

文章编号: 1672-8785(2012)04-0026-05

近红外白天测星时不同方位角的背景辐射修正

韩艳丽¹ 王 铎² 刘鑫伟²

(1. 海军航空工程学院控制工程系, 山东烟台 264001;

2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东烟台 264001)

摘 要: 基于星敏感器的白天测星可探测到的星数目有限, 严重限制了导航需求。利用红外波段可以探测到足够多的用以导航的星体。采用近红外多视场小口径探测器同时对不同天区进行恒星探测。各个探测器接收到的背景辐射不同, 探测到的恒星视星等也不同。利用 MODTRAN 软件对白天不同探测器方位角时的背景辐射进行了分析。根据不同方位角时的辐射曲线, 提出了背景修正方法——倒影法并以 6 星等恒星对其进行了验证。

关键词: 小口径; 多视场; 方位角; 背景修正; 倒影法

中图分类号: V249.32+6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.04.005

Correction of Background Radiation Received by Near Infrared Star Sensors at Different Azimuth in Daytime

HAN Yan-li¹, WANG Duo², LIU Xin-wei²

(1. Department of Control Engineering, Aeronautical and Astronautical University;

2. Graduate School of Management Brigade, Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Since the stars which can be detected by a star sensor in the daytime is limited, the demand of star navigation is limited severely. By using an infrared waveband, enough stars can be detected for navigation. Several near infrared multiple field-of-view detectors with a small diameter are used to detect the stars in different sky areas. Because the background radiation received by each detector is different, the detected stellar apparent magnitude is different. The MODTRAN software is used to analyze the background radiation detected by the detectors at different azimuths in the daytime. According to the radiation curves obtained at different azimuths, a background correction method, the reflection method is proposed and is verified by using six stars.

Key words: small-diameter; multiple field-of-view; azimuth; background correction; reflection method

0 引言

现代导航技术已被广泛应用于多个领域。导航的主要手段包括无线电导航、全球定位系统、惯性导航和天文导航等。其中, 天文导航通过观察恒星的位置来确定载体自身的位置和方

向, 具有较高的精度。目前的天文导航技术大多是基于星敏感器的空间飞行目标姿态测量。它们可以在晚上用于航海船只的位置测定和航向确定, 并可对惯性导航的航向误差进行修正。在白天的强背景下, 该技术很难探测到足够多的满足导航需求的恒星。文献 [1] 提出使用光谱滤

收稿日期: 2012-02-21

作者简介: 韩艳丽 (1965-), 女, 内蒙古赤峰人, 教授, 主要从事图像处理与智能化、光电技术以及计算机智能等方面的研究。E-mail: lotuser109@163.com

波技术来提高信噪比, 并研究了探测系统视场的选取对信噪比和对比度的影响。但这都是基于同一视场对恒星进行探测, 而且光谱滤波容易降低接收到的恒星光谱辐射。在白天利用红外波段探测恒星始于几年前, 国外已经进行了实验并取得了一定的实验结果^[2-5]。利用红外波段可以探测到足够多的用以导航的星体。不同于传统的大视场星敏感器, 本文提出采用三个光轴指向不同且固定在同一平台上的小视场红外探测系统对恒星进行探测, 进而将其用以导航。由于视场指向不同, 各个探测器接收到的背景辐射也不一样, 成像灰度值的相对对比存在差异。通过对不同指向的背景辐射进行研究, 可以实现对背景的修正。

1 不同方位角的背景辐射

1.1 溢角修正

在白天进行恒星探测时, 假定探测器平台水平放置在水平面上, 由于各个探测器距离太阳较远, 太阳光及星光均可被认为是平行光。图 1 所示为太阳与探测器视场的方位关系。其中, x - y 平面为地面; z 指向的是天顶方向; $\theta_{\text{sun}z}$ 为太阳天顶角; $\theta_{\text{det}z}$ 为探测器天顶角; $\theta_{\text{det}a}$ 为探测器方位角。定义从图 1 所示的探测器光轴方向到太阳光方向 (光轴指向的右侧方向) 为正方向, 方位角为正值, 其范围为 $(0, 180]$; 反方向则为负, 方位角范围为 $(0, -180)$ 。

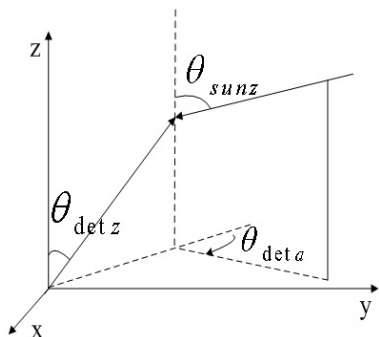


图 1 太阳与探测器视场的方位关系

本文采用固定在同一平台上, 三个光轴指向不同, 俯仰皆为 45° 和方位相差 120° 的小视场红外探测系统 (见图 2)。

具体到某一时刻, 无论哪个探测器光轴指向如何, 太阳顶角都相同。不同视场探测器的靶面在成像时, 只是各个探测器光轴指向不同而引起变化。为了便于分析过程, 我们将其投影至水平面上, 如图 3 所示。

图 3 中, 红线代表太阳光线 (为平行光), 三个黑色的箭头指向线分别代表三个探测器在水平面上的投影。设任一时刻太阳与三个探测器光轴指向所成的方位角分别为 $\theta_{\text{det}a}$ 、 $\theta_{\text{det}b}$ 和 $\theta_{\text{det}c}$, 则有:

$$\theta_{\text{det}b} = \theta_{\text{det}a} + 120^\circ \quad (1)$$

$$\theta_{\text{det}c} = \theta_{\text{det}a} - 120^\circ \quad (2)$$

式中, $\theta_{\text{det}a}$ 、 $\theta_{\text{det}b}$ 、 $\theta_{\text{det}c} \in [180^\circ, -180^\circ)$ 。在计算过程中, 若得到的方位角小于 -180° , 则将计算结果加上 360° 进行修正; 若大于 180° , 则将计算结果减去 360° 进行修正。以上修正被称为溢角修正。

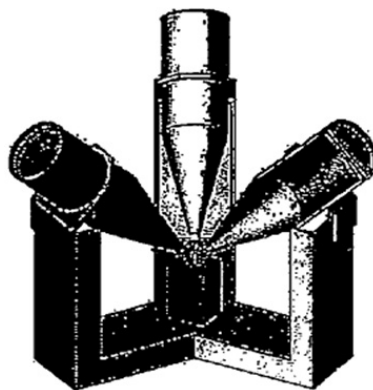


图 2 三视场红外探测系统

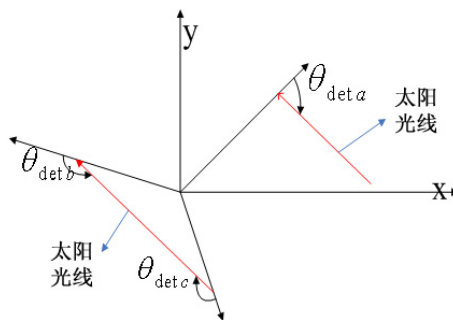


图 3 太阳与探测器视场的方位关系投影

1.2 大气透过率及波段选取

目标辐射在传输至探测器之前经历了大气的消光作用(包括散射和辐射)。探测器实际接收到的是视亮度,背景是天空散射的太阳光和天空热辐射^[6]。波长小于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的天空辐射是散射的太阳光。探测器所接收的天空红外辐射主要由天空背景的红外辐射亮度、天空背景的热辐射以及散射的太阳辐射亮度组成。由于在计算各个分量时需要考虑的因素非常多,计算精度会受到很大的限制。目前一般采用大气传输软件进行计算^[7],在此我们使用 MODTRAN 软件进行计算。

经 MODTRAN 软件验证,不同探测器视场的大气透过率是一个与方位角无关的量。在计算中,当太阳和探测器顶角、探测器高度、时间、气溶胶模式等影响大气透过率的因素一定时,影响各个探测器成像视星等的主要因素是背景辐射,所以我们着重分析不同探测器视场所接收到的背景辐射。图 4 所示为在中纬度冬季,地面温度为 272.2 K ,对流层气溶胶能见度为 50 km ,二氧化碳含量为 386 ppmv ,探测器天顶角为 45° ,太阳天顶角为 30° ,无云无雨无风的理想情况下, $1.5002 \sim 1.7544\text{ }\mu\text{m}$ 波段内的大气透过率随波长的变化曲线(其平均透过率为 0.9338)。

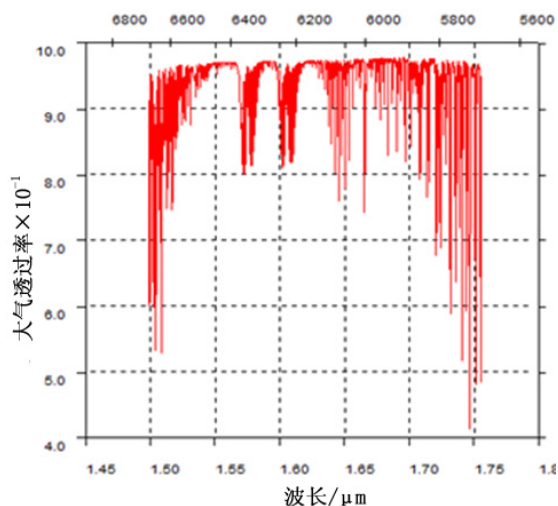


图 4 大气透过率与波长的关系

在进行波段选择时,主要考虑目标背景对比度及大气斜程透过率的大小,并且综合 2MASS

在拍摄恒星时所使用的几个近红外波段: J,H,K_s 波段(分别对应于 $1.25\text{ }\mu\text{m}$ 附近、 $1.65\text{ }\mu\text{m}$ 附近和 $2.15\text{ }\mu\text{m}$ 附近)。文献 [6] 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。他们认为 $2 \sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段是进行大气外目标探测的理想波段,但是其分析主要基于大气层外非自发光体的探测,而恒星为自发光体。美国有关恒星探测的最新研究结果^[8]表明,当波长大于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,望远镜的热辐射将会严重影响对星系和恒星探测的灵敏度;当波长小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时,星际红化和月光的影响严重。综合以上因素,本文选用 H 波段 ($1.65\text{ }\mu\text{m}$ 附近) 进行恒星探测。

1.3 探测器视场接收到的背景辐射

三个视场的俯仰角同为 45° ,但方位角相差 120° 。在近红外波段,白天探测器视场接收到的背景辐射主要是太阳辐射和大气路径的热辐射。在近红外 H 波段附近 ($1.5 \sim 1.75\text{ }\mu\text{m}$),大气路径中的热辐射与波长之间的关系见图 5。相对于太阳辐射产生的背景,该热辐射可以忽略不计。

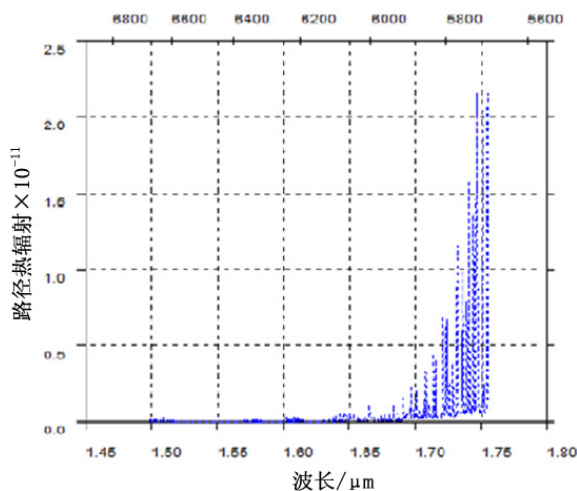


图 5 大气路径热辐射与波长的关系

在不同方位角时,探测器接收到的背景辐射相差较大。图 6 所示为方位角在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 内时探测器所接收到的背景光谱辐射变化(单位为 $\text{W}/\text{cm}^2/\text{ster}$)。其中,蓝色表示原始数据,红色表示拟合曲线(其值高于路径热辐射 5 个数量

级)。该分布类似于正态分布, 其拟合曲线可用正态分布函数表示:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ 对应于方位角为 0° 时的辐射值, 由此可算出 $\sigma = 6925.2$ 。

当方位角相差 120° 时, 各个探测器接收到的背景辐射通常相差 $20\% \sim 80\%$, 最大可达 2 倍左右。因此, 即使是同等星等的星, 由于背景辐射不同, 在不同视场内所成像的像素值也不相同, 需要进行修正。对于单一波长, 探测器方位角和接收到的光谱辐射的关系曲线与该曲线是形状完全相似的一组曲线, 只是其起伏值大小不同罢了 (与波长成正比)。

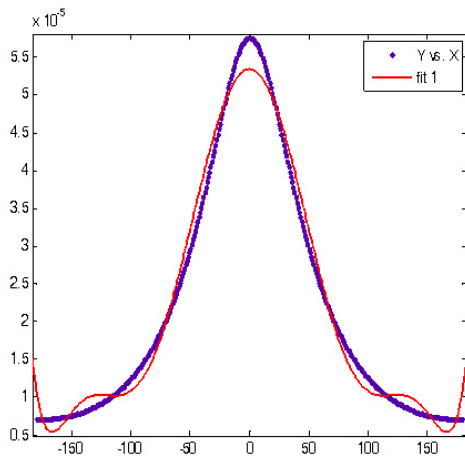


图 6 方位角与探测器接收光谱辐射的关系

2 背景修正方法

2.1 倒影修正法

本文采用三个指向不同的小口径近红外探测器。恒星辐射与星等相关。在进行修正时, 由于是小口径探测器, 我们可以认为恒星辐射量是经过同样的大气衰减到达探测器的。我们主要考虑不同方位角时各个探测器接收到的背景辐射的不同, 然后消除背景成像差异, 以实现不同探测器拍摄到的图像。在修正后即可认为它们是同一视场的图像, 进而利用现有的三星定位方法来实现导航。将图 6 中的曲线沿横轴竖直翻转, 形成倒影曲线 (见图 7)。

该曲线即为不同方位角时探测器视场拍摄到的背景辐射倒影修正曲线, 其表达式为

$$P_1(x) = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

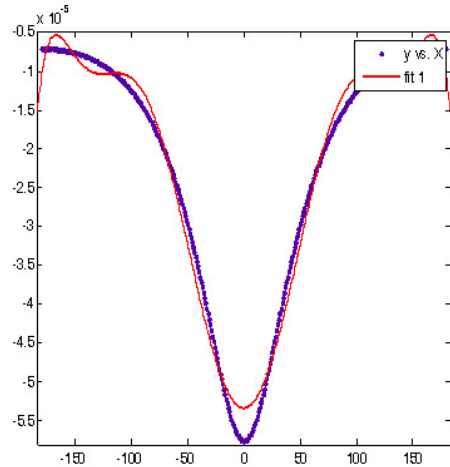


图 7 倒影修正曲线

在进行背景辐射修正时, 首先确定探测器的方位角, 然后加上该角度下的修正值。由于其值与拍摄时探测器视场接收到的背景辐射完全相反, 修正后背景变为灰度值为 0 的纯黑色背景, 避免了图像采集时由比特数低引起的探测器修正饱和所带来的错误修正 (而目标不受影响)。

3 理论验证

3.1 恒星辐射计算

根据天文学规定, 恒星在相差五个星等时照度正好相差 100 倍, 以此为基准, 可计算出各星等星的辐射出度。就相邻的两个星等而言, 星等值高的要比星等值低的暗 2.512 倍, 任意 m 星等星的辐射出度为 ^[2,9]

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

式中, F_0 为零星等的大气层外辐射出度, 其值为 $1.387 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$ 。

基于以上理论, 以 6 星等恒星进行理论验证。由式 (5) 可知, 6 星等恒星的光谱辐射出度为 $5.52 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。

3.2 倒影修正

假设所有辐射在 CCD 探测阵面上均匀分布, 探测器的视场大小为 256×256 像元, 单个像

元大小为 2 角秒,在不考虑拍摄时噪声及探测器暗电流等不确定因素的影响的前提下,单个像元接收到的背景辐射随方位角的变化情况见图 8。

由式 (4) 可以得到其倒影修正函数为

$$P'(x) = -\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中, $\sigma = 1.25 \times 10^7$ 。假设该像元点接收到 6 星等的恒星辐射,由图 8 可知,在 0° 方位角的情况下,6 星等的恒星——背景对比度在 $1 \sim 2$ 之间,而 180° 方位角时的对比度要高出 1 个数量级。用式 (6) 对其进行修正,修正后背景辐射为 0,仅有恒星辐射,此时极容易提取恒星目标。

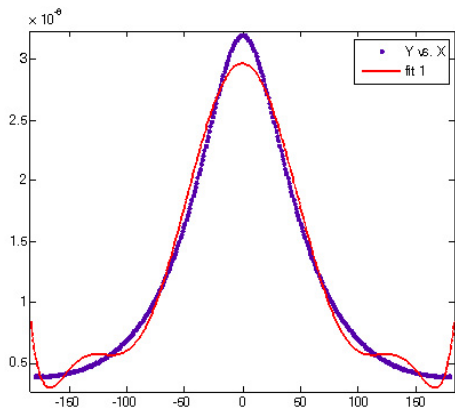


图 8 单个像元接收到的背景辐射与方位角的关系

4 结论

本文针对白天过强的背景辐射,分析了白天近红外恒星探测的各种影响因素,并利用 MODTRAN 软件分析了不同方位角与探测器接收到的背景辐射之间的关系。针对该曲线,结合本文提出的三视场小口径红外探测方法,提出了一种倒影修正方法。使用倒影法修正可以极大地突出目标,实现对背景的最大抑制。在不同方

位角时,背景辐射的差异相当明显。此外,利用修正有利于统一由不同探测器视场成像造成的视星等差异,进而可结合现有的同一视场探测恒星导航方法来实现导航。在本文分析中,某些大气条件是基于理想情况下考虑的,如无云、无风、无雨,能见度高以及三个探测器固连的平台水平放置等。在实际应用中,云雨对不同视场成像的影响相当严重。我们下一步将考虑其他因素的影响。

参考文献

- [1] 万敏, 苏毅. 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, **24**(12): 1151-1154.
- [2] Joel E N. Infrared Methods for Daylight Acquisition of LEO Satellites [D]. Ohio: Department of the Air Force Air University, 2004.
- [3] Robert F C, Randal J H, Adrienne N C, et al. Very Wide Dynamic Range SWIR Sensors for Very Low Background Applications [C]. SPIE, 1999, **3968**: 756-765.
- [4] Chery D A, Wesley S, Kajal G, et al. Design of a Daylight Star Camera System [C]. SPIE, 1999, **3779**: 47-54.
- [5] Karl G H, John F S, Christine A O'Neill, et al. Detection of Orbital Debris with GEODSS Telescopes [C]. SPIE, 1993, **1951**: 76-84.
- [6] 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, **34**(2): 46-51.
- [7] 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]. 烟台: 海军航空工程学院, 2010.
- [8] Mikhail Belenkii, David Sandler, Donald Bruns, et al. Daytime Stellar Imager for Attitude Determination [J]. *Patent Application Publication*, 2006, **23**(2): 1124-1129.
- [9] Zhu Qixiang. Detection of Celestial Objects by CCD Camera in the Daytime and the Related Experiments [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(6): 1-10.