

单模光纤中高相干光源的瑞利散射光的统计特性

任梅珍 徐团伟 张发祥 李芳 刘育梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要 基于光纤中高相干光源(相干长度大于 100 km)的瑞利散射光的统计特性,采用随机相向量模型,推导了光纤中瑞利散射光的功率分布和相位分布,指出瑞利散射光功率的概率密度函数(PDF)符合修正的莱斯分布,而瑞利散射光的相位分布近似为高斯分布。采用高灵敏度的光电探测器对不同长度的光纤的瑞利散射光功率进行了测试,实验结果与理论吻合,同时发现不同长度光纤的瑞利散射光功率的最大值随平均值线性增加。

关键词 统计光学;瑞利散射;概率密度函数;高相干光源

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0105001

Statistical Properties of Rayleigh Backscattered Light in Single-Mode Fibers Caused by a Highly Coherent Laser

Ren Meizhen Xu Tuanwei Zhang Faxiang Li Fang Liu Yuliang

(*Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract Statistical properties of the Rayleigh backscattered light power and phase caused by a highly coherent semiconductor laser from single-mode fiber are presented. Based on the random phasor model, the results show that the probability density function (PDF) of Rayleigh backscattered light power from single-mode fiber follows the modified Rician distribution. The phase distribution of Rayleigh scattered light is approximately Gaussian distribution. The experimental results are shown to correspond to theoretical derivation, and the maximum power of scattered light from different lengths increases linearly with the mean intensity.

Key words statistical optics; Rayleigh backscattering; probability density function; highly coherent laser

OCIS codes 030.1640; 030.6600; 290.5870; 060.2430

1 引言

光沿着光纤传播时,由于光纤制造过程中折射率的随机变化而引起瑞利散射损耗。瑞利散射光在空间各个方向上呈均匀分布,由于光纤的传导作用,反向瑞利散射光沿光纤返回到光源入射处^[1]。反向瑞利散射光是 1550 nm 波段内光纤传输损耗的主要因素之一,尤其是在长距离光纤通信系统中^[2],反向瑞利散射光已经达到影响器件性能的水平,例如,光纤放大器^[3]、光纤陀螺^[4,5]、光通信系统^[6]以及光

传感系统^[7,8]。虽然瑞利散射光会降低系统的性能,但同时也可以利用它实现光纤测量,确定光纤中的故障断点和损耗分布^[9,10]。因此研究瑞利散射光的特性对实际应用具有指导意义。

文献[11]讨论了非相干光源的瑞利散射光,给出了相应的瑞利散射功率。文献[12]讨论了光源相干长度远小于光纤长度时的瑞利散射光,并指出瑞利散射场是零平均的圆复高斯随机变量。文献[9]理论研究了任意波形的输入脉冲在光纤中的瑞利散

收稿日期: 2012-07-04; **收到修改稿日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61107071,61077059,41074128)和广东省中国科学院全面战略合作项目(2010A09010002)资助课题。

作者简介: 任梅珍(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤激光器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: renmeizhen@semi.ac.cn

导师简介: 刘育梁(1966—),男,博士生导师,主要从事光传感、光通信系统与器件等方面的研究。

E-mail: ylliu@semi.ac.cn

射过程,并进行了实验验证。近年来,窄线宽激光器在各个领域得到了广泛的应用,线宽小于 3 kHz(相干长度大于 100 km)的高相干光源在光传感和通信系统中具有显著的优点,日益成为该领域的研究热点^[13,14]。在长距离的光传感系统中,瑞利散射成为影响传感器性能的主要因素^[15]。为了有效消除瑞利散射光的影响,需要分析其统计特性。文献[16]粗略地讨论了高相干光源的瑞利散射光,仅给出了瑞利散射光强度的实验结果。

本文分析了高相干光源在相干长度远远大于光纤长度时的瑞利散射光的统计特性,给出了不同长度光纤的瑞利散射光的强度和相位的统计分布,该结果可用于对光通信和传感系统中的瑞利散射进行建模,深入分析瑞利散射的特性,进而降低瑞利散射对器件的影响^[17]。

2 理 论

采用光纤的一维模型,将长度为 L 的光纤分成 N 个散射单元, $\Delta L = L/N$ 是散射单元的长度^[18],远远小于入射光的波长。沿着光纤传播的光源的复幅度矢量为

$$\mathbf{E}_p(t, z) = \mathbf{P}(z)\mathbf{E}_s(t - z/v_g)\exp[-(\alpha/2 + j\beta)z], \quad (1)$$

式中 $\mathbf{E}_s(t)$ 为入射光源的电场强度, α 为总的光强损

耗系数, β 为传播常数, v_g 为群速度,琼斯矩阵 $\mathbf{P}(z)$ 描述传播中光偏振态的变化。假设光纤中 z 处的散射单元的背向散射系数为 $\Delta\rho(z)$,则 z 处的散射单元贡献的瑞利散射场为

$$\Delta\mathbf{E}_b(t, z) = \mathbf{M}(z)\mathbf{E}_s(t - 2z/v_g) \times \exp[-(\alpha + 2j\beta)z\Delta\rho(z)], \quad (2)$$

式中琼斯矩阵 $\mathbf{M}(z) = \mathbf{P}^T(z)\mathbf{P}(z)$ 描述偏振态的往返变化。

为了得到瑞利散射光的统计特性,可以推导瑞利散射光功率的概率密度函数(PDF)^[18,19],但是推导过程相当繁琐。考虑到该研究情况——光源的相干长度远远大于光纤长度,采用文献[20,21]中的随机向量和加入相干背景的模式。该模型基于以下假设:1)每一个散射单元的幅度和相位是相互独立的,也独立于其他散射单元的幅度和相位;2)每一个散射单元的瑞利散射场是完全偏振的,且遵循圆复高斯统计分布,其幅度和相位独立于相干背景的幅度和相位;3)相干背景具有特定的功率,且偏振态与总瑞利散射场的偏振态一样。

基于中心极限定理和圆复高斯统计分布的理论,由高相干光源(相干长度远远大于光纤长度)引起的瑞利散射场的功率和相位的联合概率密度函数可以写为^[20]

$$p_{I_b, \theta} = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\langle I_N \rangle} \exp\left(-\frac{I_b + I_s - 2\sqrt{I_b I_s} \cos \theta}{\langle I_N \rangle}\right), & I_b \geq 0, -\pi \leq \theta \leq \pi, \\ 0, & \text{other wise} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 I_b 为瑞利散射光的功率, I_s 为相干背景的光功率, $\langle I_N \rangle$ 为无相干背景时瑞利散射光的平均功率, θ 为瑞利散射光的相位。将联合概率密度函数关于 θ 积分可得功率的概率密度函数,且由积分恒等式:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \exp\left(2\frac{\sqrt{I_b I_s}}{\langle I_N \rangle} \cos \theta\right) d\theta = 2\pi J_0\left(2\frac{\sqrt{I_b I_s}}{\langle I_N \rangle}\right), \quad (4)$$

式中 J_0 是修正的第一类零阶贝塞尔函数,得到瑞利散射场的强度分布:

$$p_{I_b}(I_b) = \begin{cases} \frac{1}{\langle I_N \rangle} \exp\left(-\frac{I_b + I_s}{\langle I_N \rangle}\right) J_0\left(2\frac{\sqrt{I_b I_s}}{\langle I_N \rangle}\right), & I_b \geq 0, \\ 0. & \text{other wise} \end{cases}, \quad (5)$$

这个密度函数称为修正的莱斯密度函数。式中:

$$\langle I_b \rangle = \langle I_N \rangle + I_s, \quad (6)$$

$$\langle I_b^2 \rangle = 2\langle I_N \rangle^2 + 4\langle I_N \rangle I_s + I_s^2, \quad (7)$$

若无相干背景,即 $I_s = 0$,则瑞利散射场的强度分布退化为

$$p_{I_b}(I_b) = \begin{cases} \frac{1}{\langle I_N \rangle} \exp\left(-\frac{I_b}{\langle I_N \rangle}\right), & I_b \geq 0, \\ 0. & \text{other wise} \end{cases}, \quad (8)$$

该分布为高斯分布,即文献[18]的研究对象——相干长度远远小于光纤长度的光源的瑞利散射光。定

义“光束比”为

$$r = I_s / \langle I_N \rangle, \quad (9)$$

将联合概率密度函数关于功率积分可得相位的概率密度函数^[22]

$$p_\theta(\theta) = \begin{cases} \frac{\exp(-r)}{2\pi} + \sqrt{\frac{r}{\pi}} \cos \theta \exp(-r \sin^2 \theta) \Phi(\sqrt{2r} \cos \theta), & -\pi \leq \theta \leq \pi, \\ 0, & \text{other wise} \end{cases} \quad (10)$$

式中

$$\Phi(b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^b \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy, \quad (11)$$

该分布与 r 的取值密切相关,若相干背景很弱($r \rightarrow 0$),相位分布接近于均匀分布;而当相干背景很强时($r > 1$),相位分布接近于高斯分布。

3 实验结果与分析

实验装置如图 1 所示,窄线宽半导体激光器(RIO0175-5-00-4)的中心波长为 1550 nm,半峰全

宽(FWHM)线宽约为 1.8 kHz(即相干长度为 160 km)。采用普通通信光纤(G652)作为测试光纤,光纤的末端通过打圈消除端面反射的影响。入射光通过 3 dB 耦合器进入长度为 1~5 km 的光纤,采用带宽为 4 MHz、响应度为 1.028 MV/W 的光电探测器来探测瑞利散射光,光电探测器的输出电压由 16 bit 的模/数转换(A/D)数据采集卡进行采集,采样率为 10 kHz。采集数据通过计算机(PC)进行分析。

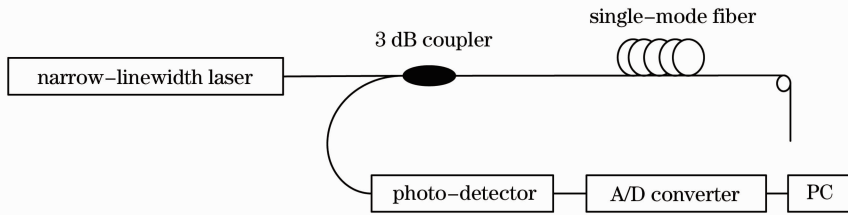


图 1 测量单模光纤中瑞利散射光的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring Rayleigh backscattered light from single-mode fibers

实验中,对长度为 1~5 km 光纤的瑞利散射光功率进行了采集,使用 Matlab 软件编程对数据进行处理,得到其光功率分布的直方图,每个柱条的纵坐标

值为瑞利散射光功率落在该光功率区间的数量。根据实验数据计算(5)式中的参数,得到了不同长度光纤的瑞利散射光功率密度函数的拟合曲线,如图 2

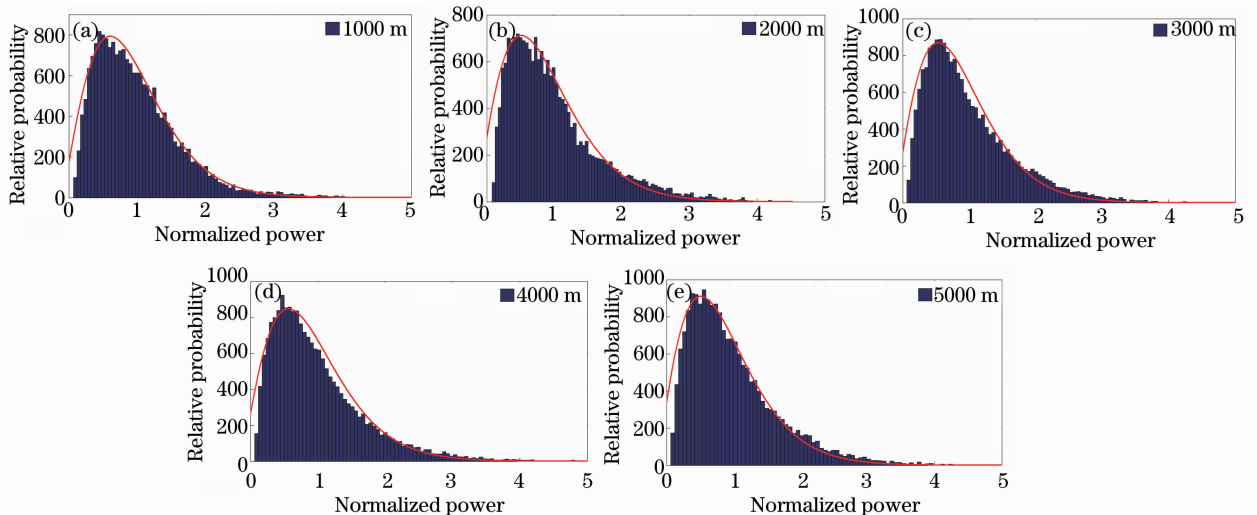


图 2 不同长度光纤的归一化瑞利散射光功率的直方图和概率密度函数

Fig. 2 Histogram and PDF curves of normalized Rayleigh backscattered light power of different fiber lengths

所示,图中横坐标采用的是归一化功率 $I_b/\langle I_b \rangle$ 。从图中可以看出,修正的莱斯密度函数与直方图吻合较好,但在功率较低的一侧存在一定的偏差,该差异可能与光在传播过程中偏振态的微小变化有关,而在分析时忽略了这些变化。

根据采集的数据和(10)式得到相位的概率密度函数,如图3所示。不同长度光纤的瑞利散射光的相位密度函数都近似为高斯分布,(10)式中 r 的取值都大于1,即相干背景很强。

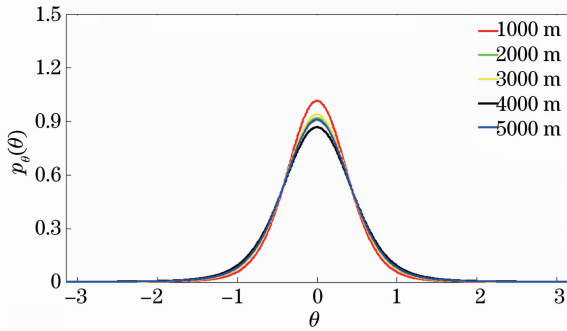


图3 不同长度光纤的瑞利散射光的相位概率密度函数
Fig. 3 PDF curves of Rayleigh backscattered light phase from the fibers of different lengths

为了使问题更清楚和便于对瑞利散射建模时使用^[17],计算了最大瑞利散射光功率与平均瑞利散射光功率的关系。通过对得到的概率密度函数积分,使积分值等于0.99,得到最大瑞利散射光功率。结果如图4所示,不同长度的光纤的瑞利散射光功率的最大值随平均值线性增加,该结果有助于建模时等效瑞利散射,进而分析其对器件的影响。

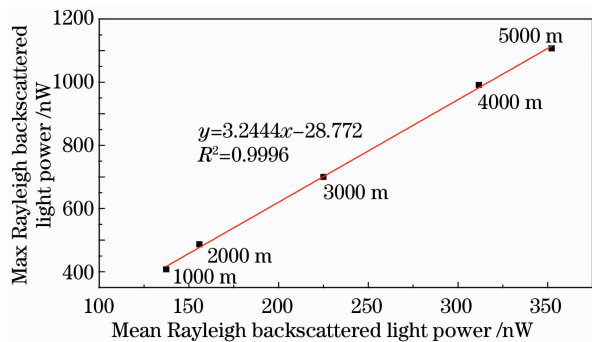


图4 瑞利散射光功率的最大值与平均值的关系
Fig. 4 Relation between the max and the mean Rayleigh backscattered light power

4 结 论

分析了由相干长度远大于光纤长度的光源引起的瑞利散射光的统计特性,得到瑞利散射光的功率分布符合修正的莱斯分布,而相位分布近似为高斯

分布,并通过实验验证了理论的合理性,实验结果表明不同长度的光纤的瑞利散射光功率的最大值随平均值线性增加。

参 考 文 献

- Xu Daxiong, An Haozhe, Pang Yong *et al.*. Study of Rayleigh backscattering in erbium-doped fibers[J]. *Optoelectronics • Laser*, 1994, **5**(5): 274~277
- 徐大雄, 安浩哲, 庞勇等. 掺铒光纤中的后向瑞利散射的研究[J]. *光电子·激光*, 1994, **5**(5): 274~277
- Jiang Wenning, Chen Jianping, Chen Yingli. Suppression of double Rayleigh backscattering noise in optical fiber Raman amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 539~541
- 姜文宁, 陈建平, 陈英礼. 光纤拉曼放大器中双重瑞利背向散射噪声的抑制[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 539~541
- P. Gysel, R. K. Staubli, R. U. Hofstetter. Power penalties due to multiple Rayleigh backscattering in coherent transmission systems using in-line optical amplifiers [J]. *IEEE Photonic. Tech. Lett.*, 1990, **2**(12): 872~874
- W. Burns, R. Moeller. Rayleigh backscattering in a fiber gyroscope with limited coherence sources [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1983, **1**(2): 381~386
- Liu Yanlei, Yuan Libo, Zhou Ai. Two-ring-resonator in parallel combined Rayleigh backscattering fiber optic gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 846~851
- 刘艳磊, 苑立波, 周爱. 双环形腔并联瑞利后向散射式光纤陀螺[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 846~851
- P. Gysel, R. K. Staubli. Crosstalk penalties due to coherent Rayleigh noise in bidirectional optical communication systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(3): 375~380
- Tuanwei Xu. Stability of a distributed feedback fiber laser sensor array with unequal wavelength spacing[C]. *SPIE*, 2009, **7382**: 738239
- Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 29~33
- 刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 29~33
- Yi Duo, Wang Zhi, Wu Chongqing *et al.*. Properties of Rayleigh backscattering in optical fiber with arbitrary input optical pulses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **4**(41): 404~407
- 易多, 王智, 吴重庆等. 任意波形输入脉冲光纤背向瑞利散射的研究[J]. *光子学报*, 2012, **4**(41): 404~407
- Lü Yuelan, Xing Yongwei. Investigation on Rayleigh scattering waveform in phase optical time domain reflectometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0819001
- 吕月兰, 邢永伟. 相位光时域反射计瑞利散射波形特性研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0819001
- E. Brinkmeyer. Backscattering in single-mode fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(9): 329~330
- P. Gysel, R. K. Staubli. Statistical properties of single-mode fiber Rayleigh backscattered intensity and resulting detector current [J]. *IEEE T. Commun.*, 1992, **40**(6): 1091~1097
- Ma Mingxiang, Yang Huayong, Xu Pan *et al.*. Investigation on characteristics of mode hopping in ultra-narrow linewidth erbium-doped fiber ring laser under pump modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0314002
- 马明祥, 杨华勇, 徐攀. 抽运调制条件下超窄线宽掺铒光纤环形激光器的跳模特性研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0314002
- Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572

- 谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 569~572
- 15 G. A. Cranch, G. Flockhart, C. K. Kirkendall. Distributed feedback fiber laser strain sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, **8**(7): 1161~1172
- 16 W. Eickhoff, R. Ulrich. Statistics of backscattering in single-mode fiber[Z]. IOOC'81, San Francisw, CA, 1981. TUK4
- 17 Xu Tuanwei. Research on Distributed Feedback Fiber Lasers [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2010
- 徐团伟. 分布反馈光纤激光器的研究[D]. 北京:中国科学院半导体研究所, 2010
- 18 P. Gysel, R. K. Staubli. Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1990, **8**(4): 561~567
- 19 A. E. Alekseev, Y. A. Tezadov, V. T. Potapov. Statistical properties of backscattered semiconductor laser radiation with different degrees of coherence[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, **42**(1): 76~81
- 20 J. W. Goodman. Statistical Properties of Laser Speckle Patterns [M]. Berlin: Springer, 1975
- 21 J. W. Goodman. Statistical Optics[M]. New York; Wiley, 1985
- 22 D. Middleton. Introduction to Statistical Communication Theory [M]. New York: McGraw-HillBook Co., 1960

栏目编辑: 王晓琰