

文章编号: 0253-2239(2010)08-2185-04

基于迈克耳孙干涉的毫米波本振信号相位稳定传送

满晓晶 章璐敏 董毅 何浩 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 提出了一种毫米波本振信号的相位稳定传送技术。采用迈克耳孙干涉原理,将传输过程中的信号相位扰动信息调制在信号臂上,通过反射部分信号臂信号,并与参考臂信号干涉拍频,获得传输过程中的相位扰动信息,从而反馈控制光纤延时器,对系统进行相位校正。在建立传送系统的理论模型和实验系统的基础上,实验测试了本振信号的相位漂移与光纤长度漂移及干涉拍频输出信号之间的关系,理论和实验结果取得了一致。研究结果表明,这一本振信号传送方案的可行性。

关键词 相干光学;毫米波本振传送;迈克耳孙干涉;相位校准

中图分类号 TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2185

Phase Stabilized Distribution of Millimeter Wave Local Oscillator Based on Michelson Interferometer

Man Xiaojing Zhang Lumin Dong Yi He Hao Hu Weisheng

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Network, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract A system of phase stabilized distribution of millimeter wave local oscillator is proposed, which is based on the principle of Michelson interferometer. In the system, the signal phase drift during transition is modulated on the reflected optical signal, which is later coherent heterodyne with reference signal to control the fiber stretcher. Then system phase can be corrected and the phase of output millimeter wave can keep stable. Based on the theoretical model and experimental system, the relationship of phase drift of local oscillator, the length drift of optical fiber and coherent heterodyne output signal are measured. The experimental results agree with the theoretical model, which indicates that the proposed system is feasible.

Key words coherence optics; millimeter wave local oscillator distribution; Michelson interferometer; phase correction

1 引言

干涉天线阵以其独有的优越性逐渐成为现代深空探测的支撑技术。21 世纪以来,欧美日等国纷纷启动了一系列深空探测天线阵的计划^[1]。干涉天线阵的关键技术之一是从中心站给各个天线单元分配相干的低相位噪声、低相位漂移的毫米波本振信号,以便将各个天线外差接收的信号进行相干合成。随着天线阵可操作频率和规模的增加,毫米波本振信

号的产生及分配将面临着很大的技术挑战。目前大量文献报道了有关本振信号产生技术研究的内容,并在此技术上逐渐趋于成熟^[2~7],然而本振信号的分配方面仍有诸多问题有待解决。从光纤的传输损耗、带宽以及抗电磁干扰特性方面看,光纤是传送毫米波本振信号的理想介质,但是环境温度、压力以及微弯均会导致光纤折射率变化,最终积累的传输延迟变化会直接导致本振信号的相位噪声和相位漂

收稿日期: 2009-11-02; 收到修改稿日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(10778713)资助课题。

作者简介: 满晓晶(1984—),女,硕士研究生,主要从事光通信方面的研究。E-mail: manxiaojing@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)

移,所以必须采取措施对光纤长度进行校准,以实现本振信号的相位稳定传送^[8~10]。

本振信号光纤传送链路的长度校准均是基于这样一个思路:在不考虑光纤非互易性的情况下,同一光纤中相向传输的信号互相之间是独立的、经历的相位扰动也是一致的。因此,如果将传输到远端的受到相位扰动的信号反射回发送端,发送端接收到的返回信号将经历两倍的相位扰动,通过比较返回信号与原始信号的相位差,即可测得光纤的相位扰动。利用该信号反馈控制光纤的延迟即可实现光纤的长度校准,而实现这一思路的方法可归纳为非相干方式和相干方式两种。

非相干方式是通过测量返回微波信号的相位变化(该微波信号预先调制在光载波上),获得光纤传输相位变化的信息,用以反馈控制光纤相位,实现长度校准。其相位稳定的精度取决于使用的微波频率^[11~14]。但是,当本振频率高达毫米波,就要求更高的相位稳定性,如 ALMA 计划中要求 119 GHz 本振信号的相位变化小于 0.09° 。因此,非相干方式的长度校准措施不能满足这一要求,必须采用更

高精度的校准措施,即相干长度校准技术。与非相干方式不同,相干式校准的相位检测是直接光域进行的,由于光波频率非常高(在 1550 nm 波段,达到 170 THz 左右)因此可以获得波长量级的长度校准精度,从而满足毫米波及次毫米波本振信号的传送。

本文将探讨相干方式的毫米波本振信号传送结构及其相位校准原理。

2 本振信号传送原理

基于迈克尔孙干涉的毫米波本振信号传送结构如图 1 所示。在本方案中,通过光强度调制生成毫米波本振信号,分布反馈式(DFB)半导体激光器输出的线宽约 10 kHz 的连续光波,经 20 GHz 微波信号通过载波抑制调制方式,生成光强度变化频率为 40 GHz(2 倍驱动信号频率)的载波抑制(CS)光信号,该信号通过光电检测器拍频即可生成 40 GHz 的本振信号。

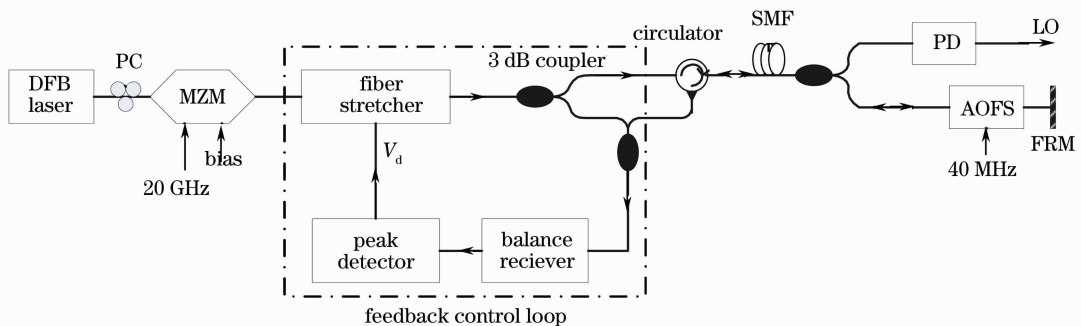


图 1 基于迈克尔孙干涉的毫米波本振信号传送系统结构图

Fig. 1 Experimental setup of distribution of millimeter wave local oscillator based on Michelson interferometer

调制输出的光信号经过光纤延时器后,被 3 dB 保偏耦合器分为两路。其中一路直接作为干涉仪的参考臂;另一路由环形器、约 800 m 的标准单模光纤(SMF)、声光频移器(AOFS)和法拉第旋光镜(FRM)组成,作为干涉仪的信号臂。

信号臂上的部分光信号用于生成本振光信号(LO),表示为

$$E_{LO}(t) = A \exp \left\{ j \left[\left(\omega_c - \frac{\omega_{RF}}{2} \right) \left(t - \tau + \frac{n}{c} \delta L \right) + \varphi_0 \right] \right\} + A \exp \left\{ j \left[\left(\omega_c + \frac{\omega_{RF}}{2} \right) \left(t - \tau + \frac{n}{c} \delta L \right) + \varphi_0 \right] \right\}, \quad (1)$$

式中光载波强度、频率以及初始相位分别为 A, ω_c, φ_0 ; ω_{RF} 是毫米波本振频率; c 是光速, n 是光纤折射

率, δL 用来表示传输光纤的长度扰动(此处,忽略了光纤的固定延迟); τ 是光纤延时器产生的时延,由输入控制电压 V_d 线性控制。

该信号经高速光电检测器 PD 检测,其交流(AC)输出信号为

$$i_{AC} = 2RA^2 \cos \left[\omega_{RF} t + \omega_{RF} \left(\frac{n}{c} \delta L - \tau \right) \right]. \quad (2)$$

式中 R 是光电检测器增益系数。由此可见,输出微波信号的相位稳定条件为

$$\tau = \frac{n}{c} \delta L. \quad (3)$$

因此传输光纤的长度扰动 δL 可以通过光纤延时器的延时 τ 来补偿。若光纤延时器产生零延迟,则毫米波本振输出的相位漂移为

$$\delta\varphi = \omega_{\text{RF}} \frac{n}{c} \delta L. \quad (4)$$

信号光由法拉第旋光镜返回(FRM 以与原旋进方向相反的偏振态反射信号,从而消除干涉仪的偏振敏感性^[15]),两次经过由 40 MHz 信号驱动的声光频移器,因此返回信号的总频移量为 80 MHz。返回的信号光与参考光在保偏光纤耦合器中合波后进入偏振无关的平衡接收模块进行干涉拍频,其中低频分量的输出信号为

$$i_s = 2RA^2 \cos\left(\omega_{\text{RF}} \frac{n}{c} \delta L\right) \times \cos\left[2\omega_a t - 2\omega_a \tau + (\omega_c + 2\omega_a) \cdot 2 \frac{n}{c} \delta L\right], \quad (5)$$

式中 ω_a 为 AOFS 的单程频移。

由上述结果,可得出如下具有重要意义的结论:

1) 传输光纤的传输延迟变化不仅改变干涉信号的相位,而且改变干涉信号的幅度。因此,可以通过相位检测或幅度检测获取光纤延迟的变化,利用该信号反馈控制微波移相器,从而实现相位稳定的微波信号输出;

2) 采用相位检测方式具有非常高的灵敏度,如对波长为 1550 nm 的光信号,1 mm 光纤长度的变化将导致信号相位变化高达约 3.6×10^4 rad。高的敏感度将导致测量范围很小,系统稳定性很难保证;

3) 幅度检测方法的敏感度大大低于相位检测,小的敏感度有利于系统的稳定性和增大测量范围。

因此研究将通过在参考臂上添加光移相器的方法实现相位偏置的幅度检测。

图 2 是光纤相位漂移与干涉拍频信号峰值关系的理论曲线。将控制信号检测模块的输出信号送入光纤延时器,即可以对毫米波信号的相位进行调节。使传输后的毫米波本振信号的相位获得稳定。

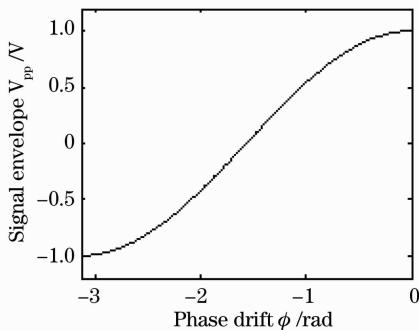


图 2 毫米波相位漂移与干涉拍频信号包络关系的理论曲线

Fig. 2 Theoretical curve of the relationship of signal phase drift and the envelope of coherent heterodyne signal

3 实验结果及分析

实验结构如图 1 所示。其中所用光纤延时器的允许输入电压 V_d 在 0~4.7 V 之间。

实验对该结构进行开路工作曲线测量,即测量输出端毫米波本振信号的相移与相干检测得到的相位扰动信息之间的关系,其中毫米波本振信号的相移是通过给光纤延时器施加可调稳压源来控制的。

光纤延时器的性能是光纤相位校准的关键。在本实验系统中,测得光纤延时器的工作曲线如图 3 所示。其中横坐标是光纤延时器的控制输入电压,纵坐标是输出端毫米波本振信号的相移。可见光纤延时器的工作曲线是线性的,相移范围覆盖 $0 \sim \pi$,因此系统可以利用光纤延时器的特性来补偿 $0 \sim \pi$ 的相位扰动。

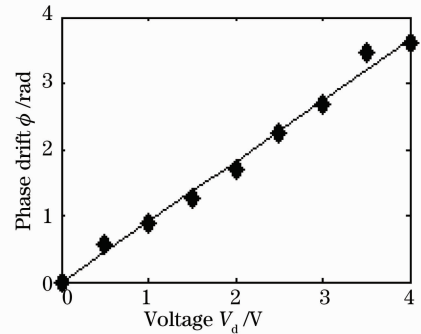


图 3 实测光纤延时器工作曲线

Fig. 3 Measured fiber stretcher working curve

干涉拍频输出信号的幅度携带相位扰动信息,图 4 是光纤延时器控制电压与干涉拍频输出信号峰峰值的关系。图中信号峰峰值随延时器的控制电压呈现正弦函数的变换关系,这与(5)式保持一致。图 5 是毫米波相移与干涉拍频信号峰峰值之间的关系。图 4,5 本质上给出了通过干涉原理拍频得到的相位扰动信号与本振输出端信号的相位变化之间的关系,这一关系与第 2 节的图 2 中理论曲线完全一

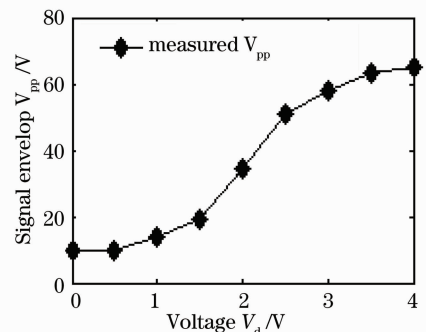


图 4 干涉拍频信号峰峰值曲线

Fig. 4 Peak value of coherent heterodyne signal

致,验证了该方案的可行性,即可以通过光纤延时器对毫米波信号的相位进行调节,从而使输出的毫米波本振信号相位获得稳定。

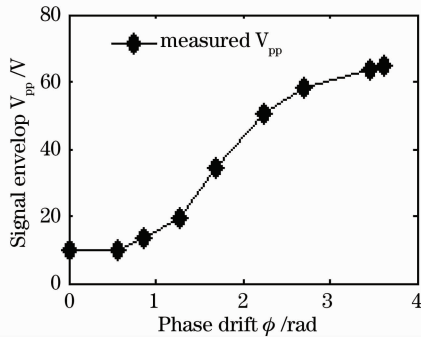


图 5 实测毫米波相移与干涉拍频信号包络的曲线关系

Fig. 5 Relationship of measured phase drift and the envelop of coherent heterodyne signal

该系统相位调节能力主要受制于光纤延时器的最大响应频率。在光纤延时器的响应频率范围内,光纤延时器的调节速度可以跟踪并及时补偿远距离的相位波动,图 6 可以很好地验证这一点。干涉拍频信号的包络跟随光纤延时器的控制输入电压而周期变化,无论在控制电压的上升阶段还是下降阶段,毫米波本振信号的相位变化都会及时反应在干涉拍频输出信号的包络上。因此利用信号光和参考光干涉得到的相位扰动信息进行光纤长度校准的方案是可行的。

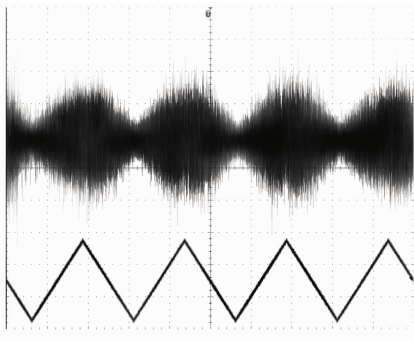


图 6 三角波电压控制下干涉拍频信号

Fig. 6 Output coherent heterodyne signal when the fiber stretcher is controlled by triangular wave voltage

4 结 论

针对迈克耳孙干涉的毫米波本振信号相位稳定传送方案进行了理论和实验研究,测试了光纤长度漂移、本振信号相位漂移与干涉拍频信号之间的关系曲线。通过控制可调光纤延时器,测得毫米波本振信号的相位变化与干涉拍频输出信号的包络关系,从而证实了这一方案的可行性。为最终通过拍

频信号反馈控制光纤延时器,实现毫米波本振信号的稳定传送提供了条件。

参 考 文 献

- 1 A. Wootten. The Atacama Large Millimeter Array (ALMA) [C]. *SPIE*, 2003, **4837**: 110~118
- 2 J. Payne, B. Shillue, A. Vaccari. Photonic techniques for use on the atacama large millimeter array [C]. *Proc. IEEE MWP*, 1999, 105~108
- 3 J. Payne, B. Shillue. Photonic techniques for local oscillator generation and distribution in millimeter-wave radio astronomy [C]. *Proc. IEEE MWP*, 2002, 9~12
- 4 Pengbo Shen, Phillip A. Davies, W. P. Shillue *et al.*. Millimetre wave generation using an optical comb generator with optical phase-locked loops [C]. *Proc. IEEE MWP*, 2002, 101~104
- 5 Wen Hong, Chen Lin, Pi Yazhi *et al.*. Full-duplex radio-over-fiber system with optical millimeter-wave generation utilizing optical phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 935~939
- 文 鸿, 陈 林, 皮雅稚等. 基于相位调制器产生光毫米波的全双工光纤无线通信系统 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(7): 935~939
- 6 Huang Cheng, Chen Lin, Yu Jianjun *et al.*. Millimeter-wave generation utilizing one phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 73~76
- 黄 诚, 陈 林, 余建军等. 采用单个相位调制器产生毫米波 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 73~76
- 7 Lu Jianmo, Wang Weinan, Li Yanhe *et al.*. Modelling of fiber radio link using Mach-Zehnder modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 159~165
- 路建模, 王伟南, 李艳和等. 应用马赫-曾德尔调制器的光微波链 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 159~165
- 8 Bill Shillue. High-frequency local oscillator transmission for the atacama large millimeter array (ALMA) [C]. *Digest of the LEOS Summer Topical Meetings (IEEE)*, 2005, 119~120
- 9 B. Shillue, S. AlBanna, L. D'Addario. Transmission of low phase noise, low phase drift millimeter-wavelength references by a stabilized fiber distribution system [C]. *IEEE MWP*, 2004, 201~204
- 10 B. Shillue. ALMA LO Distribution Round Trip Phase Correction. ALMA Memo JHJ443, <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma443/memo443.pdf>
- 11 K. Sato, T. Hara, S. Kuji *et al.*. Development of an ultrastable fiber optic frequency distribution system using an optical delay control module [J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(1): 19~24
- 12 M. Calhoun, R. Sydnor, W. Diener. A stabilized 100-Megahertz and 1-gigahertz reference frequency distribution for cassini radio science [C]. *The Interplanetary Network Progress Report*, 2002, 42~148
- 13 Longsheng Ma. 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
- 14 L. D'Addario, M. Stennes. Transmission of timing references to sub-picosecond precision over optical fiber [C]. *SPIE*, 1998, **3357**: 691~701
- 15 L. A. Ferreira, J. L. Santos, F. Farahi. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6399~6402