

文章编号 1004-924X(2011)09-1991-08

抑制光束抖动的快速反射镜复合控制

丁科^{1,2,3*}, 黄永梅^{1,2}, 马佳光^{1,2}, 付承毓^{1,2}

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209;

2. 中国科学院光束控制重点实验室, 四川成都 610209; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了改进的抑制光束抖动的快速反射镜控制算法,用于提高卫星平台捕获跟瞄(ATP)系统的瞄准精度。根据自适应前馈控制和经典PID控制算法的特点,分析了两种算法复合控制的优势。探讨了现有直接复合控制算法中自适应算法不收敛的原因,并依据解耦理论引入了解耦的复合控制算法,解决了现有直接复合算法不收敛的问题。最后,对经典PID控制,自适应前馈控制和解耦复合控制算法进行了实验比较。实验结果表明,在给定实验条件下,解耦复合控制算法的控制精度相对于经典PID反馈算法提高了近10倍;相对于自适应前馈算法提高了约3倍。结果显示,提出的解耦复合控制的算法结合了两种算法的优点,对抑制光束抖动更有效。

关键词:激光通信;光束抖动;快速反射镜;反馈控制;自适应前馈控制;直接复合控制;解耦复合控制

中图分类号: TN929.1; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.1991

Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter

DING Ke^{1,2,3*}, HUANG Yong-mei^{1,2}, MA Jia-guang^{1,2}, FU Cheng-yu^{1,2}

(1. Institute of Optics & Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Key Laboratory of Beam Control of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: dingke206@mails.gucas.ac.cn

Abstract: An improved composite control algorithm to improve the pointing accuracy of a Acquiring, Tracking and Pointing(ATP) system in a satellite platform was presented for controlling a fast-steering-mirror to reduce the beam jitter. The advantages of the composite control combined an adaptive feedforward algorithm and a PID feedback algorithm were analyzed according to the two algorithms' characteristics. Then, the convergence problem of direct composite control of two algorithms was analyzed and solved by introducing a new algorithm, decoupling composite control using decoupling theory. Finally, the algorithms referred above were experimented and compared. Experimental results indicate that, in the experiment conditions, the control accuracy of the decoupling composite control algorithm is nearly 10 times better than that of the classic PID control algorithm and 3 times better than that of the adaptive feedforward algorithm, respectively. It concludes that the decoupling composite control algorithm combines the merits of two algorithms and can reduce the beam jitter better.

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-01-25.

基金项目: 中国科学院光束控制重点实验室预研基金资助课题(No. A09k002)

Key words: laser communication; beam jitter; fast-steering-mirror; feedback control; adaptive feedforward control; direct composite control; decoupling composite control

1 引言

星地激光通信链路中,激光穿越大气到达卫星平台捕获跟瞄(Acquiring, Tracking and Pointing, ATP)系统的通信接收器时会产生光束抖动。抖动的原因主要有 3 个:(1)粗跟踪系统的残差;(2)大气湍流造成的光束抖动;(3)卫星平台传递给 ATP 系统的谐波振动。如果不加以控制,抖动造成的功率损失会远远超过通信接收器能容忍的程度。控制抖动通常是在粗跟踪基础上增加一套精跟踪系统,也就是在系统光路中增加一块快速反射镜和与通信接收器共光轴的信标探测器,探测器将得到的误差信号通过反馈来控制光束瞄准靶面的中心,从而使通信激光也被控制在通信探测器中心,这种将粗跟踪机架构成的粗跟踪系统和快速反射镜构成的精跟踪系统结合在一起就是复合轴控制系统^[1-2]。快速反射镜的控制律一般选用比例积分微分(PID),其设计简单,抑制能力取决于精跟踪系统的带宽,对抑制能力范围内的宽带和窄带的扰动都有很好的抑制效果。然而在卫星激光通信系统中,由于能量限制,系统的采样率只能做到几千赫兹,加上图像处理造成的系统延迟,抑制带宽通常只能做到一百多赫兹,这样的能力对于宽带抖动可以抑制得很好,但是对于卫星振动造成的窄带抖动却无法要求,根据美国 NASA 发布的卫星振动的功率谱,如果采用 PID 控制将 100 Hz 高达 12 μrad 的抖动抑制到 3 μrad ,抑制带宽应在 200 Hz,这在目前来说还是很困难的。

前馈补偿可很好地抑制窄带振动^[3-4],但是这对前馈信号的频率,相位,增益都有很高的要求,而且当环境变化后还需要重新设计控制器,这对实现卫星平台振动的抑制尤为困难。目前,前馈自适应控制也就是自适应逆控制^[5-6]技术对光束的窄带抖动控制显示出了很大的潜能,其只需要测量抖动信号的频率,对增益和相位的要求都很低,已经有很多文献^[7-9]对这个问题表示出了极大的关注,并取得了不错的效果。但是自适应前

馈补偿对于宽带扰动的效果不好,而这恰好是经典反馈控制的强项,不难看出,将反馈控制和自适应前馈控制结合起来是有效的控制方法。本文根据上述两种算法的特点,分析了复合控制的优势,在实验中发现直接将两种控制算法复合时自适应算法存在收敛性问题,在对自适应算法的收敛原理进行分析后提出了解耦的复合控制方法。该方法既维持了反馈回路的增益,又保证了自适应前馈控制的收敛。实验结果表明,这种解耦复合控制方法能同时对宽带和窄带的扰动有很好的抑制效果,能有效提高星地激光链路的性能。

2 快速反射镜系统控制模型及算法

由快速反射镜和精探测器构成的精跟踪系统是复合轴系统的子轴,其精度直接决定了复合轴系统的精度^[1-2]。图 1 是星地激光通信链路中卫星平台 ATP 系统精跟踪子系统示意图。快速反射镜控制算法就是要通过对快速反射镜施加控制使得信标光与定标点之间的误差最小。

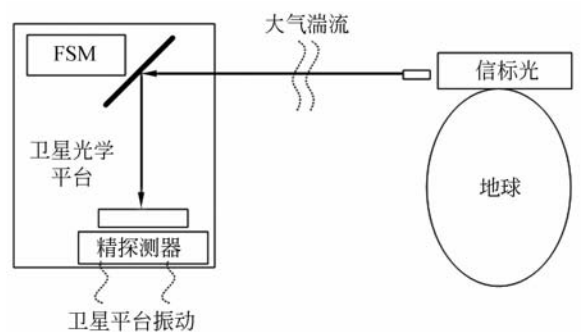


图 1 卫星平台 ATP 系统精跟踪子系统示意图

Fig. 1 Sketch map of precision tracking subsystem of satellite platform ATP system

2.1 快速反射镜的 PID 反馈控制

图 2 是经典 PID 反馈控制算法的原理图,图中 d 为信标光轴需要定位的位置,一般为 0 或 1 个常量; r 为图 1 中大气湍流和卫星平台振动对信标光轴的扰动; y 为快速反射镜对信标光轴的校正; Y 为信标光经过扰动和校正后实际的信标

光轴; e 为由精探测器探测到的实际光轴和参考光轴的误差,也称为脱靶量。通常采用 Matlab/sisotool 工具来设计 PID 控制器,设计原则一般是系统开环为一型且具有 6~10 dB 幅值裕度和 45~60° 的相位裕度。

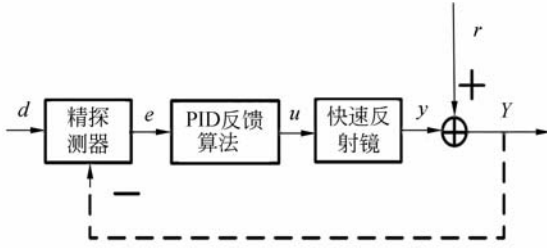


图 2 经典 PID 算法原理图

Fig. 2 Block diagram of classic PID algorithm

2.2 快速反射镜的自适应前馈控制

图 3 是自适应前馈控制算法的原理图^[7-9],容易看出其与反馈控制算法的区别有两点:第一个是误差不再直接经过控制器产生控制信号,而是通过自适应算法改变自适应前馈控制器参数,使得误差依据某种最优原则收敛到最优;第二个是需要对扰动 r 进行测量,这在反馈算法中是不需要的。

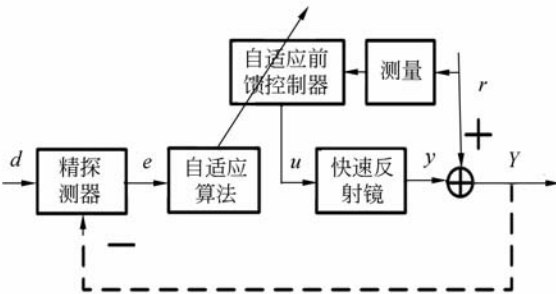


图 3 自适应前馈控制算法原理图

Fig. 3 Block diagram of adaptive feedforward algorithm

2.3 快速反射镜的复合控制

从文献[7-9]和后面的实验结果都可以发现,自适应前馈控制器对宽带扰动的抑制效果并不好,而经典反馈 PID 控制对扰动的抑制不分宽带和窄带,因此将反馈和自适应前馈结合在一起形成复合控制很自然成为人们的共识。图 4 是这种直接复合控制算法的原理图,图中 u_1 和 u_2 分别代表自适应前馈控制器和 PID 控制器产生的控制量。在文献[7-9]中,这种复合控制方法的目的主要是利用反馈控制来迅速消除静态或动态偏差

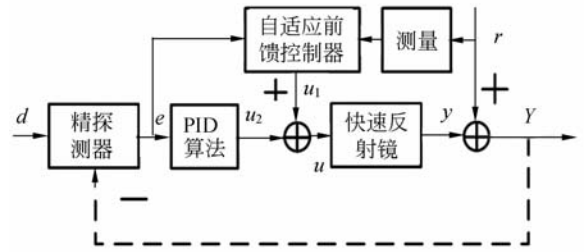


图 4 直接复合控制算法原理图

Fig. 4 Block diagram of direct composite algorithm

对自适应算法收敛的影响。文献[7]提到了反馈采用积分器时自适应前馈出现不收敛,但并没有给出实质性分析,而是采用反馈中不添加积分器使算法收敛。文献[9]没有提到反馈环路增益的设计,而是如图 4 所示将自适应前馈和反馈直接复合,文中没有提到复合控制的稳定性,但是可以分析出其反馈回路的增益不需要太高,所以没有出现收敛性问题。本文在实验中发现提高反馈回路增益至单反馈回路增益的 40% 以上时,自适应算法不再收敛,因此对这种直接复合控制中自适应算法不能收敛的原因进行了分析并提出了解耦的符合控制算法。

3 反馈和自适应前馈的复合控制

3.1 直接复合控制收敛性分析

这里首先分析自适应算法的收敛原理,图 5 是自适应 FIR 滤波器的原理图,将图中的关系表示成矩阵形式:

$$y_j = \mathbf{X}_j^T \mathbf{W} = \mathbf{W}^T \mathbf{X}_j, \tag{1}$$

$$e_j = d_j - y_j = d_j - \mathbf{X}_j^T \mathbf{W}, \tag{2}$$

式中 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$, $\mathbf{X} = [x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{Nj}]^T$, y_j 是滤波器的单位脉冲响应, d_j 是参考信号, e_j 是误差信号。

自适应算法中,误差信号被用来作为权系数的控制信号。采用均方误差原则,经过推导可以得到性能函数表达式如下:

$$E[e_j^2] = E[d_j^2] - 2\mathbf{R}_{dx}^T \mathbf{W} + \mathbf{W}^T \mathbf{R}_{xx} \mathbf{W}, \tag{3}$$

式中 \mathbf{R}_{dx} 为 d_j 和 \mathbf{X}_j 的互相关矩阵, \mathbf{R}_{xx} 是输入信号的自相关矩阵。式(3)表明当输入信号和期望信号是平稳随机信号时,均方误差信号是权系数的二次函数,即式(3)展开时,公式中的权系数均以它的一次或二次幂出现,对于两个权系数 w_1 ,

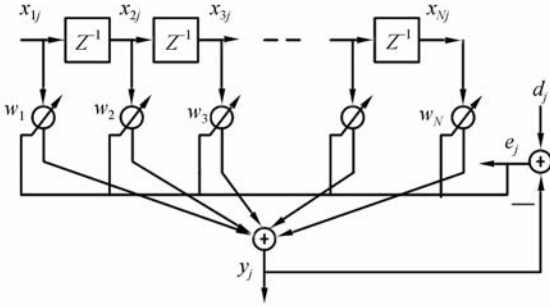


图 5 自适应 FIR 滤波器原理图

Fig. 5 Block diagram of adaptive FIR filter

w_2 , 则 $E[e_j^2]$ 是它们的开口向上的抛物面; 对于多个权系数以上的情况, 则属于超抛物面的性质, 图 6 是二维权矢量性能函数示意图。图中沿性能函数的负梯度方向搜索就可以找到性能函数的最低点 $E[e_j^2]_{\min}$, 此时权向量为最优值 W_{opt} 。

图 4 所示为直接复合控制原理图, 由于 PID 反馈回路的收敛速度大大快于自适应前馈算法的收敛速度, PID 算法在控制开始时很快收敛, 此时前馈控制器产生的控制量 u_1 可以看作是 PID 反馈回路的扰动量, 反馈控制对于包含在反馈回路中的扰动是有抑制作用的, 如果 PID 反馈回路的能力足够高, 则自适应前馈控制器产生的控制量就会被抑制掉, 从而保持误差 e 基本不变。此时绘制的性能曲面就不再如图 6 所示, 而是一个平坦表面, 自适应算法自然也不能收敛。事实上, 只要 PID 反馈回路和自适应前馈算法的作用频带有明显交叠, 自适应算法就无法收敛。

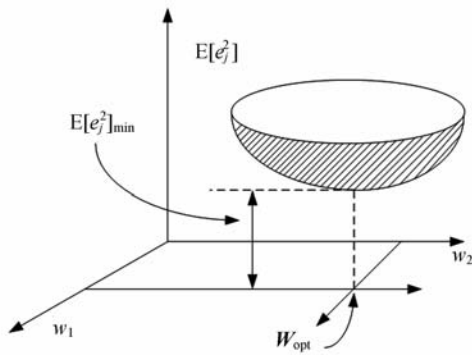


图 6 二维权矢量-性能函数示意图

Fig. 6 Sketch map of performance function to 2-D weight vectors

3.2 解耦复合控制

上节的分析表明两种算法之间的耦合是造成自适应算法不收敛的原因。在控制系统中, 若系统某些输出的变化会影响其他输出, 则系统是互相关联的, 称为关联系统^[10]。如果在一定条件下, 能做到任何一个输出的变化都不影响其他的输出, 则称系统是自主系统, 或者说系统是完全解耦的。对于图 3 所示系统, 设定收敛过程的自适应前馈算法作用函数为 f , 快速反射镜模型为 P , PID 反馈算法的作用函数为 g , 则有如下等式:

$$f(r, e) = f(r, d - r - u_2 P - u_1 P) = u_1, \quad (4)$$

$$g(e) = g(d - r - u_1 P - u_2 P) = u_2, \quad (5)$$

很显然, 控制量 u_1 和 u_2 具有交互关系, 正是这种交互关系使得自适应算法不能收敛, 所以需要进行解耦, 根据式(4)和(5)可以提出如下解耦方案:

$$f(r, e + u_2 P) = f(r, d - r - u_1 P) = u_1, \quad (6)$$

$$g(e + u_1 P) = g(d - r - u_2 P) = u_2, \quad (7)$$

只采用式(6)则 PID 反馈算法不再影响自适应前馈算法, 自适应算法的性能函数起始点为 $d - r$, 式(7)则相反, 但自适应算法的性能函数起始点为 $d - r - u_2 P$ 。其中 $u_2 P$ 正好是 $d - r$ 中包含直流偏差和反馈回路误差抑制带宽内的宽带扰动部分。若同时采用(6)(7)两式则实现了两种算法的完全解耦。显然无论采用上述 3 种方案的任一种, 自适应算法都能够收敛, 但是对于自适应算法的收敛速度就不尽相同了。由于 PID 反馈算法可以迅速去除抑制带宽内的宽带扰动和直流偏差, 而自适应算法对这两者的收敛都很慢, 所以如果采用了式(6), 自适应算法的收敛速度将会变慢。因此应仅选择式(7)作为实际的解耦方案。图 7 就是这种解耦方案的原理图。由于解耦方案中 $u_1 P$ 不能直接得到, 因而采用了快速反射镜的

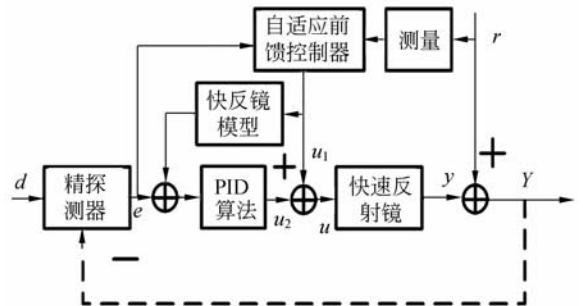


图 7 解耦复合控制算法原理图

Fig. 7 Block diagram of decoupling composite algorithm

模型来计算,这也是算法中第二次用到快速反射镜的模型。

4 实验与结果

4.1 抑制光束抖动的实验平台

由于目前实验室内还不能为整个光路提供振动,于是提出了一种等效的振动抑制实验方案。图 8 是光束抖动控制实验系统的原理图。

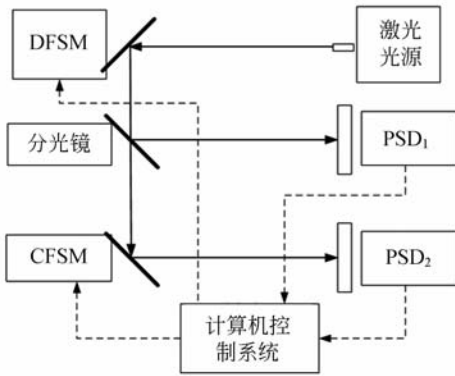


图 8 光束抖动控制实验系统原理图

Fig. 8 Block diagram of beam jitter control system

实验系统主要由 2 个快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM: 控制反射镜 CFSM 和扰动反射镜 DFSM); 2 个位敏传感器 (Position Sensor Device, PSD; PSD₁ 和 PSD₂, PSD₁ 用作扰动测量, PSD₂ 用作精探测器) 和计算机控制系统组成。其中 DFSM 用来提供光束抖动; CFSM 用来提供控制信号。CFSM 采用的是自行研制的 SiC 镜面的快速反射镜, 由于两个轴的频率曲线基本重合, 所以这里只给出其中一个轴的模型。图 9 是其频率特性曲线和相应的拟合曲线, 拟合的传递函数模型为:

$$\frac{k}{(as^2 + bs + c)(ds + e)} e^{-\Delta\tau} \quad (10)$$

DFSM 采用的是美国 PI 公司的 S330 系列的快速反射镜, 其内部闭环后带宽大约 1 000 Hz, 由于用作扰动镜, 其模型不在这里给出。PSD₁ 和 PSD₂ 分别用来提供前馈和反馈信号; 计算机控制系统包含一台工控机和嵌入其中的一套运动控制卡, 其上配备的数据采集系统的模数和数模转换的位数均为 16 位, 系统的采样和运算更新频率均为 2 kHz。

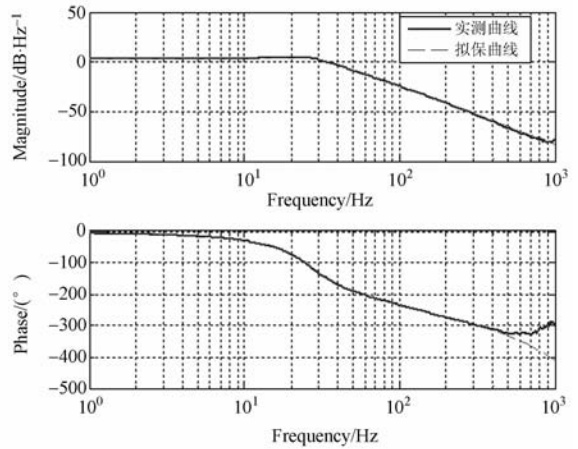


图 9 SiC 快速反射镜开环 bode 图

Fig. 9 Bode open loop diagrams of SiC fast-steering-mirror

4.2 实验方法

星地激光通信卫星终端的光学系统的抖动频谱不仅包含窄带噪声, 还包含有宽带的随机噪声^[11-12]。为了模拟真实的光束抖动, 试验中引入的干扰使用了两个窄带扰动(一个 53 Hz, 另一个 97 Hz) 和一个白噪声通过滤波器后的输出作为宽带扰动。扰动幅值根据 SILEX 给出的卫星振动的功率谱进行设计, 并适当增大了窄带噪声的幅值, 以体现前馈自适应控制的能力。

本文采取的自适应算法为最小均方算法 (Least mean square, LMS)^[13], 其具有结构简单, 算法复杂度低, 对系统宽度要求小, 易于用 DSP 实现等优点, 但是其收敛速度慢, 通常用来作为系统稳态性能分析, 因此这里主要研究算法的稳态性能, 没有分析自适应算法的阶数与收敛速度, 步长和失调的关系。实验均是在阶数为 48, 步长为 0.2, 算法收敛时间为 30 s, 数据记录时间为 10 s 的条件下完成数据记录的。数据分析部分主要通过计算 3 种算法的稳态误差的均方根和功率谱图来分析算法对各种扰动的抑制能力。稳态误差是加控制后 PSD₂ 的电压输出, 其单位为伏特 (V), 探测器的 1 V 相当于激光轴转动大约 200 μrad。功率谱图采用的是 Matlab 的 Pwelch 函数绘制, Pwelch 函数的参数设置为 pwelch(error, 1024, [], [], 2000); 横坐标采用对数坐标, 因而功率谱图与控制系统设计中的 bode 图物理意义相同, 算法在各个频段的误差抑制能力可以从未加控制和施加控制的误差功率谱图中直观的看出来。由于

CFSM 两个轴耦合非常小,且两个轴的频率特性几乎一致,所以仅给出了垂直轴 Y 的试验结果。下面 3 个小节分别给出了 3 种算法的实验结果和相应的分析。

4.3 经典 PID 控制算法

图 10 是经典 PID 控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较,可以看见经典 PID 算法对误差的抑制不区分宽带和窄带,抑制能力随频率的增高而降低,并对误差抑制带宽后的一段区域有放大。53 Hz 处抑制能力约 10 db,97 Hz 处抑制能力约 3 db。未加控制的误差信号的标准差为 0.052 0 V,施加经典 PID 控制算法后为 0.022 6 V。

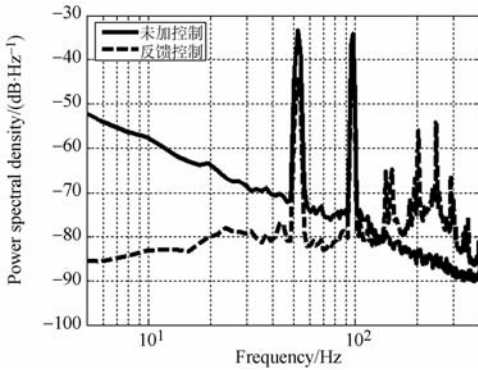


图 10 经典 PID 控制算法误差功率谱图
Fig. 10 PSD of classic PID algorithm

4.4 自适应前馈控制算法

图 11 是自适应前馈控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较,可以看见自适应前馈控制算法对宽带扰动的抑制很差,甚至在某些频段还会放大误差。但是其对窄带扰动的抑制效果是很明显的,抑制后窄带峰基本消失。未加控制的误差信号的标准差为 0.051 8 V,施加自适应前馈控制算法后为 0.008 1 V。从式(3)也可以看出,自适应前馈控制算法的误差的期望主要取决于期望信号(扰动本身)和参考信号(测量信号)的相关性,宽带扰动经过测量后与扰动本身的相关性随时间延迟下降很快,而窄带扰动经过测量后与扰动本身相关性并不会随时间延迟下降,而且宽带扰动受系统噪声的影响更为明显,所以自适应前馈控制算法对窄带扰动抑制得很好,对宽带扰动抑制得较差。

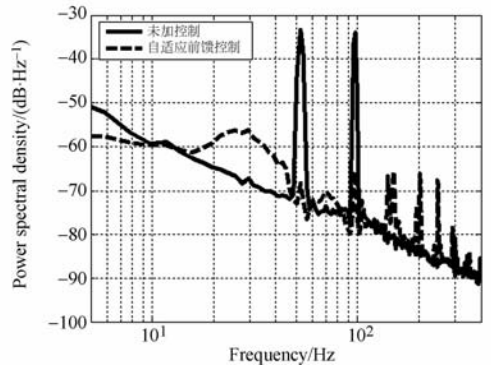


图 11 自适应前馈控制算法误差功率谱图
Fig. 11 PSD of adaptive feedforward algorithm

4.5 解耦复合控制算法

图 12 是解耦复合控制算法和未加控制算法的误差功率谱图比较,可以看见解耦复合控制算法完全结合了经典 PID 控制和自适应前馈控制算法的优点,明显优于单 PID 或单自适应前馈控制算法,能同时对宽带和窄带扰动产生了很好的抑制效果。未加控制的误差信号的标准差为 0.052 0 V,施加解耦复合控制算法后为 0.002 5 V。

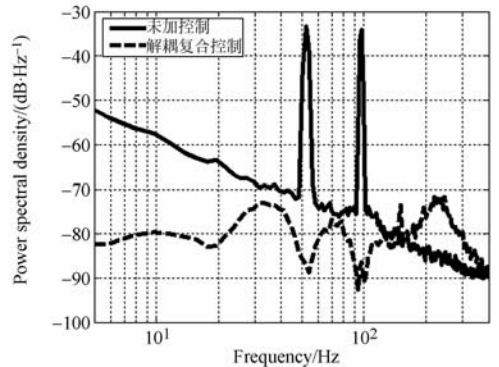


图 12 解耦复合控制算法误差功率谱图
Fig. 12 PSD of decoupling composite algorithm

5 结 论

本文根据自适应前馈控制和经典 PID 控制算法的特点,分析了两种算法复合控制的必要性。针对直接复合控制时自适应算法存在的收敛性问题,依据自适应算法的收敛原理进行了分析,指出算法不收敛的原因是两种算法之间的耦合。从自适应收敛速度方面考虑后从 3 种解耦方案中选择了最合适的一种。实验结果表明:相对于经典 PID 反馈算法和自适应前馈算法,解耦复合控制

算法的控制精度分别提高了近10倍和约3倍,表明反馈和自适应前馈解耦复合控制算法结合了两

种算法的优点,可以进一步缓解光束抖动,提高卫星平台ATP系统精度。

参考文献:

- [1] 傅承毓,姜凌涛,任戈,等.快速反射镜成像跟踪系统[J].光电工程,1994,21(3):1-8.
FU CH Y, JIANG L T, REN G, *et al.*. Image tracking system with a fine-steering-mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, 21(3):1-8. (in Chinese)
- [2] 岳冰,杨文淑,傅承毓.空间光通信中的快速倾斜镜跟踪实验系统[J].光电工程,2002,29(3):35-38.
YUE B, YANG W SH, FU CH Y. Experiments on precision tracking system with a fast steering mirror in space laser communication [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(3):35-38. (in Chinese)
- [3] SKORMIN V A, TACILLO M A, NICHOLSON D J. Jitter rejection technique in a satellite-based laser communication system [J]. *Optic Engineering*, 1993, 32(11):2764-2769.
- [4] SKORMIN V A, TACILLO M A, BUSCH T. An adaptive jitter rejection technique applicable to airborne laser communication system [J]. *SPIE*. 1994, 2123:357-368.
- [5] 党选举.压电陶瓷执行器的神经网络实时自适应逆控制[J].光学精密工程,2008,16(7):1266-1272.
DANG X J. Real-time adaptive inverse control based on neural networks for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1266-1272. (in Chinese)
- [6] 李英,葛文奇,王绍彬,等.稳定平台的自适应逆控制[J].光学精密工程,2009,17(11):2744-2749.
LI Y, GE W Q, WANG SH B, *et al.*. Adaptive inverse control of stable platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2744-2749. (in Chinese)
- [7] WATKINS R J. *The adaptive control of optical beam jitter* [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2004.
- [8] BATEMAN B E. *Experiments on laser beam jitter control with applications to a shipboard free electron laser* [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.
- [9] BEERER M J. *Adaptive filter techniques for optical beam jitter control and target tracking* [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2008.
- [10] 李文军.复合轴光电跟踪系统控制策略研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2006.
LI W J. *Study on control strategy of O-E tracking systems with compound axis* [D]. Changchun: Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [11] 李晓峰.星地激光通信链路原理与技术[M].北京:国防工业出版社,2007.
LI X F. *The Principle and Technology of the Satellite-to-ground Laser Communication Links* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [12] COSSON F, DOUBRERE P, PEREZ E. Simulation model and on-ground performances validation of the PAT system for SILEX program [J]. *SPIE*. 1991, 1417:262-276.
- [13] 丁玉美,阔永红,高新波.数字信号处理-时域离散随机信号处理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2003.
DING Y M, KUO Y H, GAO X B. *Digital Signal Processing-Time Domain Discrete Random Signal Processing* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. (in Chinese)

作者简介:



丁科(1982-),男,重庆南川人,博士研究生,2004年于哈尔滨工程大学获得学士学位,主要从事光电跟踪系统,星地激光通信捕获跟瞄系统的研究。E-mail: dingke206@mails.gucas.ac.cn



马佳光(1941-),男,研究员,博士生导师,1964年毕业于大连工学院无线电工程系,主要研究方向为光电捕获跟瞄技术及其应用。E-mail: mjj@ioe.ac.cn

导师简介:



黄永梅(1968-),女,四川内江人,研究员,1989年于成都电子科技大学获得学士学位,1995年、2004年于中国科学院光电技术研究所分别获得硕士和博士学位,主要从事光电跟踪系统,空间光通信捕获跟瞄系统的研究。E-mail: hjn666@sohu.com



付承毓(1952-),男,研究员,博士生导师,1980年毕业于中国科学技术大学无线电电子学系,1990~1991年在英国Essen大学进修,研究领域为自动控制、精密测量、跟踪与数字信号处理以及光束控制系统中的精密跟踪瞄准技术。E-mail: cyfu@ioe.ac.cn

● 下期预告

大功率垂直腔面发射激光器列阵的串接结构

史晶晶^{1,2},秦莉¹,刘迪^{1,2},彭航宇^{1,2},曹军胜¹,杨晔^{1,2},宁永强¹,刘云¹,王立军¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室,吉林长春130033;2.中国科学院研究生院,北京100039)

为了满足大功率垂直腔面发射激光器的应用需求,在不提高驱动电流的前提下增大垂直腔面发射激光器的输出功率,提出了一种将多个垂直腔面发射激光器芯片串接在一起的结构。首先,将垂直腔面发射激光器芯片焊接在氮化铝陶瓷热沉上,接着用金丝引线的方法将芯片连接在一起,连接方式为串联。分别测试了串接4个芯片、2个芯片和单个芯片器件的微秒脉冲输出功率和纳秒脉冲输出功率,其输出功率分别为775,416,217 mW和18.9,9.8,5 W,测试结果显示,串接4个芯片器件和串接2个芯片器件的输出功率分别约为单个芯片输出功率的4倍和2倍。串联多个芯片器件的发射光谱半高宽比单个器件略宽,但是可以通过选择均匀性良好的芯片进行串接来解决这一问题。因此串接结构可以在不提高驱动电流的条件下大幅度提高输出功率。