

光纤稳相微波频率传输中相干瑞利噪声的影响与抑制

常 乐 董 毅 孙东宁 张达敏 谢玮霖 胡卫生

(上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 利用光纤进行相位稳定的微波频率参考的远距离分配, 在深空科学研究、基础物理测量以及多基地雷达技术方面有着广泛的应用需求。研究了基于往返相位校正的光纤稳相传输理论, 建立了稳相传输的理论模型, 搭建了基于光电延迟锁相环的光纤稳相传输实验系统, 理论分析并实验研究了相干瑞利散射噪声对系统传输相位稳定性的影响。研究发现相干瑞利散射噪声不仅直接造成远端信号信噪比恶化, 并且通过锁相环路转化为系统残余相位噪声, 进一步恶化远端信号的稳定性, 成为影响稳相传输系统性能的主要因素。针对该问题, 提出了双波长的稳相传输技术, 有效地克服了相干瑞利散射噪声的影响, 实现了 10 GHz 微波频率参考、100 km 光纤稳相分发, 传输至远端的相位均方根抖动(RMS-jitter)低于 730 fs。

关键词 光通信; 微波光子学; 微波稳相传输; 延迟锁相环; 相干瑞利散射噪声

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0506004

Influence and Suppression of Coherent Rayleigh Noise in Fiber-Optic-Based Phase-Stabilized Microwave-Frequency Transmission System

Chang Le Dong Yi Sun Dongning Zhang Damin Xie Weilin Hu Weisheng

(National Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical communication Systems, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Distribution of phase-stabilized microwave frequency reference over a wide area is a key technology in a variety of applications including long-baseline interferometry for radio astronomy, fundamental physics metrology and multi-static radar system. Based on the round-trip phase correction, a theory model of phase-stabilized microwave frequency reference distribution through optical fiber with opto-electronic delay locked-loop is established. Theoretical and experimental efforts are made to investigate the influence of the coherent Rayleigh-scattering noise on the system stability. Coherent Rayleigh-scattering noise not only leads to degradation of signal-to-noise ratio, but also further degrades the stabilizing of remote signal by transforming phase locked loop into residual phase noise, which is the key factor of phase-stabilized transmission. A dual wavelength transmission technology is proposed to overcome its influence, the concept by transmitting a 10 GHz microwave frequency reference over 100 km single-mode fiber is demonstrated, and the root mean square-jitter is measured under 730 fs at the remote end.

Key words optical communication; microwave photonics; microwave frequency phase-stabilized transmission; delay locked-loop; coherent Rayleigh-scattering noise

OCIS codes 060.5625; 280.5110; 120.7000; 290.5870

1 引 言

近年来, 高稳定、低噪声以及大区域分配微波频率参考成为备受关注的研究热点, 以满足深空科学研究、基础物理测量和电子对抗等领域的应用需

求^[1~4]。受限于传输损耗, 传统的同轴传输线能够支持的传输距离有限, 如美国 Micro-coax 生产的低损耗电缆传输损耗在 0.5~2.0 dB/m, 而光纤的传输损耗仅为 0.2 dB/km, 优于同轴传输线传输损耗

收稿日期: 2011-11-17; **收到修改稿日期**: 2012-01-16

基金项目: 国家 973 计划 (2012CB315602) 和国家自然科学基金 (10778713) 资助课题。

作者简介: 常 乐 (1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光通信方面的研究。E-mail: qdmimosa@sjtu.edu.cn

导师简介: 董 毅 (1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光传输光接入及光电测量等方面的研究。

E-mail: yidong@sjtu.edu.cn (通信联系人)

3 个数量级以上,且光纤还具有抗电磁干扰、易绕曲和价格低廉等优点,因此成为大区域分配微波信号的优选介质^[1,5,6]。然而,由于外界环境(如温度、应变、振动等)变化会引起光纤传输延迟的改变,导致经光纤传输的微波信号的相位发生漂移、相位噪声增加。因此需要实时补偿光纤的传输延迟,以实现稳定的微波信号传输。

目前,补偿光纤传输延迟的主要方法是往返相位校正(RTPC)^[7]。往返校正的实施方法可归纳为两类:1) 基于光相干混频鉴相,称为相干校正;2) 基于微波混频鉴相,称为非相干校正。相干校正的基本思路是在光域内返回信号与本地信号相干混频,利用获得的相位误差反馈补偿光纤延迟^[8]。相干校正的优点是可以获得光波长量级的长度校准精度;缺点是锁相范围有限,要求传输系统稳定性高,此外可支持的传输距离受限于激光的相干长度^[9]。非相干校正通过直接测量调制在光载波上的微波信号的相位变化,获得相位差信息,其优点是锁相范围大,对系统稳定性要求低,可支持的传输距离不受激光相干长度限制;缺点是校准精度限于微波波长量

级^[10]。根据应用需求,通常在超高频毫米波频率参考的稳相传输中采用相干校正方式,而在频率较低的微波信号的稳相传输中采用非相干校正。实际应用中,要求稳相传输后信号相位抖动小于信号周期的1%。

本文采用基于光电延迟锁相环的非相干往返校正方式^[11],实现 10 GHz 微波频率参考信号的光纤稳相传输。研究了瑞利散射对传输系统的影响,通过采用双波长传输技术,克服了瑞利散射的影响,实现了 10 GHz 微波参考信号的 100 km 稳相传输,传输后相位均方根抖动(RMS-jitter)低于 730 fs。

2 往返相位校正理论

如果忽略传输介质的非线性和非互易性^[12],在同一段光纤链路中相向传输的光信号是相互独立的,经历了相同的相位扰动。如果将传输到远端的信号沿原光路返回,返回信号将经历两倍的相位扰动,因此返回信号可以表征传输信号在单程传输中的相位变化,如图 1 所示。

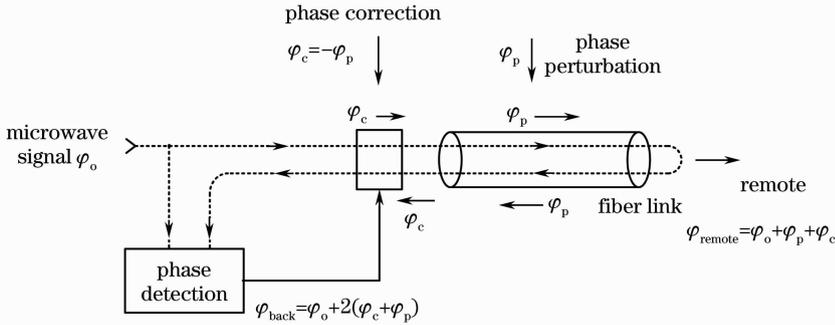


图 1 往返相位校正原理图

Fig. 1 Schematic diagram of RTPC

假设微波信号初始相位为 φ_0 , 相位补偿器的相位延迟为 φ_c , 传输光纤链路引入的相位扰动为 φ_p , 则传输到远端的微波信号的相位 φ_{remote} , 可表示为

$$\varphi_{\text{remote}} = \varphi_0 + \varphi_c + \varphi_p, \quad (1)$$

将该信号经同一光纤链路返回至本地, 信号将再次经历相同的相位变化, 返回信号的相位 φ_{back} 可表示为

$$\varphi_{\text{back}} = \varphi_0 + 2(\varphi_c + \varphi_p), \quad (2)$$

通过测量返回信号和初始信号的相位差, 并反馈调整相位补偿器的相位延迟, 使 $\varphi_0 = \varphi_{\text{back}}$, 有

$$\varphi_c + \varphi_p = 0, \quad (3)$$

此时, 远端微波信号的相位 $\varphi_{\text{remote}} = \varphi_0$, 与本地的微波信号相位保持一致, 即传输系统的传输相位是稳

定的, 故称为稳相传输。基于上述思路的稳相技术, 称为往返相位校正。

RTPC 的基本假设是同一段光纤链路中相向传输的光信号经历了相同的相位扰动, 但是, 返回光信号的瑞利后向散射^[13~15]将与前向光信号发生相干, 产生附加噪声, 称为相干瑞利噪声(CRN)。

相干瑞利噪声是分布式存在于整个光纤链路中, 为研究方便, 可将其近似为光纤中某等效位置的单点反射。由此导致的接收信号幅度噪声, 可表示为^[16]

$$\langle \delta_{\text{CRN}}^2(f) \rangle = \frac{R^2 P_{\text{ray}} P_{\text{return}}}{8\pi} \frac{\Delta f}{f^2 + \Delta f^2}, \quad (4)$$

式中 f 为噪声频率, R 为光电检测的响应度, P_{ray} 和

P_{return} 分别为进入光电检测的瑞利散射光功率和信号光功率, Δf 为激光器的线宽。

相干瑞利散射从两方面影响系统的性能: 1) 在远端信号上叠加幅度噪声, 导致远端信号信噪比恶化; 2) 返回信号携带的相干瑞利散射噪声, 通过锁相环路转换为光纤延迟补偿误差, 导致远端信号的相位抖动增加。随着传输距离的增长, 为保证信号的信噪比, 必须提高传输光功率, 此时, 相干瑞利噪声的影响更加显著, 其成为影响传输相位稳定的重要因素, 必须予以重视。

3 实验系统与结果分析

本实验基于文献[11]中提出的光电延迟锁相环稳相传输技术, 与文献[11]的不同之处主要体现在光纤传输链路和远端结构。

图 2 为远端采用法拉第反射镜(FRM)的单波长稳相传输系统结构图。10 GHz 的微波信号经过功分器分为两路, 一路作为参考信号与返回信号进行光电混频; 另一路经过电延迟线和窄带低噪声微波放大器(频率范围为 9~10 GHz、噪声系数为 1.7 dB)驱动后, 对光载波进行强度调制。光载波是波长为 1553 nm、线宽 10 kHz、相对强度噪声为 -150 dB/Hz(典型值)的窄线宽、低噪声激光。此时本地信号可表征为

$$E_{\text{local}}(t) = \cos[\omega_{\text{RF}}(t - t_0 - \tau)], \quad (5)$$

调制光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后, 经光环形器(OC1)和 100 km 光纤传输链路送到远端。若光纤引入的相位抖动为 φ_p , 则远端信号为

$$E_{\text{remote}}(t) = \cos[\omega(t - t_0 - \tau) + \varphi_p], \quad (6)$$

到达远端的光信号经光环形器(OC2)、光放大器放大和光滤波器滤除 EDFA 的自发辐射噪声(ASE)后, 由 10:90 的光耦合器分为两路, 10% 的光信号由高速光电检测器转换为微波信号; 90% 的光信号经光环形器(OC3)后, 被 FRM 反射, 反射光信号经光环形器 OC2 导入原光纤, 回传至本地。忽略传输介质的非线性和非互易性, 返回至本地的信号将经历相同的相位扰动, 表示为

$$E_{\text{return}} = \cos[\omega_{\text{RF}}(t - t_0 - \tau) + 2\varphi_p], \quad (7)$$

返回至本地的光信号, 经光环形器 OC1 分离和 EDFA 放大后, 送入光电混频单元。光电外差混频驱动信号为

$$E_{\text{drive}}(t) = \cos[\omega_{\text{RF}}(t - t_0 + \tau) + \omega_{\text{IF}}t], \quad (8)$$

通过光电器件的外差混频, 滤除高频项, 可以获得承载相位抖动信息的中频信号, 可表示为

$$E_{\text{IF_receive}}(t) = \cos[\omega_{\text{IF}}t + 2(\omega_{\text{RF}}\tau - \varphi_p)], \quad (9)$$

通过与中频参考信号进行鉴相, 可以获得环路相位抖动信息:

$$E_{\text{error}}(t) = \cos 2(\omega_{\text{RF}}\tau - \varphi_p), \quad (10)$$

通过环路滤波, 反馈调整微波延迟线, 完成系统传输延时的校正, 实现微波信号的稳相传输。

图 2 系统中的 EDFA 用于提高传输和接收的光功率, 以获得信噪比足够高的远端信号及返回信号。然而, 随着传输光功率的增加, 相干瑞利噪声随之严重, 接收信号的信噪比和抖动恶化。图 3 为在入纤光功率为 1 dBm 时的远端信号和返回信号, 信号上的噪声及抖动明显可见。

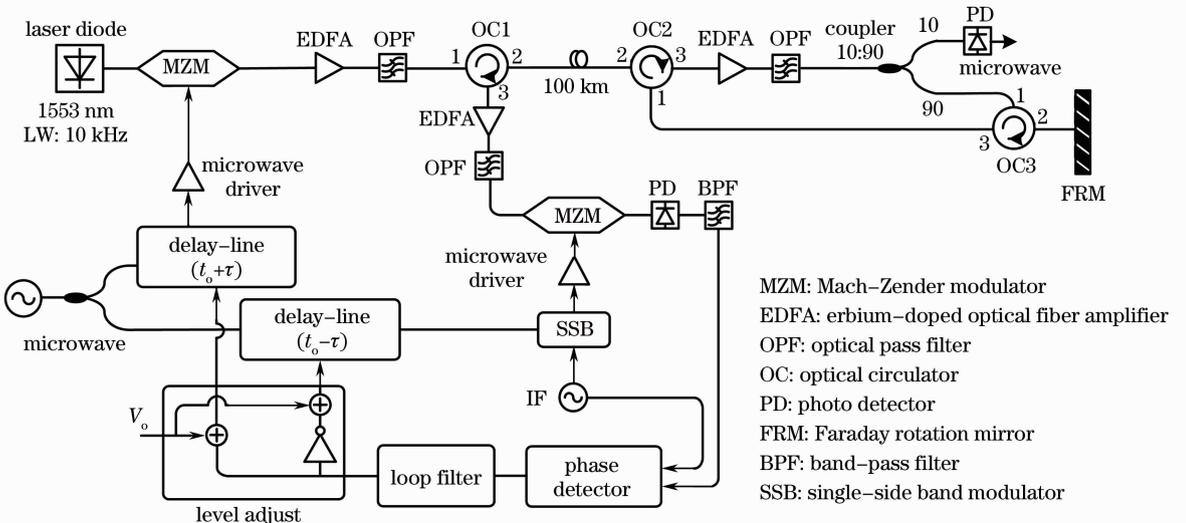


图 2 基于法拉第反射镜(FRM)的单波长稳相微波频率传输系统结构图

Fig. 2 Schematic of single-wavelength phase-stabilized microwave-frequency transmission system using FRM

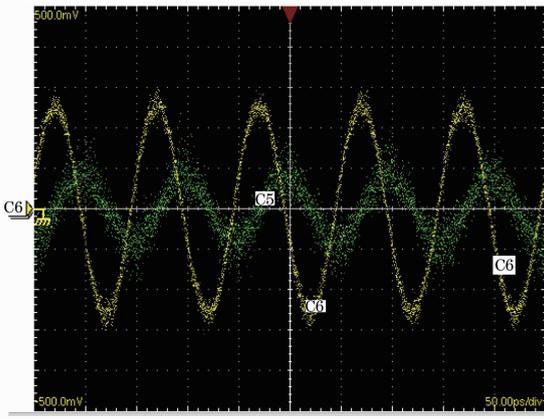


图 3 相干瑞利散射噪声导致的远端信号(C6)和返回信号(C5)的幅度噪声与抖动

Fig. 3 Amplitude noise and jitter of remote signal (C6) and returned signal (C5) due to coherent Rayleigh noise

图 4 为实验测得的远端信号的幅度噪声与抖动随入纤光功率的变化情况。测试结果表明,随着入纤功率的增加,相干瑞利散射噪声的影响愈加严重,远端信号的幅度噪声和抖动随之增加。当入纤功率超过 1 dBm 后,远端信号的抖动大于 1 ps,超过了信号周期的 1%。利用双波长传输方式,返回信号(以及前向光信号)的瑞利后向散射和前向光信号(以及返回信号)相干产生的噪声落在接收机的带宽之外,使相干瑞利散射噪声的影响得到抑制。因此,采用双波长传输结构可以有效抑制相干瑞利散射噪声。

基于双波长的稳相传输系统结构图如图 5 所

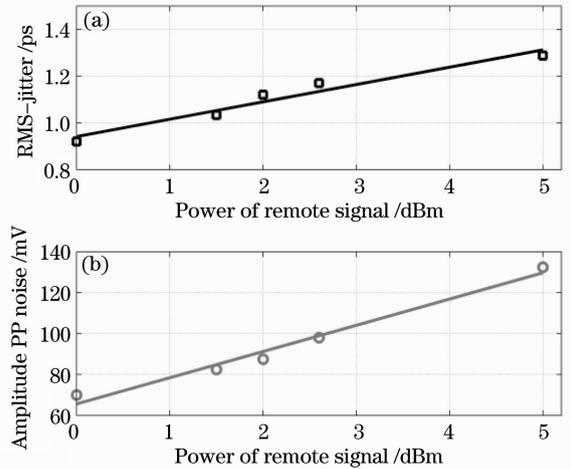


图 4 相干瑞利散射噪声对远端信号的影响
Fig. 4 Influence of coherent Rayleigh noise on remote signal

示,与图 2 的不同之处主要体现在远端结构。经光纤传输到达远端的光信号,经环形器后,送入光电探测器转换为微波信号,再经频率范围为 9~10 GHz、噪声系数为 1.7 dB 的窄带、低噪声微波放大器放大后,分为两路,其中一路作为信号输出,另一路驱动马赫-曾德尔调制器,将远端的微波信号再次调制到另一中心波长为 1550 nm、线宽 10 kHz、相对强度噪声为 -150 dB/Hz(典型值)的窄线宽激光上,并经过环形器回传到本地,进行鉴相和锁相控制。本实验中,往返光载波的光波长分别为 1553 nm 和 1550 nm,入纤功率均为 5 dBm,在本地和远端接收端均采用 EDFA 增强接收光功率,以获得足够高的信噪比。

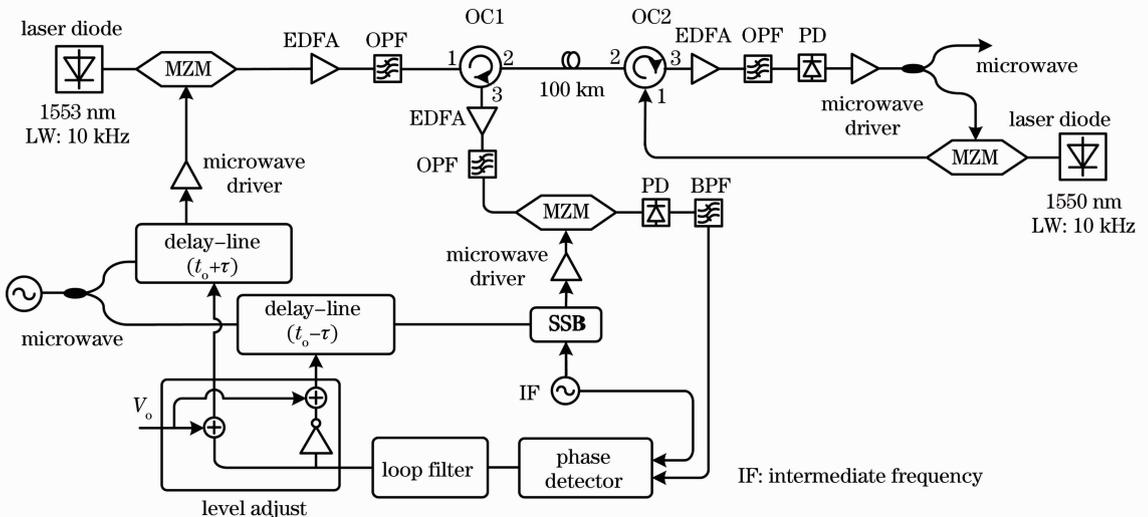


图 5 基于双波长的稳相传输系统结构图

Fig. 5 Schematic of dual-wavelength phase-stabilized microwave-frequency transmission system

图 6 为测得的远端和返回本地端的微波信号，与图 3 结果比较，信号的信噪比和抖动有明显改善，瑞利散射噪声得到有效抑制，从而保证了系统传输相位的稳定。

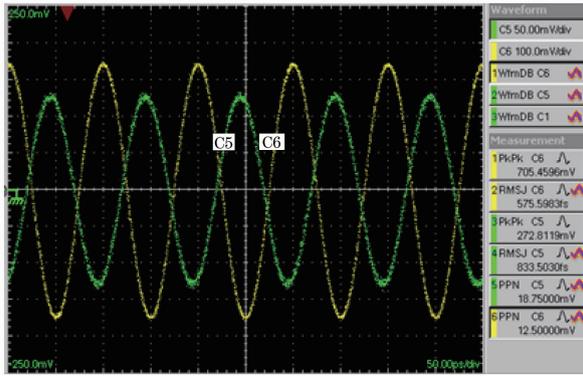


图 6 双波长稳相传输系统中远端信号(C6)和返回信号(C5)

Fig. 6 Remote signal (C6) and returned signal (C5) in dual-wavelength phase-stabilized microwave-frequency transmission system

图 7 为直接传输在本地端直接接收，经 100 km 光纤传输后相位校正(闭环)和未经相位校正(开环)的情况下，测得的单波长和双波长两种稳相结构中信号相位抖动随时间的变化。实验结果表明：采用光电延迟锁相技术可以有效地稳定光纤的传输延迟，实现 10 GHz 微波信号的 100 km 稳相传输。然而，随着传输距离的增加，传输链路的损耗增加，要求更高的传输光功率以获得足够高的信噪比，随之带来的相干瑞利散射噪声的影响愈加明显，导致单波长系统难以获得抖动小于信号周期 1%(1 ps)的传输，而采用双波长的系统可有效克服相干瑞利散射问题，从而获得抖动小于 1 ps(0.726 ps)的稳相

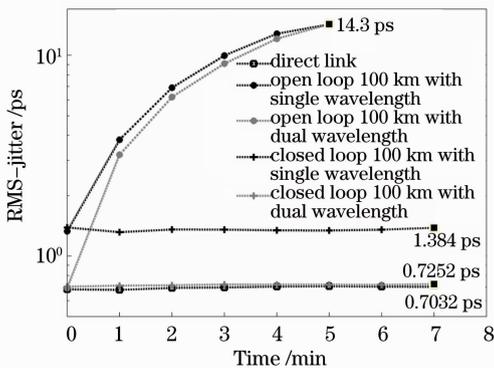


图 7 两种实验条件下，往返校正系统性能比较

Fig. 7 Performance comparison RTPC system under two experimental conditions

传输，远端信号的相位均方根抖动基本可以和直接传输本地端直接接收的效果一致。

4 结 论

研究了基于光电延迟锁相的微波信号长距离光纤稳相传输技术，分析了相干瑞利散射噪声对系统稳相性能的影响。分析表明，在长距离稳相传输中，由于需要较高的传输光功率，以获得足够高的信噪比，相干瑞利散射噪声成为影响系统相位稳定性的重要因素。针对这个问题提出了双波长的稳相传输技术，有效克服了相干瑞利散射噪声的影响，实现了 10 GHz 信号、100 km 的光纤稳相传输，传输后信号的均方根相位抖动为 726 fs，小于信号周期的 1%。研究结果表明，采用光电延迟锁相和双波长技术，可以有效稳定光纤的传输延迟、抑制光纤的相干瑞利散射噪声，这是一种可行的、有效的稳相传输技术。

参 考 文 献

- 1 Jun Ye, Jinlong Peng, R. J. Jones *et al.*. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(7): 1459~1467
- 2 F. Narbonneau, M. Lours, S. Bize *et al.*. High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2006, **77**(6): 0647010
- 3 S. Foreman, K. Holman, D. Hudson *et al.*. Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks [J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 2007, **78**(2): 021101
- 4 Dong Ze, Cao Zizheng, Chen Lin *et al.*. Experimental research on a radio-over-fiber system based on 60 GHz millimeter-wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1018~1021
董泽, 曹子铮, 陈林等. 基于 60 GHz 光毫米波的光纤无线传输系统实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1018~1021
- 5 M. Musha, Y. Sato, K. Nakagawa *et al.*. Robust and precise length stabilization of a 25-km long optical fiber using an optical interferometric method with a digital phase-frequency discriminator[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **82**(4): 555~559
- 6 G. Marra, S. Helen, N. Stephen *et al.*. High-stability microwave frequency transfer by propagation of an optical frequency comb over 50 km of optical fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 1025~1027
- 7 G. Lutes. Reference frequency distribution over optical fibers: a progress report [C]. in 41st Annual Symposium on Frequency Control, 1987, 161~166
- 8 Man Xiaojing, Zhang Lumin, Dong Yi *et al.*. Phase stabilized distribution of millimeter wave local oscillator based on Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2185~2188
满晓晶, 章璐敏, 董毅等. 基于迈克尔孙干涉的毫米波本振信号相位稳定传送[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2185~2188
- 9 R. Wilcox, J. Byrd, L. Doolittle *et al.*. Stable transmission of radio frequency signals on fiber links using interferometric delay sensing[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(20): 3050~3052
- 10 M. Fujieda, M. Kumagai, T. Gotoh *et al.*. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions*, 2009,

- 58(4): 1223~1228
- 11 Lumin Zhang, Le Chang, Yi Dong *et al.*. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 873~875
- 12 L. Ma, P. Jungner, J. Ye *et al.*. Delivering the same optical frequency at two places; accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1777~1779
- 13 Nakazawa, Masataka. Rayleigh backscattering theory for single-mode optical fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1983, **73**(9): 1175~1180
- 14 Jiang Wenning, Chen Jianping, Chen Yingli *et al.*. 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, 陈英礼等. 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
- 15 Zhang Wei, Peng Jiande, Liu Xiaoming *et al.*. Impact of Rayleigh backscattering on noise characteristics of distributed fiber Raman amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(2): 143~148
张 巍, 彭江得, 刘小明等. 光纤中的瑞利后向散射对分布式光纤拉曼放大器噪声特性的影响[J]. *中国激光*, 2002, **29**(2): 143~148
- 16 T. Wood, R. Linke, B. Kasper *et al.*. Observation of coherent Rayleigh noise in single-source bidirectional optical fiber systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(2): 346~352

栏目编辑: 谢 婧