

光学稳像技术在空间通信及航空、 航天中应用的探讨

周庆才 王志坚 王春艳

(长春理工大学 长春 130022)

摘 要

论述了光学稳像的一般概念,并给出了分析稳像问题的普遍公式,解决了空间通信及航空、航天相机的稳瞄及图像稳定问题.实际算例表明,光学稳像技术可普遍应用到空间技术中,可为稳像光学系统的设计提供重要的理论基础.

关键词 光学稳像; 空间通信; 图像稳定

1 引言

航空、航天相机中图像稳定问题是目前国际上光学工作者关注的科研课题.由于航空航天相机装载在运动载体上,载体的运动和随机震荡影响相机的光学性能.如用焦距为1000 mm的照相物镜在卫星上对地面拍摄,曝光时间为1/100 s,不可能得到分辨率高于25线/毫米的照片,尽管其静态分辨率高达100线/毫米.又如对于卫星间通信,激光发射系统的光束发散角应小于20 mrad,但载体的随机震荡会使光束的偏转角度大于此值,导致通信中断.故而稳像及光束的稳定问题是当前急需解决的问题.

2 光学稳像的基本概念

1. 光学稳像

光学稳像指像(光束)相对于固定坐标稳定.

①绝对稳像: 像(光束)相对于大地坐标稳定.

②相对稳像: 像(光束)相对于像面坐标稳定.

2. 光学稳像的方式

①整体稳定: 惯性元件(陀螺)稳定整个光学系统.

②局部稳定: 惯性元件(陀螺)稳定系统中某一元件.

3. 稳像的方法

①基准式: 陀螺直接稳定光学系统或某一元件,使之不随载体运动.

2003-03-27 收到原稿, 2003-09-25 收到修定稿

②随动式: 陀螺感知载体的运动, 将信号传输给随动系统, 控制光学系统或某一元件运动, 使像(光束)相对于大地坐标或像面坐标稳定. 相当于电学中的负反馈系统, 又称为补偿式.

3 动态物、像共轭关系式

(1) 动态下物点不动时物、像共轭关系式^{[1]-[5]}

$$\mathbf{A}'_m = \mathbf{O}' - \mathbf{SRS}^{-1}\mathbf{O} + \mathbf{SRS}^{-1}\mathbf{A}. \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}'_m$ 为光学系统运动后像点坐标矢量; $\mathbf{O}$ 为物坐标 $Oxyz$ 原点 O 运动矢量; $\mathbf{O}'$ 表示像坐标 $O'x'y'z'$ 原点 O' 运动矢量; $\mathbf{R}$ 为光学系统的作用矩阵; $\mathbf{S}$ 为光学系统绕空间任意轴旋转的旋转矩阵, $\mathbf{S}^{-1}$ 为 $\mathbf{S}$ 的逆矩阵; $\mathbf{A}$ 为物点坐标矢量.

上面所有矢量均在静态像坐标 $O'x'y'z'$ 内标定. 式中 $\mathbf{O}' - \mathbf{SRS}^{-1}\mathbf{O}$ 称为原点项, 反映动态物、像位置共轭关系; $\mathbf{SRS}^{-1}\mathbf{A}$ 称为旋变项, 反映动态物、像方向共轭关系.

(2) 动态下物点运动时物、像共轭关系式

$$\mathbf{A}'_m = \mathbf{O}' - \mathbf{SRS}^{-1}\mathbf{O} + \mathbf{SRS}^{-1}(\mathbf{A} + \Delta\mathbf{A}). \quad (2)$$

式中 $\Delta\mathbf{A}$ 表示物点运动的矢量.

4 用于卫星间通信的激光稳瞄光学系统

自从 1981 年美国白沙导弹靶场进行了飞机与地面间激光通信系统的实验后, 世界先进国家如美国、欧洲空间局及日本等均开展了空间通信研究, 现已将其扩展到卫星间通信. 为了在长距离卫星间通信, 激光发射系统的光发散角要很小, 一般在微弧度以下, 由于卫星的随机振动会使激光光束偏转, 故而应采用光学稳像系统. 由于是稳定激光束, 故称稳瞄系统. 下面分别讨论基准式和随动式稳瞄光学系统.

(1) 基准式

由公式 (1) 得出物体在无限远时, 透镜的等效节点 J_0 和像方节点 H' 重合, 透镜随载体运动时, 等效节点的运动即是像点的运动. 在激光发射系统物镜后放置一个光学元件, 用陀螺稳定此元件. 若经此元件后像点的位移等于接收器件的位移, 则可做到相对稳像, 由此得出如下稳像方程:

$$\mathbf{RJ} - \mathbf{O}' = 0. \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -J_{z'} & J_{y'} \\ J_{z'} & 0 & -J_{x'} \\ -J_{y'} & J_{x'} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{O}' = \begin{bmatrix} 0 & -O'_{z'} & O'_{y'} \\ O'_{z'} & 0 & -O'_{x'} \\ O'_{y'} & O'_{x'} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{x'} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{y'} \end{bmatrix}.$$

式中, $J_{x'}$, $J_{y'}$, $J_{z'}$ 分别表示物镜等效节点在以陀螺转点 G 为原点建立起的直角坐标系 $Gx'y'z'$ 上 3 个轴的投影; $O'_{x'}$, $O'_{y'}$, $O'_{z'}$ 分别表示像点 O' 在 $Gx'y'z'$ 上 3 个轴的投影; α 为被稳定光学元件的沿轴放大率; $\beta_{x'} = \beta_{y'} = \beta$ 为被稳定光学元件的垂轴放大率.

下面以一实例予以说明.

图 1 为一个稳瞄激光发射系统的光路图, 图中平面反射镜位于物镜的 $1/2$ 焦距处, 用陀螺稳定. 在物镜的等效节点处放置激光器. 物镜等效节点 J 和像点 O' 重合, 它们到陀螺转点 G 距离为 l .

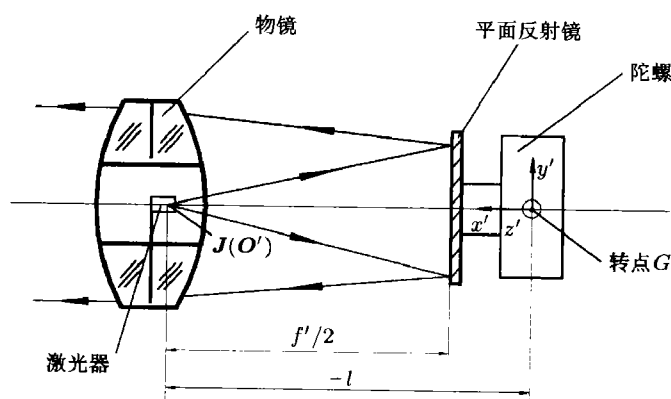


图 1 稳瞄激光发射系统光路图

Fig.1 Illustration of steady taking aim laser emission system

显然,

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$O'_{y'} = J_{y'} = O'_{z'} = J_{z'} = 0, \quad O'_{x'} = J_{x'} = -l.$$

代入稳像方程 (3) 有

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l \\ 0 & -l & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l \\ 0 & -l & 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

可知满足要求, 说明此光学系统发出的激光光束是稳定的, 不随负载的振动改变方向.

(2) 随动式

随动式一般采用局部稳定方式, 多采用平面反射镜随动方式. 为此应了解平面反射镜的动态成像特性, 由国家标准 GB 7660—87 可知, 当平面反射镜和光轴成 45° 放置时, 其特征方向 T , 像偏转极值轴向 u, v, ω 关系如图 2 所示.

当平面反射镜绕 ω 轴旋转 α 角时, 可使光轴高低方向旋转 2α 角; 绕 v 轴旋转 β 角时, 光轴绕水平方向旋转 2β 角.

由惯性元件感知载体的水平、高低转角后, 便可控制平面反射镜的反向转动, 达到稳定光束的目的。

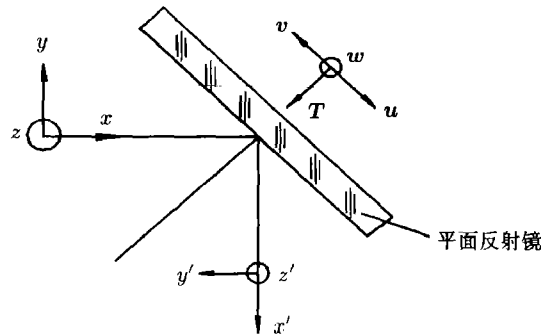


图 2 平面反射镜的偏转极值轴向

Fig.2 The direction of deflexion extremum axis of plane reflector

下面以一实例予以说明。

图 3 为带有卡塞格林系统的激光发射系统, 由二维振镜随动实现光束的稳定。二维振镜位于由卡氏系统和透镜 1 组成的望远系统中, 此望远系统的视放大率为 Γ 。设由惯性元件感知载体的高低转角为 $\Delta\alpha$, 则随动系统使二维振镜反向绕 ω 轴转 $\frac{1}{2\Gamma}\Delta\alpha$ 角; 载体水平转角为 $\Delta\beta$, 则二维振镜反向转 $\frac{1}{2\Gamma}\Delta\beta$ 。从而保证出射光束的稳定。

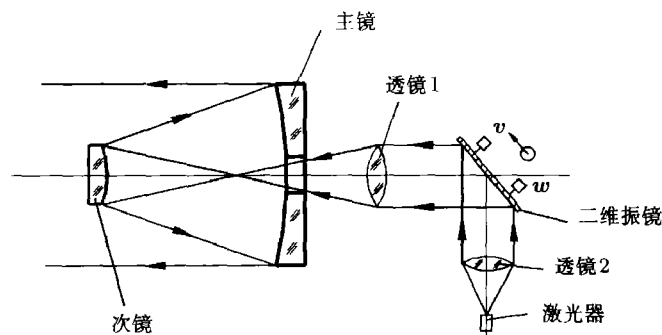


图 3 卡塞格林激光发射系统

Fig.3 The laser emission system of Cassegrain

5 稳像航空和航天相机

(1) 航空相机稳像光学系统

航空相机可以认为地面物体是不动的, 即不考虑地球的自转。由公式 (1) 表达动态下物像共轭关系, 按公式 (3) 求解稳像光学系统结构。下面以美国专利 (Willam E. Humphery, U.S. Pat. 3608995 和 Pat. 3608996) 提供的稳像光学系统说明其满足稳像方程 (3)。专利提供的光学系统如图 4 所示, 图中反射镜组由 4 块平面反射镜如图放置组成, 为陀螺稳

定. 平行光束经透镜 1 和反射镜组成的像 O'_1 和透镜 1 等效节点 J_1 重合; 透镜 2 的等效节点 J_2 与平行光束经透镜 1 成的像点重合; 陀螺的转点 G 位于连线的垂线上.

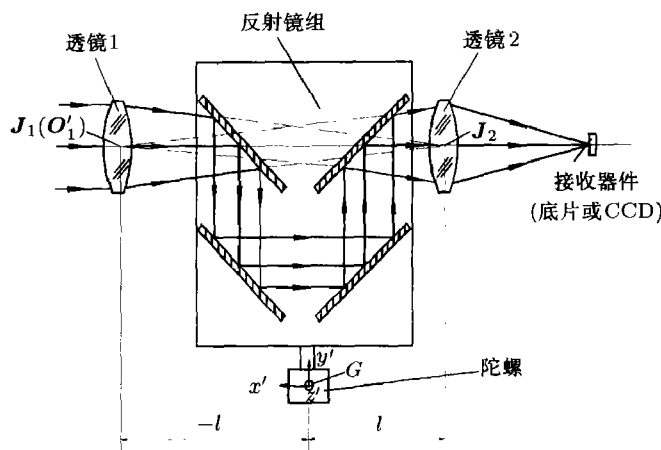


图 4 航空相机的稳像光学系统

Fig.4 The image stabilization optical system of the aerospace camera

则它们在 $Gx'y'z'$ 的坐标有

$$\begin{bmatrix} O'_{1x'} \\ O_{1y'} \\ O'_{1z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1x'} \\ J_{1y'} \\ J_{1z'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_{2x'} \\ J_{2y'} \\ J_{2z'} \end{bmatrix}.$$

反射棱镜组的作用矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

由稳像方程 (3) 得 J_1 和 O'_1 是相对稳定的. 又由 $O'_{1x'} = J_{1x'} = -J_{2x'}$, 可得 $O'_{1x'}(J_{1x'})$ 的位移量和 J_2 的位移量大小相等, 方向相反, 这就保证 $O'_{1x'}(J_{1x'})$ 在载体运动时, 像点始终位于接收器件的中心上 (即和接收器件同步运动), 实现了相对稳像 (像和接收器件没有相对运动).

(2) 航天相机稳像光学系统

航天相机应考虑地球的自转. 动态下物、像共轭关系用 (2) 式表示. 拍摄照片时, 底片应相对底片框运动 (像移补偿), 以保证像和接收器件 (底片) 相对稳定. 由 (2) 式可得出像移补偿公式为^[6]

$$\Delta \mathbf{A}' = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{R} \left\{ [\mathbf{T}_{y_i, \omega t} - \mathbf{T}_{y_e, \Omega}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ r + h \end{bmatrix} + [\mathbf{E} - \mathbf{S}] \begin{bmatrix} A_{x'} \\ A_{y'} \\ -(H - h) \end{bmatrix} \right\}. \quad (4)$$

式中, $\Delta \mathbf{A}'$ 为底片相对底片框的位移矢量; $\mathbf{S}$ 为航天相机的旋转矩阵, $\mathbf{S}^{-1}$ 为 $\mathbf{S}$ 的逆矩阵; $\mathbf{R}$ 表示航天相机的作用矩阵; $\mathbf{T}_{y_i, \omega t}$ 表示地球自转的旋转矩阵; $\mathbf{T}_{y_e, \Omega}$ 表示卫星

绕轨道轴旋转的旋转矩阵; E 表示单位矩阵; $A_{x'}$ 表示物矢量在 $O'x'y'z'$ 内 x' 轴上的投影; $A_{y'}$ 为物矢量在 $O'x'y'z'$ 内 y' 轴上的投影; r 为地球半径; h 为地面物体高度; H 为卫星高度.

6 结束语

由光学稳像理论, 可以导出稳像矩阵和稳像方程. 按稳像方程可以解出稳像光学系统, 由于其是多解的, 故可根据实际情况跟踪美国等国家专利, 发现它们都是稳像方程的特解, 如图 4 所示的稳像光学系统. 由稳像矩阵可分析稳像偏差. 故稳像方程和稳像矩阵的给出, 为设计光学稳像系统提供了重要的理论基础.

参 考 文 献

- [1] Zheng Jianping, Wang Peng, Wang Zhijian. Board optical stabilitying image. *SPIE*, 1994, **2 321**:532—537
- [2] Wang Zhijian, Zheng Jianping. The object-image conjugate theory of optical systems and optical elements in motion. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):1—13. in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学系统及元件动态下物像共轭理论. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2):1—13)
- [3] Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilization and generalized optical image-stabilization. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):29—37. in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学稳像、广义光学稳像. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2):29—37)
- [4] Wang Zhijian, Zheng Jianping. Optical image-stabilizing system. *J. Changchun Ins. Opt. Fine Mech.*, 1992, **15**(2):38—51. in Chinese (王志坚, 郑建平. 光学稳像系统. 长春光学精密机械学院学报, 1992, **15**(2):38—51)
- [5] Wang Zhijian. Application of prism moving theory in optical image-stabilization. *Acta Armamentarii*, 1988, (4):20—26. in Chinese (王志坚. 棱镜转动定理在光学稳像中的应用. 兵工学报, 1988, (4):20—26)
- [6] Zhou Qingcai, Wang Zhijian. Calculating image motion of aerospace camera based on dynamic object-image conjugate relation. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(1):74—79. in Chinese (周庆才, 王志坚. 应用动态物像矢量共轭关系计算航天相机像移. 空间科学学报, 2003, **23**(1):74—79)

THE DISCUSS OF APPLICATION ABOUT THE TECHNOLOGY OF OPTICAL IMAGE-STABILIZATION IN SPACE COMMUNICATION OR IN AERIAL AND AEROSPACE CAMERAL

ZHOU Qingcai WANG Zhijian WANG Chunyan

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

Abstract

This text discusses the common theory of optical image stabilization, and gives the common formula of analyzing image stabilization. Besides that this text resolve the problem of space communication, steady aiming of space flight camera and the image stabilization. A practical example indicates that the technical of optical image-stabilization is very good when using in space technology, which provide the important base of the design on optical image-stabilization system.

Key words Optical image-stabilization, Space communication, Aerial, Aero-space cameral, Image stabilization

第十届全国日地空间物理学术讨论会召开

第十届全国日地空间物理学术讨论会于 2003 年 10 月 17 日至 22 日在上海双拥大厦召开, 参加本次大会的代表来自全国 23 个单位, 共 176 人, 宣读论文 170 篇, 均超过历届代表人数和论文篇数. 本次大会是空间物理学术交流的空前盛会.

本次大会设一个主会场, 四个分会场. 主会场举行开幕式、闭幕式和大会特邀综合性报告 (6 篇). 四个分会场分别为: 日球层、磁层、等离子体物理组分会场; 双星 -Cluster 科学专题研讨会分会场; 电离层物理组分会场; 空间天气、空间环境中高层大气物理组分会场.

本次大会期间进行的专题研讨内容: 双星 -Cluster 科学专题研讨, 电离层地域特性重点课题专题研讨, 极区高空大气物理专题研讨, 空间天气系列卫星方案建议专题研讨.

双星计划是我国正在执行中的一项重大空间探测研究计划, 首席科学家刘振兴院士报告了发射计划和要开展的研究内容, 与欧洲的 Cluster 星簇计划合作, 将第一次实现对空间环境的六点同时观测, 在围绕这一计划开展的专题讨论中, 代表们就地球空间暴的机制, 双星资料的分析, 亚暴的触发及活动时间序列, 星簇立体探测对磁层磁场的几何结构分析发表了系列的学术成果和新见解; 关于太阳大气中的剧烈扰动过程及其空间环境和地球物理效应方面, 对日球子午面内太阳风的二维数值模拟, 太阳风质子热各向异性, 行星际磁云, 行星际激波在日球空间中的传播及其相互作用, 外日球层中的太阳风行为等宣读了高水平的论文; 在电离层和中高层大气物理领域, 代表们围绕偶发 E 层, 中层和低热层中的风

(下转第 73 页)

- [2] Teunissen P J G. A new method for fast carrier phase ambiguity estimation. Proc. IEEE Position, Location, Navigation Symp. PLANS'94, Las Vegas, 1994, 562—573
- [3] Sutton Eric. Integer cycle ambiguity resolution under conditions of low satellite visibility. Proc. IEEE Position, Location, Navigation Symp., Palm Springs, California, 2002, 91—98
- [4] Peng H M, Chang F R, Wang L S. Rotation method for direction finding via GPS carrier phases. *IEEE*, 2000, **36**(1):72—84

RESEARCH OF FAST ORIENTATION DETERMINATION WITH HIGH PRECISION BY TWIN-STAR SYSTEM

LU Liangqing WU Meiping HU Xiaoping

(College of Mechatronics and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract

This paper has developed an approach of rotating the baseline to solve the key technical problem lying in the process of orientation determination by Beidou satellites' carrier phase—identification of the original phase integer ambiguity, and the simulation result shows that the azimuth determination precision of 0.01° by a 2-meter-long baseline during 5 minutes can be achieved when the non-difference phase measurement precision is better than 2 percent of a cycle.

Key words Twin-star system, Carrier phase, Integer ambiguity

(上接第 80 页)

和潮汐、重力波等的季节变化特征,我国的高能粒子测量,吸收分析, GPS 对电子总含量和闪烁及掩星观测,高频多普勒和中频雷达观测等,从多角度讨论了电离层地区特别是东亚和我国地区的特征,还介绍了当前国际上行星环境研究热点之一的火星电离层探测计划和研究内容,并对太阳质子事件,太阳黑子,地磁暴预报等新方法进行了探讨;我国的极区高空物理观测近年来有很大发展,南极中山站处于地磁极隙区,并与北欧在挪威附近的观测形成共轭,极区观测的专题讨论围绕极光、宇宙噪声,极低频波,地磁共轭特性,极区非相干散射雷达观测等发表了多篇论文;会议结合我国制订 2020 年科技发展中长期规划,组织了对我国空间天气研究卫星探测计划的建议的专题讨论,代表们提出了双星之后的多点卫星观测, L1 点和地球极轨太阳及地球空间监测卫星,合成孔径雷达的太阳监测,以及多种观测仪器建议。上述学术内容均为当前空间物理学,空间天气和空间环境科学方面国际关注的前沿,具有相当高的学术水平,充分反映了近年来我国空间物理研究的主要成果。

本次大会成立了由科学家组成的学术委员会,该委员会审议大会的组织准备工作和大会各项议程,并负责评审出本次大会青年优秀论文奖的获奖者(14 人),颁发了青年优秀论文奖的获奖证书。

本次大会得到了中国科学院空间科学与应用研究中心,中国极地研究中心,各专题研讨会承办者的大力支持,在此表示感谢!