

# 基于拉曼散射的光纤分布式温度测量系统的空间分辨力\*

刘建胜 李 铮 张其善

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要** 基于自发拉曼散射的光纤分布式温度测量系统是一种真正的分布传感系统且已商品化。本文从光学的角度出发较详细地分析了此类系统的空间分辨力理论极限及其影响因素。分析表明, 对于一个 1 km 的多模系统, 若接收机的最小可分辨光功率优于 3.5 pW, 则其在 0~ 400℃ 的范围内且温度精度为 ±1℃ 时的空间分辨力极限为 2 cm; 当接收机的最小可分辨光功率小于 0.5 pW, 单模系统的空间分辨力极限优于对应的多模系统。因此, 把基于自发拉曼散射机理的光纤分布式温度测量系统用于短距离高分辨力的系统理论上是可行的。

**关键词** 光纤, 分布温度测量, 受激拉曼散射, 非线性脉冲展宽。

## 1 引 言

一个分布式温度传感系统能检测其长度上任意一点的温度。当需要在很多点测温时, 分布式传感系统在性能价格比上优于分立系统。石英光导纤维的极宽的工作温度范围、快速的热响应和其绝缘特性使它成为一种有广阔应用前景的分布式温度传感系统。

自从 Hartog<sup>[1]</sup>报道了第一个使用液芯光纤的分布式温度传感系统以来, 人们一直努力使用固芯光纤来实现实用的分布式温度传感系统, 并提出了多种不同的机理如瑞利(Rayleigh)散射<sup>[1]</sup>、自发拉曼(Raman)散射<sup>[2, 3]</sup>和受激布里渊(Brillouin)散射<sup>[4]</sup>等等光纤分布式温度系统。但是只有基于自发拉曼散射的光纤分布式系统得以商品化。

关于自发拉曼散射的物理过程已有十分成熟的理论<sup>[5]</sup>。这里所强调的是这一过程是光纤中分子的热振动态与入射光子相互作用的结果。光纤分子的热振动由一个与温度有着显性联系的麦克斯韦-玻尔兹曼(Maxwell-Boltzman)能量分配关系所决定, 这就使得自发拉曼散射机制能用于温度的测量。而且, 当使用把散射过程中产生的反斯托克斯光与斯托克斯光相比的技术时, 它们的强度比  $R(T)$  有一非常简单的关系式:

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a}\right)^4 \exp\left(-\frac{hc\nu}{kT}\right)$$

可看出这一关系式不受诸如光源波动、光纤成份、应力等除温度外任何扰动的影响。

\* 归国人员基金资助课题。

收稿日期: 1998-01-19; 收到修改稿日期: 1998-10-20

然而自发拉曼散射最致命的弱点是这一过程很微弱,其反斯托克斯光比瑞利散射光还弱3~4个数量级。如此弱的信号大大增加了系统的探测和处理难度,从而限制了系统的性能——主要是空间分辨力和温度分辨力。长期以来,通过使用高的输入功率、高的重复频率和光子计数技术等手段来改善这类系统的性能,并取得了很大的进展,但是对于基于此机理的分布系统性能的理论极限的分析尚未见有报道。本文将从光学的角度来分析这一问题。

## 2 分析与讨论

拉曼系统都是采用光时域反射(OTDR)技术来定位的,当只考虑光路方面时,后向散射回光接收机的反斯托克斯光功率随温度的变化为<sup>[6]</sup>:

$$P_{AS}(T) = 0.5(P_0 W_p) v \theta_{AS} \beta \exp[-(\alpha_p + \alpha_{AS})L] \exp(-hcv/kT) \quad (1)$$

式中,  $P_0$  为光脉冲功率,  $W_p$  为脉冲宽度( $E = P_0 W_p$  为光脉冲能量),  $v = c/n = 2 \times 10^8$  m/s 为光在光纤中的群速度,  $\beta = 3(\text{NA})^2/8n^2$  为光纤的后向集光系数,  $\theta_{AS} = 4 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ <sup>[7]</sup> 为  $\text{SiO}_2$  光纤在入射光波长为 905 nm 时的拉曼散射系数,  $\alpha_p$  和  $\alpha_{AS}$  均为 3.2 dB/km, 分别是光纤在入射光波长与反斯托克斯光波长(875 nm)处的损耗系数。 $\nu = 440 \text{ cm}^{-1}$  为  $\text{SiO}_2$  光纤的拉曼光波数偏移。

当温度变化  $\Delta T$  (K) 时, 后向散射回来的反斯托克斯光功率的变化量为:

$$\Delta P_{AS}(T) = P_{AS}(T)(-hcv/kT^2) \Delta T \quad (2)$$

因此, 要使一个系统的温度分辨力为  $\Delta T$ , 必须使光接收机的最小可分辨光功率  $S \leq \Delta P_{AS}(T)$ 。由(1)式和(2)式, 且考虑到基于光时域反射技术的空间分辨力:

$$\Delta L = v(W_p + \Delta W_p)/2 \quad (3)$$

式中  $\Delta W_p$  为光脉冲的展宽, 可知拉曼散射系统的空间分辨力为:

$$\Delta L = \Delta P_{AS}(T)/(PP_0) + v\Delta W_p/2 \leq S/(PP_0) + v\Delta W_p/2 \quad (4)$$

式中,  $P = \theta_{AS} \beta \exp[-(\alpha_p + \alpha_{AS})L] [\exp(-hcv/kT)] (-hcv/kT^2) \Delta T$ 。可看出对于一个应用要求确定的系统, 其空间分辨力仅依赖于激励光功率  $P_0$ 、光接收机最小可分辨光功率  $S$  和光脉冲宽度。而从光学角度来说, 这可分为来自所能使用的最大入射光功率[即(4)式右端的第一项]的限制和光脉冲展宽[即(4)式右端的第二项]的影响两部分。

### 2.1 受激拉曼散射引入的限制

受激拉曼散射是指在强输入光情形下, 当入射光功率达到一特定值——阈值时, 相当一部分(通常定义为一半)的入射光功率通过一个类似于激光器中粒子数反转的机制(非平衡状态, 与温度无关)转移至斯托克斯光频。这意味着, 一方面对于任一频率的光, 光纤有一个对应的所能传输的最大光功率。另一方面, 对于使用斯托克斯光作为参考光的系统, 由于由受激拉曼散射引起的斯托克斯光与温度无关, 它在系统中可能成为一个噪声。因此, 受激拉曼散射决定了基于此原理的测温系统的最大可使用的初始入射光功率。由自发辐射起始的受激拉曼散射的阈值  $P_{\text{th}}(L)$  可由下式粗略确定<sup>[7]</sup>:

$$P_{\text{th}}(L) = \frac{16A_{\text{eff}}}{g_R \left\{ \frac{1}{\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p L)] \right\}} A_P \quad (5)$$

式中,  $g_R = 4 \times 10^{-14}$  m/W 为受激拉曼散射增益系数;  $A_{\text{eff}}$  为光纤模式的有效截面积;  $\alpha_p$  为光纤在激励波长的损耗系数(dB/km);  $L$  为系统的光纤长度;  $A_P$  是与偏振有关的系数, 其值在 1

~ 2 之间, 当非偏振时,  $A_p = 2$ 。

从图 1 中可看出一个长度  $L = 1 \text{ km}$  的系统, 对于使用多模渐变光纤(芯径和包径为  $50/125 \mu\text{m}$ , 相对折射率  $\Delta = 1\%$ ),  $A_{\text{eff}} = 56 \mu\text{m}^2$  [这一数值是使用多模渐变光纤的基模高斯近似得来的, 即假设所有的光功率都集中在基模上。这对应于  $P_{0\text{th}}(L)$  为最小值的情况], 其  $P_{0\text{th}}(1 \text{ km}) = 63 \text{ W}$ ; 而单模光纤( $4/125 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0.3\%$ ),  $A_{\text{eff}} = 26 \mu\text{m}^2$ , 其受激拉曼散射的阈值功率  $P_{0\text{th}}(1 \text{ km}) = 29 \text{ W}$ 。

既然受激拉曼散射阈值功率决定着拉曼测温系统所能使用的最大入射激励光功率, 用(5)式中的  $P_{0\text{th}}(L)$  代替(4)式中的  $P_0$  就得到受激拉曼散射限制下的空间分辨力。对于测温范围  $0\sim 400^\circ\text{C}$ 、温度分辨力为  $1^\circ\text{C}$  的多模光纤系统, 图 2 (a) 中的曲线给出了三个不同的  $S$  值时受激拉曼散射限制下的空间分辨力随系统长度的变化。图中对于一个  $1 \text{ km}$  长的系统, 受激拉曼散射限制下的空间分辨力分别为  $6 \text{ cm}$  ( $S = 10 \text{ pW}$  时)、 $2 \text{ cm}$  ( $S = 3.5 \text{ pW}$  时) 和  $0.8 \text{ cm}$  ( $S = 1 \text{ pW}$  时), 因此对于给定长度的系统可通过提高光接收机的性能来改善受激拉曼散射限制下的空间分辨力。

对于使用多模渐变光纤(芯径和包径为  $50/125 \mu\text{m}$ , 相对折射率  $\Delta = 1\%$ ),  $A_{\text{eff}} = 56 \mu\text{m}^2$  [这一数值是使用多模渐变光纤的基模高斯近似得来的, 即假设所有的光功率都集中在基模上。这对应于  $P_{0\text{th}}(L)$  为最小值的情况], 其  $P_{0\text{th}}(1 \text{ km}) = 63 \text{ W}$ ; 而单模光纤( $4/125 \mu\text{m}$ ,  $\Delta = 0.3\%$ ),  $A_{\text{eff}} = 26 \mu\text{m}^2$ , 其受激拉曼散射的阈值功率  $P_{0\text{th}}(1 \text{ km}) = 29 \text{ W}$ 。

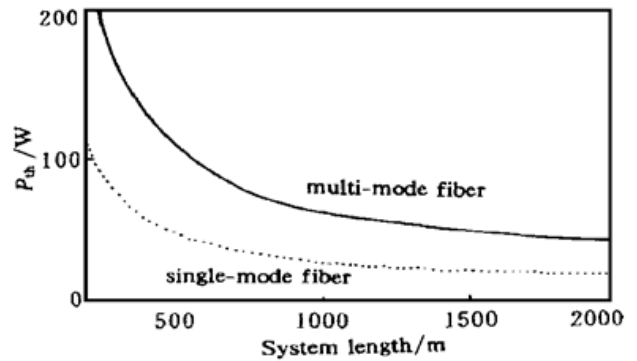


Fig. 1 The relation of threshold power vs. system length

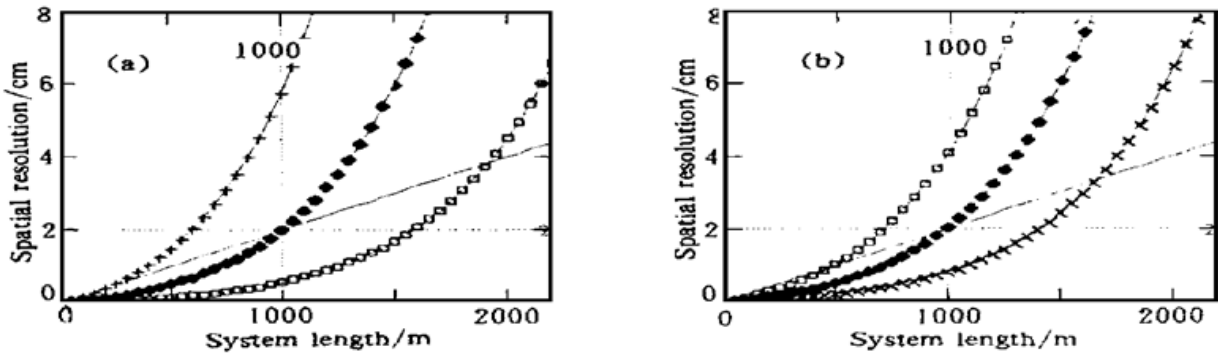


Fig. 2 The relation of spatial resolution vs. system length. (a) Systems of multi-mode fibres. - □- :  $S = 1 \text{ pW}$ ; - ■- :  $S = 3.5 \text{ pW}$ ; - ×- :  $S = 10 \text{ pW}$ ; —: mode-delay. (b) Systems of single-mode fibres. - □- :  $S = 1 \text{ pW}$ ; - ■- :  $S = 0.5 \text{ pW}$ ; - ×- :  $S = 0.2 \text{ pW}$

## 2.2 脉宽的展宽

### 2.2.1 模式色散的限制

多模光纤系统(象绝大多数商品化系统), 脉冲展宽主要由模式色散 ( $\Delta\tau_{\text{mod}} = n\Delta^2/2c = 0.2 \text{ ns/km}$ ) 引起。把它对系统空间分辨力的影响[即(4)式右端的第二项且  $\Delta W_p = \Delta\tau_{\text{mod}}L$ ] 也画入图 2(a) 中(对应于图中的直线)。图中显示模式色散限制直线与受激拉曼散射限制曲线相交——对应着两种限制对空间分辨力的影响相等时的情形。当系统的长度小于交点长度时, 空间分辨力极限主要受模式色散限定, 大于交点长度时主要由受激拉曼散射决定。这样一来对于上述  $1 \text{ km}$  系统, 由于模式色散的影响, 使得使用  $S = 3.5 \text{ pW}$  和  $S = 1 \text{ pW}$  的光接收机对系统最终的空间分辨力的效果是一样的, 都为  $2 \text{ cm}$ 。这说明多模系统依靠改善光接收机来提高其空间分辨力是有一限度的。即使这样, 所得的厘米级的空间分辨力说明把基于自发拉曼散射机理的光纤分布式温度传感系统用于短距离高分辨力的应用理论上是可行的。

而在通过提高光接收机的性能来改善系统的空间分辨力这一点上,单模系统优于多模系统。如图 2(b) 所示,同样对于 1 km 系统,当光接收机可分辨的最小光功率小于 0.5 pW 时(使用光子计数技术<sup>[8]</sup>是可以实现的),单模系统的极限空间分辨力会变得优于多模系统。当然在具有相同空间分辨力的条件下,单模系统对接收机的要求要远高于多模系统,这是由于单模光纤低的受激拉曼散射阈值功率和小的数值孔径所决定的。

### 2.2.2 非线性效应引起的脉冲展宽

对于输入强光的系统的脉冲展宽,除了以上所讨论的模间色散,就是在光源谱线很纯(中心波长  $\lambda_0 = 905 \text{ nm}$ , 材料色散  $\Delta\tau_{\text{mat}}$  为  $70 \text{ ps/km} \cdot \text{nm}$ , 当使用宽谱  $\Delta\lambda_0 > 3 \text{ nm}$  的激光源时,必须考虑光源引起的材料色散)的情况下,还需要考虑光纤非线性自相位调制效应对视频信号谱宽引起的展宽:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{c} \frac{2}{W_p} \Delta\omega \quad (6)$$

其中,  $W_p$  为初始脉冲宽度,  $\Delta\omega$  为非线性频率展宽倍数。对于高斯型光脉冲,  $\Delta\omega$  有以下关系<sup>[9]</sup>:

$$\Delta\omega = \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}}\phi_{\text{max}}\right)^2$$

$$\phi_{\text{max}} = \left\{\frac{1}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha L)]\right\} [\gamma P_{\text{oth}}(L)]$$

式中  $\gamma$  为光纤的非线性系数。并设定当材料色散引起的展宽与模式色散引起的展宽相等时,即

$$\Delta\lambda\Delta\tau_{\text{mat}} = \Delta\tau_{\text{mod}} \quad (7)$$

为判断标准,通过简单计算可知,对于 1 km 系统,当入射光功率等于受激拉曼散射阈值时,只有在初始脉宽小于 23 ps(其对应的距离分辨力为 2.3 mm)情形下,非线性效应引起的展宽才须考虑。而这时由模式色散决定的最小脉宽为 0.2 ns(其相应的距离分辨力为 2 cm)。对单模光纤,虽然不用考虑模间色散,但由于其小的芯面积,在同等输入光功率的情况下,单模光纤的非线性效应会大大地高于多模光纤。

**结 论** 以上从光纤的受激拉曼散射和脉冲展宽出发,分析了基于拉曼散射的光纤分布式温度测量系统的空间分辨力理论极限。分析表明,对于多模光纤系统,模式色散限制了通过提高光接收机的性能来改善系统空间分辨力极限的程度;对于单模系统,其空间分辨力随接收机的功率分辨力的提高而改善,对于 1 km 系统,当接收机的最小可分辨光功率小于 0.5 pW 时,其空间分辨力便得优于多模系统,因此在单模系统中采用光子计数技术可能是提高空间分辨力极限的一个有效方法。

### 参 考 文 献

- [1] Hartog H. A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1983, **LT-1**(3): 498~ 509
- [2] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W *et al.*. Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(13): 569~ 570

- [3] Kawakami H, Osawa S. Application of fibre optic distributed temperature sensor system. *Proc. SPIE*, 1995, **2507**: 136~ 138
- [4] Bao X, Webb D J, Jackson D A. 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 552~ 554
- [5] Long D A. *Raman Spectroscopy*. London: McGraw-Hill, 1977.
- [6] Smith R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated raman and brillouin scattering. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(11): 2489~ 2494
- [7] Dakin J P, Pratt D J, Bibby G W *et al.*. Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry. *Proc. SPIE*, 1985, **566**: 249~ 256
- [8] Stterlin R, Ricka J, Zysset B *et al.*. Distributed fibre optic temperature sensor using single photon counting detection. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(8): 1368~ 1370
- [9] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 1989. 4

## Spatial Resolution Limit of A Raman Distributed Optical Fibre Temperature System

Liu Jiansheng    Li Zheng    Zhang Qishan

(Department of Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

(Received 19 January 1998; revised 20 October 1998)

**Abstract** So far, a truly distributed and commercialized optical fiber temperature system is based on Raman scattering. The spatial resolution limit of such a system is analyzed in the view of nonlinear fiber optics. It is found that a spatial resolution of 2 cm can be achieved for an 1km multi-mode system of 3.5 pW sensitivity and temperature resolution of  $\pm 1^\circ\text{C}$  within 0~ 400 $^\circ\text{C}$ . With a sensitivity of better than 0.5 pW, the spatial resolution of a single-mode system will be better than that of above multi-mode system. Theoretically there is no restriction to introduce such a system into the application of moderate distance and high spatial resolution.

**Key words** optical fibre, distributed temperaturing, simulated Raman scattering (SRS), nonlinear pulse spreading.