

# 分布式光纤温度传感器\*

龚俊杰\*\* 周建华 周晓军 邱琪 白晓明

(电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】论述了喇曼散射与布里渊散射光纤温度传感器的频域分析方法，该方法克服了传统时域法在信号检测中需要高速采样电路的缺点，为提高传感器空间分辨率开辟了新的途径，讨论了一种基于模耦合原理的高空间分辨率分布式温度传感器，并对喇曼散射、布里渊散射和模耦合效应三种传感器的特点进行了比较。

关键词 分布式温度传感；喇曼散射；布里渊散射；模耦合

中图分类号 TN29 文献标识码 A

## Distributed Optical-Fiber Temperature Sensor

Gong Junjie Zhou Jianhua Zhou Xiaojun Qiu Qi Bai Xiaoming

(State Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** The principle of distributed optical-fiber temperature sensor, based on Raman scatter and Brillouin scatter, is discussed by this paper, which adopts the frequency analytical method. The analytical method can overcome the shortcoming of the traditional temporal analytical method, which needs high-speed sample circuit. Furthermore the analytical method has broke a new path to enhance the spatial resolution of sensors. At the same time, a high spatial resolution optical-fiber sensor based on mode coupling is discussed by this paper. Finally the comparison of several optical-fiber sensors are presented.

**Key words** distributed temperature sensor; Raman scatter; Brillouin scatter; mode coupling

目前，对分布式光纤温度传感器的研究主要是基于喇曼散射、布里渊散射及模耦合效应的三种分布式温度传感器，本文对这三种传感器的原理进行了分析和比较。

### 1 喇曼散射型分布式光纤温度传感器频域反射法

喇曼光频域反射法(ROFDR)是根据喇曼散射效应原理，用网络分析仪分析频域信号，确定光纤的复基带传输函数来进行温度的分布式测量。ROFDR原理框图如图1所示，电光调制器对光源发出的单色光  $f_0$ ，连续以不同的频率进行正弦强度调制，其调制频率依次为  $f_m = m\Delta f$ ,  $m = 1, 2, \dots, M-1$ ，再经过分束比为1:99的分束器，1%的信号经检测器送入网络分析仪中作为参考信号，其他信号直接注入传感光纤中。耦合器把背向散射光耦合进滤波器，分别滤出斯托克斯光  $I_s$  与反

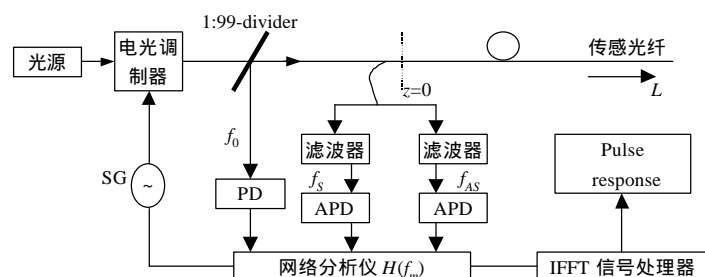


图1 喇曼光频域反射法原理框图

2002年11月20日收稿

\* 国防科研基金

\*\* 男 24岁 硕士 主要从事光纤通信与传感技术方面的研究

斯托克斯光  $I_{AS}$  , 并送入光电探测器APD中进行光电转换。对于每一个调制频率  $f_m$  , 网络分析仪对相应频率传感信号  $P_{S,m}(t)$ 、 $P_{AS,m}(t)$  分别进行采样, 得到传感光纤的基带传输函数为  $H_S(j\omega) = P_S(j\omega) / P_0(j\omega)$ ,  $H_{AS}(j\omega) = P_{AS}(j\omega) / P_0(j\omega)$ 。IFFT信号处理器对基带传输函数信号进行反傅氏变换, 得斯托克斯光与反斯托克斯光的脉冲响应函数  $h_S(t)$  和  $h_{AS}(t)$ 。所得的脉冲响应函数则反映了沿光纤的温度信息, 再把  $t = 2z_k n/c$  代入可得空间的脉冲响应函数  $h_S(z)$  和  $h_{AS}(z)$ 。为了提高系统的分辨率, 通常是利用两者脉冲响应函数的实部的比值来获得温度的测量, 其关系式为

$$T(z_k) = \Delta E / \ln \left\{ K \left( \frac{I_S}{I_{AS}} \right)^4 \frac{h_{S,Re}(z_k)}{h_{AS,Re}(z_k)} e^{\Delta a z_k} \right\} \quad (1)$$

式中  $\Delta a = a_{I_S} - a_{I_{AS}}$ ,  $a_{I_S}$  为斯托克斯光在光纤中的损耗系数,  $a_{I_{AS}}$  为反斯托克斯光在光纤中的损耗系数;  $h_{S,Re}(z_k)$  与  $h_{AS,Re}(z_k)$  分别是空间脉冲响应函数  $h_S(z)$  和  $h_{AS}(z)$  的实部。

## 2 布里渊散射型分布式光纤温度传感器频域分析法

布里渊散射光也是光在光纤中传输时由非弹性光子与热运动产生的声子发生的一种非弹性碰撞。散射光的频移量与温度的关系式为  $\nu_B(T) = \nu_B(T_0)[1 + C_T(T - T_0)]$ , 其中  $T_0$  为参考温度,  $\nu_B(T_0)$  为温度为  $T_0$  时的频移,  $C_T$  为温度系数 ( $9.4 \times 10^{-5} K^{-1}$ )。如果让泵浦光和探测光分别从光纤的两头注入, 并且当两者的频率差在光纤中某区域与布里渊频移量相等时, 就会产生受激布里渊效应。若泵浦光能量较高, 则泵浦光的能量就会向探测光转移, 利用此物理过程可以实现温度的分布式测量。

基于布里渊频域分析法(BOFDA)的分布式光纤传感器也是通过网络分析仪测出光纤的复基带传输函数, 从复基带传输函数的幅值和相位来提取所携带的温度信息, 达到温度的分布式测量。

图2是BOFDA的系统框图, 在光纤  $z=0$  端注入一个窄线宽的泵浦激光信号, 在传感光纤的另一端  $z=L$  探测光首先经过频率可变的电光强度调制器, 其调制频率依次为  $f_m = m\Delta f, m=0,1,2,\dots,M-1$ , 其调制强度为探测光与泵浦光在光纤中能够相互作用的边界条件。对每一个调制频率值  $f_m$ , 在探测器上能测得一个对应频率的探测光  $I_S(L)$  和泵浦光  $I_P(L)$ , 再把探测器的

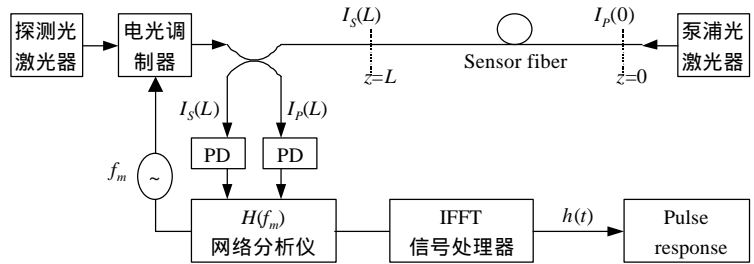


图2 布里渊光频域分析法原理框图

输出信号送入网络分析仪中, 得到光纤复基带传输函数  $H(j\omega) = I_P(j\omega_m) / I_S(j\omega_m)$ , 其中  $I_P(j\omega_m) = \text{FFT}\{I_P(L)\} | \omega_m$ ,  $I_S(j\omega_m) = \text{FFT}\{I_S(L)\} | \omega_m$ 。

经网络分析仪A/D转换的数字信号送入IFFT信号处理器中进行反傅氏变换, 得到系统的脉冲响应函数  $h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega) \exp(j\omega t) d\omega$ 。将  $t = 2nz/c$  代入  $h(t)$  中可得脉冲的空间脉冲响应函数  $S(z) = h(t) |_{t=2nz/c}$ 。

由前面的分析可知, 当探测光的调制频率与布里渊散射频移相等时, 在光纤中就会产生布里渊增益效应。根据相应频率的脉冲响应函数的幅值, 并联合频移-温度关系式, 可计算出受扰温度点的温度大小。另外, 根据空间脉冲响应函数的位置关系可得受扰温度点的位置。

## 3 偏振模耦合效应型分布式光纤温度传感器

模耦合效应型分布式光纤温度传感器是利用保偏光纤在受到外界的压力时, 产生两正交偏振模间的耦合效应传感。其系统框图如图3所示, SLD发出的准单色光沿保偏光纤的一个偏振方向注入, 设光源发出的光信号在保偏光纤中激起  $HE_{11}^x$  模, 并且输入光功率谱函数为高斯分布, 由部分相干光理论, 在探测器上得到与传感信息有关的光功率表达式为

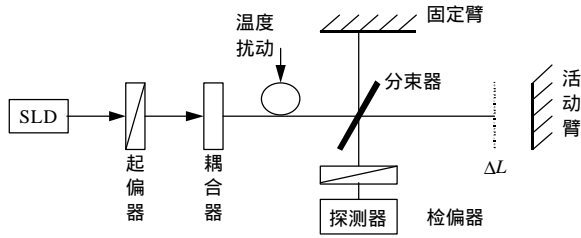


图3 耦合模分布式温度传感器的系统框图

光源的谱半宽； $w_0$ 为中心角频率； $P_0$ 为输入功率。

实验中，可以把外界温度的变化转化为光纤所受压力的变化。其具体做法是把光纤与一个膨胀系数大的金属圆柱棒并排放入在石英管中，当温度升高时，金属棒热膨胀挤压光纤，从而对光纤产生一个横向压力，光纤在这一点产生一个耦合效应，通过对系统进行温度定标，得到温度与耦合系数的关系图。另外，如图3所示，可移动活动臂，使探测器上的相干光强达到最大，这时群延时 $t=0$ ，并测得光强 $P_0$ 。把 $t=0$ ，相干光强 $P_0$ 代入 $P(t)$ 可以得到耦合系数大小，通过查耦合系数与温度关系图可知温度大小。同时，由相干光强达最大时的 $\Delta L$ 值，并联合关系式延时表达式可确定温度点的位置 $L=2\Delta L/B$ ， $B$ 为光纤的双折射率。

#### 4 三种光纤温度传感器性能比较

三种不同的传感器性能比较如表1所示，传统时域法的系统结构简单，但在信号处理时需要高速的采样电路，这给信号的检测电路提出了更高的要求。频域法的信号处理复杂，但对检测电路的要求降低了，故更有利于精确检测信号的实现。

表1 三种分布式光纤温度传感器的性能参数比较

传感类型	工作带宽	测量时间	高速采样电路	信号处理	光源	空间分辨率/m	温度分辨率/	传感距离/km
喇曼时域法	宽	短	需要	简单	几百mW	2	1	10
喇曼频域法	窄	长	不需要	复杂	几百mW	2	1	10
布里渊时域法	宽	短	需要	简单	十几nW	80	3	11
布里渊频域法	窄	长	不需要	复杂	十几nW	80	3	11
模耦合型	宽	长	不需要	简单	几十 $\mu$ W	0.1	1~3	0.1

#### 参 考 文 献

- [1] Mostafa A F, Torsten G. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(8): 1 379-1 391
- [2] Tsuneo H, Kaoru S, Toshio K. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1995, 33(7): 1 296-1 302
- [3] Dieter G, Torsten G, Kateria K, et al. Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 (4): 654-662

编辑 徐培红