

文章编号: 2095-4980(2022)05-0407-07

## 基于 PID 反馈控制的光载射频稳相传输技术

张 磊<sup>1,2</sup>, 梁晓东<sup>1,2</sup>, 李少波<sup>1,2</sup>, 王东杰<sup>1,2</sup>, 刘彦丹<sup>1,2</sup>, 邢贯苏<sup>1,2</sup>, 罗青松<sup>2</sup>

(1. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;  
2. 河北省光子信息技术与应用重点实验室, 河北 石家庄 050081)

**摘 要:** 针对光纤时频传输过程中由于温度、压力变化等环境因素导致的相位抖动, 提出了一种基于比例-积分-微分(PID)反馈控制的高精确度相位稳定纠正技术。采用迈克耳逊干涉仪进行实时相位检测, 并通过压电陶瓷进行实时补偿, 能够有效克服传统鉴相、延时线等在补偿精确度和速度方面的瓶颈。经过对环境因素的计算与 PID 补偿仿真, 得到该方法在 800 m 光纤传输的传输延时测量精确度为 2.2 fs, 传输延时稳定度 < 8.8 fs, 在小于 100 N 的外界轴向拉力作用下, 恢复初始状态的时间在 0.088 s 以内。

**关键词:** 时频传递; 微波光子; PID 控制; 稳相传输

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021346

## Phase stabilized transmission over optical fiber link based on PID feedback control

ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, LIANG Xiaodong<sup>1,2</sup>, LI Shaobo<sup>1,2</sup>, WANG Dongjie<sup>1,2</sup>, LIU Yandan<sup>1,2</sup>,  
XING Guansu<sup>1,2</sup>, LUO Qingsong<sup>2</sup>

(1.The 54th Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang Hebei 050081, China;  
2.Hebei Key Laboratory of Photonic Information Technology and Application, Shijiazhuang Hebei 050081, China)

**Abstract:** Aiming at the phase jitter caused by environmental factors such as temperature and vibration changes in the process of optical fiber time-frequency transmission, a high-precision phase stability stress technology based on Proportional-Integral-Derivative(PID) feedback control is proposed. Michelson interferometer is employed for real-time phase detection. The real-time compensation is carried out through piezoelectric ceramics. This method can effectively overcome the bottleneck in compensation accuracy and speed of traditional phase discrimination and delay line. After calculation of environmental factors and PID compensation simulation, the transmission delay measurement accuracy of this method in 800 m optical fiber transmission is 2.2 fs, the transmission delay stability is < 8.8 fs, and the initial state time is within 0.088 s under the external axial tension less than 100 N.

**Keywords:** time-frequency transmission; microwave photon; PID control; phase stabilized transmission

高精度度和高稳定的时频基准在很大程度上决定了航天测控、导航、通信、分布式雷达、天文观测等电子信息系统的性能, 是航空、军事乃至国际安全的基石<sup>[1]</sup>。原子钟<sup>[2]</sup>、光钟的出现, 使频率源的稳定度达到了 $10^{-19}$ 量级<sup>[3-4]</sup>, 光载射频稳相传输技术也作为一项新兴技术突破了传统基于长波、短波在时频基准传递中稳定性和精确度等方面的技术瓶颈。利用高精度光载射频传输系统抗干扰、低损耗、高稳定等技术优势, 能够实现雷达定位精确度<sup>[5]</sup>、通信测控精确度、导航精确度、干涉测量精确度等性能的大幅度提升。在应用需求和技术优势等多方面因素的作用下, 光载射频稳相传输逐渐成为高精尖电子信息系统重要的技术手段。

依据应用场景的不同, 光载射频稳相传输也逐渐形成了基于光纤链路、光纤网络、空间信道的技术体制, 性能指标不断提升, 技术方案层出不穷。在光纤链路方面, 美国、日本和法国等欧美国家开展了大量的研究工

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2022-01-05

基金项目: 中国电科五十四所发展基金资助项目(SXX20641X041)

作, 如, 利用高稳定的光频率梳实现了 300 km 的长距离光频率信号传输, 系统达到了秒稳  $3 \times 10^{-15}$ 、20 h 长稳  $5 \times 10^{-20}$  的指标<sup>[6]</sup>; 在自由空间已实现了 km 级频率传递, 精确度达到了 fs 量级<sup>[7]</sup>; 通过商用光纤网络的拓扑结构实现了峰峰值  $\pm 50$  ps 的时标稳定性和  $3 \times 10^{-14}$ /s 的频率传输稳定度<sup>[8]</sup>。

在光载射频稳相传输中, 不可避免地会受到外界环境扰动影响, 如温度变化、机械振动、应力等, 使光纤折射率和物理长度发生变化。光程时变会导致传输射频信号的相位抖动, 要实现稳相传输, 需对传输延时或相位变化进行补偿。光延迟线、电延迟线和光纤拉伸器等方法相位补偿范围受限, 难以实现大动态的相位补偿, 且在补偿精确度和实时性方面存在缺陷。

自动控制理论是实现实时参数调节、实时补偿控制的经典理论。其中比例-积分-微分(PID)控制, 是最早发展起来的控制策略, 由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高, 广泛用于工业过程控制。PID 控制的一个关键问题是 PID 参数的整定, 传统的方法是在获取对象数学模型的基础上, 根据某一整定原则来确定 PID 参数。但在实际工业过程控制中, 许多被控过程机理较复杂, 具有高度非线性、时变不确定性和纯滞后等特点。在不同因素的影响下, 过程参数, 甚至模型结构, 均会发生变化。这就要求在 PID 控制中, PID 参数能在线调整, 以满足实时控制的要求。自适应 PID 控制将自适应控制思想与常规 PID 控制器相结合, 形成自适应 PID 控制, 可以在不同的影响因素条件下实时修改 PID 参数, 是机理复杂的自动控制过程的一个有效解决途径<sup>[9]</sup>。

本文提出一种基于 PID 反馈控制的光载射频稳相传输方案, 通过自适应 PID 反馈控制, 实现对由于环境扰动因素导致的传输相位抖动的大范围、高精度度和实时补偿。设计了基于波分复用的干涉仪光纤传输延时探测方法, 并用压电陶瓷进行实时补偿, 分析了温度与机械应力对光纤传输的影响, 仿真得到自适应 PID 控制应对不同外界环境情况时的延时稳定性。

## 1 理论推导

### 1.1 温度对传输延时的影响

调制到载波上的射频信号在光纤中传输时, 光纤的延时变化量会引起射频信号的相位变化。一般在外界环境的影响下, 温度、应力、振动等, 都会对光纤的长度与折射率产生影响, 从而影响光纤的传输延时。光纤的传输延时为光在光纤中传输所用的时间<sup>[10-11]</sup>:

$$\tau = \frac{Ln}{c} \quad (1)$$

式中:  $L$  为光纤长度;  $n$  为折射率;  $c$  为光速。当光纤受外界温度影响时, 设单位温度下的延时变化量为  $K$ , 根据函数求导法则得

$$K = \frac{d\tau}{dT} = \frac{n}{c} \times \frac{dL}{dT} + \frac{L}{c} \times \frac{dn}{dT} \quad (2)$$

则单位长度、单位温度下的延时变化量  $K'$  为:

$$K' = \frac{1}{L} K = \frac{1}{c} \left( \frac{n}{L} \times \frac{dL}{dT} + \frac{dn}{dT} \right) \quad (3)$$

式中:  $dL/dT$  为光纤的热膨胀系数, 常温情况下普通单模光纤的热膨胀系数为  $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ ;  $dn/dT$  为光纤的热光系数, 常温状态下普通单模光纤的热光系数为  $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。将光速与单模光纤折射率代入, 可得光纤受温度影响的每公里的延时变化量为  $40 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

由于外部温度对光纤的延时变化量影响较大, 因此光纤的传输延时变化量为微波信号高精度度传输的主要相位抖动因素。

### 1.2 机械应力对光纤传输延时的影响

微波信号经过光纤传输受到外部环境的影响不仅仅只有温度, 机械应力也是非常重要的因素。温度的变化是一个长期、缓慢的过程, 因此对微波的光纤传输是一个长期的影响。而机械应力因影响机制不同, 对光纤的传输是一个短期的影响。机械应力主要由光纤的拉伸、挤压或其他环境变化产生。具体可分为下面几种:

1) 外来压力径向作用于光纤。光纤受到径向压力主要分为两种: 一种是受到来自多个方向的环境力的合力; 另一种是两个方向的压力共同造成。这两种压力使光纤的长度与纤芯、折射率发生变化, 最终导致传输信号的相位变化, 产生抖动。并且, 光纤会因外部环境的机械应力而产生双折射效应, 当光纤的两个正交横截面方向的应力差为  $\Delta\sigma$ , 则同方向的折射率可表示为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2E} (1 + \mu)(p_{11} - p_{12}) \Delta \sigma \tag{4}$$

式中： $E$ 为杨氏模量； $p_{11}$ 、 $p_{12}$ 为光弹张量； $\mu$ 为泊松比。

2) 外来拉力轴向作用于光纤。受到作用于轴向的外来压力时，光纤的长度会有一个瞬时变化，这是导致微波信号传输时延抖动的主要因素。当轴向外来压力作用于光纤时，引起的光载波相位变化为<sup>[13]</sup>：

$$\Delta \varphi = \frac{LF}{SE} \left\{ \beta + \frac{1}{2} k_0 n^3 [\mu p_{11} - (1 - \mu) p_{12}] \right\} \tag{5}$$

式中： $S$ 为光纤横截面； $F$ 为轴向的应力； $\beta$ 为传播常数。

3) 光纤受到轴向的应力导致扭曲形变。当光纤受到外部作用力导致轴向扭曲时，光纤的各向异性会对偏振面产生变化，且光纤因应力扭曲产生形变会导致光纤产生圆双折射现象，这个圆双折射的值可以表示为：

$$B_c = \frac{1}{2} n^2 (p_{12} - p_{11}) 2\pi N \tag{6}$$

式中 $N$ 为单位长度的光纤的扭曲数。

综上，机械应力对光纤时延是一个快速、短期的影响，与温度引起的延时变化不同。

## 2 系统设计与仿真分析

### 2.1 系统设计

本文设计了基于迈克尔逊干涉仪的延时探测方法，并通过自动控制PID算法实现压电陶瓷延时补偿。设计的频率传递稳定传输系统如图1所示，系统通过构建信号调制模块、传输模块、干涉仪延时检测模块、上位机信号PID处理模块、延时补偿模块进行频率信号的传递。

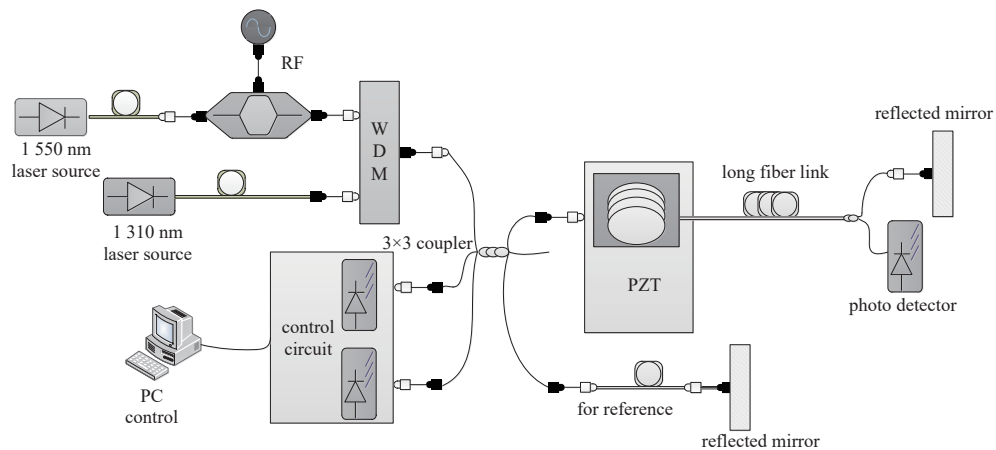


Fig.1 Diagram of frequency stable optical fiber transmission system  
图1 频率稳定光纤传递系统设计图

信号调制模块由射频信号、1550 nm激光器和马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Modulator, MZM)构成，将需要传输的稳定的射频信号，通过MZM调制到1550 nm的稳定的光载波上，通过光纤传输到远端，在接收端由光电探测器进行光电转换，解调后实现频率远距离传输。

干涉仪延时检测模块由1310 nm激光器、波分复用器、反射镜、3x3耦合器、光电探测器、上位机和控制电路组成。为防止信号载波与检测光波相互干扰，系统通过1310 nm激光器与1550 nm激光波分复用后进入光纤链路，利用1550 nm激光进行传输，1310 nm激光进行链路相位延时量测量。在接收端的反射镜与传输链路构成迈克尔逊干涉仪，由于三角函数存在多解问题，当相位漂移量超过 $\pi$ 时，就无法通过干涉仪求得实际的相位漂移量，本方案采用3x3耦合器结合双光路判向的条纹计数法进行协同测量。

条纹计数法的前提是需增加一个探测光路作为参考，与主探测光路保持一定的相位差(90°或120°)；2x2光纤耦合器形成的迈克尔逊干涉仪，输出干涉信号的相位差为180°，不能用于判向，不满足条纹计数要求；3x3光纤耦合器形成的迈克尔逊干涉仪，两个干涉仪输出出口的相位差为120°，可用于条纹计数法的双光路判向。通过光电接收电路的“光-电流-电压”转换后，可得到近乎幅值相等的3路待解调电压信号，3路待解调电压信

号为：

$$I_n = A + B \cos \left[ \varphi(t) - \frac{2\pi}{3} (n-1) \right] \quad (7)$$

将 3 路信号之和乘以  $-1/3$ ，再与每一路分别进行相加去掉直流分量，可得

$$a = B \cos \varphi(t) \quad (8)$$

$$b = B \cos \left[ \varphi(t) - \frac{2\pi}{3} \right] \quad (9)$$

$$c = B \cos \left[ \varphi(t) - \frac{4\pi}{3} \right] \quad (10)$$

式中  $a, b, c$  分别表示 3 路信号去掉直流分量的电流值。其中两个探测器同步探测的信号功率波形示意图如图 2 所示。

每当光路  $A$  探测器探测的功率上穿时或下穿时，进行一次条纹计数，即加一或减一，每次计数值的方向根据计数当前时刻的参考信号  $B$  进行判断，具体判断情况由表 1 所示。

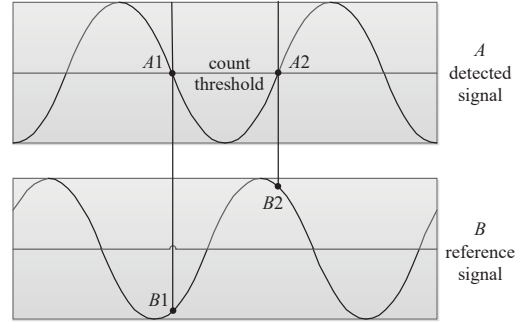


Fig.2 Schematic diagram of detector counting stripes  
图 2 探测器计数条纹示意图

表 1 3×3 耦合器探测信号与条纹移动方向判断

Table1 3×3 coupler detection signal and stripes movement direction judgment

A light path change (penetrate upwards/penetrate down)	B light path change	A position of the cycle time (A1/A2)	the direction in which the stripes move
penetrate upwards	$B1(B < \bar{A})$	A1	shift left(-1)
penetrate upwards	$B2(B > \bar{A})$	A2	shift right(+1)
penetrate down	$B1(B < \bar{A})$	A1	shift right(+1)
penetrate down	$B2(B > \bar{A})$	A2	shift left(-1)

根据两个光电探测器的读数计算得到当前传输链路的相位漂移量，通过外部电路控制传输到上位机，进行信号的分析与处理。

上位机信号 PID 处理模块，主要由上位机对检测到的相位漂移信号进行分析与处理，根据 PID 控制理论，调节相应的 PID 参数，将计算后的补偿值传递给延时补偿模块，通过对压电陶瓷的电压控制，进行对传输链路延时的实时补偿。

### 2.2 仿真分析

为模拟 PID 控制压电陶瓷补偿之后的链路延时补偿效果，设当前环境温度的漂移速度最快为  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ，设计通过外接电路每  $0.01 \text{ ms}$  采集一次计数点，则每个计数周期达到的最大温度变化为  $1.667 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据 1.1 节推导的光纤受温度影响的每公里延时变化量，使用  $800 \text{ m}$  的光纤传输，得到每个计数周期最大实现的延时量为  $0.544 \text{ fs}$ 。延时量与相位的关系为：

$$k = \pi \times \frac{\lambda}{2\pi c} = \frac{\lambda}{2c} \quad (11)$$

求得每 4 个计数周期的计数点数为 0.989 个计数条纹，约等于 1 个计数条纹。根据由温度引起的条纹变化时间进行 Matlab 仿真，得到不加 PID 控制下的延时条纹计数图，如图 3 所示，可以看出， $200 \text{ s}$  内在不加 PID 控制的情况下温度影响下的光纤传输延时漂移量非常大。

使用压电陶瓷每  $0.2 \text{ ms}$  进行一次电压调整，根据压电陶瓷特性将电压值转化为对光纤的延时量，进行实时探测，并在 PID 的参数里控制压电陶瓷一次可以补偿的范围，在  $0.2 \text{ ms}$  后补偿到下一个探测点，补偿到实时的延时补偿。根据图 3 拟合的曲线，在 Matlab 中进行 PID 仿真，对 PID 的比例、积分、微分系数进行调整得到由单一参数 PID 控制下的延时条纹计数图，如图 4 所示。可以看出 PID 控制后的传输延时稳定在  $\pm 4$  个计数点以内，即稳定在  $\pm 8.8 \text{ fs}$ 。

使用压电陶瓷每  $0.2 \text{ ms}$  进行一次电压调整，根据压电陶瓷特性将电压值转化为对光纤的延时量，进行实时探测，并在 PID 的参数里控制压电陶瓷一次可以补偿的范围，在  $0.2 \text{ ms}$  后补偿到下一个探测点，补偿到实时的延时补偿。根据图 3 拟合的曲线，在 Matlab 中进行 PID 仿真，对 PID 的比例、积分、微分系数进行调整得到由单一参

数PID控制下的延时条纹计数图，如图4所示。可以看出PID控制后的传输延时稳定在±4个计数点以内，即稳定在±8.8 fs。

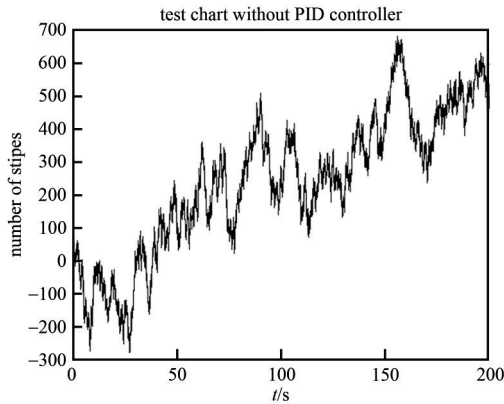


Fig.3 Time-delay stripes counting without PID controlling temperature change  
图3 不加PID控制温度变化下的延时条纹计数图

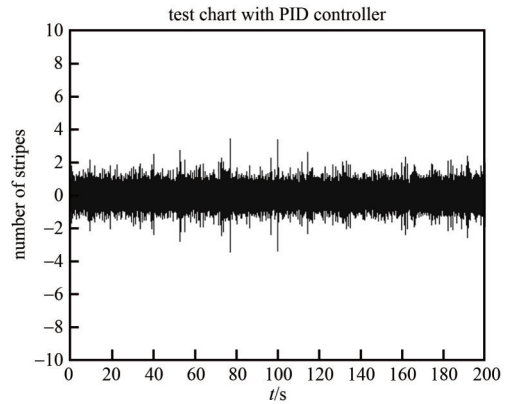


Fig.4 Time-lapse stripes counting under PID control  
图4 PID控制下的延时条纹计数图

由于温度与机械应力对光纤的链路的影响不同，单一的PID算法不能完美应对两种情况，因此设计了由于温度与机械应力变化的链路延时仿真。本文用轴向拉力作为研究对象进行PID补偿，在1 s时，在光纤上施加一次轴向作用于光纤的外力  $F=80\text{ N}$ ，施加在光纤的2 m范围内，条纹数将瞬间有一个大的变化。根据  $S=2\pi r^2$ ， $\beta=\frac{2\pi n}{\lambda}$ ， $p_{11}$ 取0.12， $p_{12}$ 取0.27， $\mu$ 取0.17<sup>[14]</sup>，代入式(5)，得到相位变化  $\Delta\varphi=144.3$ ，条纹计数个数为45个。通过研究发现，当外部环境引起延时瞬时变化时，原有的PID参数将不再适合。图5为在1 s时刻，施加轴向力80 N，在没有PID控制的情况下的延时条纹计数图。图6为PID参数不变的情况下的条纹计数图，可以看出，在外力作用下，PID参数不再适应新的环境，出现振荡，不能再恢复稳定的延时量。

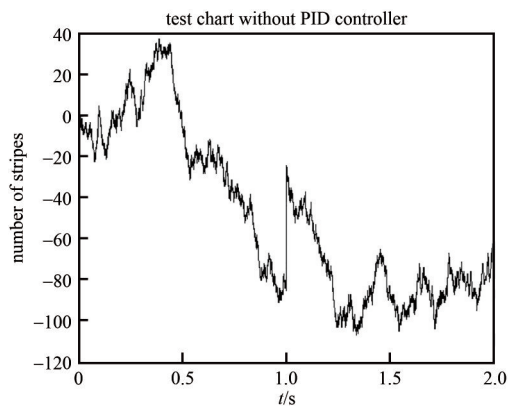


Fig.5 Time-lapse stripes counting under the influence of axial tension  
图5 轴向拉力影响下的延时条纹计数图

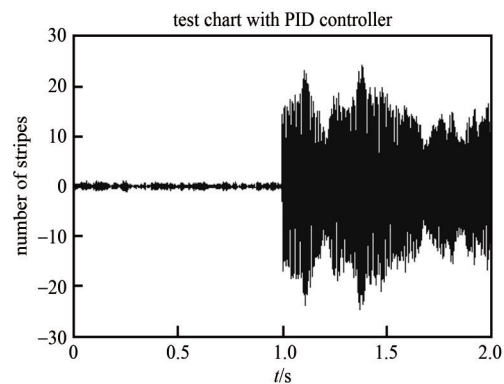


Fig.6 Stripes counting under the influence of axial tension with PID control  
图6 轴向拉力影响下有PID控制条纹计数图

因此，根据不同的情况需要不同的PID参数，本文设计了参数可变的自适应PID算法。当通过算法检测到条纹剧烈快速变化时，更改PID参数直到条纹回归，再返回之前的PID参数，实现对相位抖动的实时补偿。参数可变的自适应PID控制仿真图如图7所示，可以看出，不同大小的轴向力作用下，PID算法回归到稳定在0附近的时间不同，轴向力越大，时间越久。对比图6可以看出，所提出的自适应PID反馈控制方案可以同时应对环境温度与机械应力的影响。在100 N范围内的瞬时作用影响下，回归初值时间可以控制在0.088 s以内。

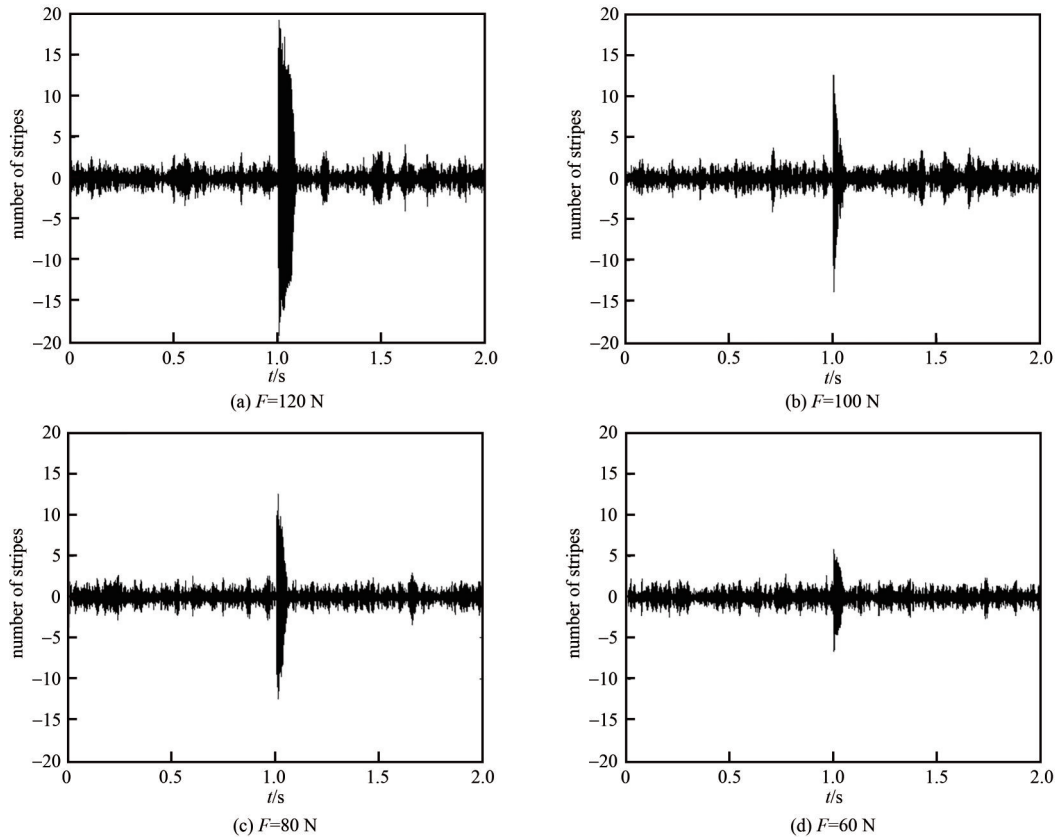


Fig.7 Stripes counting under the influence of axial tension with adaptive PID control  
图7 轴向拉力影响下的自适应PID控制条纹计数图

### 3 结论

本文设计了一种基于PID算法的光载射频稳相传输系统，并提出了一种基于迈克尔逊干涉仪的光纤传输延时高精度测量方法。使用 $3\times 3$ 耦合器进行光纤延时的条纹计数，通过仿真计算得到延时测量精确度为2.2 fs，探测得到的数据经过自适应PID算法处理后，通过压电陶瓷进行实时反馈补偿。根据环境对光纤延时的影响因素进行了理论推导，并使用Matlab软件仿真了没有外力作用下环境对光纤延时的影响。通过对PID参数的设计，仿真得到传输延时稳定性 $< 8.8$  fs。改进了PID算法，解决了原始PID参数无法适应外力作用下高速变化延时量的问题，能够自调节参数以同时应对外界应力和普通环境的变化，对于突发机械应力轴向拉力在100 N范围内的恢复初始状态的时间 $< 0.088$  s。

根据本文研究可知，基于迈克尔逊干涉仪的传输方法可以实现光纤延时的高精度测量， $3\times 3$ 耦合器可以解决三角函数多解的问题，能够探测到传输过程中任何的相位变化，根据不同环境实时调节参数的自适应PID算法可以很好地解决光延时的补偿问题，有效克服时频传递研究中的传统鉴相、延时线等在补偿精确度和速度方面的瓶颈，为实现高精度频率传递提供了更好的解决思路。

#### 参考文献：

- [1] 蒲磊. 石英晶体振荡器在线测试系统的研究与设计[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016. (PU Lei. Research and design of online testing system for quartz crystal oscillator[D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2016.)
- [2] HEAVNER T P, DONLEY E A, LEVI F, et al. First accuracy evaluation of NIST-F2[J]. Metrologia, 2014(51):174–182.
- [3] NICHOLSON T L, CAMPBELL S L, HUTSON R B, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at  $2\times 10^{-18}$  total uncertainty[J]. Nature Communications, 2015(6):6896.
- [4] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level[J]. Nature, 2018(564):87–90.
- [5] 游彪, 杨健. 极化合成孔径雷达图像目标去定向性质及应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(4):527–532. (YOU Biao, YANG Jian. Properties and application of target's deorientation in polarized SAR image[J]. Journal of Terahertz Science

- and Electronic Information Technology, 2014,12(4):527–532.)
- [6] 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. (ZHANG Anxu. Research on optical fiber-based phase-stable transmission technology[D]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.)
- [7] KANG J, SHIN J, KIM C, et al. Few-femtosecond resolution characterization and suppression of excess timing jitter and drift in indoor atmosphere frequency comb transfer[J]. Optics Express, 2014,22(21):26023–26031.
- [8] 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. (YUAN Yibo. Research on time-frequency transmission and synchronization technology of optical fiber network[D]. Beijing:Tsinghua University, 2017.)
- [9] 付沙沙. 非线性系统的模糊控制与自适应故障估计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019. (FU Shasha. Fuzzy control and adaptive fault estimation of nonlinear systems[D]. Harbin, China:Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [10] 马志超, 何翠平, 王绍雷. 环境温度对单模光纤中光信号传输延时的影响[J]. 光通信技术, 2015,39(5):15–16. (MA Zhichao, HE Cuiping, WANG Shaolei. Influence of ambient temperature on the optical signal transmission delay in single mode fiber[J]. Optical Communication Technology, 2015,39(5):15–16.)
- [11] 陆强, 张伟, 林荣刚. 基于光纤传输的延时系统设计[J]. 电子设计工程, 2012,20(23):160–163. (LU Qiang, ZHANG Wei, LIN Ronggang. Design of delay system based on optical fiber transmission[J]. Electronic Design Engineering, 2012,20(23):160–163.)
- [12] 王小成. 时间和频率信号的光纤稳定传输技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2019. (WANG Xiaocheng. Research on optical fiber stable transmission technology of time and frequency signals[D]. Shanghai, China:Shanghai Jiaotong University, 2019.)
- [13] HARTOG A H, CONDUIT A J, PAYNE D N. Variation of pulse delay with stress and temperature in jacketed and unjacketed optical fibres[J]. Optical and Quantum Electronics, 1979(11):265–273.
- [14] 杨双收. 基于偏振的光时域反射技术(POTDR)的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010. (YANG Shuangshou. Research on Polarization-based Optical Time Domain Reflectance(POTDR)[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2010.)

#### 作者简介:

张 磊(1993–), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为微波光子学、时频传递、光纤传感等. email: zhanglei9992021@126.com.

李少波(1986–), 男, 石家庄市人, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为微波光子.

刘彦丹(1991–), 男, 河北省衡水市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波光子.

梁晓东(1988–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波光子技术、集成光电子等.

王东杰(1996–), 男, 河北省邢台市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为微波光子.

邢贯芬(1996–), 男, 太原市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为微波光子.

罗青松(1964–), 男, 广西省桂林市人, 硕士, 主要研究方向为光通信.