

高精度时钟抗光纤振动传输技术

何翠平¹,熊先越¹,夏爱军²,钟 昆¹

(1.中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004; 2.火箭军装备部驻北京地区第八军事代表室,北京 100085)

摘要:光纤是远距离传输时钟信号的重要途径之一,光纤振动会对光纤的偏振模色散产生变化,从而影响时钟信号的传输性能。为了降低光纤振动对时钟传输的影响,详细分析了光纤振动对时钟信号传输劣化的原因,提出了一种新的抗光纤振动传输技术方案,并通过实验方法验证了该技术方案可以改善相位噪声 10~15 dB。

关键词:高精度时钟;光传输;相位噪声;抗光纤振动;偏振模色散

中图分类号:TN929.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)07-0015-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.07.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High precision clock anti fiber vibration transmission technology

HE Cuiping¹, XIONG Xianyue¹, XIA Aijun², ZHONG Kun¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. The 8th Military Representative Office of Rocket Army Equipment Department in Beijing area, Beijing 100085, China)

Abstract: Fiber is one of the important ways to transmit clock signal over a long distance. The vibration of fiber will change the polarization mode dispersion of fiber, which will affect the transmission performance of clock signal. In order to reduce the impact of fiber vibration on clock transmission, the reasons of clock signal transmission degradation caused by fiber vibration are analyzed in detail, and a new anti fiber vibration transmission technology scheme is proposed. The experimental results show that the phase noise can be improved by 10~15 dB.

Key words: high precision clock; optical transmission; phase noise; anti fiber vibration; polarization mode dispersion

0 引言

时钟信号对于数字系统的重要性不言而喻,它是所有程序代码运行、数据传输以及时序同步的核心和基准,对于长距离的数字光传输系统,时钟传输的质量直接影响到数字光传输系统的带宽和误码率。

光缆是远距离时钟传输的主要介质,地理光缆受环境影响小,对时钟的传输影响也较小;架空光缆对数字光传输系统时钟的影响则比较大,主要体现在时钟抖动增加、码间串扰现象加剧,造成传输带宽下降或误码率增加等问题。解决措施通常有优化线路编码码型、加入线路均衡和改进调制解调方式等技术手

收稿日期:2020-05-26。

基金项目:中电 34 所技术创新项目(G134002019B001)资助。

作者简介:何翠平(1975—),男,本科,高级工程师,广西、河北两省科技厅专家库技术专家,现就职于中国电子科技集团公司第三十四研究所,主要研究方向是模数混合信号的远距离光传输,先后参与多项国家重点背景项目光传输设备研制工作。



段,这些措施适用于同步数字光传输系列(SDH)、分组传送网(PTN)及类似同步数字光传输系统。对于一些专用的光传输系统,如多基站相控阵雷达、深空探测以及光纤授时等系统,传输带宽和误码率并不是系统的核心指标,时钟传输的频率稳定性和相位噪声才是关注焦点。这些系统对时钟的抖动要求远高于一般的数字通信系统,因为传输时钟的频率稳定度会直接影响目标探测的精度或范围。从本文作者参与的某项目外场测试数据来看,即使在铺设时进行了加固处理的架空光缆在受到 4~5 级风力影响时,也会因风力振动对传输时钟性能产生劣化,30 km 的架空距离就足以使时钟的短期稳定度下降一个数量级,1~100 Hz 区间的近端相位噪声劣化达到 10~15 dB 以上。随着相控阵技术、时敏网络技术的广泛深入应用,对时钟的传输距离和频率稳定度要求也越来越高,这种传输距离和频率稳定度之间的矛盾会更加突出。因此,研究抗光纤振动的低相位噪声时钟传输技术具有很强的实际应用价值。

1 光纤振动对时钟传输影响的机理分析

光纤色散的本质是不同频率光信号的群延时效应,色散对传输时钟最直接的影响就是造成时钟抖动。对于最常用的单模光纤传输系统,色散主要由波导色散、材料色散和偏振模色散构成,前2种色散占比高、变化范围很小,工程上常用色散光纤进行补偿;偏振模色散由于占比很小,对于40G以下的数字光纤传输系统,通常不予考虑。但偏振模色散有一个很重要特性是,对外界应力的反应远高于波导色散和材料色散,即当光纤受到振动、温度等外界应力因素影响时,光纤内部会发生轻微的折射率变化从而加剧色散现象。对于环境温度引起的变化,由于速度非常缓慢,一般可以通过精确测定光线路延时变化量并配合电控延迟线予以补偿,常见于稳相传输或精确授时系统。对于光纤振动引起的偏振模色散变化,由于振动的频率和幅度都随机,很难进行测定和补偿。北邮光通信国家重点实验室张晓光教授对偏振模色散的光域偏振态补偿进行了长期研究,采用粒子群优化(PSO)神经网络算法在40G数字同步光传输系统上成功应用,与华为共同研制出国内第一台偏振模色散(PMD)自适应补偿设备,并在华为40G光传输设备上验证了补偿效果。不过该技术仅限于归零差分四相位相移键控(RZ-DQPSK)线路码型,对专用数字光传输系统通常采用的非归零(NRZ)码型补偿效果不明显,同时补偿速度最高只能达到5 ps/s^[1],应用范围存在一定的局限。

为了找出光纤振动与偏振模色散变化之间的内在联系,本文进行了如下实验。采用Chromos11-32102色散分析仪对一盘25 km的G.652 9/125 μm实验光纤进行振动色散变化测试,实验光纤盘的振动频率为2~5 Hz,振动幅度为2~3 cm,测得其总色散斜率从0.062 ps/(nm²·km)增大到0.084 ps/(nm²·km),变化率达到35.5%,如图1所示。同时测得偏振模色散系数从0.075 ps/km^{1/2}增大到23.399 ps/km^{1/2},变化率达到312倍。由此可见,光纤振动确实会造成偏振模色散的急剧变化,同时其色散值会随距离累积增加,并满足式(1)。

$$\tau_{\text{PMD}} = D \times \sqrt{L} \quad (1)$$

其中, D 为偏振模色散系数, L 为传输距离(单位:km)。根据式(1)计算可知25 km的实验光纤在上述振动状态下,偏振模色散变化量达到117 ps,如果增加传输距离,则偏振模色散的变化值会更大。该色散变化值会

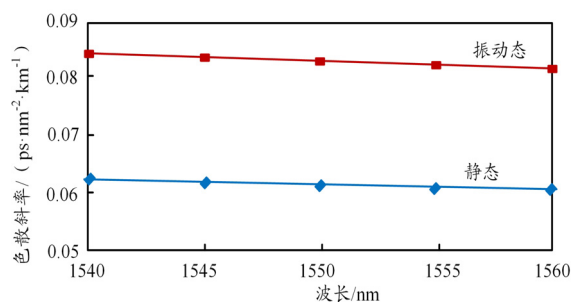


图1 实验光纤盘静态与振动状态的总色散斜率变化

直接作用到光传输系统的数据或时钟上,造成数据和时钟附加额外的传输抖动,最终使接收端的时钟相位噪声指标劣化。

对比模拟振动环境与外场实际环境测试得到的传输时钟相位噪声数据,将振动环境下的实验光纤长度增加到50 km,其时钟相位噪声劣化情况将会与外场30 km架空光缆在4~5级风力影响下的情形高度相似,两者在1 Hz处的相位噪声劣化都会达到10~15 dB。

2 抗光纤振动时钟光传输方案原理

高精度时钟信号的光传输一般有2种技术方案,即直接光调制传输方案和数字化光调制传输方案。

直接光调制传输方案将时钟信号作为数字信号直接进行光纤调制,电路简单。但是,由于是直接基带光调制,光信号受线路环境影响较大,在振动环境下传输相位噪声会升高。虽然在接收端采用恒温晶振伺服重生技术可以在一定程度上降低输出时钟的相位噪声,但传输时钟的相参性能会受到影响。同时这种伺服重生技术对传输时钟的相位噪声设有条件,必须达到一定的相位噪声指标并且只能应用在频率变化缓慢的环境。目前,国内外比较先进的伺服重生技术可以将相位噪声降低15~20 dB。

数字化光调制传输方案则是将时钟信号视为正弦波模拟信号,通过高速采样转换成数字化信号后再进行光调制,电路结构相对复杂。由于光调制传输的是数字化转换后的数据,因而受线路环境影响的主要是传输的数据和嵌入数据的编码时钟,在接收端通过时钟数据恢复(CDR)技术可以提取出线路编码时钟完成数据接收,但不能过滤线路振动对编码时钟的附加抖动。当该编码时钟再次用于数/模转换(DAC)电路的数据时钟时,将对恢复的时钟信号相位噪声产生劣化,只是程度上要低于直接光调制传输方案。

综上所述可知,数字化光调制传输方案其本身具备了一定的抗振动传输能力,可供优化的参数也比较多,改进空间更大,本文基于此技术方案提出抗光纤振动的时钟光传输技术方案,其原理框图如图2所示。

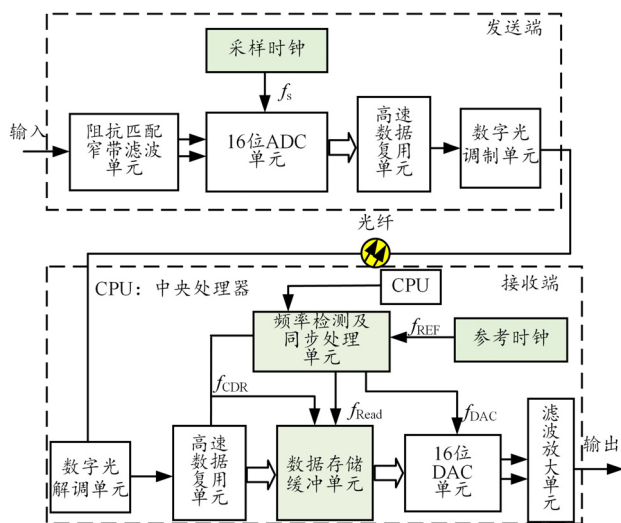


图2 抗光纤振动的时钟光传输技术方案原理框图

抗光纤干扰时钟光传输方案包括发送端信号处理、接收端信号处理两部分。

①发送端信号处理。基准信号经阻抗匹配和窄带滤波后进入16位模/数转换(ADC)单元完成模/数转换,输出16位并行采样数据进入高速复用单元完成并/串转换和线路编码,复用成一路高速数据进入数字光调制单元完成电/光转换输出。

②接收端信号处理。接收光信号经数字光解调出高速电信号,进入高速数据解复用单元完成线路编码时钟提取和串/并转换输出,经过预设周期的数据存储缓冲后进入16位DAC单元恢复模拟时钟信号,再经窄带滤波和低噪声放大到预定幅度后输出。频率检测及同步处理单元主要监测处理线路编码时钟 f_{CDR} 和本地参考时钟 f_{REF} 的频率误差及相位同步关系,以参考时钟为蓝本结合误差信息重新生成DAC数据时钟 f_{DAC} ,并用于控制数据的存储读取和16位DAC。

本文提出的抗光纤振动时钟传输技术方案与普通的数字化光传输方案的改进主要体现在以下3点:

◆提高了发送端采样时钟和接收端参考时钟的频率稳定度,用恒温晶振替代了原来的温补晶振,并且必须是同批次、同性能参数的恒温晶振,比同指标的普通方案晶振稳定度提高了3个数量级。

◆接收端增加了数据存储缓冲电路,将DAC的实

时数据存取变成类似直接数字合成器(DDS)电路结构,降低了对数字化数据帧同步要求,提高了数据传输误码对线路振动的容忍能力。

◆接收端增加了高精度的频率检测及同步处理电路,用于精确控制 f_{DAC} 输出。通过计算线路时钟和参考时钟的频率误差信息,并将该信息以参考时钟为蓝本来校准接收端的数据缓冲读取时钟和 f_{DAC} 。校准周期取决于两者的频率偏移速度,这一过程可以通过算法控制。以参考时钟为基准,当两者偏移速度大于200 ps/s时(本项目实际调试数据),校准电路介入,将 f_{DAC} 的频率值拉回到线路时钟平均值,其它时刻不进行时钟校准。在非校准时刻由前一次校准后的时钟进行缓存数据和 f_{DAC} 读取,与线路时钟没有关联,因而可以滤除光线路振动引起的时钟抖动干扰。

在光纤静态情况下,可以近似认为 $f_s=f_{CDR}=f_{DAC}$,只要光接收功率正常、传输过程不产生数据误码,接收端的DAC电路就可以真实地完成发送端ADC电路的逆变换,相位噪声指标仅取决于ADC和DAC芯片本身的转换误差,不需要频率检测及同步处理单元和数据存储缓冲单元的电路参与也可以获得预期的性能指标。

在光纤振动的情况下,由于光线路上附加了偏振模色散引起的额外抖动,因此 f_s 、 f_{CDR} 与 f_{DAC} 之间也会存在因线路抖动而附加额外抖动。频率检测及同步处理单元的目的就是降低参考时钟与线路时钟的耦合关联度,将线路抖动信息全部滤除,只剩下发送端时钟 f_s 本身的固有特性,由于ADC与DAC配对转换技术的关键主要是考量采样点的时间位置误差,因此本技术方案对 f_s 与 f_{REF} 2个时钟的时间间隔误差(TIE)参数一致性有很高要求。以本项目为例,针对16位的ADC和DAC电路的转换精度要求,同时考虑到频率校准时刻也会让输出频率产生波动影响输出相位噪声,因此要实现1 Hz处相位噪声的抑制, f_s 与 f_{REF} 2个时钟的短期频率稳定度1s阿伦方差至少达到 1×10^{-12} 。

由此可见,新技术方案是通过降低发送端ADC采样时钟 f_s 和接收端DAC数据时钟 f_{DAC} 之间的实时关联度,间接降低了因光纤振动引起的起线路时钟抖动对 f_{DAC} 的影响。由于在非校准时刻, f_{DAC} 与 f_s 都是独立运行,而 f_{DAC} 又是以参考时钟 f_{REF} 为蓝本进行调整,因此对 f_s 和 f_{REF} 的固有参数一致性(尤其是TIE参数)有很高要求,否则,即使在静态环境下也会使DAC恢复的模拟信号相位噪声指标大幅下降。

3 抗光纤振动测试验证

根据上述方案原理,本文作者所在项目组研制了一套收、发实验设备,设定其采样频率为 32.768 MHz,经 16 位 DAC 和 8B/10B 线路编码后,总数据速率为 735.36 Mb/s;设备采用通用的 1.25G 数字光模块完成光纤调制和解调。抗光纤振动试验测度连接框图如图 3 所示。本文测试用的时钟基准源频率为 10 MHz,1 Hz 相位噪声 ≤ -112 dBc/Hz,信号源幅度为 10 dBm,接收端的相位噪声测试仪器为 Symmetricom 5120A,测试精度为 ± 2 dB,用 1 盘 50 km 的 G.6529/125 μm 实验光纤作为振动光纤。

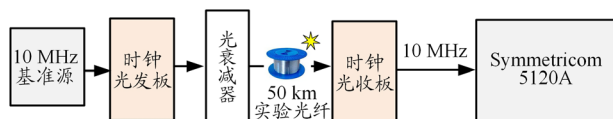
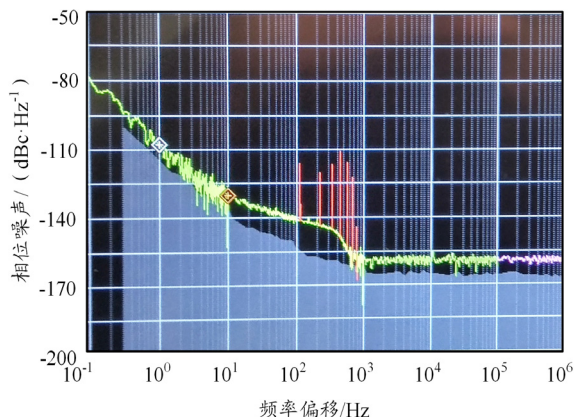


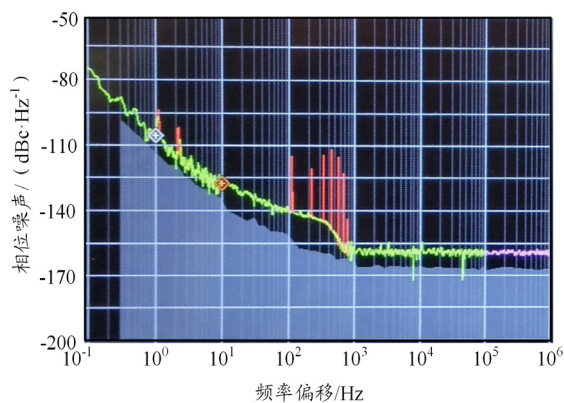
图 3 抗光纤振动试验测试连接框图

由于恒温晶振和测试仪器通电后都有一个稳定过程,因此,实验前,将所有仪器设备和实验板均预热 30 min,让系统运行足够稳定。实验中,输入的振动频率为 2~5 Hz,振动幅度为 2~3 cm,根据式(1)可知此时偏振模色散变化值在 165 ps 左右。调整光衰减器使接收光功率在灵敏度附近,模拟实际的运行环境,测得接收端的输出模拟时钟信号相位噪声截图如图 4(a)和图 4(b)所示,图 4(c)为改进之前相同振动环境下测试得到的相位噪声截图。

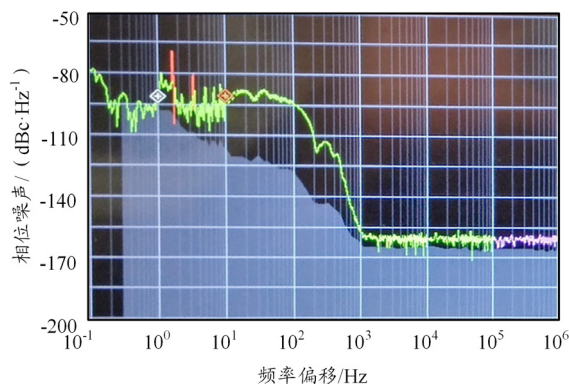
从图 4(a)、图 4(b)可以看出,抗光纤振动实验设备在光纤静态和振动状态下传输时钟的相位噪声可以基本保持不变,能有效地过滤光纤线路振动引发的传输时钟抖动。与改进之前的设备测试结果图 4(c)对比,在相同的振动条件下,1 Hz 相位噪声从 -90 dBc/Hz 降低到 -105 dBc/Hz,改善幅度达到 15 dB,同时由于



(a) 静态传输



(b) 振动传输



(c) 改进之前振动传输

图 4 抗振动光纤实验板传输相位噪声测试对比截图

收、发两端改用了高稳定恒温晶振,使 ADC 和 DAC 的时钟 TIE 降低,1~100 Hz 区间的相位噪声仍获得超过 10 dB 以上的改善。

4 结束语

本文提出的高精度时钟抗光纤振动光传输技术方案,通过采用降低发送端采样时钟和接收端参考时钟的耦合关联度、提高二者频率稳定性和固有特性一致性等方法,使传输线路上的振动干扰对传输时钟的抖动影响降到最低。实验设备的测试数据对该技术方案的有效性进行了充分验证,相对现阶段示采用抗振动措施的产品设备,该技术方案的传输相位噪声指标改善了 10~15 dB,具有较高的经济价值,可以广泛应用在各种高精度时钟需要远距离传输的领域,如时敏网络、多基站相控阵雷达、卫星导航和深空探测等专用系统,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 张晓光. 光纤偏振控制研究: 从理论到实验应用 [J]. 物理与工程, 2015, 25(3): 13-25.