

# 激光与光电子学进展

## 远距离光纤时频信号传递研究进展

谭小容<sup>1,2</sup>, 许江宁<sup>1</sup>, 吴苗<sup>1\*</sup>, 何泓洋<sup>1</sup>, 陈丁<sup>1,2</sup>, 梁益丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033;

<sup>2</sup>九江学院电子工程学院, 江西 九江 332005

**摘要** 光纤具有损耗低、稳定性高、抗干扰能力强等优点,在远距离、高精度、高可靠时频传输系统建设中起到了突出作用。梳理了远距离光纤时间频率传输系统实施方案和相关研究成果,并分析了双向时延不对称性和各种噪声对传递精度、稳定度、传输距离的影响。此外,提出了光纤时频传输网与现有光纤通信网络融合的下一步发展研究的建议。

**关键词** 光纤光学; 光纤网络; 时频传递; 光放大器

中图分类号 TN929.11

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0500006

### Research Progress of Long-Haul Fiber-Optic Time-Frequency Transmission

Tan Xiaorong<sup>1,2</sup>, Xu Jiangning<sup>1</sup>, Wu Miao<sup>1\*</sup>, He Hongyang<sup>1</sup>, Chen Ding<sup>1,2</sup>, Liang Yifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Electrical Engineering, The Chinese People's Liberation Army Naval University of Engineering,

Wuhan, Hubei 430033, China;

<sup>2</sup>School of Electronic Engineering, Jiujiang University, Jiujiang, Jiangxi 332005, China

**Abstract** Optical fiber has the advantages of low loss, high stability, and strong anti-interference ability, which plays an outstanding role in the construction of long-distance, high-precision, and highly reliable time-frequency transmission system. This paper combs the implementation scheme and related research results of the long-distance optical fiber time-frequency transmission system, and analyzes the influence of bidirectional delay asymmetry and various noises on the transmission accuracy, stability, and transmission distance. In addition, this paper puts forward the next development research suggestion for the fusion of optical fiber time-frequency transmission network and existing optical fiber communication network.

**Key words** fiber optics; optical fiber network; time-frequency transmission; optical amplifier

## 1 引 言

随着互联网和自动控制设备逐渐覆盖生活中的每一个角落,时间频率传递技术成为设备协同工作甚至是整个社会正常运转的重要保证<sup>[1-3]</sup>。高精度远距离时频传输系统已经被广泛应用于日益庞

大、分布化程度越来越高的电力通信、工业自动化、交通运输系统等国防建设和国民经济相关领域<sup>[4-6]</sup>。长波授时是较早发展的授时技术之一,该技术传输距离远、时延稳定<sup>[7]</sup>,由于其传播路径复杂以及气象条件实时变化,长波罗兰-C(Loran-C)的时间同步精度为微秒量级,每天频率稳定度为 $10^{-12}$ <sup>[8]</sup>。卫星

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-02; 录用日期: 2021-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(41804076)、湖北省自然科学基金(2018CFB544)、国家重点研发计划(2016YFB0501700, 2016YFB0501701)

通信作者: \*wumiao9387@163.com

双向时间传递和全球定位系统共视是目前最常见的授时手段,传输距离可达上万千米,但是由于卫星轨道波动、大气温度变化、终端环境不稳定等因素的影响<sup>[9-12]</sup>,其时间同步精度为纳秒量级,每天的频率稳定度最高可达 $10^{-15}$ <sup>[8]</sup>。然而,随着科技的发展,基于长波和卫星的时频传递方式无法满足稳定度高达 $10^{-18}$ 量级的原子钟比对、时间频率播发标准、量子物理以及武器装备等其他高精度、高可靠性应用领域的需求。光纤的波导传播相比于自由空间,能够确保传播延迟的稳定性、传播路径的确定性和系统较高的信噪比。光纤信道所具有低损耗、大带宽、高稳定、抗干扰等优点<sup>[13]</sup>,能够为高精度、高可靠性时频信号远距离传递提供强有力的保障。

光纤时间频率传递技术来自美国国家航空航天局(NASA)对数千千米距离无衰减传递时间频率标准信号的需求<sup>[1]</sup>。随后多个国家和机构参与研究,特别是2000年以后,更是掀起了利用光纤进行时间频率传递研究的热潮<sup>[14]</sup>。在国外,2010年,Smotlacha等<sup>[15]</sup>在744 km的实地光纤环路上,利用波分复用双向时间比对的方法实现了时间同步传输,测得时间稳定度为8.1 ps/(500 s)。2013年,Śliwczynski等<sup>[16]</sup>利用双向掺铒光纤放大器作为中继,采用波分复用环回法在480 km缠绕光纤上实现了稳定度为 $10^{-17}$  s/d的时间传递,并将该系统安装在420 km实地光纤链路上,得到的稳定度优于50 ps/s。2016年,Dierikx等<sup>[17]</sup>在274 km的光纤链路上采用双波单纤方式进行时间频率传递,得到约为45 ps/s的时间传递稳定度和约为80 ps/s的频率传递稳定度<sup>[17]</sup>。国内方面,2016年,上海交通大学吴龟灵等<sup>[18]</sup>采用同纤同波双向时分复用和单向光放大器级联方式在实验室6000 km等效长度的光纤上获得优于190 ps/s和61 ps/( $10^5$  s)的时间传输稳定度以及70 ps的时间传输精度的测量结果。2017年,清华大学Yuan等<sup>[19]</sup>在30 km实验室光纤上,采用双向比对法实现了多路由光纤时间同步,得到100 ps量级的同步精度测量结果。2020年,中国人民解放军海军工程大学Chen等<sup>[20]</sup>在700 km实验室光纤上,采用环回法得到时间传输稳定度为47.5 ps/( $10^4$  s)的测量结果。除此之外,美国、德国、法国、日本等其他国家和国内北京大学、中国科学院等研究机构也在光纤时频传递方面进行了深入研究并实现了不同传递方案的时频传输<sup>[2,21-27]</sup>。

对比各个团队的系统组成和研究成果发现,传输系统的组成部件、链路的光纤或波长数、单双向或环回比对法等都是构建远近距离光纤时间频率传递系统需要考虑的关键点。不同的传递方案能够获得不同的传递精度、稳定性和传输距离。为了深入研究远距离时频传递性能指标的具体影响因素,本文对目前国内外已经实施的四种主要的远距离光纤时间频率传输系统的原理、拓扑结构、传输时延等方面进行了详细分析并得出相关结论。

## 2 远距离光纤时频传递

通常情况下,短距离光纤时频传递不需添加补偿器件就能获得较高性能;对于较长距离,需要在传输链路中增加数个中继设备以补偿光纤损耗。光放大器可以补偿光纤链路损耗,是时频传输拓展距离的手段之一<sup>[28]</sup>。引入放大器后,可能会因双向时延不对称和增加的噪声而影响性能指标。为了保证整个系统具有较好的时延对称性、较高的信噪比和较远的传输距离,传输方案的制订以及光放大器的设计和选择都是设计远距离光纤时间频率传递方案的关键环节。

由于传输介质热灵敏性或机械应力会引起较大双向传播延迟差,大多数基于光纤的时间频率传递采用同一波长信号在相同光纤、同一波长信号在两条平行光纤以及两路波长信号在同一根光纤双向传输方案。这里所指的光纤是完全指定专用于时间频率传递的光纤(暗光纤法),或者是在密集波分复用(DWDM)网络中与电信业务共享光纤(暗信道法)。

综合考虑传递方式和信号放大以及时间频率信号与电信业务数据共享传输链路,远距离光纤时频传递的方案有很多种,在此主要对目前已经实施的四种方式进行分析。这四种方式分别是同纤同波-光放大器(TSFSW-OA)级联、双纤同波-光放大器(TDFSW-OA)级联、同纤双波-光放大器(TSFDW-OA)级联以及逐级驯服级联。每种方式都是以获得更好的时延对称性和噪声抑制能力为目的,从而构建一个稳健可靠的远距离光纤时频传递网。

### 2.1 TSFSW-OA 级联传递

同纤同波-双向光放大器级联链路由主站和从站两个终端授时设备、 $N$ 个光放大器(OA)和 $N+1$ 段光纤组成,可以采用暗光纤法也可以采用暗信道

法。这种传递方式的基本思想是主从两个授时设备在不同时刻,通过同一根光纤或同一个信道向对

方发送和接收强度调制光信号来交换精确的时间和稳定的频率信息。图 1 是级联示意图。



图 1 TSFSW-OA 级传递示意图

Fig. 1 Schematic of cascade transmission of TSFSW-OA

主站授时设备将标准时间频率信号调制到波长为  $\lambda_{TF}$  的光载波上,载波信号沿着暗光纤或暗信道传输一定距离后到达第一个中继站,经双向光放大器放大再生后继续往下传输、放大再生,直到从站授时设备接收到信号。从站接收到信号后延迟一定时间并调制到相同波长上再经过相同的传输和放大方式返回主站。假设从站的延迟时间为  $T_d$ ,

主站和从站本地定时信号与接收定时信号之间的时间间隔分别为  $T_{MS}$  和  $T_{SM}$ ,主站和从站的发送时延分别为  $\tau_{MT}$  和  $\tau_{ST}$ ,主站和从站的接收时延分别为  $\tau_{MR}$  和  $\tau_{SR}$ ,主站到从站、从站到主站光纤传播路径总时延分别为  $\tau_{MS}$  和  $\tau_{SM}$ ,双向中继设备总时延之和分别为  $\sum_{i=1}^N \tau_{MS}^i$  和  $\sum_{i=1}^N \tau_{SM}^i$ ,两站的钟差  $\Delta T$  可表示为

$$\Delta T = \frac{1}{2} \left[ (T_{MS} - T_{SM} - T_d) + (\tau_{MS} - \tau_{SM}) + (\tau_{MT} + \tau_{SR}) - (\tau_{ST} + \tau_{MR}) + \sum_{i=1}^N (\tau_{MS}^i - \tau_{SM}^i) \right]. \quad (1)$$

(1) 式中  $T_{MS}$ 、 $T_{SM}$  和  $T_d$  可以用高精度的时间间隔测试仪实时精确测量得到,  $\tau_{MT}$ 、 $\tau_{ST}$ 、 $\tau_{MR}$  和  $\tau_{SR}$  可以精确标定。将钟差简化为可测量和标定时延差  $\Delta\tau_{meas}$ 、传播时延差  $\Delta\tau_{trans}$  及中继设备处理时延差  $\Delta\tau_{amp}$  三部分值之和,分别表示为  $\Delta\tau_{meas} = (T_{MS} - T_{SM} - T_d) + (\tau_{MT} + \tau_{SR}) - (\tau_{ST} + \tau_{MR})$ 、 $\Delta\tau_{trans} = \tau_{MS} - \tau_{SM}$ 、 $\Delta\tau_{amp} = \sum_{i=1}^N (\tau_{MS}^i - \tau_{SM}^i)$ 。简化后的钟差表达式为

$$\Delta T = \frac{1}{2} (\Delta\tau_{meas} + \Delta\tau_{trans} + \Delta\tau_{amp}). \quad (2)$$

由于双向信号以同一个波长为载波在同一秒内的不同时段,在相同光纤或信道中传输,可以最大限度地消除温度变化引起的光纤长度变化和折射率变化带来的时延波动。但是,在远距离信号传输中,由于主从两站距离跨度较大、地域温差变化不同,没法消除因温度变化引起的主从两站激光器输出波长漂移带来的时延波动差,从而造成双向传播时延不对称,此时不能视  $\Delta\tau_{trans} = 0$ 。增加中继设备后,理论上可以通过精确测量仪器对链路中各个器件的双向时延差  $\Delta\tau_{meas}$  从而进行标定,但在远距离系统中设备数量较多且分布在不同地方,标定的难度和成本很高,且标定的精度还随着测量误差的积累而恶化<sup>[18]</sup>。中继设备处理时延差  $\Delta\tau_{amp}$  主要取决于光放大器的类型,可选择双向掺铒光纤放大器 (Bi-EDFA) 或单通道双向光放大器 (SPBA)<sup>[29]</sup>。Bi-EDFA 的本质是使用两个常见的单向掺铒光纤

放大器 (EDFA) 分别放大两个方向的信号。尽管单向 EDFA 两端的光隔离器能够有效地避免反向散射噪声进入放大器引起多次放大对时频传输性能产生不利影响,但是由于两个方向信号在不同掺铒光纤内放大,因此会引入额外的双向链路不对称时延。SPBA 是将单个 EDFA 两端的光隔离器用双向光滤波器替代,让双向信号在同一段掺铒光纤内放大,但是由于 SPBA 没有隔离器,后向散射噪声会进入光放大器进一步放大,恶化系统性能,并且还会影响放大器增益及工作的稳定性<sup>[30-31]</sup>。为此,上海交通大学吴龟灵等<sup>[18]</sup>提出了一种单向放大单纤双向传输的中继放大方法,这种中继方案既能解决反向噪声造成的问题又能保证双向信号在同一段掺铒光纤内放大,因此可以将  $\Delta\tau_{amp}$  近似为 0。

国内外多家研究机构采用同纤同波-双向光放大器级联传递方式在实验室完成了远距离时频传输,并获得很高的时间传输精度。如文献<sup>[18]</sup>中,采用  $\lambda_{TF} = 1549.32 \text{ nm}$  为载波,SPBA 型放大器,在 2000 km 的实验室光纤环路上,完成了稳定度优于 89 ps/s 和 23 ps/(10<sup>5</sup> s) 的时间传输。该团队还采用单向放大单纤双向传输方案在实验室 6000 km 等效长度光纤上获得优于 190 ps/s 和 61 ps/(10<sup>5</sup> s) 的时间传输稳定度及 70 ps 的时间传输精度。中国科学院国家授时中心以自行研制的工程样机,载波为  $\lambda_{TF} = 1542.936 \text{ nm}$ ,放大器为 Bi-EDFA,在长度约为

550 km 的实验室光纤链路上得到时间同步标准差为 18.4 ps, 时间稳定度为 13 ps/s 和 2.92 ps/(10<sup>3</sup> s)。不仅如此, 该团队以南京为起点, 在沿途 10 个城市共计 871.6 km 实地光纤链路上进行了时间同步, 测得时间同步标准差为 29.8 ps, 时间稳定度为 15.1 ps/s 和 3.85 ps/(10<sup>3</sup> s)<sup>[9]</sup>。

### 2.2 TDFSW-OA 级联传递

TDFSW-OA 级联传递方式的基本思想与单纤同波级联方式一样, 只是为了与现有光通信网络共享信道资源, 该传输方式中双向时频信号经过的是同一光缆中两根平行光纤。这样既有效地利用信

道资源, 又很容易与现有光纤传输网兼容, 不需要再为高精度时间频率信号传输建设专用网络。图 2 是这种传递方式与双向放大级联的示意图。图中双三角形是双向光放大器(BOA)(为了画图方便, 将两个传输方向所用的 BOA 分开画, 事实上的每个中继站只有一个 BOA), 专门用来放大时频信号; 单三角形是常见的 EDFA, 用来放大光纤传输网中的业务信号; 梯形框是光分插复用器(OADM), 用来分离或复用时频信号和电信业务信号; 粗实线是传输网的光缆, 传输所有信号; 粗虚线用来传输电信业务信号; 细实线专用来传输时频信号。

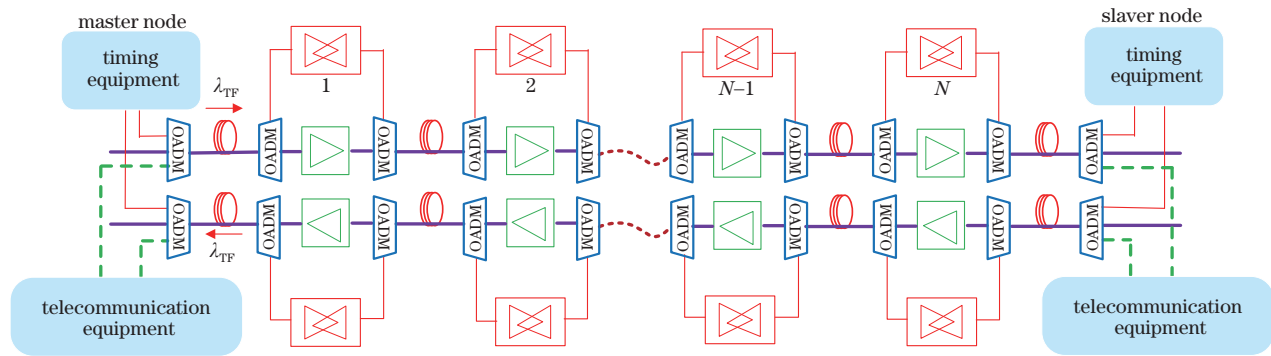


图 2 TDFSW-OA 级联传递示意图

Fig. 2 Schematic of cascade transmission of TDFSW-OA

主站的授时设备输出只占用一个波长信道 λ<sub>TF</sub> 的时频信号与包含多个波长信道的业务信号复用后进入 OADM 的光纤端, 经过一定距离传输后到达第一个中继站, 然后通过中继站的 OADM 分离出时频信号光载波 λ<sub>TF</sub> 并采用 BOA 放大。电信业务信号有选择性地从下行端输出或从上行端输入所需的波长信道, 与本地无关的波长信道经过单向光放大器放大后和上路波长信道以及 λ<sub>TF</sub> 经 OADM 复用后进入下一段光纤和下一个中继设备, 直到时频信号到达从站的授时设备。从站收到时间频率信号后, 通过平行光缆的另一根光纤以相同的波长信道将时频信号返回主站。

相比于同波单纤-光放大器级联传递方式, 由于双向时频信号在不同光纤中传输, 从站接收到信号后不需要延迟 T<sub>d</sub>, 可测量和标定时延差 Δτ<sub>meas</sub> = (T<sub>MS</sub> - T<sub>SM</sub>) + (τ<sub>MT</sub> + τ<sub>SR</sub>) - (τ<sub>ST</sub> + τ<sub>MR</sub>)。时频信号中继放大设备一般选用 Bi-EDFA, 所以钟差中依然存在中继设备处理时延差 Δτ<sub>amp</sub>。同种波长信号在不同光纤中传输虽然克服了后向散射光对传输精度的影响, 也消除了不同波长引起的色散时延误差, 但是双向传播时延差 Δτ<sub>trans</sub> 不能忽视。为了解决

两根不同光纤导致的不对称时延的问题, 可以使用两条初始参数相同的并行光纤, 采用多个时间间隔计数器和比对设备在实验环境下测量出钟差值后再利用钟差公式估计链路不对称时延值<sup>[6,15]</sup>。

目前国内外学者们致力于将高精度光纤时频传输系统与现有电信光纤网络兼容, 也就是将精确的时间信号和稳定频率信号与业务信号通过 WDM 在电信网中并行传输, 共享传输信道。捷克教育科研网利用这种方式在总长 550 km 的商用光纤传输链路中安装了 7 个 Bi-EDFA, 采用 32 号信道(中心波长为 1551.72 nm)传输时间信号, 在长达 8 个月的测量时间范围内获得 20 ps/(20 s) 的最佳时间传递稳定度<sup>[6]</sup>。

### 2.3 TSFDW-OA 级联传递

TSFDW-OA 级联传递方式利用波分复用器将时间频率信号和电信业务信号在同一根光纤的不同信道传输。一般情况下, 电信业务信号采用单向传输和单向放大, 时间频率信号采用双向传输和双向放大。在这种传递方式中, 主站以 λ<sub>TF</sub>、从站以 λ<sub>RF</sub> 同时向对方发送时间频率信号, 经过长距离传输、放大、复用解复用后到达对端, 通过两站的时间间

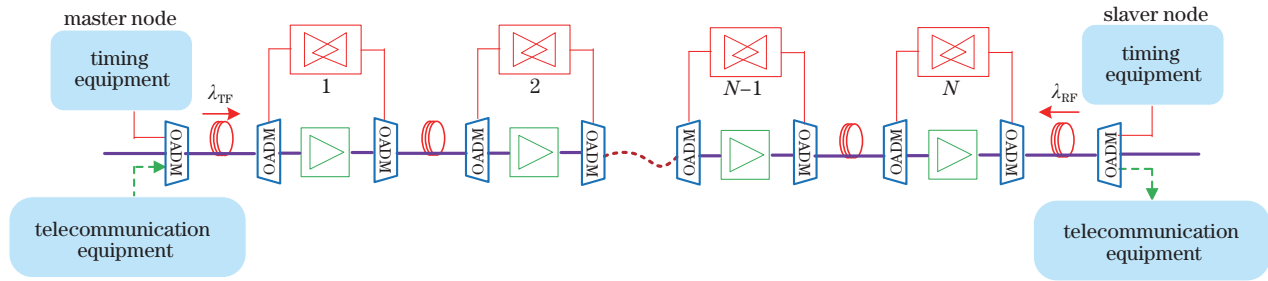


图 3 TSFDW-OA 级联传递示意图

Fig. 3 Schematic of cascade transmission of TSFDW-OA

隔计数器测量结果、器件时延标定结果以及光纤链路传输时延共同计算两站之间的钟差。图 3 给出了 TSFDW-OA 级联传递示意图。

TSFDW-OA 级联传递方式中主从两站的钟差表达式与(2)式相同,只是不包括延迟项  $T_d$ 。钟差公式中,链路器件的双向时延差  $\Delta\tau_{\text{meas}}$  可以通过精密器件进行标定;中继设备不论采用 Bi-EDFA 还是 SPBA 都是在不同的掺纤中放大,此时  $\Delta\tau_{\text{amp}} \neq 0$ ;由于双向传输波长不同,即使不考虑温度对光纤传输时延的影响也不能令  $\Delta\tau_{\text{trans}} = 0$ 。相比于 TSFSW-OA 级联方式,采用不同传输波长可以消除后向反射光对传输系统精度的影响,但是波长差异会引起色散时延误差,而且这种误差会随着链路的长度增加变得越为明显。为此,陈法喜等<sup>[23]</sup>提出一种具有色散误差修正功能的同纤双波传输方法,并利用自行研制的工程样机先后在 800 km 实验室光纤链路和 1085 km 实地光纤链路上进行了测试,在实地光纤上测得的时间同步标准差为 18 ps, 稳定性为  $5.4 \text{ ps}/(4 \times 10^4 \text{ s})$ 。

以上三种级联方式理论上都可以在中继站外接授时设备实现多站点高精度时频同步,如吴龟灵等<sup>[18]</sup>利用轮流交替时分复用法,控制各个站点内授时设备的  $T_d$ ,使不同站点发送的光信号在时域上错开,最终实现各个站点与主站的时间同步。文献[9]设计了一种包含授时设备地址的时码帧结构,让主站以时分多址的方式对其他站点进行轮询同步,在实验室搭建的 550 km TSFSW-OA 级联系统上同时

测得 50, 300, 550 km 处的时间同步标准差分别为 16.7, 16.8, 18.4 ps, 时间稳定度分别为 13.2 ps/s 和  $1.78 \text{ ps}/(10^3 \text{ s})$ 、13.8 ps/s 和  $2.09 \text{ ps}/(10^3 \text{ s})$ 、13.0 ps/s 和  $2.92 \text{ ps}/(10^3 \text{ s})$ 。

采用光放大器与多段光纤级联传递远距离时频信号的三种方式各有利弊。同纤同波的双向传播时延对称,但会因为后向散射光影响传递精度;同纤双波避免了后向散射影响,但会因为波长差引起色散时延误差;双纤同波同时考虑了后向散射和色散时延误差但会因为不同光纤导致传播时延不对称。从中国、波兰、法国、荷兰等多家研究机构的实地光纤链路测试结果可以看出,三种传递方式的性能相当,一般情况下几百千米的传输距离,其时间同步标准差为几十皮秒量级,短期稳定度为每秒几十皮秒,长期稳定度为几个皮秒。

#### 2.4 逐级驯服级联传输系统

逐级驯服级联方式采用非全光中继方法,图 4 是逐级驯服级联示意图。其基本思想是,远距离主从两站之间所有中继站不使用放大器补偿损耗,而采用与从站相同的授时设备将接收到的光信号转换为电信号,然后驯服本地时钟使其与主站同步后再转换为光信号传输到下一个中继。中继站的授时设备类似于交换机,既是主站又是从站,如 1 号中继的授时设备与主站同步时是从站,而与 2 号中继同步时是主站。所有站点的授时设备都能为本地提供用于下行同步的标准物理接口,既可多站点时间同步,又可组成多种时频网络拓扑结构。

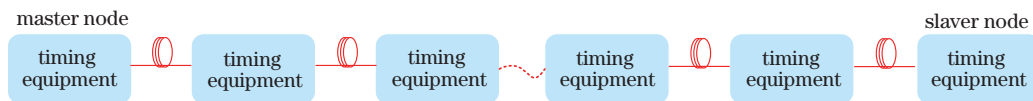


图 4 逐级驯服级联传递示意图

Fig. 4 Schematic of cascade transmission step by step taming

任意一对授时设备之间的时频同步方式可以选择双向或环回,可以是同一波长也可以双波长信

道。为了保证双向传播时延的对称性,一般采用单根光纤连接各个中继站。相比于其他级联方式,逐

级驯服系统结构中不需要中继放大器,所以钟差表达式可以只包括  $\Delta\tau_{\text{meas}}$  和  $\Delta\tau_{\text{trans}}$ 。

四川泰富地面北斗科技股份有限公司利用逐级驯服级联方式在远距离、多站点、高精度时间频率同步方面展开相关研究。该公司采用自制的 1 台 TFT3001 和 10 台 TFT1001 授时样机在实验室搭建了传输距离长达 1000 km 的总线型级联同步网。站点间采用双波长单纤环回同步方式。分别对传输距离为 100, 300, 1000 km 处的输出信号与主站的输入参考源进行为期 3 天的实时比对,测得最大时间差分别为 2.042 ns、1.911 ns、1.644 ns;最小时间差分别为 -1.124 ns、-1.383 ns、-4.599 ns;峰值分别为 3.166 ns、3.294 ns、6.243 ns。同时,在传输距离为 1305.65 km,经过 19 个站点的实地光纤链路上进行为期 9 天的测试,得到最大时间偏差 4.859 ns、最小为 -4.452 ns,峰值为 9.310 ns,精度为  $\pm 5$  ns 的测试结果,满足许多行业对时间同步精度优于  $\pm 10$  ns 的要求<sup>[32]</sup>。

时间频率信号经过多级放大或逐级驯服后都能将传输距离为几十千米的点对点系统拓展到几百千米甚至上千千米的端到端系统。而且,在上述四种级联传递系统的中继站增设授时设备及相关接口后还可以实现多站点授时。逐级驯服级联方式由于不需要考虑与电信网的融合性,结构简单、组网灵活,所以授时方式可以是双向也可以是环回,可以同纤同波,也可以同纤双波。但是,逐级驯服传递中时频基准信号传输到远端从站需要经过多级电光/光电转换,一方面在转换过程中容易造成信号损伤从而影响比对,另一方面会给整个比对过程带来大量不对称时延,从而影响时频授时精度。基于光放大器的 TSFSW-OA、TDFSW-OA 和 TSFDW-OA 三种级联传递方式可以将整个网络全面光纤化,主站与其他任何从站之间的传输和放大过程全部通过光路实现,中间不需要进行光信号和电信号间的转换,这样可以避免因光电转换带来更多的不对称时延影响同步精度。但是,基于光放大器级联传递方式的性能指标会随着放大器个数的增加而下降,文献[33-34]对此做了详细分析。

### 3 远距离光纤时间频率传递系统性能提升措施

对远距离光纤时间频率传递的关注点在于提高时间传递的精度和稳定度以及增加传输距离并

与现有光纤网络融合发展。不论传递方案设计还是光放大器选择,都需要考虑双向时延不对称性、噪声的抑制和损耗的补偿。同纤同波、双纤同波和双纤同波传递方式,BOA 和单向放大双向传输都可以最大限度地保证对称性。为了补偿光路对信号的衰减,远距离时频传输系统增加了光放大器、隔离器、滤波器、分插复用器等光学器件。这些器件对系统组成和性能的提升都是不可或缺的,但是会给系统引入额外的插入损耗和大量的随机噪声。其中,光纤接头端面反射噪声系数较小,可以采用防护措施加以抑制;光纤中的后向散射噪声(主要为瑞利散射)<sup>[14]</sup>、放大器产生的放大自发辐射(ASE)噪声以及放大器与光纤链路连接端端面的反射噪声是主要噪声源<sup>[35-36]</sup>。光放大器中一般都安装了光滤波器,通过滤波器可以滤除放大的光信号叠加到输出信号中的 ASE 噪声,但不能抑制进入放大器的后向散射噪声。

噪声信号和时频信号一起被放大,有些噪声甚至在同一放大器内多次振荡,导致时频信号增益减小,授时设备接收机信噪比明显降低,而且多级放大器累积的噪声会严重恶化时频信号的精度和稳定度。信噪比越低,接收机的误码率越高,时频传输出错的概率也越高。严重时还会导致授时设备中的锁相环锁定捕获失败而无法工作。因此,有必要对传输系统的噪声来源、信噪比测量和计算、信噪比与传输系统性能指标的定量关系做进一步研究。关于信噪比的计算和测量方法以及信噪比对时频传输系统的精度和稳定度的影响程度,国内外学者也展开相关研究。文献[33]给出了光纤链路长度和 Bi-EDFA 组成的传输矩阵,导出相关公式计算接收信噪比,并在由 4 个双向光放大器和 5 个总长达 420 km 的光纤段组成的 TDFSW-OA 级联实验室链路上进行了信噪比测量,得到测量信噪比和计算信噪比之间相差 2 dB。文献[34]给出光电、电光直接耦合的光纤时频传输系统,加入光放大器后接收信噪比和信噪比与阿伦标准偏差表达式,通过理论分析和实验验证发现,在 150 km 光纤链路中加入一个 Bi-EDFA 对时间传输精度的影响略为数十皮秒量级,秒稳定度影响为  $10^{-11}$  量级。文献[14]设置相关参数采用上面两个公式仿真得到 200 km 光纤链路配置一个 SPBA 情况下对时间比对的秒稳定度约为  $3.6 \times 10^{-11}$ ,在实验室光纤双向比对链路中的秒稳定度约为  $6.9 \times 10^{-11}$ 。

信噪比不仅影响时频传输系统精度和稳定度,而且还会影响接收端信号的误码率,信噪比越低误码率越高,传输出错的概率就越大。所以,逐级驯服级联方式避开放大器的使用,而基于光放大器的 TSFSW-OA、TDFSW-OA 和 TSFDW-OA 级联方式在任意时刻,单根光纤链路上只有单向传播光信号,这样可以避免由本地光源引起的单次后向散射与反射噪声对接收信号质量的影响。为了获得最佳性能,需要调整光放大器的增益以最小化由瑞利反向散射和放大自发辐射产生的噪声;需要估计主链路末端站点和中间站点处的信噪比;还需要考虑波长选择隔离器,它可以有意阻断反向散射信号传播,并在长距离光纤跨度中有效提高信噪比。信噪比最大化可以保证时频传输系统所需的安全冗余度,冗余度越宽,链路对难以预测的光纤路径衰减变化的鲁棒性就越高。

#### 4 远距离光纤时频网与电信网融合研究建议

虽然与现有光纤网络共享传输通道的远距离光纤时频传输系统在一定程度上能够节省设备资源,但由于现有光纤通信网的传输方式和光放大器等器件都是单向,而时频传输网的传递方案均采用双向方式以便满足双向时延对称性,因此时频传输网与现有光网络融合发展是远距离高精度时频传递技术的一大挑战。另外,不论是通过专用暗光纤还是与电信网络共享的专用通道或两者混合都是在独立的网络上进行时频传递,高成本的光纤租赁费用有可能是在网络上提供永久和可持续授时服务的另一障碍。

目前的研究结果表明,通信信号和时频信号共享传输能够获得较高的性能指标,但大部分方案都局限于实验室环境或在现有网络的小范围内建设和测试,要形成大规模远距离光纤时频传输系统还需要综合考虑各种影响因素。例如,电信网采用不同厂商不同类型的单模、多模光纤在不同铺设管道、架空、直埋光缆等异构环境中运行,所以对于不同的传输方案进行不同距离传输时,如何根据现场环境、器件参数、目标性能等指标较为科学地选择相对最佳的铺设方式、器件类型和数目,还需通过大量的测试、验证和评估来确定相应的准则。目前已有相关文献给出了传输系统稳定度与信噪比定量关系,但性能指标提升对系统的有源和无源器件

参数指标有什么具体要求还有待进一步地深入分析。

针对时频信号传递技术本身而言,有必要制订类似于网络时间协议(NTP)、精确时间协议(PTP)、白兔精确时间协议(WR-PTP)等基于光纤的标准通用协议。在网络覆盖范围方面,该协议能够适配多种信道后承载于不同体制光网络中,并辅以多种手段提升授时组网性能,以满足各领域时频同步应用需求。在业务方面,该协议能够集通信、授时、维护为一体在通用光纤网络上传输,形成可交互智能化时频同步网。在服务对象方面,该协议能够为专用、通用终端客户提供不同精度等级需求的时频同步业务。最终构建一个具有较强适应能力、灵活组网能力和易于管控的智能泛在的光纤授时体系。

#### 5 结束语

远距离光纤时频传输系统研究,对于多个国家守时实验室的原子钟比对、各种应用领域的网络和控制设备时间统一、高精尖、高可靠性行业的超精密参数测量等方面具有重要的作用。近些年来,世界各国的研究小组在高精度光纤时频传递技术研究中取得了长足的进步,时间同步精度由百纳秒到纳秒甚至更高;传递距离从几十千米到几百千米甚至上千千米;同步站点数由点到点到多站点;传输光纤由时频专用暗光纤到租赁电信网的光纤信道或两者混合;网络化拓扑结构由简单的线形到星形树形再到复杂的网状形;研究过程由实验室验证到商用网实测。但是,要想构建更为智能泛在的光纤时频传递系统仍有很多具体问题有待进一步研究。

#### 参 考 文 献

- [1] Yang W Z, Yang H L, Wang X Y, et al. High precision time and frequency integration transfer via optical fiber[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1579-1586.  
杨文哲, 杨宏雷, 王学运, 等. 高精度光纤时间频率一体化传递[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(7): 1579-1586.
- [2] Levine J. A review of time and frequency transfer methods[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): S162-S174.
- [3] Sliwczynski Ł, Kolodziej J. Bidirectional optical amplification in long-distance two-way fiber-optic time and frequency transfer systems[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,

- 2013, 62(1): 253-262.
- [4] Frank F, Stefani F, Tuckey P, et al. A sub-ps stability time transfer method based on optical modems[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(6): 1001-1006.
- [5] Deng X, Liu J, Jiao D D, et al. Coherent transfer of optical frequency over 112 km with instability at the 10-20 level[J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(11): 47-49.
- [6] Smotlacha V, Kuna A. Two-way optical time and frequency transfer between IPE and BEV[C]//2012 European Frequency and Time Forum, April 23-27, 2012, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2012: 375-378.
- [7] Liang Y F, Xu J N, Wu M, et al. Research progress on optical fiber time-frequency synchronization technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 050004.  
梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. 光纤时频同步技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 050004.
- [8] Yuan Y B. The research on fiber-based time and frequency dissemination and synchronization technique [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 7.  
袁一博. 光纤网络时间频率传输与同步技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2017: 7.
- [9] Chen F X, Zhao K, Zhou X, et al. High-precision long-haul fiber-optic time transfer between multi stations[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(20): 200701.  
陈法喜, 赵侃, 周旭, 等. 长距离多站点高精度光纤时间同步[J]. 物理学报, 2017, 66(20): 200701.
- [10] Zhang Y, Fang Y S. Research on optical fiber time-frequency transmission technology[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2021, 19(1): 54-60.  
张岩, 方云升. 光纤链路高精度时频传输及延迟补偿技术研究[J]. 光学与光电技术, 2021, 19(1): 54-60.
- [11] Petit G. The long term stability of EAL and TAI (revisited) [C]//2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, May 29-June 1, 2007, Geneva, Switzerland. New York: IEEE Press, 2007: 391-394.
- [12] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. Science, 2017, 358(6359): 90-94.
- [13] Chen D, Xu J N, Li Z Z, et al. Advancement in time synchronization technology using Bi-contrast methods in optical fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130004.  
陈丁, 许江宁, 李振中, 等. 光纤双向比对时间同步技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130004.
- [14] Qu H Y, Pan H L, Liu F R, et al. Status and trends of time and frequency transfer via optical fiber based on bibliometrics[J]. Science Focus, 2017, 12(3): 24-32.  
瞿海燕, 潘慧玲, 刘芙蓉, 等. 光纤时间频率传递研究发展态势的文献计量分析[J]. 科学观察, 2017, 12(3): 24-32.
- [15] Smotlacha V, Kuna A, Mache W. Time transfer using fiber links[C]//EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, April 13-16, 2010, Noordwijk, Netherlands. New York: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [16] Śliwczynski 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.
- [17] Dierikx E F, Wallin A E, Fordell T, et al. White rabbit precision time protocol on long-distance fiber links[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(7): 945-952.
- [18] Wu G L, Chen J P. Ultra-long haul high-precision fiber-optic two way time transfer[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(16): 99-103.  
吴龟灵, 陈建平. 超长距离高精度光纤双向时间传递 [J]. 科技导报, 2016, 34(16): 99-103.
- [19] Yuan Y B, Wang B, Gao C, et al. Fiber-based multiple access timing signal synchronization technique [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(4): 040601.
- [20] Chen D, Xu J N, Liang Y F, et al. Long-distance time transfer in optical fiber networks using a cascaded timing technology[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1-10.
- [21] Amemiya M, Imae M, Fujii Y, et al. Simple time and frequency dissemination method using optical fiber network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(5): 878-883.
- [22] Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, et al. Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the Internet fiber network[J]. Optics Express, 2012, 20(21): 23518-23526.
- [23] Chen F X, Zhao K, Li B, et al. High-precision dual-wavelength time transfer via 1085-km telecommunication fiber link[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7):



070702.  
陈法喜, 赵侃, 李博, 等. 基于 1085 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): 070702.
- [24] Liang Y, Yi Y J, Zhu P, et al. Single-shot synchronous measurement technique for multichannel ultra-short pulse lasers based on all-fiber spectral interference[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1604003.  
梁彦, 易友建, 朱坪, 等. 基于全光纤光谱干涉的多路超短脉冲时间同步单次测量技术[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1604003.
- [25] Wojbor Bogacki I, Turza K, Binczewski A, et al. CLONETS-clock network services: optical-fiber network for clock services in Europe: recent progress [C]//2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), April 14-18, 2019, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2019: 1-4.
- [26] Łukasz Ś, Przemysław K, Karol S. Real-time performance monitoring of fiber optic long-distance time and RF frequency transfer links[C]//2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), April 4-7, 2016, York, UK. New York: IEEE Press, 2016: 1-2.
- [27] Guillou-Camargo F, Ménoret V, Cantin E, et al. First industrial-grade coherent fiber link for optical frequency standard dissemination[J]. Applied Optics, 2018, 57(25): 7203-7210.
- [28] Śliwczyński Ł, Krehlik P, Kołodziej J, et al. Fiber optic time transfer for UTC-traceable synchronization for telecom networks[J] IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(1): 66-73.
- [29] Li X Y, Zhu Y, Lu L, et al. Single path bidirectional amplifier used in two-way time transfer via optical fiber link[J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, 35(3): 17-20.  
李晓亚, 朱勇, 卢麟, 等. 光纤双向时间比对中的单通道双向放大器研究[J]. 军事通信技术, 2014, 35(3): 17-20.
- [30] Wu G L, Hu L, Zhang H, et al. A round-trip fiber-optic time transfer system using bidirectional TDM transmission[C]//2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, April 12-16, 2015, Denver, CO, USA. New York: IEEE Press, 2015: 773-776.
- [31] Amemiya M, Imae M, Fujii Y, et al. Precise frequency comparison system using bidirectional optical amplifiers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 631-640.
- [32] Li Z W, Wang K, Long B. Implementation of 5G oriented high precision time synchronization network [J]. Telecommunications Technology, 2018(5): 43-46.  
李忠文, 王科, 龙波. 面向 5G 的高精度时间同步网实现方案[J]. 电信技术, 2018(5): 43-46.
- [33] Śliwczyński Ł, Krehlik P, Salwik K. Modeling time and frequency fiber links with bidirectional amplifiers using transmission matrixes[C]//2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), July 9-13, 2017, Besancon, France. New York: IEEE Press, 2017: 710-711.
- [34] Cheng Q M, Zhang B F, Lu L, et al. The performance impact study about Bi-direction EDFA to time transfer system over long-distance optical fiber[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(3): 50-52.  
程清明, 张宝富, 卢麟, 等. 双向 EDFA 对长距离光纤时间传递影响研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(3): 50-52.
- [35] Chen X J, Wang J, Wu C Q. Study on bit error rate degradation caused by EDFA crosstalk in DWDM system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806005.  
陈祥敬, 王健, 吴重庆. DWDM 系统中 EDFA 串扰引起的误码率恶化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1806005.
- [36] Huang Z M, Shu Q, Chu Q H, et al. All fiber single mode fiber optical amplifier of 5 kW narrow linewidth [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0616001.  
黄智蒙, 舒强, 楚秋慧, 等. 5 kW 窄线宽全纤化单模光纤放大器[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0616001.