

· 光电探测 ·

## 三视场白天测星研究

王 铎<sup>1</sup>, 韩艳丽<sup>2</sup>, 孙腾飞<sup>3</sup>

(1.92941部队, 辽宁 葫芦岛 125001; 2.海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 3.92819部队, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** 白天恒星探测最大的困难在于过强的背景辐射, 全天时近红外多视场探测系统将三个参数相同的探测器刚性固连在探测平台上, 同时进行恒星探测。结合中国地理位置, 分析了白天近红外波段三个探测视场内的恒星——背景对比度随太阳天顶角、平台方位角、平台 $x$ 方向俯仰角, 平台 $y$ 方向俯仰角及平台高度的变化情况。结果表明, 随太阳天顶角的变化, 对比度近似指数增长; 随平台方位角的变化, 对比度呈正态分布变化; 当平台有一定的倾角时, 对比度变化都很低且变化范围不大, 但三个视场间相差较大(相差1.5~20倍不等); 随着平台高度的变化, 对比度呈指数变化明显增大; 为星等修正研究奠定较好的基础。

**关键词:** 全天时; 多视场; 对比度; 方位角; 星等比

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-05-0026-05

## Research on Three-FOV Star Detection during Daytime

WANG Duo<sup>1</sup>, HAN Yan-li<sup>2</sup>, SUN Teng-fei<sup>3</sup>

(1.92941 Army Unit, Huludao 125001, China; 2. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 3. 92819 Army Unit, Dalian 116600, China)

**Abstract:** The main difficulty of star detection during daytime is the over strong background radiation. Detectors with three same parameters are rigid connected to the detection platform by an all-weather near Infrared multi-FOV detection system to detect stars. According to geographical positions in China, star background contrast during daytime at near Infrared band in three detection FOV changing with sun zenith, platform azimuth, pitching angle in  $x$  and  $y$  direction as well as platform height is analyzed. The results show that with the variation of sun zenith, contrast similar exponent increases. With the variation of platform azimuth, the contrast approaches to normal distribution. When the platform has a certain pitching angle, the contrast changes little and change range is small, but three FOV has a big difference such as from 1.5 to 20 times. The contrast will exponentially increase greatly with the platform height changing to provide a better basis for star magnitude amendment.

**Key words:** all-weather; multi-FOV; contrast ratio; azimuth; compare of star magnitude

白天可见光测星, 恒星被淹没在强烈的大气散射背景中<sup>[1]</sup>, 星光对比度比夜间要差 $10^5$ 倍<sup>[2]</sup>。利用红外探测可较好解决空间目标白天探测问题<sup>[3]</sup>。国外利用红外波段白天探测恒星已进行实验并取得一定的实验结果<sup>[4-6]</sup>。文献[7]针对大气层外非自发光体的探测, 对不同波段的目标背景对比度和大气斜程透过率进行了

分析, 但恒星为自发光体。不同于传统的大视场星敏感器, 采用三个小视场红外探测系统, 对恒星进行探测, 进而辅助导航, 具体如图1所示。

影响恒星成像信号强度的因素有很多, 包括恒星的星等、光学系统的入瞳、焦距、光谱透过率、积分时间等<sup>[8]</sup>。当工作波长大于 $2\ \mu\text{m}$ 时望远镜的热辐射严重影响

收稿日期: 2014-08-15

基金项目: 863项目(2010AAJ140)

作者简介: 王铎(1986-), 男, 河南新郑人, 硕士, 研究方向为天文导航; 韩艳丽(1965-), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为图像处理、天文导航与光电技术; 孙腾飞(1985-), 男, 92819部队助理工程师, 研究方向为图像处理。

响对星系和恒星探测的灵敏度,波长小于 $1\ \mu\text{m}$ 时星际红化和月光的影响严重<sup>[9]</sup>。为准确的测量不同视场的恒星星等比值,必须明确各要素对白天测星的影响,明确各种情况下恒星——背景对比度的变化规律。由于探测器视场较小,假定接收到的恒星辐射是恒定不变的,分析近红外H-波段<sup>[10]</sup>( $1.65\ \mu\text{m}$ ),白天天空背景辐射随太阳天顶角、平台方位角、平台 $x$ 方向俯仰角、平台 $y$ 方向俯仰角、探测器高度的变化情况,针对本系统三个视场的天空背景辐射进行对比,结合白天实际拍摄到的恒星图像,从理论和实际两方面,分析计算不同方位角时的背景亮度比和恒星星等比,并进行背景一致性修正。



图1 三视场探测系统

恒星辐射在传输到探测器的路径中经历了大气的消光作用(包括散射和辐射),到达探测器的为光照度,背景是天空散射的太阳光和天空热辐射<sup>[11]</sup>。因计算时考虑的因素非常多,计算的精度受到严重的限制,通常使用大气传输软件进行计算<sup>[12]</sup>,在此使用MODTRAN进行计算。

## 1 系统的探测参数

### 1.1 探测参数

探测参数示意图如图2所示。其中, $x$ - $y$ 平面为地面; $z$ 指向的是天顶的方向; $A$ 为探测器指向; $B$ 为太阳光线方向;则 $u$ 为观测天顶角; $u_0$ 为太阳天顶角; $\phi$ 为探测方位角,且定义从探测器光轴指向到太阳方向(光轴指向的右侧方向)为正,范围是 $(0, 180]$ ,另一方向为负,范围是 $(0, -180)$ 。

现在规定垂线测量坐标系:其方位绝对零度指向大地北且定义为 $x'$ 轴方向,铅垂线方向指向天顶,定义为 $z'$ 轴方向;然后规定探测平台坐标系:假设平台上固定的三个探测器的交汇点为原点 $o$ ,并

且与垂线测量坐标系的原点 $o'$ 重合,令平台水平放置时有一个探测器方位指向刚好位于 $x'$ 轴正方向,记为探测器I,那么位于方位角 $-120^\circ$ 位置的探测器为探测器II,分布在方位角 $120^\circ$ 位置的探测器为探测器III,定义探测器I在水平面的投影方向为 $x$ 轴正方向。于是当平台水平放置且其中一个探测器指向大地北时,平台坐标系 $o$ - $xyz$ 和垂线测量坐标系 $o'$ - $x'y'z'$ 完全重合,保证垂线测量坐标系和平台坐标系原点保持重合的前提下,从平台上任意一点 $P$ 做垂线到水平面,垂足为 $Q$ 则所有夹角 $POQ$ 中的最大夹角定义为平台俯仰角,平台水平放置时俯仰角为 $0^\circ$ ,铅锤方向俯仰角为 $90^\circ$ 。据此,文中使用的二维精密转台在测量时给出的方位、俯仰信息,在实际处理过程中转化为在垂线测量坐标系中,平台方位角及平台沿任一方向(例如:沿与 $x$ 轴方向成 $\theta$ 角的方向)的俯仰角信息。方位角的正负如图2规定。而当平台高出水平面时,俯仰角为正,反之则为负。

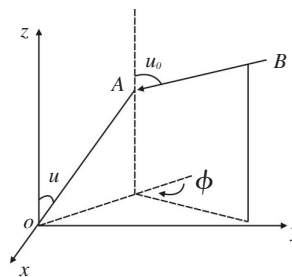


图2 探测参数示意图

白天进行恒星探测,由于各探测器距离太阳位置较远,太阳光及星光均可认为是平行光,具体某一时刻,平台水平放置,不同视场探测器的靶面在成像时,只是各探测器光轴指向不同而引起的变化。

当平台有一定的俯仰角时,三个探测器的方位角和天顶角都发生改变,研究平台在 $x$ 轴正方向(以下简称 $x$ 方向)俯仰角度为 $\alpha$ 度和 $y$ 轴正方向(同 $x$ 轴)俯仰角度为 $\beta$ 度时,三个探测器天顶角的变化,经简单的坐标旋转计算,其关系如下

(1)平台在 $x$ 方向俯仰角度为 $\alpha$ ,设其天顶角分别为 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ,方位角分别为 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,则

$$\begin{cases} \alpha_1 = 45^\circ - \alpha \\ \alpha_2 = \alpha_3 = 90 - \arccos \sqrt{\frac{3}{8} + \left(\frac{\sqrt{2}}{4} \sin \beta - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \beta\right)^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_1 = 0 \\ A_2 = -\arccos \frac{\frac{\sqrt{6}}{4}}{\sqrt{\frac{3}{8} + (\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha + \frac{\sqrt{2}}{4} \cos \alpha)^2}} - 9 \\ A_3 = \arccos \frac{-\frac{\sqrt{6}}{4}}{\sqrt{\frac{3}{8} + (\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha + \frac{\sqrt{2}}{4} \cos \alpha)^2}} + 90 \end{cases} \quad (2)$$

(2)平台在 $y$ 方向俯仰角度为 $\beta$ 度,设其天顶角分别为 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ ,方位角分别为 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 则

$$\begin{cases} \beta_1 = 90 - \arccos \frac{\sqrt{2}}{2} (\cos \beta - \sin \beta) \\ \beta_2 = 90 - \arccos \sqrt{\frac{1}{8} + (\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta)^2} \\ \beta_3 = 90 - \arccos \sqrt{\frac{1}{8} + (\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta)^2} \\ B_1 = \pm \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \sin^2 \beta}} \\ B_2 = -\arccos \frac{\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta}{\sqrt{\frac{1}{8} + (\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta)^2}} - 90 \\ B_3 = \arccos \frac{-\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta}{\sqrt{\frac{1}{8} + (\frac{\sqrt{6}}{4} \cos \beta + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \beta)^2}} + 90 \end{cases} \quad (3)$$

当平台沿着与 $x$ 轴方向成 $\theta$ 角的方向有 $\gamma$ 度俯仰角时,可将 $\gamma$ 角垂直分解在 $x$ 方向有 $\gamma \cos \theta$ 俯仰角和 $y$ 方向有 $\gamma \sin \theta$ 俯仰角分别求解。

## 1.2 对比度

根据天文学规定,恒星在相差五个星等时照度刚好相差100倍,以此为基准,可计算出各星等恒星辐射出度,相邻的两个星等,星等值高的要比星等值低的暗2.512倍,则任意视星等 $m$ 的辐射出射度为

$$F_m = F_0 (2.512)^{-m} \quad (5)$$

其中, $F_0$ 为零星等的大气层外辐射出射度,其值为 $1.387 \times 10^{-9} \text{ Wm}^{-2[6]}$ 。据此,星等为 $m$ 和温度为 $t$ 的恒星—背景对比度(以下简称对比度)定义为<sup>[3]</sup>

$$C_m(\lambda, t) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_m(\lambda, t) T(\lambda, \mu_0, \mu, \phi, H) Fun(\lambda) d\lambda}{2\pi[1 - \cos[\theta/2N]] \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda, \mu_0, \mu, \phi, H) Fun(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

其中, $\theta$ 为探测器视场角; $N$ 为CCD阵列大小; $2\pi[1 - \cos[\theta/2N]]$ 为单位像元所占立体角,在三视场探测系统中,其值为 $\frac{2}{60 \times 60} \text{ sr}$ ;  $T(\lambda, \mu_0, \mu, \phi, H)$ 为大气透过率; $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda, \mu_0, \mu, \phi, H) d\lambda$ 是 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段范围内的背景辐射; $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_m(\lambda, t) d\lambda$ 是 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段范围内的恒星光谱辐射;响应波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2 \in [1.50 \sim 1.75 \mu\text{m}]$ ;  $Fun \lambda$ 是响应函数,近似处理的情况下可约去。

分析背景辐射随平台 $x$ 方向俯仰角 $\alpha$ 、平台 $y$ 方向俯仰角 $\beta$ 、平台方位角 $\phi$ 、探测器高度 $H$ 的变化情况,着重分析和计算6星等恒星—背景对比度随太阳天顶角 $\mu$ 、平台方位角 $\phi$ 、平台 $x$ 方向俯仰角 $\alpha$ 、平台 $y$ 方向俯仰角 $\beta$ 、探测器高度 $H$ 的变化情况。采用的分析方法对于任何一种大气模式是通用的,由于中国大部分地区位于中纬度,结合MODTRAN软件(中纬度分冬季和夏季两种模式),分别选择中纬度冬季和夏季大气模式,无风无雨,不考虑云层因素,使用乡村模式能见度23 km,二氧化碳含量以1995年的355 ppmv为基准,到2012年增长为386 ppmv的前提下,分析可知,对比度随单个探测器天顶角和太阳天顶角之间夹角(DDO)范围为 $(40^\circ, 80^\circ)$ ,由此可以得到,平台沿 $x$ 方向和 $y$ 方向的俯仰角范围分别为 $(-5^\circ, 35^\circ)$ 和 $(-25^\circ, 25^\circ)$ 。

据此,计算背景辐射和对比度时的具体参数如表1所示。

表1 计算所用参数

$C$ 与参数 之间关系	太阳天 顶角 $\mu/^\circ$	平台方 位角 $\phi/^\circ$	平台 $x$ 方向 俯仰角 $\alpha/^\circ$	平台 $y$ 方向 俯仰角 $\beta/^\circ$	探测器高 度 $H/\text{km}$
$C$ 与 $\mu$	0~60	0	0	0	0
$C$ 与 $\phi$	10	-180~180	0	0	0
$C$ 与 $\alpha$	10	0	-5~35	0	0
$C$ 与 $\beta$	10	0	0	-25~25	0
$C$ 与 $H$	10	0	0	0	0~30

## 2 计算结果及分析

### 2.1 中纬度冬季

根据表1中所列参数,对中纬度冬季,不同情况下恒星—背景对比度进行计算,分析结果如下。

#### 2.1.1 恒星—背景对比度随太阳天顶角的变化

依据表1中的第一组数据,计算不同太阳天顶角

时对比度的变化如图3所示。可以看出,由于在太阳天顶角为 $45^\circ$ 时,太阳光线直射进入探测器 I 视场内,所以探测器 I 的对比度从 $0^\circ$ 开始呈下降趋势,而探测器 II、III,由于太阳天顶角的变化,两者视场内的背景辐射逐渐减小,类似指数减小,所以对比度不断增大,近似指数增长。

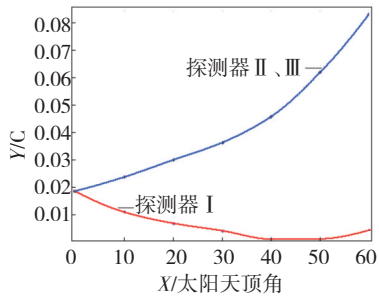


图3 对比度与太阳天顶角关系

### 2.1.2 恒星—背景对比度随平台方位角的变化

依据表1中的第二组数据,计算不同平台方位角时对比度的变化如图4所示。可以看出,随着平台方位角的变化,对比度的变化仍然呈现高斯分布趋势,但是不同的平台方位角时,三个视场对比度差异很大, $0^\circ$ 方位角时,三个探测器视场的对比度一样, $90^\circ$ 方位角时,探测器 III 的对比度是探测器 I 的1.38倍,是探测器 II 的2.24倍。

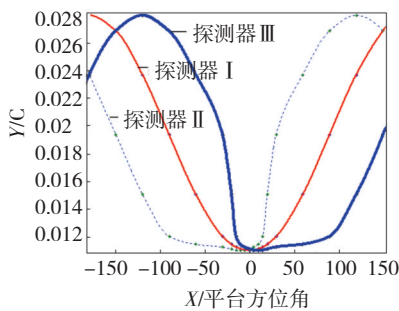


图4 恒星—背景对比度与平台方位角的关系

### 2.1.3 恒星—背景对比度随平台x方向俯仰角的变化

依据表1中的第三组数据,计算平台x方向不同俯仰角时对比度的变化如图5所示。可以看出,随着平台俯仰角的增大,探测器 I 的对比度线性减小,而探测器 II 和探测器 III 的对比度缓慢增加,这主要是因为太阳位于方位角 $0^\circ$ ,探测器 I 在平台俯仰角度变化时,视场内的背景辐射变化较为剧烈,进而引起对比度的较大变化,探测器 II 和探测器 III 由于天顶角和方位角

变化一致,所以对比度大小也完全一致。不同的平台俯仰角时,三个视场对比度差异较大, $15^\circ$ 俯仰角时,探测器 II 和探测器 III 的对比度是探测器 I 的3.77倍,随着俯仰角的增大,这个比值仍在增大。

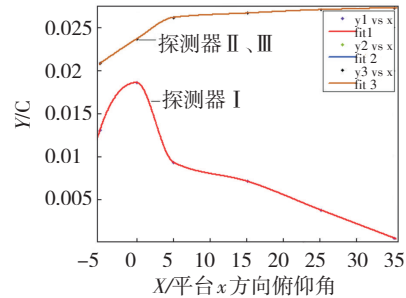


图5 恒星—背景对比度与平台x方向俯仰角的关系

### 2.1.4 恒星—背景对比度随平台y方向俯仰角变化

根据表1中的第四组数据,计算恒星—背景对比度随平台y方向俯仰角变化情况如图6所示。由结果可知,探测器 II 和探测器 III 的恒星—背景对比度随平台y方向俯仰角的改变变化不大,其值始终保持差值在0.02的范围以内,但是探测器 I 的对比度随平台俯仰角的增大明显增大, $25^\circ$ 俯仰角时是 $-25^\circ$ 俯仰角时的1.5倍。

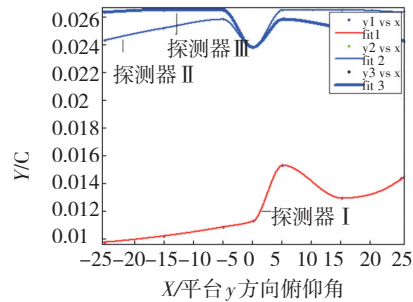


图6 恒星—背景对比度与平台y方向俯仰角的关系

### 2.1.5 恒星—背景对比度随探测高度变化

根据表1最后一组数据,计算恒星—背景对比度随探测高度的变化情况如图7所示。

由图7可知,近地面时,恒星背景对比度随探测高度的变化不很明显,15 km以内,对比度仍处于3以下;到达一定高度时(15 km左右),对比度随探测器高度的增加近似指数增加,30 km时,对比度可达到12左右。这是因为大气中影响红外辐射传输的主要是二氧化碳和水蒸气,而在近地面高度时,这两种气体的含量急剧增加,随着高度的增加,其含量急速下降,从而导

致较高的高度上,大气对红外辐射传输的透过率较好,恒星—背景对比度明显增大。同时可以看出,不同的方位角时对比度的增加幅度不一样,由于探测器Ⅱ和探测器Ⅲ光轴指向背向太阳位置,对比度比探测器Ⅰ增长快得多。

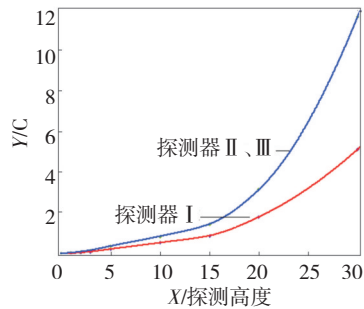
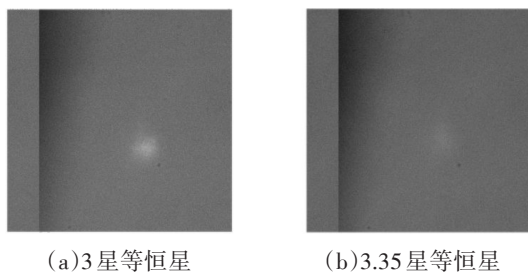


图7 恒星—背景对比度与探测高度的关系

## 2.2 中纬度夏季

同样根据表1中所列参数,对中纬度夏季,不同情况下恒星—背景对比度进行计算,经分析,夏季时恒星—背景对比度随各参数的变化规律与冬季类似,并且某些参数情况下(随高度、方位角变化时),其值略优于冬季情况下的结果,但不是很明显。

从结果可以明显地看到,同一时刻,即便是相同的探测天顶角,三个不同视场的背景辐射强度变化很大。即使三个视场同时探测到的恒星星等相同,由于受到背景辐射的影响,不同视场中恒星目标像素点的灰度值也不一样。实际情况的确如此。图8显示的是同一地点、同一时间、同一台设备在相同探测天顶角但不同方位角情况下探测到的两颗已知星等恒星的图像,其恒星像素灰度值与星等不成比例。



(a)3星等恒星

(b)3.35星等恒星

图8 白天拍摄星图

## 3 结论

综合目前已有的白天测星技术和可用的星表,针对中国所处的地理位置,在无云无雨无风的理想大气情况,采用Modtran软件分析计算了中纬度冬季和夏季大气模式下白天恒星探测时,同一探测时刻三个视场内恒星—背景对比度随太阳天顶角、平台方位角、平台 $x$ 方向俯仰角、平台 $y$ 方向俯仰角、探测高度的变化曲线。对实际探测的红外星图的星等比修正具有重要作用。

## 参考文献

- [1] 叶松,方勇华,孙晓兵,等.一种基于偏振信息的恒星白天观测方法[J]. 大气与环境光学学报,2007,2(3):222-226.
- [2] 陈秀红,魏合理,余凯,等.星敏感器白天观星对比度分析[J]. 大气与环境光学学报,2008,3(1):28-34.
- [3] 牟达,李全勇,董家宁.地基红外系统探测空间目标红外星等的分析[J]. 红外与激光工程,2011,40(9):1609-1613.
- [4] Joel E Nelson. Infrared methods for daylight acquisition of LEO satellites[D]. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Department of the Air Force Air University, 2004.
- [5] Robert F Cannata, Randal J Hansen, Adrienne N Costello, et al. Very wide dynamic range SWIR sensors for very low background applications[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3968: 756-765.
- [6] Chery D Alexander, Wesley Swift, Kaja Ghost, et al. Design of a daylight star camera system[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3779: 47-54.
- [7] 万敏,苏毅,杨瑞,等.提高白天观测星体信噪比的方法研究[J]. 强激光与粒子束,2003(12):1151-1154.
- [8] 张伟,潘海滨,鲍文卓,等.星空背景数字图像的生成[J]. 光学精密工程,2009,17(3):676-682.
- [9] 高建云,陈力,王家骥,等.2MASS的科学意义和成果概览[J].天文学进展,2004,22(4):275-280.
- [10] 韩艳丽,王铎,郭少军,等.近红外白天恒星探测对比度分析[J]. 应用光学,2012,33(5):969-973.
- [11] 范伟,王毅,饶瑞中,等.根据大气辐射特征进行目标波段的选取[J]. 红外与激光工程,2005(2):177-182.
- [12] 娄树理.海洋战场环境红外建模与场景生成关键技术研究[D].青岛:海军航空工程学院,2010.