意味着在该范围内瑞利散射信

号被相位噪声掩盖,测量精度下降。

另一方面,相位噪声的影响也与反射信号的强度有关,图 4 为反射率分别为 -40, -50 和 -60 dB[分别对应物理端面(PC), 超级物理端面(UPC), 角度物理端面(APC)光纤连接器的典型反射值]情况下,激光相位噪声的变化情况。计算中,仍取 100 GHz 的扫频范围、100 GHz/s 扫频速率、反射点距离 1 km,取激光器相干长度为 2 km。

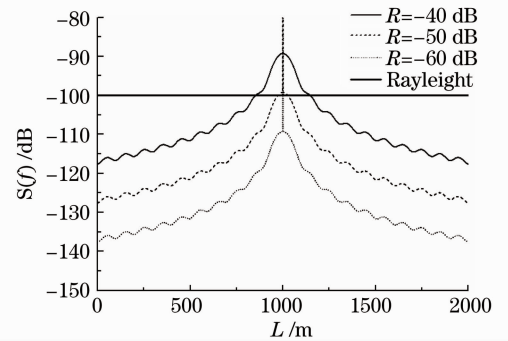


图 4 不同端面反射率对相位噪声的影响

Fig. 4 Phase noise versus reflectivity

图 4 结果表明,随着反射信号的增强,相位噪声影响程度和范围随之增大。在实际应用中,应尽可能避免链路中存在大的菲涅耳反射。

为进一步分析相位噪声的影响,图 5 呈现了不同归一化相干长度(反射点距离与相干长度的比值)和不同反射率下,相位噪声的峰值和次峰值的变化

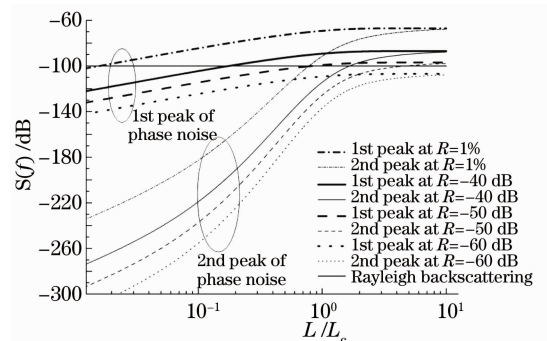


图 5 不同反射率下的噪声峰值和次峰值与归一化相干长度的关系曲线

Fig. 5 1st and 2nd peaks of phase noise versus normalized coherent length at different reflectivities

情况。相位噪声峰值可作为评估相位噪声大小的参考,次峰值可作为评估相位噪声影响范围的参考。

图 5 中,1%反射率代表链路发生断点或存在末端反射的情况。发生这种情况时,相位噪声将急剧增加,如果以相位噪声峰值为限制条件,对于瑞利散射的可测距离只能达到激光相干长度的 1%;如果以相位噪声的次峰值为限制条件,瑞利散射的可测距离只可达 70%。

-40 dB 的反射率代表链路中的 PC 型光纤连接器,瑞利散射的可测范围将达到相干长度的 20%。次峰值的影响可忽略不计。-50 dB 的反射率代表 UPC 型光纤连接器,瑞利散射的可测范围将达到相干长度的 90%。次峰值的影响可忽略不计。

如果采用 APC 型的连接器(典型反射率-60 dB),其影响可忽略不计。因此,OFDR 的设计中除了要求光源具有足够长的相干长度,还要求在中尽可能减小被测链路中的菲涅耳反射,比如采用 UPC,APC

型连接器以及光纤终端使用匹配液等。

3 实 验

图 6 为 OFDR 实验系统框图。实验中,激光源(LD)采用线宽 $\Delta\nu_0 = 6$ kHz 的外腔半导体激光器,其相干长度约 $L_c = 10.6$ km,相干时间约 $\tau_c = 5.3 \times 10^{-5}$ s。激光扫频通过对双平行铌酸锂外调制器施加扫频射频(RF)信号实现^[12,13],扫频范围为 10 GHz,相应的理论上的空间分辨率为 $\Delta x = c/2nF_s = 0.01$ m=10 cm。扫频光信号通过一个 1:2 的保偏光纤耦合器分为两路,其中一路经光环行器送入待测光纤,光环行器同时用于将回波信号导入光相干检测器系统中;另一路光信号经 45°偏转角后,作为本振光送入相干接收机中。光接收采用平衡混频式偏振分集相干接收方式,以抑制偏振敏感和减低强度噪声^[9]。接收的拍频信号经过放大、滤波后,送入数字频谱分析仪中进行频谱分析。

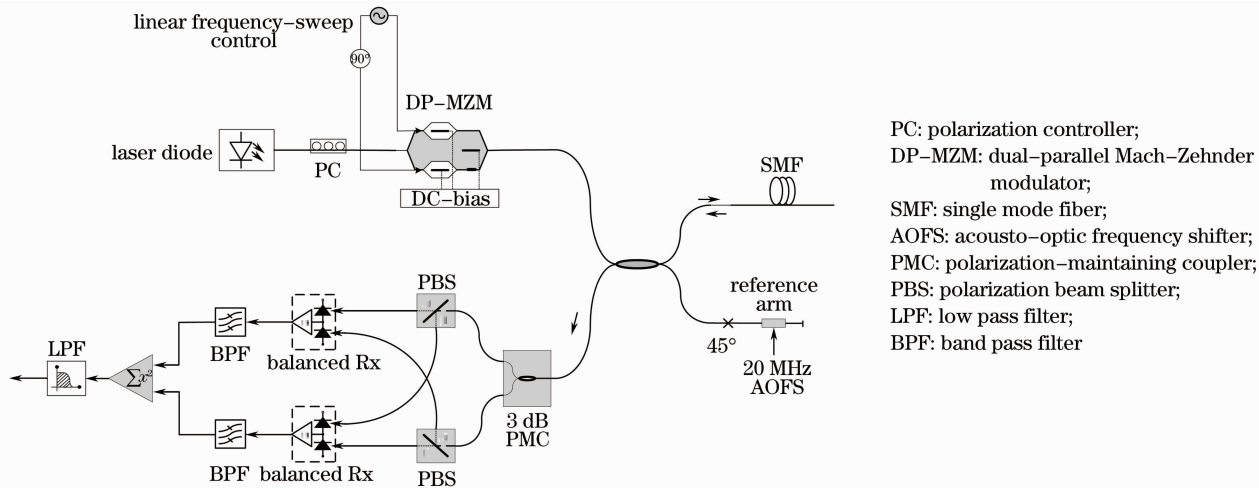


图 6 OFDR 实验系统框图

Fig. 6 Experimental setup of OFDR system

为了研究相位噪声的影响,本文对 3 种不同的光纤链路进行了测试研究。图 7(a)所示的链路由两段长度分别为 1 m 和 3 km 的光纤组成,光纤段通过 APC 光纤连接器相连,光纤末端为 APC 接头。测试结果如图 7(b),(c)所示。由于接头和尾端反射信号均很小,相位噪声的影响较小。连接 1 m 光纤的两个 APC 连接点的反射信号清晰可见[如图 7(c)所示]。

图 8(a)所示的链路组成与图 7 唯一不同的是链路的末端是 PC 接头,具有高的反射率。测试结果如图 8(b),(c)所示。强的末端反射使相位噪声

的影响变得严重,相比于图 7,不仅曲线的整体电平被提升约 10 dB,而且 1 m 光纤段两端的连接器的反射信号也被淹没。

为了研究 OFDR 的距离分辨能力,在图 9(a)所示的链路中,采用 4 段光纤,各段光纤之间通过 APC 或 PC 型光纤连接器连接,链路末端采用 APC 接头。测试结果如图 9(b),(c)所示。图 9(c)表明,两段 1 m 光纤端头的连接点清晰可辨。显示出 OFDR 在距离分辨能力上的优越性。

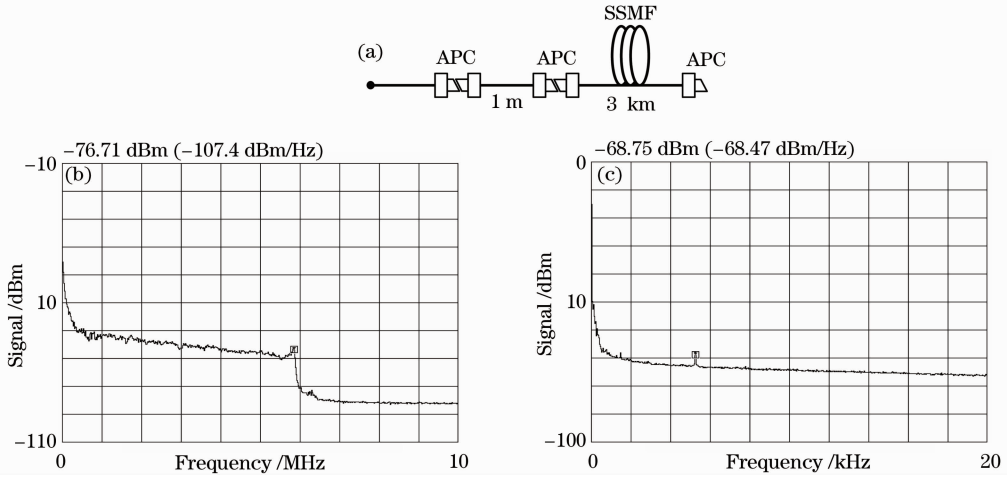


图 7 (a)被测光纤链路; (b)反射信号频谱图; (c) 0~20 kHz 内反射信号频谱图细节

Fig. 7 (a) Fiber link under test; (b) spectrum of reflected signal; (c) 0~20 kHz spectrum of reflected signal

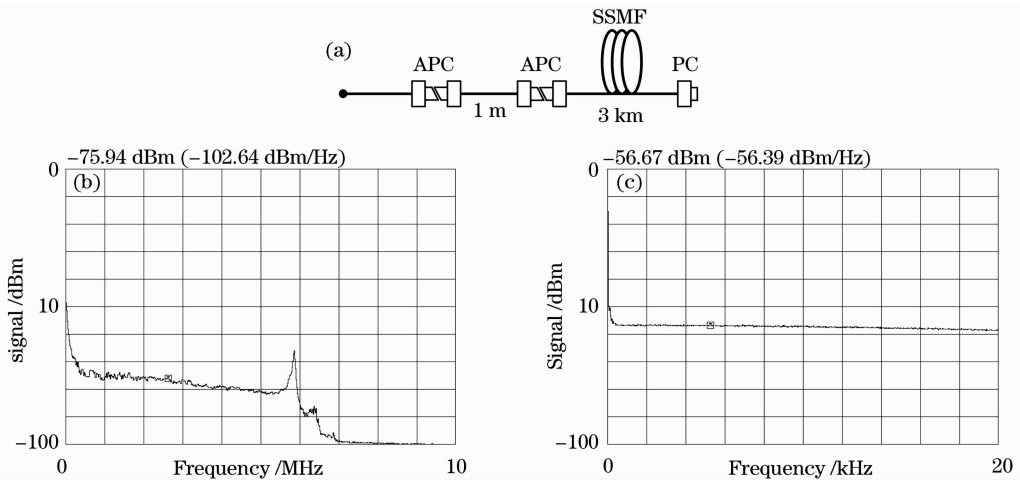


图 8 (a) PC 端面作为尾纤的被测光纤链路; (b)反射信号频谱图; (c) 0~20 kHz 内反射信号频谱图细节

Fig. 8 (a) Fiber link with APC ended pigtail under test; (b) spectrum of reflected signal; (c) 0~20 kHz spectrum of reflected signal

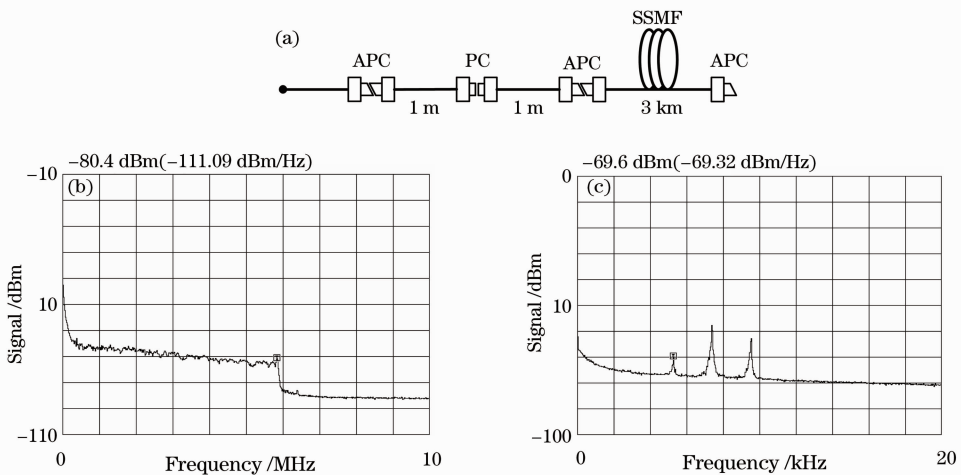


图 9 (a) APC 作为尾纤,前端增加 PC 接口跳线的被测光纤链路; (b)反射信号频谱图; (c) 0~20 kHz 内反射信号频谱图细节

Fig. 9 (a) Fiber link with APC ended pigtail and PC interface jumper at the beginning under test; (b) spectrum of reflected signal; (c) 0~20 kHz spectrum of reflected signal

4 结 论

对 OFDR 中激光相位噪声问题,进行了理论分析、仿真计算和实验测试,研究了激光相位噪声与激光相干长度、反射信号强度之间的内在关联性。研究表明,激光相位噪声是 OFDR 中的重要噪声来源,影响着系统的测试精度和可测距离,当测试点距离接近相干长度以及链路中存在强的反射信号时,相位噪声将增大、影响范围变宽。为此,要求在 OFDR 的设计中要根据实际需求,选用相干长度足够长的激光;在实际应用中要尽可能减小被测链路中的菲涅耳反射,避免造成过大的相位噪声。

参 考 文 献

- 1 J. Jasenek. The Theory and Application of Fiber Optic Sensors with Spread Parameters [M]. Slovakia: FEI STU Bratislava, 2008[2010-9-5]. http://www.eaeie.org/theiere_bratislava
- 2 R. C. Youngquist, S. Carr, D. E. N. Davies. Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(3): 158~160
- 3 J. P. Von der Weid, R. Passy, G. Mussi *et al.*. On the characterization of optical fiber network components with optical frequency domain reflectometry [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1131~1141
- 4 Xi Lixia, Wang Shaokang, Zhang Xiaoguang. Probability density of phase noise in optical phase-modulated transmission systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3408~3412
席丽霞, 王少康, 张晓光. 光相位调制传输系统中相位噪声的概率分布特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3408~3412
- 5 R. Passy, N. Gisin, Von der Weid. High-sensitivity-coherent optical frequency-domain reflectometry for characterization of fiber-optic network components [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(6): 667~669
- 6 Y. Koshikiya, X. Fan, F. Ito. Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(18): 3287~3294
- 7 J. Geng, C. Spiegelberg, S. Jiang. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(9): 1827~1829
- 8 A. J. Hymans, A. P. Graduate, J. Lait. Analysis of a frequency-modulated continuous-wave ranging system [J]. *The Institution of Electrical Engineers*, Paper No. 3264. Proceeding of the IEE-Part B: Electronic and Communication Engineering, 2010, **107**(34): 365~372
- 9 Wang Xiao, Zhang Xueliang, Hu Zhengliang *et al.*. Experimental research on interferometric fiber-optical sensing system with polarization diversity receiver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1566~1570
王 潇, 张学亮, 胡正良 等. 干涉型光纤传感系统偏振分集接收实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 3408~3412
- 10 S. Venkatesh, W. V. Sorin. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(10): 1694~1700
- 11 P. Oberson, B. Huttner, O. Guinnard *et al.*. OFDR with a narrow linewidth fiber laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1131~1141
- 12 M. Izutsu, S. Shikama, T. Sueta. Integrated optical SSB modulator/frequency shifter [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(11): 2225~2227
- 13 S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou *et al.*. Singal side-band modulation performance of a LiNbO₃ integrated modulator consisting of four-phase modulator waveguides [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(4): 364~366
- 14 Jia Fangxiu, Ding Zhenliang, Yuan Feng *et al.*. Real-time laser range finding system for moving target based on all-phase Fourier transform apectrum analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2928~2934
贾方秀, 丁振良, 袁 峰 等. 基于全相位快速傅里叶变换谱分析的激光动态目标实时测距系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2928~2934