

doi: 10.3788/gzxb20154403.0319002

# 多模光纤不同模式布里渊散射参数

李永倩, 赵旭, 赵丽娟, 马立, 李晓娟, 安琪

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 基于射线光学和波动光学理论分析了多模光纤的布里渊散射特性, 提出了确定布里渊散射角取值范围的方法; 推导了阶跃型和渐变型多模光纤不同模式群布里渊频移、线宽、散射谱和散射功率的表达式. 结果表明, 阶跃型和渐变型多模光纤布里渊散射角的最大取值范围为全反射临界角的 2 倍到  $\pi$ ; 阶跃型光纤的布里渊频移、线宽、归一化峰值增益和散射功率随模式群的变化比渐变型光纤缓慢, 且随着模式群编号的增加, 阶跃型光纤的上述参量分别在 11.084~10.932 GHz、21.760~21.168 MHz、1~0.933 和  $1.990 \times 10^{-9}$ ~ $1.857 \times 10^{-9}$  W 范围内呈曲线下降; 渐变型光纤的上述参量分别在 11.064~10.969 GHz、21.683~21.314 MHz、1~0.957 和  $2.052 \times 10^{-9}$ ~ $1.965 \times 10^{-9}$  W 范围内呈直线下降.

**关键词:** 非线性光学; 布里渊散射; 射线光学; 波动光学; 多模光纤; 布里渊散射角; 不同模式

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-421(2015)03-0319002-7

## Brillouin Scattering Parameters of Different Modes in Multimode Optical Fibers

LI Yong-qian, ZHAO Xu, ZHAO Li-juan, MA Li, LI Xiao-juan, AN Qi

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China)

**Abstract:** The characteristics of Brillouin scattering in silica multimode optical fiber were analyzed based on the ray optics and wave optics theory. A method to determine the range of Brillouin scattering angle was proposed and the expressions of Brillouin shift, Brillouin linewidth, Brillouin scattering spectrum and scattering power of different mode group in step and graded multimode optical fibers are deduced and simulated. The results show that the maximum range of Brillouin scattering angle in step and graded fibers is from twice of the critical incident angle of total reflection to  $\pi$ , and with the increasing of mode group number, Brillouin shift, Brillouin linewidth, normalized peak gain and scattering power of step fiber change more slowly than those of graded fiber, and the above parameters of step fiber decrease nonlinearly in the ranges of 11.084 GHz to 10.932 GHz, 21.760 MHz to 21.168 MHz, 1 to 0.933 and  $1.990 \times 10^{-9}$  W to  $1.857 \times 10^{-9}$  W, but the corresponding parameters of graded fiber decrease linearly in the ranges of 11.064 GHz to 10.969 GHz, 21.683 MHz to 21.314 MHz, 1 to 0.957 and  $2.052 \times 10^{-9}$  W to  $1.965 \times 10^{-9}$  W, respectively.

**Key words:** Nonlinear optics; Brillouin scattering; Ray optics; Wave optics; Multimode optical fiber; Brillouin scattering angle; Different mode

**OCIS Codes:** 190.4370; 290.5830; 060.2310; 060.2370; 300.6330

## 0 引言

在分布式光纤传感技术中, 基于瑞利散射和喇曼散射的分布式传感技术的研究比较成熟且已经实用

化; 基于布里渊散射的分布式传感技术的研究起步较晚, 但由于它在温度和应变测量中较高的测量精度、测量范围和空间分辨率<sup>[1-2]</sup>, 因而在长距离分布式光纤传感器中得到了广泛的关注与研究<sup>[3-4]</sup>.

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 61377088)和河北省自然科学基金(Nos. E2012502045, F2014502098)资助

**第一作者:** 李永倩(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信与光传感技术. Email: liyq@ncepu.edu.cn

**通讯作者:** 赵旭(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信与光传感技术. Email: zhaoxu0324@163.com

**收稿日期:** 2014-09-19; **录用日期:** 2014-11-04

<http://www.photon.ac.cn>

布里渊传感系统中一般采用单模光纤,但由于单端受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)效应的限制,传感光纤的入纤功率有限,导致系统传感距离受限.多模光纤芯径大,单端 SBS 阈值高,如果选用多模光纤作传感光纤,因其允许的入纤功率远高于单模光纤,因而其布里渊散射功率也将远高于单模光纤,可望获得高于单模光纤的传感性能.多模光纤能传输很多模式,不同模式的光在纤芯中产生的布里渊散射不同,其布里渊散射参量对不同的物理量可能有不同的响应特性,因而利用多模光纤作传感光纤可望实现多物理量的同时测量.多模光纤适用于中、短距离的传感,与单模光纤适用的长距离传感融合,可望实现大范围传感区域的无缝覆盖.

近年来,有学者开展了基于多模光纤布里渊散射传感技术的研究.2003年,A Mocofanescu等研究了1550 nm波长时多模光纤的SBS效应,分别采用平面波模型和模态模型对多模光纤进行了SBS阈值和反射率的测定,结果表明采用模态模型分析多模光纤SBS阈值和反射率可取得更好的效果<sup>[5]</sup>.2011年,L I Victor等测得多模光纤SBS阈值、布里渊频移和线宽等参数,并比较了单模光纤和多模光纤的布里渊散射特性,由于多模光纤传输大量模式,每个模式产生各自的布里渊散射谱,导致多模光纤的布里渊散射特性与单模光纤有着明显的差异<sup>[6]</sup>.同年,Y Mizuno等利用纤芯直径为120 μm的聚合物多模光纤测得布里渊频移和线宽分别为2.83 GHz和105 MHz,研究发现布里渊频移与温度和应变呈负依赖关系,其温度和应变灵敏度分别为-4.09 MHz/K和-121.8 MHz/ $\frac{0}{\%}$ <sup>[7]</sup>.上述学者虽然对多模光纤布里渊散射特性进行了实验研究,但是并未解决多模光纤布里渊频移、线宽、散射谱和散射功率的数学描述问题,影响了多模光纤布里渊散射传感系统的建模分析和优化设计.

本文基于射线光学和波动光学理论分析多模光纤的布里渊散射特性,提出确定布里渊散射角取值范围的方法;推导阶跃型和渐变型多模光纤不同模式群布里渊频移、线宽、散射谱和散射功率的表达式,并进行仿真.

## 1 理论分析

### 1.1 多模光纤中的模式和模数量

光纤的传播模式是指光波在光纤中传输时的电磁场分布形式,在多模光纤中存在很多能够远距离传输的传导模式.由于实际多模光纤的相对折射率差为0.01或更小,满足弱导近似条件,所以为了得到模式数量、相位常数等的简便计算公式,通常采用线偏振(Linear Polarization, LP)模的概念进行分析.多模光纤传输的模式数量是由其归一化频率 $V$ 决定的,阶跃型

和渐变型多模光纤 $V$ 的表达式分别为

$$V_s = k_0 \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 \cdot a \cdot n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} = k_0 \cdot a \cdot \text{NA} \quad (1)$$

$$V_g = k_0 \cdot a \cdot \sqrt{n(r)^2 - n_2^2} = k_0 \cdot a \cdot n(r) \cdot \sqrt{2\Delta} = k_0 \cdot a \cdot \text{NA}(r) \quad (2)$$

式中, $a$ 是纤芯半径; $r$ 是纤芯中任一点到轴心的距离; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 是真空中波数; $n_1$ 、 $n_2$ 和 $n(r)$ 分别是纤芯、包层和纤芯中距轴心为 $r$ 处的折射率; $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ 和 $\Delta = (n(0) - n_2)/n(0)$ 分别是阶跃型和渐变型光纤的相对折射率差; $\text{NA} = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 和 $\text{NA}(r) = \sqrt{n(r)^2 - n_2^2}$ 分别是阶跃型和渐变型光纤的数值孔径, $\alpha_{\max}$ 表示空气与光纤交界面处的最大入射角.

阶跃型光纤中模式数量 $M = V_s^2/2$ ,而渐变型光纤中模式数量 $M = V_g^2/4$ .对于规格为50 μm/125 μm的多模光纤来说, $\lambda = 1550$  nm,  $\text{NA} = 0.2$ 时, $V \approx 20.258$ ,这时阶跃型和渐变型光纤中传输的模式分别有206和103种左右.

### 1.2 多模光纤中的布里渊散射参数

光纤中的布里渊散射效应是注入光波场与弹性声波场相互耦合作用而产生的一种非线性光散射现象<sup>[8]</sup>.其特点是:散射光的频率相对于入射光的频率发生变化,并且这种变化的大小与散射角和散射介质内声波场的特性有关.为了简化分析,本文忽略各个模式间的耦合效应,假设所讨论的多模光纤为理想光波导,即在光纤中传输的各个模式群独立存在、独立地与弹性声波场相耦合产生各自的布里渊散射效应,因此可以认为多模光纤各模式群产生的布里渊散射与单模光纤中的布里渊散射具有相同的传输和统计特性.

#### 1.2.1 布里渊频移

多模光纤不同模式在纤芯中的入射角和传播路径不同,其与声波相互作用产生的布里渊散射也不同.不同模式产生的布里渊散射频移表示为<sup>[9]</sup>

$$\nu_B = \frac{2n_{mm}v_\Lambda}{\lambda} \sin(\theta_{mm}/2) \quad (3)$$

式中, $n_{mm}$ 和 $\theta_{mm}$ 分别为与模式标号有关的多模光纤折射率和散射角, $m$ 表示场量沿纤芯圆周方向分布的整个驻波的个数; $n$ 表示场量沿纤芯半径方向分布的半个驻波的个数; $v_\Lambda = \sqrt{\frac{(1-k)E}{(1+k)(1-2k)\rho}}$ 为光纤中的声速, $E$ 为介质的杨氏模量, $k$ 为泊松比, $\rho$ 为介质密度; $\lambda$ 为入射光的波长.

单模光纤与多模光纤因其结构参数和传输模式的差别,散射角有着显著的区别,导致两种光纤布里渊频移的明显不同.对于单模光纤来说,只有前、后向为相关方向,只需考虑后向散射即 $\theta = \pi$ 的情形.对于多模光纤来说,不同模式入射到光纤的角度不同,从而有不

同的  $\theta_{mm}$ . 基于射线光学理论和光纤的全反射传光原理,可以确定  $\theta_{mm}$  的取值范围.

根据光波导理论,子午光线必须满足全反射条件才能在光纤中长距离传输,不满足全反射条件的子午光线会很快衰减掉. 光线在多模光纤中传输时,在任意点、任意方向发生布里渊散射效应,但大部分散射光在传输过程中衰减掉,只有少部分在背向满足全反射条件的布里渊散射可以返回到入射端并被光电探测器检测. 阶跃型和渐变型光纤中的子午光线分别为直线和曲线,由于渐变型光纤中  $NA(r)$  随  $r$  的增大而减小,故当  $r=0$  时,  $n_1(r) = n_1(0) = n_1$ ,  $NA(r)$  有最大值,此时可将渐变型光纤看作阶跃型光纤处理. 当光线以全反射临界角  $\varphi_c$  入射到芯包界面上时,可以得到散射角的最大取值范围,选取该光线上的芯包界面上的点  $A$  和任意散射点  $B$  如图 1 所示进行分析,图中选取以全反射临界角入射的光线的延长线所在方向为散射角  $0^\circ$  参考点,其相反方向散射角为  $\pi$ ,  $y$  轴负向为芯包界面的法线方向.

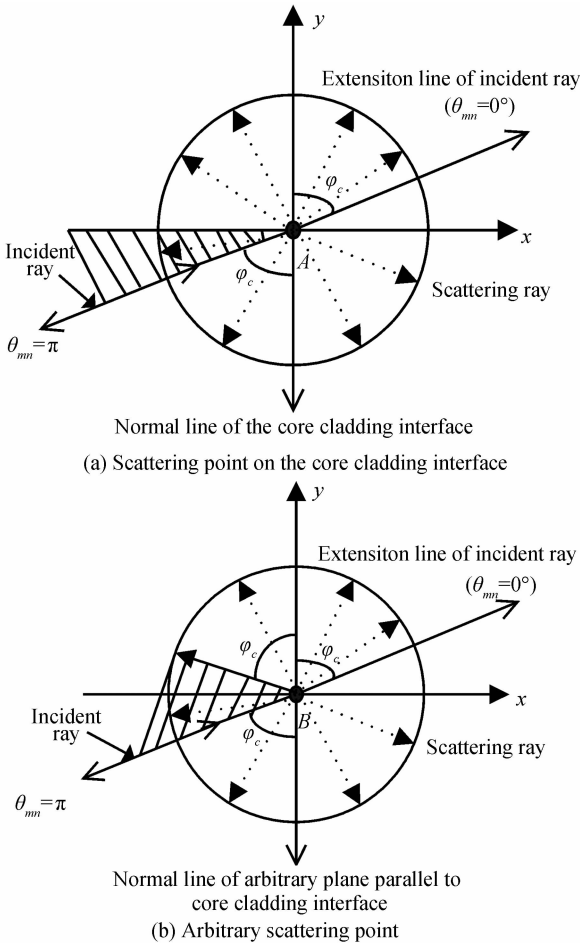


图 1 全反射临界角子午光线上的散射点

Fig. 1 Scattering point on the meridional ray with critical incident angle of total reflection

由图 1 可知,散射效应发生在圆周以内  $A$  和  $B$  为圆心的任意方向,由于散射光线在背向必须满足全反

射条件才能返回入射端并被接收,即散射光与芯包界面法线的夹角必须大于或等于  $\varphi_c$  才能返回光纤始端,故  $A$ 、 $B$  两点产生的能够返回光纤始端散射的区域分别为图中阴影部分. 在  $A$  点,散射角的取值范围为  $\pi/2 + \varphi_c \leq \theta_{mm} \leq \pi$ ; 在  $B$  点,散射角的取值范围为  $2\varphi_c \leq \theta_{mm} \leq \pi$ . 故多模光纤中  $\theta_{mm}$  的最大取值范围为  $2\varphi_c \leq \theta_{mm} \leq \pi$ , 即

$$2\arccos(NA/n_1) \leq \theta_{mm} \leq \pi \quad (4)$$

多模光纤不同模式的折射率  $n_{mm}$  表示为

$$n_{mm} = \beta_{mm} / k_0 \quad (5)$$

式中,  $\beta_{mm}$  是相位常数,它描述各个模式的传输特性. 阶跃型和渐变型光纤的  $\beta_{mm}$  表达式分别为<sup>[10]</sup>

$$\beta_{ms} = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \frac{u_{mm}^2}{a^2}} \quad (6)$$

$$u_{mm} = \frac{\pi}{2} \left( m + 2n + \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

$$\beta_{mg} = k_0 n(0) \sqrt{1 - \frac{2\sqrt{2}\Delta}{k_0 n(0)a} (m+n+1)} \quad (8)$$

式中,  $u_{mm}$  表示  $m$  阶贝塞尔函数的第  $n$  个根.  $\beta_{mm}$  与模式标号  $m$ 、 $n$  有关,对应不同  $m$ 、 $n$  组合的模式,可能有相同的相位常数. 按照相位常数将光纤中的模式分组,将所有相位常数相同的模式归为一组,叫做一个“模式群”. 在多模光纤中有许多模式群,可用  $p$  表示其编号,  $p$  可由 0 变到  $p_{max}$ . 在阶跃型光纤中有  $p = m + 2n$  和  $p_{max} = V_s/\sqrt{2}$ ; 在渐变型光纤中有  $p = m + n$  和  $p_{max} = V_g/2$ .

### 1.2.2 布里渊散射谱

光与介质中的声波相互作用产生的布里渊散射谱服从洛伦兹分布,可由布里渊频移、线宽和峰值增益系数等参量来描述. 假定声波是以  $e^{-\Delta\omega t}$  衰减的,多模光纤中各个模式独立地传输能量,独立地与声波相互作用,则各个模式产生的布里渊散射增益系数表示为<sup>[11-12]</sup>

$$g_B(\nu) = g_p \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2} = \quad (9)$$

$$g_p \frac{1}{1 + (2\Delta\nu/\Delta\nu_B)^2}$$

在  $\nu = \nu_B$  处,布里渊增益系数峰值表示为

$$g_p = g_B(\nu_B) = \frac{2\pi^2 n_{mm}^7 p_{12}^2}{c\lambda^2 \rho v_A \Delta\nu_B} \quad (10)$$

式中,  $p_{12}$  为纵向弹光系数;  $c$  为光速;  $\nu$  为入射光的频率,  $\Delta\nu = \nu - \nu_B$  为频率失谐;  $\Delta\nu_B$  为布里渊线宽,其表达式为<sup>[13]</sup>

$$\Delta\nu_B = \frac{16\pi^2 n_{mm}^2 \eta}{\lambda^2 \rho} \quad (11)$$

式中,  $\eta = 3 \sim 4$  dPa · s 为石英光纤材料的粘滞系数<sup>[14]</sup>. 由式(11)可知,  $\Delta\nu_B$  与  $\lambda^2$  成反比,布里渊增益谱随  $\lambda$  的增大而变窄抵消了式(10)中增益的降低,结果使布里

渊峰值增益  $g_p$  与  $\lambda$  几乎无关.

### 1.2.3 布里渊散射功率

根据瑞利散射功率公式<sup>[15-16]</sup>, 类似地得到布里渊散射功率的表达式为

$$P_B = \frac{P_0 S \alpha_B W v_{mm}}{2} \quad (12)$$

式中,  $P_0$  为入射脉冲光功率;  $S$  为布里渊散射的背向捕捉系数;  $\alpha_B$  为布里渊散射损耗系数;  $W$  为脉冲宽度;  $v_{mm}$  为光纤中的光速.  $S$ 、 $\alpha_B$  和  $v_{mm}$  分别表示为

$$S = \frac{(\lambda/n_{mm})^2}{4\pi A_{\text{eff}}} \quad (13)$$

$$\alpha_B = \frac{8\pi^3 q T n_{mm}^8 p_{12}^2}{3\lambda^4 \rho v_\lambda^2} \quad (14)$$

$$v_{mm} = \frac{c}{n_{mm}} \quad (15)$$

式中,  $q$  为波尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $A_{\text{eff}} = \pi\omega^2$  为光纤有效横截面积, 式中  $\omega$  为模场半径. 阶跃型和渐变型光纤的模场半径表示为<sup>[17-18]</sup>

$$\frac{\omega_s}{a} = 0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \quad (16)$$

$$\frac{\omega_g}{a} = \sqrt{\frac{2}{V}} + \frac{0.23}{V^{3/2}} + \frac{18.01}{V^6} \quad (17)$$

## 2 数值仿真与讨论

选用长飞公司 50/125  $\mu\text{m}$  多模光纤进行数值仿真, 光纤的具体参数为: 工作波长  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.45$ , 包层折射率  $n_2 = 1.436$ ; 数值孔径  $\text{NA} = 0.2$ , 由式(4)可知  $164^\circ \leq \theta_{\text{min}} \leq \pi$ ; 归一化频率  $V \approx 20.258$ , 由式(16)和式(17)可得阶跃型和渐变型光纤的模场半径  $\omega_s = 16.694 \mu\text{m}$  和  $\omega_g = 7.918 \mu\text{m}$ ; 阶跃型和渐变型光纤的最高模式群标号  $p_{\text{maxs}} = V_s/\sqrt{2} \approx 15$  和  $p_{\text{maxg}} = V_g/2 = 10$ ; 绝对温度  $T = 300 \text{ K}$ , 波尔兹曼常数  $q = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ , 纵向弹光系数  $p_{12} = 0.27$ ; 脉冲宽度  $W = 100 \text{ ns}$ , 峰值功率  $P_0 = 5 \text{ mW}$ .

### 2.1 布里渊频移

布里渊频移不仅与多模光纤的模式群有关, 还与入射光和布里渊散射光的夹角即布里渊散射角有关, 由式(3)可得阶跃型和渐变型光纤的布里渊频移随模式群编号和散射角的变化曲线如图 2 和 3.

由图可知, 当散射角一定时,  $\nu_B$  随模式群编号的增加而减小; 当模式群编号一定时,  $\nu_B$  随散射角的增加而增加, 即  $\nu_{B2\varphi_s} \leq \nu_B \leq \nu_{B\pi}$ . 不同的是阶跃型光纤有 15 个模式群, 而渐变型光纤只有 10 个模式群, 且阶跃型光纤的  $\nu_B$  随模式群编号和散射角的变化比渐变型光纤缓慢.

多模光纤布里渊散射角的最小值和最大值分别为  $\theta = 2\arccos(\text{NA}/n_1) \approx 164^\circ$  和  $\theta = \pi$ , 散射角只有  $16^\circ$  的变化范围. 在这个范围内, 对于不同的散射角, 不同模

式群的布里渊频移、线宽、散射谱和散射功率变化趋势大致一样, 而单模光纤的  $\theta = \pi$ , 为了很好地与单模光纤作比较, 选取  $\theta = \pi$  进行分析.

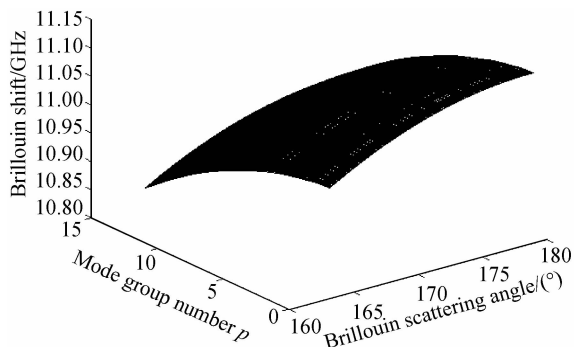


图 2 阶跃型光纤布里渊频移与模式群编号和散射角的关系  
Fig. 2 Brillouin shift of step fiber with mode group number and scattering angle

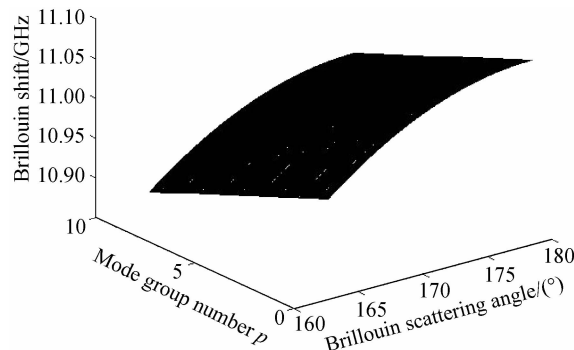


图 3 渐变型光纤布里渊频移与模式群编号和散射角的关系  
Fig. 3 Brillouin shift of graded fiber with mode group number and scattering angle

当散射角  $\theta = \pi$  时, 由式(3)可得阶跃型和渐变型光纤的布里渊频移  $\nu_B$  随模式群编号的变化曲线如图 4.

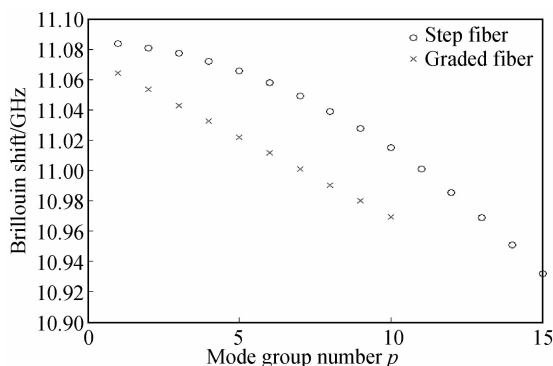


图 4 阶跃型和渐变型光纤布里渊频移与模式群编号的关系  
Fig. 4 Brillouin shift of step and graded fiber versus mode group number

由图 4 可知, 阶跃型光纤的布里渊频移大于渐变型光纤, 且随模式群编号的变化比渐变型光纤缓慢. 随着模式群编号的增加, 阶跃型光纤布里渊频移在 11.084~10.932 GHz 范围内呈曲线下降; 而渐变型光纤的布里渊频移在 11.064~10.969 GHz 范围内呈直线下降. 单

模光纤的传输模可用  $LP_{01}$  模表示,它的散射角  $\theta = \pi$ ,文献[19]测得波长为 1 550 nm 时石英系标准单模光纤的布里渊频移为 11.003 GHz,与本文分析相吻合。

## 2.2 布里渊线宽

由式(11)可得阶跃型和渐变型光纤的布里渊线宽随模式群编号的变化曲线如图 5。由图 5 可知,阶跃型光纤的布里渊线宽大于渐变型光纤,且随模式群编号的变化比渐变型光纤缓慢。随着模式群编号的增加,阶跃型光纤的布里渊线宽在 21.760~21.168 MHz 范围内呈曲线下降;而渐变型光纤的布里渊线宽在 21.683~21.314 MHz 范围内呈直线下降。文献[19]测得波长为 1 550 nm 时石英系标准单模光纤的布里渊线宽为 20 MHz,与本文的分析结果一致。上述结果说明多模光纤中每个模式独立地产生各自的布里渊散射谱,其线宽主要取决于光纤的材料、结构、掺杂和相应模式场的特性,数值为相同量级。

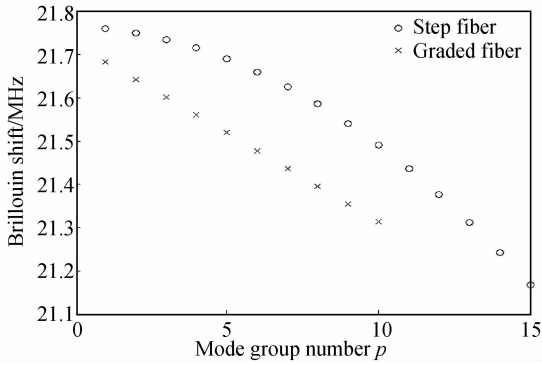


图 5 阶跃型和渐变型光纤布里渊线宽与模式群编号的关系  
Fig. 5 Brillouin linewidth of step and graded fiber versus mode group number

## 2.3 布里渊散射谱

由式(9)可得阶跃型和渐变型光纤的布里渊散射谱随模式群的变化曲线如图 6 和 7。

由图 6、7 可知,阶跃型光纤的布里渊频移和增益随模式群的变化比渐变型光纤缓慢。随着模式群编号的增加,阶跃型光纤的布里渊散射谱的归一化峰值增

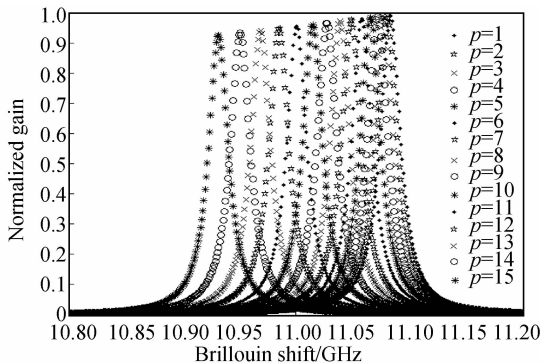


图 6 阶跃型光纤不同模式群布里渊散射谱  
Fig. 6 Brillouin scattering spectra of different mode group in step fiber

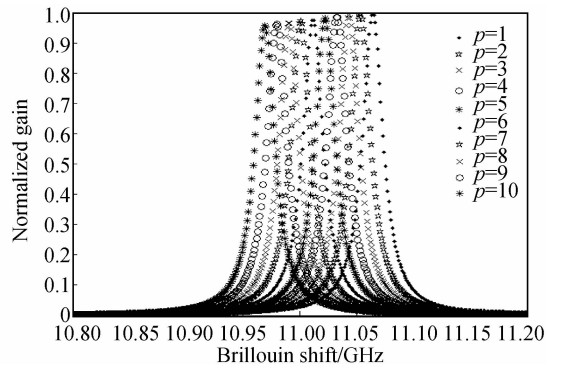


图 7 渐变型光纤不同模式群布里渊散射谱  
Fig. 7 Brillouin scattering spectra of different mode group in graded fiber

益在 1~0.933 范围内呈曲线下降;而渐变型光纤的布里渊散射谱的归一化峰值增益在 1~0.957 范围内呈直线下降,两种类型光纤的归一化峰值增益随模式群编号的下降趋势如图 8。

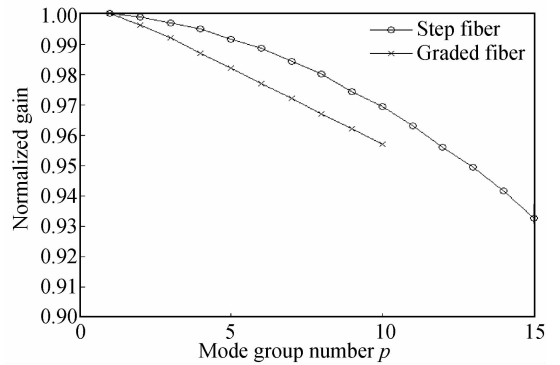


图 8 阶跃型和渐变型光纤归一化峰值增益与模式群编号的关系  
Fig. 8 Normalized gain of step and graded fiber versus mode group number

两种类型的光纤对应模式群编号  $p=1$  和 2 的两个模式群布里渊散射谱的频移差为 2.5 MHz 和 10.5 MHz,这说明多模光纤相邻模式群间的布里渊散射频移相差很小,若要通过测量布里渊频移提取不同物理量的信息,则应选择间隔较远的几个模式群和采用一定的检测手段对所选模式群产生的布里渊散射谱进行分离,并进一步分析不同模式群布里渊散射特性参数对不同物理量的响应特性。

实际传感系统中在光纤始端检测到的背向布里渊散射是各模式群在光纤中产生的布里渊散射的叠加,本文假设所讨论的光纤为理想光波导,仿真得到了各模式群产生的布里渊散射在光纤始端的合成谱,如图 9 和 10。

由图可知,阶跃型和渐变型光纤布里渊散射合成谱的布里渊频移分别为 11.077 GHz 和 11.023 GHz,布里渊线宽分别为 81 MHz 和 106 MHz。波长为 1 550 nm 时石英系标准单模光纤的布里渊频移和线宽

分别为 11.003 GHz 和 20 MHz<sup>[19]</sup>,与本文对多模光纤的仿真结果有一定的偏差,形成这种偏差的主要原因为:

1)实际光纤布里渊频移随纤芯掺杂浓度的增加而下降,其依赖关系为 94 MHz/wt. %<sup>[20]</sup>,而本文的分析未考虑光纤掺杂对布里渊散射特性的影响;

2)单模光纤只传输一种模式,而多模光纤传输多种模式,且每种模式独立地产生各自的布里渊散射谱.尽管各个模式群的布里渊线宽相差很小,但是由于各个模式群的布里渊频移不同,使得叠加后的多模光纤的布里渊散射合成谱相对于单模光纤大大展宽并偏离洛伦兹分布.

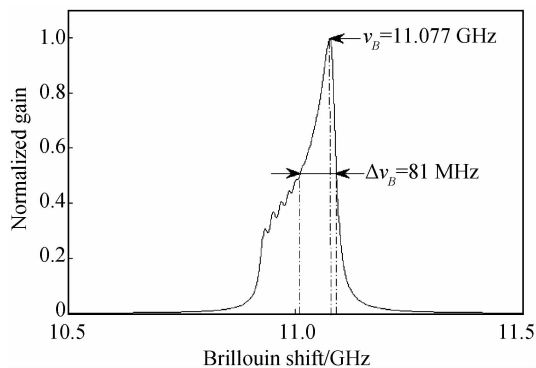


图9 阶跃型光纤所有模式群布里渊散射谱的叠加

Fig. 9 Superposition of Brillouin scattering spectra of all mode groups in step fiber

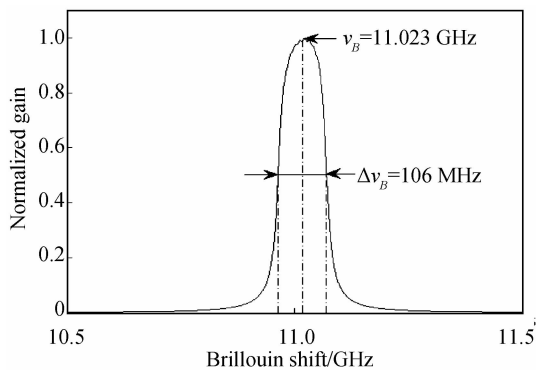


图10 渐变型光纤所有模式群布里渊散射谱的叠加

Fig. 10 Superposition of Brillouin scattering spectra of all mode groups in graded fiber

## 2.4 布里渊散射功率

由式(12)可得阶跃型和渐变型光纤的布里渊散射功率随模式群编号的变化曲线如图 11.

由图可知,阶跃型光纤的布里渊散射功率小于渐变型光纤,且随模式群编号的变化比渐变型光纤缓慢.随着模式群编号的增加,阶跃型光纤布里渊散射功率在  $1.990 \times 10^{-9} \sim 1.857 \times 10^{-9}$  W 范围内呈曲线下降;而渐变型光纤的布里渊散射功率在  $2.052 \times 10^{-9} \sim 1.965 \times 10^{-9}$  W 范围内呈直线下降.当入纤功率为 4.5 mW 时,波长为 1550 nm 时石英系标准单模光纤的

传输模产生的布里渊散射功率为  $2.04 \times 10^{-9}$  W<sup>[21]</sup>,与本文的分析基本吻合.在多模光纤始端采集到的布里渊散射功率为各个模式群的布里渊散射功率之和,因此可求得阶跃型光纤和渐变型光纤的布里渊散射总功率分别为  $29.098 \times 10^{-9}$  W 和  $20.083 \times 10^{-9}$  W.由于多模光纤各个模式独立地产生布里渊散射效应,SBS 阈值高,因此当增加入纤功率时其布里渊散射总功率将更大,可望获得更高的系统信噪比.

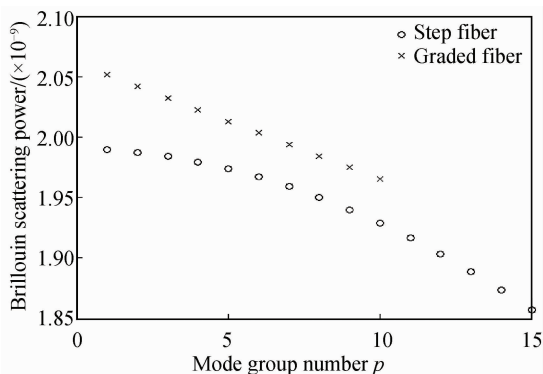


图 11 阶跃型和渐变型光纤布里渊散射功率与模式群编号的关系

Fig. 11 Brillouin scattering power of step and graded fiber versus mode group number

## 3 结论

本文基于射线光学和波动光学理论分析了多模光纤的布里渊散射特性,提出了确定布里渊散射角取值范围的方法;推导了阶跃型和渐变型多模光纤不同模式群布里渊频移、线宽、散射谱和散射功率的表达式,并进行了仿真.结果表明,多模光纤布里渊散射角的最大取值范围为  $2\arccos(NA/n_1) \leq \theta_{\text{min}} \leq \pi$ ;阶跃型光纤的布里渊频移、线宽、归一化峰值增益和散射功率随模式群的变化比渐变型光纤缓慢,且随着模式群编号的增加,阶跃型光纤的上述参量分别在 11.084 ~ 10.932 GHz、21.760 ~ 21.168 MHz、1 ~ 0.933 和  $1.990 \times 10^{-9} \sim 1.857 \times 10^{-9}$  W 范围内曲线下降;渐变型光纤的上述参量分别在 11.064 ~ 10.969 GHz、21.683 ~ 21.314 MHz、1 ~ 0.957 和  $2.052 \times 10^{-9} \sim 1.965 \times 10^{-9}$  W 范围内直线下降.本文的研究结果不但为分析和评价多模光纤布里渊散射传感技术的性能提供了理论依据,而且对分布式多模光纤布里渊散射传感系统的建模分析和优化设计具有重要的参考价值.

### 参考文献

- [1] BAO X Y, LI W H, LI Y, *et al.* Distributed fiber sensors based on stimulated Brillouin scattering with centimeter spatial resolution[C]. COIT, China; Beijing, 2009; 2-12.
- [2] JAMIOY G, JOSE M. Decimeter spatial resolution by using differential pre-excitation BOTDA pulse technique[J]. *Sensors Journal*, 2011, 11(10): 2344-2348.

- [3] DONG Y K, CHEN L, BAO X Y. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(2):277-279.
- [4] FEMANDEZ-VALLEJU M, OLIER D, ZOMOZA A, *et al.* 46-km-long Raman amplified hybrid double-bus network with point and distributed Brillouin sensors [J]. *Sensors Journal*, 2012, **12**(1):184-188.
- [5] MOCOFANESCU A, WANG L, JAIN R, *et al.* Experimental and theoretical investigations on stimulated Brillouin scattering (SBS) in multimode fibers, at 1550 nm wavelength [C]. ROMOQTO, Romania; Constanta, 2003:654-661.
- [6] VICTOR L I, SEBASTIEN L, AISSA H, *et al.* Stimulated Brillouin scattering in multi-mode fiber for sensing applications [C]. WFOPC, Canada; Montreal, 2011:1-4.
- [7] MIZUNO Y, NAKAMURA K. Brillouin scattering in polymer optical fibers; fundamental properties and potential use in sensors [C]. Polymers, Japan; Switzerland, 2011:886-898.
- [8] 赵圣之. 非线性光学 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2007.
- [9] AGRAWAL G P. Principle & application of nonlinear fiber optics [M]. Jia Dong-fang trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [10] 顾晓仪, 黄永清, 陈雪, 等. 光纤通信 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [11] TANG C L. Saturated and spectral characteristics of Stokes emission in the stimulated Brillouin process [J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, **37**(8):2945-2955.
- [12] HEIMAN D, HAMILTON D S, HELLWARTH R W. Brillouin scattering measurements on optical glasses [J]. *Physical Review B*, 1969, **19**(12):6583-6592.
- [13] LI Qiang, LV Zhi-wei, HA SI Wu-li-ji, *et al.* Study on parameters and performances of SBS medium  $C_4Cl_6$  [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(9):1481-1485.
- 李强, 吕志伟, 哈斯乌力吉, 等. SBS 新介质  $C_4Cl_6$  参数确定及性能研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(9):1481-1485.
- [14] LI Gang, OU Shu-fang, XU Jian. Introduction coating materials for silica optical fiber [J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2008, **15**(6):2-5.
- 李刚, 欧书方, 徐剑. 石英光纤涂层材料 [J]. *涂料技术与文摘*, 2008, **15**(6):2-5.
- [15] AOYAMA K, NAKAGAWA K, ITOH T. Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber [J]. *Quantum Electronics*, 1981, **17**(6):862-868.
- [16] TSUNEO H, KAORU S, TOSHIO K, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7):1296-1302.
- [17] MARCUSE D. Loss analysis of single-mode fiber splices [J]. *Bell System Technical Journal*, 1977, **56**(5):703-718.
- [18] ZHAN Sheng-bao, ZHAO Shang-hong, XU Jie, *et al.* Scattering effect in stimulated Brillouin scattering combination for a multimode gain fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(10):34-39.
- [19] SHIMIZU K, HORIGUCHI T, KOYAMADA Y, *et al.* Coherent self-heterodyne detection of spontaneously Brillouin-scattered light waves in a single-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(3):185-187.
- [20] NIKLES M, THEVENAZ L, ROBERT P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(10):1842-1851.
- [21] PARKER T P, FARHADIROUSHAN M, HANDEREK V A, *et al.* Simultaneous distributed measurement of strain and temperature from noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1998, **34**(4):645-659.