

# 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究

吕月兰 行永伟\*

(哈尔滨工程大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 采用单模光纤后向瑞利散射的一维脉冲响应模型, 数值模拟了相位光时域反射计(OTDR)中 80 m 探测光纤对 1550 nm 波长的纳秒激光脉冲的瑞利散射波形特性。模拟给出了影响波形的各种物理参数(折射率、激光频率和脉宽等)变化时的相应瑞利散射波形, 理论分析得到了这些参数影响瑞利散射波形变化规律: 随着光纤折射率逐渐增大, 第一峰漂移量增大, 瑞利散射波形峰密度逐渐减小; 随着激光频率的增大, 第一峰漂移量周期性振荡衰减, 瑞利散射波形峰密度增大; 随着脉宽的增大, 第一峰漂移量周期性振荡衰减, 瑞利散射波形峰密度减小, 峰值功率不断增大。

**关键词** 非线性光学; 相位光时域反射计; 瑞利背向散射; 波形

**中图分类号** O437 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0819001

## Investigation on Rayleigh Scattering Waveform in Phase Optical Time Domain Reflectometer

Lü Yuelan Xing Yongwei

(College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** On the basis of theoretical calculation of one-dimensional pulse-response model of the Rayleigh backscattering in a single mode fiber, theoretical simulations of Rayleigh waveforms for 1550 nm of nanosecond pulses in 80 m fiber in a phase optical time domain reflectometer (OTDR) are presented. By changing physical parameters such as refractive index, laser frequency and pulse width, relations between waveforms and the physical parameters are given. With the increase of optical fiber's refractive index, the drifting quantity of the first Rayleigh peak increases and the Rayleigh peak density decreases; with the increase of the laser frequency, the drifting quantity of the first Rayleigh peak shows a periodic attenuation oscillation, and the Rayleigh peak density increases accordingly; with the increase of the pulse width, the drifting quantity of the first Rayleigh peak displays a periodic attenuation oscillation, the Rayleigh peak density decreases, and the peak power increases.

**Key words** nonlinear optics; phase optical time domain reflectometer; Rayleigh backscattering; waveforms

**OCIS codes** 190.0190; 060.4370; 290.1350; 030.1670

## 1 引 言

传统的光时域反射计(OTDR)最早被应用于通信领域中光纤衰减、裂纹、连接损耗及断裂点的测量<sup>[1,2]</sup>。高性能的 OTDR 还可以用于温度、应力及扰动信号的远距离探测<sup>[3,4]</sup>。传统的 OTDR 将一系列光脉冲引入探测光纤中, 通过探测背向瑞利散射光强度的变化, 提取探测光纤各处的光强反射率来获知折射率突变的信息, 以此来探测光纤的长度或者是缺陷, 例如断裂或熔接点。众所周知, 如果采用相干的光脉冲作为 OTDR 的探测光源, 则返回的瑞

利波形将呈现锯齿样, 这种锯齿样的波形是由于一个光脉冲内不同散射中心之间的相干叠加造成的<sup>[5,6]</sup>。这种锯齿波随着脉冲带宽及脉冲宽度不同而不同, 它可以利用更多不同频率的非相干光脉冲的叠加而消除, 因而传统的 OTDR 更多采用的是宽达吉赫兹或者太赫兹的宽带长脉冲来消除这种锯齿波形, 这就大大降低了 OTDR 探测的空间分辨率<sup>[7]</sup>。与之相反, 相位敏感 OTDR 恰恰是利用了锯齿样的波形。在相位敏感 OTDR 系统中, 窄带的短光脉冲被发射到探测光纤中, 返回的瑞利散射的波

收稿日期: 2010-12-14; 收到修改稿日期: 2011-04-21

作者简介: 吕月兰(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事非线性光学方面的研究。Email: yuelanl@gmail.com

\* 通信联系人。E-mail: xingywiii@sohu.com

形由于不同散射中心的相干作用被调制成锯齿状。通过分析这种锯齿状瑞利波形的变化,就可以监视探测光纤中由于外界扰动带来的折射率变化。同时传统的 OTDR 是强折射率变化探测,很难探测弱的折射率变化信息,而往往这些变化是静态变化,所以对探测时间也没有更高要求。相位敏感 OTDR 采用的是窄带激光,引入探测光纤的系列光脉冲是相干光脉冲,弱折射率变化都可以由脉冲之间的相干效应得到加强。同时采用的是短脉冲激光,从而极大地提高了空间分辨率。相位 OTDR 系统应用范围很广,不但可以进行全自动的信息技术(IT)安全监控系统,为现有的光缆通信线路提供方便的线路篡改或干扰报警,而且可以用于长距离的天然气、石油管道监控和光缆监控等安全监测和民用设施如桥梁、大型建筑等土木工程的健康监测<sup>[4]</sup>。然而相位敏感 OTDR,尤其是在采用相干检测系统时,会受到很多因素的制约和影响,例如温度或应变的随机变化就会导致折射率的随机变化;激光频率的不稳定(跳频)会造成系统探测波形不稳定,进而使得系统的探测准确度下降,造成虚假信号,降低了系统甄别率。因此,研究相干检测相位 OTDR 波形的特性是十分必要的。本文理论模拟了光纤中瑞利散射波

形随各种参数变化的规律,探讨了光纤折射率、激光光源频率、激光脉宽对探测系统输出瑞利散射波形影响的各种规律。

## 2 理 论

采用描述光纤后向瑞利散射的一维脉冲响应模型来描述相位 OTDR 波形的特性<sup>[8]</sup>。如图 1 所示,假设探测信号是频率为  $f$  的准单色矩形脉冲,脉宽为  $w$ ,同时假设该光源相干时间与脉宽  $w$  相比足够大。在  $t=0$  时将这样一个光脉冲发射进光纤,在光纤输入端获得一个背向瑞利散射波,其振幅可表示为

$$e(t) = \sum_{i=1}^N a_i \exp\left(-\alpha \frac{c\tau_i}{n_i}\right) \times \exp[j2\pi f(t - \tau_i)] \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{w}\right), \quad (1)$$

式中  $a_i$  和  $\tau_i$  分别是第  $i$  个散射波的振幅和时间延迟, $N$  是设定的散射中心个数, $\alpha$  是光纤衰减常数, $c$  是真空中光速, $n_i$  是光纤折射率,并且当  $[(t - \tau_i)/w] \leq 1$  时矩形函数  $\text{rect}[(t - \tau_i)/w] = 1$ ,否则为 0。时间延迟  $\tau_i$  与从输入端到第  $i$  个散射的光纤长度  $l_i$  的关系为  $\tau_i = (2n_i l_i)/c$ ,背向瑞利散射波的光功率  $p(t)$  则表示为

$$p(t) = |e(t)|^2 = p_a(t) + p_b(t), \quad (2)$$

$$p_a(t) = \sum_{i=1}^N a_i^2 \exp\left(-2\alpha \frac{c\tau_i}{n_i}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{w}\right), \quad (3)$$

$$p_b(t) = 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N a_i a_j \cos \phi_{ij} \exp\left\{-\alpha \frac{c(\tau_i + \tau_j)}{n_i}\right\} \text{rect}\left(\frac{t - \tau_i}{w}\right) \text{rect}\left(\frac{t - \tau_j}{w}\right), \quad (4)$$

式中  $\phi_{ij} = 2\pi f(\tau_i - \tau_j)$ ,定义为背向散射波中第  $i$  个到第  $j$  个散射中心的相对相位。部分求和项  $p_a(t)$  代表大量散射中心中每一个独立背向散射中心的光功率的求和,它是一个关于  $t$  的函数,提供常规的 OTDR 波形。

另一方面,求和项  $p_b(t)$  由来自同一脉冲中不同散射中心之间的干涉引起。当探测信号是一个非相干光脉冲时,这一项将消失。相比之下,当探测信

号是一个相干光脉冲时,它将导致相位 OTDR 波形中出现一个锯齿样波形。 $p_b(t)$  中的每一个项都含有余弦函数  $\cos \phi_{ij}$ ,该余弦函数中相对相位  $\phi_{ij}$  也可描述为  $\phi_{ij} = 4\pi f n_i s_{ij}/c$ ,其中  $s_{ij} = l_i - l_j$ 。因此,干涉项  $p_b(t)$  是一个关于  $f, n_i$  和  $s_{ij}$  的函数。

## 3 相位 OTDR 瑞利散射波形特性的理论模拟及分析

计算采用长 80 m 的光纤进行模拟,激光频率  $f=1.9 \times 10^{14}$  Hz,光纤衰减系数  $\alpha=4.5 \times 10^{-5}$ ,脉宽  $w=100$  ns,令光纤折射率  $n_i=1.5$ ,模拟后得到原始波形。

### 3.1 光纤折射率对瑞利散射波形的影响

逐渐改变折射率  $n_i$  进行理论模拟,得到不同折

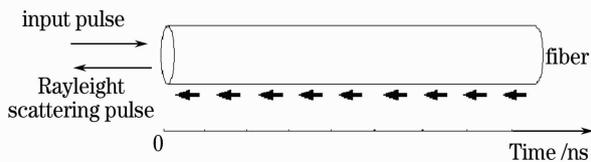


图 1 基于相位 OTDR 技术探测光纤的示意图

Fig. 1 Schematic of testing fiber based on phase OTDR technology

射率的瑞利散射波形图,如图 2 所示。

为了准确地描述折射率改变对波形的影响,引入一些物理参量对瑞利散射波形进行分析,其一是第一峰值位置漂移量,其定义为改变参数后产生的

波形中第一波峰与原始波形中第一波峰对应位置的  
距离差,用  $\Delta L$  表示;其二是波形峰密度,定义为改变参数后得到的波形中峰个数与原始波形中峰个数之比,用  $R$  表示。

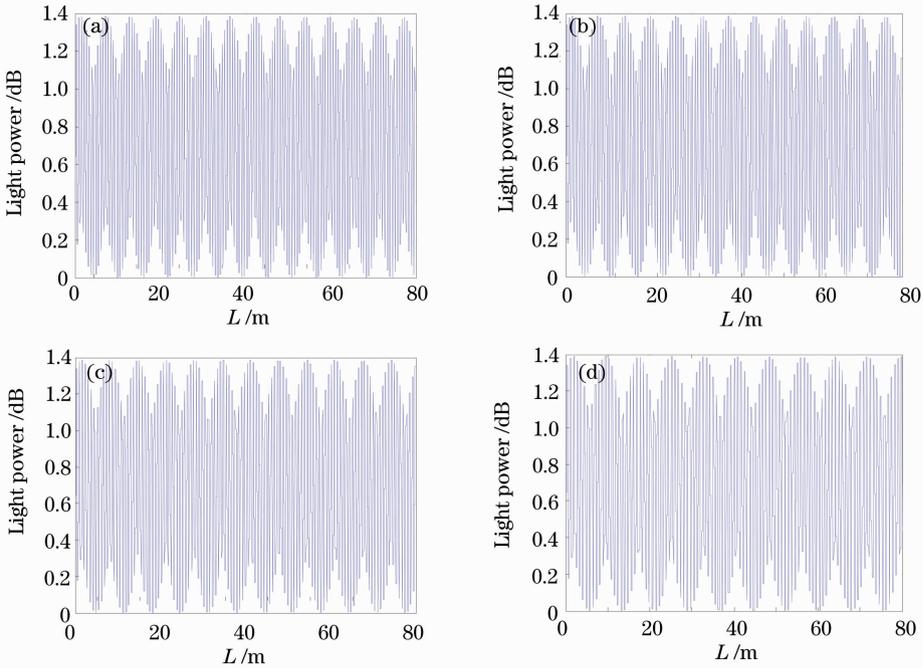


图 2 不同折射率的瑞利散射波形图。(a)  $n_t=1.5$ ; (b)  $n_t=1.6$ ; (c)  $n_t=1.7$ ; (d)  $n_t=2.0$

Fig. 2 Rayleigh scattering waveforms with different refractive indices. (a)  $n_t=1.5$ ; (b)  $n_t=1.6$ ; (c)  $n_t=1.7$ ; (d)  $n_t=2.0$

由图 2 不同折射率的波形图,分析得到如图 3 所示的波形变化规律:随着光纤折射率逐渐增大,第一峰值漂移量线性增大,波形峰密度逐渐减小。通过数据分析发现峰值功率无明显变化。其规律根据距离-时间公式  $L = ct/2n_t$  解释,当折射率增大、 $L$  不

变时,测试整个光纤所需的时间  $t$  增大,第  $i$  个光功率和第  $i+1$  个光功率之间的时间差变大 ( $i \geq 1$ ),对应的距离差  $\Delta L$  也相应变大,显示在波形上就是波形周期变大。所以,波形会出现上述理论模拟结果:峰值漂移量增大,波形峰密度减小。

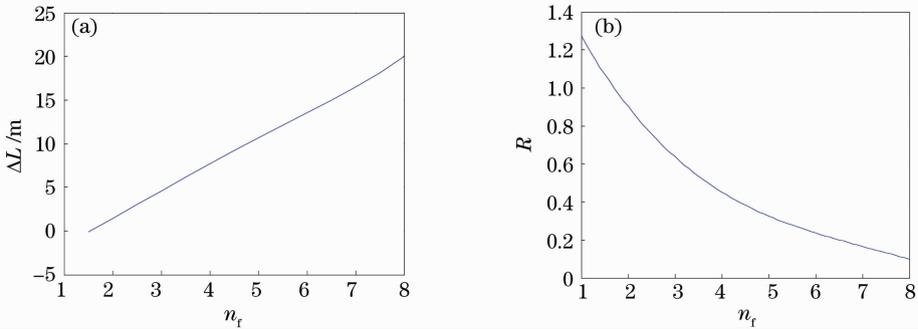


图 3 瑞利散射波形随折射率变化曲线。(a)峰值位置漂移量随折射率的变化曲线;(b)波形峰密度随折射率的变化曲线

Fig. 3 Characteristics of Rayleigh scattering waveform varying with refractive index. (a) Drifting quantity of peak position; (b) peak density with refractive index

### 3.2 激光脉冲频率对瑞利散射波形的影响

频率的稳定性对于相位敏感 OTDR 是至关重要的。如果后一个脉冲相对前一个脉冲产生了跳频,将导致前后两个脉冲所产生的锯齿波形漂移,相干效应下降,锯齿波形的可见度降低,这样将导致外

来扰动信号的模糊甚至消失。改变激光频率  $f$ ,模拟瑞利散射波形。图 4 给出瑞利散射波形的变化规律:随着频率的增加,波形第一峰值位置漂移量周期性振荡衰减,波形密度增大。

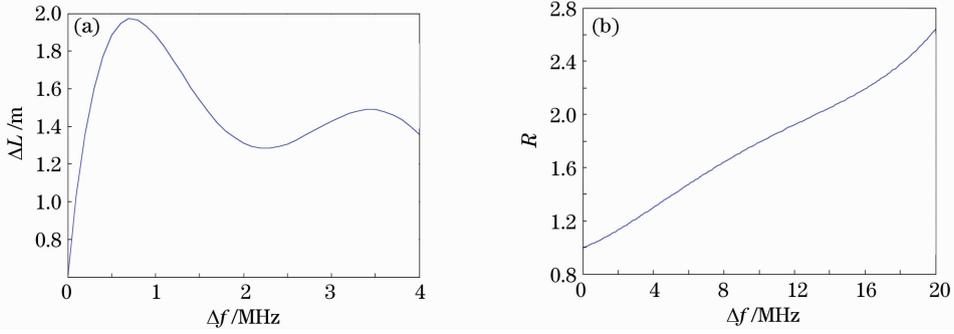


图 4 瑞利散射波形随激光频率改变曲线。(a)峰值位置漂移量变化曲线;(b)波形峰密度变化曲线

Fig. 4 Characteristics of Rayleigh scattering waveform varying with laser frequency. (a) Drifting quantity of the peak position; (b) peak density of the pulse

上述规律可以由光功率计算(4)式中与频率有关的项  $\cos \phi_{ij} = \cos[2\pi f(\tau_i - \tau_j)]$  分析得到。模拟中, 频率增大后与其原始频率的比值(即增大幅度)逐渐变大, 而  $\cos \phi_{ij}$  周期改变的幅度与频率增大的幅度成正比, 因此波形会出现上述理论模拟的结果。

### 3.3 激光脉宽对瑞利散射波形的影响

逐渐增大激光脉宽  $w$ , 理论模拟瑞利散射波形, 得到图 5 所示变化规律: 增加脉宽后波形密度减小, 峰值功率变大, 波形第一峰值位置漂移量周期性振荡衰减。

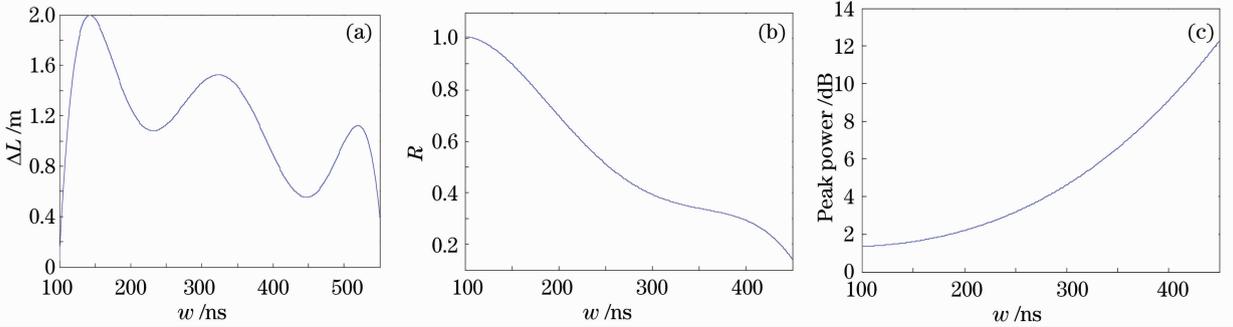


图 5 瑞利散射波形随脉宽改变曲线。(a)第一峰值位置漂移量变化曲线;(b)波形峰密度变化曲线;

(c)第一峰值功率变化曲线

Fig. 5 Characteristics of Rayleigh scattering waveform varying with pulse width. (a) Drifting quantity of the first peak position; (b) peak density; (c) the first peak power

上述规律可以这样解释: 单模瑞利背向散射光功率方程为<sup>[19]</sup>

$$P_{bs}(z) = \frac{S \alpha_s P_0 w v_g}{2} \exp(-2\alpha z),$$

式中  $S$  为反向散射系数,  $\alpha_s$  为瑞利散射因子,  $P_0$  为

峰值功率;  $v_g$  为光纤中的群速度。增大脉宽  $w$ , 光功率  $P_{bs}(z)$  随之增大。因此, 第一峰值功率随着脉宽增大而增大。(4) 式中的  $\phi_{ij} = 4\pi f n_l s_{ij}/c$ , 而散射区间  $s_{ij} = l_i - l_j$ , 脉宽增大,  $s_{ij}$  也增大, 因此第一峰值位置漂移量振荡衰减, 相应瑞利散射波形密度减小。

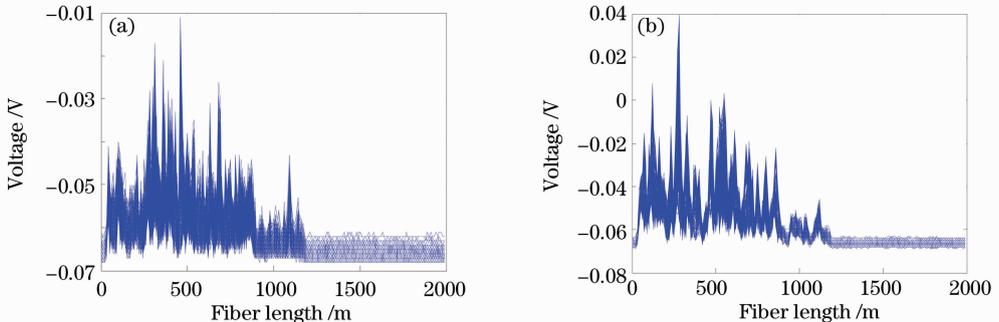


图 6 不同脉宽时瑞利散射实验波形图。(a)  $w=100$  ns; (b)  $w=200$  ns

Fig. 6 Experimental Rayleigh scattering waveforms with different pulse widths. (a)  $w=100$  ns; (b)  $w=200$  ns

引用文献[10]的实验结果与上述理论模拟结果进行比较。图6给出不同脉宽时瑞利散射实验波形,横坐标为光纤长度,纵坐标为瑞利散射电信号的电压值(正比于瑞利散射光功率)。当脉宽为100 ns时,脉冲峰功率较低,而单位光纤长度上的脉冲峰密度较高;当脉宽增加到200 ns时,峰值功率增高而脉冲峰密度变低,这和不同脉宽时瑞利散射波形的变化规律完全相符,表明上述理论模拟是正确的。

## 4 结 论

利用简化的单模光纤一维脉冲响应模型,数学模拟了相干短脉冲作用下的瑞利散射波形,理论模拟了不同参数(例如折射率、激光频率和激光脉宽)下的瑞利散射波形,并分析了瑞利散射波形随这些参数的变化规律,进一步探索了相干短脉冲作用下瑞利散射过程的物理实质。该研究对于提高相位OTDR中瑞利散射波形的稳定性提供理论指导,对于发展相位OTDR实际应用有指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Luo Jun. Highly sensitive distributed optical fiber intrusion monitoring system [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(6): 1123~1128  
罗 俊. 新型高灵敏分布式光纤入侵监测系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(6): 1123~1128

- 2 Zhao Hongbo, Zhao Ziyang, Ding Jian. Bidirectional OTDR-based long-range optical cable line tests [J]. *Study On Optical Communications*, 2011, **37**(1): 50~51  
赵宏波, 赵子岩, 丁 健. 基于双向OTDR测试的长距离光缆线路的测量[J]. *光通信研究*, 2011, **37**(1): 50~51
- 3 Li Rongwei, Li Yongqian, Yang Zhi *et al.*. Measurement of optical fiber temperature sensing based on coherent optical time domain reflectometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1988~1992  
李荣伟, 李永倩, 杨 志 等. 基于相干光时域反射计的光纤温度传感测量[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 1988~1992
- 4 Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light  $\varphi$ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572  
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 $\varphi$ 光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572
- 5 Juan C. Juarez. Field test of a distributed fiber-optic intrusion sensor system for long perimeters [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(11): 1968~1971
- 6 P. Healey. Fading in heterodyne OTDR [J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(1): 30~32
- 7 Juan C. Juarez. Distributed fiber-optic intrusion sensor system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(6): 2081~2087
- 8 Yahei Koyamada. Novel fiber-optic distributed strain and temperature sensor with very high resolution [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2006, **E89-B**(5): 1722~1723
- 9 A. H. Hartog, Martin E. Gold. On the theory of backscattering in single-mode optical fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **2**(2): 76~82
- 10 Yuelan Lu, Tao Zhu, Liang Chen *et al.*. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(22): 3243~3249