

基于架空光缆的高稳定频率信号传递技术研究

王崇阳¹, 陈娉娉², 肖博文³, 王正勇¹, 刘铁强¹

(1. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081;

2. 北京卫星导航中心, 北京 100094; 3. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043)

摘要: 为解决架空光缆因晃动幅度大和温度变化剧烈引起的相位噪声恶化问题, 采用双向传输与预补偿技术, 设计了基于电子相位补偿的光纤频率传递方案, 在包含 30 km 架空光缆、总长 133 km 的实际链路上进行频率传递试验, 与单向传输设备相比相位噪声指标提高 28 dB; 采用双向传输光纤频率传递技术, 在包含架空光缆与 133 km 全部埋地光缆进行对照测试, 在 5 级风力情况下架空光缆传递相较恶化了 4 dB, 均可以满足架空光缆下频率传递使用需求; 经实地试验表明, 基于电子相位共轭的光纤频率传递技术可以优化经架空光缆传递后频率信号的相位噪声, 为分布式雷达、分布式守时系统及航天测控等系统多站间同步方案提供支撑。

关键词: 架空光缆; 频率; 传递; 预补偿; 相位噪声

Research on High Stable Frequency Signal Transmission Technology Based on Aerial Optical Cable

WANG Chongyang¹, CHEN Pingping², XIAO Bowen³, WANG Zhengyong¹, LIU Tieqiang¹

(1. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

2. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China;

3. State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to solve the phase noise deterioration caused by large shaking amplitude and drastic temperature changes of overhead optical cable, a fiber frequency transmission scheme based on electronic phase compensation is designed by using bidirectional transmission and pre-compensation technology. The frequency transmission test is carried out on the actual link containing 30 km overhead optical cable with a total length of 133 km. Compared with the unidirectional transmission scheme, the bidirectional transmission scheme improves the phase noise index by 28 dB. The bidirectional transmission fiber frequency transmission technology is used to make a comparison test between the overhead optical cable and the 133 km buried optical cable, and the transmission of the overhead optical cable deteriorates by 4 dB under the level 5 wind, which can meet the needs of frequency transmission under the overhead optical cable. On-site test results show that the optical frequency transfer technology based on electronic phase conjugation can optimize the phase noise of frequency signals transmitted by overhead optical cables, and provide a support for the multi-station synchronization scheme of distributed radar, distributed time-keeping system, and space telemetry and control system.

Keywords: overhead optical cable; frequency; transmission; pre-compensation; phase noise

0 引言

高稳定的时间频率是电子信息系统的重要组成, 高性能时间频率决定了卫星导航、航天测控等众多系统关键性能。同时, 随着光学频率基准发展, 铝离子光钟的频率不确定度达到了 10^{-18} 量级^[1-4]。将高精度时频基准无损传递至远端, 扩展使用范围的需求日益凸显, 需要发展高精度、高稳定的时间频率传递方法^[5]。使用光纤传递时频信号因其损耗低、抗电磁干扰、高稳定度的优势, 成为现在全球主流时频传递手段。

上海交通大学使用基于锁相环的光纤微波频率传递技术在 40 km 光纤上进行单向传输, 受到外界温度变化作用到光纤上而引入相噪声, 相位噪声恶化严重, 使用双带带

补偿系统后可对 1 Hz 处相位噪声提高 17 dB, 并有效抑制温度对长期稳定度的影响^[6]。中国电科 14 所理论分析了架空光缆晃动对传输信号相位噪声恶化, 并进行了仿真实验, 根据晃动幅度不同对相位噪声恶化 10~35 dB, 并优于光缆受温度急剧变化引起相位波动增大^[7]。清华大学在南非 SKA 中使用后置相位噪声补偿系统在 32 km 架空光纤上进行频率传输性能测试试验, 测试时气温变化约 10 °C, 风速低于 40 公里/小时, 与无相位噪声补偿结果相比, 相位起伏降低了 3 000 倍, 有效提高了频率传输稳定度^[8]。

因此, 在实际光纤链路遇到架空光缆时需要进行相位噪声补偿, 本文中采用电子共轭相位补偿技术进行链路引入噪声进行预补偿, 解决架空光缆优于光缆晃动和温度变

收稿日期: 2024-04-26; 修回日期: 2024-06-17。

作者简介: 王崇阳(1990-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 王崇阳, 陈娉娉, 肖博文, 等. 基于架空光缆的高稳定频率信号传递技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 269-275.

化对相位稳定性影响问题。

1 光纤频率传递技术原理

利用光纤进行高稳定性频率信号传递具有以下优点：1) 光纤传递频率信号相比于采用同轴线缆传递传统的微波信号具有很大的优势，同轴电缆进行稳相传输，但电缆损耗大、成本高，随着传输距离增大信号质量恶化严重，难以实现百米以上信号传输。光纤传递信号以损耗小、成本低、抗电磁干扰的优势多用于远距离信号传输^[9]。2) 主流远距离时间频率传输方法包含全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 共视法、GNSS 载波相位法和卫星双向时间频率传递等这些方法能达到的频率稳定度最好的指标为 $10\text{ E}\sim 15/\text{d}$ ，已经不能满足日益提高的时间标准信号^[10-12]。因此研究利用光纤进行时频信号传输，被认为是超稳定频率传递非常有潜力的发展方向。

光纤链路传递时频信号时会受温度、振动等因素影响引入相位噪声，例如振动引起的随机相位噪声和随温度变化引入的相位漂移，影响传输信号稳定性和准确度^[13-16]。在单向光纤传输频率信号时，传递后短期稳定度仍可以达到较高水平，在使用电子共轭相位补偿技术后，相位预补偿可以减小甚至消除光纤链路对频率传递稳定度的影响，长期稳定度指标可以提高几个数量级。

国内外很多研究单位也进行了未补偿和补偿后的频率传递相位变化以及频率稳定度的比对实验，如日本国家情报与通信技术研究所 (NICT) 在 150 km 的光纤链路上采用补偿和未补偿的两种方法进行 1 GHz 频率信号传递，相位波动及 Allan 方差比对结果如图 1 所示，未补偿的光纤频率传递在 17 小时内相位变化幅度为 500 ps 左右，频率稳定度 (迭代 Allan 方法) 为 $6\text{E}\sim 13/\text{s}$ ， $2\text{E}\sim 15/10\ 000\ \text{s}$ ^[17]；经过共轭相位补偿的光纤频率传递相位波动为 ps 量级，短期频率稳定度提升较小，长期频率稳定度降低两个数量级。因此可以看出相位补偿系统对光纤频率传递稳定性具有重要意义。

为了测试未补偿下光纤频率传递稳定度及验证光纤链路对频率传递的影响，搭建了开环光纤频率传递实验平台 (图 2)。利用相噪测试仪 5 120 A 测试铷原子钟 (Timetech 10466) 输出的 10 MHz 频率信号经过光纤传递后的频率稳定度，实验中通过改变相噪仪测试输入端接入光纤的长度获得了一组测试结果 (表 1)。

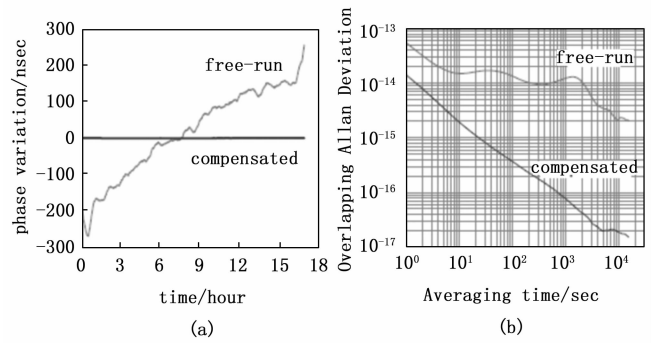


图 1 NICT 未补偿和补偿的光纤频率传递相位波动及 Allan 方差比对

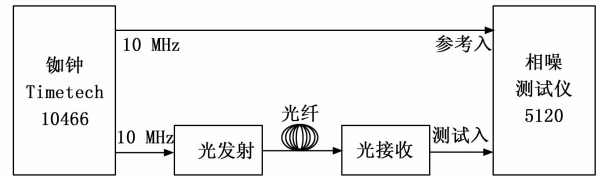


图 2 开环光纤频率传递实验

基于开环光纤频率传递稳定度测试结果，可以得到以下结论：

- 10 MHz 噪底为： $9.23 \times 10^{-15}/1\text{s}$ ， $1.7 \times 10^{-16}/10\ 000\ \text{s}$ ；
- 1) 接入 1 m 光纤后 10 MHz 频率稳定度为： $1.45 \times 10^{-13}/1\ \text{s}$ ， $1.9 \times 10^{-16}/10\ 000\ \text{s}$ ，光发射和光接收终端的引入只对短期频率稳定度有影响；
- 2) 接入 2 km 光纤后 10 MHz 频率稳定度为： $1.66 \times 10^{-13}/1\ \text{s}$ ， $1.27 \times 10^{-15}/10\ 000\ \text{s}$ ，长期频率稳定度的恶化主要是由于光纤传输距离变大；
- 3) 接入 35 km 光纤后 10 MHz 频率稳定度为： $6.64 \times 10^{-14}/1\ \text{s}$ ， $1.2 \times 10^{-14}/10\ 000\ \text{s}$ ，随着光纤传输距离变大，长期频率稳定度恶化到 $10^{-14}/10\ 000\ \text{s}$ 量级，符合实验预期。

综上所述，光收发模块只影响短期频率稳定度，可达 $10\sim 13/1\ \text{s}$ 量级；随着光纤传输距离的增加，长期频率稳定度会恶化到 $10\sim 14/10\ 000\ \text{s}$ 量级，因此利用光纤实现频率信号高稳定度的传输，需要采取措施对传输过程中的附加相位进行修正及补偿，来提高光纤传输频率的稳定度。

表 1 开环光纤频率传递频率稳定度测试结果

光纤长度	1 s	10 s	100 s	1 000 s	10 000 s
0 m (噪底)	9.23×10^{-15}	1.72×10^{-15}	5.00×10^{-16}	3.10×10^{-16}	1.70×10^{-16}
1 m	1.45×10^{-13}	3.45×10^{-14}	6.05×10^{-15}	6.60×10^{-16}	1.90×10^{-16}
2 km	1.66×10^{-13}	3.73×10^{-14}	7.15×10^{-15}	1.97×10^{-15}	1.27×10^{-15}
7 km	1.46×10^{-13}	3.83×10^{-14}	9.75×10^{-15}	7.90×10^{-15}	1.51×10^{-14}
25 km	1.49×10^{-13}	4.14×10^{-14}	9.40×10^{-15}	1.09×10^{-14}	1.31×10^{-14}
35 km	6.64×10^{-14}	3.96×10^{-14}	1.91×10^{-14}	1.89×10^{-14}	1.20×10^{-14}

为了实现基于光纤的高稳定频率信号传递, 势必引入相位补偿措施, 当外界温度、湿度、振动以及压强等环境变化的影响引起远端接收频率信号的相位波动, 导致频率信号传递稳定度恶化。测得往返传递信号的相位变化, 对单向传递引入的相位变化进行预补偿, 如图 3 所示。

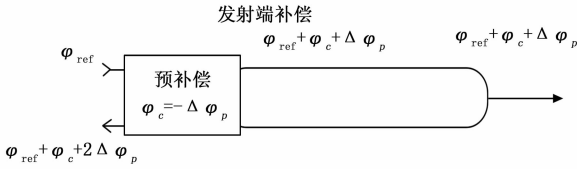


图 3 光纤频率传递预补偿系统原理图

其中标准频率源的初始相位为 φ_{ref} , 经过单向光纤传递后引入相位变化为 $\Delta\varphi_p$ 往返传递后返回本地的信号引入相位为 $2\Delta\varphi_p$, 在本地端对传递信号进行 $\varphi_c = -\Delta\varphi_p$ 的预补偿, 使单向传递到远端的频率信号相位与标准频率源初始相位 φ_{ref} 相同, 从而实现对光纤频率信号传递过程中引入相位噪声的实时补偿。

国内外稳相光纤频率传递方法根据补偿手段主要分为三种: 数字相位补偿方法, 光学相位补偿方法和电子共轭相位补偿方法, 数字相位补偿方法体积小、硬件电路相对简单, 但受限于数字调相器件调整精度低; 光学相位补偿方法使用光纤延迟线进行相位预补偿, 补偿精度高, 但设备体积大, 补偿范围小导致实际工程应用较少; 电子共轭相位补偿方法使用压控晶振进行相位补偿, 补偿范围大, 传递精度高, 但电路设计复杂^[19-20]。

本文使用电子共轭相位补偿方法进行稳相传输, 信号同时在光纤上双向传播, 要求相位具有共轭关系。信号在闭环路径的终点是光缆的远端。该系统始终保持了参考信号的相位与光纤输入端的正、反向信号的相位之间的共轭关系^[21]。

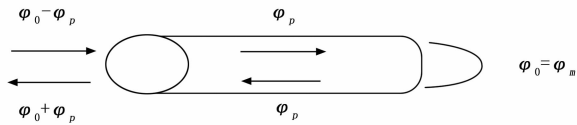


图 4 电子共轭相位补偿示意图

发射端提供待传输的参考频率信号, 通过光纤链路传输至接收端, 在接收端对信号在光纤链路中传输时引入的相位起伏进行主动补偿, 从而在接收端复现参考频率信号。

待传 10 MHz 原子钟信号为整个系统的频率参考。系统中, 补偿器件使用的是恒温压控晶振, 通过反馈回路预补偿光纤链路受环境因素引入的相位噪声。压控晶振生成的频率信号为: $V_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi_0)$ 。利用该信号对半导体激光器的输出光信号进行幅度调制。系统内 V_1 、 V_2 、 V_r 为三个相位锁定于原子钟的频率信号, 分别记为: $V_1 = \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$, $V_2 = \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$, $V_r = \cos(\omega_r t + \varphi_r)$, 且满足:

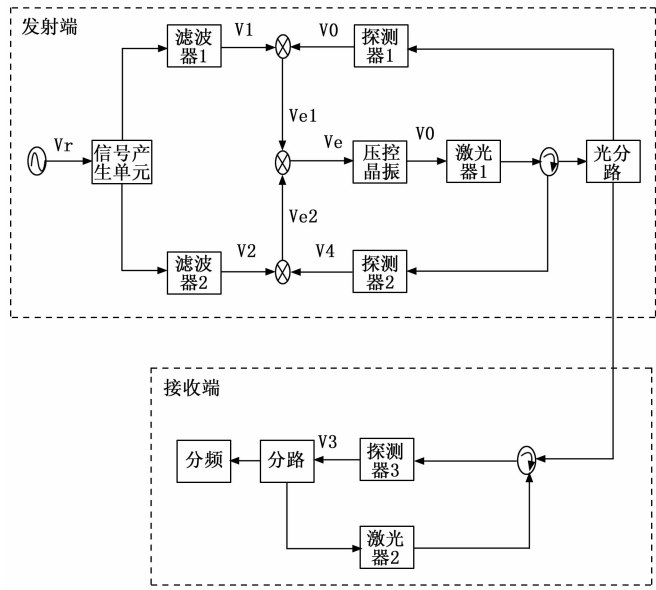


图 5 光纤频率传递原理框图

$$\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_r$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 2(\varphi_r + \xi)$$

其中: ξ 是固定相位值。频率信号 V_r 是原子钟向远端进行传输的频率信号。 V_1 , V_2 是混频后产生的相位锁定于 V_r 的信号对, 与远端传回信号混频后产生误差信号。 V_0 信号经过激光器、环形器、光分路器等光绪器件后进入光纤链路。

将发射端接收到对端传递来的光纤信号使用光分路器功分部分光信号进入探测器 1 解调输出电信号 $V'_0 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0)$, 传输信号在分路器处的行为信息 φ'_0 包含了压控晶振和环外器件的相位信息, 进一步测量了传输系统环外器件引入的相位噪声。接收端探测器 3 接收到发射端传递来的光信号解调后输出 $V_3 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0 + \varphi_p)$ 。在接收端将解调后的电信号 V_3 经过激光器 2 调制后返回至发射端, 发射端将返回光信号探测解调, 可以测量得到携带两倍光纤链路传递引入相位噪声 φ_p 的频率信号 $V_4 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0 + 2\varphi_p)$ 。将 V_1 和 V_0 混频经过低通滤波后得到:

$$V_{e1} = \cos[(\omega_0 - \omega_1)t + (\varphi'_0 - \varphi_1)]$$

将 V_2 和 V_4 混频, 经过低通滤波器后:

$$V_{e2} = \cos[(\omega_2 - \omega_0)t + (\varphi_2 - \varphi'_0 - 2\varphi_p)]$$

再将 V_{e1} 和 V_{e2} 混频, 经过低通滤波器后得到用于控制压控晶振相位的误差信号:

$$V_e = \cos[(2\omega_0 - \omega_1 - \omega_2)t + 2\varphi'_0 + 2\varphi_p - \varphi_1 - \varphi_2] = \cos[2(\omega_0 - \omega_r)t + 2(\varphi'_0 + \varphi_p - \varphi_r - \xi)]$$

V_e 为控制压控晶振的误差信号, 固定相位值 ξ 对传输后频率稳定度无影响。通过 V_e 反馈控制压控晶振 V_0 的频率和相位, 满足以下条件:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \omega_r, \\ \varphi'_0 + \varphi_p &= \varphi_r \end{aligned}$$

接收端解调后的频率信号 V_3 可以表示为：

$$V_3 = \cos(\omega_0 t + \varphi'_0 + \varphi_p) = \cos(\omega_r t + \varphi_r)$$

即接收端输出频率信号 V_3 锁定于发射端原子钟输出的参考信号 V_r ，实现了远端复现原子钟高稳定频率信号。

2 光纤频率传递方案

本次方案传递频率信号使用 2.2 GHz，光纤频率传递方案如图 6 所示。

发射端标准频率源产生 10 MHz 参考信号，进入 100 MHz 锁相晶振后产生 100 MHz 频率信号，100 MHz 经过倍频器和滤波器后产生两个相位锁定于频率源的 2.1 GHz 和 2.3 GHz 频率信号。压控晶振产生 100 MHz 频率信号倍频至 2.2 GHz 频率信号后经激光器输出，光信号经光分路后一路进入发射端探测器 1 光电转换为 2.2 GHz 频率信号，与本地 2.1 GHz 频率信号混频输出 100 MHz 信号，发射端探测器 2 接收远端传回的 2.2 GHz 信号与本地 2.3 GHz 频率信号混频输出 100 MHz 信号，两个混频后输出的 100 MHz 频率信号再一次混频，输出包含光纤链路传输时延波动的误差信号，控制压控晶振控制电压，实现发射端原子钟频率信号稳相传输。

在接收端，将发射端传递来的光信号进行光电转换后输出 2.2 GHz 频率信号，分路后一路使用激光器传递回发射端进行相位检测，另一路与本地 2.2 GHz 频率信号混频后使本地 100 MHz 晶振锁定在发射端频率标准源上，分频输出 10 MHz，实现稳相传输。

3 频率传递稳定度评估

一般使用远端恢复的频率信号与发射端输出的参考信号相位偏差评估频率传递性能，频率稳定度表征输出频率

信号与标准频率符合度，是评估频率传递性能的重要指标，本文采用相位噪声谱密度来表征相位的变化^[22]。

相位噪声是频率稳定度的频域表征方法。由上述噪声模型可知，五种噪声分别影响频率信号的短期稳定性和长期稳定性。不同噪声对频率稳定性影响不同是因为各种噪声的功率谱分布不同导致在不同频点影响不同。美国国家标准局 (NIST) 提出用相对频率偏移谱密度和相位噪声谱密度作为频率稳定度的频域表征。

相对频率偏移谱密度 $S_y(f)$ 和相位噪声谱密度 $S_\varphi(f)$ 分别表示将频率波动和相位抖动转换到傅里叶频域后再频偏 f 处 1 Hz 带宽内的频谱密度。相位是频率在时间上的积分，因此有关系式 $y(t) = \frac{1}{2\pi f_0} \frac{d\varphi(t)}{dt}$ ，两边进行傅里叶变换得：

$$S_y(f) = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 S_\varphi(f)$$

由于系统内部各种影响因素导致信号频率、相位或者幅度的随机波动。如果不受影响，正弦频率信号的功率都应该集中在频率 $f = f_0$ 处。实际的正弦频率信号受到噪声的影响，频谱会扩展到相邻的频率中。相位噪声为在偏离标准频率某一频率频率处的功率与总功率的比值，其单位为 dBc/Hz，研究问题是可以取一个单边带相位噪声进行分析，如图 7 所示，在偏移频率 f_m 处 1 Hz 带宽内的单边带信号功率 P_{SSB} 与信号的总载波功率 P_s 的比值即为 f_m 处的相位噪声 $L(f_m)$ ^[23]，即：

$$L(f_m) = \frac{P_{SSB}}{P_s} =$$

偏移频率 f_m 处 1 Hz 内单边带信号功率
载频信号总功率

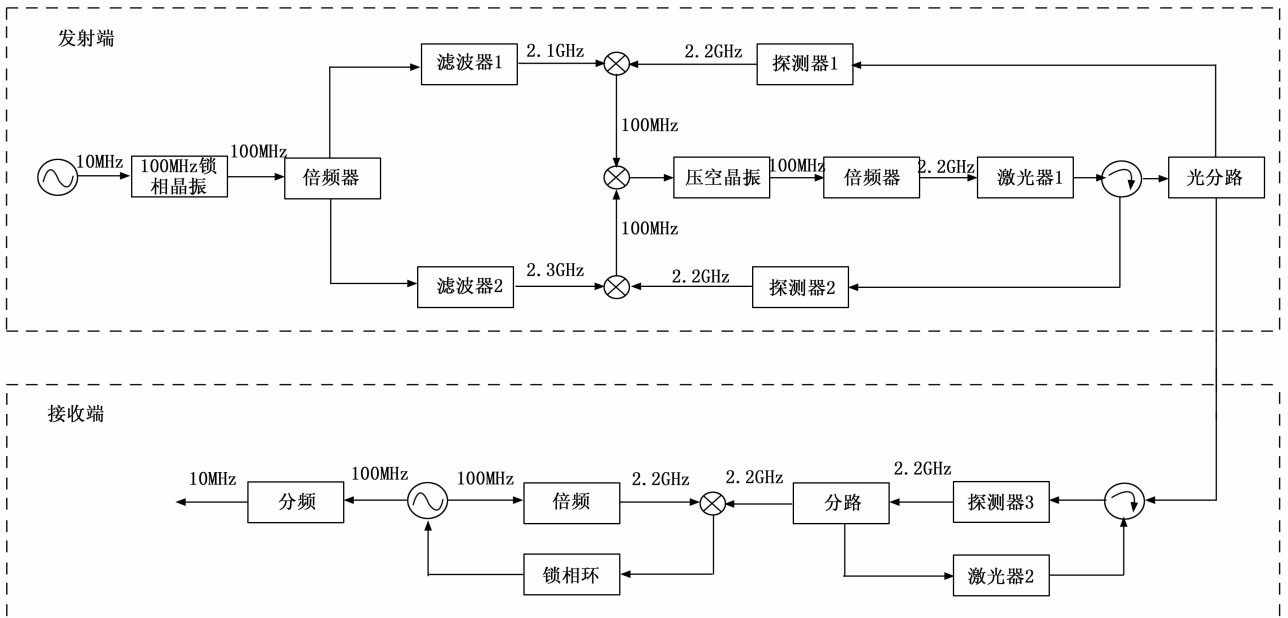


图 6 共轭相位补偿光纤频率传递方案

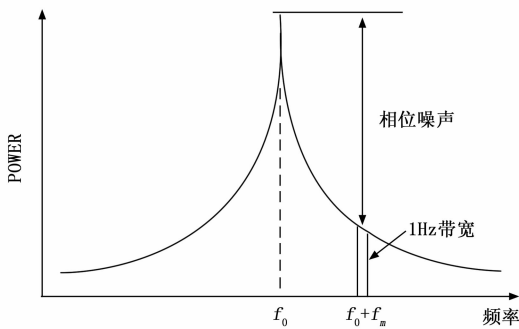


图 7 相位噪声的概念

频率稳定度分为短期稳定度和长期稳定度, 频率短期稳定度是指由噪声引起的频率或者相位的随机波动, 相位噪声谱密度测量一般都采用频谱分析仪或者相位噪声测量仪, 测量较低傅里叶频率的时间很长, 因此相位噪声谱密度评估的傅里叶频率往往大于 1 Hz 或者 0.1 Hz, 对应的采样时间约为 1 s 或者 0.1 s 以下, 频率稳定度时域表征方法为 Allan 方差, 长用来评估长采样时间的频率稳定度。本次传递性能评估使用相噪测试仪 5 120 A 测试相位噪声指标。

4 频率传递试验

在站 A 部署 10 MHz 基准光发射设备, 在站 B 部署 10 MHz 基准光接收设备, 两站间相距 133 km, 建有两条光纤链路, 第一条光纤链路包含 30 km 架空光缆和 103 km 埋地光缆, 第二条光纤链路全部为埋地光缆。

4.1 不同风力下架空光缆传递稳定度测试

首先在第一条包含架空光缆的链路上开展了架空光缆情况下不同风力对。

测试了站址 A 中 10 MHz 基准光发射设备输入 10 MHz 信号相位噪声为 -122.7 dBc/Hz@1 Hz。

经过 133 km 光缆后不同风力下测试站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声, 采用 4 次相位噪声测试结果算术平均值作为相位噪声测试结果。风力依据当地天气预报。

在 2 级风力下站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备相位噪声依次为 -119.2 dBc/Hz@1 Hz, -118.48 dBc/Hz@1 Hz。

在 5 级风力下站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备相位噪声依次为 -114.75 dBc/Hz@1 Hz, -115.8 dBc/Hz@1 Hz。

在 4 级风力下站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备相位噪声依次为 -119.35 dBc/Hz@1 Hz, -120.5 dBc/Hz@1 Hz, -119.18 dBc/Hz@1 Hz, -120.25 dBc/Hz@1 Hz。测试结果如表 2 所示。

综上所述, 相比较 ≤3 级风力, 风力 5 级时, 由于接收站至发射站光缆有 30 km 架空光缆, 控制站输出 10 MHz 相位噪声指标有 5 dB 左右相位噪声恶化, 相位噪声仍可以

表 2 B 站址 10 MHz 基准光接收设备相位噪声结果 (架空光缆) dBc/Hz@1 Hz

序号	B 站址 10 MHz 基准光接收设备相位噪声		风力	
	单次测量值	4 次平均值		
1	-119.6	-119.2	2 级	
2	-118.9			
3	-119.4			
4	-118.9			
5	-122.1	-118.48		
6	-118.0			
7	-116.7			
8	-117.1			
9	-114.0	-114.75	5 级	
10	-113.4			
11	-116.4			
12	-115.2			
13	-114.9	-115.8		
14	-115.4			
15	-115.9			
16	-117.0			
17	-119.6	-119.35		4 级
18	-119.1			
19	-117.4			
20	-121.3			
21	-119.5	-120.5		
22	-121.7			
23	-120.3			
24	-120.5			
25	-118.9	-119.18		
26	-120.2			
27	-119.6			
28	-118.0			
29	-120.25	-121.5		
30	-119.4			
31	-118.3			
32	-121.8			

满足技术指标要求, 为系统提供时频服务。

4.2 架空光缆与埋地光缆对比试验

站址 A 至站址 B 第二条光缆全程为埋地光缆, 在该条件下, 测试了站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出的 10 MHz 信号相位噪声, 测试过程中室外风力在 5 级, 同时有大风蓝色预警, 平均风力可达 6 级, 阵风 7 级以上, 测得 10 MHz 基准光传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声依次为: -118.7 dBc/Hz@1 Hz, -118.78 dBc/Hz@1 Hz, -118.38 dBc/Hz@1 Hz, -119.15 dBc/Hz@1 Hz, -119 dBc/Hz@1 Hz。测试结果详见表 3。

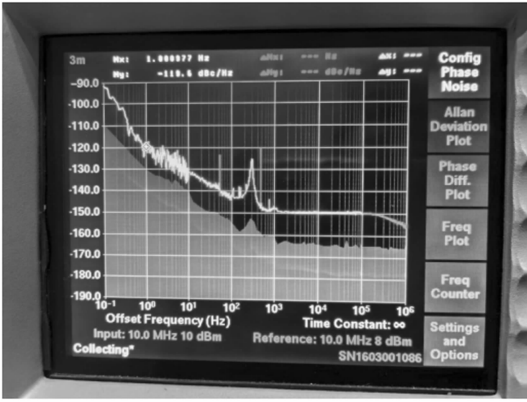


图 8 B 站址接收 10 MHz 信号架空光缆单次相位噪声测量结果 (2 级风力)

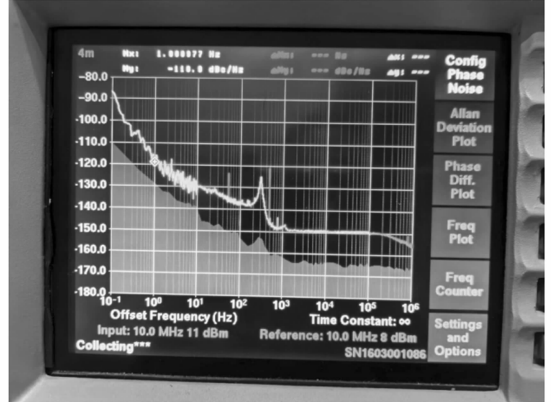


图 9 B 站址接收 10 MHz 信号埋地光缆单次相位噪声测量结果

表 3 B 站址 10 MHz 基准光传输设备相位噪声测试结果 (埋地光缆) dBc/Hz@1 Hz

序号	B 站址 10 MHz 基准光接收设备相位噪声		备注
	单次测量值	4 次平均值	
1	-118.9	-118.7	
2	-117.2		
3	-119.2		
4	-119.5		
5	-118.8	-118.78	
6	-119.4		
7	-117.7		
8	-119.2		
9	-120.8	-118.38	
10	-118.3		
11	-117.4		
12	-117.0		
13	-120.0	-119.15	
14	-119.3		
15	-118.9		
16	-118.4		
17	-118.6	-119	
18	-119.1		
19	-118.4		
20	-119.9		

同光芯, 对站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声、单向传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声进行测试。测得站址 B 单向传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声依次为 -104.89 dBc/Hz@1 Hz, -105.04 dBc/Hz@1 Hz, -105.15 dBc/Hz@1 Hz; 测得站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声依次为 -113.75 dBc/Hz@1 Hz, -115.25 dBc/Hz@1 Hz, -114.58 dBc/Hz@1 Hz。测试结果如表 4 所示。

表 4 单向传输设备与双向传输设备相位噪声测试结果 (埋地光缆) dBc/Hz@1 Hz

序号	单向传输设备相位噪声		10 MHz 基准光接收设备相位噪声	
	单次测量值	4 次平均值	单次测量值	4 次平均值
1	-104.57	-104.89	-113.4	-113.75
2	-105.82		-113.8	
3	-104.92		-113.7	
4	-104.24		-114.1	
5	-105.41	-105.04	-115.0	-115.25
6	-103.91		-114.3	
7	-104.89		-114.7	
8	-105.96		-117.0	
9	-105.94	-105.15	-116.7	-114.58
10	-105.28		-114.5	
11	-104.83		-114.0	
12	-104.56		-113.1	

综上所述, 均是在 5 级风力情况时, 架空光缆条件下站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备相位噪声依次为 -114.75 dBc/Hz@1 Hz, -115.8 dBc/Hz@1 Hz (详见 4.1 节测试结果), 与埋地光缆相比相位噪声恶化了 4 dB 左右。

4.3 埋地光缆情况下单向传输与相位补偿对比试验

站址 A 至站址 B 第二条光纤链路全程为埋地光缆, 在该条件下, 单向传输方案与相位补偿方案进行对比测, 测试时使用相同的基准源, 测试光纤链路为同一根光缆中不

埋地光缆条件下, 10 MHz 基准光传输设备输出 10 MHz 相位噪声比已建接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声指标高 9.5 dB。

4.4 架空光缆情况下单向传输与相位补偿对比试验

站址 A 至站址 B 第一条光纤链路包含约 30 km 架空光缆和 100 km 埋地光缆, 在该条件下, 对站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声、单向传输设

备输出 10 MHz 信号相位噪声进行测试, 测试过程中室外风力在 4 级, 同时有大风蓝色预警, 平均风力可达 6 级, 阵风 7 级以上, 测试时使用相同的基准源, 测试光纤链路为同一根光缆中不同光芯。

测得站址 B 单向传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声依次为 $-82.01 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, $-82.13 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, $-81.5 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$; 测得站址 B 中 10 MHz 基准光接收设备输出 10 MHz 信号相位噪声依次为 $-111.18 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, $-109.93 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$, $-108.95 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$ 。测试结果如表 5 所示。

表 5 单向传输设备与双向传输设备相位噪声测试结果
(架空光缆) $\text{dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$

序号	单向传输设备相位噪声		10 MHz 基准光接收设备相位噪声	
	单次测量值	4 次平均值	单次测量值	4 次平均值
1	-81.54	-82.01	-111.7	-111.18
2	-82.31		-112.1	
3	-82.59		-110.8	
4	-81.6		-110.1	
5	-82.38	-82.13	-109.1	-109.93
6	-81.76		-109.8	
7	-81.94		-110.9	
8	-82.45		-109.9	
9	-81.57	-81.50	-110.5	-108.95
10	-82.32		-108.6	
11	-81.76		-108.7	
12	-80.33		-108.0	

通过上述结果可以看出, 架空光缆条件下, 10 MHz 基准光传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声比单向传输设备输出 10 MHz 信号相位噪声指标高 28 dB。

5 结束语

为满足远距离站间时频同步需求, 采用基于电子共轭相位补偿的光纤频率传递技术, 设计了光纤双向频率传输设备, 在架空光缆和埋地光缆上进行对照试验, 架空光缆相对埋地光缆传递相位噪声指标恶化 4 dB, 单向传输设备受晃动和温度变化影响在架空光缆传递相较于埋地光缆相位噪声结果恶化 23 dB; 在架空光缆情况下, 双向频率传输设备相比单向传输设备相位噪声结果提高 28 dB。基于电子相位共轭的频率传递技术可以广泛应用于分布式雷达、分布式守时系统及航天测控等系统中, 解决架空光缆传递频率信号引入的相位噪声, 实现多站间高稳定频率信号传递。

参考文献:

[1] 蒋燕义. 超窄线宽激光及其在光钟中的应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
 [2] 周兵. 北斗卫星导航系统发展现状与建设构想 [J]. 无线电

工程, 2016, 46 (4): 1-4.
 [3] 杨辉, 蔚保国, 王正勇, 等. 空间信息网络时间同步技术研究 [J]. 无线电工程, 2018, 48 (3): 173-177.
 [4] 刘兰. RoF 链路及系统性能改善的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
 [5] 王力军. 超高精度时间频率同步及其应用 [J]. 物理, 2014, 43 (6): 360-363.
 [6] 张佳朋. 基于锁相环的光纤微波频率传递技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
 [7] 熊慎伟, 陈国帅. 光缆架空对模拟信号传输性能的影响 [J]. 光通信技术 2019, 43 (4): 38-41.
 [8] 朱玺. 光纤时间频率同步网络技术应用 [D]. 北京: 清华大学, 2016: 53-88.
 [9] 王目光, 张健勇. 光纤通信原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
 [10] 韩华. 卫星导航系统中的高精度时间同步误差分析与仿真 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.
 [11] 王茂磊, 王棋萍, 刘魁星. 一种卫星双向时间同步系统故障定位方法 [J]. 无线电工程, 2020, 50 (5): 362-367.
 [12] 张金涛, 魏海涛, 李隽, 等. 车载卫星双向时间同步系统研究 [J]. 无线电工程, 2016, 46 (11): 51-54.
 [13] 李得龙, 程清明, 张宝富, 等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51 (1): 58-64.
 [14] 何宁, 廖欣. 光纤弯曲损耗对信号传输的影响与分析 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2007, 27 (4): 259-262.
 [15] KAMIYA M, IKEDA H, SHINOHARA S. Analog data transmission through plastic optical fiber in robot with compensation of errors caused by optical fiber bending loss [J]. IEEE Trans. Indus. Electron, 2001, 48 (5): 1034-1037.
 [16] 万瑾, 黄元庆. 应力诱导单模光纤双折射的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2002 (Z3): 111-113.
 [17] KUMAGAI M, FIJIEDA M, GOTOH T, et al. Development of frequency transfer via optical fiber link at NICT [J]. 40th annual Precise time and Time Interval (PTTI) Meeting, Reston, VA, USA, 2008, 12: 125-134.
 [18] LOPEZ O, AMY-KLEIN, C DAUSSY, et al. 86 km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer [J]. European Physical D, 2008, 48 (1): 35-41.
 [19] 李孝峰, 梁双有, 张首刚. 光纤时间频率传输数字相位补偿方法 [J]. 时间频率学报, 2009, 32 (2): 115-119.
 [20] FUJIEDA M, KUMAGAI M, GOTOH T, et al. Ultra-stable frequency dissemination via optical fiber at NICT, Istm-mentation and Measurement, IEEE, 2009, 58 (4): 1223-1228.
 [21] 谢勇, 赵大勇, 尹继凯, 等. 基于电子相位补偿的光纤频率传递技术 [J]. 无线电通信技术, 2022, 48 (3): 534-540.
 [22] 刘杰. 光纤光学频率传递研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
 [23] 陈瑞昊. 光纤频率传递系统中的光学相位噪声补偿方案的优化与实现 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.