

光学学报

面向天线组阵的光载微波光纤稳定传输技术

董毅^{1,2*}, 魏伟^{1,2**}, 王喜^{1,2}, 谢玮霖^{1,2}, 谈仲纬^{1,2}, 薄天外^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081;

²北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江 嘉兴 314011

摘要 光载微波光纤稳定传输技术解决了天线组阵中所需的延时(或相位)稳定的微波信号远距离分配难题,在多天线协同的新一代微波测量中具有不可替代的作用。本文介绍了光载微波光纤稳定传输的基本理论,分析了制约传输稳定性的关键因素,并展示了基于相位预补偿和基于光延时校正的提高传输稳定性的技术途径。通过光电双外差混频的相位检测高灵敏地感知光纤链路延时变化,并分别利用微波相位调控和光延时调控来对这一变化进行高精度的补偿,最终实现了多路时间抖动在数十 fs 量级的高稳定光载微波传输,为天线组阵等多天线协同微波测量中的信号级同步提供了有效的解决方案。

关键词 光纤光学; 天线组阵; 光载微波; 微波光子; 光纤传输

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230730

1 引言

天线孔径是限制微波探测灵敏度、分辨率以及作用距离的关键因素。长期以来,增大天线孔径是提升微波探测能力的重要途径,一系列超大孔径天线应运而生。典型的大孔径天线有射电天文领域的阿雷西博望远镜(孔径为 350 m)、FAST(孔径为 500 m,又称“中国天眼”),以及雷达领域的美国 AN/FPS-132“铺路爪”远程预警雷达、Haystack 宽带成像雷达、GBR-P 陆基以及 SBX 海基反导雷达等,其面阵直径均达到数十米。然而,天线孔径的增加不仅限制了系统的机动性和灵活性,而且工艺需求更加严苛,造成工作频率受限和造价高昂。通过增大天线孔径来提升性能途径已难以以为继^[1],亟待寻求新型的微波探测技术。

天线组阵成为突破单天线系统发展困境的有效途径之一。天线组阵利用多个天线信号进行时间和相位同步的相参合成(也称“信号级相参合成”)来提升探测系统的灵敏度及发射功率。理想情况下, N 部天线的收发信号全部相参合成后,可获得 N^2 的信噪比增益。分辨率则由天线阵列的最长基线(最远天线间距)决定。天线组阵等效形成了一个超大孔径探测系统,由此突破了单天线探测的孔径限制问题^[2]。

天线组阵技术首先在深空观测领域得到成功应用。1995年,欧美发达国家和日本等联合启动了 ALMA(Atacama Large Millimeter Array)计划^[3-4],采

用天线组阵技术对智利阿塔卡马高原上的 54 台孔径为 12 m 和 12 台孔径为 7 m 的单天线进行合成,阵列的最长基线为 18 km,观测频段覆盖 31.3 GHz 至 950 GHz。ALMA 计划实现了观测灵敏度和分辨率的数百倍提升,成为当今世界观测能力最强的毫米波深空观测装置,被誉为毫米波探测能力的里程碑。自 ALMA 建造以来,天文领域的一系列重大突破和创新发现诞生于这一科学装置。ALMA 不仅验证了天线组阵的能力,而且证明了光载微波光纤稳定传输技术在解决天线同步方面具有不可替代性。ALMA 的成功迅速推动了雷达领域天线组阵技术(即分布式相参雷达)的发展。21 世纪以来,中国和欧美国家纷纷开展分布式相参雷达技术的研究^[5-6]。光载微波光纤稳定传输技术得到进一步广泛深入的研究,成为微波光子领域的热点课题。

天线组阵中的光载微波光纤传输技术就是为各个天线分配高度同步的时间基准和频率参考,各个天线以该时频基准为参考,进行信号发射和接收处理,主要难题体现在两方面:其一,极高的同步精度需求^[7]。同步需求与相参合成的信号频率直接相关,一般要求同步误差小于信号中最高频信号相位的 5%。当信号的频率超过 50 GHz 时,时间同步精度需求将达到 fs 量级。其二,光纤传输延时不稳定^[8]。光纤的折射率和长度受温度、振动等环境因素的影响,其传输延时不稳定,从而降低了经光纤传输至各天线的时频基准的稳

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-05-08; 录用日期: 2023-05-15; 网络首发日期: 2023-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(62271058)

通信作者: *yidong@bit.edu.cn; **weiwei@bit.edu.cn

定性以及天线间的同步性。典型的二氧化硅(SiO_2)光纤的温度系数约为 $40 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{K})$ 、压强系数约为 $47.1 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{MPa})$, 如果将 1 km 长的该光纤放置在昼夜温差为 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境中, 仅由温度导致的延时变化就达到 600 ps , 远不能满足天线组阵的同步需求。为此, 基于传输延时控制的光纤传输技术应运而生。

实现光载微波光纤传输的稳定控制, 需要经过传输延时测量和补偿两个环节^[9-10]。光纤传输延时的测量可分为测时和测相两种方式: 前者需要采用宽带探测信号(如脉冲、扫频、类噪声等), 测时精度有限, 但测时范围大, 可以获得光纤传输的绝对时延; 后者则是通过测量单频信号的相位获得延时变化信息, 通过提高信号频率实现极高精度的延时测量, 但由于相位具有周期特性, 只能测量小范围的延时变化, 不能获得光纤的绝对传输延时。由于在本类型的传输中关注的是延时变化, 而不是绝对延时, 因此测相方式得到广泛的应用。

传输延时控制方法也可大体上分为相位补偿和延时补偿两种方式。相位补偿是对传输信号进行相位预校正, 以补偿由光纤传输延时变化导致的远端信号相位的不稳定, 故被称为“稳相传输”^[11-14]。相位补偿方式的优点是调谐速度快、补偿范围大, 因此可支持的传输距离远、抗环境扰动能力强; 主要问题是只能稳定单频传输信号本身的相位, 不能稳定传输光纤中的其他信号, 且稳定度有限(ps量级)。延时补偿方式是在传输光纤之前加入可控延迟器来补偿传输延时变化, 故被称为“稳时传输”^[15-16]。延时补偿方式的优点是可稳定传输延迟, 因此可支持任意信号的稳定传输, 而且稳定度高(fs量级); 主要问题是可控光延迟器在范围、精度、速度上难以兼得, 可支持的传输距离短、抗环境扰动能力弱。

天线组阵的巨大发展需求, 吸引了国内外众多学者对光载微波光纤稳定传输技术进行研究: 早期的研究主要聚焦于延时补偿方式, 围绕 ALMA 应用需求,

采用将光纤链路深埋地下的方式, 传输距离可达数十 km, 稳定性达到数十 fs 量级^[17-20]; 近年来, 通过级联多种可控光延时方式, 增强了光延时控制的综合能力, 使其在抗环境扰动和传输距离方面得到提升, 其应用领域得到明显扩展。相位补偿方式因具有高的抗环境扰动能力, 可满足天线的机动部署需求而得到广泛研究, 其主要聚焦单频信号的稳相分配技术。文献^[21-26]提出的基于光电融合的相位检测和控制方式在高频传输能力上取得突破, 实现了 100 GHz 信号的数百千米传输, 时间抖动达到数十 fs 量级, 但其宽带传输能力较低仍是待解决的问题。此外, 相位共轭方式也受到较多学者的关注^[27-28], 其优点是采用相位共轭直接生成预校正微波信号, 避免了反馈控制过程, 但由复杂的射频处理造成的精度受限以及难以支持宽带补偿的问题限制了其应用。

本文首先重点介绍反馈控制式光载微波光纤稳定传输的基本理论, 分析传输稳定度与信号频率的关系, 提出采用高频信号实现高稳定传输的思路; 然后, 介绍光电双外差混频的相位误差检测方式, 以及基于单边带调制(SSB)的相位调控方法和级联式可控光延时技术; 最后, 介绍基于上述传输思路和技术方案的光载微波光纤稳相和稳时两种稳定传输技术。与传统的射频传输方案相比, 通过传输高频信号可以将稳相传输稳定度提升至数十 fs 量级, 通过级联式可控光延时技术则实现了稳时传输延时补偿精度、速度和范围的兼顾。本文展示的光载微波光纤稳相和稳时传输技术为天线组阵等多天线协同微波测量中的信号级同步提供了有效的解决方案。

2 基本原理

2.1 光载微波光纤稳定传输基本理论

应用最为广泛的稳定传输方法是源于 1987 年 JPL 实验室报道的往返延时校正(RTDC)方法^[29], 其基本原理如图 1 所示。

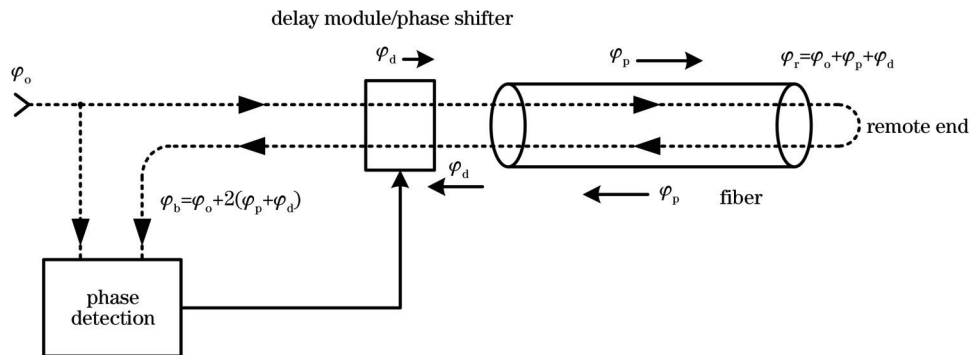


图 1 往返延时校正和相位预补偿原理

Fig. 1 Principle of round-trip delay correction

在本文方法中, 忽略光纤往返传输延时的差异性, 认为在同一段光纤中相向传输的两个信号将经历相同

的延时变化。因此, 沿同一光纤返回的信号将经历两倍的延时变化, 返回信号可表征信号在单程传输中的

相位变化。在本地端使用相位检测器(phase detector)对返回信号和本地信号进行相位比较,即可获得链路的延时变化。如果反馈调控延时模块的时延可使返回信号与本地信号的相位锁定,则链路的总传输延时也是稳定的,故称之为“稳时传输系统”。此时,通过此系统传输的任意信号的传输延时也是稳定的。如果通过调控注入信号的相位,补偿由光纤传输延时不稳定造成的远端信号相位变化,也可使其相位达到稳定。然

而,此时稳定的只是注入信号本身,故此类系统被称为“稳相传输系统”。

需要注意的是,上述结果是在忽略相位检测器的误差和假定输入信号频率 ω_0 不变的前提下得到的。在实际情况下,信号源相频噪声、相位检测误差、锁相环路噪声及其有限带宽等因素均会造成残余不稳定。考虑上述因素后的远端信号时间抖动(time jitter)可表示为

$$T_{\text{RMS}} = \sqrt{2 \int_{\omega_L}^{\omega_H} \left[\frac{S_{\phi_0}(\omega)}{\omega_0^2} \cdot |H_0'(\omega) - 1|^2 + \frac{S_{\phi_i}(\omega)}{\omega_0^2} \cdot |H_i'(\omega)|^2 + \frac{S_{\phi_{\text{PLL}}}(\omega)}{\omega_0^2} \right] d\omega}, \quad (1)$$

式中: $S_{\phi_0}(\omega)$ 、 $S_{\phi_i}(\omega)$ 、 $S_{\phi_{\text{PLL}}}(\omega)$ 分别表示注入信号、光纤链路、锁相环路的噪声功率谱密度; $H_0(\omega)$ 和 $H_i(\omega)$ 分别为本地信号处理系统和光纤传输链路的传递函数,其中带上撇号变量表示远端量,不带上撇号变量表示本地端量。

基于上述模型,仿真计算的不同注入信号噪声和

锁相环路噪声(合称为系统噪声底),以及不同的传输距离下远端信号时间抖动与注入信号频率的关系如图2所示。如图2(a)所示,无论是高系统噪声底,还是低系统噪声底,经过40 km的光纤传输后高频信号的时间抖动均会显著降低。如图2(b)所示,不同传输距离下信号时间抖动均随频率升高而降低。

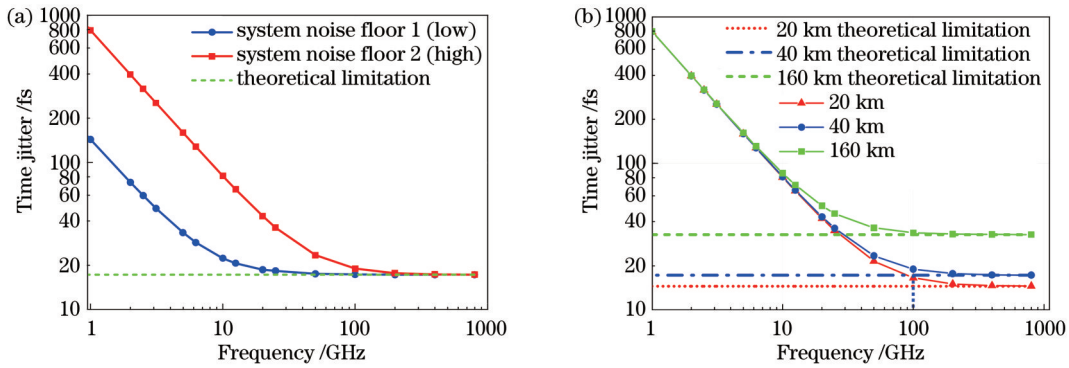


图2 不同情况下远端信号时间抖动与信号频率的关系(纵轴为对数坐标轴)。(a)不同系统噪声底下;(b)不同传输距离下
Fig. 2 Relation between time jitter and the frequency of remote signals under different conditions (vertical axis is logarithmic axis).
(a) Under different system noise floors; (b) under different transmission distances

图2所示结果表明,通过提高注入信号的频率可提高传输稳定性,其根本原因是提高信号频率不仅可提高传输延时测量精度,还可“弱化”其他噪声源的影响。但是系统存在稳定性极限,该极限值与信号源噪声、锁相环路噪声以及光纤传输距离有关。较大的信号源噪声及锁相环路噪声需要更高的频率才能达到极限稳定值,而极限稳定值则随着传输距离的延长而增加。

2.2 光电双外差混频的相位检测原理

要想实现上述稳定传输,首先需要实现高频信号的高灵敏度相位检测。在所搭建的系统中,制约相位检测灵敏度提升的因素有两个:其一,回传光信号功率弱。这不仅是因为回传信号经历了两次链路损耗,还因为该系统只能使用双向光放大技术来保证其往返延时的互易性,而目前的双向光放大技术因噪声过大或过于复杂(如拉曼光纤放大)而不宜采用。其二,高速

光电转换效率低和低频信号的混频效率低。

针对这一问题,本文提出基于光电双外差混频的相位检测方法,其原理如图3所示。首先,在本地端将待传输的射频(RF)信号经过电频移后调制到光载波,从而生成光载微波参考信号;然后,将该参考信号与经远端光频移后回传的光载微波信号进行光外差混频,并经过低速的光电转换器获得光载波和左(或右)调制边带的拍频信号;最后,对两个拍频信号进行电外差混频,即可获得回传信号的相位变化信息。本文方法不仅利用光相干混频技术获得增益,而且只需要低速的光电转换和低频信号相位检测,就可以大幅度提高接收灵敏度和鉴相精度,避免光电转换带宽对传输频率的限制。此外,无需采用高速鉴相器,解决了高频信号的高灵敏相位检测问题。

2.3 微波相位调控和光延时调控原理

对高频微波信号相位及光延时的高精度调控是所

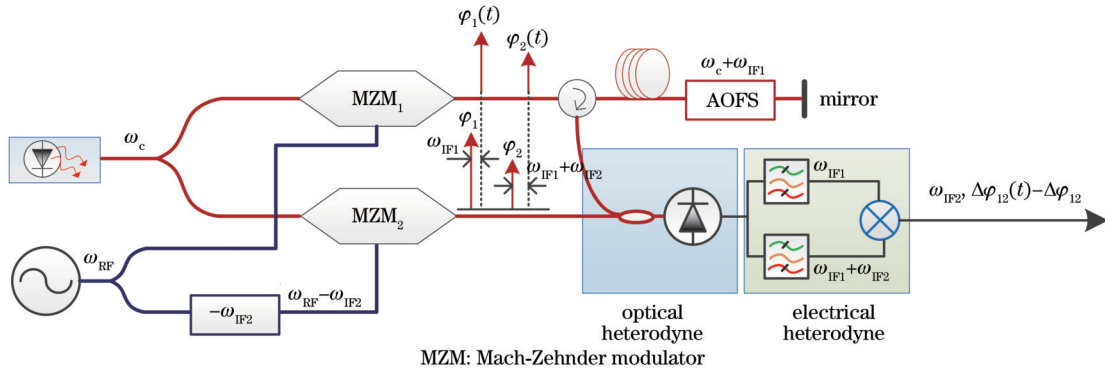


图 3 光电双外差混频相位检测原理图

Fig. 3 Principle of the optical and electrical heterodyne phase detection

搭建传输系统中需要实现的另一项关键技术。为此, 本文提出了基于单边带调制的高频信号相位调控和级联式光延时调控方法。

1) 单边带调制的高频信号相位调控原理

传统的基于压控振荡器(VCO)的相频调控方法随着振荡频率的升高, 调频系数增大, 如 10 GHz VCO 的调频系数高达数十 MHz/V, 难以支持高精度的相频控制需求。针对这一问题, 本文提出基于单边带调制的相位调控方法, 如图 4 所示。基本思路是: 通过单边带调制将 MHz 量级的中频信号相位搬移至高频信号。由于 MHz 量级 VCO 的调频系数较低 (kHz/V 量级), 易于实现精确的相频调控。单边带调制器为无源器件, 不会引入额外的相位噪声, 故经过单边带调制搬移即可实现高频信号相频的高精度调控。

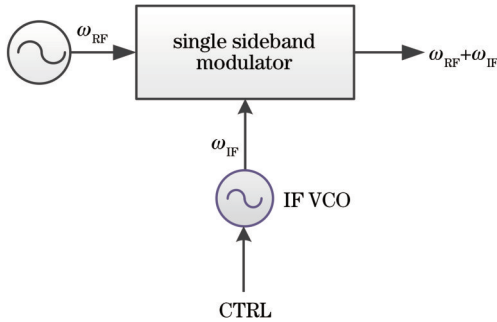


图 4 单边带调制的高频信号相位调控原理

Fig. 4 Principle of phase control of high-frequency signal via single sideband modulation

2) 级联式光延时调控原理

级联式光延时调控是将高精度(fs级)、小范围(ps级)的压电陶瓷(PZT)拉伸光纤式可调光延时器与中等精度(ps级)、大范围(ns级)的马达式可调光延时器级联使用。其关键在于如何无缝衔接二者的精度和范围, 实现兼具高精度和大范围的光延时调控。本实验采用锁相控制 PZT 光延时器, 同时监测 PZT 的工作范围, 反馈控制马达光延时器, 补偿延时, 使锁相环保持在 PZT 的拉伸补偿范围内。由此, 解决了两种类型延

时器在协同调控和无缝衔接方面存在的问题, 实现了 fs 级精度、ns 范围的光延时调控, 控制原理如图 5 所示。

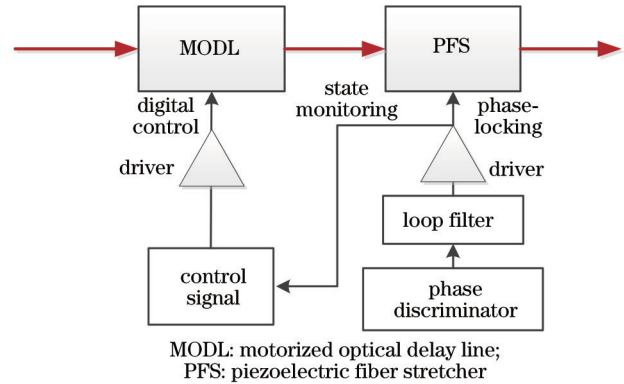


图 5 级联式光延时调控原理

Fig. 5 Control principle of cascaded optical delay line

3 实验结果分析与讨论

基于上述传输思路和关键技术方案, 实现了基于相位预补偿的光载微波稳相传输和基于光延时校正的光载微波稳时传输。

3.1 相位预补偿的光载微波稳相传输

所搭建的系统采用光电双外差混频相位检测和单边带调制的相位调控方法, 如图 6 所示。所搭建系统选取的传输频率为 100 GHz。将激光器输出的光载波功分为两路, 分别用作传输信号和参考信号的光载波。采用电频率综合和光频梳倍频相结合的方法生成 100 GHz 的光载毫米波信号。以铷原子钟输出的 10 MHz 为参考频率, 锁相倍频生成 24.99 GHz 的信号, 然后经过 10 MHz VCO 驱动的单边带调制器生成相位可调的 25 GHz 信号, 驱动马赫-曾德尔铌酸锂电光调制器(MZM)对光载波进行调制。使用光滤波器提取 ±2 阶调制谐波, 生成待传输的 100 GHz 光载微波信号, 并通过光纤传输至远端。类似地, 光载微波参考信号是由 24.99 GHz 信号直接调制另一路光载波生成的; 不同的是, 参考光不需要经过滤波器选取谐波,

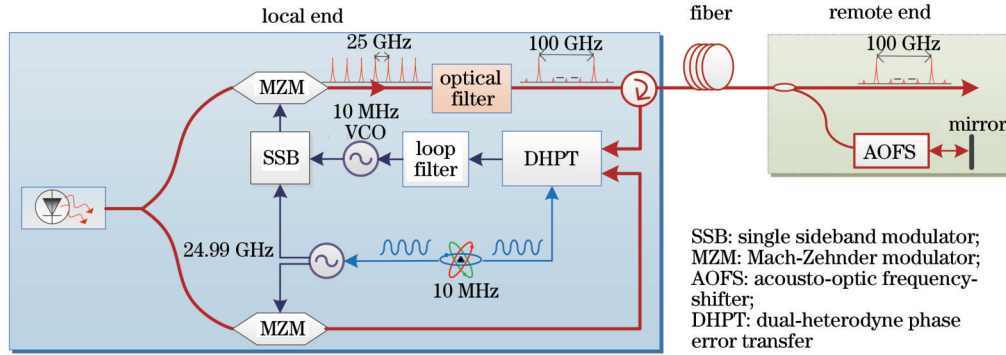


图 6 相位预补偿的光载微波稳相传输系统原理

Fig. 6 Principle of phase-stable optically carried microwave signal transmission system based on phase pre-compensation

这是因为回传信号中只有±2阶分量,其他阶分量不会产生拍频信号。

在远端节点,一部分光经声光频移和反射镜反射后,回传至本地端,另一部分则输出为远端信号。受限于高速光电转换器件,远端信号的相位稳定性测量同样采用光电双外差混频方法。

将回传至本地端的光载微波信号与本地端的光载微波参考信号进行光电双外差混频相位检测,获取远端信号的相位变化信息,经环路滤波后反馈控制 10 MHz VCO,调控 100 GHz 信号的相位,稳定远端信号相位。图 7 为研制的两路光载微波稳相传输系统实物图。

图 8 所示为测得的不同传输距离下的远端信号频率稳定性(艾伦方差)和时间抖动。在 10000 s 时间内传输 100、120、140、160 km 后的平均频率稳定性分别为 1×10^{-17} 、 1.2×10^{-17} 、 4×10^{-17} 、 6×10^{-17} 。艾伦方差值随平均时间的增大呈线性减小,表明系统具有优良的长期稳定性。相应的时间抖动(RMS)分别为 33、37、52.5、62 fs。图 8 中 1 m 的频率稳定性代表了 8×10^{-18} 的系统噪底水平。

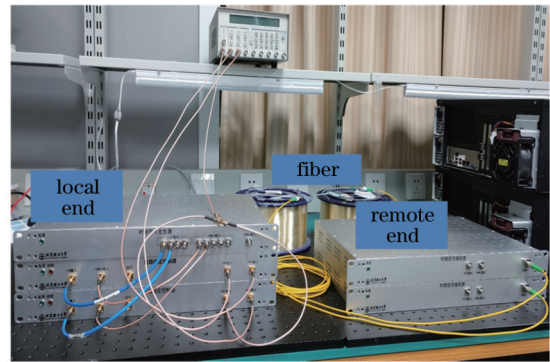


图 7 相位预补偿的光载微波稳相传输系统(两路)实物图

Fig. 7 Phase-stable optically carried microwave signal transmission system (dual-channel) based on phase pre-compensation

10^{-18} 的系统噪底水平。

3.2 光延时校正的光载微波稳时传输系统

所搭建系统的注入光纤信号频率为 25 GHz,采用光电双外差混频相位检测和级联式光延时控制方法来稳定光纤传输延时,实现延时稳定的光纤传输,实验原理如图 9 所示。

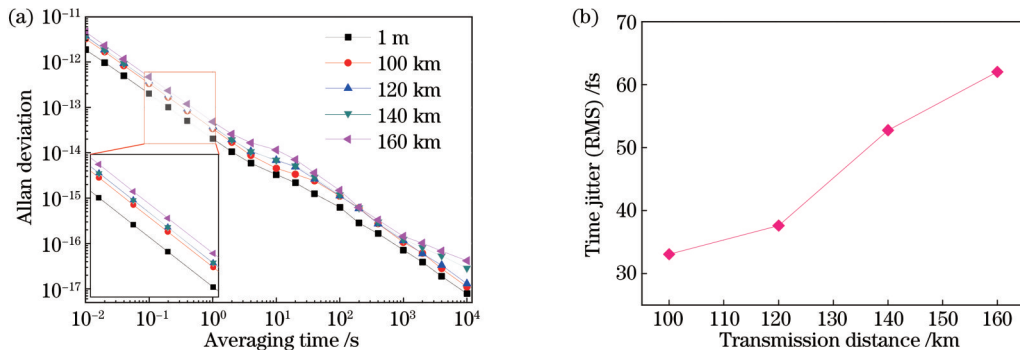


图 8 不同传输距离下 100 GHz 信号传输后的频率稳定性和时间抖动。(a)频率稳定性;(b)时间抖动

Fig. 8 Frequency stability and time jitter of the transmitted 100 GHz signal under different transmission distances. (a) Frequency stability; (b) time jitter

以铷钟输出的 10 MHz 频率为参考,经锁相倍频和频移生成 24.99 GHz 和 25.00 GHz 的微波信号,分别调制光载波,生成光载微波参考和传输信号。传输

到远端的光信号,一部分光经高速光电转换,输出远端微波信号;另一部分光经声光频移和反射镜反射后回传至本地端,与参考光信号进行光电双外差混频相位

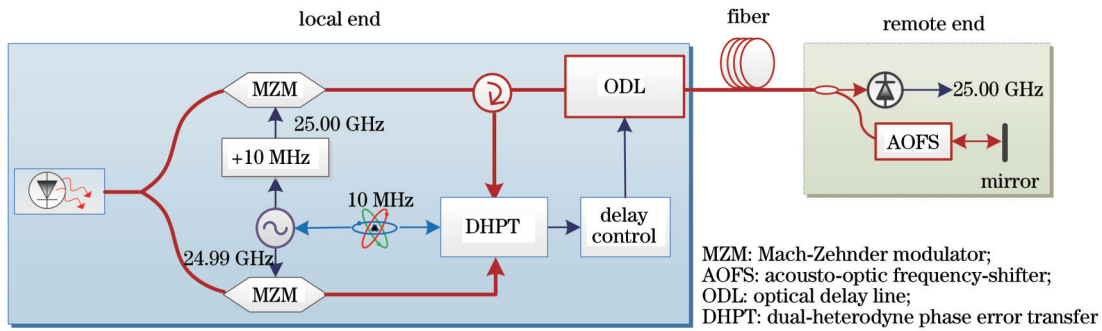


图 9 光延时补偿的光载微波稳时传输系统原理

Fig. 9 Principle of time-stable optically carried microwave signal transmission system based on optical delay compensation

检测,获得表征光载微波传输延时变化的相位误差信号。误差信号经环路滤波和数字化处理,生成PZT延时器和马达延时器的控制信号,补偿光纤传输链路的延时变化,实现光纤传输延时稳定控制。

图 10 为所研制的 3 路光纤稳时传输系统实物图。该系统已通过外场实验验证,具有极高的系统稳定性和重复性。



图 10 光载微波稳时传输系统(3路)实物图

Fig. 10 Time-stable optically carried microwave signal transmission system (3-channel)

图 11 所示为用矢量网络分析仪测得的经 21 km 光纤传输后的 25.00 GHz 信号在 3800 s 内的相位变化。测试结果表明,信号相位变化(RMS)小于 0.09° , 对应的时间误差(RMS)为 10 fs。得益于高精度的光延时调控,传输系统的稳定性得到大幅度提升。

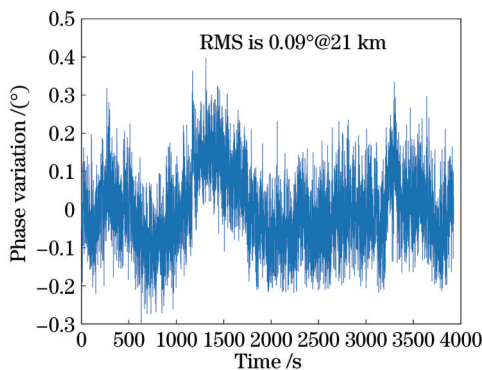


图 11 25.00 GHz/21 km 传输后的信号相位稳定性

Fig. 11 Phase stability of a 25.00 GHz signal after 21 km transmission

4 结 论

光载微波光纤稳定传输技术是当前解决天线组阵

中信号同步问题的最为有效手段。极高的传输稳定性需求是其面临的主要挑战。本文理论分析了光载微波光纤传输系统稳定性与信号频率之间的物理关系,提出通过提高信号频率来实现高稳定传输的思路。针对实现这一传输思路所需的高频信号的高灵敏相位检测、高精度相位和延时调控,提出一种基于光电双外差混频相位检测、单边带调制的相位调控、级联光延时调控方法。实现了 100 GHz 信号的光纤稳相传输,在 160 km 传输距离下,信号的频率稳定性达到 6×10^{-17} , 时间抖动达到 62 fs。所搭建的光纤稳时传输系统在 21 km 传输距离下,3800 s 内的时间误差(RMS)达到 10 fs。所提方法为天线组阵等多天线协同微波测量中的信号级同步难题的解决提供了有效的技术途径。

参 考 文 献

- [1] Brookner E. Recent developments and future trends in phased arrays[C]//2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, October 15-18, 2013, Waltham, MA, USA. New York: IEEE Press, 2014: 43-53.
- [2] Rogstad D H, Mileant A, Pham T T. 深空网的天线组阵技术[M]. 李海涛,译.北京:清华大学出版社,2003. Rogstad D H, Mileant A, Pham T T. Antenna array technology for deep space networks[M]. Li H T, Transl. Beijing: Tsinghua

- University Press, 2003.
- [3] Wootten A. The Atacama large millimeter array (ALMA)[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4837: 110-118.
- [4] Tarengi M. The Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array: overview & status[M]//Bachiller R, Cernicharo J. *Science with the Atacama large millimeter array*. Dordrecht: Springer, 2008: 1-7.
- [5] Coutts S, Cuomo K, McHarg J, et al. Distributed coherent aperture measurements for next generation BMD radar[C]// *Fourth IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing*, July 12-14, 2006, Waltham, MA, USA. New York: IEEE Press, 2008: 390-393.
- [6] Cuomo K M, Coutts S D, McHarg J C, et al. Wideband aperture coherence processing for next generation radar (NexGen) [R]. Lexington: Lincoln Laboratory, 2004.
- [7] Nanzer J A, Mghabghab S R, Ellison S M, et al. Distributed phased arrays: challenges and recent advances[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(11): 4893-4907.
- [8] Hartog A H, Conduit A J, Payne D N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibres[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1979, 11(3): 265-273.
- [9] Fujieda M, Kumagai M, Gotoh T, et al. Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(4): 1223-1228.
- [10] Lopez O, Amy-Klein A, Lours M, et al. High-resolution microwave frequency dissemination on an 86-km urban optical link[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(4): 723-727.
- [11] Chen Y F, Wang B, Wang L J, et al. Integrated dissemination system of frequency, time and data for radio astronomy[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 7100707.
- [12] Hu C, Luo B, Bai W L, et al. Stable radio frequency transmission of single optical source over fiber based on passive phase compensation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(1): 7200607.
- [13] Liu L, Cheng N, Wang J L, et al. Simultaneous optical and radio frequency transmission using optical phase stabilization combined with phase conjugation technology[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 5542106.
- [14] Zuo F X, Li Q, Xie K F, et al. Fiber-optic joint time and frequency transmission with enhanced time precision[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 1005-1008.
- [15] Liang J S, Wei W, Li Z Q, et al. Toward a phase adaptive stabilization system for next-generation single-dish sub-mm telescope part I: multipath phase measurements based on ultrastable microwave signal distribution[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 8001110.
- [16] Wang X, Wei W, Weng X Y, et al. Elimination of the PMD related delay jitter in a fiber stretcher based ultra-stable microwave signal distribution system[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41609-41621.
- [17] Cliche J F, Shillue B. Precision timing control for radioastronomy maintaining femtosecond synchronization in the Atacama large millimeter array[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(1): 19-26.
- [18] Kiuchi H. Highly stable millimeter-wave signal distribution with an optical round-trip phase stabilizer[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(6): 1493-1500.
- [19] Kumagai M, Fujieda M, Nagano S, et al. Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2949-2951.
- [20] Beas J, Castanon G, Aldaya I, et al. Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(4): 1593-1619.
- [21] Zhang L M, Chang L, Dong Y, et al. Phase drift cancellation of remote radio frequency transfer using an optoelectronic delay-locked loop[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6): 873-875.
- [22] Wang S W, Sun D N, Dong Y, et al. Distribution of high-stability 10 GHz local oscillator over 100 km optical fiber with accurate phase-correction system[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 888-891.
- [23] Sun D N, Dong Y, Shi H X, et al. Distribution of high-stability 100.04 GHz millimeter wave signal over 60 km optical fiber with fast phase-error-correcting capability[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2849-2852.
- [24] Wang X C, Liu Z, Wang S W, et al. Photonic radio-frequency dissemination via optical fiber with high-phase stability[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2618-2621.
- [25] Deng N, Liu Z, Wang X C, et al. Distribution of a phase-stabilized 100.02 GHz millimeter-wave signal over a 160 km optical fiber with 4.1×10^{-17} instability[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 339-346.
- [26] Liu Z, Xie W L, Wei W, et al. Theoretical analysis for fiber-optic distribution of RF signals based on phase-locked loop[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19851-19863.
- [27] He Y B, Orr B J, Baldwin K G H, et al. Stable radio-frequency transfer over optical fiber by phase-conjugate frequency mixing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18754-18764.
- [28] Wang H J, Li S Y, Xue X X, et al. Distributed coherent microwave photonic radar with a high-precision fiber-optic time and frequency network[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31241-31252.
- [29] Lutes G. Reference frequency distribution over optical fibers: a progress report[C]// *41st Annual Symposium on Frequency Control*, May 27-29, 1987, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 161-166.

Stable Transmission Technology of Optically Carried Microwave Signals via Optical Fiber for Antenna Array

Dong Yi^{1,2*}, Wei Wei^{1,2**}, Wang Xi^{1,2}, Xie Weilin^{1,2}, Tan Zhongwei^{1,2}, Bo Tianwai^{1,2}

¹Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314011, Zhejiang, China

Abstract

Objective The antenna array technology overcomes the aperture limitation of single antenna detection and improves the microwave detection capability by several or even dozens of times, which is regarded as a revolutionary change in microwave detection technology. Stable transmission of optically carried microwave signals via fiber links enables the long-distance distribution of microwave signals with delay (or phase) stability required in antenna arrays and plays an irreplaceable role in the new generation of microwave measurement technology with multiple antenna coordination. The core issue of this stable transmission technology is the unstable transmission delay due to environmental factors such as temperature variation and physical vibration. The key to this technology lies in how to accurately measure and compensate for the fiber transmission delay variation, thereby ensuring the delay or phase stability of the signal transmitted to the remote end.

Methods Increasing the signal frequency not only improves the measurement accuracy of transmission delay but also weakens the effect of other sources of noise. Therefore, transmission stability can be improved by increasing the signal frequency (Fig. 2). To achieve stable transmission, it is necessary to first detect the phase variation of the high-frequency signal with high sensitivity. Therefore, we propose a phase detection method by dual optical and electrical heterodyne mixing (Fig. 3). The RF signal to be transmitted at the local end after electrical frequency shifting is modulated onto an optical carrier to generate a reference. It is then optically mixed with the signal returned to the local end after optical frequency shifting at the remote end. The resulting intermediate frequency signals are then obtained through a low-speed photodiode. Finally, the two intermediate frequency signals are mixed electrically to obtain the phase variation of the returned signal representing the transmission delay variation. This method significantly improves receiving sensitivity and phase detection precision. High-precision control of the phase of high-frequency microwave signals or the optical delay is another key technique to be addressed for stable transmission. To improve the phase control precision of microwave signals in stable-phase transmission, we put forward a high-frequency signal phase control method based on single-sideband modulation. By adding the phase of the MHz-level intermediate frequency signal to the high-frequency signal via single-sideband modulation, accurate phase control of the high-frequency signal can be achieved by controlling the intermediate frequency signal. To achieve high-precision control of optical delay in stable-time transmission, we adopt a cascaded optical delay control method. This method employs a high-precision (fs-level), small-range (ps-level) piezoelectric fiber stretcher and a medium-precision (ps-level), large-range (ns-level) motorized adjustable delay line in series, achieving remarkable performance in delay compensation accuracy, speed, and range.

Results and Discussions Based on the above-mentioned transmission scheme and key technical solutions, we realize phase-stable and time-stable optically carried microwave signal transmission systems. For the phase-stable transmission system, the frequency of the transmitted signal is 100 GHz. Phase detection via dual optical and electrical mixing and phase control via single-sideband modulation are adopted (Figs. 6 and 7). Under 10000 s of averaging, the frequency stability after 100, 120, 140, and 160 km transmission are 1×10^{-17} , 1.2×10^{-17} , 4×10^{-17} , and 6×10^{-17} respectively (Fig. 8). It should be noted that the Allan deviation maintains linear decrease with the increasing averaging time, indicating excellent long-term stability of the system. The corresponding root mean square (RMS) value of time jitter is 33, 37, 52.5, and 62 fs respectively. For the time-stable transmission system, the frequency of the transmitted signal is 25.00 GHz. Phase detection via dual optical and electrical mixing and delay control via cascaded optical delay lines are utilized to stabilize fiber transmission delay (Figs. 9 and 10). The phase variation of the 25.00 GHz signal transmitted over 21 km measured by a vector network analyzer is less than 0.09° (RMS) within 3800 s, corresponding to a time error of 10 fs (RMS). Due to the high-precision optical delay control capability, the stability of the transmission system is greatly improved.

Conclusions Stable transmission of optically carried microwave signals is currently the most effective means for signal

synchronization in antenna array systems. After analyzing the relationship between the transmission stability of the optically carried microwave and signal frequency, we propose the idea of increasing the signal frequency for achieving high transmission stability. High-sensitivity phase detection and high-precision phase and delay control have been realized by dual optical and electrical mixing, single-sideband modulation, and cascaded optical delay control. Based on these techniques, we demonstrate a phase-stable and time-stable transmission system. For the phase-stable transmission, the frequency stability of the 100 GHz signal after 160 km transmission reaches 6×10^{-17} , and the time jitter is 62 fs. For the time-stable transmission, the RMS value of the time jitter is 10 fs within 3800 s at a transmission distance of 21 km. Our study provides an effective technical approach to signal synchronization in multi-antenna cooperative microwave measurements, such as antenna array systems.

Key words fiber optics; antenna array; optically carried microwave; microwave photonics; fiber transmission