

doi: 10.3788/gzxb20124104.0404

任意波形输入脉冲光纤背向瑞利散射的研究

易多, 王智, 吴重庆, 刘岚岚, 潘超男

(北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘 要:背向瑞利散射是光纤中一种重要的物理过程, 利用该物理现象实现的光时域反射计是一种重要且常见的光纤测量设备. 本文理论研究了任意波形的输入脉冲在光纤中的背向瑞利散射过程, 导出了将瑞利散射看作为一种线性系统的冲激响应函数, 讨论了方波与有振荡拖尾的注入脉冲的背向散射输出波形. 对于方波注入, 利用商用光时域反射仪表对理论进行了验证; 对于有拖尾的脉冲, 进行了实验研究, 结果表明仿真与实验结果一致.

关键词:光纤光学; 背向瑞利散射; 冲激响应; 光时域反射

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0404-4

0 引言

背向瑞利散射是光纤中一种重要的物理现象, 属于光纤局部不均匀引起的一种线性过程^[1]. 虽然背向瑞利散射增加了光信号的传输损耗, 但同时也可以利用它实现光纤测量, 并且基于背向瑞利散射原理的分布式光纤传感技术, 由于集传感与传光于一体, 可用于长距离的监测. Barnsen 与 Jensen 于 1976 年实验证实了光纤中的背向散射现象^[2], Personik S D 在此基础上提出了光时域反射 (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) 来测量光纤的传输损耗^[3]. 在 OTDR 技术基础上, 拓展出基于喇曼散射的光时域反射 (Raman-OTDF, R-OTDR)^[4-6]、以及基于布里渊散射的光时域反射 (Brillouin-OTDF, B-OTDR)^[4-6]、基于偏振的光时域反射 (Polarization Sensitive OTDF, P-OTDR)^[7-8] 等一系列新型检测技术, 成为光纤分布式传感技术的主流.

目前基于背向瑞利散射的研究主要是面向光时域反射仪的使用, 包括 OTDR 参量的选择等. 但是, 都是假定输入脉冲是一种标准的周期性方波脉冲. 然而, 由于激光器以及光放大器等存在码元效应, 很难获得标准的周期性方波, 通常具有一定的拖尾和抖动, 严重的影响测量的准确度和分辨率. 尤其是为了获得较大的注入功率, 往往在注入被测光纤前, 采用掺铒光纤放大器 (Erbium-Doped Optical Fiber

Amplifier, EDFA) 对注入脉冲进行放大, 从而导致严重的拖尾现象. 对于这种任意波形的输入脉冲, 关于它的背向瑞利散射研究还未见报道.

本文从光纤背向瑞利散射的基本原理出发, 将光纤视为一个线性系统, 推导出了背向瑞利散射冲激响应的函数表达式, 然后利用这个冲激响应计算了标准方波脉冲的背向瑞利散射, 验证了冲激响应的正确性. 进而, 将它应用于实验中实际的非规则脉冲, 进行了仿真计算, 并与实验得到的输出脉冲进行比较, 验证理论正确性. 本文的工作可用于修正 OTDR 技术当输入脉冲波形不规则导致的误差, 从而可以提高 OTDR 测量的准确度与分辨率.

1 光纤背向散射的冲激响应

基于背向瑞利散射机理的光纤系统中, 在低光功率情形下, 光纤可以视为线性系统^[9]. 此时探测器接受到的散射信号功率函数 $G(t)$ 可以表示成输入脉冲功率函数 $F(t)$ 与光纤背向瑞利散射冲激响应 $H(t)$ 的卷积^[2].

$$G(t) = F(t) \otimes H(t) \quad (1)$$

基于文献[10]的理论, 在 t 时刻, 与光纤始端相距 z 点处, 探测器接收到的散射幅值微分函数为

$$dg(t) = \pm \frac{r}{2} \sqrt{1 - m_7^2} e^{(i2\beta - \alpha)z + i\theta} f(t - 2\beta_0 z) dz \quad (2)$$

式中, r 是背向瑞利散射的损耗系数, $\theta = \arctan(m_8 \pm \sqrt{1 + m_8^2})/m_9$, m_7 、 m_8 、 m_9 是光脉冲从

基金项目:国家自然科学基金(No. 61077048, No. 60907027)、北京市基金(No. 4092031)和基本科研业务费(No. 2009JBM103)资助

第一作者:易多(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤通信与光信号处理. Email: 10121930@bjtu.edu.cn

通讯作者:吴重庆(1944—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤通信、光纤传感、全光网络、全光信号处理、量子光通信.

Email: cqwu@bjtu.edu.cn

导 师:王智(1971—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤通信、光纤传感和集成光电子学. Email: zhiwang@bjtu.edu.cn

收稿日期:2011-11-28; **修回日期:**2012-01-24

光纤始端传播至 z 点处的 Mueller 矩阵(Mueller 矩阵主要描述脉冲光沿光纤各点的偏振态变化)系数. $1/\beta'_0 = v_{gr}$ 是光脉冲在光纤中传播群速度. $f(t - 2\beta'_0 z)$ 是经时延后的输入脉冲幅值函数.

1)若光源的相干长度较短,远小于光纤拍长(两个正交偏振模的相位差达到 2π 时对应的光纤长度定义为拍长),可以近似认为光源不相干,并且假设脉冲宽度足够小,此时散射信号功率函数为

$$G(t) = \frac{rP_0 T_0}{2\beta'_0} \left\{ \left[1 - 2m_7^2 \left[\frac{t}{2\beta'_0} \right] \right] \exp \left(-\alpha \frac{t}{\beta'_0} \right) \right\} \quad (3)$$

式中 P_0 为脉冲峰值功率, T_0 为脉冲宽度.

若不考虑偏振对散射信号功率函数的影响,令 $m_7 = 0$, 且令 $P_0 T_0 = E$, 可得

$$G(t) = \frac{rE}{2\beta'_0} \left\{ \exp \left[-\alpha \frac{t}{\beta'_0} \right] \right\} \quad (4)$$

式中 $r = S_0 \alpha_s$, S_0 为常量,表示探测器方向接收到的散射光占总散射光的百分比, α 表示光纤总损耗算数平均系数, α_s 为散射损耗系数. 冲激响应可视为 T_0 趋于零而 P_0 趋于无穷大,并保持能量 $E = 1$ 的输出响应. 于是,将 $1/\beta'_0 = v_{gr}$ 及 S_0 、 α_s 代入,可得

$$G(t)_{E=1} = H(t) = \frac{1}{2} S_0 \alpha_s V_{gr} \exp(-\alpha V_{gr} t) \quad (5)$$

式(5)所描述的就是光纤背向散射冲激响应.

2)若光源的相干长度大于光纤拍长,此时散射信号功率函数可表示为

$$G(t) = \frac{r^2}{4} \left[\frac{P_0 T_0^2}{4\beta_0'^2} \right] \left\{ \left[1 - 2m_7^2 \left[\frac{t}{2\beta_0'} \right] \right] \exp \left[\frac{-\alpha}{\beta_0'} t \right] \right\} \quad (6)$$

同理,若令 $P_0 T_0 = E$, 此时无对应背向散射冲激响应,光纤的功率响应不符合线性系统的条件,因此无法表述其冲激响应.

为了验证冲击响应函数的正确性,首先利用商用 OTDR 进行了实验对比. 商用 OTDR 的输入脉冲功率函数 $F(t)$ 可视为理想方波,由式(1)和(5)可得

1)当脉冲宽度小于时间常量 t_0 ($t/2 = L/V_{gr}$, L 为光纤长度)时

$$G(t) = \frac{P_0 S_0 \alpha_s}{2\alpha} [e^{\alpha V_{gr} T_0} - 1] \exp(-\alpha V_{gr} t) \quad (7)$$

2)当脉冲宽度大于时间常量 t_0 时

$$G(t) = \frac{P_0 S_0 \alpha_s}{2\alpha} [e^{\alpha V_{gr} T_0} - 1] (\exp(-\alpha V_{gr} t) - \exp(-2\alpha V_{gr} t)) \quad (8)$$

实验时,测试单模光纤长度约为 1.3 km. 脉冲波长 1 550 nm, 平均化时间取 10 s, 方波脉冲宽度分别设置为 $T_0 = 10$ ns, 100 ns, 500 ns. 对应的实际输入脉冲宽度如图 1. 仿真时,以商用 OTDR 的光源作为仿真光源,取 $t = 0 \sim 1.3 \times 10^{-5}$ (s), 脉冲宽度设置与实验相同,由式(7)和(8),以及表 1 所示的常量,可得到背向瑞利散射光功率,如图 2.

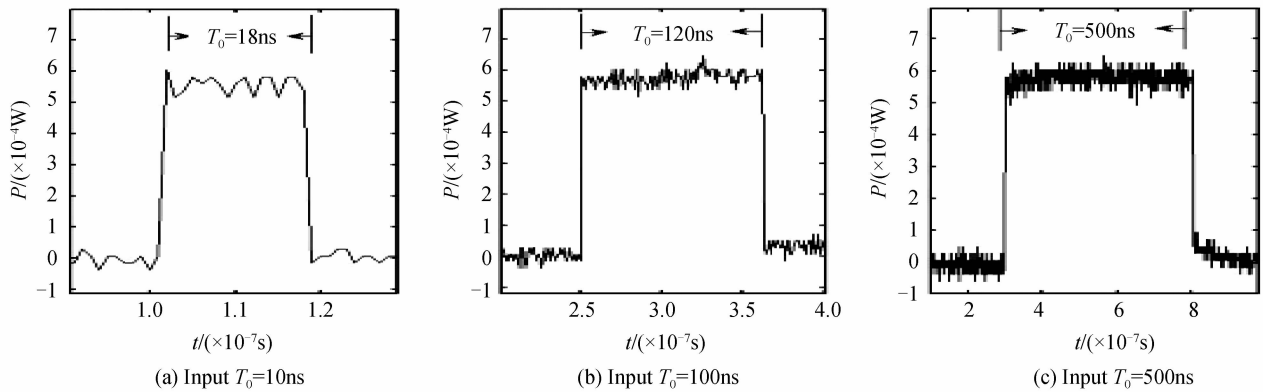


图 1 不同脉冲宽度的实际输入脉冲

Fig.1 The actual input pulse corresponding to pulse width of 10 ns, 100 ns, 500 ns

表 1 背向瑞利散射的常量值

Table 1 Constant value of Rayleigh backscattering

Constant	S_0	α_s/km^{-1}	α/km^{-1}
Value	10^{-3}	0.032	0.023

(注: α_s , α 取值条件均为单模光纤,入射波长 1 550 nm)

图 2 中, P_1 为仿真条件下背向瑞利散射功率, P_2 为实验中由光时域反射仪表采集的数据点,显示数

据已经过仪表内部处理. 数据相对大小对应光纤损耗. 由于 OTDR 光源与活动连接头的连接完好程度,以及微小清洁差异都会改变输出脉冲功率. 因而实验值与仿真实理想值存在一定差异. 比较实验以及仿真,可以看出,在不考虑费涅尔反射以及绝对散射功率下,仿真结果与实验基本一致,较好地验证了推导出的光纤背向散射冲激响应表达式.

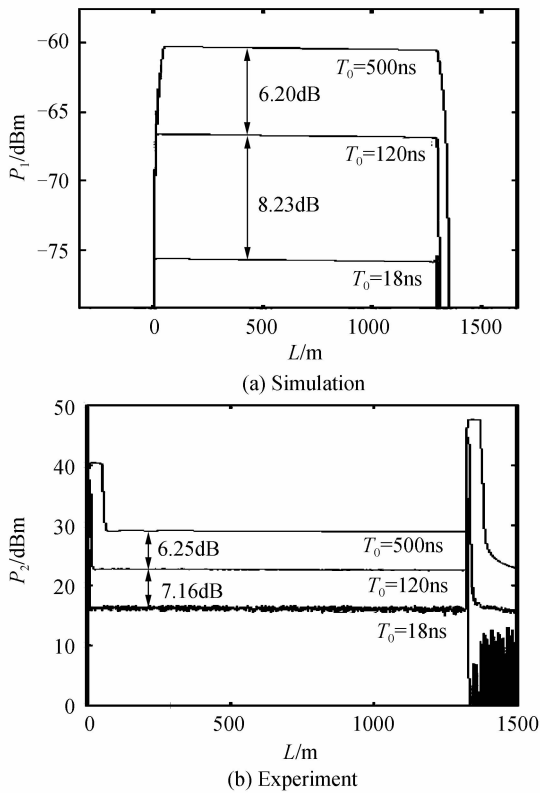


图 2 不同脉冲宽度对应的输出脉冲
Fig. 2 Output pulse corresponding to different pulse width

2 任意波形脉冲的背向瑞利散射

本文对有拖尾的脉冲注入光纤中的背向瑞利散射进行了实验研究,实验系统框图如图 3.

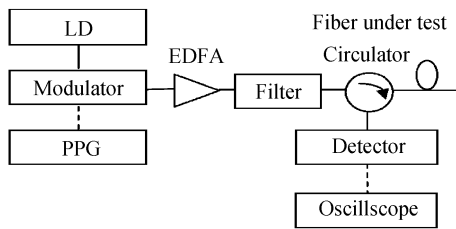


图 3 背向瑞利散射测量系统框图(实线表示光纤跳线,虚线表示电缆)
Fig. 3 Scheme of rayleigh backscatter system (solid line represents the optical fiber, dashed line represents the cable)

激光器输出 1 556 nm, 线宽 0.02 nm 的连续光,由脉冲编码发生器(Programme Pulse Generator, PPG)输出的脉冲序列调制成光脉冲序列,经 EDFA、窄带滤波器和环形器,进入一段普通单模光纤,背向瑞利散射光经环形器和探测器后,在示波器上显示.

实验过程中,调制信号脉冲宽度为 50 ns,重复周期为 200 μ s,调制后的光脉冲经 EDFA 放大并滤波后,波形如图 4.

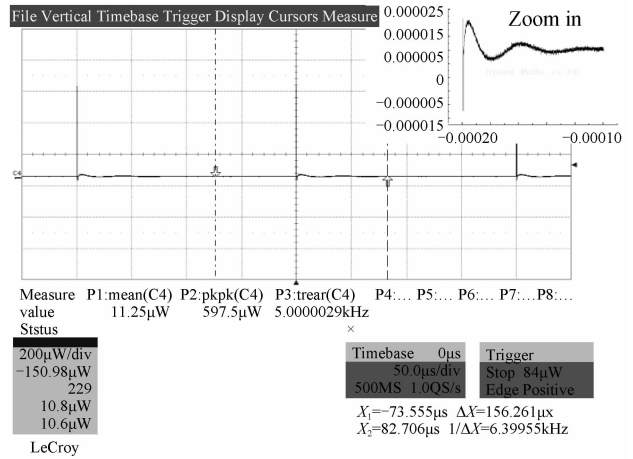


图 4 经 EDFA 放大后输入脉冲
Fig. 4 The input pulse after EDFA amplification

由于 EDFA 的瞬态特性,方波脉冲在经过 EDFA 放大后,不仅直流分量被放大,而且产生明显的弛豫振荡过程,形成拖尾,进入光纤的脉冲已经远远偏离方波.图 4 右上角的插图是单个周期内的放大后的输出脉冲,可以清晰看出由于 EDFA 的瞬态特性而引起的脉冲畸变.

图 5 是背向瑞利散射波形.在光纤首尾的两个费涅耳反射峰之间,光功率明显比两侧高,这就是背向瑞利散射光.图 5 右上角的插图是单个周期内的背向瑞利散射光.比较图 4 和图 5,可以看到(入射脉冲进入示波器前由于示波器量程限制已进行衰减,而散射光未进行衰减,因而不讨论具体功率峰值),散射脉冲波形与入射脉冲波形非常相似.这是由于输入的方波脉冲因 EDFA 的瞬态特性而产生了严重畸变,导致输出波形严重偏离指数形式.对此,我们也根据前文的理论研究,进行了仿真分析.

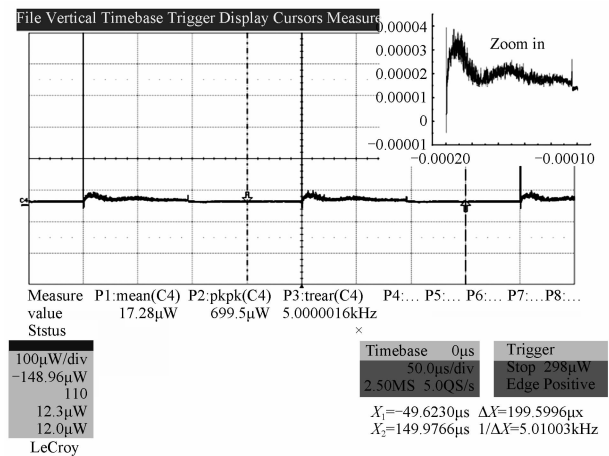


图 5 背向瑞利散射波形
Fig. 5 The Rayleigh backscattering light

从图 4 的实验结果中采集数据,得到输入光脉冲,利用式(1),经过卷积计算,得到图 6 所示的背向

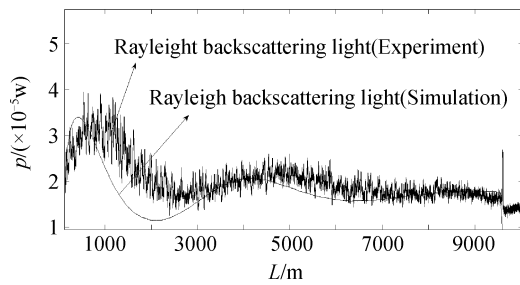


图6 仿真背向瑞利散射脉冲波形

Fig. 6 Simulation result of rayleigh backscattering light
瑞利散射仿真结果,显然,仿真结果与图5所示的实验基本一致.

3 结论

理论研究了将光纤的背向瑞利散射作为一个线性系统的冲激响应函数.将冲激响应函数应用于方波对其背向散射进行了仿真,并与商用 OTDR 的实测结果进行了对比,结果表明仿真与实验结果一致,证实了冲激响应函数的正确性.进而将此冲激响应函数应用于 EDFA 放大后出现的振荡拖尾脉冲注入被测光纤的情形,理论仿真与实验结果符合较好.本文的工作表明,利用此卷积方法,对于注入光纤的脉冲波形不需要呈严格的方波.从而对于通过数据处理改进 OTDR 的性能有一定帮助.

参考文献

[1] DUCKEY L, HOSUNG Y, PILHAN K, *et al.* Optimization of SNR improvement in the non-coherent OTDR based on simplex codes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(1):322-328.

- [2] JOSEF B. OTDRs and Backscatter measurements [M]. New Jersey: Prentice Hall PTR Press, 1998: 434-474.
- [3] PERSONIK S D. Photon probe-an optical time domain reflectometer[J]. *Bell System Technology*, 1977, **56**(1): 355-366.
- [4] ZHANG Lei, FENG Xue, ZHANG Wei, *et al.* Fiber Raman distributed temperature sensor based on the light source with adjustable pulse width[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2584-2587.
- 张磊, 冯雪, 张巍, 等. 基于变脉宽光源的分布式光纤拉曼温度传感器研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2584-2587.
- [5] WANG Yu-tian, LIU Zhan-wei, HOU Pei-guo, *et al.* Distributed optical fiber sensor for multi-point temperature measurement[J]. *Semiconductor Photonics and Technology*, 2004, **10**(3): 199-202.
- [6] SHOJI A. Distributed optical fiber sensors and their applications [C]. SICE Annual Conference. Japan: The Electro-Communications University, 2008: 329-332.
- [7] YANG Shuang-shou, WU Chong-qing, LI Zheng-yong, *et al.* Distributed measurement of birefringence by P-OTDR assisted with piezoelectric polarization controller[J]. *China Physics Letter*, 2008, **25**(9): 3304-3306.
- [8] YANG Shuang-shou. Research of Polarization Optical Time Domain Reflectometry (POTDR) [D]. Beijing: Institute of Optical Information of Beijing Jiaotong University, 2010: 37.
- 杨双收. 基于偏振的光时域反射技术(POTDR)的研究[D]. 北京: 北京交通大学光信息研究所, 2010: 37.
- [9] JASENEK J. The theory and application of fiber optic sensors with spread parameters [J/OL]. Slovakia: FEI STU Bratislava. 2010-9-5. [2011-9-16]. http://www.eaeie.org/theiere_bratislava.
- [10] WU Chong-qing, FU Song-nian, DONG Xian-zi. The effect of coherence of light source on the P-OTDR [C]. *SPIE*, 2004, **5279**: 236-240.

Properties of Rayleigh Backscattering in Optical Fiber with Arbitrary Input Optical Pulses

YI Duo, WANG Zhi, WU Chong-qing, LIU Lan-lan, PAN Chao-nan

(Key Lab of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Rayleigh backscattering is an important physical process in optical fibers, and the Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) based on the rayleigh backscattering, is one of the most important and widely-used optical fiber measuring equipments. Rayleigh backscattering progress with arbitrary input optical pulses in the fiber was analyzed theoretically, the impulse response function was derived on the basis of regarding fiber as a linear system, and backscattered output pulse of square pulse and pulse with vibrating was discussed. For the square pulse, the theory of impulse response was demonstrated by commercial OTDR instrument. For the pulse with vibrating, the experimental results show a good agreement with the simulation.

Key words: Fiber optics; Rayleigh backscattering; Pulse response; Optical time-domain reflection