

星间激光通讯中的精跟踪研究^{*}

刘锡民[†] 刘立人 孙建锋 郎海涛 潘卫清 赵 栋

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

(2005 年 1 月 4 日收到 2005 年 4 月 8 日收到修改稿)

星间激光通讯中, 精跟踪起着十分重要的作用, 而精密偏转镜(FSM)是精跟踪系统中最为关键的部件. 基于光学矢量反射定律, 推导得到了 FSM 的精确光学特性, 这一特性为精跟踪控制系统提供了精确的理论依据. 设计了基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统, 对系统整定所用的单纯形法进行了两点重要改进, 并对所设计的精跟踪系统进行了数字模拟, 由此实现了对 FSM 的精确控制, 提高了精跟踪系统的精确性. 将光学衍射超分辨原理应用到星间激光通讯中, 利用三区位相光瞳滤波器的超分辨性能, 改变光学系统的点扩散函数, 从而改变接收端焦平面上的光强分布, 由此减小接收衍射光斑的大小, 提高系统的光学分辨能力, 从而提高精跟踪系统的精确性.

关键词: 星间激光通讯 精跟踪 精密偏转镜(FSM) 超分辨 光瞳滤波器

PACC: 4230Q, 4280S, 4278F, 0670T

1. 引 言

随着信息技术的不断发展, 人们对信息的快速性要求越来越高. 地面上, 光纤通讯系统在信息的快速传递中起着重要的作用^[1-3]; 空间中, 卫星通信系统使人们在地球的一侧能很快知道地球另一侧发生的事情, 对信息的快速传递起着更为重要的作用. 目前, 卫星通信系统主要采用无线电频率通信方式. 随着人们对数据传输速率要求的不断提高, 星间激光通讯系统迅速发展起来. 与传统的无线电频率通信系统相比, 星间激光通讯有诸多优点^[4], 特别是其数据传输速度远大于无线电频率通信系统, 可达几百兆字节每秒. 因此, 星间激光通讯具有广阔的应用前景.

星间激光通讯中, 通信激光束非常窄, 宽度只有 $10\mu\text{rad}$ 左右. 为确保接收方能接收到足够强的能量, 必须使如此窄的激光束与另一终端的对准误差保持在 $1.7\mu\text{rad}$ 以内^[5]. 星间激光通讯系统中, 精跟踪系统保证了如此高的对准精度^[6]. 因此, 精跟踪系统在星间激光通讯中具有极为重要的作用. 而精密偏转镜(FSM)是精跟踪系统中最为关键的部件^[7], 因为在精跟踪过程中, 就是通过控制 FSM 的偏转, 抑制

各种扰动, 从而使跟踪误差保持在 $1.7\mu\text{rad}$ 以内的. 因此本文基于矢量反射定律, 推导 FSM 的精确光学特性, 以设计基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统, 以提高精跟踪系统的精确性.

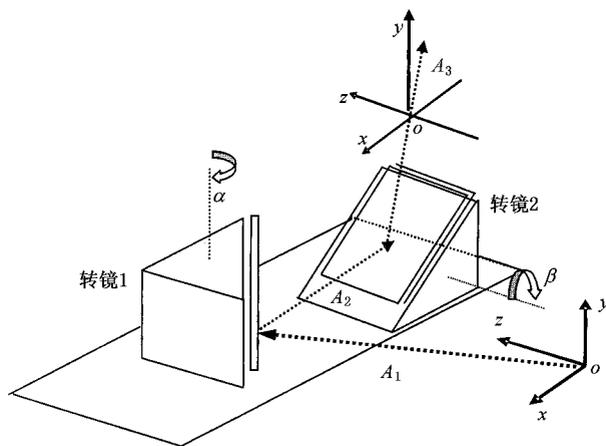


图 1 FSM 光路示意图^[8]

2. FSM 光学特性推导

图 1 给出了 FSM 的结构及光路示意图^[8], 坐标系如图所示. 图中有两个转镜, 令左侧转镜为转镜

^{*} 国家高技术研究发展计划资助的课题.

[†] E-mail: liuximin03@163.com

1, 其镜面为反射面 1. 右侧转镜为转镜 2, 其镜面为反射面 2. 转镜 1 的偏转角为 α , 转镜 2 的偏转角为 β . A_1 为入射光线, A_2 为 A_1 经反射面 1 反射后的光线, A_3 为出射光线, 即 A_2 经反射面 2 反射后的光线.

设入射光线 A_1 的方位角和俯仰角分别为 θ_1 和 φ_1 , 且为单位量, 则 A_1 可表示为 $A_1 = [\cos\theta_1 \sin\varphi_1, \sin\theta_1 \sin\varphi_1, \cos\varphi_1]$. 反射面 1 和反射面 2 的单位法线矢量分别表示为

$$n_1 = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2} \rho, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right], n_2 = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2} \rho \right].$$

转镜 1 绕 y 轴旋转, 变换矩阵为

$$\text{transfery} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix}.$$

旋转后反射面 1 的单位法线矢量变为

$$n_{11} = \text{transfery} \times n_1 \\ = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\alpha + \sin\alpha)\rho, \frac{\sqrt{2}}{2}(\sin\alpha - \cos\alpha) \right].$$

转镜 2 绕 z 轴转动, 变换矩阵为

$$\text{transferz} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

旋转后反射面 2 的单位法线矢量变为

$$n_{21} = \text{transferz} \times n_2 \\ = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\beta - \sin\beta), \frac{\sqrt{2}}{2}(\cos\beta + \sin\beta)\rho \right].$$

2.1. 反射光线 A_2 的特性

当在反射面 1 上发生反射时, 设反射光线 A_2 在 y 轴与 z 轴上的投影分别为 y_2 与 z_2 , 则 A_2 可表示为

$$A_2 = \left[-\sqrt{1 - y_2^2 - z_2^2}, y_2, z_2 \right].$$

令 $m = \sin\alpha + \cos\alpha$, $n = \sin\alpha - \cos\alpha$. 根据反射定律:

$A_1 \times n_{11} = A_2 \times n_{11}$, 得

$$A_1 \times n_{11} = \begin{pmatrix} i & j & k \\ \cos\theta_1 \sin\varphi_1 & \sin\theta_1 \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}m & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2}n \end{pmatrix} \\ = i \frac{\sqrt{2}}{2} n \sin\theta_1 \sin\varphi_1$$

$$-j \frac{\sqrt{2}}{2} (m \cos\varphi_1 + n \cos\theta_1 \sin\varphi_1) \\ + k \frac{\sqrt{2}}{2} (m \sin\theta_1 \sin\varphi_1), \quad (1)$$

$$A_2 \times n_{11} = \begin{pmatrix} i & j & k \\ -\sqrt{1 - y_2^2 - z_2^2} & y_2 & z_2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}m & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2}n \end{pmatrix} \\ = i \frac{\sqrt{2}}{2} n y_2 - j \frac{\sqrt{2}}{2} (m z_2 - n \sqrt{1 - y_2^2 - z_2^2}) \\ + k \frac{\sqrt{2}}{2} (m y_2). \quad (2)$$

由 (1) 式与 (2) 式得

$$y_2 = \sin\theta_1 \sin\varphi_1, \quad (3)$$

$$2z_2^2 - 2m(m \cos\varphi_1 + n \cos\theta_1 \sin\varphi_1)z_2 \\ + (m \cos\varphi_1 + n \cos\theta_1 \sin\varphi_1)^2 \\ - n^2 + n^2 y_2^2 = 0. \quad (4)$$

(4) 式为关于 z_2 的二次方程, 其中一次项系数化简为

$$2\cos\varphi_1 + 2[\sin 2\alpha \cos\varphi_1 \\ - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1],$$

常数项化简为

$$2\cos\varphi_1 \times [\sin 2\alpha \cos\varphi_1 \\ - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1].$$

由此 (4) 式化简为

$$(z_2 - \cos\varphi_1) \times [z_2 - (\sin 2\alpha \cos\varphi_1 \\ - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1)] = 0. \quad (5)$$

方程 (5) 的解为

$$z_{21} = \cos\varphi_1,$$

$$z_{22} = \sin 2\alpha \cos\varphi_1 - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1.$$

由于反射光线 A_2 是入射光线 A_1 经转镜 1 的反射面反射后的光线, 因此, 其方向与转镜 1 的旋转角度 α 有关, 故将根 z_{21} 舍去, 因此方程 (4) 的最终解为

$$z_2 = z_{22} \\ = \sin 2\alpha \cos\varphi_1 - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1. \quad (6)$$

由 (3) 式与 (6) 式便得反射光线 A_2 的特性.

2.2. 出射光线 A_3 的特性

光线在面 2 发生反射时, 令 $p = \sin\beta + \cos\beta$, $q = \sin\beta - \cos\beta$. 设光线 A_2 的方位角和俯仰角分别为 θ_2 和 φ_2 , 则 A_2 可表示为

$$A_2 = [\cos\theta_2 \sin\varphi_2, \sin\theta_2 \sin\varphi_2, \cos\varphi_2].$$

设出射光线 A_3 在 x 轴与 z 轴上的投影分别为 x_3 与 z_3 , 则 A_3 可表示为

$$A_3 = [x_3, \sqrt{1 - x_3^2 - z_3^2}, z_3]. \quad (7)$$

同理 根据反射定律 $A_2 \times n_{21} = A_3 \times n_{21}$, 得

$$z_3 = \cos\varphi_2, \quad (8)$$

$$2x_3^2 - 2p\sin\varphi_2(p\cos\theta_2 - q\sin\theta_2)x_3 + \sin^2\varphi_2(p\cos\theta_2 - q\sin\theta_2)^2 - q^2(1 - \cos^2\varphi_2) = 0. \quad (9)$$

同上, 化简求解方程(9), 最终解为

$$x_3 = \sin\varphi_2(\sin\theta_2\cos 2\beta - \sin 2\beta\cos\theta_2). \quad (10)$$

2.3. FSM 光学特性

设出射光线 A_3 的方位角和俯仰角分别为 θ_3 与 φ_3 , 由(7)式得

$$A_3 = [\cos\theta_3\sin\varphi_3, \sin\theta_3\sin\varphi_3, \cos\varphi_3] \\ = [x_3, \sqrt{1 - x_3^2 - z_3^2}, z_3]. \quad (11)$$

由(8)式与(11)式得

$$\cos\varphi_3 = z_3 = \cos\varphi_2 = z_2. \quad (12)$$

由此, 由(6)式与(12)式, 得到 FSM 的第一个光学特性

$$\cos\varphi_3 = \sin 2\alpha \cos\varphi_1 - \cos 2\alpha \cos\theta_1 \sin\varphi_1. \quad (13)$$

同理, 由(10)式和(11)式得

$$\cos\theta_3 \sin\varphi_3 = \sin\varphi_2(\sin\theta_2 \cos 2\beta - \sin 2\beta \cos\theta_2) \\ = y_2 \cos 2\beta - x_2 \sin 2\beta. \quad (14)$$

由(3)式(12)式及 A_2 的定义式

$$A_2 = [-\sqrt{1 - y_2^2 - z_2^2}, y_2, z_2]$$

得

$$x_2 = -\sqrt{1 - y_2^2 - z_2^2} \\ = \sqrt{1 - \sin^2\theta_1 \sin^2\varphi_1 - \cos^2\varphi_3}. \quad (15)$$

因此, 由(3)式和(15)式, 化简(14)式便可以得到 FSM 的第二个光学特性

$$\cos\theta_3 \sin\varphi_3 = \sin\theta_1 \sin\varphi_1 \cos 2\beta \\ + \sqrt{1 - \sin^2\theta_1 \sin^2\varphi_1 - \cos^2\varphi_3} \sin 2\beta. \quad (16)$$

至此, 便得到了由(13)式与(16)式表示的 FSM 精确光学特性. 根据此光学特性, 在已知 FSM 入射光线的方位角和俯仰角 θ_1, φ_1 和出射光线的方位角和俯仰角 θ_3, φ_3 的情况下, 可以得到两个转镜的偏转角 α, β . 这在对 FSM 的精确控制中具有重要意义. 本文推导的 FSM 精确光学特性为精跟踪系统提

供了精确的理论依据.

3. 基于 FSM 光学特性的精跟踪控制

目前有关精跟踪的研究有很多^[9], 主要是在精跟踪控制方面的研究, 旨在提高精跟踪控制系统的带宽和抑制带宽, 从而提高精跟踪系统对扰动的抑制能力. 在这些研究中, 人们都采用跟踪误差与转镜偏转角成正比的近似, 即当跟踪误差为 δ 时, 转镜应偏转 $-\delta$ 以补偿该误差. 由 FSM 精确光学特性关系(13)式与(16)式可知, 跟踪误差与转镜偏转角并非成正比关系. 因此本文设计了基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统.

3.1. 基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统设计

星间激光通讯精跟踪控制研究中, Saksonov 等人引入了前馈控制方式^[10], 使精跟踪性能得到了很大改善. 本文采取了前馈与反馈共同作用的精跟踪控制方案, 即先利用前馈控制进行提前补偿, 再利用反馈补偿前馈控制的剩余误差及其他各种扰动. 此种控制方式既能对扰动产生快速抑制, 又能保证较小的扰动剩余误差. 根据以上方案, 本文设计了基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统, 如图 2 所示. 其中, H_{FC} 为前馈通道传递函数, H_{DC} 为扰动通道传递函数.

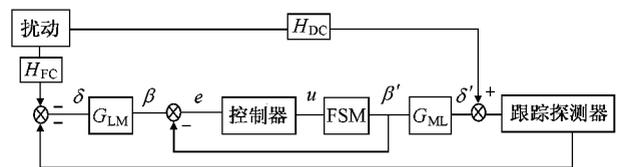


图 2 基于 FSM 光学特性的精跟踪控制框图

如图 1 所示, 光线 A_3 与 y 轴的夹角决定着跟踪误差的大小. 因此, A_3 的方位角 θ_3 决定着跟踪误差的大小. 所以系统需对 A_3 的方位角 θ_3 和与之关联的转镜偏转角 β 进行控制, 以实现精跟踪任务. 扰动出现后, 通过前馈通道 H_{FC} 得到前馈信号 δ . 关于 $\cos 2\beta$ 的二次方程为

$$\sin^2\varphi_3 \times \cos^2 2\beta \\ - 2 \times \sin\theta_1 \sin\varphi_1 \cos\delta \sin\varphi_3 \times \cos 2\beta \\ + \sin^2\theta_1 \sin^2\varphi_1 - \sin^2\varphi_3 \sin^2\delta = 0.$$

解此方程, 便得转镜偏转角度 β , 此过程对应图 2 中的 G_{LM} . 根据(16)式, 由转镜闭环控制回路输出 β' 得

到出射光线 A_3 的偏转角度 δ' , 即前馈控制的输出, 此过程对应图 2 中的 G_{ML} . 前馈控制输出在输出端提前补偿扰动对出射光线的影响, 体现出前馈作用的快速性. 反馈信号将前馈补偿剩余误差与其他扰动误差反馈到控制系统前端, 利用反馈控制补偿这些误差. 由此, 便形成了基于 FSM 精确光学特性的前馈与反馈共同作用的精跟踪控制系统.

3.2. 系统整定及对单纯形法的改进

基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制中, 需要整定系统控制器参数, 从而整定整个控制系统, 使控制系统的动态响应最优化. 单纯形法具有操作简单、计算量小、适用面广、便于计算机实现等优点, 因此我们采用单纯形法对系统进行整定.

3.2.1. 改进的指定超调量的单纯形法

每个控制系统的设计都对动态响应超调量有特定的要求. 因此, 对控制系统进行在指定超调量范围内的最优化整定, 是十分有意义的. 因此, 本文将单纯形法改进为指定超调量的单纯形法, 实现了这一控制要求. 对于一 FSM 系统, 设其传递函数为 $\frac{697}{66s^2 + 100s}$, 指定超调量小于 20%. 利用改进的指定超调量的单纯形法得到整定结果为 $k_p = 8.0$, $t_d = 13.8$, $t_i = 5.0 \times 10^{-5}$, 其中 k_p , t_d , t_i 分别为控制器的比例、微分和积分参数. 其对应的动态响应如图 3 所示. 由图可以看出, 控制系统的动态响应是要求超调量范围内的最优结果.

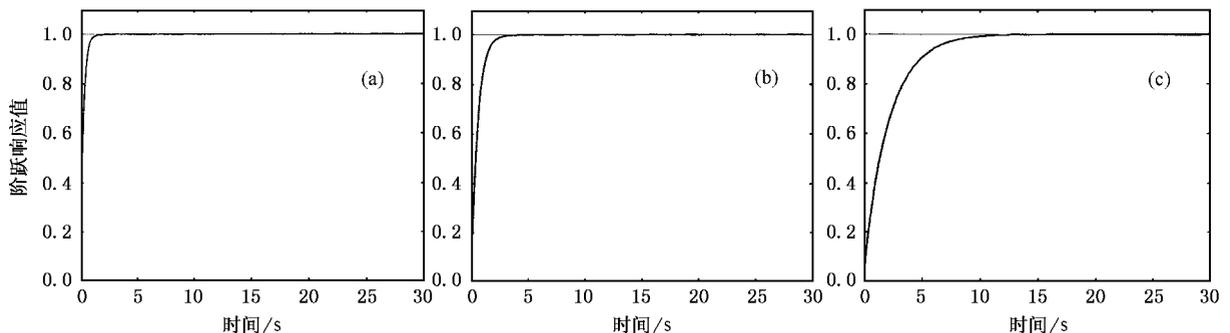


图 4 指定调整时间 t 的无超调无振荡单纯形法整定结果 (a) $t = 2s$, (b) $t = 4s$, (c) $t = 15s$

4. 基于 FSM 光学特性的精跟踪数字模拟

利用本文推导得到的 FSM 精确光学特性, 基于

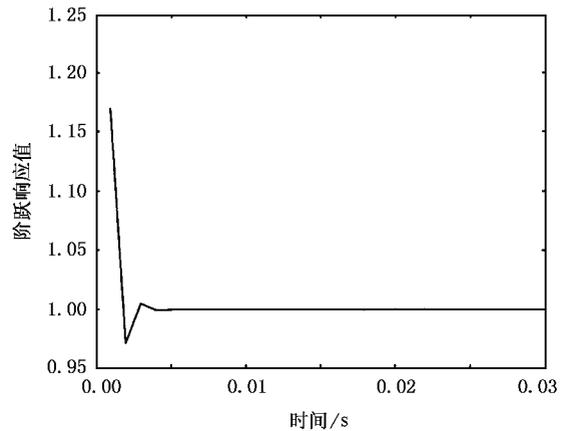


图 3 指定超调量小于 20% 的单纯形法整定结果

3.2.2. 改进的指定调整时间的无超调无振荡单纯形法

每个控制系统的设计也都对动态响应调整时间有特定的要求, 有的系统甚至需要在不同的工作状态下采用不同的动态响应调整时间. 因此, 对控制系统进行指定调整时间的系统整定, 是十分有意义的. 我们将单纯形法进行了改进, 使其实现了指定调整时间的无超调无振荡系统的整定. 对某一控制系统进行指定调整时间的无超调无振荡整定结果如图 4 所示. 分别得到响应时间为 2.4, 15s 左右对应的无超调无振荡最优结果. 结果显示, 本文改进的单纯形法实现了指定调整时间的无超调无振荡整定.

以上对单纯形法的两点改进, 为精跟踪控制系统的设计、研究提供了有力的工具.

FSM 精确光学特性的前馈与反馈共同作用的控制方法及改进的指定超调量的单纯形法, 我们对超调量不超过 20% 的一 FSM 精跟踪系统的精跟踪性能进行了数字模拟. 精跟踪系统的 Bode 图及抑制曲线如图 5 和图 6 所示. 由图 5 可知, 系统带宽达到

1200Hz. 由图 6 可知, 系统扰动抑制带宽达到 2500Hz. 系统带宽和扰动抑制带宽都得到了较高值. 因此, 系统响应迅速, 同时具有较宽的扰动抑制范围和较强的扰动抑制能力. 设扰动为含 200Hz, 300Hz, 400Hz 三个主要频率的高斯扰动, 扰动频谱如图 7 所示. 图中曲线所示为高斯噪声, 三个最大值分别是频率为 200Hz, 300Hz 及 400Hz 的扰动对应的频谱. 精跟踪数字模拟结果, 即扰动抑制后的频谱如图 8 所示. 由图可知, 控制系统对高斯扰动的抑制能力为 -16dB 左右, 对频率为 200Hz, 300Hz, 400Hz 的扰动的抑制能力约在 -40dB— -25dB. 表明了该前馈和反馈共同作用的控制系统, 对扰动起到了较强的抑制作用. 由此实现了对 FSM 的精确控制, 从原理以及控制上提高了精跟踪系统的精确性.

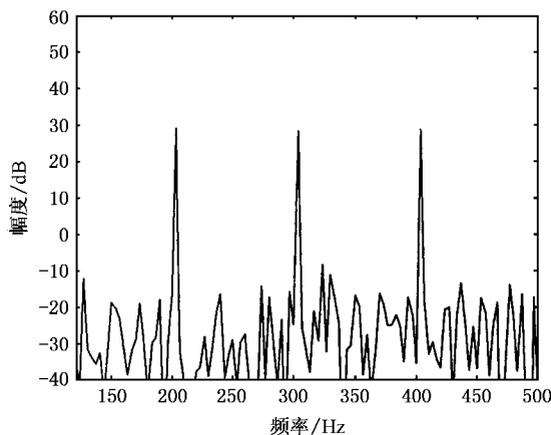


图 7 含三个主要频率的高斯扰动频谱

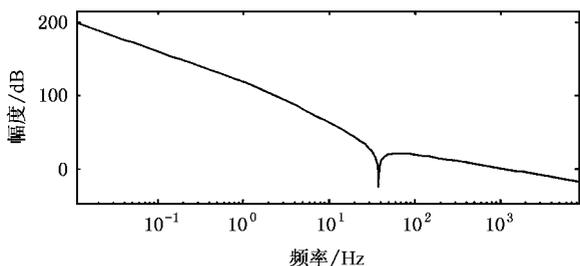


图 5 系统 Bode 图

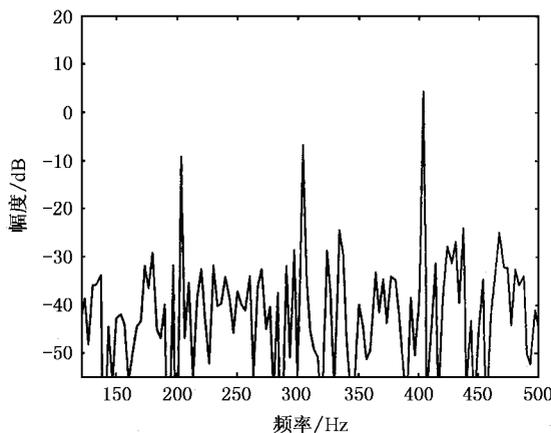


图 8 扰动抑制后的频谱

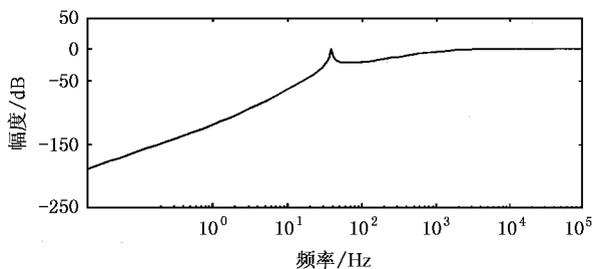


图 6 系统抑制曲线

5. 光学衍射超分辨在星间激光通讯中的应用

FSM 的精确光学特性, 保证了星间激光通讯中精跟踪系统对 FSM 控制的精确性, 从而提高了精跟踪系统的精确性. 下面考虑影响精跟踪精确性的另一重要环节. 由图 2 可知, 精跟踪系统的控制信号来源于跟踪探测器. 因此, 跟踪探测器的误差也会严重影响精跟踪系统的精确性. 跟踪探测器的误差主要来源于跟踪探测器的系统噪声和光探测误差.

星间激光通讯中, 远场接收到的光能量分布, 为光束的夫朗禾费衍射. 对应于发射光源上的一点, 接收到的是一个衍射光斑, 即爱里斑, 其能量分布即为光学系统的点扩散函数(PSF). 此光斑的大小决定了整个系统的光学分辨率, 从而决定了光探测误差的大小. 跟踪探测器的系统噪声是无法克服的, 因此提高系统的光学分辨率, 从而提高光探测精度, 对提高星间激光通讯中精跟踪系统的精确性也起着至关重要的作用. 由瑞利判据可知, 系统的最小分辨距离 $\delta = 1.22 \frac{\lambda f}{D}$, 其中 f 为接收透镜焦距, D 为接收系统孔径, λ 为通讯光束波长. 星间激光通讯光学系统的通讯波长和透镜焦距是确定的, 因此, 要提高其光学分辨率, 必须通过增大系统数值孔径的方式. 增加系统的数值孔径会使光学元件的制造变得极为困难, 极大提高系统的成本. 同时会造成系统体积的增大, 这在星间激光通讯中是不允许的. 本文将衍射超分

辨技术应用到星间激光通讯中,利用光瞳滤波器来提高系统的光学分辨能力,从而提高精跟踪的精确性.

超分辨是通过在系统的入射或出射光瞳插入光瞳滤波器,以改变光学系统 PSF 的一种技术^[11].利用该技术,在成本较低,不增加系统复杂程度的前提下,可以达到减小衍射光斑大小,提高系统光学分辨率,从而提高星间激光通讯精跟踪精确性的目的.根据光学标量衍射理论,超分辨系统焦点附近的复振幅 U 的归一化分布为^[12,13]

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v\rho) \exp\left(-\frac{i u \rho^2}{2}\right) \rho d\rho,$$

其中 ρ 为归一化半径, $P(\rho)$ 为滤波器的光瞳函数, $J_0(v\rho)$ 为 0 阶贝塞尔函数, $v = krs\sin\alpha$, $u = 4kz\sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, 其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $s\sin\alpha$ 为系统数值孔径, r, z 分别为横向和轴向坐标. 令 $u = 0$, 得到系统焦平面上的复振幅分布为

$$U(v, 0) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v\rho) \rho d\rho,$$

其振幅分布为光瞳函数的汉克尔变换. 定义不加光瞳滤波器时的 PSF 宽度与加入光瞳滤波器后的 PSF 宽度比为超分辨因子 G ; 加入光瞳滤波器和不加光瞳滤波器的 PSF 最大强度之比为斯特尔比 S ; 系统的离焦量为 u_F . 令 $I_n = \int_0^1 2P(\rho) \rho^{2n+1} d\rho$, 则有

$$u_F = -2 \frac{\text{Im}(I_0^* I_1)}{\text{Re}(I_0 I_2^*) - |I_1|^2},$$

$$S = |I_0|^2 - \frac{u_F}{2} \text{Im}(I_0^* I_1),$$

$$G = 2 \frac{\text{Re}(I_0 I_1^*) - u_F \text{Im}(I_0^* I_2)}{S}.$$

由于星间激光通讯对能量的要求较高,因此采用能量利用率较高的三区位相滤波器,如图 9 所示. 其三区的位相调制分别为 $0, \pi, 0$, 内外分区的归一化半径分别为 ρ_1, ρ_2 . 同时,该滤波器的制造技术现已比较成熟,因此,我们将三区位相滤波器应用到星间激光通讯中,通过设计该滤波器的内外分区半径,得到最优的超分辨性能,从而提高精跟踪系统的精确性. 对于该三区位相滤波器,相应的超分辨因子和斯特尔比分别为

$$G = \frac{1 + 2\rho_1^4 - 2\rho_2^4}{1 + 2\rho_1^2 - 2\rho_2^2},$$

$$S = (1 + 2\rho_1^2 - 2\rho_2^2)^2.$$

在减小光斑大小的同时,还要保证足够的能量强度,

因此在滤波器设计中,给出对斯特尔比的限制条件 $S \geq 0.7$. 利用约束非线性函数最小值寻优算法,得到在 $S \geq 0.7$ 的情况下,三区位相滤波器的最优超分辨性能为 $G = 1.187$, 对应的内外分区半径分别为 0.003 和 0.286. 相应的加光瞳滤波器和不加光瞳滤波器时的强度分布函数如图 10 所示. 由图可知,加入光瞳滤波器后的系统主瓣宽度,是不加滤波器时的 0.84 倍,衍射光斑的大小减小,因此系统的光学分辨率得到了提高. 由此,将光学衍射超分辨元件应用到星间激光通讯中,减小了接收衍射光斑的大小,提高了系统的光学分辨率,从而提高了星间激光通讯中精跟踪系统的精确性.

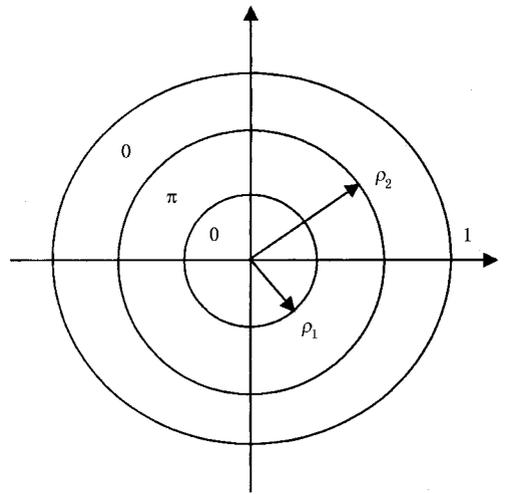


图 9 三区位相光瞳滤波器

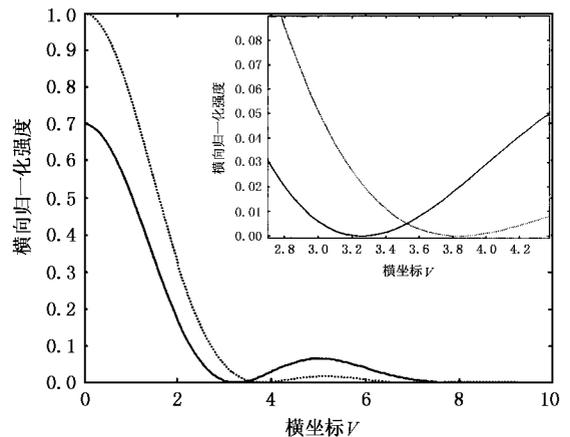


图 10 系统焦平面上的光强分布

6. 结 论

精跟踪系统中,精密偏转镜 FSM 是一最为关键

的部件. 基于光学矢量反射定律, 本文推导得到了在 FSM 第一个和第二个镜面反射后的光线 A_2, A_3 的表达式, 从而得到了 FSM 的精确光学特性, 为星间激光通讯中的精跟踪系统提供了精确的理论依据. 由此设计了基于 FSM 精确光学特性的前馈与反馈共同作用的精跟踪控制系统. 对系统整定所用单纯形法做了两点重要改进, 使其实现了指定超调量和指定调整时间的系统整定. 对基于 FSM 精确光学特性的精跟踪系统进行了数字模拟. 结果表明本文设计的基于 FSM 精确光学特性的精跟踪控制系统对

扰动具有较强的抑制作用. 由此实现了对 FSM 的精确控制, 从原理以及控制上提高了精跟踪系统的精确性. 将光学衍射超分辨原理应用到星间激光通讯中. 利用三区位相光瞳滤波器超分辨原理, 改变系统点扩散函数, 从而改变接收端焦平面上的光强分布. 通过设计三区位相滤波器的内外区半径参数, 得到了在规定斯特尔比下的最优超分辨性能, 使接收端焦平面上的衍射光斑大小减小为原来的 0.84 倍, 提高了系统的光学分辨能力, 从而提高了精跟踪系统的精确性.

-
- [1] Gong J M , Liu J , Fang Q *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1287 in Chinese] 巩稼民、刘 娟、方 强等 2000 物理学报 **49** 1287]
- [2] Lou S Q , Wang Z , Ren G B *et al* 2004 *Chin. Phys.* **13** 1493
- [3] Wang M G , Li T J and Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2818 in Chinese] 王目光、李唐军、简水生 2003 物理学报 **52** 2818]
- [4] Lambert G and Casey W L 1995 *Laser Communication in Space* (Boston, London : Artech House) p11
- [5] Michel B and Eric P 1991 *SPIE* **1417** 142
- [6] Francois C , Patrick D and Eric P 1991 *SPIE* **1417** 262
- [7] Toni T N 1995 *SPIE* **2381** 194
- [8] Hicks T , O 'Sullivan B , Russell J *et al* 1989 *SPIE* **1111** 289
- [9] Lee S , Alexander J W and Jeganathan M 2000 *SPIE* **3932** 150
- [10] Saksonov A , Arnon S and Kopeika N S 2001 *SPIE* **4365** 188
- [11] Liu L , Deng X Q , Wang G Y *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 48 in Chinese] 刘 力、邓小强、王桂英等 2001 物理学报 **50** 48]
- [12] Canales V F , Oti J E and Cagigal M P 2005 *Optics Comm.* **247** 11
- [13] Yun M J , Liu L R , Sun J F *et al* 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 272

Fine tracking in space laser communication *

Liu Xi-Min Liu Li-Ren Sun Jian-Feng Lang Hai-Tao Pan Wei-Qing Zhao Dong

(*Laboratory for Information Optics , Shanghai Institute of Optical and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

(Received 4 January 2005 ; revised manuscript received 8 April 2005)

Abstract

Fine tracking plays an important role in space laser communication , and the Fine Pointing Mirror (FSM) is a key component in fine tracking system. Based on the optical vector reflection law , the accurate optical characteristics of FSM is deduced , which serves as the theoretical basis for fine tracking study. A fine tracking control system based on the FSM accurate optical characteristic is introduced. For system regulation , two important improvements to the simplex method are obtained. Then a digital simulation of the fine tracking is given. So an accurate control of the FSM is accomplished and the accuracy of the fine tracking system is improved. The diffractive superresolution theory is introduced into the space laser communication. By using 3-zone phase pupil filter , the point spread function (PSF) of the optical system is modified , and the optical energy distribution at the focal plane is modified accordingly. Then the diffraction spot size is decreased , and the optical resolution is increased , so the accuracy of the fine tracking system is improved.

Keywords : space laser communication , fine tracking , FSM , superresolution , pupil filter

PACC : 4230Q , 4280S , 4278F , 0670T

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program).