

长距离光纤布里渊散射研究*

沈一春 宋牟平 章献民** 陈抗生

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江杭州 310027)

摘要 研究了25 km长距离光纤中布里渊散射的功率分布,提出了求解长距离光纤中布里渊散射的耦合强度方程的数值计算方法,与忽略光纤损耗的解析解进行比较,并从实验上加以研究.在此基础上,分析了25 km长距离光纤中布里渊散射过程,得到泵浦波和斯托克斯波沿光纤的功率分布图.

关键词 分布式传感技术;布里渊散射;长距离光纤

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

0 引言

基于布里渊散射的分布传感技术在温度、应变测量上所达到的测量精度、范围以及空间分辨率均高于光纤分布传感技术,其他如瑞利散射和喇曼散射,近来受到人们广泛的关注^[1-3].大量的理论和实验研究证明,光纤中布里渊散射信号的功率与光纤所处环境温度和所承受的应变在一定的条件下呈线性变化关系^[4],因而对光纤中布里渊散射信号的功率研究是十分重要的.在一定的条件下,光纤中布里渊散射的功率分布是由稳态耦合强度方程组所决定的,获得其解析解相当困难.忽略泵浦损耗或忽略光纤损耗可以较容易得到其解析解^[5],但无法准确确定长距离光纤中布里渊散射功率分布.随着布里渊散射分布传感技术研究的不断深入和应用需求的发展,分辨率要求越来越高,其使用的光纤长度也越来越长.这就需要对布里渊传感中长距离光纤功率分布进行研究.X. Bao等研究了短距离(7 km左右)光纤的布里渊散射过程,给出了稳态耦合强度方程的数值解法^[6],但这一方法在求解长距离光纤中布里渊散射耦合强度方程时计算量比较大、精度不太高.本文提出一种计算方法能快速准确地求解出长距离光纤中布里渊散射耦合强度方程,并进行了实验研究.在此基础上,求解出沿光纤分布的功率图,加以分析.

1 布里渊散射稳态耦合强度方程组的求解

光纤中布里渊散射过程是泵浦波、斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,因此用来描述布里

渊散射过程中参量特性的经典数学模型是三个耦合振幅方程^[7].但在连续泵浦或准连续泵浦条件下,假设声波在布里渊散射过程中会很快地衰减,三个耦合方程可以简化为稳态条件下耦合强度方程,即

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B(\Delta\nu)I_pI_s + \alpha I_s \quad (1)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B(\Delta\nu)I_pI_s - \alpha I_p \quad (2)$$

式中, I_s 是斯托克斯光强, I_p 是泵浦光强, α 为光纤衰减系数, g_B 为布里渊增益系数,可表示为

$$g_B(\Delta\nu) = g_0 \frac{\gamma(\Delta\nu_B/2)^2}{\Delta\nu^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (3)$$

式中 γ 为偏振系数,对普通单模光纤其值为 $2/3$ ^[8], $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽.

$$\Delta\nu = (\nu_s - \nu_p) - \nu_B \quad (4)$$

式中, ν_s 为斯托克斯光频率, ν_p 为泵浦光频率, ν_B 为布里渊频移,其值为 $\nu_B = 2nV_A/\lambda$, n 为光纤折射率, V_A 是声速, λ 是光纤中泵浦波长.

峰值增益系数 g_0 为

$$g_0 = \frac{2\pi n^7 p_{12}^2}{c\lambda_p^2 \rho_0 V_A \Delta\nu_B} \quad (5)$$

式中 ρ_0 是材料密度, p_{12} 是材料的纵向弹光系数.

如果用功率描述布里渊散射耦合方程,方程(1)、(2)可化为

$$\frac{dP_s}{dz} = -\frac{g_B}{A_{eff}} P_p P_s + \alpha P_s \quad (6)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{g_B}{A_{eff}} P_p P_s - \alpha P_p \quad (7)$$

式中 A_{eff} 为光纤的有效截面积, P_p 为泵浦功率,其值 $P_p = I_p A_{eff}$, P_s 为斯托克斯功率,其值为 $P_s = I_s A_{eff}$.

对上式精确求解比较复杂,一般有两种简化求法,其一忽略泵浦损耗,其二忽略光纤损耗($\alpha=0$),这里对后者进行简单分析.

在 $\alpha=0$ 的情况下,可由方程(6)、(7)推导出其

*国家高技术研究发展计划项目(863)资助(No. 2001AA602022-1)

** Tel:0571-87952054 Email: zhangxm@zju.edu.cn

收稿日期:2003-08-11

解析解

$$P_p(z) = [P_p(0) - P_s(0)] \cdot \frac{P_p(0) \exp\{(g_B/A_{\text{eff}})[P_p(0) - P_s(0)]z\}}{P_p(0) \exp\{(g_B/A_{\text{eff}})[P_p(0) - P_s(0)]z\} - P_s(0)} \quad (8)$$

$$P_s(z) = [P_p(0) - P_s(0)] \cdot \frac{P_s(0)}{P_p(0) \exp\{(g_B/A_{\text{eff}})[P_p(0) - P_s(0)]z\} - P_s(0)} \quad (9)$$

在考虑光纤损耗和泵浦损耗时,方程(6)、(7)没有解析解,需要利用数值解计算. 其为一阶常微分方程组,只知道边界入射泵浦功率 $P_p(0)$ 和末端斯托克斯光功率 $P_s(L)$, 这样的边界条件用常规的常微分方程组计算方法是求解不出来的. 但如果同时知道了 $z=0$ 边界条件或 $z=L$ 处边界条件,就可以求解出耦合方程. 故我们可以假设 $z=0$ 处,另一个边界条件 $P_s(0)$ 为已知, 给其一个初值, 给定步长 h , 然后对方程(6)、(7)利用四阶经典龙格库塔法沿着光纤前向积分, 这样在光纤末端 $z=L$ 处可以得到计算出的斯托克斯功率 $P'_s(L)$, 将其与已知的边界 $P_s(L)$ 进行比较, 然后对 $P_s(0)$ 进行迭代直到其差值 e 满足了要求. 这样便可以求出 $P_s(0)$, 从而求解出方程(6)、(7). 应该注意的是, 基于布里渊散射的分布传感技术中常常关注的是光纤中某一段的温度、应力的变化, 因此在求解时应该可以将该段附近的步长取的细化一些, 差值 e 取得更小一些来提高计算精度, 从而精确确定该段附近的功率分布. 对于光纤其他段可以步长取大一些, 精度取低一些, 来减少计算量, 提高计算速度. 光纤中温度、应力变化区域的确定可参考相关文献^[9]. 与参考文献[4]的算法比较, 在计算短距离 7 km SMF-28 光纤时, 本文算法的计算速度稍快, 相差不大. 但在计算长距离 25 km SMF-28 光纤时, 本文算法的计算速度可提高一倍左右, 精度提高一到两个量级.

2 实验结果及分析

实验设计如图1所示. 光源发送波长为1550 nm 的连续波, 其线宽约为 1 MHz. 光源发送的光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 可调衰减器控制进入 3 dB 耦合器的光功率. 激光器发射的泵浦光通过 3 dB 耦合器进入 25 km 的单模光纤, 功率计 B 是用来监测入纤泵浦光功率. 泵浦光进入光纤后, 由于布里渊散射效应, 产生斯托克斯光, 通过 3 dB 耦合器耦合到 A 端, 在 A 处利用光谱分析仪对其分析. 但在光纤中产生的瑞利散射也会进入到 A 处, 实验中将 Agilent86141B 光谱分析仪设定为滤波器模式, 带宽为 0.07 nm, 减小瑞利散射带来的影响, 后接功率计 D 用以探测斯托克斯光强. 光纤末端的传输

功率用功率计 C 测量. 在 B、C 之前, 为了防止功率过大对功率计造成损害, 分别加入了 100:1 和 100:10 的固定衰减器.

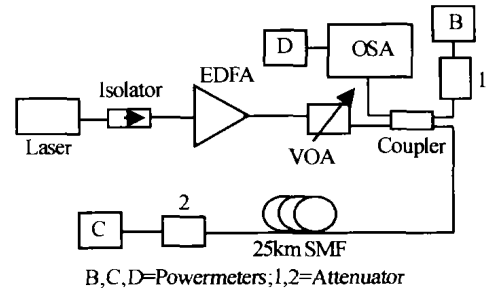


图1 实验系统框图

Fig. 1 Experimental set-up

实验中, 采用的是康宁公司的 SMF-28 单模光纤作为传输介质. 在计算耦合方程时, 采用的计算参数如下: $g_B/A_{\text{eff}} = 0.2153 (\text{Wm})^{-1}$, $\alpha = 0.235 \text{ dB/km}$, $P_s(L) = 0.005 \text{ nW}$, 考虑到实验过程中光纤微弯曲、连接器等因素的影响, 计算过程中所取光纤衰减系数 α 比理论值 (0.2 dB/km) 要大一些. $P_s(L)$ 是光纤末端的斯托克斯光功率, 在自发散射恒定在一定值^[4], 其值与光纤的类型和泵浦光波长有关, 在本文的计算中估计为 0.005 nW.

图2是斯托克斯光功率 $P_s(0)$ 随着入纤泵浦光功率 $P_p(0)$ 变化的关系图. 图3是光纤末端传输功率 $P_p(L)$ 与入纤泵浦光功率 $P_p(0)$ 关系图. 图中实线是用本文数值方法计算的理论值, 虚线是忽略光纤损耗 ($\alpha=0$) 算出的曲线, 离散点是实验中测得的数据. 可以看出用本文数值方法计算的理论与实验数据较好的吻合, 而简化算法 ($\alpha=0$) 与实验值相差较大, 这也容易从直观上理解, 长距离光传输忽略光纤损耗肯定会带来不小的误差. 应注意的是本文所提出的计算方法可用于稳态条件下自发布里渊散射过程和受激布里渊散射过程. 很多布里渊传感测量技术中都是利用了光纤自发布里渊散射, 因而对阈值的确定显得比较重要, 通过本文计算方法可以很快确定其近似的阈值, 如图2所示受激布里渊散射的阈值大概为 4 mW 左右. 从图2可以看出, 一旦泵浦光功率超过阈值, 布里渊散射从自发布里渊散射变为受激布里渊散射, 斯托克斯光功率随着入射泵浦功率的增加很快增加, 泵浦波功率的一大部分就会转给斯托克斯波, 当泵浦波为 6 mW、12 mW、14 mW 左右时, 分别有约有 1.6%, 34%, 46% 的泵浦功率转给了斯托克斯波. 可见, 布里渊散射从自发散射变为受激散射后, 随着泵浦波功率的增加, 转给斯托克斯波的功率也越多, 在一定范围内, 提高了增益. 在基于布里渊散射的分布传感技术中, 可用于测量的光纤长度受到泵浦波和探测波

(斯托克斯波)功率衰减和增益的影响,通过提高增益,可以增长用于测量的光纤长度. 从图 3 可以很清楚的看到,泵浦波在小功率时,光纤末端传输功率随着泵浦功率几乎是线性增加,而一旦泵浦波功率增加到一定数值,即使泵浦波功率的增加很多,传输功率变化也很小,恒定在一定的范围,达到了饱和状态.

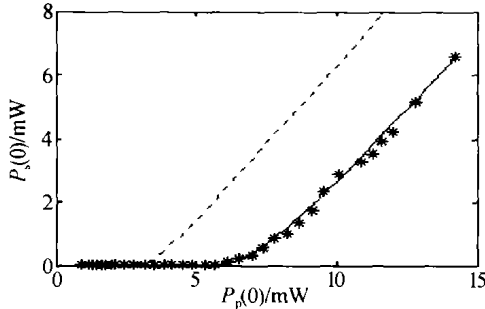


图 2 斯托克斯光与入纤泵浦光功率图
Fig. 2 Stokes power versus launching

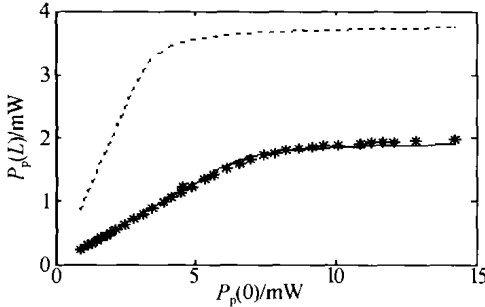


图 3 传输功率与入纤泵浦光功率图
Fig. 3 Transmitted power versus launching

如果在光纤的某段出现了应变或温度场变,就需要详细了解该段的功率分布^[10]. 在对耦合方程进行理论分析时,可以通过调整步长和精度达到上述目的. 图 4 是泵浦波为 10 mW,其他计算参数和图 2、3 一样,光纤在 12.625 km 处 250 m 范围内的泵浦波与斯托克斯波的功率较为精确分布情况,曲线 a、b 对应着泵浦波和斯托克斯波.

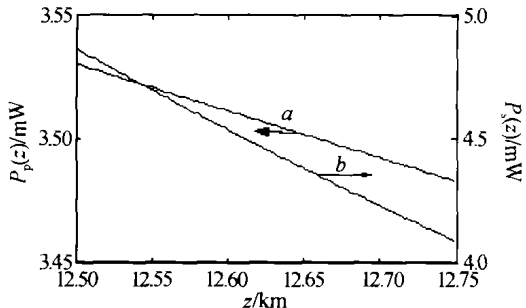


图 4 小范围内功率分布图
Fig. 4 z-profile of the pumping power and Stokes

在实际操作中,不可能测量出光纤内每一点的功率,只能测出光纤两端或单端的功率情况. 通过本文的方法可以根据两端或单端测量的功率计算出沿整个长距离光纤的功率分布情况. 图 5 和图 6 为泵浦光功率和斯托克斯光功率沿 25 km 长光纤分布

情况. 图中曲线 1, 2, 3 分别是光纤端入射功率为 2 mW, 8 mW, 14 mW 的情况,与之对应的是光纤中布里渊散射自发、受激和饱和三个状态.

图 5、6 中曲线 1 是布里渊散射的自发状态,这时泵浦波沿着光纤衰减很小,主要的衰减应该是由光纤的损耗引起的,斯托克斯波的增益也不大. 随着泵浦光功率的增加,布里渊散射从自发状态变为受激布里渊散射,对应图 5、6 中的曲线 2,从图中可见,这时由于布里渊效应泵浦波沿着光纤有着较大的衰减,相应的斯托克斯波也开始有较大的增益. 图 5 中曲线 3 可以看出,达到饱和状态时,泵浦波急剧的衰减,在入纤泵浦波为 14 mW 时,光纤末端就有 8.78 dB 左右的损耗. 另外,从图 6 可见,在光纤前 5 km,也就是光纤长度的前 20%,就发生大部分能量的转移.

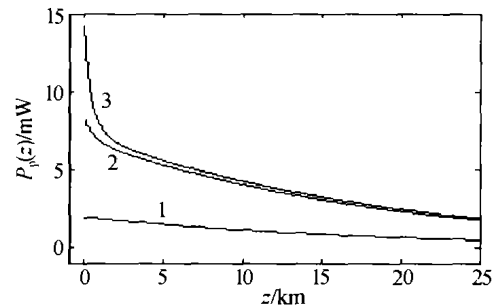


图 5 泵浦波功率沿光纤分布图
Fig. 5 z-profile of the pumping power

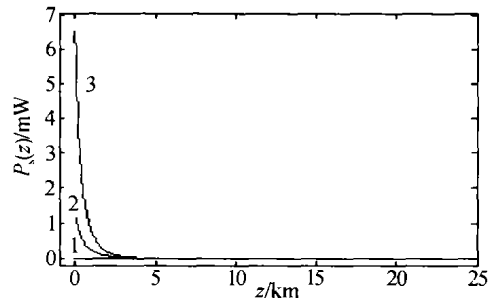


图 6 斯托克斯波功率沿光纤分布图
Fig. 6 z-profile of the Stokes power

3 结论

本文从理论计算和实验两方面研究了长距离光纤中布里渊散射的功率分布. 忽略光纤损耗方法来计算稳态耦合方程比较简单,能够说明布里渊散射在光纤中随着泵浦波变化的趋势,但不能准确反应出光纤中泵浦波和斯托克斯波功率分布,误差较大. 本文提出了计算长距离光纤布里渊散射稳态耦合强度方程的快速算法,利用该算法可以准确推算出长距离光纤的各点功率分布,计算结果与实验相吻合.

参考文献

1 Waits P C, Souza K De, Newson T P. A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fiber optic distributed temperature sensors. *Opt Commun*, 1997,

- 144(12): 17 ~ 23
- 2 杨志,杨永清,何玉钧,等. 分布式光纤布里渊散射温度传感实验系统. 光子学报,2003,32(1):14 ~ 17
Yang Z, Li Y Q, He Y J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(1): 14 ~ 17
 - 3 何玉钧,李永清,杨志,等. 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪及其在光纤自发布里渊散射测量中的应用. 光子学报, 2002,31(7):865 ~ 869
He Y J, Li Y Q, Yang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(7): 865 ~ 869
 - 4 Parker T R, Farhandiroushan M, Handerek V A. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers. *Opt Lett*, 1997, 22(11): 787 ~ 789
 - 5 Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*. San Francisco, California Academic Press, 1995
 - 6 Chen L, Bao X. Analytical and numerical solutions for steady state stimulated Brillouin scattering in a single-mode fiber. *Opt Commun*, 1998, 152(6): 65 ~ 70
 - 7 Tang C L. Saturated and spectral characteristics of Stokes emission in the stimulated Brillouin process. *J Appl Phys*, 1966, 37(8): 2945
 - 8 Bao X, Dhliwayo J, Heron N, et al. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1340 ~ 1347
 - 9 Naruse H, Tateda M, Ohno H, et al. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum. *IEEE WC4*, 2002. 309 ~ 311
 - 10 Lecoche V, Hathaway M W, Webb D J, et al. 20 km distributed temperature sensor based on spontaneous Brillouin scattering. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(10): 1367 ~ 1369

Brillouin Scattering in Long Optical Fiber

Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng

Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2003-08-11

Abstract The power distribution of the 25 km optical fiber in distributed sensing technique based on Brillouin scattering is studied. A numerical method is presented to solve the steady state Brillouin scattering in long optical fiber and the solution is compared with the analytical one without fiber attenuation. The experiment is done. At the same time, Brillouin scattering in the 25 km optical fiber is investigated. Finally, z-profile of the pumping power and Stokes power are obtained and discussed.

Keywords Distributed sensing technique; Brillouin scattering; Long optical fiber



Shen Yichun was born in 1979. He received his M. S. degree in machine design and its theory, Harbin Institute of Technology. Now he is a Ph. D. candidate of Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University. His current research interests include nonlinear optics, optical fiber sensors, and optical fiber gratings.