

文章编号: 0258-7025(2010)06-1462-05

采用 Simplex 编码光外调制的拉曼散射 分布式光纤传感器

宋牟平 鲍 翀 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 拉曼散射分布式光纤传感器(DOFS)能有效地进行长距离温度检测,并具有抗电磁干扰强、系统结构简单和灵敏度高等优点。但其空间分辨率与检测信噪比(SNR)之间存在一定的矛盾,即在一定的光功率限制下,当增加光源脉冲宽度以提高检测信噪比时,系统的空间分辨率也会因此降低。采用 Simplex 编码(简称 S 编码)光外调制的方式来解决这一矛盾,通过理论分析和数值计算研究了 S 编码对拉曼散射分布式光纤传感器的作用。在实现编码光调制的分布式光纤传感器中,存在如何产生高功率编码调制光这一问题,难以应用一般的脉冲激光器或内调制。采用光源外调制加放大的方案,建立了基于 S 编码的 4.7 km 拉曼散射传感实验系统,初步实验结果验证了码长为 7 的 S 编码,对检测信号比有 1.6 倍左右的改善效果。

关键词 传感器;拉曼散射;Simplex 编码;温度

中图分类号 TN247;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1462

Raman Distributed Optical Fiber Sensor with Simplex Coding Optical External Modulation

Song Muping Bao Chong Ye Xianfeng

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract The Raman-scattering-based distributed optical fiber sensor (DOFS) can realize the continuous temperature detection in one-dimension space. It has good environmental adaptability, simple system structure, and high sensitivity. But there is a conflict between the spatial resolution and the signal sensitivity in the system, namely, when increasing pulse width of the probe pulse to improve the signal to noise ratio (SNR) of the detected signal, the spatial resolution is degraded simultaneously. Simplex code is used to overcome this conflict between the SNR and the spatial resolution. Using the theoretical analysis and numerical simulation, the Simplex code's effect on Raman DOFS has been studied. In realizing a coding DOFS, there exists a problem of how to achieve high-power coding pump light, because the usual methods, such as pulsed-laser or internal modulation, can not be used. A method based on external modulation and optical amplifier is chosen, and a 4.7 km Simplex coding Raman DOFS experimental system has been set up. The results show that the 7-bit simplex code can improve the SNR of the detecting signal by around 1.6 times.

Key words sensors; Raman scattering; Simplex coding; temperature

1 引 言

光纤传感器^[1,2]具有区别于传统电传感器的优点,如无辐射干扰性、抗电磁干扰性好和化学稳定性好等。其中的分布式光纤传感器(DOFS)还具有在时间和空间上对一维物理量场进行实时检测的能

力。拉曼散射分布式光纤传感器^[3~7]是其中较成功的一种,在过去 20 多年的研究中该传感器得到了迅速的发展和應用。

拉曼散射 DOFS 利用的是光纤的自发拉曼散射信号。拉曼散射^[8]有如下规律:散射光中在每条原始

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-16

作者简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事新型光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

入射谱线(频率为 ν_0) 两侧对称地伴有频率为 $\nu_0 \pm \nu_i$ ($i=1,2,3,\dots$) 的谱线,长波一侧的谱线称为斯托克斯(Stokes)线,短波一侧的谱线称为反斯托克斯(anti-Stokes)线。而其中的频移 ν_i 与入射光频率 ν_0 无关,它是由拉曼散射材料决定的。在光纤中,拉曼效应中的反斯托克斯光强有较强的随温度变化效应,利用这一特性可构成分布式光纤温度传感器。

在拉曼散射 DOFS 中,脉冲光产生的后向自发拉曼散射光非常微弱,易受噪声干扰。而在 DOFS 系统中,信噪比(SNR)决定了传感器所能达到的实际精度和整个系统在一定累加平均次数下所能测量的最大距离。系统的空间分辨率($s=\tau c/2$, τ 为光脉冲宽度, c 为光在光纤中传播的速度)取决于光脉冲的宽度,脉冲宽度越大,分辨率越低。由于受激拉曼散射对入射峰值功率的限制,为了提高入射光脉冲的能量,可采用增加光脉冲宽度的方法。但是如果增大了光脉冲的宽度,则就降低了系统的空间分辨率。为了解决这一问题,Marcelo A. Soto 等^[9-11]提出把经过编码后的光脉冲信号引入到 DOFS 系统中,以期在不改变光脉冲宽度和叠加次数的前提下提高信号信噪比,从而解决提高系统信号信噪比与提高系统的空间分辨率之间的矛盾。本文采用 Simplex 编码(简称 S 编码)来实现对拉曼散射 DOFS 接收信号的改善。

2 原 理

图 1 所示为 S 编码拉曼散射 DOFS 的原理图。普通拉曼散射 DOFS 应用的是单脉冲光,但对于 S 编码拉曼散射 DOFS,输入到传感光纤的是 S 编码光脉冲序列。检测时不能直接对光电接收信号进行累加平均(Boxcar),必须先进行 Simplex 解码,得到相当于单脉冲光的传感信号。其他的信号处理,如滤波、光

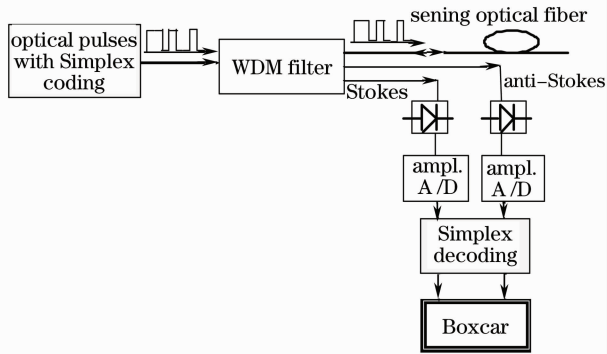


图 1 S 编码拉曼散射 DOFS 原理图

Fig. 1 Schematic of the Simplex coding Raman scattering DOFS

电检测、模/数(A/D)转换和温度信息提取等,都和一般的拉曼散射 DOFS 一样,但采用 S 编码后,系统的检测信噪比会得到有效提高。

S 编码^[9-11]被用于提高分布式光纤传感器的检测信噪比,它是一个由 1 和 0 构成的单极矩阵。这个矩阵是由 Hadamard 矩阵转化得到的,其中的每一行即叫作 S 码。当去除 Hadamard 矩阵的第一行与第一列,并将矩阵中的元素“+1”改为“0”,将“-1”改为“1”,得到的新矩阵便是所需的 S 矩阵。而 n 阶 S 矩阵的逆矩阵的 $(n+1)/2$ 倍恰好就是将 S 矩阵中对应位置的元素“0”改为“-1”。如 7 阶 S 矩阵和它的逆矩阵 S^{-1} 分别为

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$S^{-1} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

假设 $\omega_1(t)$ 为单脉冲光 $P_1(t)$ 经光时域反射计(OTDR)系统得到的不包含噪声的理想检测信号。同时定义经一定时延后输出的新的脉冲为 $P_2(t) = P_1(t-\tau)$, $P_3(t) = P_1(t-2\tau) \dots$, 其中 τ 为单脉冲光 $P_1(t)$ 的脉冲宽度。相应于新的脉冲 $P_2(t)$, $P_3(t) \dots$, 得到一系列相对应的新的理想检测信号 $\omega_2(t) = \omega_1(t-\tau)$, $\omega_3(t) = \omega_1(t-2\tau) \dots$ 。若将 S 编码引入 OTDR 系统中,则经过编码后在检测光纤输出端得到的实际光信号定义为 $\eta_1(t)$, $\eta_2(t)$, $\eta_3(t) \dots$ 。此时假定信号中各自包含的系统噪声为 $e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t) \dots$ 。最终通过系统解码得到的实际检测信号(相当于在 0 时刻输入单脉冲光)为

$$\omega'_n(t) = S_n^{-1} \cdot [\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_n(t)]^T,$$

式中 S_n^{-1} 是 S^{-1} 的第 n 行。

因此对于一个码长为 L 的 S 编码,可以计算得到^[11]

$$\begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \vdots \\ \eta_{L-1}(t) \\ \eta_L(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_L \cdot \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \vdots \\ \omega_{L-1}(t) \\ \omega_L(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_{L-1}(t) \\ e_L(t) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \omega'_1(t) \\ \omega'_2(t) \\ \vdots \\ \omega'_{L-1}(t) \\ \omega'_L(t) \end{bmatrix} = \mathbf{S}_L^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \eta_1(t) \\ \eta_2(t) \\ \vdots \\ \eta_{L-1}(t) \\ \eta_L(t) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

解码后输出信号为

$$\bar{\omega}(t) = \frac{\omega'_1(t) + \omega'_2(t + \tau) + \dots + \omega'_{L-1}[t + (L - 2)\tau] + \omega'_L[t + (L - 1)\tau]}{L} = \omega_1(t) + \frac{2}{L(L + 1)} \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^L T_{j,k} e_k [t + (L - 1)\tau], \quad (5)$$

式中 $T_{i,j}$ 为矩阵 $\mathbf{T}_L = \frac{L+1}{2} \mathbf{S}_L^{-1} = \begin{bmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & \dots & T_{1,L} \\ T_{2,1} & T_{2,2} & \dots & T_{2,L} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ T_{L,1} & T_{L,2} & \dots & T_{L,L} \end{bmatrix}$ 的元素, $T_{i,j} \in \{1, -1\}$ = 1 或 -1。

相应的噪声均方差为

$$E \left\{ \left(\frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \omega'_n [t + (L - 1)\tau] - \omega_1(t) \right)^2 \right\} = \frac{4}{L^2(L + 1)^2} E \left\{ \left(\sum_{j=1}^L \sum_{n=1}^L T_{j,n} e_n [t + (L - 1)\tau] \right)^2 \right\} = \frac{4\sigma^2}{(L + 1)^2}, \quad (6)$$

而同样经 L 次普通叠加处理后得到的噪声均方差为 σ^2/L , 因此 S 编码后, 系统检测信噪比提高了

$$\sqrt{\frac{\sigma^2}{L} \frac{4\sigma^2}{(L + 1)^2}} = \frac{L + 1}{2\sqrt{L}}. \quad (7)$$

由(5)式和(7)式可得出, 解码后的光信号能恢复出单脉冲的检测信号, 故能在不影响空间分辨率的基础上, 提高传感器的检测信噪比达 $\frac{L+1}{2\sqrt{L}}$ 倍。如图 2 所示, 随着 S 编码长度的增加, 信噪比的提高量并没有相应地线性增加, 而且相对于 L 次普通叠加处理的方案, 码长为 L 的 S 编码的解码计算量大为增加, 因此需要选取合适的编码长度。考虑到实验

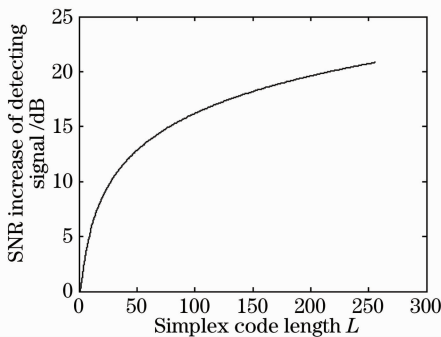


图 2 不同编码码长下的信噪比增益

Fig. 2 SNR increase as a function of code length

的可操作性, 在下面的初步实验中采用码长为 7 的 S 编码。

3 实验及结果分析

在 S 编码拉曼分布式光纤传感器中, 需要产生 S 编码光脉冲序列, 显然难以使用脉冲激光器或光源内调制方案, 这里采用光源外调制加放大器方式。图 3 为采用 S 编码的拉曼散射 DOFS 的实验系统。该系统采用波长为 1550 nm 的低功率 (约为 10 mW) 分布反馈式激光器 (DFB-LD) 作为传感器光源。通过电子线路产生一组 S 编码的脉冲序列电信号, 将之加载到光外调制器 (铌酸锂电光调制器)

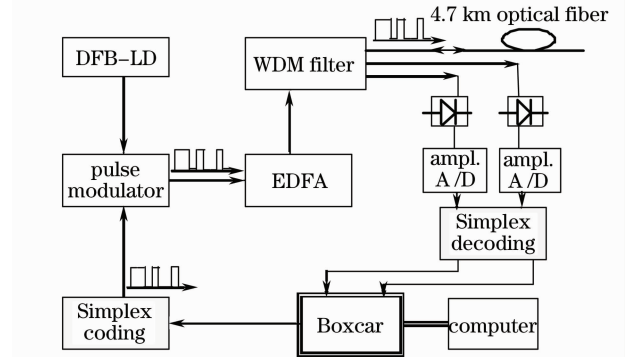


图 3 拉曼散射 DOFS 实验系统

Fig. 3 Experimental setup of Raman scattering DOFS

上,光源发出的直流光被调制为一组 S 编码脉冲序列光(受光放大器功率限制,单脉冲宽度设为 50 ns)。脉冲序列光再经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后通过波分复用(WDM)器件入射到传感光纤,产生所需的后向自发拉曼散射光。受光功率的制约,这里采用 4.7 km 多模光纤作为传感光纤。从传感光纤返回的后向散射光,经 WDM 滤波器滤出的两路信号光,一路为斯托克斯光,另一路为反斯托克斯光,分别经光电转换、放大和 A/D 转换后,对两组信号进行相应的解码处理,然后输入到累加平均器,最终由计算机进行相关计算,得出温度检测

信号。

实验中以 4.7 km 多模光纤作为传感光纤。为了显示系统检测温度的效果,在光纤末端 4.5 km 处,将约 20 m 长的光纤浸没于 40 °C 温水中。图 4 为计算机处理获得的信号波形图(反斯托克斯光),叠加次数为 10^5 次。为了验证 S 编码对传感器的作用,在同样情况下得到了未经 S 编码的系统信号波形[图 4(a)]和经 S 编码处理的系统信号波形[图 4(b)]。比较图 4(a)和(b)可看出,采用 S 编码可得到较好的检测信噪比。

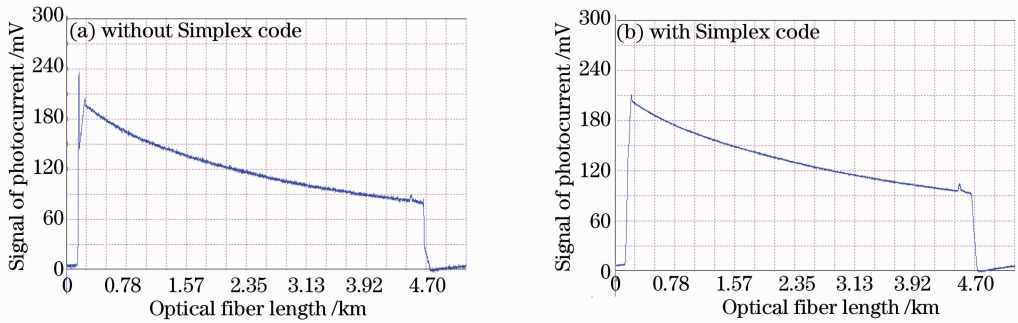


图 4 10^5 次叠加后的反斯托克斯信号波形

Fig. 4 Detecting anti-Stokes signal wave after one hundred-thousand times of accumulation

为了进一步说明 S 编码处理对检测信噪比的变化,引入信号波动比率这一参量,定义为

$$P = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{\bar{V}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中 V_{\max} 和 V_{\min} 分别表示光纤某一点上检出的波动信号的最大值和最小值, \bar{V} 为该处光纤信号量的均值。信号波动比率可形象地表征出由噪声引起的信号波动程度,和检测信噪比成反比关系。表 1 所示在 1.31, 2.61 和 3.92 km 处光纤反斯托克斯光的信号波动比率,其中 P_1 为未采用 S 编码处理时得到的信号波动比率, P_2 为采用 S 编码处理时得到的信号波动比率, P_1/P_2 表征采用 S 编码处理后信号波动的相对改善量。从表 1 可看出,在进行 S 编码处理后,拉曼散射 DOFS 的检测信号波动更小,信噪比有了 1.6 倍以上的提高,这超过了(7)式和图 2 给出的理论分析结果(为 1.51),并且信号的前后部分的改善程度不一样。造成这些差异的原因是模拟电子信号放大等处理造成的:一方面,由于单脉冲时,检测信号较微弱,噪声对电路的影响较大,而脉冲序列时,接收信号约是单脉冲的 4 倍,噪声对电路

的影响较小;另一方面,在模拟电路中采用了交流耦合而不是理想的直流耦合,造成信号和噪声的影响对靠近上升沿的前部分和远离上升沿的后部分不一样,其中前部分较准确。

表 1 信号波动比率

Table 1 Ratio of signal fluctuation

Detecting location /km	Without S coding $P_1/\%$	With S Coding $P_2/\%$	P_1/P_2
1.31	4.70	2.73	1.67
2.61	5.81	2.74	2.04
3.92	8.72	2.87	2.89

对图 4 所示信号进行处理后可得到温度分布图,如图 5 所示。图 5(a)表示未经 S 编码的传感温度曲线,图 5(b)表示经 S 编码的传感温度曲线。在实验中,光纤末端 4.5 km 处,约 20 m 长的光纤浸没于 40 °C 的温水中。对比图 5 的两条曲线可看出,(b)图的温度波动幅度比(a)图更小,这说明经过 S 编码后,拉曼散射 DOFS 的检测性能得到了有效的提高。

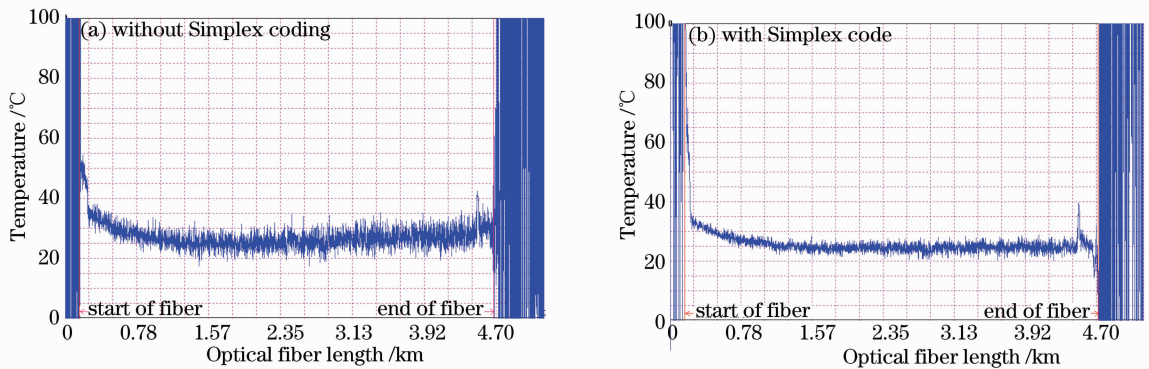
图 5 10^5 次叠加下温度检测曲线

Fig. 5 Detecting temperature curve after one hundred-thousand times of cumulation

4 结 论

在拉曼散射分布式光纤传感器中,需要在一定入射光功率限制下提高系统性能。采用 S 编码可以在增加整个入射光宽度的同时,保持空间分辨率与单个脉冲一样,从而提高传感器性能。在理论分析的基础上,应用光源外调制加光放大这一方案,实现了 S 编码的拉曼分布式光纤系统。初步的实验结果表明采用 S 编码后,能在相同条件下有效地提高系统检测信噪比。由于受电、光器件的制约, S 编码长度只有 7 位,传感器的传感距离和分辨率没有达到较好结果,这些将在后续研究工作中改进。

参 考 文 献

- Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91
肖浩,李芳,王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 87~91
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐平,庞拂飞,陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2008, **35**(12): 1955~1958
- Zhang Lixun, Liao Yun, Ou Zhonghua *et al.*. Symmetrical demodulation of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 400~403
张利勋,廖云,欧中华等. 分布式光纤拉曼温度传感器的对称解调[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 400~403
- Zhang Lei, Feng Xue, Zhang Wei *et al.*. Fiber Raman distributed temperature sensor based on the light source with adjustable pulsewidth [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

- Geng Wenqian, Geng Junping, Li Yan *et al.*. Comparison between the fully distributed fiber optic sensors based on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry and time-domain reflectometry [J]. *J. Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 2002, **31**(5): 49~53
耿文倩,耿军平,李焱等. 光时域背向拉曼散射分布式光纤传感器与光频域背向拉曼散射分布式光纤传感器对比研究[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2002, **31**(5): 49~53
- Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1168~1171
刘建胜,李铮. 光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1168~1171
- Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 613~616
张在宣,王剑锋,刘红林等. 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 613~616
- Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 188~221
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 188~221
- Marcelo A. Soto, Gabriele Bolognini, Fabrizio Di Pasquale. 30-km spontaneous-Brillouin distributed temperature sensor employing Simplex-coding and low optical input power[C]. *IEEE Sensors 2008 Conference*, 2008. 282~285
- Jonghan Park, Gabriele Bolognini, Duckey Lee *et al.*. Raman-based distributed temperature sensor with Simplex coding and link optimization[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(17): 1879~1881
- Duckey Lee, Hosung Yoon, Pilhan Kim *et al.*. Optimization of SNR improvement in the noncoherent OTDR based on Simplex codes[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 322~328