

偏振正交法抑制双向传输系统瑞利干涉噪声

王艳红¹, 郭 磐², 倪国强²

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘 要:瑞利后向散射引起的干涉噪声是双向光纤传输系统的主要噪声来源。本文对单模光纤双向传输系统中瑞利后向散射的一般理论和偏振特性进行了分析,并提出了采用偏振正交法减小干涉噪声的方法。建立了10 GHz模拟RF信号单波长双向传输系统,并采用偏振旋转器件实现正、反向传输光的偏振近似正交传输。通过数值模拟,分析了本系统瑞利后向散射偏振状态与入射光偏振状态、反向光偏振旋转角的关系,进一步分析了系统干涉噪声抑制水平。模拟分析结果表明,在80°~90°范围内旋转偏振态,能够使瑞利后向散射降低至少一个数量级;系统信噪比提高了近15倍。利用偏振正交法减小双向传输系统的干涉噪声,有对偏振旋转的精度要求不高、容易操作的优点。

关键词:光纤光学;瑞利后向散射;干涉噪声;偏振正交;邦加球;双向传输

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.019

Reducing coherent Rayleigh noise using orthogonal polarization in bidirectional fiber communication system

WANG Yan-hong¹, GUO Pan², NI Guo-qiang²

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, North University of China, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China; 2. Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Ministry of Education of China, Beijing 100081, China)

Abstract: The coherent Rayleigh noise (CRN) induced by Rayleigh backscattered (RB) light and backward transferred light in the fiber is a main noise source in bidirectional communication systems. In this paper, the bidirectional communication system with a single mode fiber for 10 GHz analog radio frequency (RF) signal is set up, and the orthogonal polarization method for reducing CRN is proposed. Orthogonal polarization communication is achieved by a polarization rotator. The system performance is analyzed by simulation. The simulation results show that CRN of the bidirectional communication system can be diminished by using the method and RB light would decrease by an order of magnitude. Signal to noise ratio (SNR) of the system would increase by 15-fold. The orthogonal polarization method has the advantage of easily adjusting for polarization rotation angle.

Key words: fiber optics; RB; coherent noise; polarization orthogonal; poincare sphere; bidirectional communication

1 引 言

利用单波长或同一光源实现在同一光纤中双向传输信息的技术,早在20世纪80年代末就有人研究^[1-2]。它的应用领域有很多,如在全光再生器^[3]

和波分复用(WDM)^[4-5]领域的应用。单波长双向

作者简介:王艳红(1978-),女,博士,讲师,主要从事射频光纤传输技术,光电测试方面研究。E-mail:wanyanhong@nuc.edu.cn

收稿日期:2012-03-28; **修订日期:**2012-04-23

传输系统由于采用同一光源,同一光纤,共用光束耦合器件及减少连接复杂性等,可以大大节约系统成本和提高系统性能,比如单向传输系统调高了波长效率^[4]。但我们也观察到使用双向传输系统出现的缺陷:它的噪声高于探测器的散粒噪声、APD 雪崩噪声或探测器热噪声^[1]。这些噪声来源于光纤中后向瑞利散射光及器件端面反射光与反向传输光的干涉。然而,器件和光纤的端面反射光可以改善到小于 -55 dB,可以忽略;而瑞利后向散射却不可避免^[6]。这一由瑞利后向散射引起的噪声称为干涉瑞利噪声(CRN)^[1,7],严重的影响了双向传输系统的工作性能。因此,双向传输系统的瑞利后向散射光的特性和对系统的影响必须予以研究。

为了使单波长双向传输系统得以适用,前人对单模光纤中瑞利后向散射统计特性做了很多研究,如光谱特性、偏振特性等^[6-10]。基于这些特性的研究,减少干涉瑞利噪声的方法主要有光源光谱展宽、偏振控制和频移^[11]。但在以往的研究中,多数是针对数字传输系统。而本文的双向传输系统针对课题的需要,则是 10 GHz 带宽的模拟双向传输系统,主要组成由 RF 信号源、CW 光源、调制器、环形器、单模光纤、偏振旋转器和光电转换器等。在此系统中,同样存在瑞利后向散射的问题。本文首先阐述瑞利后向散射的一般原理,然后分析其在本双向传输系统的特性和受反向传输光偏振旋转的影响;根据分析结论,设计偏振正交解决方案以提高系统性能。

2 单模光纤的瑞利后向散射特性

为了说明瑞利后向散射在光纤中传输的偏振状态变化,采用斯托克斯矢量表示光波的偏振态和 4 × 4 的 Mueller 矩阵计算传输过程的传输矩阵。

设光纤的快轴与慢轴的光相位差为 δ 时 Mueller 矩阵为 M_f ,则输出光的斯托克斯矢量 S_{out} 与输入光的斯托克斯矢量 S_{in} 关系为 $S_{out} = M_f S_{in}$ 。由于光纤的互易性,反向传输的 Mueller 矩阵可以表示为正向传输 Mueller 矩阵的转置矩阵 M_f^T 。

对于光的反射,光的偏振旋转状态由右手系变为左手系,设光经过反射的 Mueller 变化矩阵为 M_r ,则光经过正向光纤传输、反射和反向光纤传输后的传输矩阵为 $M_t = M_f^T \cdot M_r \cdot M_f$ 。

瑞利后向散射可以看做许多沿光纤均匀分布的反射^[6],且散射场是可加的。由此,对于许多个反

射的传输矩阵,是每个反射的传输矩阵的求和^[10]。即沿光纤的后向瑞利散射的总传输矩阵为 $M_{rbt} = \Sigma M_t$ 。由以上各公式展开计算可得到:

$$M_{rbt} = I - 2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin^2 \delta & -\sin \delta \cos \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta \cos \delta & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, I 为 4 × 4 单位矩阵。

当 δ = 0 时,光纤为没有双折射的均匀单模光纤,由式(1)可得,其传输矩阵 M_{rbt} 为:

$$M_{rbt} |_{\delta=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由此可见,后向瑞利散射的偏振状态与输入光相同,只是右手系改变。

3 双向传输系统

本文所研究系统是利用 1310 nm 红外连续光波(CW)作为载波,10 GHz 射频(RF)模拟信号调制光波,实现在同一光纤的双向传输。系统组成主要有:10 GHz RF 信号源、1310 nm 红外光源、LiNbO₃ 调制器、线性起偏器、三端环形器、单模光纤、偏振旋转器和光电转换器等。系统线路示意图如图 1 所示。

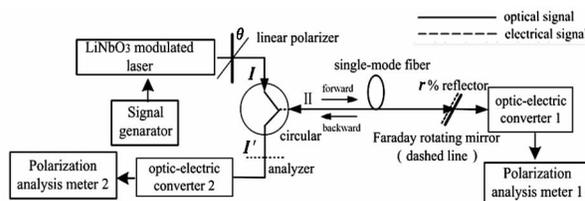


图 1 系统原理示意图

如图 1 所示,射频信号源产生的 10 GHz 射频信号和 1310 nm 光源发出的光共同作用于 LiNbO₃ 调制器,完成电光变换;调制器输出的被调制光,由线性起偏器转换为线偏振光后,经三端环形器的 I → Π 端口耦合入单模光纤,经单模光纤传输及反射镜后,透过的光由光电转换器 1 进行光电变换,从而在远端副天线得到射频信号。由反射镜反射的光再次反向耦合入单模光纤,并通过三端环形器的 Π → I' 端口输出;由光电转换器 2 进行光电转换,解调得到 RF 信号已备后续使用。

在此双向传输系统中,由于实际单模光纤的不均匀性及光纤端面、连接器端面的反射,同样存在瑞利后向散射及端面反射光与反向传输光的干扰问

题。由于光学环形器和连接器件可以选择性能较好的器件,连接器件表面的反射和光纤端面的反射可以忽略。影响该双向传输系统性能的主要因素是由瑞利后向散射与反向传输光引起的干涉噪声。

根据本系统特点和其偏振特性,采用正、反向传输光偏振正交的方法来减少干涉噪声。采用的方法是在反射镜的前面放置 45° 偏振旋转器,即当由反射镜反射的光正反两次通过偏振旋转器后,光的偏振态将旋转 90° ,实现正反向传输光偏振态的正交。由公式(2),当入射光是线偏振光时,瑞利后向散射光的偏振态与入射光(这里即正向传输光)偏振态一致;而反向传输光的偏振态已由偏振旋转器旋转 90° ,即瑞利后向散射光与反向传输光的偏振态正交。利用与瑞利后向散射光偏振态正交的检偏器偏振滤波,则可大大减小瑞利后向散射对系统的影响。

4 仿真结果和分析

理想情况下,瑞利后向散射光偏振态与入射光相同,但实际系统会受光强、偏振正交误差等一系列不完善因素的影响,使得瑞利后向散射光的偏振态发生变化。本文将利用斯托克斯矢量和邦加球对本系统后向瑞利散射特性及系统性能进行分析。

本系统主要器件参数为:光源:1310 nm DFB 激光器,线宽 10 MHz,功率 20 mW;正弦信号源:带宽 10 GHz,消光比 20 dB,插入损耗 5 dB;单模光纤:长度 10 km,损耗 0.2 dB/km,瑞利后向散射系数 $5 \times 10^{-5}/\text{km}$ 。其他器件均选用典型参数。

4.1 瑞利后向散射与光强关系

为了分析瑞利后向散射与正反向传输光强的关系,改变反射镜的反射系数进行数值模拟,可以得到关系曲线,如图 2 所示。

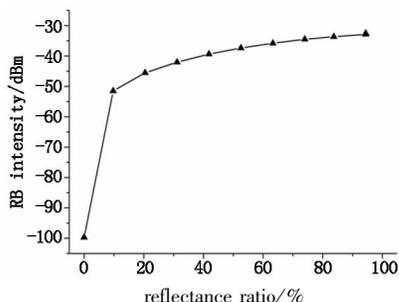


图2 反射率与正向过光纤瑞利后向散射的关系

图2中曲线表明,在正向光功率不变的情况下,在正向光纤末端瑞利后向散射与反向传输的光功率基本成线性关系。当反射率为0即反向传输光功率

为0 mW时,噪声为基底噪声;随着反射率的增加,瑞利后向散射噪声随之增加,当反射率为100%时接近 -30 dBm。

理论上,瑞利后向散射与反向传输的光无关。但当反射率增加,随着反向耦合进入光纤的光功率增大,光纤的布里渊散射、前向散射及光强对光纤特性的微弱影响等因素,都会导致总散射噪声的增加。因此,图3中的曲线有在原瑞利后向散射基底上成微弱上升的趋势。

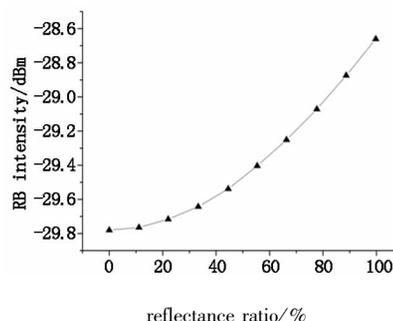


图3 反射率与反向经过光纤后的瑞利后向散射关系

由文献[1],CRN与反射传输光强 I_{rev} 及瑞利后向散射 I_{rb} 成正比例关系,即 $\text{CRN} \propto I_{\text{rev}} I_{\text{rb}}$ 。其中的任何一个增大都会增加系统的干涉瑞利噪声,因此,为了更好地研究偏振特性,固定反射率为50%。

4.2 偏振旋转对瑞利后向散射的偏振特性影响

图4相当于邦加球的赤道平面,上半图代表邦加球右半球赤道平面,下半图代表左半球赤道平面。该图表示相应偏振旋转角对应的瑞利后向散射光的偏振椭圆,可以看出,瑞利后向散射椭圆率为0,即都在邦加球的赤道上,仍为线偏振光;但偏振方位角与入射光的 0° 有所不同。从图中可以看出,反向传输光偏振态在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 的变换范围内,瑞利后向散射的最大方位变化绝对值小于 15° 。这一结果与文献[10]的结论相同。同样,反向旋转偏振态有类似的情形,如图5所示。

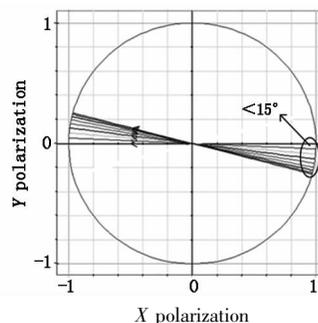


图4 反向过光纤后瑞利后向散射相应偏振态 $(0^\circ \sim 90^\circ)$

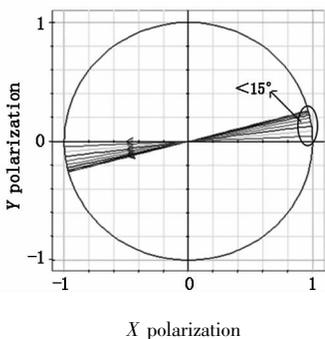


图5 反向过光纤后瑞利后向散射
相应偏振态($-90^\circ \sim 0^\circ$)

根据式(1),对于单模光纤,瑞利后向散射的偏振态应该与入射光偏振态相同。但是由于系统热噪声及光源线宽的影响,瑞利后向散射会有小角度的偏振变化^[10]。

5 系统 CRN 的优化

在反向传输光偏振旋转情况下,由于瑞利后向散射偏振变化范围不大,可以利用这一特点来减小系统的 CRN 影响,即找到反向传输光偏振与瑞利后向散射偏振接近垂直范围。

从图 6 可以看出,随着偏振旋转角度的增大,瑞利后向散射方位有 $\pm 15^\circ$ 的波动。如图 6 中虚线所示,选择合适的偏振旋转角度,可以使两者的相位差之和 φ 范围为 $80^\circ < \varphi < 100^\circ$, 即与两者正交相差 $\Delta\varphi < \pm 10^\circ$ 。同图 6 中相对应的横轴范围为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 。反向旋转偏振态有类似的情形。

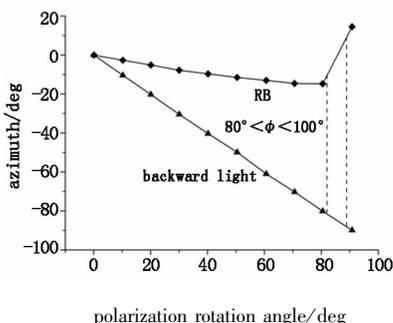


图6 偏振旋转角度与反向传输光及瑞利后向
散射偏振方位关系

由 $CRN \propto I_{rev} I_{rb}$, 则当到达光电转换器 I_{rb} 的减小时,信噪比将有很大的提高。因此,在图 1 所示系统环形器的 I' 端口处加线性检偏器,其透光轴与反向传输光的偏振方向相同,则系统瑞利干涉噪声 $CRN \propto I_{rev} I_{rb} \sin\Delta\varphi$, 即对于本系统 CRN 可减小一个数量级。

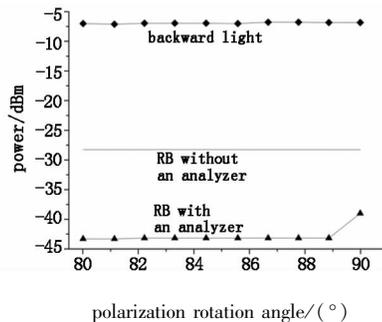


图7 偏振旋转角与反向传输及瑞利后向散射功率
(加检偏器和未加检偏器)

从图 7 可以看出,在 $80^\circ \sim 90^\circ$ 范围内旋转偏振状态,信噪比提高了近 15 倍;且加检偏器后的瑞利后向散射功率基本不变。因此,在调节偏振旋转器的偏转角度时,对于调节精度要求不高,只要在一定得范围内都可大大减小瑞利干涉噪声,提高系统性能,尤其对于微小信号检测时优点尤显突出。

6 结论

通过对模拟 RF 单光纤双向传输系统传输光的偏振态分析,得出光纤中瑞利后向散射光的偏振态与正向入射光接近,但有小的变化范围。利用瑞利后向散射光的这一特点,找到反向传输光与其接近正交的偏振旋转范围,实现偏振正交双向传输。从而,在反向光纤的输出端利用检偏器件可在很大程度上抑制干涉噪声。数值模拟结果表明,在此系统条件下,选择使反向传输光的偏振态在 $85^\circ \pm 2.5^\circ$ 变化(相对于正向传输光的 0°),可以使瑞利后向散射降低一个数量级。且对偏振旋转角的控制精度要求不高,便于实现;对于小信号系统抑制干涉噪声非常有意义。

参考文献:

- [1] Thomas H Wood, Richard A Linke, Bryon L Kasper, et al. Observation of coherent Rayleigh noise in single-source bidirectional optical fiber systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(2) :346 - 352.
- [2] Roland Karl Staubli, Peter Gysel. Crosstalk penalties due to coherent Rayleigh noise in bidirectional optical communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(3) :375 - 380.
- [3] L Provost, F Parmigiani, C Finot, et al. Analysis of a two-channel 2R all-optical regenerator based on a counter-propagating configuration [J]. Optics Express, 2008, 16(3) :2264 - 2275.

- [4] Hitoshi Obara. Bidirectional WDM transmission technique utilizing two identical sets of wavelengths for both directions over a single fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 297 – 304.
- [5] Xianming Zhu, Shiva Kumar. Effects of Rayleigh backscattering in single-source bidirectional fiber-optic system using different modulation formats for downstream and upstream transmission[J]. *Optical Fiber Technology*, 2008, 14: 185 – 195.
- [6] Peter Gysel, Roland K. Staubli. Statistical properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(4): 561 – 567.
- [7] Roland Karl Staubli, Peter Gysel. Statistical properties of single-mode fiber Rayleigh backscattered intensity and resulting detector current[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1992, 40(6): 1091 – 1097.
- [8] Peter Gysel, Roland Karl Staubli. Spectral properties of Rayleigh backscattered light from single-mode fibers caused by a modulated probe signal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1990, 8(12): 1792 – 1798.
- [9] M Oskar van Deventer. Polarization properties of Rayleigh backscattering in single-mode fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(12): 1895 – 1899.
- [10] Arthur H Hartog, Martin P Gold. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, LT-2(2): 76 – 82.
- [11] Thomas H Wood, Highlands N J. Optical fiber bidirectional transmission system[P]. United States Patent, Patent number, 1989: 4879763.
- [12] Yanbiao Liao. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [13] Jixiang Yan, Guanghui Wei. Matrix optics[M]. Beijing: The Weapon Industry Press, 1995. (in Chinese)
阎吉祥, 魏光辉. 矩阵光学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.