

# 卫星光通信中平台抖动补偿技术研究<sup>\*</sup>

尹道素<sup>\*\*</sup> 熊金涛 皮德忠

(电子科技大学应用物理所 成都 610054)

**【摘要】** 以卫星光通信系统为例,对空间光通信系统中光学平台的抖动进行了分析。研究了一种自调节前馈补偿技术,通过自适应信号处理或对前馈控制器进行直接优化,可对光学平台的抖动进行有效抑制。

**关键词** 空间光通信; 光学平台; 抖动抑制; 前馈补偿

**中图分类号** TN929.1; TP273.3

在空间光通信的 ATP 技术中,如何提高系统的定位精度一直是人们非常关注的问题,这一问题可采用三环路控制结构和采用水平/倾斜万向支架等方法解决<sup>[1~5]</sup>。事实上,还有一个更为复杂的问题就是平台抖动的抑制,在运动载体的空间光通信系统中,抖动信号具体特性的获取比较困难,但其对收发的光信号造成的非线性影响是十分明显的,甚至会导致通信的中断。

本文以卫星的抖动状况为例,研究一种自动调节前馈补偿对抖动信号的抑制。在卫星光通信系统中,引起光学平台抖动的主要因素有:陀螺、伺服机械、平台的热膨胀/收缩、地球引力场,这些因素引起的抖动相对比较固定。还有一些抖动源则是动态的、非周期的和随机的,如初始条件的不同、轨道的椭圆性、微陨星体的碰撞等。尽管如此,卫星抖动信号的频谱还是有规可寻的。大量研究表明,卫星的抖动信号可表示为一种“有色”噪声,其频谱成分大多集中在 1 kHz 以内的频段,并在低频部分有几处明显的“尖峰”<sup>[6,7]</sup>。

## 1 补偿原理

实际上,卫星抖动可以看成是一种机械振动,并可通过加速计检测<sup>[6]</sup>。为了测得抖动信号的实际波形,可设计一 RLC 模拟电路,使其传递函数  $Q(j\omega)$  尽量接近于加速计传递函数  $G(j\omega)$  的倒数,即

$$Q(j\omega) \approx [G(j\omega)]^{-1} \quad (1)$$

再通过计算机模拟,对抖动信号进行重建。因为抖动信号沿机械路径传播的过程中,已先经过了监测和电路补偿后才作用于系统输出,所以前馈补偿能在很大程度上抑制抖动信号。

当然,对于实际系统来讲,这种补偿过于简化。首先,抖动信号不应只有一路监测,而应从正交的三个方向监测;其次,作为一个复杂的机械结构系统,抖动补偿信号应是三个正交方向上抖动信号的线性组合,即

$$U(j\omega) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i Q_i(j\omega) X_i(j\omega) \quad (2)$$

其中  $U(j\omega)$  是前馈补偿信号  $u(t)$  的傅里叶变换;  $X_i(j\omega)$  是微加速计输出信号  $x_i(t)$  的傅里叶变换;  $\alpha_i$  是一个与光学系统几何尺寸有关的未知系数,如图 1 所示。另外,微加速计的传递函数与 RLC 模拟电路传递函数间的关系是否满足式 (1),也是抑制抖动信号的一个关键问题。因为微加速

1998 年 6 月 17 日收稿

\* 国防科研基金资助项目

\*\* 女 30 岁 博士 讲师

计的特性可能受到温度变化、辐射等环境条件的影响, 其传递函数是否可以通过适当的屏蔽、电路补偿加以稳定, 还需要具体地分析和考虑。

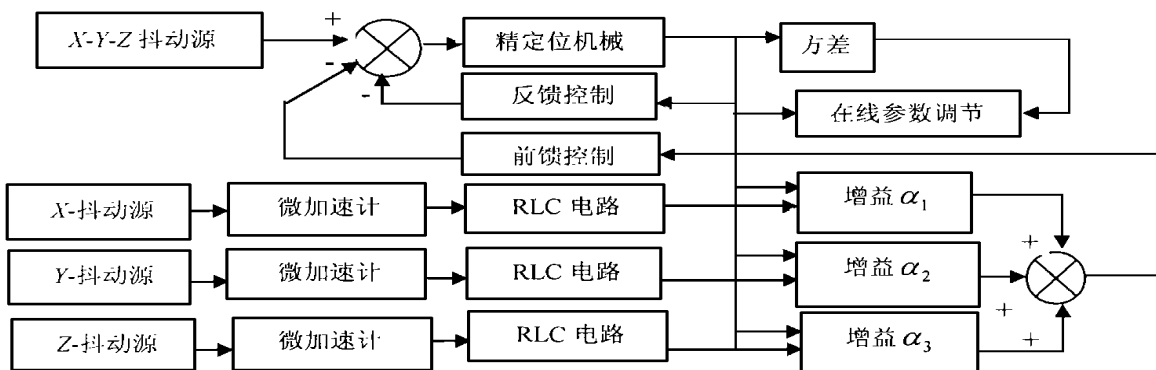


图 1 自调节前馈补偿

## 2 自调节前馈补偿

要想进一步抑制抖动信号, 式 (2) 中系数 (增益)  $\alpha_i, i = 1, 2, 3$  的选取应满足这样一个条件: 将所有抖动信号减到最小。也就是说, 这些系数不是一旦确定就完全不变, 而是根据微加速计的增益和特殊的抖动特性相应地做周期性的调整, 即所谓的自调节控制<sup>[7]</sup>。

虽然控制理论已经确定, 其具体实现仍是一个非常复杂的问题。常用的自调节控制往往都是建立在控制过程的数学模型的基础上, 利用递归最小平方估计方法对控制过程的当前特性进行估计, 或者直接估计控制器的参数, 然后进行相应的控制。这两种方法均存在一些缺点, 甚至有时不但没有改善系统性能, 而是使其更加恶化。

本文研究的一种自调节补偿方法原理框图如图 2 所示。该方法不仅可以抑制光学平台的震动, 而且可以在很大程度上对卫星的抖动进行补偿。图 2 中,  $G_F(S), G_O(S), G_Q(S)$  分别表示精定位驱动源、光学天线、四象限探测器的传递函数,  $H(S)$  是反馈控制器的传递函数。则其闭环传递函数  $G_{CL}(S)$  为

$$G_{CL}(S) = \frac{G_F(S)G_O(S)G_Q(S)}{1 + G_F(S)G_O(S)G_Q(S)H(S)}$$

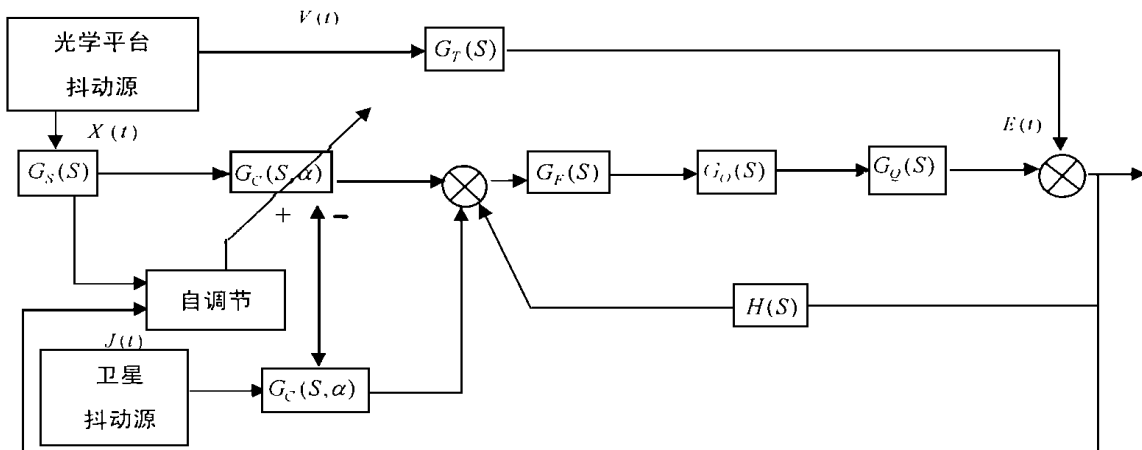


图 2 自调节控制框图

式中  $G_T(S)$  是平台抖动信号传播路径的传递函数, 它将抖动信号  $V(t)$  转换为四象限探测器误差信号  $E(t)$ , 其表达式与光学系统元件结构、光学平台在星体上的安装以及对温度的敏感程度等因素有关。  $G_S(S)$  表示安装于光学平台上的一组微加速计的传递函数, 这组微加速计由三个正交方向上的三个微加速计组成, 其作用是测量平台的抖动信号  $V(t)$ 。  $G_C(S, \alpha)$  是自调节前馈控制器的表达式, 自调节前馈控制器的作用是产生抖动补偿信号  $P(t)$ , 其参数  $\alpha$  可根据各个系统的应用情况, 通过软件或电路进行调节。

信号  $P(t)$  输入精定位控制电路, 要想实现对抖动信号的补偿, 有

$$G_T(S) = -G_S(S)G_C(S, \alpha)G_{CL}(S) \quad (3)$$

由于  $G_T(S)$  不能精确得知, 式 (3) 的实现只能通过自调节前馈控制器来调节, 自调节控制器通过对参数  $\alpha$  的调节, 使四象限探测器误差信号的方差随时都处于最小状态。

至于卫星的抖动信号  $J(t)$ , 其检测仍是通过三个加速计。要实现对其抖动信号  $J(t)$  的补偿, 首先应将其等效为相应的位置参考信号, 并输入到精定位控制电路中。考虑到卫星抖动信号和平台抖动信号都是沿同一路径传播, 其补偿调节方法也就与  $V(t)$  的补偿调节方法一样。

综合起来, 上述过程包括:

- 1) 通过优化自调节前馈控制器  $G_C(S, \alpha)$  中的参数  $\alpha$ , 可对光学平台的抖动信号进行抑制;
- 2) 当抖动信号的影响低于某些规定的容限时, 自调节前馈控制器中的参数便开始作用于预处理器;
- 3) 连续监测光学平台的抖动信号和四象限探测器的误差信号, 并提供给下一步调节程序, 使之对预处理器的性能进行实时修正。

### 3 自调节过程

要抑制光学平台和卫星的抖动, 应考虑三个方向上的影响, 而每个方向上的抖动信号又和四象限探测器水平、垂直的两个误差信号相联系, 因此,  $G_T(S)$  可以被看成一个  $3 \times 2$  的传输矩阵。三个微加速计的动态特性  $G_S(S)$  可表示为一个连续的  $3 \times 3$  传输矩阵, 闭环传递函数  $G_{CL}(S)$  为一个  $2 \times 2$  传输矩阵,  $G_C(S, \alpha)$  为一个  $3 \times 2$  传输矩阵。

先以一定的形式对  $G_C(S, \alpha)$  进行初始化, 并通过调节使  $G_C(S, \alpha)$  和  $G_T(S)$  满足式 (3) 的要求。调整  $G_C(S, \alpha)$ , 使四象限探测器输出误差信号的方差  $\sigma_E^2$  最小, 相应的  $\sigma_E^2$  值就定义为自调节过程的最小值, 并作为前馈控制器参数  $\alpha$  调节的参考。

#### 1) 前馈控制器的直接优化

这是一种典型的自适应控制方法。定义  $G_C(S, \alpha)$  为

$$P = \begin{bmatrix} g_{11}(s, \alpha_{11}) & g_{12}(s, \alpha_{12}) \\ g_{21}(s, \alpha_{21}) & g_{22}(s, \alpha_{22}) \\ g_{31}(s, \alpha_{31}) & g_{33}(s, \alpha_{33}) \end{bmatrix}$$

其中  $g_{ij}(s, \alpha) = (a_{ij}s^2 + b_{ij}s + c_{ij})^{-1}$ ,  $i = 1, 2, 3$   $j = 1, 2$ 。

位置误差信号  $\sigma_E^2$  可以表示为三个正交方向上误差信号的和, 即

$$\sigma_E^2 = \sum_{j=1}^3 \sigma_{jE}^2$$

其中

$$\sigma_{jE}^2 = T^{-1} \int_{t-T}^t [x_j^2(t) + y_j^2(t)] dt$$

$t$  为连续时间,  $T$  为固定的时间间隔,  $x_j(t), y_j(t)$  表示第  $j$  个方向上的抖动信号在四象限探测器形成的误差信号的水平垂直分量,  $j = 1, 2, 3$ 。

显然,  $\sigma_E^2$  是传输矩阵  $\sigma_E^2 = \Phi(\alpha)$  参数  $\alpha$  的函数

$$\alpha = [a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}], i = 1, 2, 3 j = 1, 2$$

虽然模拟表达式  $\Phi(\alpha)$  未知,  $\sigma_E^2$  却可以由  $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$  数字化地定义, 即直接求出自适应过程中误差信号的最小方差值  $\sigma_E^2$ 。其中很重要的一点是, 三个方向上的抖动信号是加性的, 可以将它们一次减到最小。

### 2) 自适应信号处理的应用

这一方法是基于简单而快速的全数字式最小均方 (LMS—Least Mean Square) 算法, 最早由 Widrow 提出<sup>[6,7]</sup>, 并成功地得到应用<sup>[8,9]</sup>。LMS 算法表明, 通过加权值的分段延迟可以等效模拟声(波)传播路径, 在这种情况下, 每个延迟分段采取移位寄存器或梯度调整加权矢量的形式而形成的自适应滤波器, 如图 3 所示。

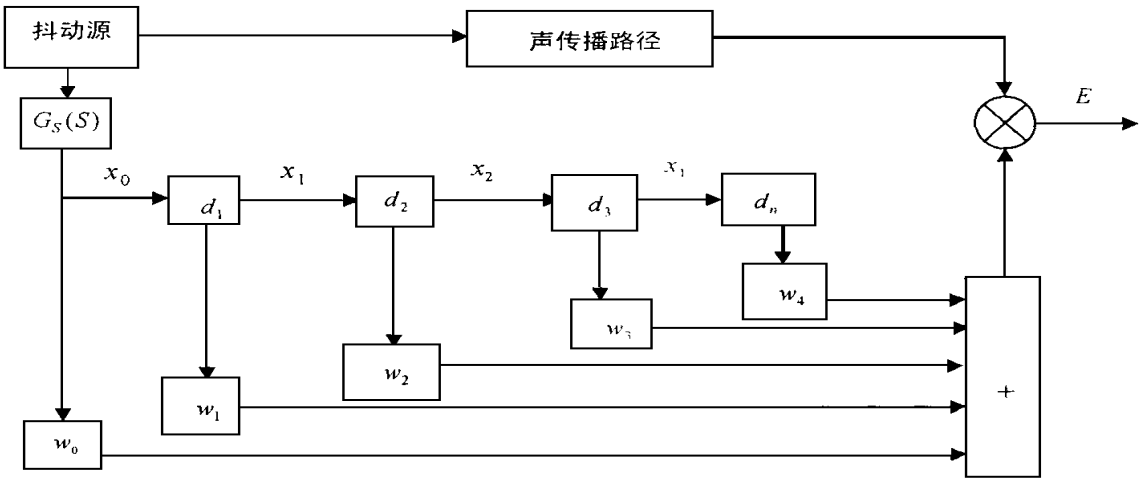


图 3 LMS 补偿器框图

可调权值  $W_{k+1}$  为

$$W_{k+1} = W_k + 2\mu E_k X_k$$

其中  $k = 1, 2, 3 \dots$  是离散时间系数,  $\mu$  是(自适应)调整率,  $E_k = E(k\Delta t)$  是四象限探测器误差。

LMS 算法的优点在于不需要对补偿器  $G_C(S, \alpha)$  的参数进行特殊的定义, 而集中考虑更进一步的声传播路径或精定位天线的动态性能。它的初始化主要是对当前参数  $\mu$  和滤波器级数的选择, 这两个参数在处理过程中可能会变化。

## 5 结 论

一般说来, 在近距离的地面站间进行光通信, 其 ATP 控制系统可选用双环结构, 但对于运动载体及卫星间的空间光通信, 则必须采用三环控制系统。

从理论上讲, 一个优良的控制系统的可以抑制光学平台在运动过程中的抖动的, 但其实现往往受到实际控制系统响应速度的限制。加之由于陀螺、机械平台的热胀/冷缩以及地球引力场等的影响, 将引起光学平台在通信过程中的抖动。如何抑制光学平台的抖动是提高定位精度的一个重要因素。本文研究了一种自调节前馈补偿技术, 通过自调节前馈控制器的作用, 产生抖

动补偿信号。这种技术能对抖动信号进行有效抑制。

### 参 考 文 献

- 1 Busch T E, Skormin V A. Experimental implementation of model reference control for fine-tracking mirrors. SPIE, 1997, 2 990: 183~189
- 2 Baister G C, Gatenby P V, Lewis J et al. Small optical-terminal designs with a softmount interface. SPIE, 1997, 2 990: 172~182
- 3 Merritt P H, Meline M E. Disturbance effects on a ground-based precision tracking system. SPIE, 1986, 641: 32~42
- 4 Pringle R, Gniady J A, Liskow D H et al. Scaled experiment for assessment of precise active tracking. SPIE, 641: 66~76
- 5 Borrello M A, Santana M S, Weight T H. Jitter stabilization experiment for a precision pointing optical system. SPIE, 641: 94~101
- 6 Skormin Victor A, Tascillo Mark A. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system. Optical Engineering, 1993, 32 (11): 2 764~2 769
- 7 Skormin Victor A, Tascillo Mark A, Busch Timothy E. Adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication systems. Optical Engineering, 1995, 34 (5): 1 263~1 267
- 8 kormin V A, Tasullo M A, Bush T E. Demonstrator of jitter rejection technique for free-space laser communication. SPIE, 1994, 2 123: 381~392
- 9 Dirk Giggenbach, Anton Schex, Bernhard Wandernoth. Prototype of a coherent tracking and detection receiver with wide band vibration compensation for free-space laser communications. SPIE, 1996, 2 699: 186~191

## Compensation Technology of Optical Platform Jitter for Intersatellite Laser Communication System

Yin Daosu    Xiong Jintao    Pi Dezhong

(Institute of Applied Physics, UEST of China, Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, a feed-forward compensation method to restrain the jitter of the optical platform in inter-satellite laser communication is discussed. Using this method, by producing jitter compensation signal from self-tuning feed-forward controller, the jitter signal can be reduced effectively.

**Key words** space laser communication; optical platform; jitter compensation; foreword-back control