

卫星光通信终端二维转台运动 参量对天线指向影响研究

刘剑峰, 韩琦琦, 于思源, 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光电子研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 二维转台与卫星平台间的耦合运动, 是影响卫星光通信终端天线指向控制的重要因素。在耦合动力学模型基础上, 研究了二维转台不同运动参量对光通信终端天线指向偏差的影响。分析结果表明: 在耦合动力学环境下, 光束指向偏差随二维转台转动成规律性变化; 当方位轴、俯仰轴转角 θ_h 、 θ_v 分别为 $(\pi, 0)$ 、 $(-\pi, 0)$ 时, 指向偏差出现最大值; 随二维转台转动时间的增加, 天线指向偏差略有增加, 转动时间由 $10s$ 增加到 $1000s$ 时增幅仅为 1% 。其结果为补偿耦合运动影响, 保证天线指向控制精度, 提高卫星光通信终端星上应用的稳定性打下基础。

关键词: 卫星光通信; 卫星姿态动力学; 耦合运动; 天线指向控制

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2007)04-0926-06

0 引言

卫星光通信技术以激光作为信息的载体在卫星间、卫星与地面站间建立高速、迅捷的通信链路系统, 是现代卫星通信领域的重要研究方向^[1,2]。由于卫星光通信系统的自身特点——信号光束宽窄、传输距离长, 要求卫星光通信终端对其天线指向具有很高的控制精度^[3]。目前世界上已研制成功及正处于研制过程中的卫星光通信系统均采用复合轴控制方法, 以二维转台作为粗瞄机构, 在卫星激光链路建立与保持过程中完成天线指向控制^[4]。

二维转台可以看作卫星平台上一个受控的动量装置, 在其运动过程中, 必然与卫星平台进行动量交换, 使卫星姿态运动发生改变。由于卫星光通信终端以卫星平台为支撑, 二维转台的转角也必然受到卫星平台姿态运动的影响, 因此二维转台与卫星平台间存在耦合运动^[5]。终端与卫星平台的耦合运动将导致二维转台对惯性空间的转角偏离终端对其的控制量, 造成天线指向偏差。不同运动参量条件下, 二维转台的转动对卫星平台姿态运动影响不同, 进而耦合运动对天线指向偏差的影响也不同。因此研究耦合运动条件下, 二维转台运动参数对天线指向偏差的影响, 是优化粗瞄控制方法, 对耦合运动进行有效补偿的前提, 必须对其进行详尽分析。

光通信终端与卫星平台耦合运动影响分析, 是卫星光通信技术研究中的崭新课题, 目前国外研究机构已发表的文献中, 尚未发现相关报道, 但此工作对卫星光通信系统的实际应用具有十分重要的意义。本文以耦合运动动力学模型为基础, 建立仿真实验系统, 对在轨运行过程中二维转台运动参数对天线指向偏差的影响进行了详细研究, 给出了天线指向偏差随终端二维转台转角、转动时间等参数的变化规律。其结果为优化终端粗瞄机构控制策略, 补偿耦合运动影响, 提高卫星光通信终端星上应用的稳定性打下基础。

1 卫星光通信终端二维转台构成及控制

典型的卫星光通信终端粗瞄机构由二维转台构成, 其基本结构如图 1 所示。

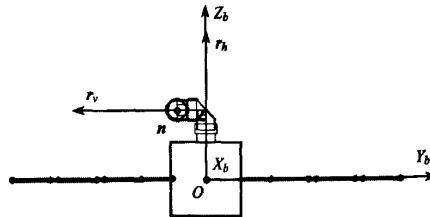


图 1 卫星光通信终端粗瞄机构基本结构

Fig. 1 Fundamental structure of Coarse Pointing Assembly

如图所示,卫星光通信终端二维转台由两个相互垂直的转动部分构成,称为方位轴和俯仰轴,轴矢量分别以 r_h 、 r_v 表示,两轴由力矩电机控制,均可进行 $-\pi \sim \pi$ 的旋转。两片反射镜分别固定于方位轴和俯仰轴转动部分上,改变终端光学天线(望远镜)的指向方向矢量 n 。二维转台的转动在卫星本体坐标系 $O-X_bY_bZ_b$ 中描述。 $O-X_bY_bZ_b$ 坐标系坐标原点为卫星质心,坐标轴与卫星平台固联。

在卫星光通信系统天线指向控制过程中,卫星光通信终端对二维转台的运动采用 PID 控制方法控制,其基本框图如图 2 所示。

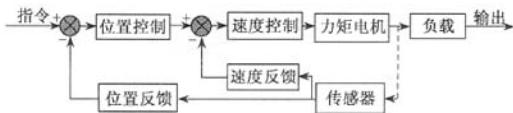


图 2 二维转台控制系统简图

Fig.2 Sketch of the gimbals control system

在轨运行中,卫星光通信终端将依据目标卫星位置、通信链路建立、保持状态,确定二维转台相对于卫星轨道坐标系 $O-X_bY_bZ_b$ 需转过的角度,进而生成控制指令,由电机驱动二维转台转过相应的角度。现有的卫星光通信终端粗瞄控制算法中忽略了卫星姿态的运动,因此二维转台的转角以卫星本体坐标系为基准。

当卫星光通信终端控制二维转台旋转时,转台将与卫星平台发生动量交换,使卫星姿态运动发生改变。由于卫星光通信终端以卫星平台为支撑,二维转台的转角也必然受到卫星平台姿态运动的影响,因此二维转台与卫星平台间存在耦合运动。终端与卫星平台的耦合运动将导致二维转台对惯性空间的转角偏离终端对其控制量,造成天线指向偏差。

2 耦合动力学模型

如图 1 所示,考虑一种二维转台典型安装方式,即 r_h 与 Z_b 轴重合,转动初始时刻时, r_v 轴与 $-Y_b$ 轴平行。设 t 时刻终端需控制天线指向矢量在卫星轨道坐标系中表示为:

$$\mathbf{n}_c^o = \begin{bmatrix} \cos\theta_h \cos\theta_v \\ \cos\theta_h \sin\theta_v \\ \sin\theta_v \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中以下标 C 表示矢量为控制量,上标 O 表示为在轨道坐标系中的分量。

由于在已有的控制算法中忽略了卫星姿态运动,即认为卫星轨道坐标系与卫星本体坐标系重合,则

$$\mathbf{n}_c^s = \mathbf{n}_c^o \begin{bmatrix} \cos\theta_h \cos\theta_v \\ \cos\theta_h \sin\theta_v \\ \sin\theta_v \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,上标 S 表示矢量在卫星本体坐标系中的分量。因此 t 时刻终端需二维转台控制方位轴转过 θ_h ,俯仰轴转过 θ_v 。

由卫星姿态动力学出发,可建立终端二维转台旋转时,卫星平台转速的微分方程组^[6],为:

$$\left. \begin{aligned} & (C_1 + C_4 \sin^2 \theta_h) \dot{\omega}_{px} - \\ & (C_4 \cos\theta_h \sin\theta_v) \dot{\omega}_{py} + \\ & (C_4 \cos\theta_h \sin\theta_v) \omega_{py} \omega_{pz} + \\ & (C_3 - C_2 + C_4 \sin^2 \theta_h) \omega_{py} \omega_{pz} + \\ & (2 C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h \dot{\theta}_h) \omega_{px} + \\ & [(2 C_4 \sin^2 \theta_h - C_4 + C_5) \dot{\theta}_h] \omega_{py} + \\ & (\cos\theta_h I_{R2x} \ddot{\theta}_v) \omega_{pz} + \\ & \sin\theta_h I_{R2x} \ddot{\theta}_v + \cos\theta_h I_{R2x} \dot{\theta}_h \dot{\theta}_v = L_x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} & -(C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h) \dot{\omega}_{px} + \\ & (C_2 - C_4 \sin^2 \theta_h) \dot{\omega}_{py} + \\ & (C_1 - C_3 + C_4 \sin^2 \theta_h) \omega_{px} \omega_{pz} - \\ & (C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h) \omega_{py} \omega_{pz} + \\ & [(2 C_4 \sin^2 \theta_h - C_4 - C_5) \dot{\theta}_h] \omega_{px} - \\ & (2 C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h \dot{\theta}_h) \omega_{py} + \\ & (\sin\theta_h I_{R2x} \ddot{\theta}_v) \omega_{pz} - \\ & \cos\theta_h I_{R2x} \ddot{\theta}_v + \sin\theta_h I_{R2x} \dot{\theta}_h \dot{\theta}_v = L_y \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} & C_3 \dot{\omega}_{pz} - (C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h) \omega_{px}^2 + \\ & (C_4 \cos\theta_h \sin\theta_h) \omega_{py}^2 + \\ & (C_2 - C_1 - 2 C_4 \sin^2 \theta_h) \omega_{px} \omega_{py} - \\ & (\cos\theta_h I_{R2x} \dot{\theta}_v) \omega_{py} - \\ & (\sin\theta_h I_{R2x} \dot{\theta}_v) \omega_p^r + C_5 \ddot{\theta}_h = L_z \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 ω_{xp} 、 ω_{yp} 、 ω_{zp} 为卫星平台对空间的转速在卫星本体坐标系中的分量。 $C_1 - C_5$ 为由二维转台主轴惯量与卫星平台主轴惯量决定的常数。 L_x 、 L_y 、 L_z 分别为卫星平台三个主轴方向的控制力矩。

由卫星姿态运动方程,可得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi} &= \omega_{p_x} + \omega_0 \cdot (\cos\theta \sin\psi + \sin\varphi \sin\theta \cos\psi) \\ \dot{\theta} &= \omega_{p_y} + \omega_0 \cdot \cos\varphi \cos\psi \\ \dot{\psi} &= \omega_{p_z} + \omega_0 \cdot (\sin\theta \sin\psi - \sin\varphi \cos\theta \cos\psi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(3)–(6)组成了终端与平台的耦合动力学模型。耦合运动模型中 6 个方程均为一阶线性微分方程,与姿态角初始条件 $\varphi(0)、\theta(0)、\psi(0)$,转速初始条件 $\omega_{p_x}(0)、\omega_{p_y}(0)、\omega_{p_z}(0)$ 组成了一阶线性方程组的初值问题。

忽略其它影响因素时,二维转台的转动将导致卫星平台姿态发生改变,则卫星姿态角为二维转台运动参量的函数,即

$$\begin{aligned} \varphi &= f_1(\theta_h, \dot{\theta}_h, \ddot{\theta}_h, \theta_v, \dot{\theta}_v, \ddot{\theta}_v, t) \\ \theta &= f_2(\theta_h, \dot{\theta}_h, \ddot{\theta}_h, \theta_v, \dot{\theta}_v, \ddot{\theta}_v, t) \\ \psi &= f_3(\theta_h, \dot{\theta}_h, \ddot{\theta}_h, \theta_v, \dot{\theta}_v, \ddot{\theta}_v, t) \end{aligned} \quad (7)$$

由于卫星平台的姿态运动,卫星本体坐标系与卫星轨道坐标系不再重合,其间的变换矩阵 R_A 为

$$R_A = \begin{bmatrix} C\theta C\psi - S\varphi S\theta S\psi & C\theta S\psi + S\varphi S\theta C\psi & -C\varphi S\theta \\ C\varphi S\psi & C\varphi C\psi & S\varphi \\ S\theta C\psi + S\varphi C\theta S\psi & S\theta S\psi - S\varphi C\theta C\psi & C\varphi C\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, S 表示 \sin , C 表示 \cos 。

则,由于姿态运动,终端天线指向矢量 n 在卫星轨道坐标系中的实际分量为:

$$n_A^0 = R_A \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_v \cos\theta_h \\ \cos\theta_v \sin\theta_h \\ \sin\theta_v \end{bmatrix} \quad (9)$$

下标 A 表示终端天线的实际指向。

由式(1)可知,存在耦合运动时终端天线的实际指向 n_A^0 与其控制指向 n_c^0 不重合, n_A^0 与 n_c^0 间的夹角即为天线指向偏差角,由符号 δ 表示,由矢量数量积定义可知

$$\delta = \arccos(n_c^0 \cdot n_A^0) \quad (10)$$

有上述分析可知,在卫星光通信终端对天线指向的控制过程中,由于二维转台与卫星平台间的运动耦合,导致了天线指向偏差的产生。

在终端对二维转台进行 PID 控制时,两轴的转角和转动时间是决定其运转方式的两个基本参数。不同运动方式下,耦合运动对卫星平台姿态的改变

方式不同,耦合运动引起的天线指向偏差也不同。因此,深入分析耦合动力学下,二维转台基本运动参数对终端天线指向偏差的影响,是进行天线指向偏差效补偿方法研究的前提。

3 天线指向运动仿真系统

星间激光链路瞄准、捕获、跟踪过程中,二维转台的运动方式由转动角、转动时间两个基本参数决定。为分析耦合运动中,二维转台运动参数天线指向偏差的影响,利用 MATLAB 语言建立了星间激光链路天线指向运动过程仿真实验系统,系统框图如图 3 所示。

仿真系统主要包括:(1)控制信号仿真器、(2)耦合动力学仿真器、(3)指向偏差计算器三个部分。其中控制信号仿真器模拟输出光通信终端对二维转台的控制信号,包括:二维转台方位轴转角 θ_h ,方位轴转动时间 T_h ,俯仰轴轴转角 θ_v ,俯仰轴转动时间 T_v 。

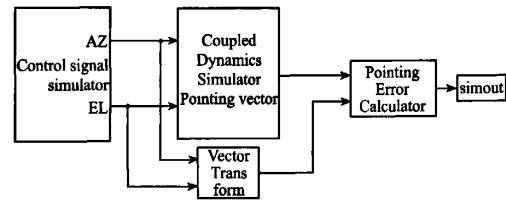


图 3 星间激光链路天线指向运动仿真实验系统

Fig.3 Simulation system of antenna pointing control program

仿真控制信号以向量形式输入耦合动力学仿真器,其基本框图如图 4 所示。耦合动力学仿真器主要包括:方位轴运动生成器、俯仰轴运动生成器、耦合动力学仿真器、天线指向矢量计算器四个部分。其中,方位轴、俯仰轴运动生成器根据输入控制指令、二维转台控制模型生成两轴运动转角、角速度、角加速度等六个量,并将其输入耦合动力学仿真器。

耦合动力学仿真器核心为式(3)–(6)组成的二维转台与卫星平台的耦合动力学模型。仿真中利用龙格—库塔法对耦合动力学模型进行数值求解,并输出卫星姿态角。由卫星姿态运动和二维转台两轴转过角度,利用式(9)可计算得到光通信终端天线对惯性空间指向的仿真结果 n_A^0 。

如图 3 所示,终端二维转台方位轴、俯仰轴控制信号经矢量转换后即可得到天线指向控制矢量 n_c^0 。将 n_A^0 与 n_c^0 输入指向偏差计算器由式(10)即可得到

二维转台与卫星平台的耦合运动引起的天线指向偏差角。

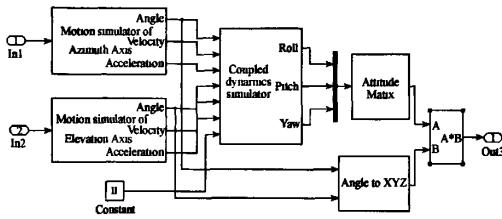


图4 耦合动力学仿真系统框图

Fig. 4 Diagram of coupled dynamics simulator

4 转台运动参数对天线指向偏差影响

为分析二维转台与卫星平台耦合动力学条件下,转台转角与转动时间对卫星光通信终端指向偏差的影响,利用天线指向运动仿真实验系统,进行二维转台转动仿真实验。

仿真中共进行了2500组二维转台转动实验,其中方位轴转动角 θ_h 变化范围为 $[-\pi, \pi]$,俯仰轴转动角 θ_v 变化范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$,仿真中转动时间均设为30秒。仿真中平台与转台参数选取如下:卫星平台三轴主轴惯量为 $I_{px} = I_{py} = I_{pz} = 4000 \text{kg}\cdot\text{m}^2$,二维转台对方位轴转动惯量为 $2.5 \text{kg}\cdot\text{m}^2$,二维转台对俯仰轴转动惯量为 $1.5 \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

仿真结果如图5、6所示。

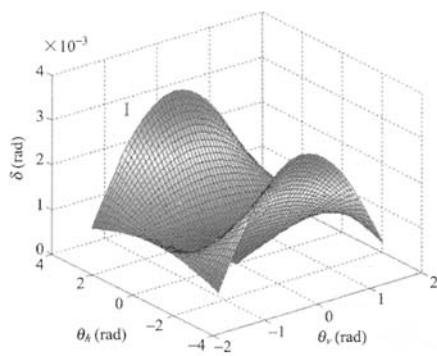


图5 转角对天线指向偏差的影响

Fig.5 Impacts of rotation angle on antenna pointing error

分析可知:

(1) 随瞄准角 θ_h 、 θ_v 的改变,耦合运动引起的瞄准偏差角 δ 呈中心对称趋势,因此两轴瞄准角幅度 $\|\theta_h\|$ 、 $\|\theta_v\|$ 分别相等的瞄准过程产生的瞄准

偏差相同,而与旋转方向无关;

(2) 当方位瞄准角幅度 $\|\theta_h\|$ 小1rad时,瞄准偏差 δ 随俯仰轴瞄准角幅度 $\|\theta_v\|$ 的增加而增加,变化趋势随 $\|\theta_h\|$ 的增加趋于平缓;当 $\|\theta_h\|$ 大于1rad时, δ 随 $\|\theta_v\|$ 的变化趋势逐渐变为 δ 随 $\|\theta_h\|$ 的增加而减小,且随 $\|\theta_h\|$ 的增加变化趋势趋于剧烈;

(3) 瞄准偏差角 δ 随方位轴瞄准角幅度 $\|\theta_h\|$ 的增加而逐渐增加,变化趋势随俯仰轴瞄准角幅度的增加而逐渐趋于缓慢;

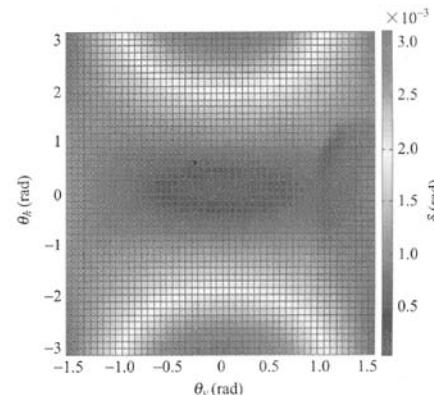


图6 转角对天线指向偏差的影响俯视图

Fig.6 Impacts of rotation angle on antenna pointing error (top view)

(4) 瞄准偏差最大值 δ_{\max} 为3.14mrad,出现在 θ_h 、 θ_v 分别为 $(2\pi, 0)$ 、 $(-\pi, 0)$ 两点。

图7为二维转台以不同转动时间进行转动时下,耦合运动对天线指向偏差影响仿真结果。

由图7可知,转动时间不影响天线指向偏差随转动角的变化趋势,最大值仍然出现在 θ_h 、 θ_v 分别为 $(\pi, 0)$ 、 $(-\pi, 0)$ 的两点。图8为天线指向偏差最大值 δ_{\max} 随转动时间的变化曲线。

仿真结果表明,随转动时间的增加,耦合运动导致的天线指向偏差略有增大,当转动时间由10s增加到1000s时增幅仅为1%。

5 结论

在星间激光链路建立与保持中,卫星光通信终端以二维转台作为粗瞄机构,完成天线指向控制。二维转台可以看作卫星平台上一个受控的动量装

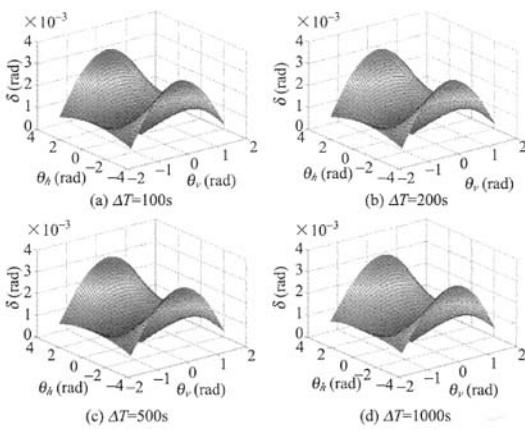
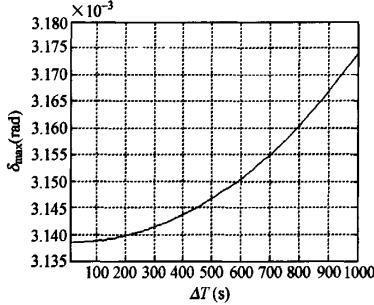


图 7 耦合运动中转动时间对瞄准偏差的影响

Fig.7 Impacts of rotation time on antenna pointing error

图 8 耦合运动中 ΔT 对 δ_{max} 的影响Fig.8 Relation between ΔT and δ_{max}

置,与卫星平台间存在运动耦合。通过理论分析可知,耦合动力学环境是影响终端天线指向偏差的重要原因。

本文由卫星姿态动力学出发,建立了终端与平台运动耦合的动力学模型,并针对耦合运动引起终端天线指向偏差进行了深入分析,得到了二维转台运动参数对天线指向偏差的影响规律,理论分析和数值仿真结果表明:

(1) 二维转台的转动将引起卫星平台姿态发生改变,进而导致终端天线对空间指向的改变,产生天线指向偏差;

(2) 在终端与卫星平台耦合动力学环境下,二维转台的转角是影响天线指向偏差的重要因素,光

束指向偏差随方位轴、俯仰轴转角的改变成规律性变化;当方位轴、俯仰轴转角 θ_h 、 θ_v 分别为 $(\pi, 0)$ 、 $(-\pi, 0)$ 时,天线指向偏差出现最大值;

(3) 随二维转台转动时间的增加,耦合运动产生的天线指向偏差略有增加,转动时间由 10s 增加到 1000s 时增幅仅约为 1%。

本文研究结果为优化卫星光通信终端粗瞄机构控制策略,补偿耦合运动影响,提高卫星光通信系统星上应用的稳定性打下基础。

参考文献:

- [1] Karafolas N, Baroni S. Optical satellite networks[J]. Journal of Light-wave Technology, 2000, 18(12): 1792 - 1806
- [2] Chan V W S. Optical space communications[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2002, 6(6): 959 - 975
- [3] Morio Toyoshima. Optimum intersatellite link design in the presence of random pointing jitter for free-space laser communication system[C]. Proceedings of SPIE, 2002, 4635: 95 - 102
- [4] 于思源,高惠德,王立松.卫星光通信复合轴跟踪控制方法研究[J].激光技术,2002,26(2):114 - 116 [YU Si-yuan, GAO Hui-de, WANG Li-song. Study of the multiple axes pointing control method in intersatellites optical communications[J]. Laser Technology, 2000, 26(2):114 - 116 (in Chinese)]
- [5] 韩琦琦,马晶,于思源,谭立英,王骥.耦合运动对星间激光链路瞄准过程影响及补偿方法研究[J].宇航学报,2006,(4):582 - 587 [HAN Qi-qi, MA Jing, YU Si-yuan, TAN Li-ying, WANG Qi. Influence analysis of coupled motions on pointing progress of intersatellite optical communication[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(3): 76 - 81 (in Chinese)]
- [6] 韩琦琦,马晶,于思源,谭立英,王骥.卫星光通信中耦合运动对光信号跟踪影响分析[J].宇航学报,2005,(4):405 - 409 [HAN Qi-qi, MA Jing, YU Si-yuan, TAN Li-ying, WANG Qi. Impact analysis of coupled motions of the optical communication terminal and the satellite platform on optical tracking progress[J]. Journal of Astronautics, 2005, (4):405 - 409 (in Chinese)]



作者简介:刘剑峰(1975 -),男,博士,讲师,
研究方向卫星光通信。

通信地址:哈尔滨工业大学科学园 2A 栋

212 室(150001)

电话:(0451)86402866

E-mail:jfliu1@163.com

Research on the Influence of the Motion Parameters of the Satellite Optical Communication Terminal's Gimbals on Antenna Pointing Error

LIU Jian-feng, HAN Qi-qi, YU Si-yuan, MA Jing, TAN Li-ying

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

Abstract: The coupled motion between the gimbals of the optical terminal and satellite platform is the key factor to influence the antenna pointing control process of the satellite optical communication (SOC) terminal. In this paper, based on the satellite attitude dynamics, we studied the antenna pointing error induced by the coupled motions under different parameters of the gimbals motion. The analysis results indicated the antenna pointing error change regularly with increase of the rotation angle of the gimbals, and reach the max value when the azimuth angle and elevation angle are $(\pi, 0)$ and $(-\pi, 0)$ separately. With increase of the rotation time, the pointing error increase slowly. The amplification of the pointing error is only 1% with the rotation time change from 10s to 1000s. The results of this paper are the basis of the antenna pointing error compensation research and will improve the stability of the SOC system applied on the satellite platform.

Key words: Satellite optical communication; Satellite attitude dynamics; Coupled motion; Antenna pointing control

· (上接第 859 页)

Test Method for Error Model Coefficients of Pendulous Integrating Gyro Accelerometer on Centrifuge

QIAO Yong-hui, LIU Yu, SU Bao-ku, ZENG Ming

(Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The paper presented a calibrating method for error model coefficients of PIGA (pendulous integrating gyro accelerometer) using precision centrifuge with counter-rotating platform, expounded its testing principle and pointed out that it could improve the environmental condition of PIGA test on centrifuge. The test scheme and identification method were given which solved the problem of rotation-related influence caused by centrifuge large arm when implementing high g testing. A data processing method for separating and accurately calibrating error model coefficients were presented, and the problem of sinusoidal inputs caused by counter-rotating platform was solved.

Key words: PIGA; Centrifuge; Counter-rotating platform; Error model coefficients; Test

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>