

⑤

消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转系统的研究及应用

张 铮 龚惠兴

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TP731

摘要 研制了在宽波段范围内采用“K镜”来消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转的系统, 并进行了理论上的推导和海洋卫星水色扫描仪的实际应用, 证明该系统能很好地消除 45° 旋转扫描反射镜产生的像旋转, 从而提出 45° 旋转扫描反射镜加“K镜”消像旋转的新扫描方式。

关键词 45° 旋转扫描反射镜, “K镜”, 像旋转。

空间扫描仪 遥感

引言

45° 旋转扫描反射镜扫描模式是一种最常用的光机扫描模式, 由于它优点独特, 所以在空间扫描仪器上有重要的广泛的应用。但是它的反射会产生旋转, 如果直接应用将造成轴外视场的无法配准, 所以线列和面阵探测器将无法使用与 45° 旋转扫描反射镜这一扫描模式配合使用。虽然道威棱镜可以有效地消除 45° 旋转扫描反射镜产生的像旋转, 但只能用于可见光到近红外波段, 对于遥感仪器中宽波段范围, 特别是对中、远红外波段的要求不能满足, 因此在使用时有相当的局限性。当今遥感仪器的探测器经常需要采用多元线列阵探测器, 这将无法采用 45° 旋转扫描反射镜的方案, 而其它的扫描方式都有一定的局限性, 为此, 我们研究 45° 旋转扫描反射镜的特性和像旋转的规律以便在宽波段范围内消除像旋转, 使 45° 旋转扫描反射镜能应用于各种要求的遥感扫描仪器。

1 消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转的目的

消除 45° 旋转扫描反射镜的像旋转对空间扫描仪器是非常重要的, 它具有许多不可替代的优点:

- (1) 仪器的扫描范围大, 对于航天遥感器可以包含整个地球目标;
- (2) 在扫描目标范围外可插入定标源, 有利于飞行中定标;
- (3) 扫描镜的尺寸比较小, 有利于空间仪器减小外形尺寸;
- (4) 45° 旋转扫描反射镜稳定性比较好, 且比较容易控制。

但是, 当 45° 旋转扫描反射镜在旋转时会产生像旋转的现像, 如果直接应用将造成视场的无法配准, 所以 45° 旋转扫描反射镜这一扫描模式无法与线列和面阵探测器配合使用, 它只能应用在单元探测器的仪器上, 这样系统的探测灵敏度将无法通过采用多元探测器来提

稿件收到日期 1998-03-09, 修改稿收到日期 1998-05-15

高,如果采用线列阵和面阵探测器时就大多只能采用摆镜,但摆镜的椭圆长轴很长,所以扫描镜的尺寸就会增大,从而整个仪器的高度和长度也相应增大,而且大的扫描镜的稳定性和易控制度不如 45° 旋转扫描反射镜,另外不易加工,同时还给引入定标源带来困难.除了这个方案外还通过以下的方法来消除 45° 旋转扫描反射镜的像旋转.

1.1 导流环消像旋

像元旋转的原因是因为当 45° 旋转扫描反射镜旋转扫描时物体的像随之转动,而探测器像元没有同步跟踪转动,所以像点在探测器焦面上相对产生了旋转.解决的办法之一就是探测器跟踪 45° 旋转扫描反射镜的像同步旋转(见图1).

如果像旋转补偿镜与 45° 扫描镜平行,且和装探测器及电路的导流环同向,并以同样的转速严格保证同步地转动,就能保证在任何时刻使系统的像在焦平面中的方向始终不变,所以可以系统消除像旋转.但是后光学系统及探测器(红外探测器还需有制冷系统)一起转动,这给机械设计带来极大难度,仪器的转动惯量相当大,而且导流环还会产生电磁干扰.如果在卫星上采用辐射致冷器制冷红外探测器,辐射致冷器却不能跟着一起旋转,这些致命弱点使这一方案很难在卫星上使用,就是在地面上使用也十分不便.

1.2 道威棱镜消像旋

在周视仪的光学系统中道威棱镜和 45° 扫描镜配合,当道威棱镜和 45° 扫描镜绕同一轴作同向转动,且转角始终保持为 45° 扫描镜转角的一半时,系统的像不发生旋转(见图2).这是一种很好的消除 45° 扫描镜像旋转的方法,但是选择一种棱镜材料覆盖从可见光波段到热红外波段是困难的.扫描仪器大多需要包括从可见光到红外波段的探测通道,所以这个方法在使用范围上有很大的局限性.

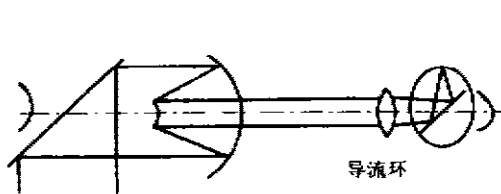


图1 导流环消旋示意图
Fig. 1 Diagram of current-ring
for offsetting rotation

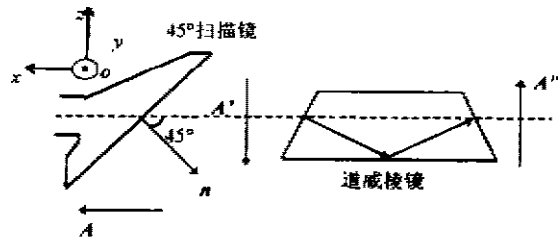


图2 道威棱镜消除像转示意图
Fig. 2 Diagram of DW prism
for offsetting rotation

从上面的分析可以看出,采用 45° 旋转扫描反射镜是许多扫描仪器的首选扫描方式,但面对其固有的像旋转都不能在宽波段范围内消除,所以迫切需要在宽波段范围内消除 45° 旋转扫描反射镜引起的像旋转,此项研究极有意义.

2 消除 45° 旋转扫描反射镜的像旋转的原理和方法

要消除 45° 旋转扫描反射镜的像旋转,首先要找到 45° 旋转扫描反射镜产生像旋转的原

因, 并采用相应的措施来解决.

2-1 45° 旋转扫描反射镜的像旋转的原因

通过推导研究当 45° 旋转扫描反射镜旋转时, 45° 旋转扫描反射镜反射像的运动规律, 找出 45° 旋转扫描反射镜产生的原因.

图 3 为 45° 旋转扫描反射镜扫描几何示意图, 建立直角坐标系 $oxyz$, 扫描反射镜的旋转轴和平台的飞行方向重合为 x 轴, y 轴指向纸外, z 轴向上. 45° 旋转扫描反射镜的表面法线 n 和系统光轴成 45° 夹角.

45° 扫描镜的法线为 n , 水平面入射光线的向量为 A , 则反射光线的向量为 A' :

$$A' = A - 2n(A \cdot n) \quad (1)$$

45° 旋转扫描反射镜法线 n 的三个坐标分量分别为 $N_x = -\cos 45^\circ$; $N_y = 0$; $N_z = -\sin 45^\circ$, 则得到 45° 扫描反射镜的反射矩阵 $R(A)$ 为:

$$R(A) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

任意角转动公式为

$$B' = B \cos \theta + (1 - \cos \theta)(B \cdot P)P - \sin \theta(B \times P), \quad (3)$$

式(3)中矢量 B 绕转轴单位向量 P 转动一大角度 θ 而成为矢量 B' (见图 4 所示).

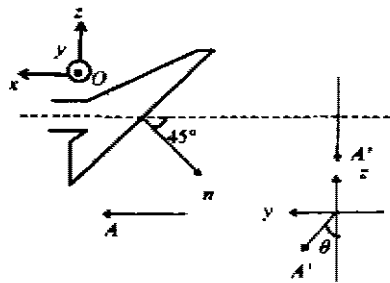


图 3 45° 旋转反射镜扫描几何示意图
Fig. 3 Geographic diagram of 45° rotating scan mirror

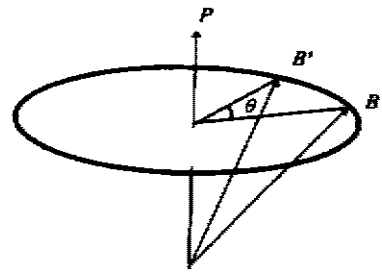


图 4 矢量旋转 θ 角示意图
Fig. 4 Diagram of vector rotating by angle θ

当 P 与 X 轴重合时, P 即为 i 矢量, 矢量 P 的三个坐标分量为 $P_x = 1$; $P_y = 0$; $P_z = 0$, 绕 x 轴旋转的转动矩阵 $S_{i,\theta}$ 为

$$S_{i,\theta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}; \quad (4)$$

设与固定系统相联结的为定坐标系 $oxyz$, 而与 45° 旋转扫描反射镜系统固定联结而一起转动的为动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$, 并且规定在 45° 旋转扫描反射镜系统未转动时动坐标 $x_1y_1z_1$ 的起始方向和定坐标 xyz 的方向对应一致.

设平面镜系统 x 轴转动了 θ 角, 入射光线入射矢量为 A , A' 为平面镜系统转动后的出射矢量, G_{10} 和 G_{01} 分别代表由动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 向定坐标系 $oxyz$ 坐标转换矩阵, 则 $G_{01} = G_{10}^{-1}$. 而由动坐标系向定坐标系的坐标转换矩阵 G_{10} 等于绕 x 轴转动了 θ 角的转动矩阵 $S_{1,\theta}$, 即

$$G_{10} = S_{1,\theta} \quad (5)$$

将入射光线的入射矢量 A 在定坐标系 $oxyz$ 中的坐标转换到动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 中, 设 A_1 为入射矢量 A 在动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 中的分量, A_0 为入射矢量 A 在定坐标系 $oxyz$ 中的分量, 即

$$A_1 = G_{01}A_0 = G_{10}^{-1}A_0 \quad (6)$$

据平面镜系统物、像共轭关系, 求得出射矢量 A' 在动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 中的分量 A'_1

$$A'_1 = R(A)_1, \quad (7)$$

其中 $R(A)_1$ 为平面镜系统的作用矩阵. 将出射矢量 A' 再转换到定坐标系中, 设 A'_0 为出射矢量 A' 在定坐标系 $oxyz$ 中的分量:

$$A'_0 = G_{10}A'_1, \quad (8)$$

综合式(6)~(8)得

$$A'_0 = G_{10}RG_{10}^{-1}A_0, \quad (9)$$

将式(2),(4),(5)代入式(9), 其中入射光线的入射矢量 A 设为

$$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

在定坐标系中 A 即为 A_0 , 而由式(4),(5)得

$$G_{10} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, \quad G_{10}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix},$$

将 G_{10} 和 G_{10}^{-1} 代入式(9)得出射矢量 A'_0 为

$$A'_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin\theta \\ -\cos\theta \end{pmatrix}, \quad (11)$$

而在定坐标系中 A' 即为 A'_0 , 所以 $A' = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin\theta \\ -\cos\theta \end{pmatrix}$, 即出射向量 A' 为与负 z 轴方向顺时针成 θ

角的矢量(见图5), 当 45° 扫描反射镜在 oyz 平面上绕 x 轴从 y 轴向 z 轴旋转 θ 角时, 反射的像也同时在 $oxyz$ 平面上 y 轴向 z 轴旋转 θ 角. 可见, 45° 旋转扫描反射镜反射像的旋转是由

其本身的光学反射特性所决定的,而且有一定的规律.

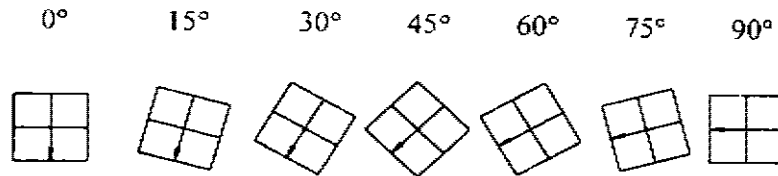


图 5 反射像旋转示意图

Fig. 5 Diagram of reflected image rotation

2.2 “K 镜”消除 45° 旋转扫描反射镜像旋转的原理和方法

我们设计了一个全波段反射系统,经过研究、设计和计算得到三反射面系统,当它的转角始终保持为 45° 扫描镜转角的一半时,像不旋转,达到消除像偏转的目的.因其三面反射镜呈“K”字排列故起名“K 镜”.

计算“K 镜”的反射特性矩阵 $R_{K\text{镜}}$. 假设“K 镜”中的三面反射镜的反射矩阵分别为 R_1, R_2, R_3 , 而

$$R_{K\text{镜}} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3. \quad (12)$$

三面反射镜的法线向量 n_1, n_2, n_3 分别为:

$$n_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ 0 \\ -\sin\alpha \end{bmatrix}, \quad n_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad n_3 = \begin{bmatrix} -\cos\alpha \\ 0 \\ -\sin\alpha \end{bmatrix},$$

得到 R_1, R_2, R_3 , 然后再代入式(12)计算得

$$R_{K\text{镜}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

取与固定系统相联结的为定坐标系 $oxyz$, 以及与“K 镜”系统固定联结而一起转动的为动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$, 并规定在“K 镜”系统未转动时坐标 $o_1x_1y_1z_1$ 的起始方向和定坐标 $oxyz$ 的方向对应一致.

设入射光线的入射矢量为 A , A' 为经 45° 旋转扫描反射镜系统转动后的出射矢量, A'' 为经“K 镜”系统后而成的像矢量. 45° 旋转扫描反射镜系统绕 x 轴转动了 θ 角, 根据 2.1 节论述 A 经平面镜的成像 A' 显然也绕 x 轴同步转动了 θ 角, 这个像 A' 亦就是“K 镜”系统的物矢量. 此时, 动坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 随“K 镜”一起绕 x 轴转动了 $\theta/2$ 角(见图 6).

由式(9)可求得 A' 经“K 镜”系统而成的像矢量 A'' , 在定坐标系中 A'' 为 A''_0 . 则:

$$A''_0 = G_{10} R_{K\text{镜}} G_{10}^{-1} A', \quad (14)$$

式(14)中 G_{10} 、 G_{10}^{-1} 可由式(4)求得, 由式(11) A' 和式(13) $R_{K镜}$ 代入式(14)得

$$A''_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \text{即 } A'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

由上式可见, A'' 始终为 z 轴正方向, 即系统最后的像不发生旋转, 所以消除了 45° 旋转扫描反射镜产生的像旋转。

综上所述, 当“K 镜”和 45° 旋转扫描反射镜旋转方向相同且速度为 45° 旋转扫描反射镜转速一半时, 物体在像面上的像不产生旋转, 整个系统是消像旋的。

2.3 “K 镜”的关键技术和解决方法

在理论上研究并设计出“K 镜”系统来消除 45° 旋转扫描反射镜产生的像旋转并在工程实际应用中解决以下几个关键技术:

(1) “K 镜”角度 α 的确定. α 的取值直接关系到“K 镜”的回转半径和“K 镜”的轴向长度以及光线的入射角, 而光线的入射角将影响系统的偏振度, “K 镜”的回转半径和“K 镜”的轴向长度的取值是相互制约的, 所以需要有一个折中的 α 值, 从而使整个“K 镜”的结构尺寸比较合理地确定下来. 我们经过计算并为了加工的方便将“K 镜”角度 α 定为 60° , 使得“K 镜”的回转半径和长度有一个较为合适的值, 使仪器不致于太长和太粗。

(2) “K 镜”加工精度的控制和装校. 为保证“K 镜”的成像质量, 我们解决了“K 镜”镜面以及顶角 β (如图 6 所示“K 镜”系统) 的加工质量问题, 这是十分重要而且关键的问题。

(3) “K 镜”的光轴和回转轴的严格重合, 它的重合度直接影响整个系统的消旋结果. “K 镜”出射光束的光轴平行偏离回转轴和系统光轴, 就会使到达后光学系统的光束的光轴平移, 但并不影响消除系统的像旋转, 而只是在焦面上的像点会围绕原有光轴旋转, 影响视场的配准度. 我们通过仔细的光校使“K 镜”的光轴和回转轴很好地重合, 并通过选择“K 镜”三棱体与反射平板之间间隔的变化。

(4) “K 镜”的光轴必须和整个系统的光轴重合. 通过系统的光校来调整使之重合度达到要求。

(5) 减小“K 镜”系统偏振度. 因为“K 镜”的反射面较多, 而且入射平面重合, 所以会产生一定的偏振. 我们通过设置“K 镜”的初始相对位置、镀制高反射率低偏振的银膜和减小光线入射角等一系列手段来减小整个系统的偏振度。

(6) “K 镜”系统的旋转必须和 45° 旋转扫描反射镜的旋转同时启动, 而且保持为 45° 旋转扫描反射镜转速的一半. 我们采用两台步进电机分别驱动“K 镜”和 45° 旋转扫描反射镜, 通过电流细分驱动、变频启动、预置复位等手段来确定准确的起始位置和精确的转速。

2.4 系统的误差分析

现将整个系统的误差进行一下分析. “K 镜”系统的误差主要来源于以下几个方面:

(1) “K 镜”三棱体与反射平板之间间隔的变化如图 7 所示。

“K 镜”三棱体与反射平板之间间隔在光校过程中已经准确地确定了. 误差只是来源于支架和“K 镜”反射基体的热胀冷缩, 而它引起的间距 y 变化只会使“K 镜”出射光束的光轴平行偏离回转轴和系统光轴, 其平行偏离量 y 等于间距的变化 y . 但是“K 镜”出射的光束到

达后光学系统光束的光轴平移并不影响消除系统的像旋转, 而只是焦面上的像点会围绕原有光轴旋转, 影响视场的配准度。

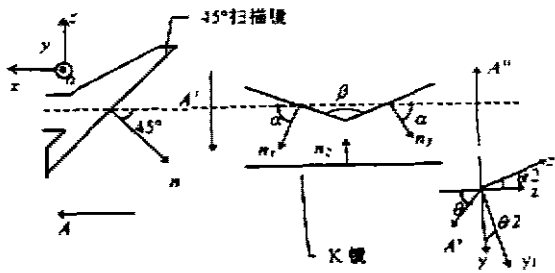


图 6 “K 镜”消除像旋转示意图
Fig. 6 Diagram of “K mirror” to offset image rotation

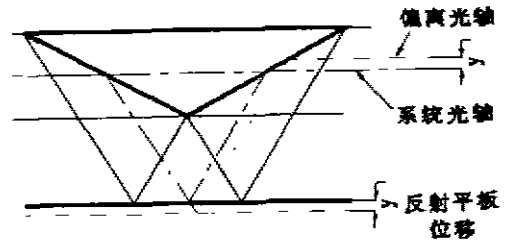


图 7 “K 镜”三棱体与反射平板之间间隔变化引起的光轴变化
Fig. 7 Optical axis change caused by the change of distance between “K mirror” body and the reflecting plate

(2) “K 镜”的光轴和整个系统的光轴重合度。

“K 镜”的光轴和整个系统的光轴重合度是影响视场配准的主要因素, 这需要在光学装校时得到解决。如果“K 镜”的光轴和整个系统的光轴不重合存在偏离, 那焦面上的像点会围绕原有光轴旋转, 影响视场的配准度, 但系统的像的方向不旋转。

(3) “K 镜”转速与 45° 扫描镜的转速的配合精度。

“K 镜”的转角是否能始终保持为 45° 扫描镜的转角的一半, 直接影响到消除像旋转的效果。这需要对电机的驱动提出合理的要求。



图 8 海洋多波段扫描仪拍摄的照片
Fig. 8 Photo taken by HY multiple-channel scanner

3 应用前景

在理论上, 采用 n 元探测器比采用单元探测器在理论上仪器的探测灵敏度要提高 \sqrt{n} 倍, 所以遥感仪器采用多元探测器是发展方向, 但是采用多元探测器就会遇到系统的光学成像不允许旋转的要求, 所以在以前的航空、航天的宽波段遥感仪器中不能采用 45° 旋转扫描反射镜作为扫描方式。

本文消像旋转系统的技术为国内首创,解决了困扰航空、航天界多年的 45° 旋转扫描反射镜产生像旋转而在宽光谱波段范围内无法消除的难题.为今后的航空、航天遥感仪器采用 45° 旋转扫描反射镜这一扫描方式开拓了广阔的前景.消除了过去一旦采用线列或面阵器件就不能采用 45° 旋转扫描反射镜作为扫描方式的顾虑,在许多以前想用而不能采用 45° 旋转扫描反射镜扫描方式的遥感仪器中均可采用此项技术.

最近我们在海洋卫星水色扫描仪上已首次采用此项技术,为其解决了诸如原先方案中的扫描范围小、无法在扫描目标范围外插入定标源来进行飞行中定标和扫描镜尺寸大等缺点,为该项目在总体方案先进性和可行性方面确立了优势,使得海洋卫星成为我国首次采用 45° 旋转扫描反射镜+“K镜”消像旋转系统+多元并扫的技术方案的遥感仪器.图8为采用了“K镜”消像旋转系统的海洋卫星水色扫描仪扫描所得的图片,由图8可见,该系统已经消除了 45° 旋转扫描反射镜产生的像旋转.

相信今后的扫描遥感仪器中将会有更多多元探测器加上 45° 旋转扫描反射镜扫描方式并辅助以“K镜”消像旋转系统的出现,因为多元探测器是遥感仪器发展的方向,并且 45° 旋转扫描反射镜有无法替代的优势.

REFERENCES

- 1 NASA Report. *System Concept for Wide-Field-of-View Observation of Ocean Phenomena from Space*, 1987
- 2 LIAN Tong-Su. *Conjugate Theory of Reflecting Prism*, Beijing: Peking Univ. Sci. & Tech. Press (连铜淑. 反射棱镜共轭理论, 北京: 北京理工大学出版社), 1988
- 3 ZHANG Yi-Mo. *Applied Optics*, Beijing: Industry Press (张以谟, 应用光学, 北京: 工业出版社), 1982

RESEARCH AND APPLICATION OF SYSTEM FOR OFFSETTING IMAGE ROTATION FROM 45° ROTATING SCAN MIRROR

ZHANG E GONG Hui-Xing

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract A system using “K mirror” to offset image rotation from 45° rotation scan mirror was developed successfully. The system was deduced in theory and applied in a scanner on an ocean satellite. The result proved that the system can offset the image rotation, thus a new model of scan was proposed.

Key words 45° rotating scan mirror, “K mirror”, image rotation