

·“机载相控阵雷达技术发展45周年”专刊·

DOI: 10.16592/j.cnki.1004-7859.2024.02.003

微波光子信号同步及其在分布式相参雷达中的应用

潘时龙¹, 章志健¹, 王祥传^{*1}, 刘熙¹, 杨思豪¹, 曹欣荣², 王立晗¹,
程强^{2,3,4}, 马丛¹, 丁泽勇¹, 郭德明², 伍光新²

(1. 南京航空航天大学微波光子技术国家级重点实验室, 江苏南京 211106)

(2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210039; 3. 雷达探测感知全国重点实验室, 江苏南京 210039)

(4. 江苏省探测感知技术重点实验室, 江苏南京 210039)

摘要:分布式相参雷达技术通过多节点高性能信号同步实现跨平台的信号级相参融合,可大幅提升雷达探测、跟踪和抗干扰能力,是雷达领域的重要发展方向之一。随着雷达频率范围的拓展、瞬时带宽的增大和搭载平台的多样化,分布式相参雷达技术对节点间信号的时间、空间、频率、相位同步性能提出了越来越高的要求,这使得传统电学信号同步技术面临巨大挑战。文中介绍了分布式相参雷达对信号时、空、频、相同步的性能要求和国内外相关技术的研究进展,重点总结了微波光子同步技术的基本原理和代表性成果;构建了微波光子分布式相参探测原理验证系统,验证了微波光子分布式相参的可行性,为推动分布式相参雷达的前沿发展与工程化应用提供了关键技术支持。

关键词:微波光子技术;时间同步;相位同步;空间基线测量;分布式相参雷达

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-7859(2024)02-0025-10

引用格式:潘时龙, 章志健, 王祥传, 等. 微波光子信号同步及其在分布式相参雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2024, 46(2): 25-34.

PAN Shilong, ZHANG Zhijian, WANG Xiangchuan, et al. Microwave photonic signal synchronization and its application in distributed coherent radar[J]. Modern Radar, 2024, 46(2): 25-34.

Microwave Photonic Signal Synchronization and Its Application in Distributed Coherent Radar

PAN Shilong¹, ZHANG Zhijian¹, WANG Xiangchuan^{*1}, LIU Xi¹, YANG Sihao¹, CAO Xinrong², WANG Lihan¹,
CHENG Qiang^{2,3,4}, MA Cong¹, DING Zeyong¹, GUO Deming², WU Guangxin²

(1. National Key Laboratory of Microwave Photonics,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 211106, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

(3. National Key Laboratory of Radar Detection and Sensing, Nanjing Jiangsu 210039, China)

(4. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Detection and Sensing Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Based on high-performance signal synchronization among multiple radars, distributed coherent radar can realize signal-level coherent fusion, significantly enhancing radar detection, tracking, and anti-jamming capabilities, which represents one of the important development directions in the field of radar. As the frequency range and instantaneous bandwidth continue to expand, and platform forms diversify, distributed coherent radar technology demands increasingly precise signal synchronization in terms of time, space, frequency, and phase. This poses significant challenges to traditional electrical signal synchronization technologies. The performance requirements of signal synchronization technologies and reviews of the research progresses are presented in this paper. Then, the basic principles and representative achievements of microwave photonic synchronization technologies which address synchronization challenges in time, space, frequency, and phase domains are summarized. Finally, a proof-of-concept system for microwave photonic distributed coherent detection is constructed, verifying the feasibility of distributed coherent detection. Microwave photonic signal synchronization provides an important technological pathway for advancing the frontier development and engineering applications of distributed coherent radar.

key words: microwave photonic technology; time synchronization; phase synchronization; spatial baseline measurement; distributed coherent radar

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62075095,62271249)

收稿日期:2023-11-16 修订日期:2024-01-09

0 引言

战场环境探测与感知是现代战争中敌我双方博弈的焦点领域,对雷达等关键军事电子装备的性能提出了极高的要求。受到体积、重量和功耗等因素的限制,单平台雷达的探测性能越来越难以提升。此外,由于单平台雷达在空间维度上的单一性,它极易被定位和干扰,导致其在战场上的生存能力受到严重威胁^[1]。与此相对,分布式孔径雷达通过布设多个独立、分置的雷达单元,利用空间分集的方式对目标进行探测,实现了高性能雷达“化整为零”的结构改变。这种方式不仅显著降低了雷达对平台资源的需求,还为雷达提供了新的空间维度,从而提高了其可靠性、灵活性和抗干扰能力^[2]。根据信号处理方式的不同,分布式孔径雷达按工作体制可分为非相参体制和相参体制^[3]。分布式非相参雷达采用数据级融合处理方式,可以实现信息的协同,但丢弃了信号相位等信息,对于提高雷达射频相关性能的增益有限。而分布式相参雷达采用信号级融合处理方式,通过相参叠加,可有效提高系统的信噪比。例如,将 N 部雷达单元进行收发相参,理论上可将信噪比提升 N^3 倍,从而显著提升系统的探测威力与跟踪能力。此外,分布式相参雷达还能将空间分置的天线合成庞大的虚拟孔径,大幅提升系统的角分辨率。

基于上述独特优势,自 2003 年美国林肯实验室提出分布式相参雷达概念以来,分布式相参技术已成为现代雷达前沿领域的研究热点。2004 年和 2005 年,林肯实验室分别进行了两次全相参外场实验,利用两个分布式雷达单元成功对水塔、飞机和火箭等复杂目标开展了探测,实现了接收相参近 6 dB、全相参近 9 dB 的合成增益^[4]。随后,该实验室又分别在 2008 年和 2014 年验证了 Ku 波段和 W 波段分布式相参雷达的可行性和相参性能^[5-6]。在国内,针对分布式相参雷达中的节点布阵方式、信号同步技术、相参处理方法、系统研制和性能评估等关键内容,北京理工大学^[7]、南京航空航天大学^[8-9]、清华大学^[10]、南京电子技术研究所^[11]、北京无线电测量研究所^[12] 等多家单位开展了广泛研究,取得了一系列重要成果,成功验证了分布式相参雷达的可行性和性能优势。

然而,目前国内较为成熟的分布式相参雷达工程验证大多集中在低频段的地基雷达系统中,主要原因在于实现分布式相参雷达的物理基础是平台间信号的时间(时)、空间(空)、频率(频)、相位(相)同步,而随着工作频段和带宽的增加,分布式相参雷达对信号时、空、频、相的同步精度要求越来越高,使得传统电学同步技术面临着诸多难题。如:在有线同步方式中,电缆

较大的传输损耗^[13]限制了分布式相参雷达的布设范围及灵活性,同时电缆的有限传输带宽也制约了同步精度的进一步提升;而基于射频无线的同步方式,则面临射频波束较宽和多径干扰等问题^[14-16],难以满足高频分布式相参雷达对高同步精度的需求。

相较于传统电学技术,微波光子技术因其高频、宽带、低损耗和可并行处理等特点^[17],在微波信号产生、传输、处理和测量等方面表现出了独特的优势,为分布式相参雷达的高精度时、空、频、相同步需求提供了新的解决手段^[18-20]。本文首先介绍了分布式相参雷达对信号时、空、频、相同步的要求,然后阐述近年来面向分布式相参雷达的微波光子时、空、频、相同步技术的研究进展,最后构建了原理验证系统,验证了微波光子分布式相参雷达的可行性,以期能为分布式相参雷达的发展提供新的思路。

1 分布式相参雷达对信号同步性能的要求

图 1 为微波光子分布式相参雷达的典型架构,包括中心节点和远端节点。各节点之间通过光链路(光纤或者空间激光)连接,形成了一个微波光子时、空、频、相同步和信号传输网络,实现各个节点间的信号同步,为分布式相参探测提供物理基础。

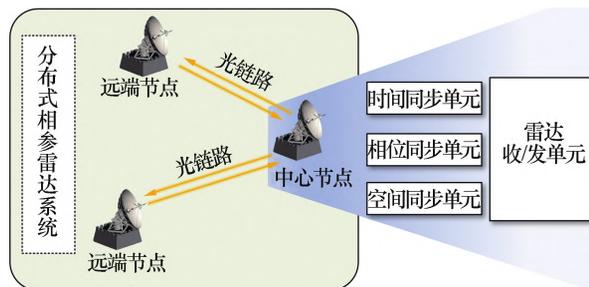


图 1 微波光子分布式相参雷达典型架构
Fig. 1 Typical structure of microwave photonics distributed coherent radar

为了达到接近理论极限的信噪比增益,必须保证各雷达单元在时、空、频、相同步等方面严格满足相参约束条件。式(1)为相参增益损失与时、频、相同步误差的关系^[21]

$$G_{\text{loss}} = 20 \lg \frac{N}{\left| \sum_{i=1}^N \text{sinc}(-\pi B \Delta T_i) e^{-j\pi B \cdot \Delta T_i - j\Delta \phi_i} \right|} \quad (1)$$

式中: N 为节点个数; B 为信号带宽; ΔT_i 与 $\Delta \phi_i$ 分别是时间和相位同步误差。由式(1)可以看出,相参增益损失随时、频、相同步误差的增加而增大。若要使相参增益损失不超过 0.3 dB,其相位同步误差应小于 15° ,时间同步误差应小于 $0.16/B$ ^[22]。因此,为满足

高频、宽带分布式相参雷达的需求,亟需突破更高精度的时、频、相同步技术。

在空间同步方面,为了获得高角度分辨能力、抗干扰能力和抗毁伤能力,分布式孔径雷达通常希望长的基线^[23],这要求各雷达平台间的空间基线测量具有大的测量范围。此外,雷达天线的位置抖动以及雷达平台间的相对运动将直接耦合到信号相干叠加时的相位抖动和变化中,导致相参增益降低。以X波段雷达为例,15°的相位同步精度需要毫米级精度的三维空间位置测量。因此,分布式相参要求空间同步技术兼具高精度和大范围特性。需要注意的是,考虑到目标回波的相关性,分布式协同相参雷达对节点间基线长度有着以下典型约束^[24-25]

$$d \leq \frac{\Phi_{\max} \lambda}{\pi L \sin \theta} R \quad (2)$$

式中: Φ_{\max} 为最大约束相位偏差; λ 为信号波长; R 为目标到基线中心点的距离; L 为目标垂直于视线方向的长度; θ 为目标中心到基线中心连线与地面的夹角。因此,对空间同步范围的要求需根据分布式相参的实际应用场景确定。

2 微波光子信号同步技术

2.1 微波光子相频同步技术

在分布式相参雷达系统中,各雷达节点时钟(本振信号)的相位和频率稳定性至关重要。任何微小的抖动都可能引发探测信号及回波信号的相位误差,从而直接影响到相参合成增益。因此,实现高精度的信号相频同步是实现高性能分布式相参雷达的关键。

目前,基于微波光子学的信号相频同步技术主要分为主动相位补偿法和被动相位失真法两类。主动相位补偿法通过检测在链路中往返传输前后的微波信号的相位差,并利用反馈控制器件实现对该相位差的补偿。当前,常见的主动相位补偿技术包括使用可调延时线和压控振荡器等进行反馈预补偿^[26-28]。图2为基于可调光延时线主动补偿方法的典型架构。在此方案中,中心节点的本振信号被调制到一个光载波上,经过可调光延时线使信号相位增加预补偿值 φ_0 后在光纤链路进行往返传输,鉴相器以中心节点参考源信号相位为基准,检测回传信号的相位变化,包括预补偿值 φ_0 和链路传输过程中的相位抖动值 φ_1 。利用鉴相器输出结果反馈控制可调光延时线对链路延时抖动进行预补偿后送入单模光纤进行传输,从而使远端节点接收信号的相位保持稳定。

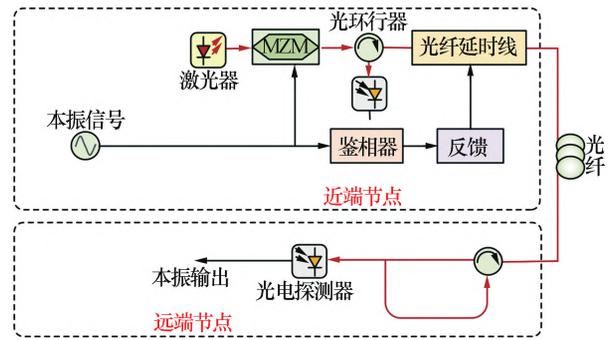


图2 基于可调光延时线主动补偿的稳相架构
Fig.2 Phase-stable transmission structure based on active compensation using tunable optical delay lines

虽然主动相位补偿法能够提供较高的相位同步精度,但受限于补偿器件范围有限、速度慢等问题,难以适应动平台场景下相频参数变化剧烈的情况。

被动相位失真技术通过相位共轭实现相位抖动的预补偿,进而实现相位同步,具有结构简单、补偿速度快、补偿范围不受限等优点。该技术通过将参考信号和携带有链路抖动信息的探测信号进行混频,得到相位共轭信号后再次传输,从而实现信号相位抖动的被动消除。这种技术不需要使用复杂的主动补偿器件、鉴相模块和控制模块等,更适用于灵活组网分布式相参雷达系统。

图3为基于被动相位失真的光载射频稳相技术的典型架构。首先,在中心节点处产生一个本振信号 V_1

$$V_1 = \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: ω 是信号的角频率; φ_0 是初始相位。该本振信号被分成两路,一路经过分频器获得频率为 $\omega/2$ 的辅助信号 V_a

$$V_a = \cos\left(\frac{\omega}{2}t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \quad (4)$$

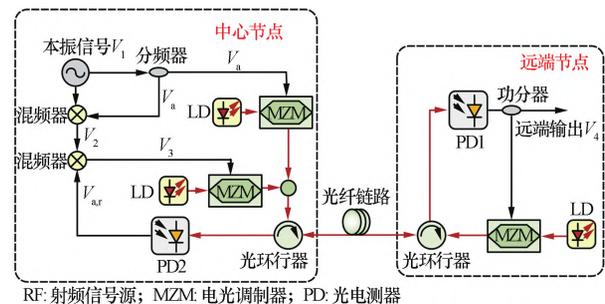


图3 基于被动相位失真的稳相传输架构
Fig.3 Phase-stable transmission structure based on passive phase distortion

该辅助信号 V_a 再次被分为两路,一路通过电光调制器调制到光载波上,经过光链路传输到远端。在远端节点,接收到的光信号由光电探测器探测后调制到另一个光载波上以进行波长转换。随后,调制光信号

通过同一光链路反向传输回中心节点。在中心节点,利用光电探测器将回传的光信号转换成电信号 $V_{a,r}$

$$V_{a,r} = \cos\left(\frac{\omega}{2}(t - 2\tau) + \frac{\varphi_0}{2}\right) \quad (5)$$

此时,该电信号中携带了链路往返传输时引入的链路延时及其抖动信息 τ 。

在中心节点,本振信号的另一路与辅助信号的另一路混频后获得信号 V_2

$$V_2 = \cos\left(\frac{3\omega}{2}t + \frac{3\varphi_0}{2}\right) \quad (6)$$

信号 V_2 与 $V_{a,r}$ 混频后得到预失真信号 V_3

$$V_3 = \cos(\omega(t + \tau) + \varphi_0) \quad (7)$$

将预失真信号调制到光载波上并传输到远端节点,消除掉链路抖动,在远端节点即可获得与中心节点本振信号相位完全一致的信号 V_4

$$V_4 = V_1 = \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (8)$$

南京航空航天大学基于上述架构^[29],在 20 km 的光纤中成功传输 6 GHz 射频信号,实现了小于 1.17 ps 的相位抖动。相比之下,未使用该方法时的相位抖动大于 41 ps。西南交通大学提出了一种基于双驱动 MZM 的光链路被动稳相传输方案^[30],利用该方案在 50 km 单模光纤上实现了 10 GHz 射频信号的稳定传输,10 h 内相位抖动均方根(RMS)为 0.82 ps。随后,该团队又提出了一种单激光器被动相位稳定射频传输方案^[31],由于抑制了非相干瑞利散射噪声,该方案显著提高了系统稳定性;在 50 km 单模光纤上传输 5 GHz 射频信号时,与没有处理非相干瑞利散射噪声的情况相比,新方案在 10 kHz 偏移处的单边带调制相位噪声降低了 10.9 dB。同时,在 1×10^4 s 内,相位抖动均方根仅为 1.12 ps。

当分布式雷达节点数量增多时,上述点对点的稳相技术难以进一步满足需求。为此,南京航空航天大学提出了一种基于偏分复用的多节点本振信号稳相传输方法^[32]。如图 4 所示,在中心节点,原始信号被分为两路,其中一路信号经过二分频后由双偏振马赫-曾德尔调制器调制到光载波的 X 偏振态上,并将其作为探测信号往返传输。返回中心节点的探测信号经过滤波后和原始信号进行混频生成预失真信号。随后将预失真信号调制到 Y 偏振态上分发给远端节点。在远端节点,将前向和后向传输光信号分离。前向传输的预失真信号调制到 Y 偏振态上,后向传输的探测信号调制到 X 偏振态上。光载波通过检偏器后经光电探测器恢复得到两个频率相同(原信号二分之一)、相

位抖动互补的信号,这两个信号混频后理论上将完全消除相位抖动,从而得到相位稳定的信号。利用该方案将 5 GHz 射频信号传输到 10 km 和 15 km 两个节点处时,RMS 定时抖动分别为 1.09 ps(约 0.03 rad)和 1.59 ps(约 0.05 rad)。

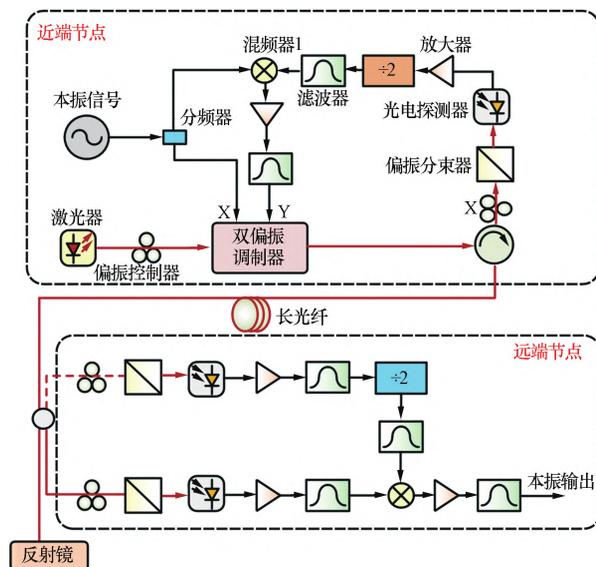


图 4 基于偏振复用的多节点被动稳相传输架构
Fig. 4 Multi-node passive phase-stable transmission structure based on polarization multiplexing

综上所述,微波光子被动相位失真技术得益于简单的系统结构、高响应速度和不受限制的补偿范围等优势,有望为分布式相参雷达提供高精度的相频同步手段。

2.2 微波光子时间同步技术

信号级相参合成要求不同雷达单元收发的信号在时间上实现精准对齐,这就需要各雷达单元必须基于统一的时间基准进行操作。目前,在分布式相参雷达中,根据信号传输手段可将常用的时间同步技术大致分为两类:基于无线射频链路和基于激光链路。在无线射频链路的时间同步方案中,通过微波双向比对技术,可以在大范围内实现节点间的时间同步。这种方案具有灵活可重构组网的优势,但其同步精度易受波束宽度和多径效应影响;作为此类技术的代表,卫星授时系统能够为分布式网络提供广域覆盖的时间同步服务。但受限于环境(温度、电离层变化、多径等)的扰动,其同步精度只能达到 ns 量级^[14-16]。相比之下,基于激光链路的时间同步技术具有窄波束、大带宽、低损耗等优势,能够实现更高时间同步精度,是满足宽带分布式相参雷达时间同步需求的有效技术途径。具体方法包括单向时间环回法与双向时间对比法。

单向时间环回法直接通过光链路将时间信号分发至远端节点。该方法通过实时测量时间信号从中心节点到远端节点的传播时延^[33],在中心节点进行时延补

偿,使时间信号稳定地分发至远端节点。图 5 为单向环回时间同步系统的典型架构。首先由中心节点时钟生成两个 1PPS 信号,一个信号被送入近端的时间间隔计数器,而另一个则用于调制波长为 λ_1 的光信号,随后该信号经由波分复用器传送至远端节点。在远端节点,时间信号由解调器提取出来作为时间基准,并再次被调制到波长为 λ_2 的光信号上,回传到中心节点。中心节点的时间间隔计数器测量往返时延后,对传输时延进行精确补偿,保障远端节点时间基准的稳定性。

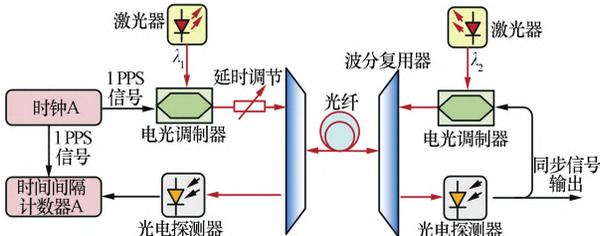


图 5 基于单向环回法的时间同步系统架构
Fig. 5 Time synchronization system structure based on unidirectional loopback method

基于单向时间环回法,波兰克拉科夫 AGH 科技大学采用两个互补 AMS-0.35 μm CMOS 工艺制造的电延时线,对链路时延漂移进行了实时补偿,在 60 km 的光纤链路中实现了 12 ps 的峰峰时间同步残余波动^[34]。清华大学和中国计量科学研究院将时间信号与 9.1 GHz 微波信号调制到不同波长上,并通过波分复用技术经由同一光纤传输。他们在中心站补偿传输引起的噪声,最终实现了 80 km 传输距离下 50 ps 的时间同步精度^[35]。上海光机所进一步将时间和频率信号调制到同一个光载波上,其中时间信号通过相位调制,而频率信号通过强度调制,并在中心节点控制光学延迟线主动补偿链路中的时延漂移噪声,在 110 km 的光纤链路上实现了小于 120 ps 的峰峰值时间漂移^[36]。南京航空航天大学基于微波光子相推法在公里量级的大气信道链路上实现了精度优于 0.1 ps 的时延测量和实时补偿。该链路无需额外的硬件,所用器件带宽仅为 10 MHz。研究团队结合动态卡尔曼滤波有效地抑制了由大气湍流引起的测量误差。在闭环控制时,系统时间抖动为 0.11 ps,时间抖动的标准偏差为 0.28 ps^[37]。尽管单向环回法具有结构简单的优势,其远端时间信号的稳定性高度依赖链路的稳定性,且同步性能受补偿器件的范围和精度限制。

双向时间对比法的原理如图 6 所示。在该技术中,两地都有参考时钟,其同步性能受链路时延波动影响较小,拓展性较强。以 1PPS 时间信号为例,设定全域时间基准下中心节点 A 时钟发出时间信号的时刻为 t_1 ,远端节点 B 时钟发出时间信号的时刻为 t_2 ,则两端的钟差 $\Delta T = t_2 - t_1$,代表着 B 端时钟滞后于 A 端时钟的值。

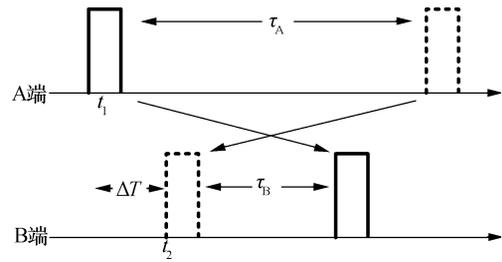


图 6 基于双向时间对比时间同步原理图
Fig. 6 Time synchronization schematic based on bidirectional time comparison

为方便表达,假设两端采用同样的设备,此时可认为两端信号发生器的发送时延和时延解算模块的接收时延是同一固定值,并可通过初始不对称性标定校准。令时间脉冲信号从 A 端发射到 B 端所需要的时间为 τ_A ,从 B 端发射到 A 端所需要的时间为 τ_B ,则在该基准下发射端和接收端同时进行绝对时延测量的结果分别为

$$\begin{cases} \tau_A = \tau_{BA} - (t_1 - t_2) = \tau_{BA} + \Delta T \\ \tau_B = \tau_{AB} + (t_1 - t_2) = \tau_{AB} - \Delta T \end{cases} \quad (9)$$

式中: τ_{AB} 、 τ_{BA} 为传输路径时延。由于初始钟差固定,且双向传输链路具有对称性,可认为 $\tau_{AB} = \tau_{BA}$,则两端钟差可表示为

$$\Delta T = (\tau_A - \tau_B) / 2 \quad (10)$$

将 A 端测量到的时间间隔值 τ_B 传至 B 端,在 B 端计算便可得到钟差。随后,在 B 端对该钟差进行补偿即可实现两端的时间同步。

图 7 为典型的微波光子双向对比时间同步系统架构。首先,A、B 端时间信号经过时延调节后由光发送模块发送至另一端。两端采用不同的光波长,以减少后向散射与端面反射的影响。随后,时间信号经光电转换后,与本地时间信号送入时间间隔计数器,解算出两端接收时延差。最后,将 A 端时延差信息传输到 B 端,在 B 端解算出两端钟差后,通过调节时延模块补偿钟差,实现两端时间同步。

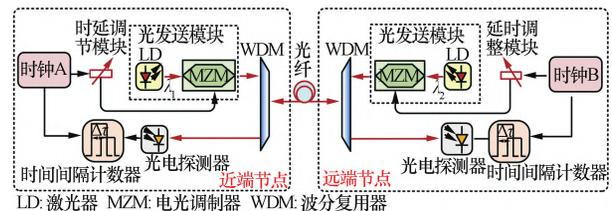


图 7 基于双向对比法的微波光子时间同步系统结构
Fig. 7 Structure of microwave photonic time synchronization system based on bidirectional comparison method

基于双向时间对比法,上海交通大学吴龟灵团队结合时分复用技术在实验室 13 134 km 等效长度的光纤链路上实现了稳定度优于 30 ps 的时间同步^[38]。随

后,该团队又基于波分复用时分同传技术,在 62 km 的光纤链路上实现了时分同时传输,时间同步精度达到 $3.5 \text{ ps/s}^{[39]}$ 。中国科学院国家授时中心利用超窄激光器产生传输信号,并引入色散误差修正机制,在 1 085 km 的光纤链路中实现了 18 ps 的时间同步标准差^[40]。

在双向对比时间同步技术的研究中,光频梳凭借其在频域和时域都具有极高的稳定性,可作为高稳定的时间基准受到广泛关注。美国国家标准与技术研究院的 Jean-Daniel 等^[41]在 2015 年首次结合线性光学采样技术,实现了基于光频梳的时间同步,其系统架构如图 8 所示。该系统利用不同重频光频梳之间脉冲的周期性干涉实现飞秒级时延差测量进而提高时间同步精度:首先分别测量出近、远端节点本地频梳与传输频梳的钟差,然后实现基于双向时间对比的钟差解算,最终在远端节点通过 10 Hz 带宽的比例积分控制器反馈控制调节时延,使得两端时间同步。两天内 4 km 空间链路的时间漂移仅 40 fs;而在 6 500 s 时间内,该漂移甚至低于 1 fs。四年后,该团队结合色散补偿技术与多普勒抑制算法,使用装载 24 m/s 高速扫描延时线反射光路的四轴飞行器,在 4 km 空间链路内实现了 1 fs 的时间同步标准差^[42]。中国科学技术大学也采用光频梳线性采样方案,在 16 km 自由空间链路中实现了优于 10 fs 的时间比对精度^[43],随后利用两对线性采样系统在 113 km 空间链路中实现了优于 0.5 fs/30 s 的时间比对精度^[44]。基于光频梳的时间同步因具有极高的精度,非常适合基于空间激光链路的同步场景。但当这项技术被应用于光纤链路时,其性能会受色散等因素影响,优势难以发挥。

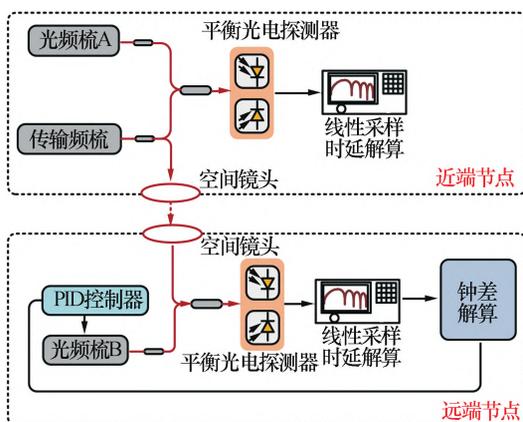


图 8 基于线性光学采样的时间同步系统架构
Fig. 8 Time synchronization system structure based on linear optical sampling

2.3 微波光子空间同步技术

在分布式相参雷达系统中,天线空间位置的变化将直接耦合到相位同步误差中,降低雷达的相参增益。因此,精准地获取各单元雷达天线的空间位置是实现

高相参增益的前提。目前能实现高精度三维空间位置测量的技术主要包括激光测距技术、全球导航卫星(GNSS)^[45]技术等。

由于激光光束定向性强、波长短等优势,激光测距技术的典型测量精度可达 $\pm 0.3 \mu\text{m/m}$ 。为实现高精度空间位置测量,目标角度信息的精准测量同等重要。但目前激光测距类仪器的测角精度(典型值 $\pm 0.5''$)较低,测距精度与测角精度还难以匹配,极大限制了对目标的定位性能。为解决这一问题,可以使用激光多边法对物体的位姿状态进行测量。激光多边法同时使用多台激光跟踪干涉仪组网测量目标物体的姿态,如图 9 所示。利用四个已知坐标的测量基站(A, B, C, D),只要测出 PA, PB, PC, PD 四个长度就能够求解待测天线 P 的三维位置坐标。天津大学基于独立式双轴驱动方法研制了一种 4 路的激光跟踪三维坐标测量系统^[46],实现了平均值约 $2.4 \mu\text{m}$ 的三维坐标测量误差;中国计量科学院基于激光多边法研制出一种坐标测量误差优于 $8.9 \mu\text{m}$ 的测量系统^[47]。激光多边法测量精度主要受限于其测量基站的数量。而当测量基站数量增加时,系统参数标定和计算复杂度也随之增加,导致系统结构复杂、成本高昂。此外,在强光照射或大气污染等恶劣天气影响下,激光测距的测量精度和稳定性会严重下降。

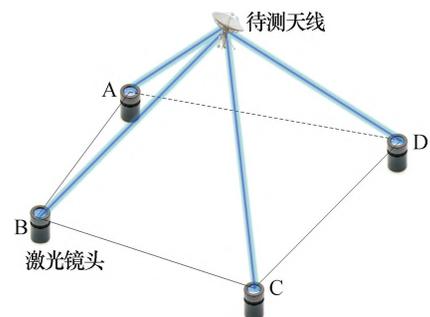


图 9 基于激光测距的空间位置测量原理
Fig. 9 Schematic of spatial position measurement based on laser ranging

基于 GNSS 的空间位置测量技术,是通过导航卫星将它们轨道信息编码到信号中并广播,地面接收站捕获这些信号后,通过解算获得卫星的精确位置以及地面目标与卫星之间的准确距离,从而得到目标在三维空间中的位置信息。该技术以其高精度、良好的稳定性和无累积误差等特点,成为了一种可靠且有效的空间位置测量方法。

为提高测量精度,GNSS 空间测量系统通常采用差分技术来消除卫星轨道误差、电离层和对流层延迟等对载波相位的影响。目前,差分技术主要分为载波相位双差模型和单差模型。双差模型通过对单差模型进行二次差分,进一步消除了不同天线接收机之间的

传输时延。然而,受限于卫星的几何分布不均匀,双差模型对于垂直方向上的位移变化量不够敏感,其垂直方向的测量误差是水平方向的三到五倍。通常情况下,基于双差模型的 GNSS 空间测量技术在测量精度上仅能达到厘米量级。为拓展测量范围,GNSS 空间测量系统将各天线接收到的导航信号通过电缆或光链路传输至接收机进行载波相位提取。电缆由于传输损耗大,会大大限制系统的测量范围。相比之下,通过低损耗的光链路可以实现更大范围的空间基线测量。此外,由于光链路可以实现大范围传输时延的实时监测,采用单差算法即可结算三维坐标,并有效解决传统双差技术在垂直方向精度不足的问题。

在载波相位单差模型中,原始载波相位观测方程为

$$\lambda \varphi_i^k = \rho_i^k - I_i^k + T_i^k + c(\delta t_i - \delta t^k) + lb_i + \lambda N_i^k + e_i \quad (11)$$

式中: λ 为载波波长; φ_i^k 是第 k 个卫星发射的信号在第 i 个天线处的载波相位观测量; ρ_i^k 是卫星和天线之间的距离; I 和 T 分别是电离层和对流层时延; c 是真空光速; δt 代表时钟偏差; lb_i 是天线与接收机之间的硬件时延; N_i^k 代表整周模糊度; e_i 是观测噪声。

通过对不同天线处的载波相位观测量进行差分运算,可以得到载波相位单差模型

$$\lambda \Delta \varphi_{ij}^k = \Delta \rho_{ij}^k + c \Delta t_{ij} + \Delta lb_{ij} + \lambda \Delta N_{ij}^k \quad (12)$$

式中: Δ 是单差算子。由于基线长度远小于卫星到天线之间的距离,如图 10 所示,可对 $\Delta \rho_{ij}^k$ 近似得到其与待测基线矢量 \mathbf{b} 的关系

$$\Delta \rho_{ij}^k \approx |\mathbf{b}| \cos \theta_k = \mathbf{S}^k \mathbf{b}^T \quad (13)$$

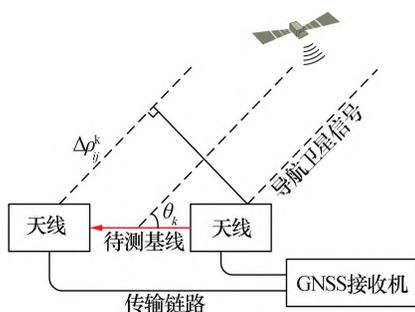


图 10 基于 GNSS 的空间位置测量原理
Fig. 10 Schematic of spatial position measurement based on GNSS

接收机钟差可通过在接收机做共时钟处理而消除,由此可得到单差后的载波相位为

$$\lambda \Delta \varphi_{ij}^k = \mathbf{S}^k \mathbf{b}^T + LB_i + \lambda \Delta N_{ij}^k \quad (14)$$

令观测到的卫星数量为 N ,我们得到单差模型的矩阵表达式为

$$\lambda \Delta \varphi_{ij} - LB_i = \mathbf{S}^k \mathbf{b}^T + \lambda \Delta N_{ij} \quad (15)$$

式中: $\Delta \varphi_{ij} = [\Delta \varphi_{ij}^n]_{N \times 1}$, $L = L \cdot [1, 1, \dots, 1]_{N \times 1}$ 。该式的左边是由载波相位和硬件时延组成的测量参数,右边是待计算的基线矢量、初始硬件时延误差和整周模糊度。由式(15)可见,单差观测方程消除了卫星钟差、电离层和对流层误差等,但是存在硬件时延项,当分布式雷达单元间基线过长时,该项的抖动将增大空间测量误差。为了消除该项的影响,可通过高精度的硬件时延监测消除该硬件时延的影响。为此,南京航空航天大学提出了一种基于线性调频光时延测量的光载 GNSS 空间三维基线测量系统^[45]。如图 11 所示,在远端节点,将 GNSS 接收天线所捕获的信号调制到光载波上,通过光纤传输到中心节点。中心节点由多通道 GNSS 数据采集模块和时延测量模块两大关键模块组成。多通道 GNSS 数据采集模块负责将光载 GNSS 信号进行光电转换,并解调得到导航数据;时延测量模块产生具有高线性度的线性调频光信号,将其发送到远端节点,再回传中心节点。得益于线性调频信号在时间和频率上的线性关系,系统能够将拍频信号的频率转换为往返传输的时延。通过精确补偿这一往返传输时延,系统成功消除了 GNSS 载波相位的抖动。实验表明,该系统三维基线的最高测量精度在 2 mm 以内,且其垂直定位精度相较于传统载波相位双差算法提高了三倍以上。

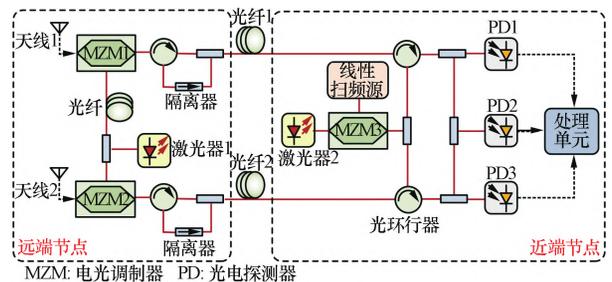


图 11 基于线性调频光时延测量的 GNSS 空间同步系统
Fig. 11 GNSS spatial synchronization system based on linear chirp optical delay measurement

综上所述,基于激光测距的同步方案测距精度高,但需要高精度、高稳定的空间激光建链,同时,多节点的位置解算对硬件资源也提出了极高的要求。而基于光载 GNSS 三维基线测量技术对硬件要求低,并可自由组网,有望实现高精度、大范围、任意节点的空间同步。

3 分布式相参雷达性能验证

为了验证分布式相参探测的性能,本文构建了一套基于微波光子技术的宽带分布式相参探测原理验证系统。该系统工作于 X 波段,具有 2 发 2 收的结构。其中,发射单元利用微波光子倍频技术生成瞬时带宽

为 4 GHz 的探测信号,接收单元采用微波光子去斜接收技术对回波信号进行接收处理。待测目标设置为直径为 5 mm 的螺栓。根据初始参数估计的结果,调整两个雷达单元发射信号的时延和相位,让多个发射波形同时、同相地照射目标,实现发射相参。随后对两单元接收信号进行相参接收,实现收发全相参,从而进一步提升信噪比。

图 12 为发射相参和全相参模式下雷达去斜接收的结果。在发射相参模式下,回波信噪比较单部雷达提升了 5.93 dB;在收发全相参模式下回波信噪比较单部雷达提升了 8.82 dB,非常接近理论值 6 dB 和 9 dB。

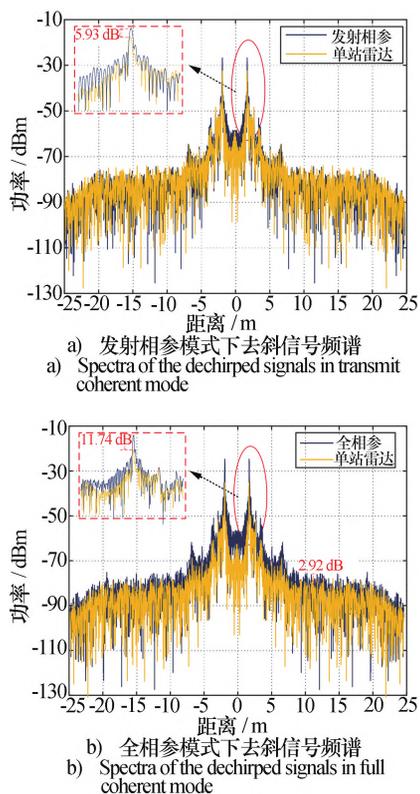


图 12 相参模式下去斜信号的频谱

Fig. 12 Spectra of the dechirped signals in coherent mode

在相参雷达成像方面,清华大学的研究团队对微波光子分布式相参雷达系统进行了距离多普勒成像的实验验证^[19]。在实验中,将三个角反射器以 10 cm 间隔均匀摆放,分别测试了两个雷达单元在单站模式、发射相参模式及全相参模式下的成像结果。结果显示,在发射相参模式下,回波信噪比有所提升,距离雷达发射机最近的角反射体可以被明显探测到,但另外两个角反射体的成像结果较为模糊。当雷达工作在收发全相参模式时,回波信噪比得到了进一步提升,可在成像结果中清晰分辨三个目标。

4 结束语

本文对分布式相参雷达及其所需的时、空、频、相

信号同步技术进行了总结与分析。针对高频段分布式相参雷达系统对时、空、频、相同步精度的高要求,重点探讨了微波光子测量与同步技术。基于光学系统波束细、带宽大、传输损耗低和并行处理等特点,微波光子技术为高精度时、空、频、相同步提供了可行的解决途径。其中,微波光子主/被动稳相传输、微波光子时间同步、高精度激光测距以及光载 GNSS 三维基线测量等关键技术已在精度和作用距离上展现出了独特优势,可为分布式相参探测,尤其是高频段雷达的分布式相参,提供关键支撑。值得关注的是,随着分布式相参技术在天基、空基、海基等动平台上拓展应用,微波光子技术的高速同步能力也有望发挥重要作用。

参考文献 (References)

- [1] 曹兰英, 郭明明, 罗美方. 雷达与电子战的认知博弈[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(5): 552-557.
CAO Lanying, GUO Mingming, LUO Meifang. Cognitive game between radar and electronic warfare[J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(5): 552-557.
- [2] FLETCHER A S, ROBEY F C. Performance bounds for adaptive coherence of sparse array radar[C]// 11th Conference Adaptive Sensors Array Processing. Lexington, MA: Massachusetts institute of technology Lexington Lincoln Lab, 2003: 1-4.
- [3] 鲁耀兵, 高红卫. 分布孔径雷达[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
LU Yaobing, GAO Hongwei. Distributed aperture radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [4] 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. Waltham MA: IEEE Press, 2006: 390-393.
- [5] 李尚远, 肖雪迪, 郑小平. 基于微波光子学的分布式相参孔径雷达[J]. 雷达学报, 2019, 8(2): 178-188.
LI Shangyuan, XIAO Xuedi, ZHENG Xiaoping. Distributed coherent aperture radar based on microwave photonics[J]. Journal of Radar, 2019, 8(2): 178-188.
- [6] CZERWINSKI M, USOFF J. Development of the haystack ultrawideband satellite imaging radar[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2014, 21(1): 28-44.
- [7] ZENG T, YIN P, LIU Q. Wideband distributed coherent aperture radar based on stepped frequency signal: theory and experimental results[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(4): 672-688.
- [8] MA C, CAO F T, YANG Y, et al. Distributed microwave photonic MIMO radar with accurate target position estimation[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2022, 71(4): 1711-1719.

- [9] 范北辰, 杨悦, 马丛, 等. 微波光子雷达组网技术[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(2): 195-207.
FAN Beichen, YANG Yue, MA Cong, et al. Microwave photonic radar networking technology [J]. Radar Science and Technology, 2021, 19(2): 195-207.
- [10] 邢云路, 李尚远, 薛晓晓, 等. 高频宽带分布相参微波光子成像雷达研究[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 422-435.
XING Yunlu, LI Shangyuan, XUE Xiaoxiao, et al. Research on high-frequency broadband distributed coherent microwave photonic imaging radar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 422-435.
- [11] 吴久涛, 曹欣荣, 陈亚伟. 一种用于双基地雷达的光纤相位同步技术[J]. 现代雷达, 2018, 40(2): 12-16.
WU Jiutao, CAO Xinrong, CHEN Yawei. Fiber phase synchronization technology for dual-base radar [J]. Modern Radar, 2018, 40(2): 12-16.
- [12] 周宝亮, 周东明, 高红卫, 等. 分布式孔径相参合成雷达技术试验验证与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(3): 413-417.
ZHOU Baoliang, ZHOU Dongming, GAO Hongwei, et al. Experimental verification and analysis of distributed aperture coherent synthesis radar technology [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information, 2019, 17(3): 413-417.
- [13] ZHAN Z W. Distributed acoustic sensing turns fiber optic cables into sensitive seismic antennas [J]. Seismological Research Letters, 2020, 91(1): 1-15.
- [14] PIZZOCARO M, SEKIDO M, TAKEFUJI K, et al. Intercontinental comparison of optical atomic clocks through very long baseline interferometry [J]. Nature Physics, 2021, 17(2): 1-5.
- [15] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system [J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 1-8.
- [16] LIU Y C, GONG H, LIU Z J, et al. A novel method based on the vondrak-cepek algorithm for correction of TWSTFT diurnal [C]// 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring. St. Petersburg, Russia: IEEE Press, 2017: 2931-2937.
- [17] 潘时龙, 张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 36-52.
PAN Shilong, ZHANG Yamei. Microwave photonics radar and key technologies [J]. Science and Technology Review, 2017, 35(20): 36-52.
- [18] XIAO X D, LI S Y, PENG S W, et al. Photonics-based wideband distributed coherent aperture radar system [J]. Optics Express, 2018, 26(26): 33783-33796.
- [19] 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.
- [20] XIAO X D, LI S Y, XUE X X, et al. Photonics-assisted broadband distributed coherent aperture radar for high-precision imaging of dim-small targets [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-9.
- [21] XIAO X, LI S, PENG S, et al. Microwave photonic wideband distributed coherent aperture radar with high robustness to time synchronization error [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(2): 347-356.
- [22] 刘兴华, 徐振海, 肖顺平. 分布式相参雷达几何布置约束条件[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(8): 1723-1731.
LIU Xinghua, XU Zhenhai, XIAO Shunping. Constraints on geometric arrangement of distributed coherent radar [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(8): 1723-1731.
- [23] 吴剑旗, 戴晓霖, 杨利民, 等. 一种大基线分布雷达近场相参探测技术[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(6): 579-583.
WU Jianqi, DAI Xiaolin, YANG Limin, et al. Near-field coherent detection technology for large baseline distributed radar [J]. Radar Science and Technology, 2020, 18(6): 579-583.
- [24] 林赞, 刘益, 王江, 等. 机载分布式相参雷达空间布阵约束条件 [C]// 第六届中国航空科学技术大会. 嘉兴: 中国航空学会, 2023: 894-900.
LIN Yun, LIU Yi, WANG Jiang, et al. Spatial arrangement constraints of airborne distributed coherent radar [C]// Proceedings of the 6th China Aeronautical Science and Technology Conference. Jiaxing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2023: 894-900.
- [25] 曾涛, 殷丕磊, 杨小鹏, 等. 分布式全相参雷达系统时间与相位同步方案研究[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 105-110.
ZENG Tao, YIN Pilei, YANG Xiaopeng, et al. Research on time and phase synchronization scheme for distributed fully coherent radar systems [J]. Journal of Radar, 2013, 2(1): 105-110.
- [26] WANG X C, LIU Z W, WANG S W, et al. Photonic radio-frequency dissemination via optical fiber with high-phase stability [J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2618-2621.
- [27] WANG X C, WEI W, DONG Y. Enhanced frequency stability over fiber link with improved phase discrimination scheme [J]. IEEE Access, 2019(7): 171405-171410.
- [28] LIU Z W, 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.
- [29] WEI J, ZHANG F Z, PAN S L, et al. Stable frequency dissemination via optical fiber based on passive phase fluc-

- tuation cancellation [C]// European Microwave Conference. Paris, France: IEEE Press, 2015: 1276–1278.
- [30] 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): 1–7.
- [31] HU C, LUO B, PAN W, et al. Incoherent rayleigh scattering noise depression for single laser stable radio frequency transmission [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(15): 815–818.
- [32] HUANG C S, WANG X C, LIU X, et al. Multi-access RF transfer with passive phase correction [C]// 20th International Conference on Optical Communications and Networks. Shenzhen: IEEE Press, 2022: 1–3.
- [33] WANG X C, LI S P, JIANG X, et al. High-accuracy optical time delay measurement in fiber link[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(6): 1–6.
- [34] SŁIWICZYŃSKI Ł, KREHLIK P, CZUBLA A, et al. Dissemination of time and RF frequency via a stabilized fibre optic link over a distance of 420 km [J]. Metrologia, 2013, 50(2): 133–145.
- [35] WANG B, GAO C, CHEN W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. Scientific Reports, 2012, 2(1): 1–5.
- [36] WANG J L, YUE C L, XI Y L, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with the same wavelength[J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 208–211.
- [37] XU Z, SUN X, ZHANG Y, et al. Absolute time delay measurement over an existing radio over free-space optical link with sub-picosecond precision[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(4): 1–8.
- [38] ZUO F X, XIE K F, HU L, et al. 13 134 km fiber-optic time synchronization[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6373–6380.
- [39] 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.
- [40] 陈法喜, 赵侃, 李博, 等. 基于1 085 km 实地光纤链路的双波长光纤时间同步研究[J]. 物理学报, 2021, 70(7): 69–78.
CHEN Faxi, ZHAO Kan, LI Bo, et al. Research on dual-wavelength optical fiber time synchronisation based on 1 085 km field optical fiber link [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7): 69–78.
- [41] DESCHENES J D, SINCLAIR L C, GIORGETTA F R, et al. Synchronization of distant optical clocks at the femtosecond level[J]. Physics, 2015, 16(1): 519–530.
- [42] BERGERON H, SINCLAIR L C, SWANN W C, et al. Femtosecond time synchronization of optical clocks off of a flying quadcopter[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1–7.
- [43] SHEN Q, GUAN J Y, ZENG T, et al. Experimental simulation of time and frequency transfer via an optical satellite-ground link at 10^{-18} instability[J]. Optica, 2021, 8(4): 471–476.
- [44] SHEN Q, GUAN J Y, REN J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km[J]. Nature, 2022, 610(7933): 661–666.
- [45] JIANG X, WANG X C, ZHAO A R, et al. A multi-antenna GNSS-over-fiber system for high accuracy three-dimensional baseline measurement [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4201–4209.
- [46] 赵树忠. 提高激光跟踪三维坐标测量精度的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
ZHAO Shuzhon. Research on improving the precision of laser tracking three-dimensional coordinate measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [47] MIAO D J, WANG G L, LI J S, et al. An improved self-calibration algorithm for multilateration coordinates measuring system [C]// 8th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test, Measurement Technology, and Equipment. Suzhou: SPIE Press, 2016: 175–181.

作者简介:

潘时龙 男,1982年生,博士,教授,研究方向为微波光子测量技术、微波光子雷达和集成微波光子学等;

章志健 男,1999年生,博士研究生,研究方向为基于微波光子学的分布式相参雷达;

王祥传 男,1987年生,博士,研究员,研究方向为微波光子测量技术及应用;

刘熙 男,1998年生,博士研究生,研究方向为基于微波光子学的时间同步技术;

杨思豪 男,2000年生,硕士研究生,研究方向为基于微波光子的空间同步技术;

曹欣荣 男,1988年生,博士,高级工程师,研究方向为数字信号处理、阵列信号处理;

王立晗 男,1998年生,博士研究生,研究方向为高分辨率光矢量分析和快速光时延测量技术;

程强 男,1986年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达信号处理和数据处理;

马丛 男,1993年生,博士研究生,研究方向为高分辨微波光子成像雷达;

丁泽勇 男,2001年生,博士研究生,研究方向为微波光子主被动一体技术;

郭德明 男,1984年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为机载火控雷达总体设计等;

伍光新 男,1980年生,博士,研究员级高级工程师,研究方向为雷达系统总体设计、综合射频一体化系统设计等。