

基于真时延补偿的上下行射频稳相传输技术

何明亮¹ 邱纪琛¹

HE Mingliang QIU Jichen

摘要

针对分布式抛物面天线组阵需求,文章提出了一种基于真时延补偿的上下行射频稳相传输技术。该技术旨在实现中心端与各天线端之间射频信号上下行双向稳相传输。采用参考光路往返式传输实时快速鉴相,并通过闭环反馈调整链路真时延,实现了1 km 光纤链路中上下行射频信号相位抖动的实时监测及动态补偿。在原理样机试验中,上行Ka频段信号和下行K频段信号通过稳相传输系统后,延时抖动峰-峰值均在 ± 0.2 ps内,抖动均方根方差 $1\sigma < 0.05$ ps,可以满足天线组阵对高稳定度上下行射频信号传输的需求。

关键词

测控通信; 天线组阵; 微波光子; 稳相传输; 时延补偿

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.015

0 引言

深空探测是当前世界航天活动的重要领域,其研究重点集中在月球探测、火星等行星探测以及太阳探测^[1]。深空探测的距离较为遥远,导致信号传输路径损失极大,使地面测控通信系统与深空探测器之间的测控通信面临严峻挑战。与传统的大口径天线建造或超低噪声接收机研发方案相比,天线组阵技术能够有效利用现有基础设施,展现出明显的技术优势。天线组阵是指在一定地域范围内利用多个天线组成阵列,将各天线接收到的同一信源的信号合成,提高接收信噪比,实现微弱信号的接收,其基本原理是获得并消除各天线信号间的时延和相位差,进而实现信号接收相干相加^[2-3],所以天线组阵对各路信号传输的稳定性要求较高。然而,由于天线前端与中心处理机房之间通常存在数百米至千米级的物理距离,如何实现上下行射频信号的远距离稳相传输成为分布式天线组阵系统的关键技术难题。

传统的射频信号传输大多利用射频线缆直接传输、无线传输、时钟搬运等方式^[4-6]。其中,射频线缆在长距离传输时,会引起较大的信号损耗,且频率越高损耗越大;无线传输则易受到站点之间的其他电磁干扰;搬运时钟的方式成本开销大,且易受环境影响;上述传统的传输方式无法满足高稳定、高精度的射频信号传输需求。此时,采用光纤作为信号传输介质的微波光子技术凭借其传输损耗小、抗干扰能力强、带宽大等优势,成为近些年射频信号传输的新方案。但由于光纤的折射率易受到应力、温度等环境变化影响,导致传输的微波信号时延和相位出现抖动,为进一步提高信号传输的精

度和稳定性,国内外也展开了大量基于微波光子的射频信号稳相传输技术的研究^[7-8]。

早期基于微波光子的时频传输技术主要采用电域调节射频信号相位的方法,通过闭环调节电控可调移相器,实现光路传输射频信号的相位匹配。随后,有研究学者提出了基于光域压控振荡器的稳相传输系统,通过调节无源锁模激光器的腔长改变其基频,从而实现信号的稳频传输。但这类系统均存在结构复杂、延时匹配精度低以及补偿带宽有限等技术瓶颈。为进一步提升系统的补偿带宽,国内外学者又提出了一种基于相位共轭相消的稳相传输技术,实现了信号宽带稳相传输。但是这种结构需要多个频率匹配的信号源,变频过程复杂,并且通常只用于单向传输,无法实现未来天线组阵中同时上下行传输的工程需求。

针对以上需求,本文提出了一种基于真时延补偿的射频信号上下行稳相传输技术,并进行了1 km的上行Ka频段信号以及下行K频段信号的双向稳相传输试验验证,补偿精度可达到ps级,具有噪声小、频带宽、双向传输等优势,可以为未来高频段天线组阵高稳定度信号传输提供有效的解决方案。

1 基本原理

1.1 温度对光纤射频传输链路的影响

在我国目前建设的地面测控站点中,为实现各天线与中心机房的信号传输,均建设了专用的线缆沟槽,用于光纤等线缆铺设,铺设条件较好,故光纤受到应力的影响基本可以忽略。但由于地面测控站点地理位置通常分布于高纬度偏远区域,昼夜温差变化大,射频信号在通过光纤进行传输时,会受到温度引起的慢变时延抖动,从而导致在光纤中传输的

1. 中国西南电子技术研究所 四川成都 610036

射频信号出现相位抖动。光纤链路传输时延为：

$$\tau = \frac{L}{c/n} \quad (1)$$

式中： L 为光纤的长度； c 为真空中的光速； n 为光纤的折射率。

当光纤所处环境温度变化时，光纤链路传输时延会发生变化，即光纤时延 τ 是关于温度 T 的函数，对函数求导可得：

$$\frac{d\tau}{dT} = \frac{d}{dT} \left(\frac{L}{c/n} \right) = \frac{1}{c} \left[\left(n \times \frac{dL}{dT} \right) + \left(L \times \frac{dn}{dT} \right) \right] \quad (2)$$

从式中可以看到光纤链路传输时延变化包括光纤折射率随温度的变化和光纤长度随温度的变化。其中，光纤长度随温度变化的 dL/dT 为光纤热膨胀系数，一般约为 $8 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ；光纤折射率随温度变化的 dn/dT 为光纤折射率系数，单模光纤一般约为 $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ，代入式 (2) 中计算可得，长度为 1 km 的光纤链路随温度变化引起的时延变化 $\Delta\tau$ 为 33 ps/ $^{\circ}\text{C}$ 。

若光纤传输的射频信号频率为 30 GHz，则射频信号传输 1 km 后的相位抖动随温度的变化将达 356 $^{\circ}$ / $^{\circ}\text{C}$ ，如若不进行链路的时延补偿，降低温度对传输链路时延抖动的影响，将无法未来满足天线组阵对射频信号高稳相传输需求。

1.2 基于真时延补偿的上下行稳相传输技术基本理论

图 1 为基于真时延补偿的上下行射频信号光纤稳相传输系统的结构示意图，主要由 2 路信号光路和 1 路参考光路组成。其中信号光路实现中心端到天线端的上行信号传输和天线端到中心端的下行信号传输；参考光路用于动态监测并补偿链路时延。为了避免光载波间互相干扰，上下行传输信号光路和参考光路载波频率分别设为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ，再通过波分复用方式在同一根光纤进行传输，确保测量得到链路时延抖动的准确性。上下行信号传输光路将待稳相传输的频率为 ω_{RF1} 的上行射频信号以及频率为 ω_{RF2} 的下行射频信号通过电光调制模块，调制到载波频率分别为

ω_1 、 ω_2 的稳定光载波上，忽略高阶分量后上下行调制光信号可以表示为：

$$\begin{aligned} E_1(t) &\propto \exp(j\omega_1 t) \cdot \cos[m_1 \cos(\omega_{\text{RF1}} t + \varphi_{\text{RF1}}) + \frac{\pi}{4}] \\ &\propto \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j\omega_1 t) \cdot [J_0(m_1) - 2 \cdot J_2(m_1) \cos(\omega_{\text{RF1}} t + \varphi_{\text{RF1}})] \\ E_2(t) &\propto \exp(j\omega_2 t) \cdot \cos[m_2 \cos(\omega_{\text{RF2}} t + \varphi_{\text{RF2}}) + \frac{\pi}{4}] \\ &\propto \frac{\sqrt{2}}{2} \exp(j\omega_2 t) \cdot [J_0(m_2) - 2 \cdot J_2(m_2) \cos(\omega_{\text{RF2}} t + \varphi_{\text{RF2}})] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： m_1 、 m_2 分别为上下行信号的调制系数； φ_{RF1} 、 φ_{RF2} 分别为上下行射频信号的初始相位。

当上下行信号光路再经过光学波分复用器、光延时线、光纤链路、光波分解复用以及光电探测器平方率检波后，恢复成射频信号，可以表示为：

$$\begin{aligned} V_1(t) &= E_1(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_f) \cdot E_1(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_f)' \\ &\propto \cos[\omega_{\text{RF1}}(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_f) + \varphi_{\text{RF1}}] \\ V_2(t) &= E_2(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_b) \cdot E_2(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_b)' \\ &\propto \cos[\omega_{\text{RF2}}(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_b) + \varphi_{\text{RF2}}] \\ &= \cos[\omega_{\text{RF2}}(t + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_f) + \varphi_{\text{RF2}}] \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\Delta\tau_f$ 、 $\Delta\tau_b$ 分别为温度对上下行光信号经过的光纤链路的时延抖动； $\Delta\tau_1$ 为光延时线的真时延改变量。

由于上下行射频信号经过的是同一根光纤链路传输，并且温度引起的时延变化是一个缓变过程，其变化速度通常远远小于调制光信号在光纤链路中的传播速度，可以认为信号在链路中上下行传输经历的延时抖动变化一致，即 $\Delta\tau_f = \Delta\tau_b$ 。并且从式 (4) 可以看到，当光延时线的真时延改变量 $\Delta\tau_f$ 满足 $\Delta\tau_f + \Delta\tau_1 = 0$ 时，传输后的射频信号相位只保留初始射频信号的相位，即可同时实现上下行射频信号的稳相传输。

参考光路负责实时监测并反馈补偿光纤链路的时延抖动，动态维持 $\Delta\tau_f + \Delta\tau_1 = 0$ 。参考光路由频率综合器、电光调制模块、

光环形器、光延时线、光纤链路、反射镜、光电探测器、鉴相模块、PID 控制模块等组成。频率综合器产生 $\cos(\omega_r t + \varphi_r)$ 的参考信号经过电光调制转换，调制到电光调制模块输出的载波频率为 ω_3 的光载波上，随后该调制光信号经过与上下行信号光路同样的光纤链路传输至天线端，在天线端经过反射镜反射，再回到中心端的光环形器，经

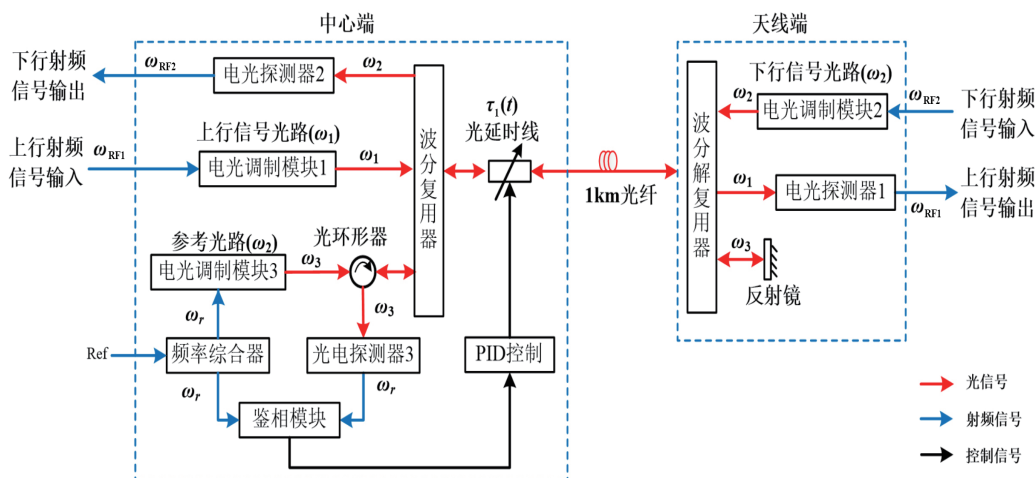


图 1 基于真时延补偿的上下行射频信号光纤稳相传输系统结构图

光电探测器转换成射频信号，可以表示为：

$$V_3(t) \propto \cos\{\omega_r[(t+\Delta\tau_1+\Delta\tau_f+\Delta\tau_1(t+T_r))+\Delta\tau_b]+\varphi_r\} \\ = \cos[\omega_r(t+2\Delta\tau_1+2\Delta\tau_f)+\varphi_r] \quad (5)$$

式中： φ_r 为参考信号的初始相位； T_r 为参考光信号在往返传输时经过光延时线的时间间隔。

由于光链路长度为 km 级， T_r 为 ns 级，远小于温度引起的链路时延变化，可以认为在这个时间间隔内，光延时线对于信号时延的调节没有发生变化，即 $\Delta\tau_1=\Delta\tau_1(t+T_r)$ 。该射频信号再与参考信号 $\cos(\omega_r t+\varphi_r)$ 通过鉴相模块鉴频鉴相，可以获得链路相位变化 $\Delta\phi$ ：

$$\Delta\phi = 2\omega_r(\Delta\tau_1 + \Delta\tau_f) \quad (6)$$

鉴相模块将链路相位变化 $\Delta\phi$ 转化为电压变化，再经过 PID (proportion integration differentiation) 控制电路转化为延时线控制信号，调整光纤延时线，改变光纤链路绝对长度也即真时延 $\Delta\tau_1$ ，使得 $\Delta\phi=0$ ，也即 $\Delta\tau_1+\Delta\tau_f=0$ ，按此实时动态监测并反馈补偿，完成上下行链路双向时延补偿。

2 基于真时延补偿的上下行射频稳相传输技术验证

2.1 上下行信号稳相传输技术试验方案

按图 1 所示，在实验室条件下搭建了基于真时延补偿的上下行射频稳相传输技术验证系统，结合工程项目需求，光纤链路长度为 1 km。系统由上下行信号光路和参考光路组成，旨在实现 Ka 频段和 K 频段信号的双向稳相传输。在上下行信号光路设计中，配置了两台 Keysight E8257D 信号源，分别用于产生上行 Ka 频段信号和下行 K 频段信号。其中，上行信号传输频率为 $\omega_{RF1}=30$ GHz，下行信号传输频率为 $\omega_{RF2}=20$ GHz。为确保上下行信号光路相位抖动的一致性，采用同批次电光调制模块以及光电探测器。电光调制模块的核心器件包括 DFB 激光器、马赫-增德尔调制器 (MZM) 等，采用外调制方式实现 K/Ka 频段信号大带宽、低噪声的电光转换。为避免上下行光信号之间的非线性效应，上下行信号光路中的 DFB 激光器的工作频率分别设为 $\omega_1=193.64$ THz 和 $\omega_2=193.16$ THz。同时，MZM 调制器通过自动偏置点控制电路保持工作在正交偏置点，以确保输出的射频信号功率最大化。光电探测器采用高速 PIN 光电探测器完成平方率检波，实现光/电转换。

在参考光路设计中，电光调制模块同样配备了与信号光路同批次的 DFB 激光器、MZM 等关键器件。其中，参考光路中的 DFB 激光器输出光载波频率 ω_3 为 192.66 THz，以避免与信号光路产生交调等非线性效应。反射镜选用商用法拉第旋光镜，确保光信号低损耗反射。根据式 (6) 可知，为提高系统相位监测精度，频率综合器以 10 MHz 高稳信号作为本振源，利用锁相环电路输出低相位噪声的 $\omega_r=10$ GHz 信号作为参考信号，用于精确感知链路的相位抖动，从而提高系

统监测相位抖动的灵敏度。

为了获得稳相传输后准确的信号特性，试验时采用 N9952A 矢量网络分析仪测试链路的 S 特性和相位变化，FSW67 频谱仪则用于观察光电探测器 1 输出的 Ka 频段信号的频谱和相位噪声。

2.2 射频信号上下行稳相传输技术试验结果及分析

对接入稳相传输系统前后射频信号频谱特性进行了对比测试。测试结果表明，信号源直接输出与经稳相传输系统后输出信号的杂散抑制分别为 -76.23 dBc 和 -75.37 dBc，且杂散与信号源本身的杂散基本一致；信号相位噪声分别为 -102.82 dBc/Hz@10 kHz 和 -102.68 dBc/Hz@10 kHz，测试曲线如图 2 所示。由此可以看出，经过稳相系统传输后，信号的杂散抑制和噪声水平并未出现明显恶化，表明系统对信号质量的影响较小。

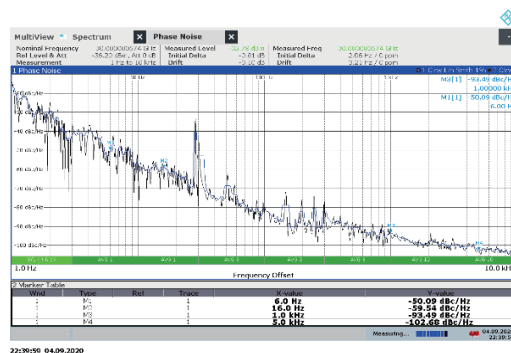


图 2 经稳相传输系统后 Ka 射频信号相位噪声结果图

另外，图 3 和图 4 分别为稳相传输系统上下行信号的增益平坦度曲线。

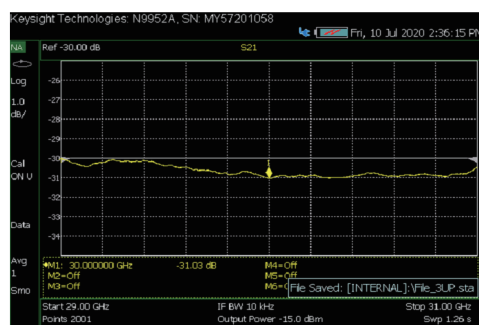


图 3 29~31 GHz 上行 Ka 射频信号稳相传输 S21 增益结果图

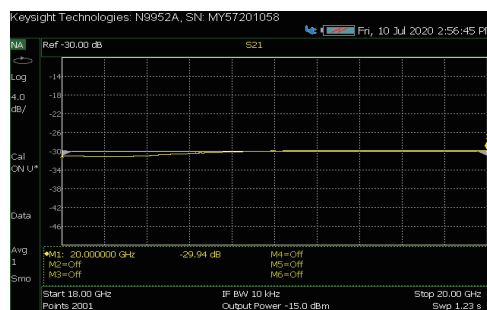
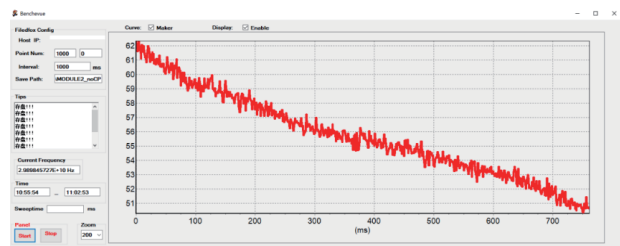


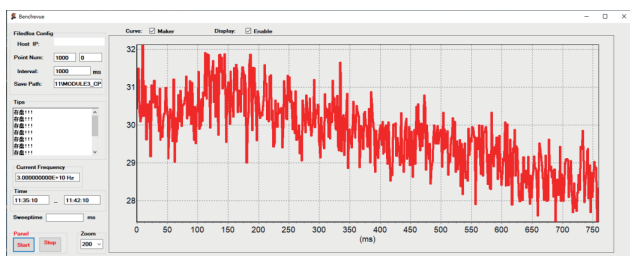
图 4 18~20 GHz 下行 K 射频信号稳相传输 S21 增益结果图

测试结果表明在 29~31 GHz 的频段范围内, 上行 Ka 频段信号的增益波动 $\leq \pm 0.5$ dB; 而在 18~20 GHz 的频段范围内, 下行 K 频段信号的增益波动 $\leq \pm 0.5$ dB。可见系统在 Ka/K 频段 2 GHz 带宽内具有较好的增益平坦性, 充分体现了系统高频段、大带宽等特点。

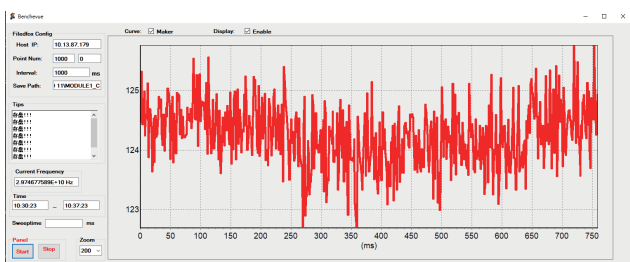
图 5 所示为上下行信号经过 1 km 光纤传输后 7 min 内的相位变化曲线, 其中图 5 (a) 为未补偿时信号的相位变化曲线, 可以看到在实验室缓慢变化的温度环境下, 射频信号相位漂移约 11° 。这表明在不进行时延补偿的条件下, 射频信号的相位会随着温度的变化不断发生漂移。开启稳相传输后, 上行 30 GHz 信号经过 1 km 光纤链路传输后的相位变化曲线如图 5 (b) 所示, 可以看到在 7 min 内峰-峰相位抖动小于 $\pm 2^\circ$ 以内, 对应的峰-峰延时抖动小于 ± 0.2 ps; 下行 20 GHz 信号的相位变化曲线如图 5 (c) 所示, 可以看到在 7 min 内峰-峰相位抖动小于 $\pm 1.4^\circ$ 以内, 对应的峰-峰延时抖动小于 ± 0.19 ps。通过对稳相后的时延抖动结果进行均方根统计计算, 可得系统的时延抖动标准差 $1\sigma < 0.05$ ps。结果表明, 该原理样机能够同时对上下行信号的时延抖动进行有效抑制, 且在不同频段下具有良好的一致性, 展现了较好的稳相传输性能。



(a) 无补偿时射频信号相位变化



(b) 补偿后上行射频信号的相位变化



(c) 补偿后下行射频信号的相位变化

图 5 无补偿和有补偿情况下上下行射频信号经过光纤链路的相位变化曲线

3 结语

针对未来深空测控通信系统高速率大容量数据传输需求, 为分布式天线组阵奠定基础, 开展了可以实现高频段、大带宽、低失真的射频信号稳相传输技术研究。本文研究了一种基于真时延补偿的上下行射频稳相传输技术, 利用往返参考光路鉴相, 获得光纤链路的时延与相位变化, 再通过 PID 算法闭环反馈控制可调光延时线的真时延, 从而动态实时抵消链路中时延变化, 可同时实现上行 Ka 频段信号和下行 K 频段信号的稳相传输。

本文提出的稳相传输系统能够支撑未来深空组阵技术对高精度、远距离和大带宽信号稳相传输需求。为进一步提升系统性能, 后续研究可从以下几个方面展开: 发展微波光子集成技术, 提高系统集成度并实现小型化; 采用大时延范围的光延时线, 扩大稳相传输系统的补偿动态范围, 以适应更复杂的测控环境等。

参考文献:

- [1] 刘继忠, 胡朝斌, 庞涪川, 等. 深空探测发展战略研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2020, 50 (9): 1126-1139.
- [2] 姚飞, 匡麟玲, 詹亚锋, 等. 深空通信天线组阵关键技术及其发展趋势 [J]. 宇航学报, 2010, 31(10): 2231-2238.
- [3] 徐茂格, 柴霖. 我国深空天线组阵技术现状与发展思考 [J]. 电讯技术, 2014, 54(1): 109-114.
- [4] WANG X C, LIU Z W Y, WANG S W, et al. Photonic radio-frequency dissemination via optical fiber with high-phase stability [J]. Optics letters, 2015, 40(11): 2618-2621.
- [5] 董毅, 魏伟, 王喜, 等. 面向天线组阵的光载微波光纤稳定传输技术 [J]. 光学学报, 2023, 43(15): 98-106.
- [6] NING B, DU P, HOU D, et al. Phase fluctuation compensation for long-term transfer of stable radio frequency over fiber link [J]. Optics express, 2012, 20(27): 28447-28454.
- [7] 张安旭. 基于光纤的稳相传输技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [8] 张磊, 梁晓东, 李少波, 等. 基于 PID 反馈控制的光载射频稳相传输技术 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(5): 407-413.

【作者简介】

何明亮 (1987—), 男, 四川南江人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 航天测控通信系统。

(收稿日期: 2025-05-12 修回日期: 2025-12-29)