

PID算法优化在光纤稳相传输系统中的应用研究

江笛, 徐嘉鑫, 范志强, 王云祥, 邱琪*

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 610097)

摘要:为提高光纤稳相传输系统的稳定度,基于稳相传输系统的基本结构与传递函数,研究了系统的相位漂移和系统稳定度随比例积分微分(PID)算法参数的变化,并通过仿真分析不同参数配置下的系统性能。仿真结果表明:增大比例参数可显著抑制相位漂移,系统稳定度提升2~3个数量级;优化积分参数有助于抑制噪声,长期稳定度提升约1个数量级;调整微分参数可减少系统振荡,短期稳定度提升1个数量级。在不改变系统硬件结构的前提下,通过优化 P 、 I 、 D 各参数可有效提升系统稳定性。

关键词:光纤稳相传输系统;比例积分微分算法;反馈补偿;稳定度;相位漂移

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)05-0057-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.05.010

Research on the application of PID algorithm optimization in optical fiber phase-stabilized transmission system

JIANG Di, XU Jiaxin, FAN Zhiqiang, WANG Yunxiang, QIU Qi*

(School of Optoelectronics Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610097, China)

Abstract: To enhance the stability of the phase-stabilized fiber optic transmission system, an investigation is conducted based on its fundamental structure and transfer function to analyze the relationship between phase drift, overall stability, and the parameters of the proportional-integral-derivative (PID) algorithm. Simulations under various parameter configurations revealed that increasing the proportional coefficient significantly suppresses phase drift, improving system stability by 2~3 orders of magnitude, optimizing the integral parameter helps mitigate noise, enhancing long-term stability by approximately one order of magnitude, and adjusting the derivative parameter reduces system oscillations, thereby boosting short-term stability by one order of magnitude. The results demonstrate that P 、 I 、 D parameters optimization can effectively enhance system stability without any modifications to the hardware architecture.

Key words: optical fiber phase-stabilized transmission system, proportional-integral-derivative algorithm, feedback compensation, stability, phase drift

0 引言

基于光纤的稳相传输技术在时频同步^[1]、光控相控阵雷达^[2]、相参雷达与分布式稳相系统^[3]等诸多领域发挥着举足轻重的作用。得益于光纤的低损耗、大带

宽和抗电磁干扰的特征,基于光纤的稳相传输系统能够将时频同步标准信号与雷达收发信号在不同空间位置之间分配,并取得相较纯电子系统或自由空间传输系统更高的准确度与稳定度。

在光纤稳相传输系统中(下文简称稳相系统),环境温度漂移、机械振动等因素会引起系统的相位漂移与稳定度降低^[4],对长距离光纤传输系统,这种不稳定性会随着光纤长度的增加被等比例放大。利用反馈环路,能够探测系统传输过程中产生的相位和延迟误差,并通过移相、锁相环、光延迟器件等电子或光电补偿方式^[5-8],对稳相系统的相位漂移予以补偿,提高系统的稳定度。目前,对稳相系统的研究大多集中于时频同步、相参雷达等系统的基本结构,以及不同结构

收稿日期:2024-07-04。

基金项目:四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0448, 2023NSFSC1379)资助。

作者简介:江笛(1994—),男,四川绵阳人,电子科技大学光学工程在读博士。主要研究方向为光纤物理特性与基于光纤的微波光子稳相传输技术。参与完成国家级、省部级项目3项;发表SCI期刊论文1篇,中文核心1篇。

***通信作者:**邱琪(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为光纤通信技术与微波光子技术。



所呈现的频率与相位稳定度特性,而关于补偿算法对相位漂移影响的深入分析仍较为缺乏。目前,稳相系统普遍采用锁相环或比例积分微分(PID)控制器来补偿相位漂移。实际上,在稳相系统中,补偿过程本质上是对外界扰动的快速反向调控,其算法参数会直接影响系统的相位特性与稳定度。在相关领域,通过优化锁相环、PID控制器的具体补偿参数,可在不改变硬件架构的基础上,改善系统的工作性能^[9-10]。因此,研究如何优化这些参数,不仅能深化对相位漂移动态过程的理解,还能在不改变系统硬件条件下优化系统性能,具有重要的理论价值和实践意义。

本文旨在研究基于PID补偿算法的稳相系统中,PID参数对相位漂移及系统稳定度的影响,通过分析不同参数配置下相位漂移的变化趋势,阐明各参数在系统稳定性调控中的作用。

1 稳相系统的基本原理

稳相系统的不稳定性与系统各级器件引入的相位噪声、外界环境的温度、机械振动及应力等方面直接相关。光纤的长度、折射率及色散等物理特性易受外界温度、机械振动和应力等因素影响,导致绝对光程发生变化并引入光延迟。其中,温度漂移是引起光延迟变化的主导因素。受光纤链路的光延迟影响,接收端收到的参考信号相位随之发生改变,这是系统相位漂移的主要来源。一个经扰动后传输至接收端的信号可写为

$$u_{\text{out}}(t) = \varepsilon A \sin(2\pi f_0 t + \Delta\varphi) \quad (1)$$

其中, ε 表示射频信号传输过程中幅度的放大倍数, A 表示信号幅度, $\Delta\varphi$ 表示传输过程中引入的相位漂移,它们都是时间的函数, f_0 表示参考频率, t 表示时间。

为实现发送端与接收端信号在时间、频率和相位上的同步,必须对由外界因素引起的相位漂移 $\Delta\varphi$ 进行补偿,这也是稳相系统所需实现的核心目标。该系统通过引入反馈机制来抵消相位漂移,基本结构如图1所示。图1中,参考射频源发出的参考信号经马赫-曾德尔调制器(MZM)调制为光纤稳相传输信号,经过环形器1、光延迟补偿器件后进入光纤传输链路。在光纤传输链路中,稳相信号传输至接收端,参考信号的大部分功率经光功率分配器后前馈至解调设备完成稳相系统的射频传输功能。少部分功率则携带光纤链路的相位漂移信息,经环形器2、光纤链路和环形器1,反馈返回发射端。反馈信号经光电探测器解调后进行滤波,再与原始参考信号通过鉴相器进行鉴相,

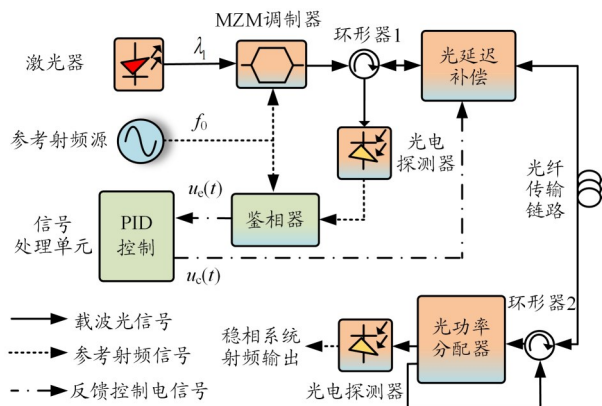


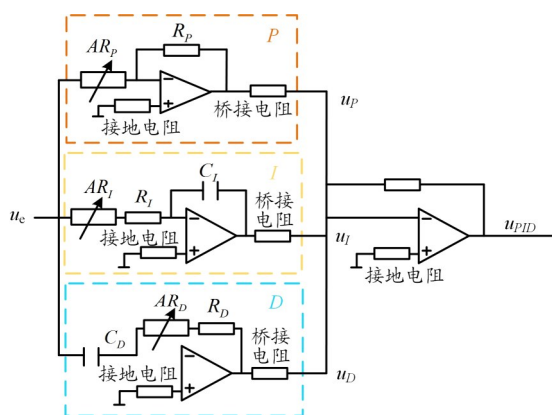
图1 稳相系统基本结构

可以得到携带有稳相系统传输链路引入的相位漂移误差信息的误差信号 $u_e(t) = k\Delta\varphi$, k 表示传输与反馈过程中系统对相位误差信号的放大系数。通过 $u_e(t)$ 和PID参数控制可调光纤延迟器件或相位补偿器件,产生对稳相系统的相位补偿信号 $u_c(t)$,完成对系统的反馈控制功能。

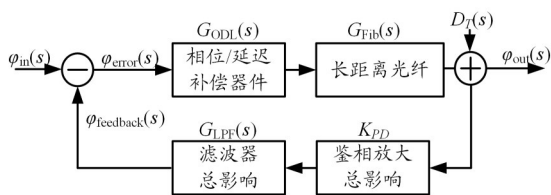
若高稳参考射频源输出参考频率为 f_0 ,则参考信号经往返传输所产生的相位漂移可表示为 $2m\pi + \Delta\varphi = -2\pi f_0 \alpha 2L \Delta T(t)$ 。其中, m 为相位变化的整周期数, α 为温度-延迟系数, L 为光纤链路单程长度, $\Delta T(t)$ 为温度随时间的漂移情况。对于普通单模光纤,其 α 的典型值约为 $40 \text{ ps} \cdot \text{km}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。以一个长度为 100 km 的单模光纤稳相系统为例,在每日温度峰峰值变化为 $\pm 5^\circ\text{C}$ 的情况下,单程光纤将产生约 40 ns 的最大延迟漂移。该延迟量对于 1 GHz 的射频调制信号而言,相当于引入约 40 个信号周期的相位漂移。但相位测量仅能获取不包含周跳($2m\pi$ 整周期跳变)的残余相位差 $\Delta\varphi$ 。当射频信号参考频率 f_0 越高,或稳相系统链路越长时,相位漂移随外界环境变化也越快。

通过反馈得到携带 $\Delta\varphi$ 数值的误差信号 $u_e(t)$,并依 $u_e(t)$ 按比例值控制光延迟补偿器件,可使接收端的参考信号与发射端的参考信号的相位漂移与补偿值抵消,这也是对光纤相位漂移进行基本数值匹配补偿的过程。但在实际工作中,通过反馈信号对相位漂移完成补偿不是一个瞬时完成的冲激响应过程。因此,需要分析稳相系统动态补偿过程与补偿参数对系统稳定性的影响。

PID的基本原理电路与稳相系统基本传递函数框图如图2所示。图2(a)将比例 P 、积分 I 、微分 D 并联,通过改变可变电阻的阻值,分别独立调试每个参数的取值。 P 、 I 、 D 参数分别满足



(a) PID基本电路图



(b) 稳相系统基本传递函数图

图2 PID基本原理与稳相系统基本传递函数框图

$$\begin{cases} u_P = \frac{R_p}{AR_p u_e} \\ u_I = -\frac{1}{C_i(AR_i + R_i)} \int u_e dt \\ u_D = -(AR_d + R_d)C_d \frac{du_e}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

其中, R_p 表示 P 参数电路中的固定电阻, AR_p 表示 P 参数电路中的可变电阻。 u_P 、 u_I 、 u_D 分别为误差输入电信号 u_e 分别经过 P 、 I 、 D 参数作用后的输出电信号, 它们的和即为 PID 补偿量 u_{PID} 。通过调整可变电阻 AR_p 、 AR_i 、 AR_d , 可单独控制 PID 的每一个参数。图 2(b) 中, $\varphi_{in}(s)$ 、 $\varphi_{error}(s)$ 、 $\varphi_{out}(s)$ 、 $\varphi_{feedback}(s)$ 分别为以相位为参考的复数域输入信号、误差信号、输出信号及反馈信号。 $G_{ODL}(s)$ 表示从获取误差信号到完成反馈补偿的过程, 主要包含 PID 补偿函数、光延迟补偿器件的响应函数。 $G_{Fib}(s)$ 表示光纤的传输特性函数, 其中 $D_T(s)$ 为外界以温度为首的环境因素对系统稳定性的扰动。 K_{PPD} 表示信号传输过程中所有放大作用的综合系数。 $G_{LPF}(s)$ 表示系统内置的各级滤波器的总影响。由此, 分析温度漂移等环境扰动对系统相位漂移影响的传递函数可表示为

$$G_T(s) = \frac{1}{1 + K_{PPD} G_{LPF} G_{ODL} G_{Fib}} \quad (3)$$

基于频率的阿伦方差是评估频域稳定性的重要指标, 也被广泛应用于陀螺仪性能分析及稳相系统的

稳定度评价中。对于一个以相位为核心关注点的稳相信号, 基于相位时间的阿伦方差可表示为

$$\delta^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} (x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i)^2 \quad (4)$$

其中, N 为阿伦方差采样点数, τ 为阿伦方差采样间隔; x_i 为相位时间, 它由相位漂移 $\Delta\varphi$ 和参考频率 f_0 定义, 可直接通过相位漂移取得

$$x_i \equiv \frac{\Delta\varphi(t)}{2\pi f_0} \quad (5)$$

由此, 基于可任意调节的 P 、 I 、 D 参数与稳相系统中的各传递函数, 可以分析系统反馈补偿下相位漂移 $\Delta\varphi$ 的变化趋势。根据 $\Delta\varphi$ 的变化趋势, 可以给出基于相位时间的系统稳定度。

2 稳相系统 P 、 I 、 D 各参数对相位漂移与系统稳定度的影响分析

相位是稳相系统的基本参考单位, 稳相系统经往返传输鉴相所得的参考信号与原始参考信号的相位差, 直接表征了稳相系统受环境干扰产生的相位漂移量 $\Delta\varphi$, 且与误差信号成正比, 即 $u_e(t) = k\Delta\varphi$ 。由此, 可通过系统传递函数分析相位漂移的变化情况。目前的研究未能系统性地描述完整的动态补偿过程, 即从误差信号 $u_e(t)$ 生成到补偿信号 $u_c(t)$ 完成补偿之间, 相位漂移的演变规律及算法对稳定性的影响。因此, 本文采用广泛应用的 PID 控制算法, 基于稳相系统的结构及传递函数模型, 对长度为 100 km 的单模光纤稳相系统进行了仿真研究。系统在每日 $\pm 5^\circ\text{C}$ 峰峰值温度漂移的正弦扰动模型下, 传输 5 GHz 射频参考信号, 分析了不同 P 、 I 、 D 各参数对系统相位漂移与稳定度的影响。

2.1 比例参数下稳相系统的相位漂移与稳定度

比例 P 参数是 PID 补偿中最核心的参数, 它直接决定了系统的误差信号 $u_e(t)$ 与反馈补偿信号 $u_c(t)$ 的比例关系。不同比例 P 参数下的相位漂移情况如图 3 所示。可以看出, 在引入比例 P 参数补偿后, 稳相系统相位漂移峰峰值得到压缩。在不引起稳相系统振荡的前提下, 相位漂移的峰峰值随着 P 值增大而减小。比例补偿作用越大, 相位漂移量越小, 发射端与接收端的相位一致性越高。

提高 P 参数不仅能够有效压缩相位漂移的峰峰值, 还能够优化稳相系统的整体稳定度。 P 参数对稳相系统补偿时稳定度的影响如图 4 所示。可以看出, 随着 P 参数的增大, 阿伦标准差越小, 系统的稳定度也

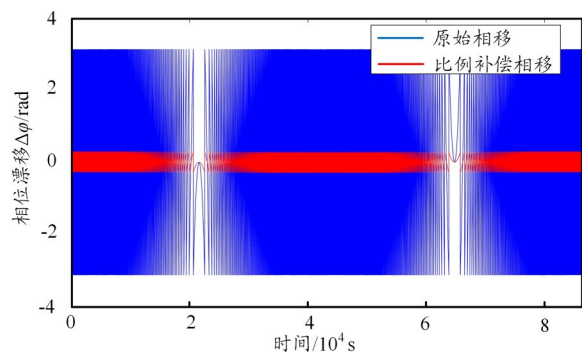
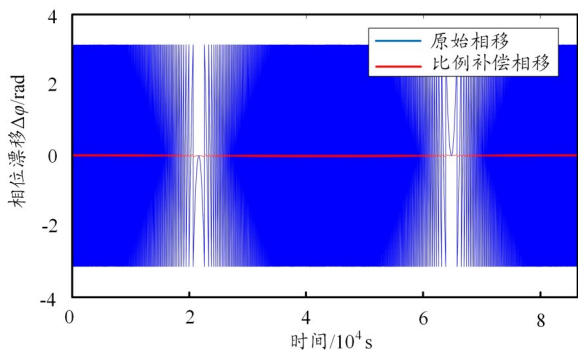
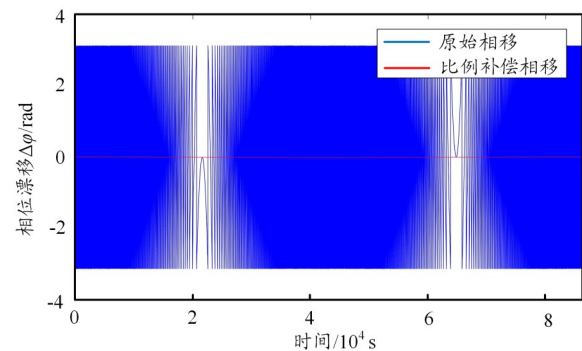
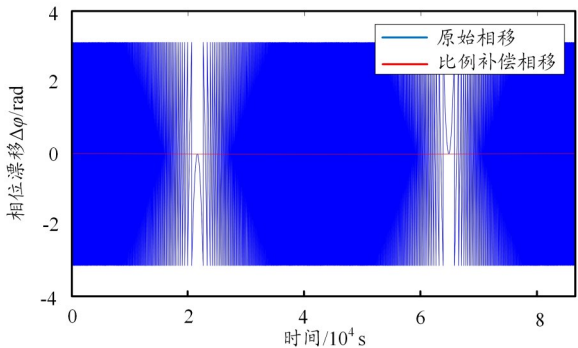
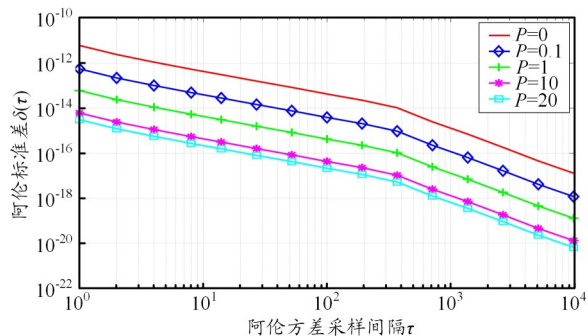
(a) $P=0.1$ (b) $P=1$ (c) $P=10$ (d) $P=20$ 图3 不同比例 P 参数下的相位漂移

图4 比例参数下的阿伦标准差

随之提升,无论是系统的短期稳定度还是长期稳定度都得到优化。但是, P 参数无法无限制增大,当 P 参数超过一定界限时,PID会出现严重的超调振荡,稳相系统则无法正常工作。

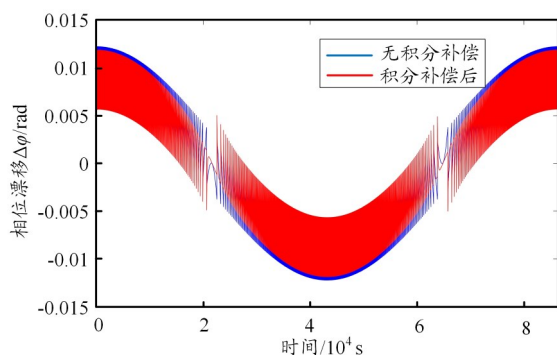
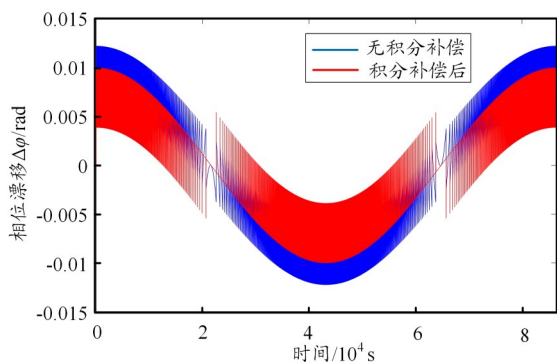
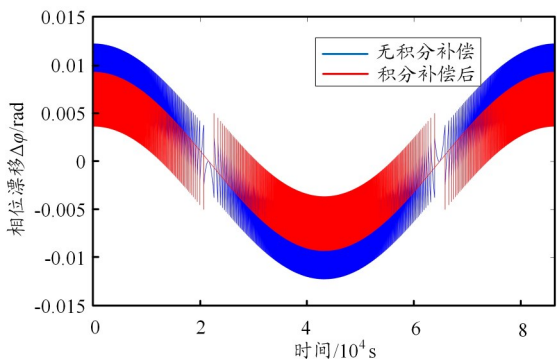
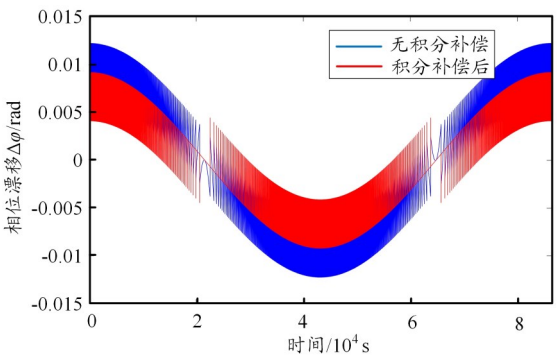
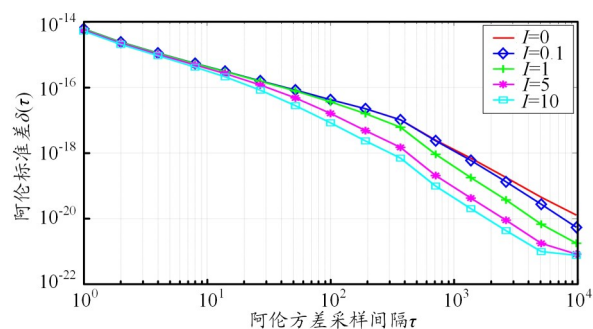
由上述分析可知, P 参数是优化光纤稳相系统性能的关键。在避免系统振荡的前提下,适度增大 P 参数可有效压缩相位漂移,提升系统稳定度2~3个数量级,尤其适用于光控相控阵等高精度场景。但 P 值过大将导致超调累积和系统失稳,因此应在稳定范围内选取较大值以兼顾性能。

2.2 积分参数下稳相系统的相位漂移与稳定度

积分 I 参数是测量和维持稳相系统稳定性的重要一环,通过积分作用,可以抑制部分随机噪声对系统稳定性的影响,并减少稳相系统期望相位与实际补偿相位之间的残余相位误差,使补偿后的相位漂移统计平均值更加趋近于理论期望值。

本文以 $P=10$ 作为控制器的较优工作点,进一步研究积分 I 参数对系统相位漂移特性的调节作用。不同 I 值对应的相位漂移曲线如图5所示。可以看出, I 参数的改变并未显著影响相位漂移的峰峰值与变化趋势,而是使相位漂移呈现一定的有序性,这种特征随着 I 参数的增大而更加明显。这是由于相位漂移补偿受限于信号周跳, I 参数无法对 2π 的周跳作出有效响应。若通过缩短光纤长度使相位漂移 $\Delta\phi$ 限制在一个周期内,或对 $2m\pi + \Delta\phi$ 的相位差进行补偿,则 I 参数能有效将相位漂移压缩至期望值附近,显著消除残差。然而,在实际的稳相系统相位补偿过程中, I 参数所产生的补偿量会随周跳的发生而呈现出一种有序排列的分布特征。

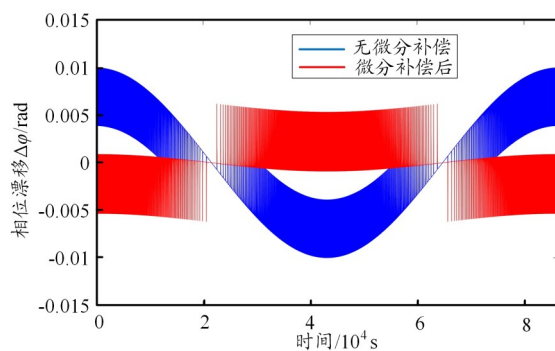
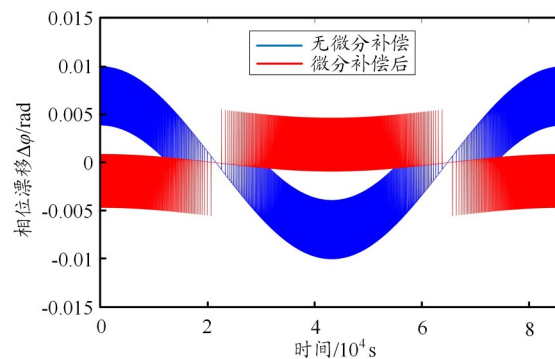
积分 I 参数对稳相系统补偿时,对系统的稳定度影响如图6所示。可以看出, I 参数越大,积分作用越强,阿伦标准差越小,说明系统的长期稳定度越高。此外,过高的 I 参数易引发系统振荡甚至失稳。因此,

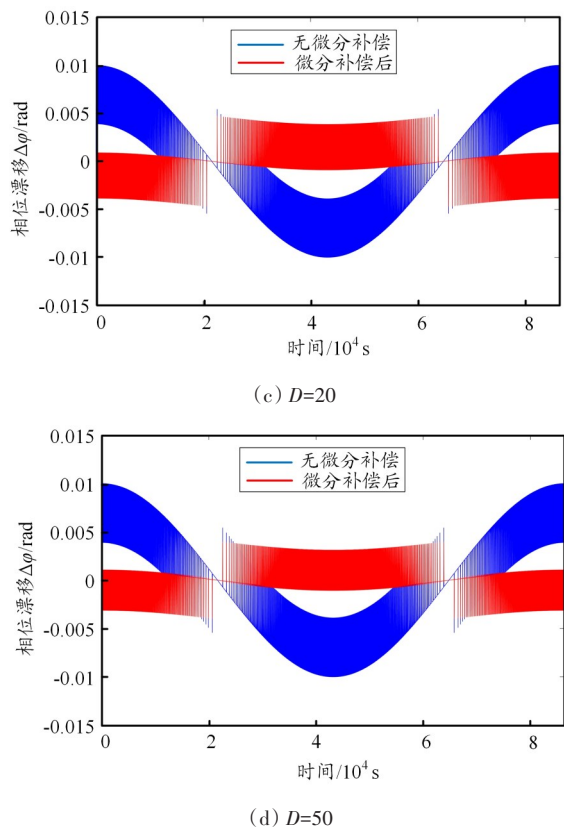
(a) $I=0.1$ (b) $I=1$ (c) $I=5$ (d) $I=10$ 图5 不同积分 I 参数下的相位漂移图6 积分 I 参数下的阿伦标准差

在 P 参数确定后,应在满足长期稳定度要求并有效抑制噪声的前提下,尽可能选取较小的 I 参数值,以避免系统振荡。综合系统无振荡与长期稳定度对 I 参数的制约关系,选择合适的 I 参数值,系统的长期稳定度能够提升约1个数量级。

2.3 微分参数下稳相系统的相位漂移与稳定度

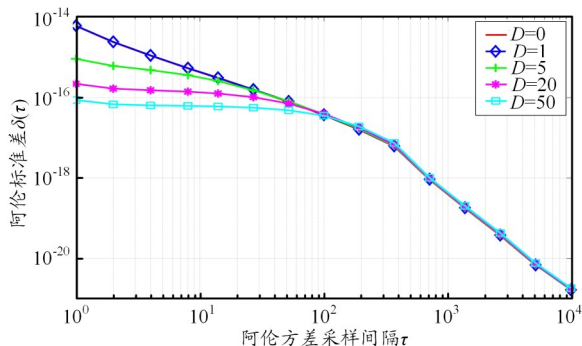
微分 D 参数能够预测相位漂移的变化趋势,并提前进行补偿,从而有效抑制由比例 P 参数和积分 I 参数引起的系统超调与振荡。在较优的 P 和 I 参数 ($P=10$, $I=1$) 下,微分 D 参数对系统相位漂移特性的影响如图7所示。可以看出,引入 D 参数后,系统相位漂移的整体趋势得到有效抑制,输出相位被稳定在期望值附近,

(a) $D=1$ (b) $D=5$

图7 不同微分 D 参数下的相位漂移

且相位抖动的峰峰值随 D 值增大而进一步压缩。

微分 D 参数对稳相系统的稳定度影响如图8所示。与 I 参数主要改善长期稳定度不同, D 参数的作用集中于提高系统的短期稳定度,在理想条件下(无随机噪声), D 值越大,阿伦标准差越小,系统短期稳定度越高。然而,微分环节对随机噪声较为敏感,会显著放大高频噪声,严重时可能淹没有用信号,恶化系统性能。因此,在随机噪声功率较高且对短期稳定度要求不高的场景中,应减小 D 值以抑制噪声放大。

图8 微分 D 参数下的阿伦标准差

由上述分析可知, D 参数的选取应在兼顾抑制振荡、满足短期稳定度要求的前提下,尽可能选用较小数值,以实现系统响应速度与抗干扰能力之间的最优

平衡。通过调整 D 参数的取值,改善系统响应能力,能够提升系统约1个数量级的短期稳定度。

综上所述,参数调整应遵循分步优化策略:首先依据实际应用需求粗调 P 参数,使系统初步逼近相位稳定范围;随后引入积分 I 和微分 D 参数,以抑制系统噪声与振荡,确保系统稳定运行于目标状态;最后对 P 、 I 、 D 各参数依次进行精细微调,协同优化系统短期及长期稳定度性能。

3 结束语

本文基于光纤稳相传输系统基本结构与PID补偿算法原理,分析了比例 P 、积分 I 、微分 D 对系统的相位漂移与稳定度的影响。研究表明, P 、 I 、 D 各参数可分别从不同维度提升系统稳定度: P 参数可将系统整体稳定度提高2~3个数量级; I 参数主要改善长期稳定度,提升约1个数量级; D 参数则有效增强短期稳定度,提升约1个数量级。在不改变硬件结构的条件下,通过优化PID补偿算法显著提高了系统稳定性,为在现有平台上进一步提升光纤稳相系统的性能提供了一种有效途径。

参考文献

- [1] 袁一博. 光纤网络时间频率传输与同步技术研究[D]. 北京:清华大学物理学院, 2017: 14-26.
- [2] 孙明明. 光控相控阵天线系统中微波光子信号处理关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2017: 71-79.
- [3] 魏娟. 面向分布式相参雷达的微波光子信号产生与传输研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018: 73-84.
- [4] 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 & Quantum Electronics, 1979, 11(3): 265-273.
- [5] KREHLIK P, SLIWICZYNSKI L, BUCZEK L, et al. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(10): 2844-2851.
- [6] 赵俊杰, 刘田, 王波, 等. 基于光纤的分布式稳相传输技术[J]. 电子信息对抗技术, 2019, 34(2): 64-67.
- [7] CHEN Z Y, ZHOU T, ZHONG X, et al. Stable downlinks for wide-band radio frequencies in distributed noncooperative system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4514-4518.
- [8] ZHANG A X, DAI Y T, YIN F F, et al. Stable radio-frequency delivery by lambda dispersion-induced optical tunable delay[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2419-2421.
- [9] ZHANG Y L, HOU D, ZHAO J Y. Long-term frequency stabilization of an optoelectronic oscillator using phase-locked loop[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(13): 2408-2414.
- [10] 侯佳佳, 赵刚, 谭巍, 等. 基于压电陶瓷与光纤光电调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 136-143.