

振动对空间光-光纤耦合效率影响及补偿实验研究

韩琦琦, 王 强, 马 晶, 谭立英

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用现有成熟光纤通信技术是目前卫星光通信技术的重要发展方向, 但需首先解决空间光-光纤耦合这一关键问题。文中对卫星平台振动对空间光-光纤耦合效率的影响进行了理论分析; 在此基础上针对卫星光通信终端, 建立以 CCD 为探测器, 高速偏转镜为补偿器件的卫星平台微振补偿系统, 并进行了实验研究。实验结果表明: 所采用的基于反馈控制技术的主动补偿系统能有效地抑制低频振动。在振动频率介于 1~50 Hz, 振动幅度介于 75~300 μrad 之间时, 补偿系统对耦合效率的最大改善率可达 54.73%, 验证了补偿方案的可行性及有效性, 为在卫星光通信系统中应用各种光纤通信技术打下基础。

关键词: 卫星光通信; 光纤耦合; 振动补偿; 耦合效率

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0933-07

Experimental research on vibration influence and compensation of space light to fiber coupling efficiency

Han Qiqi, Wang Qiang, Ma Jing, Tan Liying

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Utilizing the existing mature technologies of fiber-optic communication is an important development direction of the present satellite optical communication technology, but the critical issue of how to couple the space light into the fiber must be resolved. A theoretical analysis of the influence caused by the vibration of satellites on the coupling efficiency of space light into fiber was conducted. On this basis, using CCD as a detector and fine steering mirror as a compensation facility, a vibration compensation system of satellite optical communication terminal was established and an experimental study was conducted. The experimental results show that the active compensation system based on the feedback control technology suppresses low frequency vibration efficiently. When the vibration frequency ranges from 1 to 50 Hz and the vibration amplitude ranges from 75 to 300 μrad , the maximum improving of coupling efficiency brought by the compensation system is up to 54.73%. The results verify the feasibility and effectiveness of the compensation system established in this paper, and lay a foundation for the using of the various fiber components in the satellite optical communication system.

Key words: optical intersatellite communication; fiber coupling; vibration compensation; coupling efficiency

收稿日期: 2013-07-06; 修订日期: 2013-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(10904026)

作者简介: 韩琦琦(1976-), 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事空间光通信技术研究。Email: hanqiqi@hit.edu.cn

0 引言

自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSO)技术具有发射光束窄、信息容量大、发射装置体积小、功耗低、保密性强、抗电磁干扰、无需申请频率使用许可、对人体无影响等诸多优点^[1-2]。同时利用现有成熟光纤通信技术是未来自由空间光通信系统设计的重要方向^[3]。例如,用具有低噪声系数的光纤放大器做前置放大器,能提供极大的光学增益,可以克服后续电路的热噪声,使接收灵敏度可与相干光通信系统媲美,但技术难度却远小于相干光通信,成为目前空间光通信系统的一个重要接收方案^[4-5]。

要在卫星平台上使用光纤放大器等光纤器件,首要解决的问题就是如何把接收到的微弱信号光高效耦合入光纤,这需要对光通信终端光学系统进行精确装调,使其具有极高的成像精度^[6]。同时进行空间光-光纤耦合时,由于光纤芯径小(微米量级)、数值孔径(多模 0.18~0.24)有限,要求入射光成像位置与入射角度稳定。而卫星光通信终端的粗跟踪误差^[7]和卫星平台微振动会使焦平面上光斑位置偏离光纤纤芯中心,同时由于纤芯芯径较小,使得光斑很容易偏离出纤芯端面,导致耦合进光纤中的光功率急剧下降,使通信信噪比降低,严重时甚至导致通信链路中断。因此必须对卫星平台微振动做出补偿,才能在卫星平台振动条件下,使空间光与光纤始终具有较高的耦合效率,从而保证系统通信性能。

对于卫星平台振动,从 20 世纪 90 年代起,日本的 NASDA、美国宇航局喷气推进实验室(NASA/JPL)等研究机构都分别进行了研究^[8-9],结果表明卫星振动主要集中在 50 Hz 以内,幅值小于 200 μrad ,而且在一段时间内具有周期性。目前对卫星平台的振动补偿方法包括直接在星上安装振动隔离系统和基于反馈控制的补偿技术两种。

在星上安装振动隔离系统,是通过将光通信终端与卫星平台进行物理隔离而达到减振的目地,根据已有研究,这种振动隔离系统能有效地抑制高频振动,但对低频振动的抑制效果不理想^[10]。

对低频卫星平台振动,已有研究采用基于反馈控制技术的补偿系统对其引起的光束发射角度偏差进行补偿^[9,11],跟踪探测器可采用 CCD 探测器或 QD

探测器^[12]。研究结果表明该技术可有效降低卫星平台低频振动对卫星光通信系统发射光束指向稳定性的影响。文中以此为基础,针对卫星平台振动对空间光-光纤耦合效率的影响进行了理论分析,并在光通信终端接收端建立以 CCD 为探测器,高速偏转镜为执行机构的空间光-光纤耦合振动补偿系统。为验证补偿效果进行了实验室模拟实验,实验结果表明该系统对低频振动具有明显的补偿效果。文中工作为在卫星光通信系统中应用各种光纤器件打下基础。

1 振动对空间光-光纤耦合效率影响分析

典型的卫星光通信终端接收端系统如图 1 所示。由于卫星平台微振动等因素,会使入射光束的入射角发生变化,从而使信号与信号探测器之间产生对准偏差,使通信信噪比降低。对于接收面积较大的面阵探测器,由于其视域较大,这种对准偏差对其影响较小。但对于接收面积较小的光纤,对准偏差将对其耦合效率造成较大影响。



图 1 卫星光通信终端接收系统

Fig.1 Receiving system of the optical intersatellite communication terminal

从空间远距离传输来的激光光束在接收系统所在平面仍为高斯光束,但其波阵面曲率半径比较大,所以可近似看作平面波。对于多模光纤,纤芯芯径(50~200 μm)相对较大,可用几何光学方法对空间光与多模光纤的耦合效率进行分析。文中分析中忽略各种像差影响,假设空间光束聚焦透镜为理想透镜。

如图 2 所示,由于卫星平台振动,平面波通过聚焦透镜后的光斑将在焦平面上移动,从而产生横向对

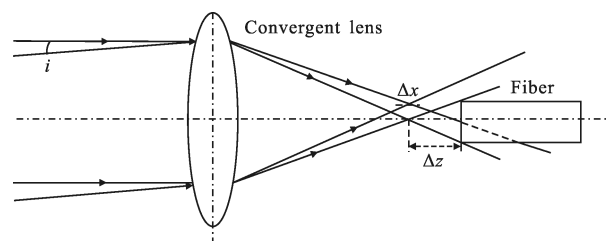


图 2 轴向偏差 Δz 与横向偏差 Δx

Fig.2 Axis based error Δz and transverse error Δx

准偏差 Δx ; 由于光纤端面不能精确地至于透镜焦面从而产生轴向对准偏差 Δz ; 由于空间折射率与纤芯折射率不同, 纤芯界面上的入射光会发生菲涅耳反射。以上三种因素都会引起损耗, 使耦合效率下降。

卫星平台微振动会引起光束入射角 i 发生改变, 聚焦光斑将在纤芯端面上移动。设聚焦透镜焦距为 f , 孔径为 D , 光纤纤芯半径为 r , 若入射角 i 较小 ($0 \sim 0.5$ mrad), 光斑可近似看作是半径 $R=(D\Delta z)/2f$ 的圆斑。由于装调等原因产生的离焦量 Δz 通常小于 $100 \mu\text{m}$, 而聚焦系统 $F\#$ 通常大于 4, 因此满足 $|\Delta z| < (2f/D)r$ 的条件, 此时 $R < r$, 如图 3 所示。

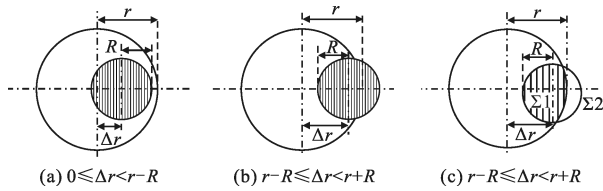


图3 纤芯端面光斑与纤芯中心的位置关系
Fig.3 Relation between light spot and fiber core

在不考虑像差的情况下, 耦合损耗主要由菲涅耳反射和离焦误差引起。当光斑圆心与纤芯中心距离 Δr 满足 $0 \leq \Delta r < r - R$ 时, 光斑没有移出光纤纤芯端面, 此时的耦合损耗为反射损耗; 当 Δr 满足 $r - R \leq \Delta r < r + R$ 时, 部分光斑移出纤芯端面, 此时耦合损耗为反射损耗和纤芯端面的光逸出损耗。图 3(c) 中, Σ_1 区域为光斑与纤芯重合区域, Σ_2 为光斑逸出纤芯端面的区域。

目前的卫星光通信系统通信距离为数百 km 到数万 km, 信号光经过遥远得传输距离将以平行光的形式满口径入射光通信终端接收透镜组, 且在入射平面内各点光强近似均匀, 如图 4 所示, 在透镜表面建立坐标系 $O-XYZ$, 在光纤表面建立坐标系 $O'-X'Y'Z'$, O' 在 OZ 轴上, $O'X'$ 平行于 OX , $O'Y'$ 平行于 OY 。

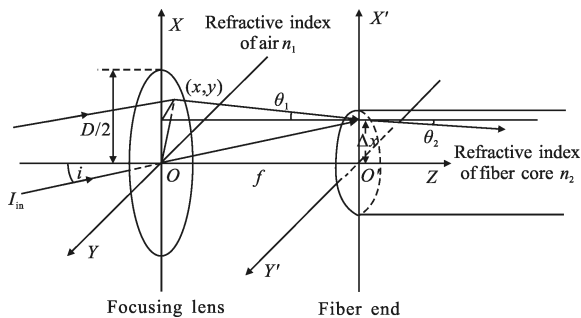


图4 空间光经透镜聚焦后入射光纤

Fig.4 Freespace beam is coupled into the fiber though focusing lens

设入射到透镜前表面的光强为 I_{in} , 入射角为 i , 所有入射光线均平行于主轴光线。透镜后表面上一点出射光线在光纤端面上的入射角为 θ_1 , 折射角为 θ_2 , 空气折射率为 n_1 , 光纤纤芯折射率为 n_2 。以 s 光为例, 光线在光纤端面上的反射系数 r_i 与反射率 R_i 分别为^[13]:

$$r_i = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (1)$$

$$R_i = r_i^2 \quad (2)$$

由轴对称性, 总可以这样选择坐标系: 使入射光束主轴光线位于 $x-z$ 平面内。当光纤纤芯端面与聚焦透镜焦平面重合时, 入射光束聚焦于纤芯端面一点, 则在此坐标系下, 当 $0 \leq i < \arctan(r/f)$ 时, 根据几何关系, 透镜表面上任一点 (x, y) 的光线在纤芯端面上的入射角 θ_1 满足:

$$\tan \theta_1 = \frac{[(x-ftani)^2 + y^2]^{\frac{1}{2}}}{f} \quad (3)$$

由几何关系可知, 当纤芯端面与聚焦透镜焦平面平行, 但偏离焦平面位置 Δz 时, 光纤端面上光线的入射位置改变, 但入射角不变, θ_1 仍满足公式(3)。

由 Snell 定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

则:

$$n_2 \cos \theta_2 = (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$n_1 \cos \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

由以上各式, 得:

$$R_i = \left[\frac{n_1 \cos \theta_1 - (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}}}{n_1 \cos \theta_1 + (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^{\frac{1}{2}}} \right]^2 = \left[\frac{n_1 \sqrt{\frac{f^2}{(x-ftani)^2 + y^2 + f^2}} - \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \frac{(x-ftani)^2 + y^2}{(x-ftani)^2 + y^2 + f^2}}{n_1 \sqrt{\frac{f^2}{(x-ftani)^2 + y^2 + f^2}} + \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \frac{(x-ftani)^2 + y^2}{(x-ftani)^2 + y^2 + f^2}} \right]^2 = \left[\frac{n_1 f - \sqrt{n_2^2 [(x-ftani)^2 + y^2 + f^2]} - n_1^2 [(x-ftani)^2 + y^2]}{n_1 f + \sqrt{n_2^2 [(x-ftani)^2 + y^2 + f^2]} - n_1^2 [(x-ftani)^2 + y^2]} \right]^2 \quad (7)$$

根据几何关系可知光纤离焦情况下, 光纤表面成像光斑每一点坐标 (x', y') 与相应入射光线在透镜表面的坐标 (x, y) 的关系为:

$$x' = -\frac{\Delta z}{f} x + (f + \Delta z) \cdot i \quad (8)$$

$$y' = -\frac{\Delta z}{f} y \quad (9)$$

综合以上分析有耦合效率:

$$\eta = \begin{cases} \frac{\iint_{\Sigma_1} I_m R dx' dy'}{1 - \iint_{\Sigma_1} I_m dx' dy'}, & 0 \leq \Delta r < r - R, \Delta z < \frac{2f}{D} r \\ \frac{\iint_{\Sigma_1} I_m dx' dy' + \iint_{\Sigma_2} I_m R dx' dy' - \iint_{\Sigma_2} I_m dx' dy'}{\iint_{\Sigma_1 + \Sigma_2} I_m dx' dy'}, & r - R \leq \Delta r < r + R, \Delta z < \frac{2f}{D} r \\ 0, & \Delta r \geq r + R, \Delta z < \frac{2f}{D} r \end{cases} \quad (10)$$

由公式(7)~(10)可得空间光-光纤耦合效率 η 随入射光入射角 i 变化的仿真结果,如图 5 所示。仿真中取纤芯半径 $r=25 \mu\text{m}$, $NA=0.22$, 透镜焦距 $f=50 \text{ mm}$ 及孔径 $D=20 \text{ mm}$, 且 Δz 满足 $0 \leq \Delta z < (2f/D)r$ 。

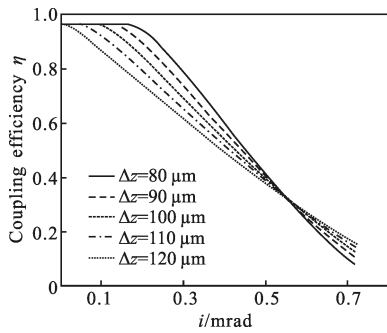


图 5 耦合效率随入射角角度的变化

Fig.5 Relation between coupling efficiency and the angle of incidence

由图 5 可见,在较小入射角条件下,轴向偏差 Δz 越大,耦合系统耦合效率越低,因此有必要提高透镜与光纤的轴向定位精度;当 Δz 为 $80 \mu\text{m}$,入射光角度 i 小于 0.16 mrad 时,耦合效率对应一段平坦区,这是由于此时的损耗只包括菲涅耳反射损耗;此后随着入射角 i 的增大,耦合效率将急剧下降,当 i 大于 0.7 mrad 时,耦合效率下降到 20% 以下。

可以预见当考虑像差等因素时,耦合效率随入射角 i 的变化将更加剧烈,因此必需对卫星平台的振动进行补偿,以使空间光-光纤耦合系统在振动情况下仍具有较高的耦合效率。

2 空间光-光纤耦合振动补偿系统

对于图 1 所示接收系统,可在接收光路中加入光束偏转装置,该装置需依据平台的振动进行偏转,改变光束入射光纤的角度补偿振动引起的光斑偏

移。依据此思路,文中设计的光通信终端接收端振动补偿系统如图 6 所示。其中光束偏转装置为压电陶瓷控制高速偏转镜。入射信号光经准直透镜准直及高速偏转镜(FSM)反射后,由分光片分为两束,一束聚焦后进行空间光-光纤耦合,一束聚焦后入射 CCD 探测器。CCD 作为光斑位置探测器,实时地跟踪入射光斑位置的变化,并将位置变化量输入到控制系统,由控制系统根据光斑位置偏移量给出控制信号,以驱动高速偏转镜(FSM)产生偏转,从而达到校正光斑位置,即补偿卫星平台微振动的目地。

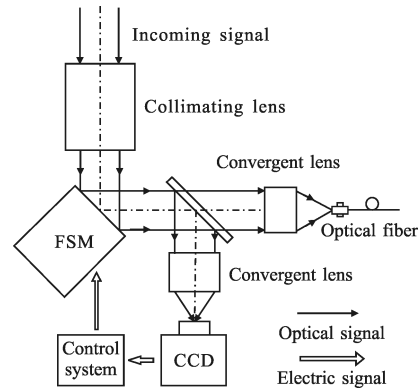


图 6 卫星平台振动补偿系统

Fig.6 Vibration compensation system for satellite

CCD 探测器根据其光敏面所成光斑灰度值计算光斑中心^[14]。

$$\left\{ \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_i \sum_j x_i f_{i,j}(x,y)}{\sum_i \sum_j f_{i,j}(x,y)} \\ y_0 &= \frac{\sum_j \sum_i y_j f_{i,j}(x,y)}{\sum_i \sum_j f_{i,j}(x,y)} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: $f_{i,j}$ 为接收面上第 (i,j) 个像素的灰度值; (x_i, y_j) 是第 (i,j) 个像素的位置坐标; (x_0, y_0) 为通过灰度质心算法求得的光斑质心坐标。通过质心算法, 由 CCD 对光斑位置进行跟踪, 然后将光斑位置相对于无振动时的位置偏移量实时输入到控制系统, 由控制系统根据实测的偏转系统传递函数给出偏转电压, 输入到高速偏转镜(FSM), 使其产生偏转, 以实现光束位置的校正, 从而使耦合系统始终具有较高的耦合效率。

3 空间光-光纤振动补偿实验

为验证文中所设计振动补偿系统的有效性, 建立了实验室模拟系统。实验装置如图 7 所示, 分为发射端、振动模拟端及接收端三部分。

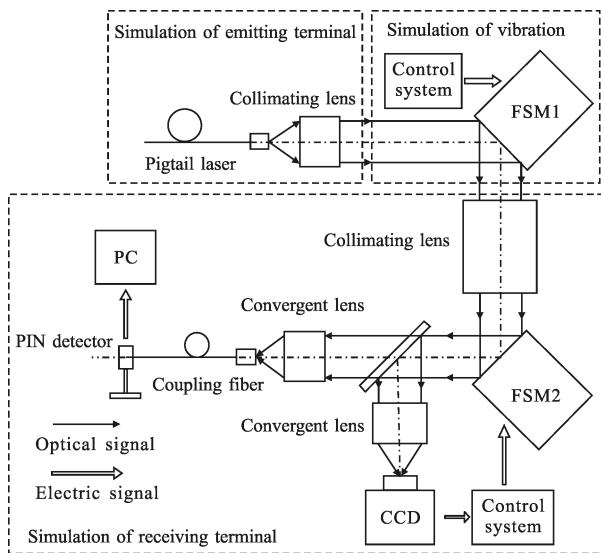


图 7 实验装置图

Fig.7 Experimental device

发射端部分由尾纤输出的半导体激光器及准直透镜组成; 激光器输出波长为 806 nm。

振动模拟部分由控制系统及高速偏转镜 1 (FSM1) 构成, 在控制系统的驱动下, 高速偏转镜产生偏转, 模拟平台振动导致的入射光角度偏差, 振动频率 1~50 Hz 以内, 振动幅度 65~130 μ rad。

接收端部分由振动补偿系统、空间光-光纤耦合系统及 PIN 探测器组成。耦合系统中聚焦透镜焦距 $f=50$ mm, 直径 $D=20$ mm, 光纤纤芯半径 $r=25$ μ m, 数值孔径 $NA=0.22$, 为多模光纤。在最佳耦合状态, PIN 探测器可探测到的最大光功率为 4.97 μ W。

为验证振动补偿系统的有效性, 由计算机控制 FSM1, 分别针对频率为 1 Hz、10 Hz、20 Hz、30 Hz、40 Hz、50 Hz 生成振幅为 75 rad、110 rad、135 rad、160 rad、185 rad、220 rad、250 rad、300 rad 的振动共 48 组, 进行不同振动频率、振幅对空间光光纤耦合效率影响的实验研究。

实验第一步: 在每一组振动条件下的实验中, 首先在最佳耦合状态下 (PIN 接收到的功率为最大的状态), 由计算机控制 FSM1 不产生振动, 由 PIN 采集光纤输出光强 12 s, 并计算平均输出功率 P_0 。

实验第二步: 由计算机根据实验要求, 控制 FSM1 产生不同振型的振动, 同时不启动振动补偿系统, 由 PIN 采集光纤输出光强 12 s, 并计算平均输出功率 P_1 。定义 $\eta_1=P_1/P_0$ 为振动条件下, 不进行振动补偿时的空间光-光纤耦合效率。

实验第三步: 由计算机根据实验要求控制 FSM1 产生不同振型的振动, 同时启动振动补偿系统, 由 PIN 采集光纤输出光强 12 s, 并计算平均输出功率 P_2 。定义 $\eta_2= P_2/P_0$ 为振动条件下, 进行振动补偿时的空间光-光纤耦合效率。则 $\eta_3=\eta_2-\eta_1$ 为振动补偿系统对空间光光纤耦合效率的改善率。

图 8~图 13 为相同振动频率下振幅与补偿后耦合效率的关系, 图中曲线包括不进行振动补偿时的空间光-光纤耦合效率 η_1 , 及进行振动补偿时的空间光-光纤耦合效率 η_2 。图 14 为振幅与耦合效率改善率 η_3 的关系。

由实验结果可知:

(1) 如图 8~图 13 所示, 当振动引起入射光角度偏差时, 不启动振动补偿系统时的耦合效率 η_1 随振动幅度的增大而明显降低。

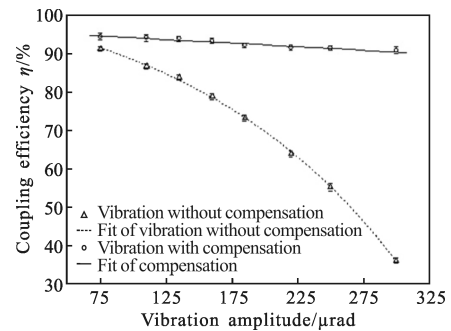


图 8 1 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.8 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency η_1 and η_2 for 1 Hz

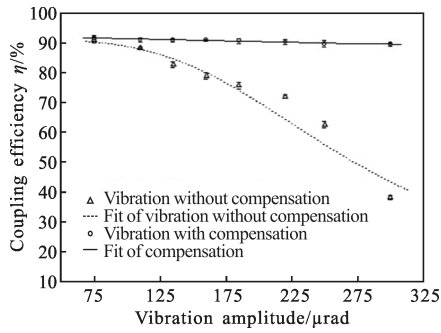


图 9 10 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.9 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency

η_1 and η_2 for 10 Hz

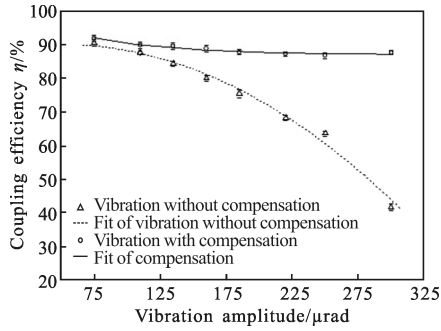


图 10 20 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.10 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency

η_1 and η_2 for 20 Hz

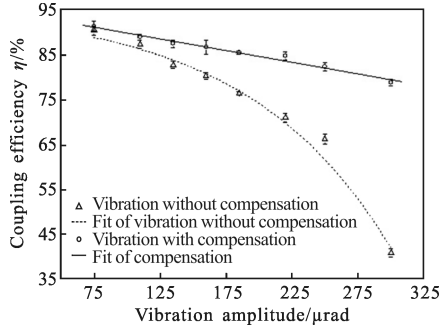


图 11 30 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.11 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency

η_1 and η_2 for 30 Hz

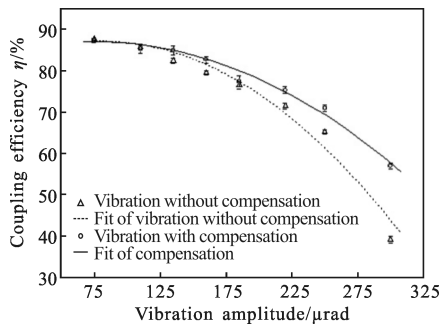


图 12 40 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.12 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency

η_1 and η_2 for 40 Hz

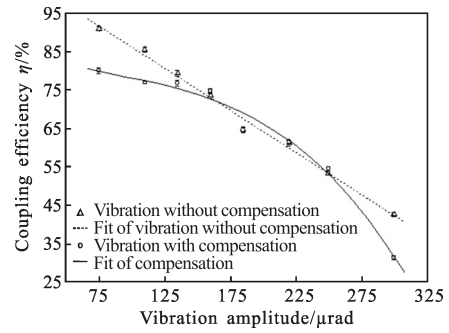


图 13 50 Hz 振动幅度与耦合效率 η_1 及 η_2 的关系

Fig.13 Relation between vibration amplitude and coupling efficiency

η_1 and η_2 for 50 Hz

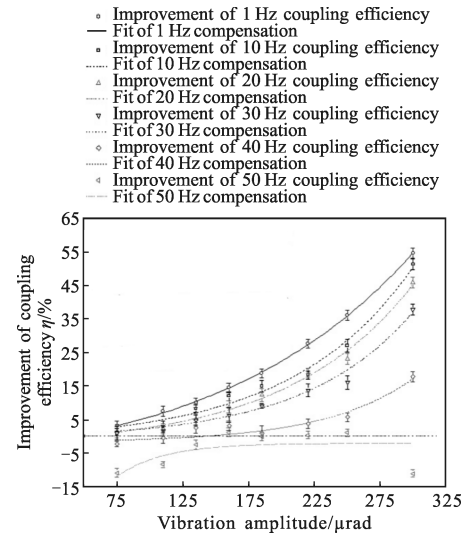


图 14 振幅与耦合效率改善率 η_3 的关系

Fig.14 Relation between vibration amplitude and improvement of coupling efficiency η_3

(2) 文中设计的振动补偿系统对振动具有明显补偿效果, 且对低频振动的耦合效率改善效果优于高频振动。

根据图 14 所示, 启动振动补偿系统后, 空间光-光纤耦合系统耦合效率得到明显改善, 且补偿系统对于低频振动改善效果优于高频振动。对于同振幅的振动, 耦合效率改善率 η_3 随着振动频率的增加而减小。当振动频率接近振动补偿控制系统带宽时, 由于所采用的补偿算法是将前一时间 t_1 采集到的振幅值 $a(t_1)$ 作为下一时刻 t_2 的振动补偿量的单点补偿算法, 而且随着振动频率的增大, 补偿器件的时间响应率显得相对较慢, 因而不能进行有效补偿(振动频率为 50 Hz 情况)。理论上这一问题可以通过采用具有预报特性的补偿算法来解决。将在后续实验中进行证实。

(4) 同一振动频率,补偿系统的补偿效果随着振动幅度的增大而增加。

如图 14 所示,补偿系统对振动情况下的耦合效率有明显的提高,而且对于同一振动频率,补偿效果的改善随着振动幅度的增大而增加,即振幅越大,补偿后耦合效率改善率 η_3 越大。例如,对于 20 Hz 的振动,振幅为 110 μrad 时,耦合效率仅比无补偿振动条件下提高 2.22%,振幅为 220 μrad 时,耦合效率可比无补偿振动条件下提高 23.14%。这是由于在相同频率条件下,当振动幅较小时,振动本身对耦合效率的影响较小,因此补偿系统的补偿效果不明显;当振动幅度较大时,由振动引起的耦合效率下降较大,此时补偿系统显示出更加明显的补偿效果。

4 结 论

文中针对卫星平台振动对空间光-光纤耦合效率的影响进行了理论分析,在此基础上针对卫星光通信终端,建立了以 CCD 为探测器,高速偏转镜为补偿器件的卫星平台微振补偿系统,并进行了实验研究。实验结果表明:

(1) 当振动引起入射光角度偏差时,耦合效率随着振动幅度的增大而明显降低。

(2) 设计的振动补偿系统对振动具有明显补偿效果,最大耦合效率改善率达 54.73%,且对低频振动的改善效果优于高频振动。

(3) 对于同一振动频率,补偿系统的补偿效果随着振动幅度的增大而增加。

实验结果验证了所建立的振动补偿系统的有效性。文中的单点补偿算法具有滞后性,随着振动频率接近补偿系统带宽时,补偿效果逐渐降低。后续工作将通过改善控制算法进一步提高高频振动条件下,空间光-光纤耦合系统的耦合效率。该研究工作为在卫星光通信系统中应用各种光纤器件打下了基础。

参考文献:

- [1] Yamakaw S, Hanad T, Kohat H. Jaxa's efforts toward next generation space data-relay satellite using optical inter-orbit communication technology[C]//SPIE, 2010, 7587: 75870P.
- [2] Smutny B, Kaempfner H, Muehlnikel G, et al. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link [C]//SPIE, 2009, 7199: 719906.
- [3] Chan V W S. Optical space communications [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 959-975.
- [4] Hemmati. Overview of laser communications research at JPL [C]//SPIE, 2001, 4273: 190-193.
- [5] Pfennighauer M, Strasser M M. Dependence of optically pre-amplified receiver sensitivity on optical and electrical filter bandwidths-measurement and simulation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(6): 831-833.
- [6] Yu Jianjie, Tan Liying, Liu Jianfeng, et al. Alignment for center distance of optical telescope in satellite optical communication terminal[J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(9): 2091-2096. (in Chinese)
- [7] Tan Liying, Wu Shichen, Han Qiqi, et al. Coarse tracking of the periscope-type optical communication terminals [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(2): 270-276. (in Chinese).
- [8] Morio Toyoshima, Kenichi Araki. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the Engineering Test Satellite VI using laser communication equipment[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(5): 827-832.
- [9] Shinhak Lee, James W Alexander, Muthu Jegathan. Pointing and tracking sub-system design for optical communications link between the international space station and ground[C]//SPIE, 2000, 3932: 150-157.
- [10] Ma Jing, Han Qiqi, Yu Siyuan, et al. The effect of vibration on intersatellite optical communication and the resolving project [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(3): 228-232. (in Chinese).
- [11] Yu Siyusn, Ma Jing, Tan Liying. Study of vibration compensation technology in intersatellite laser links [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(4): 472-476. (in Chinese)
- [12] Lin Zhiqi, Li Huijie, Lang Yonghui, et al. Obtaining spot parameters by quadrant photodetectors [J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(4): 764-770. (in Chinese).
- [13] Shi Shunxiang, Zhang Xinhai. Physical Optics and Applied Optics[M]. Xi'an: Xi'an University Press, 2000. (in Chinese)
- [14] Li Xiaofeng, Luo Tong, Deng Ke. Analysis and experiment of CCD-applied spatial optical communications light spot position locating gravity center calculation [J]. *Optical Communication Technology*, 2004(6): 13-14. (in Chinese)