

## 基于 NCEP 数据库的星光大气折射修正模型

杨玉峰<sup>1,2\*\*</sup>, 宋宁宁<sup>1\*</sup>, 韩香<sup>1\*\*\*</sup><sup>1</sup>西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;<sup>2</sup>西安理工大学陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710000

**摘要** 提高星光大气折射模型精度对于改善天文导航系统的精确性具有重要意义。本文针对目前常用的美国标准大气(USSA)和 COSPAR 国际参考大气(CIRA)参考模式精度较低的问题,利用高分辨率的美国国家环境预报中心(NCEP)大气参数数据结合傅里叶插值算法建立了大气参数时空变化模型,根据不同高度、不同经纬度的大气折射率,计算了星光在大气中的传播路径,并建立了星光大气折射模型。与现有模型对比分析表明,本文建立的大气温度时空变化模型拟合实测数据时的相对误差小于 2%,平均绝对误差小于 3.5 K,大气密度拟合的相对误差小于 4.39%,1 月低纬、中纬和高纬的折射时空模型与传统单点模型之间的相对误差分别为 37.64%、9.79% 和 28.78%,7 月低纬、中纬和高纬的折射时空模型与传统单点模型之间的相对误差分别为 27.95%、26.89% 和 39.10%,因此考虑了时空变化的星光大气折射模型理论精度更高。

**关键词** 大气与海洋光学; 美国国家环境预报中心大气参数数据; 傅里叶插值; 时空变化折射模型

**中图分类号** TN929.12

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230452

## 1 引言

空间飞行器、深空探测、长航时飞机等设备对导航精度的要求越来越高,如何提高飞行器的空间导航精度,如何实现不受干扰的全自主导航,以及如何降低昂贵的设备费用是急需解决的难题。星光大气折射导航是指不与外界进行信息传输和交换,不依赖于地面设备的导航定位技术<sup>[1]</sup>,其隐蔽性更好、抵抗外界环境能力更强,人类对深空探测、火星探测、建立空间站一系列太空活动更离不开自主式导航<sup>[2]</sup>。星光大气折射导航分为直接敏感地平和利用星光折射间接敏感地平两种方式。利用星光折射间接敏感地平的方式比直接利用空间六分仪的直接敏感,其地平方式获得的量测信息更准确、导航精度更高<sup>[3-4]</sup>。当星光通过地球大气时,由于近地空间大气变化复杂,光线会首先向地心方向弯曲,然后偏离地心方向向大气层外出射,进入飞行器视中<sup>[5]</sup>。因此建立精确的大气参数模型对提高导航精确性至关重要。

1983 年, Gounley 等<sup>[6]</sup>利用离散线性卡尔曼滤波研究了星光大气折射对天文导航产生的影响并对其计算误差进行了分析,结果表明,低轨卫星在位置估算时仅用 40 颗星就可以使误差小于 100 m。2015 年, Louedec<sup>[7]</sup>在深空探测研究过程中发现目标光线会穿

过大量的大气,因此需要考虑大气对光传播的影响, Louedec 利用通用的标准大气参数模式分析并给出了干燥空气环境下的折射率随波长、温度、压强的变化模型。2018 年, Ogunsua 等<sup>[8]</sup>利用位于阿库雷(7° 15' 9.22"N, 5° 11' 35.23"E)的自动气象站,测量了大气压力、水汽压和大气温度的时间序列数据,通过实测数据分析了复杂大气环境下的折射率变化,结论中指出,由于测量数据的单一性和局限性,需要增加不同月份或选取其他地点进行数据测量和补充。2019 年,刘一博等<sup>[9]</sup>建立了一种新的大气密度模型,该模型考虑了不同区域之间密度变化的差别,同时分析了季节和大气扰动对区域密度的影响。2020 年,张少雄等<sup>[10]</sup>对基于几何近似和等温模式等假设的传统模型进行了误差分析,在理论分析的基础上,设计了仿真实验,揭示了不同假设对模型产生的影响,但是由于忽略了大气参数的水平分布,模型并不符合实际大气变化情况,会导致星光大气折射估算错误。

以上这些有关大气参数模型的研究大都基于美国标准大气(USSA)参数模式数据、COSPAR 国际参考大气(CIRA)模式数据以及中性大气经验模式(Neutral Atmosphere Empirical Model-2000,简称 NRLMSISE-00)数据分析的,这些通用模式数据分辨率普遍较低,而美国国家环境预报中心(NCEP)数据

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-15; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 装备预先研究项目(61405180204)

通信作者: \*2200321154@stu.xaut.edu.cn; \*\*yangyufeng@xaut.edu.com; \*\*\*852432328@qq.com

分辨率为经纬度  $1^\circ \times 1^\circ$ , 并且每天记录四个时刻的数据, 充分考虑昼夜温差带来的影响, 在此基础上建立模型会比以 CIRA 为典型代表的传统模型精度更高。因此, 本文基于传统大气参考模式和前人对大气参数的特性分析, 针对现有星光大气折射模型精度较低的问题, 以大气复杂的时空变化特性入手, 以高精度、高分辨率的 NCEP 大气参数数据为基础, 建立了随时间和空间变化的大气参数模型, 计算了星光大气折射模型, 同时分析并计算了大气星光折射路径, 从而得到了星光大气折射角, 为提高星光大气折射导航系统精度提供了理论支撑。

## 2 NCEP 数据资料简介

NCEP 再分析资料利用了世界先进的数据分析系统, 对全球从 1999 年至今的大气参数资料进行整合处理, 从而形成格点化数据资料。该套再分析资料包含的气象要素多且使用范围广、持续时间长、时空分辨率高, 是一个完整的数据再分析资料集。最新的 NCEP 逐日大气资料包括了每日间隔 6 h 的大气参数数据, 空间分辨率为经纬度  $1^\circ \times 1^\circ$ 。整体数据集分为两类, 分别是按照等压面层划分的 31 层温度、涡度、比湿等格点数据, 以及 62 层按照不同模式划分的模式层, 提取时可以根据需求选择对应区域的大气参数值, 可供下载的格式有 GRIB 和 NetCFD 两种<sup>[11]</sup>。

由于通用大气参数模式数据精度和分辨率较低, 因此本文建模使用的是 2019 年的 NCEP 逐日再分析数据, 空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 时间分辨率为逐日 6 h, 数据在垂直高度上按照等压面共分 31 层。具体的分层方式为: 等压面 1000~900 hPa 间隔 25 hPa 取第一层; 750~100 hPa 间隔 50 hPa 取一层; 垂直方向上分别按照 70、50、30、20、10、7、5、3、2、1 hPa 分层, 其中平流层是整体数据分层的第 19~31 层, 平流层底对应第 19 层, 平流层顶对应第 31 层。

## 3 基于 NCEP 数据的大气参数时空变化模型

### 3.1 大气温度时空变化模型

2017 年, 房建成等<sup>[1]</sup>得出了温度随经度变化不显著的结论。由于研究的温度特性主要针对平流层, 且高度在 20 km 以上, 因此不用考虑大气温度随经度的变化, 水平方向主要研究温度随纬度的变化。结合 NCEP 提供的大气温度数据变化特性, 给定任意时间(天)和空间(经、纬度), 以规范展开的形式给出了全球大气温度随时间变化的模型, 大气温度随时间的变化可用傅里叶规范形式展开:

$$T = a_0 + \sum_{i=1}^N [a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t)], \quad (1)$$

式中:  $T$  为大气温度;  $t$  为时间;  $\omega$  为模型周期;  $a_0$ 、 $a_i$  和  $b_i$  为需要拟合求得的未知系数; 函数拟合过程中  $N$  值为

4 时, 模型拟合结果与真实大气变化趋势相符。在全球大气温度模型构建过程中, 利用式(1)拟合任意纬度下对应的温度随时间变化的系数。为进一步提高模型精度, 对垂直方向等压面间进行拉格朗日插值<sup>[12]</sup>、水平方向进行双三次插值, 对拟合得到的已知函数进行插值得到大气温度随时间和纬度的变化关系为

$$T = T_m - \frac{\varphi_m - \varphi}{\varphi_m - \varphi_{m-1}} (T_m - T_{m-1}), \quad (2)$$

式中:  $T_m$  和  $T_{m-1}$  为对应两个纬度用来插值的温度随时间变化的函数;  $\varphi_m$  和  $\varphi_{m-1}$  为给定的纬度值;  $\varphi$  为模型输入的某区域的纬度值。利用式(2)拟合不同等压面、不同纬度下温度随时间的变化, 假设第 1 层等压面、纬度  $\varphi_1 = 0^\circ$  时对应的大气温度随时间的变化为

$$T_0 = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t)], \quad (3)$$

纬度  $\varphi_2 = 10^\circ$  对应的温度随时间的变化为

$$T_{10} = a_0 + \sum_{i=1}^4 [a_i \cos(i\omega t) + b_i \sin(i\omega t)]. \quad (4)$$

利用拉格朗日插值计算纬度  $0^\circ \sim 10^\circ$  范围内大气温度随时间变化模型为

$$T_s = T_{10} - \frac{\varphi_2 - \varphi}{\varphi_2 - \varphi_1} \cdot (T_{10} - T_0), \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  取  $0^\circ \sim 10^\circ$  之间的任意纬度值;  $T_s$  为任意  $\varphi$  对应的温度值。图 1 所示为大气温度时空变化模型拟合结果。

如图 1 所示, 选取平流层的高度研究大气温度随水平方向和时间变化的变化, 图 1(a) 拟合结果的相对误差为 1.9%, 平均绝对误差为 1.86 K。图 1(b) 拟合结果的相对误差为 2.0%, 平均绝对误差为 3.38 K。平流层 1~13 层高度的温度随纬度变化的拟合结果平均误差为 0.94%, 温度随日期变化的拟合结果平均误差为 2.63%。由于温度随垂直高度的变化规律较单一, 因此研究温度的垂直分布可以在研究其水平变化的基础上对垂直方向进行拉格朗日插值。

### 3.2 大气压强模型

NCEP 大气参数按照等压面进行分层, 假设大气压强模型表达式符合  $P = ae^{bh}$  的函数形式并对系数进行拟合, 拟合可得大气压强模型为

$$P = 1.273 \times 10^5 e^{-0.1633h}. \quad (6)$$

由图 2 可以看出, 气压随高度的增加而减小。越往上空气越少且越来越稀薄, 因此大气压也越来越小。由于大气压强随高度的变化形式比较单一, 利用简单的指数函数就可以拟合压强随高度的变化, 因此不需要使用形式复杂的函数进行拟合。

### 3.3 大气密度时空变化模型

在研究星光大气折射的过程中, 大气密度是不可避免的一个重要问题<sup>[13-14]</sup>。传统大气密度建模过程中, 假设空气在垂直方向上受的气体压力与重力平衡, 随着海拔高度升高, 大气各个成分的密度按照不同速

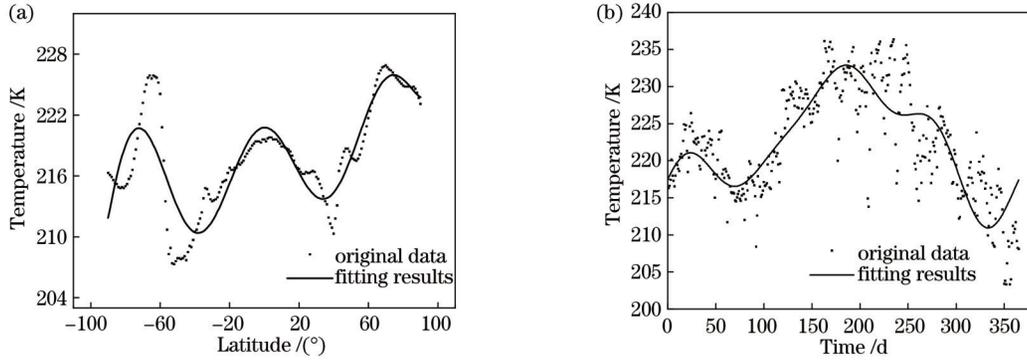


图 1 大气温度时空变化模型拟合结果。(a)温度随纬度变化;(b)温度随日期变化

Fig. 1 Fitting results of spatiotemporal variation model of atmospheric temperature. (a) Temperature varies with latitude; (b) temperature varies with date

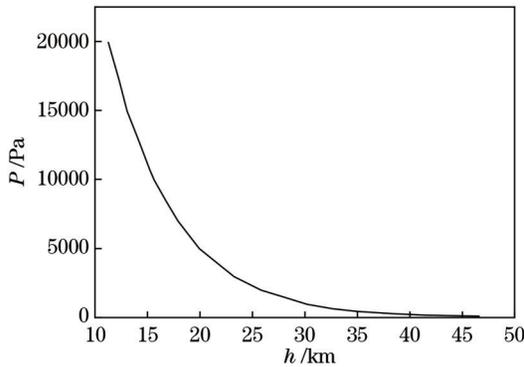


图 2 压强分布模型

Fig. 2 Pressure distribution model

率在减少。依据理想气体定律:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M}, \quad (7)$$

而大气密度并非理想气体,这与复杂的大气(气压、温度、湿度等)变化有关,通常不会直接测得,且传统的折射经验模型都是基于球形大气假设近似得到的,认为在同一海拔高度、不同区域处的密度相同,即传统的大气密度模型是通过大气数据库提供的数据拟合而成,且只能描述密度随高度呈指数增长的变化。虽然满足形式简单、便于计算的需求,但和实际的大气密度变化仍存在很大的偏差,如不同区域、不同时间的实际大气密度是不同的。由于高分辨率的大气密度实际测量难度较大,为满足高分辨率大气密度模型的要求,可以利用大气温度时空变化模型和压强模型间接求得。即按照 NCEP 大气分层原理对大气密度进行分层和格点分区,建立三维大气密度模型,将传统的指数函数描述的大气密度视为随时间和空间变化的函数,将时间和纬度引入偏真实的密度模型中。相比数据库中的离散数据,三维大气密度模型的优势在于它能够利用函数进行表示,在实际的导航系统使用过程中可以直接进行实时的计算和调用,从而实现系统的实时仿真验证。图 3 所示为地球密度格点分区图。

通过考虑多维度因素的变化,从而减小因密度水

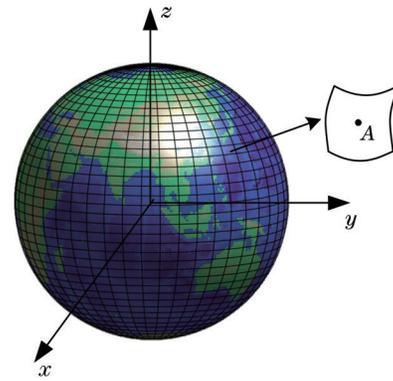


图 3 地球密度格点分区图

Fig. 3 Earth density grid zoning map

平变化导致折射模型不够精确的问题,提高星光大气折射导航精度。如图 3 所示,对全球进行网格划分,选取图中任一网格区域,研究飞行器飞过任意区域的大气分布只需要将对应的分区 NCEP 数据利用模型进行计算得到该区域的大气密度数据,由于网格划分为经纬度  $1^\circ \times 1^\circ$ ,若需要更精确的数值,可以通过插值得到 A 点的值。格点分区的思想充分考虑了密度的三维空间分布,因此较传统单一的方法计算的密度更加接近该区域真实大气密度,从而提高导航精度。三维密度模型表示为

$$\rho(h, \lambda, L) = p(h, \lambda, L)M/RT(h, \lambda, L), \quad (8)$$

式中: $p$ 为不同等压面层气压; $M$ 为气体摩尔质量, $M = 28.97 \text{ km/mol}$ ; $R$ 为比例系数, $R = 287$ ; $T$ 为对应的经纬度和高度下的温度; $\rho$ 为区域三维密度。图 4 所示为大气密度时空变化模型拟合结果。

如图 4 所示,选取平流层的高度研究大气密度随水平方向和时间变化的变化,图 4(a)拟合结果的相对误差为 1.19%,图 4(b)拟合结果的相对误差为 2.40%。平流层 1~13 层高度的密度随纬度变化的拟合结果平均误差为 0.99%,密度随日期变化的拟合结果平均误差为 4.39%。由于在地球引力的作用下,大气向低层密集,地面附近空气密度最大,并且密度会随着高度的增

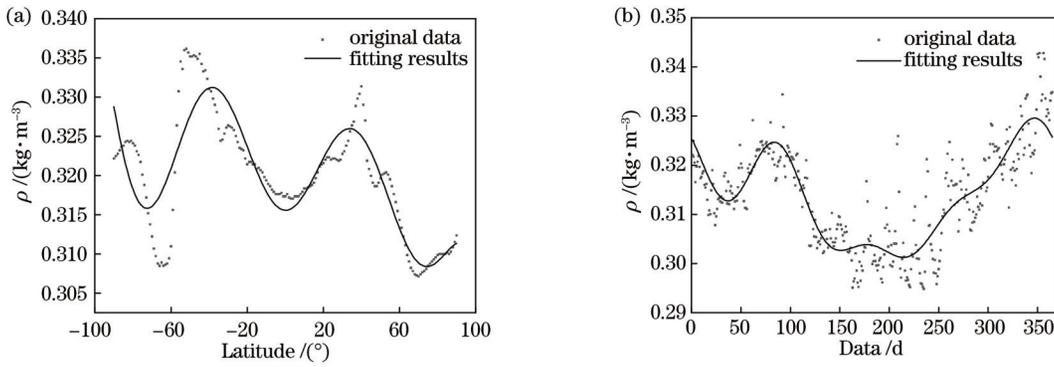


图 4 大气密度时空变化模型拟合结果。(a)密度随纬度变化;(b)密度随日期变化

Fig. 4 Fitting results of spatiotemporal variation model of atmospheric density. (a) Density varies with latitude; (b) density varies with date

长不断降低,在实际计算飞行器飞行路径上的密度值时只需要利用模型求解区域大气密度,相比于平均大气密度的精度更高。

#### 4 星光大气折射模型修正

由于传统星光大气折射模型没有考虑大气参数随水平和时间的变化。如果按照星光穿越平流层大气的真实路径建立折射方程,那么该模型将是大气密度、纬度、高度和时间等多种参数的方程。虽然大多数研究没有给出星光大气折射的时空变化模型,也很少涉及到位置或时间的变化,但是构建了很多随海拔高度迅速变化的星光大气折射模型。基于以上相关研究基础,结合星光在大气中的传播路径和大气参数随水平

和时间的变化,利用大气参数时空变化模型建立星光大气折射时空变换模型。

星光在大气层中传播时,大气折射率与真空状态下的数值为 1 的折射率接近,实际的大气折射率并不是连续变化的,而是折射率存在一定的梯度变化,梯度的变化会产生大气折射,光线在短距离传输时,折射现象并不明显,然而星光穿过大气的距离很远,此时折射就会对导航产生一定的误差<sup>[15]</sup>。由于大气折射率变化很小,变化量接近  $3 \times 10^{-4}$ ,因此研究折射率的变化时,引入折射度的概念,数值分析时折射度等于折射率减 1,折射度的单位用 ppm 表示,即  $10^{-6}$ 。在可见光/近红外波段,考虑水汽、波长的折射率计算公式采用 Stone 等在 2001 年对 Edlen 结果的修正公式:

$$\begin{cases} n_{\text{tpe}} - 1 = n_{\text{tp}} - 1 - 10^{-6} \frac{292.75}{T + 273.15} e \left[ 3.7345 \times 10^{-4} - 4.01 \times 10^{-6} \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 \right] \\ n_{\text{tp}} - 1 = \frac{P n_s - 1}{96095.43} \frac{1 + P(0.601 - 0.00972T) \times 10^{-8}}{1 + 0.0036610T} \\ n_s - 1 = 10^{-6} \left[ 83.4254 + \frac{24061.47}{130 - (1/\lambda)^2} + \frac{159.98}{38.9 - (1/\lambda)^2} \right] \end{cases}, \quad (9)$$

式中: $e$ 为水汽压; $\lambda$ 为波长, $\mu\text{m}$ ; $P$ 为气压; $T$ 为温度。将基于 NCEP 数据的大气温度模型式(5)和大气压力模型式(6)代入式(9),得:

$$\begin{cases} n_{\text{tpe}}(h, \lambda, L) = 1 + n_{\text{tp}}(h, \lambda, L) - 10^{-6} \frac{292.75}{T(h, \lambda, L) + 273.15} e \left[ 3.7345 \times 10^{-4} - 4.01 \times 10^{-6} \left( \frac{1}{\lambda} \right)^2 \right] \\ n_{\text{tp}}(h, \lambda, L) = 1 + \frac{P(h, \lambda, L) n_s}{96095.43} \frac{1 + P(h, \lambda, L) [0.601 - 0.00972T(h, \lambda, L)] \times 10^{-8}}{1 + 0.0036610T(h, \lambda, L)} \\ n_s = 1 + 10^{-6} \left[ 83.4254 + \frac{24061.47}{130 - (1/\lambda)^2} + \frac{159.98}{38.9 - (1/\lambda)^2} \right] \end{cases}, \quad (10)$$

式中: $P(h, \lambda, L)$ 为不同高度、不同经纬的气压; $T(h, \lambda, L)$ 为不同高度、不同经纬的温度。

##### 4.1 基于时空变化模型的星光传播路径计算

由于 NCEP 大气参数数据是以经纬度和高度表示

的,因此需要研究球坐标系下的路径方程。星光折射基础方程<sup>[16]</sup>为

$$\frac{ds}{ds} = -\frac{1}{n} s \times (\nabla n \times s), \quad (11)$$

式中:  $\nabla n$  为光线方向矢量; 负号代表方向。因此, 折射方向的偏折方向为

$$s_a - s_0 = - \int \frac{1}{n} s \times (\nabla n \times s) ds. \quad (12)$$

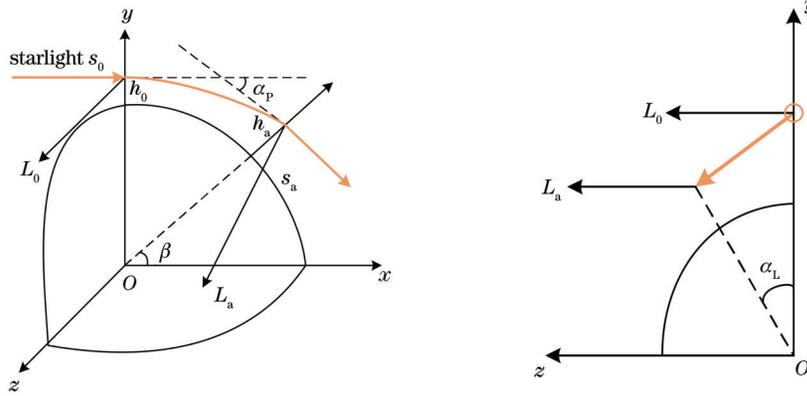


图 5 球坐标系下的星光传输  
Fig. 5 Starlight transmission in spherical coordinate system

由于折射角很小, 有近似关系:

$$\frac{ds}{ds} \approx \frac{ds}{dx} = -\frac{1}{n} \times (\nabla n \times x) = -\frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial h} \sin \beta i_y + \frac{\partial n}{\partial s} \cos \beta i_y + \frac{\partial n}{\partial L} i_z \right), \quad (13)$$

同样地, 有近似关系:

$$s_0 = i_x s_a \approx i_x + \alpha_p i_y + \alpha_L i_z. \quad (14)$$

假设星光在地心坐标系中的位置分量为  $(x, y, z)$ ,  $x$  轴的经纬度为  $(0, 0)$  (图 5), 则星光位置的经度、纬度和高度分别为

$$\begin{cases} \lambda = \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right), \lambda \in [0 \sim 360^\circ] \\ L = \arcsin\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right), L \in [-90^\circ \sim 90^\circ] \\ h = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - r_e \end{cases}. \quad (15)$$

星光位置方向矢量为

$$r = (x, y, z)^T. \quad (16)$$

经纬度方向的方向矢量为

$$\lambda = (-y, x, 0)^T, \quad (17)$$

$$L = \lambda \times r = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -x \\ 0 & 0 & -y \\ x & y & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -xz \\ -yz \\ x^2 + y^2 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

在高度、经度和纬度上的折射率为

$$n_h = k_{G-D} \frac{\partial \rho}{\partial h}, \quad n_\lambda = k_{G-D} \frac{\partial \rho}{\partial \lambda}, \quad n_L = k_{G-D} \frac{\partial \rho}{\partial L}. \quad (19)$$

总密度的变化率可以写为

$$\nabla n = n_h \frac{r}{|r|} + n_\lambda \frac{\lambda}{|\lambda|} + n_L \frac{L}{|L|}. \quad (20)$$

计算得到的星光大气折射路径如图 6 所示。

图 6 中同时也对星光折射路径和未经折射路径进

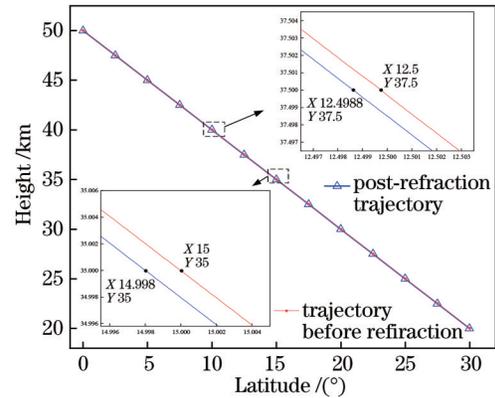


图 6 星光折射路径  
Fig. 6 Starlight refraction trajectory

行了对比。假设星光沿经度方向传输, 飞行器的初始位置为 20 km, 按照 NCEP 大气参数平流层的分层方式计算星光折射路径在不同高度和纬度处的大气密度, 从而确定不同格点的折射率大小, 利用光线迭代方法计算出真实折射路径, 并与未经折射的星光路径进行比较, 计算得到在高度范围 20~50 km 之间, 星光在纬度和高度方向上产生的总折射角为 689.9''。

#### 4.2 基于时空变化模型的星光大气折射模型

传统星光大气折射模型只考虑了星光传输过程中单点的大气参数模型, 且大气参数都是按照指数形式拟合得到, 不能代表大气的复杂空间变化<sup>[17]</sup>。由于星光在大气中的传输路径很长, 会跨越不同的纬度, 单点的大气参数模型不能代表整个大气的空间分布, 基于指数形式的模型假设同样会存在较大的误差, 因此需要基于大气参数时空变化模型和星光的传输路径建立更精确的星光大气折射时空变化模型。星光在大气中的折射路径是基于大气分层计算的, 因此首先给出星光大气折射分层原理图, 如图 7 所示。其中  $\theta_m$  的表达式为

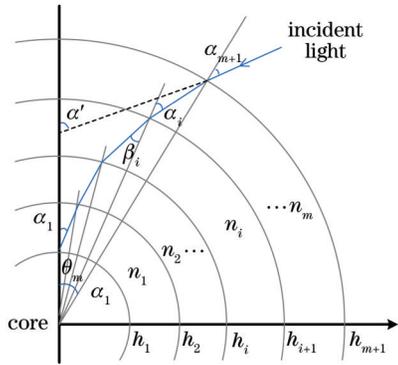


图 7 星光大气折射分层示意图

Fig. 7 Schematic diagram of refraction stratification of starlight atmosphere

$$\theta_m = \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i). \quad (21)$$

星光在整个传输路径上,星光传输方向矢量  $s$  与矢径  $r$  的矢量乘积为常数,结合 Snell 折射定律,有:

$$\alpha_i = \arcsin(n_i h_i \sin \alpha_1 / n_i h_i), \quad (22)$$

$$\beta_i = \arcsin(n_i h_i \sin \alpha_1 / n_i h_{i+1}). \quad (23)$$

将式(22)和式(23)代入式(21)中得到:

$$\alpha_m = \left[ \arcsin(n_1 h_1 \sin \alpha_1 / n_i h_i) - \arcsin(n_1 h_1 \sin \alpha_1 / n_i h_{i+1}) \right]. \quad (24)$$

则大气折射角为

$$R = \alpha_{m+1} + \theta_m - \alpha_1, \quad (25)$$

即:

$$R = \sum_{i=2}^{m+1} \arcsin(n_1 h_1 \sin \alpha_1 / n_i h_i) - \sum_{i=2}^{m+1} \arcsin(n_1 h_1 \sin \alpha_1 / n_i h_{i+1}), \quad (26)$$

式中,  $\alpha_1 = 90^\circ$  时对应的高度  $h_1$  即为切点高度,由于光线切点高度  $h_t$  与飞行器视高度  $h_a$  相关,可间接转化为折射角与视高度之间的关系为

$$h_a \approx (n_i - 1)(h_t + R_e) + h_t, \quad (27)$$

则有:

$$R = 2 \left\{ \sum_{i=2}^{m+1} \arcsin[(h_a + R_e) / n_i h_i] - \sum_{i=1}^m \arcsin[(h_a + R_e) / n_i h_{i+1}] \right\}. \quad (28)$$

利用式(28)结合星光在大气中的传播路径,选取不同高度、不同纬度的大气参数值,如图8所示为根据折射路径选取不同格点的大气参数数据原理图。

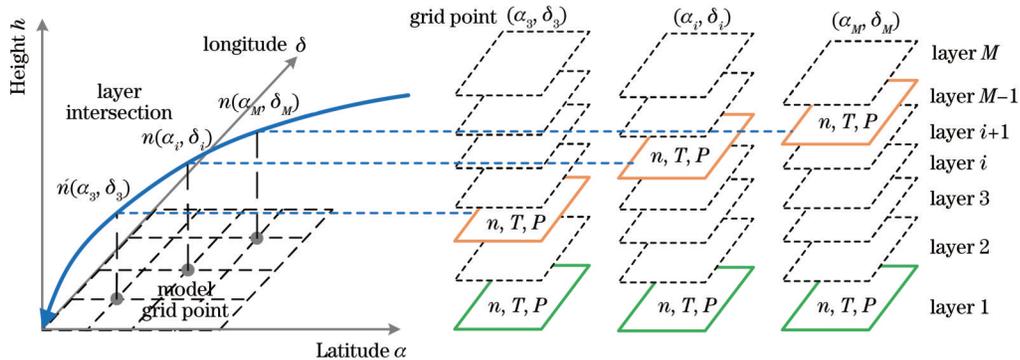


图 8 选取不同格点的大气参数数据

Fig. 8 Selecting atmospheric parameter data for different grid points

根据图8所示的数据选取方法,设置不同时间和不同纬度计算折射角随高度的变化,以1月15日世界

时00:00和7月15日世界时00:00为例,计算不同纬度的星光大气折射角,计算结果如图9所示。

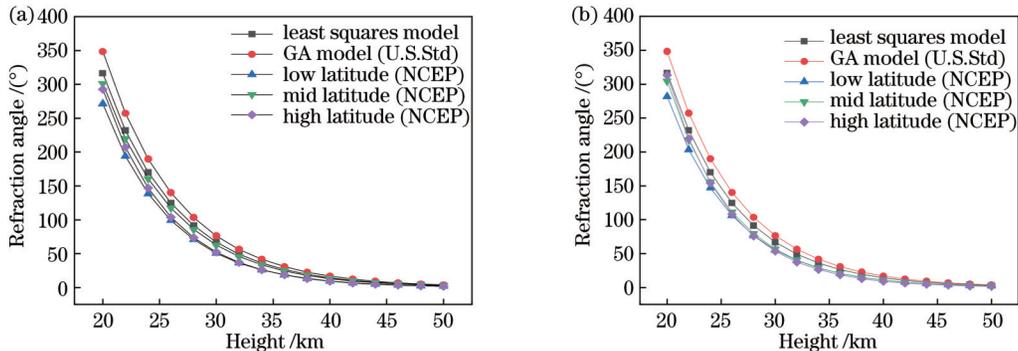


图 9 不同时间、不同纬度折射角随高度的变化。(a) 1月15日世界时00:00;(b) 7月15日世界时00:00

Fig. 9 Refraction angle varies with height at different time and latitudes. (a) 00.00 UTC, January 15; (b) 00.00 UTC, July 15

由图 9 可以得到,1月15日 00:00 低纬度、中纬度和高纬度和传统星光大气折射模型之间的误差分别为:37.64%、9.79% 和 28.78%;7月15日 00:00 低纬度、中纬度和高纬度和传统星光大气折射模型之间的误差分别为:27.95%、26.89% 和 39.10%。由相对误差分析可以看出,同一高度、不同纬度对应的大气折射角之间有偏差,由于传统模型是基于 USSA 参数数据建立的,代表了中纬度的平均大气变化情况,因此利用 NCEP 大气参数数据的中纬度拟合结果和传统模型的相对误差最小。总体来说,大气折射模型不能只考虑大气参数在垂直方向上的变化,因为水平方向随纬度的变化偏差也很大,并且在相同高度和纬度条件下,时间不同,折射角也不同。

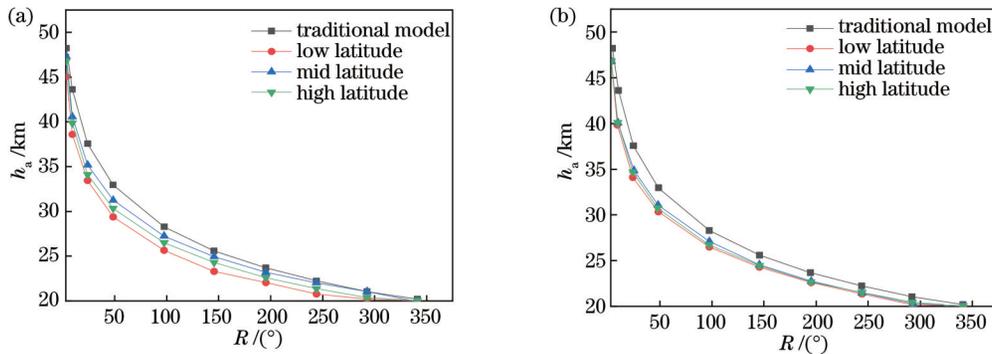


图 10 传统星光大气折射模型和星光大气时空变化折射模型计算得到的视高度。(a) 1月中旬;(b) 7月中旬

Fig. 10 Visual heights calculated by traditional starlight atmospheric refraction model and starlight atmospheric spatiotemporal variation refraction model. (a) Mid January; (b) mid July

由图 10 可以看到,结合星光大气折射时空变化模型计算得到的飞行器视高度与传统模型计算得到的视高度存在差异,在上述设置的仿真条件下:1月中旬低纬度、中纬度和高纬度与传统模型的相对偏差分别为 5.39%、2.91% 和 9.37%;7月中旬低纬度、中纬度和高纬度与传统模型的相对偏差分别为 5.95%、4.83% 和 5.15%。根据仿真结果分析可知,1月的折射影响效果比7月更强。由于修正后的模型考虑了大气的水平分布和随时间的变化,更接近大气的真实状况,因此对提高星光大气导航精度能够起到修正作用。

由图 1(a)可知,在中低纬度温度拟合误差较小,而在高纬度最大温度拟合误差约为 7.39 K,但拟合的整体平均温度误差为 1.86 K,虽然在高纬度区域拟合误差会导致折射率误差累积,但星光大气折射角误差在 1.04" 范围内。

## 5 结 论

本文利用高分辨率 NCEP 逐日再分析大气参数数据建立了大气参数时空变化模型,考虑时间、水平和垂直方向大气参数对星光大气折射的影响,给出了模型仿真结果,计算了星光在大气中的传输路径,基于大气

## 4.3 视高度修正

利用式(29)中的星光大气折射角  $R$  反演得到星光的视高度为

$$h_a = f(n_i, h_i | R), \quad (29)$$

式中: $n_i$  为高度为  $h_i$  时的折射率; $h_i$  为高度。

在大气参数时空变化模型的基础上,将建立的星光大气时空变化折射模型与传统的星光大气折射模型进行比较,通过数据仿真分析可知,纬度越高,密度偏差越大,折射影响效果越明显,特别是在1月(冬季),为了与不同月份进行对比,仿真条件分别设置为:1月中旬和7月中旬,星光沿经度方向传输,光线传输切点处的纬度分别取低纬、中纬和高纬。当折射角范围为  $R = 3'' \sim 350''$  时,根据星光大气折射时空变化模型计算得到的视高度如图 10 所示。

参数时空变化模型建立了星光大气折射时空变化模型,计算了不同时间和不同纬度下折射角随高度的变化,通过分析得到不同时间和不同纬度下折射角随高度的变化均存在偏差。结果表明,大气温度时空变化模型拟合实测数据时的相对误差小于 2%,平均绝对误差小于 3.5 K,大气密度拟合的相对误差小于 4.39%,最终利用折射角反演得到视高度,低纬度、中纬度和高纬度的视高度与传统视高度之间的相对偏差为 6.27%、5.10% 和 5.42%。由于修正的模型考虑了大气的空间和时间变化,因此仿真结果更接近真实大气变化。

## 参 考 文 献

- [1] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 103-108.  
Fang J C, Ning X L, Tian Y L. Principle and method of spacecraft autonomous astronomical navigation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 103-108.
- [2] Dupeyroux J, Viollet S, Serres J R. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2019, 117(C): 40-56.
- [3] 刘禹, 陈浩, 张丽敏. 构造折射星场方法用于星光折射导航仿真的研究 [J]. 上海航天, 2018, 35(1): 43-47.  
Liu Y, Chen H, Zhang L M. Artificial refracted star field

- method in simulation of autonomous navigation by stellar refraction[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(1): 43-47.
- [4] 詹先军, 王新龙, 胡晓东, 等. 大气层内载体星光折射间接敏感地平定位可行性分析[J]. 航空兵器, 2022, 29(1): 107-112.  
Zhan X J, Wang X L, Hu X D, et al. Feasibility analysis of stellar refraction indirect horizon sensing positioning on the carrier inside the atmosphere[J]. Aero Weaponry, 2022, 29(1): 107-112.
- [5] 伍雁雄, 张新, 张继真, 等. 星光折射自主导航星敏感器及光学系统设计研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 222001.  
Wu Y X, Zhang X, Zhang J Z, et al. Research on the autonomous star sensor based on indirectly sensing horizon and its optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 222001.
- [6] Gounley R, White R, Gai E. Autonomous satellite navigation by stellar refraction[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1984, 7(2): 129-134.
- [7] Louedec K. Atmospheric effects in astroparticle physics experiments and the challenge of ever greater precision in measurements[J]. Astroparticle Physics, 2015, 60: 54-71.
- [8] Ogunsua B O, Ojo J S, Adediji A T. Atmospheric chaoticity and complexity from radio refractivity derived from Akure station [J]. Advances in Space Research, 2018, 62(7): 1690-1701.
- [9] 刘一博, 沈作军, 张向宇. 一种区域参考大气密度的建模与应用方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(10): 2079-2088.  
Liu Y B, Shen Z J, Zhang X Y. A method for range reference atmospheric density modeling and application[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(10): 2079-2088.
- [10] Zhang S X, Wang K D. Error analysis of typical starlight refraction model[C]//2020 European Navigation Conference (ENC), November 23-24, 2020, Dresden, Germany. New York: IEEE Press, 2021.
- [11] Liu H C, van Oosterom P, Hu C F, et al. Managing large multidimensional array hydrologic datasets: a case study comparing NetCDF and SciDB[J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 207-214.
- [12] 袁建国, 李阳旭, 左智航. CO-OFDM 系统中分块拉格朗日插值的 CKF 相位噪声补偿算法[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1606003.  
Yuan J G, Li Y X, Zuo Z H. CKF phase noise compensation algorithm of block Lagrangian interpolation for CO-OFDM systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1606003.
- [13] Schiemenz F, Uitzmann J, Kayal H. Least squares orbit estimation including atmospheric density uncertainty consideration[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(12): 3916-3935.
- [14] 郎开. 基于星光折射间接敏感地平的捷联惯性/天文组合导航方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 8.  
Lang X K. Research on the SINS/CNS integrated navigation method based on stellar refraction sensing earth's horizon indirectly[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 8.
- [15] 杨明珊, 周慧妍, 刘璐, 等. 对流层大气折射率剖面模型研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(7): 0701001.  
Yang M S, Zhou H Y, Liu L, et al. Study on tropospheric atmosphere refractive index profile model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(7): 0701001.
- [16] Fischbach F F, Graves M E, Hays P, et al. Atmospheric sounding by satellite measurements of stellar refraction: technical report[R/OL]. [2006-12-01]. <http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/4900/5/bac2098.0001.001.pdf>.
- [17] 武鹏飞, 宋峰, 魏合理. 星光导航大气折射模型及数据模式研究[J]. 现代防御技术, 2017, 45(2): 6-13.  
Wu P F, Song F, Wei H L. Atmospheric refraction model and data mode for starlight navigation[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(2): 6-13.

## Corrected Starlight Atmospheric Refraction Model Based on NCEP Database

Yang Yufeng<sup>1,2\*\*</sup>, Song Ningning<sup>1\*</sup>, Han Xiang<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>Shaanxi Civil-Military Collaboration Key Laboratory of Intelligence Coordination Networks, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China

### Abstract

**Objective** Space vehicles, deep space explorers, long-endurance aircraft, and other equipment have increasingly high requirements on navigation accuracy. In this aspect, a major issue to solve is how to improve the space navigation accuracy of aircraft, achieve fully autonomous interference-free navigation, and reduce the cost of expensive equipment. Starlight atmospheric refraction navigation technology neither involves the transmission and exchange of information with the outside world nor depends on the navigation and positioning by ground equipment. It is thus characterized by remarkable concealment and strong resistance to the external environment. However, due to the complex atmospheric environment in the near-Earth space, the bending of starlight toward the center of the Earth after entering the atmosphere will affect the accuracy of starlight atmospheric refraction navigation. For this reason, building an accurate starlight atmospheric refraction model is crucial for improving navigation accuracy. In related studies of starlight atmospheric refraction models, analysis is mostly based on the data from the United States Standard Atmosphere (USSA) parameter model, the COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA) model, and the Neutral Atmosphere Empirical Model-2000 (NRLMSISE-00). However, the data from these universal models have a low resolution. Therefore, a corrected starlight atmospheric

refraction model is constructed using the data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) in this paper. NCEP data are recorded four times a day to give due consideration to the effect of the day and night temperature difference, and the resolution is  $1^\circ \times 1^\circ$  in latitude and longitude. The model built on this basis will be more accurate than the traditional models with CIRA as the typical representative.

**Methods** The accuracy of the commonly used USSA and CIRA atmospheric reference models is low. To solve this problem, this study builds a spatiotemporally varying atmospheric parameter model using the high-resolution NCEP atmospheric parameter data and employing the Fourier interpolation algorithm. The atmospheric refractive indices at different altitudes, latitudes, and longitudes are used to calculate the propagation path of starlight in the atmosphere, and a corrected starlight atmospheric refraction model is constructed.

**Results and Discussions** The comparison among the corrected starlight atmospheric refraction model and the existing models shows that the spatiotemporally varying atmospheric temperature model developed in this study has a relative error smaller than 2% and an average absolute error of 1.86 K when fitting measured data (Fig. 1) and a relative error below 4.39% when fitting the atmospheric density (Fig. 4). Moreover, the relative error between the refractive spatiotemporal model and the traditional single-point model at low, middle, and high latitudes in January is 37.64%, 9.79%, and 28.78%, respectively [Fig. 9(a)]. The relative error between the two models at low, middle, and high latitudes in July are 27.95%, 26.89%, and 39.10%, respectively [Fig. 9(b)]. Therefore, the proposed starlight atmospheric refraction model considering spatiotemporal variations has higher theoretical accuracy.

**Conclusions** In this study, high-resolution data from the NCEP are selected for the reanalysis of the atmospheric parameter data. The reanalysis data are further used to build a spatiotemporally varying atmospheric parameter model. Model simulation results are presented, with due consideration given to the effects of temporal, horizontal, and vertical atmospheric parameters on starlight atmospheric refraction. The propagation path of starlight in the atmosphere is calculated, and the corrected starlight atmospheric refraction model is constructed on the basis of the spatiotemporally varying atmospheric parameter model. The changes in the refraction angle with height at different time, longitudes, and latitudes are calculated, and the deviations of the refraction angle with height at different time, longitudes, and latitudes are obtained through analysis. The results show that the relative errors between the refractive spatiotemporal model and the traditional single-point model at low, middle, and high latitudes in January are 37.64%, 9.79%, and 28.78%, respectively. The relative errors between the two models at low, middle, and high latitudes in July are 27.95%, 26.89%, and 39.10%, respectively. Finally, the apparent height is obtained by inverting the refraction angle, and its relative deviations from the traditional apparent height at low, middle, and high latitudes are 6.27%, 5.10%, and 5.42%, respectively. Because the corrected model takes into account the spatial and temporal variations in the atmosphere, the simulation results are closer to the changes in the real atmosphere.

**Key words** atmospheric and ocean optics; the National Centers for Environmental Prediction atmospheric parameter data; Fourier interpolation; spatiotemporally varying refraction model