

基于 FBOC 调制的高精度光纤双向时频比对方法

杨文哲^{1,2,3}, 王海峰^{1,2,3}, 王学运^{1,2,3}, 张升康^{1,2,3}, 冯克明^{2,3}

(1. 北京无线电计量测试研究所, 北京 100854;

2. 计量与校准技术国家重点实验室, 北京 100854; 3. 中国航天科工集团 第二研究院, 北京 100854)

摘要:为了提高光纤双向时频传递系统的传递精度,解决系统码相位测量不确定度过大的问题,提出了一种基于灵活二进制偏移载波(FBOC)调制方式的光纤双向时频比对方法,利用 FBOC 调制信号的良好自相关特性,降低码相位测量不确定度,在 100km 室内光纤中完成了实验验证,时间传递稳定度达到 3.37ps/s,频率传递稳定度达到 $4.74 \times 10^{-16}/40000\text{s}$;仿真了 FBOC 调制信号的码相位测量不确定度,其值约为 3.5ps,远小于传统二进制相移键控调制信号的码相位测量不确定度。

关键词: 光纤; 时频比对; FBOC 调制; 不确定度

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)05-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.05.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High precision fiber bidirectional time–frequency comparison method based on FBOC modulation

YANG Wenzhe^{1,2,3}, WANG Haifeng^{1,2,3}, WANG Xueyun^{1,2,3}, ZHANG Shengkang^{1,2,3}, FENG Keming^{2,3}

(1. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China; 2. Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Beijing 100854, China; 3. Second Research Institute of China Aerospace Science and Industry Corporation, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to improve the precision of two-way time and frequency transfer system via optical fiber, to solve the problem that system code phase measurement uncertainty is too large, in this paper, the two-way time and frequency comparison method via optical fiber based on flexible binary offset carrier (FBOC) modulation is developed. By taking the advantage of the good self-correlation features of FBOC modulation signal, the code phase measurement uncertainty is reduced. The experiment in 100km spooled optical fiber is completed. Time transfer stability is 3.37ps/s and frequency transfer stability is $4.74 \times 10^{-16}/40000\text{s}$. The code phase measurement uncertainty of FBOC modulated signal is simulated, and the value is 3.5ps, which is much smaller than that of traditional binary phase shift keying modulated signal.

Key words: optical fiber; time and frequency comparison; FBOC modulation; uncertainty

0 引言

由于光纤信道传输稳定、带宽大和不易受干扰,光纤时间频率传递技术有望成为新一代的时间同步主力军,现已出现多种时间频率传递方法,如:光纤网络时间同步方法^[1,2]、微波时间频率信号调制类传递方法^[3,4]、超稳光学频率直接传递类方法^[5]和飞秒光学频

率梳类同步方法^[6]等。其中,微波时间频率信号调制类传递方法的发展时间长,技术成熟度高,系统相对简单,是工程实践中应用最广泛的方法。但是很少有科研人员对光纤时频传递系统的不确定度进行评定。北京无线电计量测试研究所广泛开展了基于伪码调制的光纤双纤时频比对研究,并深入分析了系统不确定度来源。其中,系统合成不确定度的主要成分是锁相环路、时间间隔计数器等设备的测量不确定度,在上海交通大学吴龟灵等人对光纤双向时分复用传递系统的不确定度评估^[7]中,端机和时间间隔测量引入了几十皮秒的不确定度。因此,为降低系统测量不确定度,本文提出一种基于灵活二进制偏移载波(FBOC)调制方式的光纤双向时间频率传递方法。

收稿日期: 2019-01-16。

作者简介: 杨文哲(1991–),男,博士研究生,本科毕业于北京航空航天大学,现就读于中国航天科工集团第二研究院研究生院,主要研究方向是时间同步与校准技术、光纤时间频率传递技术、时间频率计量和电子电路设计等。



1 基本原理

1.1 FBOC 调制方式

FBOC 调制方式是由二进制偏移载波(BOC)调制方式衍生而来的一种新型调制方式。目前在 Galileo 和 GPS 导航系统中,均采用了 BOC 调制信号,通过频谱分裂的特性解决了理想中心频点被充分占用的问题,常用的 BOC 信号有 BOC(1,1)、BOC(6,1)。相比 BOC 调制方式,FBOC 调制方式选用了更高频率的方波子载波,调制信号可以表示为在传统二进制相移键控(BPSK)调制信号上加入了高频率的周期方波作为子载波,如式(1)、式(2)所示。

$$s_{\text{FBOC}}(t) = s_c(t) s_{\text{BPSK}}(t) \quad (1)$$

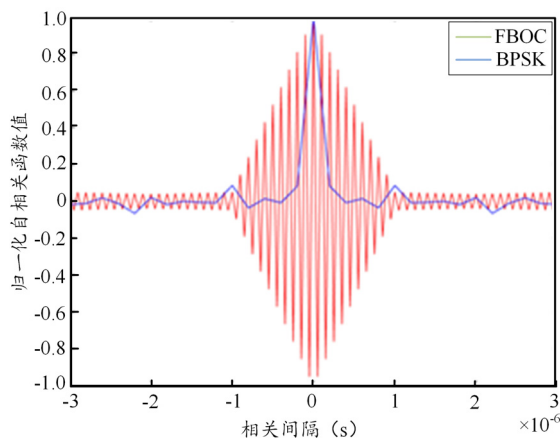
$$s_{\text{BPSK}}(t) = D(t) c(t) \sin(2\pi f_{\text{F}} t) \quad (2)$$

其中, $s_c(t)$ 为方波子载波, $D(t)$ 为传输数据, $c(t)$ 为扩频码信号, f_{F} 为发射信号载波频率。相比 BPSK 调制信号,FBOC 调制信号的自相关函数具有很多相关峰,而主峰比 BPSK 信号相关峰更加尖锐,如图 1(a)所示;FBOC 调制信号的频谱分裂为两瓣,相对中频载波频率对称,如图 1(b)所示。由于理论上信号自相关峰越窄,伪码相位测量精度越高,而且 FBOC 调制信号的自相关函数的尖锐程度与子载波频率和伪码速率之间的比值成正比,因此 FBOC 调制方式采用高频率的子载波,能够提高伪码相位测量精度和系统时间同步合成标准不确定度。

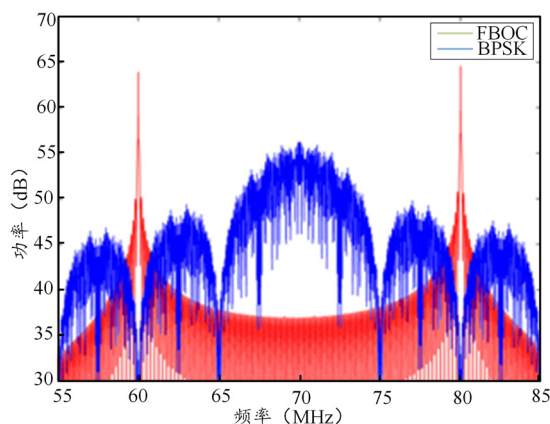
1.2 双向时频比对原理

光纤双向时频比对原理如图 2 所示。时间同步原理是利用双方向链路时延相等的特点,通过数据解算消除信号传输时延中的噪声,如图 2(a)所示。将 A、B 两地钟差记为 ΔT , 通过光纤链路连接的 A 站和 B 站分别向对方发送信号,同时接收来自对方的信号。将 A 站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_A , B 站测量的发送信号时间与接收信号时间的差记为 T_B 。

比对过程信号流程如图 2(b)所示。在 T_1 时刻, A 站和 B 站同时向对方站点发出 FBOC 调制信号,信号中携带发射时刻时间戳,设 A 站、B 站发射时刻分别为 T_{A1} 、 T_{B1} 。随后,FBOC 调制信号对激光强度进行调制,使光信号携带时间频率信息。调制后的激光信号经过光纤传输到对方站点。激光信号经过光电探测后恢复出 FBOC 调制信号,并恢复出发射时间戳。设 A 站、B 站接收时刻分别为 T_{A2} 、 T_{B2} ,结合图 2(a),站点 A、B 测量的时延可以表示为:

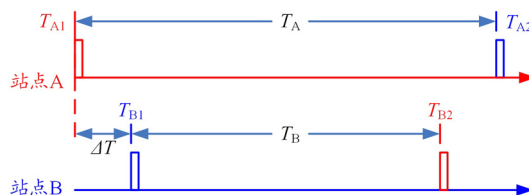


(a) 自相关函数

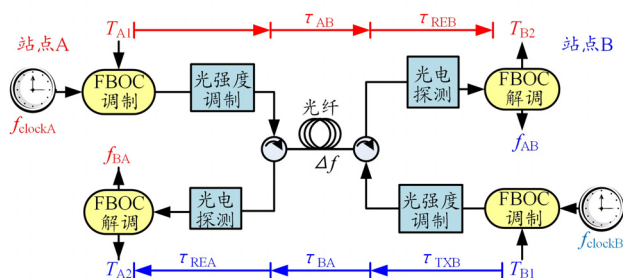


(b) 功率谱密度函数

图 1 FBOC 调制信号自相关特性和频域特性



(a) 时间同步原理图



(b) 比对过程信号流程图

图 2 光纤双向时间频率比对原理图

$$T_A = T_{A2} - T_{A1} = \Delta T + (T_{A2} - T_{B1}) = \Delta T + \tau_{TXB} + \tau_{BA} + \tau_{REA} \quad (3)$$

$$T_B = T_{B2} - T_{B1} = -\Delta T + (T_{B2} - T_{A1}) = \Delta T + \tau_{TXA} + \tau_{AB} + \tau_{REB} \quad (4)$$

其中, τ_{TXA} 、 τ_{TXB} 分别为 A 站、B 站信号发射时 FBOC 调制、光强度调制引入的总时延, τ_{AB} 、 τ_{BA} 分别为光信号由 A 站到 B 站和 B 站到 A 站的传输时延, τ_{REA} 、 τ_{REB} 分别为 A 站、B 站信号接收过程中光电探测、FBOC 解调引入的总时延。

将式(3)减(4)可得:

$$T_A - T_B = 2\Delta T + (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB}) + (\tau_{BA} - \tau_{AB}) \quad (5)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} [(T_A - T_B) - (\tau_{TXB} - \tau_{TXA} + \tau_{REA} - \tau_{REB}) + (\tau_{BA} - \tau_{AB})] \quad (6)$$

因此,根据测量结果 T_A 、 T_B ,并预先校准信号发射和接收时延 τ_{TXA} 、 τ_{TXB} 、 τ_{REA} 、 τ_{REB} ,估计双向传输不对称时延 τ_{AB} 、 τ_{BA} ,最终计算得到两地钟差 ΔT ,实现高精度时间同步。

频率传递原理与时间同步原理相似。系统中两端所使用的设备引入的频率噪声近似相等,而光纤链路对于双向信号所引入的频率噪声也近似相等。因此,两端对频率测量结果进行联合解算,消除系统频率噪声,从而实现频率传递。具体过程如下:站点 A、B 的标准频率分别记为 f_{clockA} 和 f_{clockB} ,并假设两者之间相差 Δf ,为便于计算,假设站点 A 为基准站,频率为 f_0 ,于是有:

$$f_{\text{clockA}} = f_0 \quad (7)$$

$$f_{\text{clockB}} = f_0 + \Delta f \quad (8)$$

以 A 站发射、B 站接收为例,站点 A 处双向调制解调器发射信号载波频率记为 f_{IF} ,以 f_{clockA} 为参考。将光发射机、光接收机以及光纤链路引入频率噪声记为 f_{noise} ,于是站点 B 处接收电信号的载波频率 f_{RE} 为:

$$f_{\text{RE}} = f_{\text{IF}} + f_{\text{noise}} \quad (9)$$

然而,式(9)的结果是所有频率均以基准频率 f_0 为参考得到的,这是不合理的。站点 A 处的所有频率值应以 f_{clockA} 为参考,而站点 B 处的频率值应以 f_{clockB} 为参考。综合考虑各站点的不同参考频率后,式(9)的计算方式如下:

$$f_{\text{RE}} = (f_{\text{IF}} + f_{\text{noise}}) \frac{f_{\text{clockA}}}{f_{\text{clockB}}} \quad (10)$$

最终站点 B 处双向调制解调器接收信号的载波频率值记为 f_{AB} :

$$f_{\text{AB}} = (f_{\text{IF}} + f_{\text{noise}}) \left(\frac{f_0}{f_0 + \Delta f} \right) \quad (11)$$

同理,B 站发射、A 站接收的载波频率值为:

$$f_{\text{BA}} = f_{\text{IF}} \left(\frac{f_0 + \Delta f}{f_0} \right) + f_{\text{noise}} \quad (12)$$

因此,通过式(11)和式(12)联合解算未知数 f_{noise} 和 Δf ,完成 A、B 两站点间的频率传递。

2 实验结果分析

2.1 实验系统及参数配置

为测量系统时间频率传递精度,区分系统引入误差和两站时差,采用两站同源的形式进行实验,具体实验装置如图 3 所示。选用同一台氢钟为两站同时提供时间基准 1PPS 信号和频率基准 10MHz 信号。伪码产生单元、子载波产生单元、FBOC 调制单元、FBOC 解调单元和时间间隔测量单元均为自研设备。在两端站点,根据 1PPS 信号和 10MHz 信号,伪码产生单元和子载波产生单元分别产生码速率为 125kHz 的伪码信号和频率为 10MHz 的方波子载波信号,并输出到 FBOC 调制单元;在 FBOC 调制单元产生频率为 70MHz 的 FBOC 调制信号。随后,FBOC 调制信号进入铌酸锂电

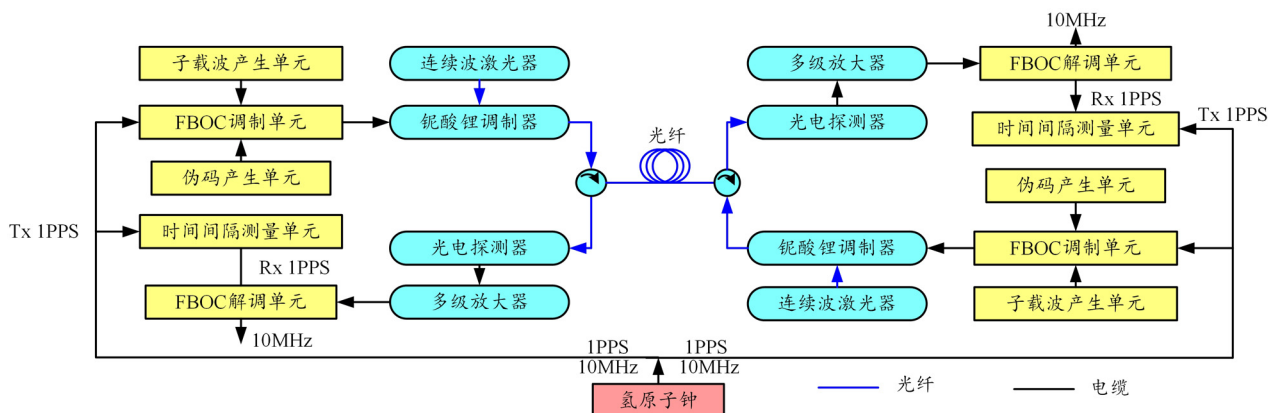


图3 同钟实验系统装置图

光调制器,对光信号强度进行调制。两站光信号均由同一型号连续波激光器产生,且输出光强度及波长均可调。为消除后向散射光对接收端的影响,同时尽量保证双向传输时延相同,最终设定2台激光器的波长分别为1550.12nm和1550.52nm,输出光强分别为1.5dBm和1.8dBm。经过强度调制后的光信号进入光纤链路并传向远端。光纤链路由2个环形器和100km室内光纤组成,其中100km室内光纤由2个50km光纤盘以及1个掺铒光纤双向放大器串行连接构成。环形器能够使双方向光信号在同一根光纤中传输,保证双方向传输链路完全一致。在接收端,站点首先利用快速光电探测器恢复出FBOC调制信号,然后利用FBOC解调单元输出1PPS信号和10MHz信号,接着利用时间间隔测量单元测量出接收1PPS信号和参考1PPS信号之间的时间间隔,最终交换两端的测量结果,解算两时钟钟差和接收频率,实现两时间频率传递。

2.2 实验结果

由于两时间参考源于同一时钟,因此钟差结果是整个系统所引入的误差,代表着系统时频传递能力。经过数据交换和解算,两钟差结果如图4所示,并且钟差变化曲线与温度变化曲线趋势十分相似。可见,环境温度变化引起的系统误差是整个系统误差的主要组成部分。不过,根据Sliwczynski等人^[8]对于光纤时间比对的研究,温度对于双向时间比对结果的影响系数约为 $2\text{fs}/(\text{km}\cdot^\circ\text{C})$,小于本实验测量结果所反映出的情况。因此,本实验中环境温度变化引起的系统误差主要由FBOC调制和解调单元等电学模块的温度引起误差组成。为了获得高精度的时间比对结果,我们根据温度测量结果对钟差结果进行修正。由于温度测量设备的测量分辨率为 0.1°C ,首先需要对温度测量结果

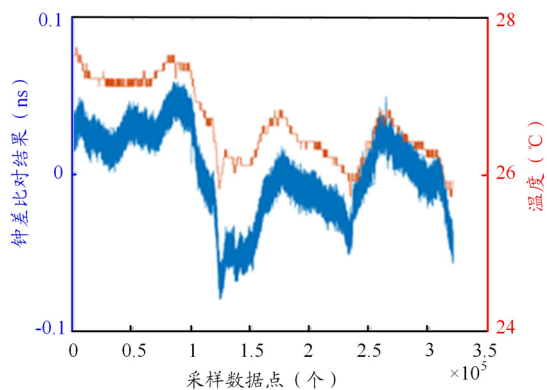


图4 钟差比对结果与温度变化曲线

进行线性拟合,以免对时间比对结果引入额外的误差。其次,根据温度拟合结果和钟差结果进行相关系数估算,并根据估算结果对钟差结果进行修正,修正后的钟差结果如图5所示,系统钟差曲线的峰峰值小于120ps,标准差为17.4ps。系统时间传递稳定度曲线如图6所示,曲线在200s前逐步下降,并达到最低点,其值为 $0.875\text{ps}/200\text{s}$,随后逐步上升到 10^{-11} 量级。时间传递稳定度分别为 $3.37\text{ps}/\text{s}$ 、 $1.17\text{ps}/10\text{s}$ 、 $0.896\text{ps}/100\text{s}$ 、 $1.26\text{ps}/1000\text{s}$ 和 $5.93\text{ps}/10000\text{s}$,达到国际先进水平。

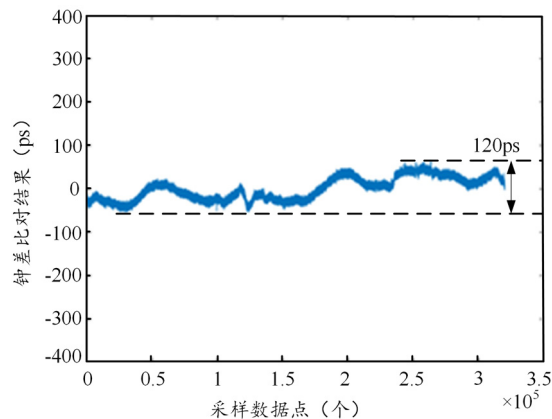


图5 补偿后的钟差比对结果

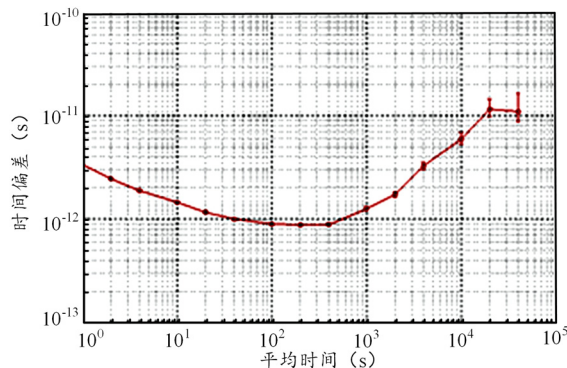


图6 系统时间传递稳定度曲线

系统频率传递稳定度曲线如图7所示,曲线下降趋势稳定,在1000s后下降趋势变缓,趋于稳定。频率传递稳定度分别达到 $5.84\times 10^{-12}/\text{s}$ 、 $2.51\times 10^{-13}/10\text{s}$ 、 $1.55\times 10^{-14}/100\text{s}$ 、 $2.19\times 10^{-15}/1000\text{s}$ 、 $1.03\times 10^{-15}/10000\text{s}$ 和 $4.74\times 10^{-16}/40000\text{s}$ 。

对于微波时间频率信号调制类传递方法而言,系统合成标准不确定度的主要成分之一是锁相环路设备的测量不确定度。目前码相位测量单元通常采用归一化相干延迟锁相环跟踪环境,其相位测量误差主要由热噪声导致,误差均方差^[9]满足公式:

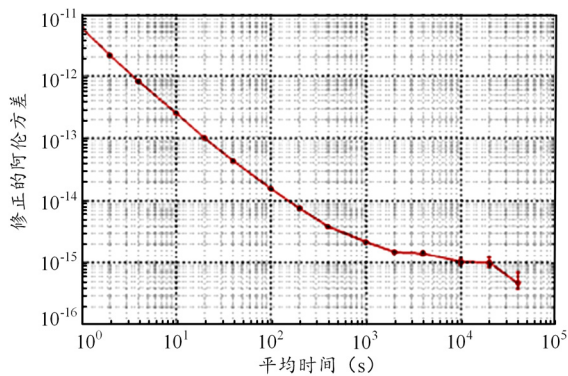


图7 系统频率传递稳定度曲线

$$\sigma_{\text{DLL}} = T_c \sqrt{\frac{4F_1 d^2 B_n}{C/N_0} \left[2(1-d) + \frac{4F_2 d}{TC/N_0} \right]} \quad (13)$$

其中, T_c 为伪码的码片宽度; F_1 为伪码跟踪环鉴相器相关因子; d 为前后相关器间距; B_n 为码环路的噪声带宽; C/N_0 为接收信号与噪声功率比, 单位为 $\text{dB} \cdot \text{Hz}$; F_2 为码跟踪环鉴别器类型因子; T 为相干积分时间。由式(13)可知, 伪码码片宽度 T_c 越小, 相关器间距 d 越窄, 则误差均方差 σ_{DLL} 越小, 意味着其引入的测量不确定度越小。本文根据式(13)仿真了 FBOC 调制方式和 BPSK 调制方式的码相位测量不确定度, 两者的比较结果如表 1 所示。BPSK 调制方式的伪码速率越高, 码相位测量不确定度越小。当伪码速率为 5MChip/s 时, 码相位测量不确定度约为 100ps; 当伪码速率提高为 20MChip/s 时, 码相位测量不确定度低至 25ps。而理论上, FBOC 调制信号的自相关主峰远窄于 BPSK 调制信号的自相关峰, 码相位测量精度则更高。仿真结果符合理论预期, 对于伪码速率为 125kChip/s、子载波频率为 10MHz 的 FBOC 调制信号而言, 码相位测量不确定度仅为 3.5ps, 远小于 BPSK 调制信号的码相位测量不确定度。因此, 基于 FBOC 调制的光纤双向时频比对系统中, 系统合成标准不确定度将低于基于 BPSK 调制的系统, 其锁相环路的测量不确定度不再是系统合成标准不确定度的主要成分。

表1 FBOC 和 BPSK 的码相位测量不确定度的比较结果

调制方式	伪码速率 (MChip/s)	占用带宽 (MHz)	码相位测量 不确定度 (ps)
BPSK	5	10	100
	10	20	50
	20	40	25
FBOC	0.125	0.5	3.5

3 结束语

光纤微波时间频率信号调制类传递方法是一种高精度的时间频率传递方法, 是目前技术发展最成熟、工程实践中应用最广泛的光纤时频传递方法。然而, 该类方法中的相位测量不确定度普遍较大, 是系统测量不确定度的主要成分。因此, 为减低系统测量不确定度, 提升时频传递精度, 针对光纤双向时频传递系统, 本文提出了一种基于 FBOC 调制的光纤双向时频比对方法, 并在 100km 室内光纤中完成了实验验证, 时间传递稳定度达到 3.37ps/s, 频率传递稳定度达到 $4.74 \times 10^{-16}/40000\text{s}$ 。此外, 通过软件仿真, 比较了 FBOC 调制方式和传统 BPSK 调制方式的码相位测量不确定度。仿真结果表明: FBOC 调制方式大幅降低了系统码相位测量不确定度, 例如, 对于伪码速率为 125kChip/s、子载波频率为 10MHz 的 FBOC 信号, 其码相位测量不确定度仅为 3.5ps, 这不仅降低了时频比对系统的合成标准不确定度, 对原有基于 BPSK 调制的时频比对系统也有着显著的改进, 增强了光纤双向时频比对的实用性。

参考文献:

- [1] 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 & Frequency Control, 2016, 63(7): 945-952.
- [2] KAUR N, TUCKEY P, POTTIE P E. Time transfer over a White Rabbit network[C]// 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), April 4-7, 2016, York, United Kingdom. New York: IEEE, 2016:1-4.
- [3] 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(2):556-1-556-5.
- [4] LOPEZ O, KANJ A, POTTIE P E, et al. Simultaneous remote transfer of accurate timing and optical frequency over a public fiber network [J]. Applied Physics B, 2013, 110(1): 3-6.
- [5] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1840 km fiber link[J]. Physical review letters, 2013, 111(11): 110801-1-110801-5.
- [6] KIM J, CHEN J, ZHANG Z, et al. Long-term femtosecond timing link stabilization using a single-crystal balanced cross correlator [J]. Optics Letters, 2007, 32(9): 1044-1046.
- [7] 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.
- [8] SLIWICZY S L, KREHLIK P, LIPI S M. Optical fibers in time and frequency transfer [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(7): 075302-1-075302-11.
- [9] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.