0254-6124/2022/42(3)-0366-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LUO Aobo, LONG Yanfei, CHEN Lihu, FANG Hanxian, YU Sunquan, Ni Jiushun. TEC Measurement Method Based on Space-based AIS Data (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 366–375. DOI:10.11728/cjss2022.03.210325037

基于星载 AIS 数据的 TEC 测量方法

罗坳柏[1] 龙燕飞[2] 陈利虎[1]
方涵先[2] 余孙全[1] 倪久顺[1]

1(国防科技大学空天科学学院 长沙 410073)

2(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘 要 基于星载船舶自动识别系统（AIS），提出一种计算全球电离层电子总含量（TEC）的方法。通过在卫星上搭载两个相互垂直的线极化天线，测量 AIS 信号穿过电离层时的法拉第旋转角，再通过法拉第旋转角与 TEC 的关系估算 TEC。基于天拓五号卫星的 AIS 数据进行了实验验证，并分析了硬件设备误差和观测参数误差对结果造成的影响。实验表明，本方法测量出的 TEC 值与基于全球定位系统（GPS）测量的 TEC 值差值平均为 0.762 TECU，证明了此方法的可行性。与现有的 TEC 测量方法相比，该方法只需利用现有的 AIS 系统，无需部署地面站，可大幅提高数据更新速率。

关键词 星载 AIS，法拉第旋转角，TEC，卫星

中图分类号 P352

TEC Measurement Method Based on Space-based AIS Data

LUO Aobo[1] LONG Yanfei[2] CHEN Lihu[1]
FANG Hanxian[2] YU Sunquan[1] Ni Jiushun[1]

1(*College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha* 410073)

2(*Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha* 410073)

Abstract A method to calculate the Total Electron Content (TEC) of the global ionosphere is proposed based on the Automatic Identification System (AIS) for ships on board. Specifically, The Faraday rotation angle of AIS signal passing through the ionosphere is measured by carrying two mutually perpendicular linearly polarized antennas on the satellite, and then estimate TEC by the relationship between the Faraday rotation angle and the TEC. The experimental validation based on the AIS data from Tiantuo V satellite is carried out, and the effects of hardware equipment errors and observation parameter errors on the results are analyzed. Experiments show that the difference between

2021-03-25 收到原稿，2022-01-07 收到修定稿

E-mail：chenlihu05@nudt.edu.cn

the TEC value measured by the method and by the Global Positioning System (GPS) is 0.762 TECU on average, which proves the feasibility of this method. Compared with the existing TEC measurement methods, this method only needs to use the existing AIS system without deploying ground stations, which can significantly improve the data update rate.

Key words Space-based AIS, Faraday rotation angle, TEC, Satellite

0 引言

基于星载船舶的自动识别系统(AIS)采用开放式广播技术,周期性播发自身位置、速度等信息,广泛分布于全球。近年来,星载 AIS 发展迅速,目前能够利用卫星平台在全球范围内实时接收信号。AIS 信号从船舶传播到卫星时会穿过地球大气层。0.1～12 GHz 频率范围的电磁波通过电离层时,可能引起信号特性改变。线极化波在电离层中传播时,由于等离子介质存在各向异性,受到地磁场的作用,极化平面将发生旋转,这种现象称为法拉第效应。

电离层电子总含量 TEC 是描述电离层形态和结构的主要参量之一,对通信、导航、地震预测等电离层相关技术具有重要影响。目前常用的 TEC 测量平台有星载广播式自动相关监视技术 ADS-B(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)、星载合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar)和全球定位系统 GPS(Global Positioning System)。常用的 TEC 测量理论有法拉第旋转法、差分群时延法和差分多普勒法。文献 [1] 以 GPS 卫星为测量平台,提出了一种双频时延与相位联合的 TEC 测量方法。在此基础上,文献 [2] 进一步提出三频时延与相位联合的 TEC 测量方法,提高了相位积分常数的测量精度。文献 [3,4] 以 6 颗卫星组成的 COSMIC 星座为测量平台,采用 GPS 掩星技术进行 TEC 测量。但是基于 GPS 建立的电离层模型的时间和空间分辨率都相对较差,时间分辨率一般为 2 h,空间分辨率在经纬度方向上分别为 5°和 2.5°[5]。近年来,低轨卫星在提高电离层模型精度方面发挥了重要作用[6]。文献 [7] 使用海军卫星导航系统 NNSS(Navy Navigation Satellite System)数据进行 TEC 测量。文献 [8–10] 证明了利用低频 SAR 数据进行 TEC 测量的可行性。文献 [11,12] 以星载 ADS-B 为测量平台,采用射线追踪技术确定单个电磁波的特性,然后计算法拉第旋转角,并将其转换为沿射线路径的 TEC。文献 [13] 证明了 AIS 信号可以作为 TEC 测量的数据源。

以上提到的 TEC 测量方法需要在地面布置相关基站,这将消耗大量人力物力,并且基站存在难以在海洋、极地和荒漠等地区部署的难题。本文研究认为当使用两个相互垂直的 AIS 线极化天线接收同一个 AIS 信号时,接收到的信号功率是不同的,接收功率大小与电磁波极化面的位置有关。具体研究过程:通过两台 AIS 接收机接收功率之间的关系,计算出 AIS 信号发生法拉第旋转之后的角度,根据船舶和卫星上天线的安装位置、卫星的速度和位置信息、船舶的位置信息,计算 AIS 信号发生法拉第旋转之前的角度,通过这两个角度计算出法拉第旋转角,进而根据法拉第旋转角计算 TEC。此外,分析了接收机硬件误差和观测参数误差对结果造成的影响,并选取天拓五号卫星上的 AIS 数据进行实验验证。

1 方法原理

用于求解法拉第旋转角的卫星 AIS 载荷主要包括两台 AIS 接收机和两个垂直安装的 AIS 线极化天线,如图 1 所示。其中 AIS 一体化接收机由高灵敏度 AIS 接收模块和电源组件等组成。AIS 天线用于接收频率为 156～163 MHz 的 AIS 信号。AIS 接收机可以完成对 AIS 信号的采样、下变频、AD 采样、解调和组包,再统一传送给数传分系统,当卫星过境时,将 AIS 报文(包含时间戳、报文功率、目标原始位置)传输给地面测控站,最后由地面测控站将解析后的 AIS 数据传输给用户。

如图 2 所示,参考天拓五号卫星上 AIS 天线的安装位置,以卫星质心为原点,建立直角坐标系,记为坐标系 1。其中+z_1 指向地心,+x_1 指向卫星飞行方向,y_1 轴的方向遵循右手定则。两个 AIS 天线分别安装在±x_1 面上,与 z_1 轴成 45°安装。其中 AIS 天线 1 在−x_1 面,AIS 天线 2 在+x_1 面上。

使用卫星工具包 STK(Satellite Tool Kit)得到

的卫星位置和速度以及从 AIS 报文中读取的船舶相关位置坐标是在 WGS-84 坐标系下显示的。由于下文的计算基本都是在地心地固坐标系下进行的，因此这里需将这些信息转换在图 2 中的地心地固坐标系下表示。以 WGS-84 椭球为基准，空间中某一点的坐标为(λ, γ, H)，通过下式可以变换到地心地固坐标系(x_2, y_2, z_2)中：

$$x_2 = (N+H)\cos\gamma\cos\lambda, \tag{1}$$

$$y_2 = (N+H)\cos\gamma\sin\lambda, \tag{2}$$

$$z_2 = [N(1-e^2)+H]\sin\gamma. \tag{3}$$

其中，

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin\gamma}}, \tag{4}$$

$$e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}. \tag{5}$$

式中，N表示椭圆球卯酉圈的曲率半径，e表示偏心率，a表示点所在轨道半长轴，b表示点所在轨道半短轴。

如图 3 所示，为便于进行计算过程描述，将发生法拉第旋转之前的极化面记为平面 1，发生法拉第旋转之后的极化面记为平面 2，两个 AIS 天线所在的平面记为平面 3，过 AIS 天线 2 的方向向量并且与平面 3 垂直的平面记为平面 4。该方法的工作流程如图 4 所示。

1.1 AIS 报文选取

选取图 1 中接收机 A 和 B 收到的同一条 AIS 报文，可以得到船舶的经纬度信息。船舶上 AIS 天线安装位置始终垂直于船身表面。卫星的位置和速度信息可通过查询卫星星历得到。

假设在地心地固坐标系下，卫星的位置坐标为(x, y, z)，卫星速度的方向向量坐标为$\boldsymbol{v} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$，船舶的位置坐标为$(x_0, y_0, z_0)$。根据这些条件可以进一步得出：船舶上对天的 AIS 天线的方向向量$\boldsymbol{m} = (x_0, y_0, z_0)$，卫星到地心的方向向量$\boldsymbol{s} = (-x, -y, -z)$，船舶到卫星的方向向量$\boldsymbol{f} = (x-x_0, y-y_0, z-z_0)$。由空间几何关系可知，平面 1 的法向量为

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{f} \times \boldsymbol{m}, \tag{6}$$

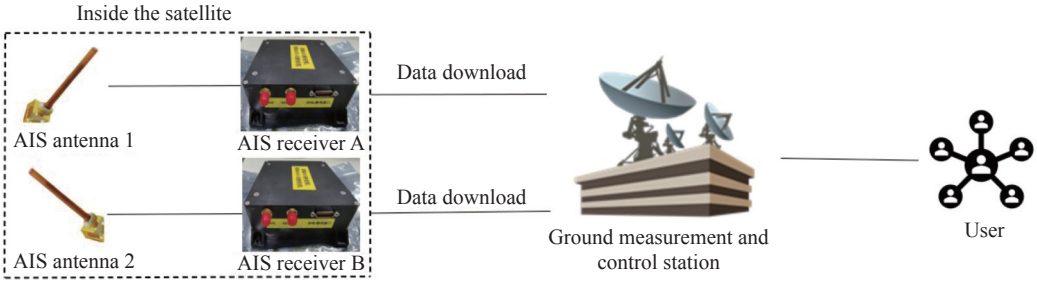


图 1 用于 TEC 测量的星载 AIS 系统

Fig. 1 Schematic diagram of the space-based AIS system for TEC measurement

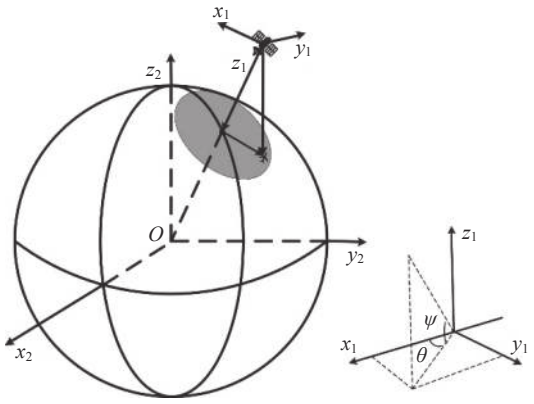


图 2 用于 TEC 测量的相关坐标系

Fig. 2 Relevant coordinate system used for TEC measurement

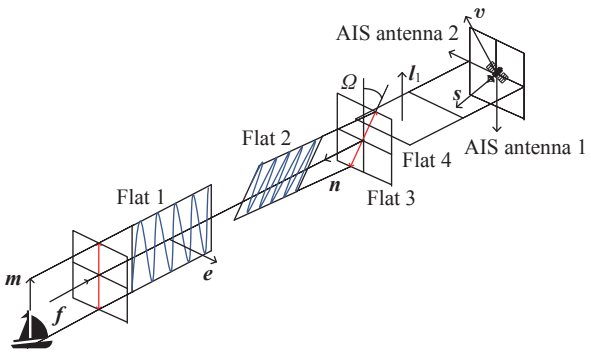


图 3 基于星载 AIS 数据的 TEC 测量方法

Fig. 3 TEC measurement method based on space-based AIS data

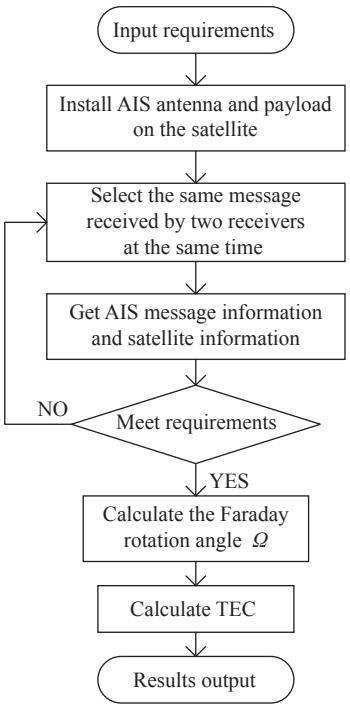


图 4 基于星载 AIS 数据的 TEC 测量方法流程

Fig. 4 TEC measurement method based on space-based AIS data

平面 3 的法向量为

$$\boldsymbol{n} = \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{s}. \tag{7}$$

根据式(6)和式(7), 可以得到平面 1 与平面 3 的夹角

$$\eta = \arccos \left| \frac{\boldsymbol{e} \cdot \boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{e}|\,|\boldsymbol{n}|} \right|. \tag{8}$$

理想条件下, AIS 信号沿船舶到卫星的方向直线传播, 可以得到平面 3 的法向量$\boldsymbol{n}$与 AIS 信号传播方向的向量$\boldsymbol{f}$的夹角

$$\beta = \arccos \left| \frac{\boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{f}|\,|\boldsymbol{n}|} \right|. \tag{9}$$

理想条件下, 船舶与卫星的位置关系如图 3 所示。根据式(8), 判断平面 1 与平面 3 是否近似垂直, 这里规定二者夹角一般与 90°相差不超过 10°, 记为条件 1。根据式(9), 判断 AIS 信号的传播方向与平面 3 的法向量是否近似平行。由于卫星与船舶存在一定的高度差, 因此这里规定二者夹角一般与 0°相差不超过 30°, 记为条件 2。如果以上两个条件都满足, 利用选中的 AIS 报文中的功率和位置信息进行法拉第旋转角计算; 如果不满足, 则重新寻找同时满足以上两个条件的报文。

1.2 法拉第旋转角计算

根据 1.1 节选中的这组两台接收机同时收到的同一条 AIS 报文, 记录其功率信息, 可以计算得出平面 2 与平面 4 的夹角

$$\theta_1 = \arctan \frac{\sqrt{10^{(P_\mathrm{A} - D_\mathrm{A} \pm \Delta P_\mathrm{A})/10}}}{\sqrt{10^{(P_\mathrm{B} - D_\mathrm{B} \pm \Delta P_\mathrm{B})/10}}}. \tag{10}$$

式中, P_A为 AIS 接收机 A 的接收功率值(单位 dBm), D_A为天线 1 的接收增益, ΔP_A为接收机 A 存在的功率误差, P_B为 AIS 接收机 B 的接收功率值(单位 dBm), D_B为天线 2 的接收增益, ΔP_B为接收机 B 上存在的功率误差。

因为发射源为同一个, 发射功率、发射天线增益和传输损耗都是一样的, 所以式(10)中的天线增益只需减去接收天线的增益。船舶位置可通过查询 AIS 报文得知, 卫星位置通过查询卫星星历得知, 卫星上 AIS 天线的方向图和安装位置事先已知, 根据这些信息可以计算得出天线方向图中的方位角和仰角, 进而查收接收天线的增益。

如图 2 所示, 为便于查找 AIS 天线的方向图, 这里的仰角指入射波与坐标系 1 中$+z_1$轴之间的夹角。$+z_1$轴的方向向量为卫星到地心的方向向量$\boldsymbol{s} = (-x, -y, -z)$, 入射波的方向为船舶到卫星的方向向量$\boldsymbol{f} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0)$, 可得到入射波相对于接收天线的仰角

$$\varphi = \arccos \frac{-\boldsymbol{f} \cdot \boldsymbol{s}}{|\boldsymbol{f}|\,|\boldsymbol{s}|}. \tag{11}$$

如图 2 所示, 为便于查找 AIS 天线的方向图, 这里的方位角指的是坐标系 1 中入射波在 Ox_1y_1 平面上的投影向量相对于$+x_1$轴偏转的角度。$+x_1$轴指向的方向为卫星速度方向$\boldsymbol{v} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$, 设$\boldsymbol{s}'$为卫星到地心的方向向量 $\boldsymbol{s}$ 的单位向量, $\boldsymbol{f}'$为船舶到卫星的方向向量$\boldsymbol{f}$的单位向量。入射波的方向向量为$\boldsymbol{f}'$, 该向量在 Ox_1y_1 平面上的投影向量为$\boldsymbol{f}_0 = \cos\varphi \boldsymbol{s}' + \boldsymbol{f}'$。入射波相对于接收天线的方位角

$$\theta = \arccos \frac{-\boldsymbol{f}_0 \cdot \boldsymbol{v}}{|\boldsymbol{f}_0|\,|\boldsymbol{v}|}. \tag{12}$$

设$\boldsymbol{v}'$为卫星速度的方向向量$\boldsymbol{v}$的单位向量。AIS 天线 1 的方向向量

$$\boldsymbol{l}_1 = \boldsymbol{v}' - \boldsymbol{s}'. \tag{13}$$

AIS 天线 1 的方向向量即为平面 4 的法向量。根据式(6)和式(13), 可以得到平面 1 与平面 4 的夹角

$$\theta_2 = \arccos\left|\frac{\boldsymbol{e}\cdot\boldsymbol{l}_1}{|\boldsymbol{e}|\,|\boldsymbol{l}_1|}\right|. \tag{14}$$

根据式(10)和式(14)可以得到 AIS 信号穿过电离层时发生的法拉第旋转角

$$\Omega = \theta_2 + \theta_1. \tag{15}$$

1.3 TEC 计算

如图 5 所示，假设电离层为单层薄壳模型，可以把接收机和卫星连线与电离层薄层的交点称为电离层穿刺点 IPP(Ionospheric Pierce Point)[14]。图 5 中 R为地球的平均半径，一般取 6371 km，天拓五号卫星的高度约为 500 km；H为电离层薄壳的高度，一般为 300～450 km[15]。

$(\theta_{\rm el},\theta_{Az})$代表卫星相对于船舶的高度角和方位角坐标。根据船舶的位置坐标(x_0,y_0,z_0)和船舶到卫星的方向向量$\boldsymbol{f}=(x-x_0,y-y_0,z-z_0)$，可以求出高度角为

$$\theta_{\rm el} = \left|90^\circ - \arccos\left(\frac{\boldsymbol{m}\cdot\boldsymbol{f}}{|\boldsymbol{m}|\,|\boldsymbol{f}|}\right)\right|. \tag{16}$$

式中，船舶的位置坐标用船舶上对天的 AIS 天线的方向向量$\boldsymbol{m}$表示。$(\varphi_{\rm lat},\varphi_{\rm lon})$为船舶的纬度和经度坐标，$(\psi_{\rm lat},\psi_{\rm lon})$为卫星的纬度和经度坐标。方位角为

$$\begin{cases} \theta_{Az} = \arctan\left[\dfrac{(\psi_{\rm lon}-\varphi_{\rm lon})\cos(\psi_{\rm lat})}{(\psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat})}\right], \\ \qquad \psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat}>0,\ \psi_{\rm lon}-\varphi_{\rm lon}>0; \\ \theta_{Az} = 180^\circ + \arctan\left[\dfrac{(\psi_{\rm lon}-\varphi_{\rm lon})\cos(\psi_{\rm lat})}{(\psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat})}\right], \\ \qquad \psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat}<0; \\ \theta_{Az} = 360^\circ + \arctan\left[\dfrac{(\psi_{\rm lon}-\varphi_{\rm lon})\cos(\psi_{\rm lat})}{(\psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat})}\right], \\ \qquad \psi_{\rm lat}-\varphi_{\rm lat}>0,\ \psi_{\rm lon}-\varphi_{\rm lon}<0. \end{cases} \tag{17}$$

z'为 IPP 处的天顶角，有

$$z' = \arcsin\left[\frac{R\cos(\theta_{\rm el})}{R+H}\right]. \tag{18}$$

为求出 IPP 处垂直方向的电离层 TEC，需先知道 IPP 处的位置信息。IPP 处纬度和经度坐标$(\phi_{\rm lat},\phi_{\rm lon})$可由下式求出：

$$\begin{cases} \phi_{\rm lat} = \arcsin\Big[\sin(\varphi_{\rm lat})\cos a + \\ \qquad \cos(\varphi_{\rm lat})\sin a\cos(\theta_{Az})\Big], \\ \phi_{\rm lon} = \varphi_{\rm lon} + \arcsin\left[\dfrac{\sin a\sin(\varphi_{\rm lat})}{\cos(\phi_{\rm lat})}\right]. \end{cases} \tag{19}$$

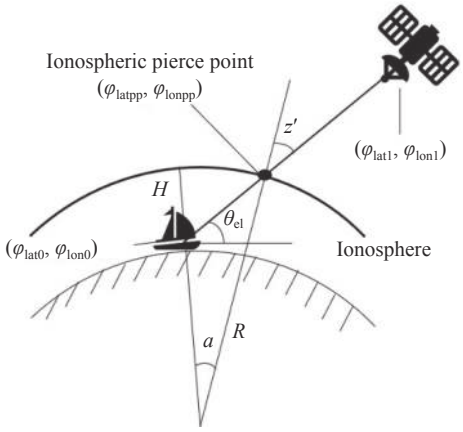


图 5 基于电离层薄层模型计算穿刺点

Fig. 5 Calculating the puncture point based on the ionospheric single layer model

式中，

$$a = \frac{\pi}{2} - \theta_{\rm el} - z', \tag{20}$$

TEC 可以写为[16]

$$\sigma_{\rm TEC} = \int_0^l n_{\rm e}{\rm d}l. \tag{21}$$

法拉第旋转角与 TEC 的关系如下：

$$\Omega = \frac{90e^3}{\pi c\,\varepsilon_0 m_{\rm e}^2 w^2}\int_0^l n_{\rm e}b_z{\rm d}l. \tag{22}$$

式中，l表示射线路径，$n_{\rm e}$表示传播路径 l 上每一点的电子密度，b_z表示传播路径 l 上每一点磁场强度在该方向上的分量，e =1.6021892×10^{-19} C 表示电子的电荷，c =3×10^5 km·s^{-1} 表示真空中的电磁波传播速度，$m_{\rm e}$=9.10956×10^{-31} kg 表示电子的质量，ε_0=8.854187817×10^{-12} C^2·N^{-1} 表示真空中的介电常数，w为 AIS 信号的角频率。

联立式(22)与式(21)，并代入已知量可得

$$\sigma_{\rm TEC} = 1.9389\times10^{10}\frac{\Omega}{B_{\rm avg}}. \tag{23}$$

由于采用电离层单层模型，式(22)中的b_z近似为 IPP 处的磁场强度$B_{\rm avg}$。这里$B_{\rm avg}$ 指平均电磁场强度。目前已知 IPP 处的纬度和经度坐标为$(\phi_{\rm lat},\phi_{\rm lon})$，$B_{\rm avg}$可根据国际地磁场参考模型 IGRF(International Geomagnetic Reference Field)[17] 计算得出。

2 误差分析

在使用本方法进行 TEC 测量的过程中，存在许

多对测量结果有影响的误差来源,误差分为硬件设备误差和观测参数误差。对这些误差影响进行分析有助于提高测量精度。目前发现的硬件设备误差主要有 AIS 接收机报文功率的读数误差及测量误差,观测参数误差主要有卫星姿态变化误差、船舶姿态变化误差、船舶位置误差、卫星星历误差以及磁场强度B_{avg}误差。

AIS 接收机的报文功率读数误差。AIS 报文中的 16 进制功率值对应的实际功率值精度为 1 dBm,造成的功率误差最大可达 0.5 dBm。

AIS 接收机的报文功率测量误差。实际利用 AIS 接收机对模拟器报文进行功率标定,信号输入为恒定时,功率差变化范围约±10%。接收机的报文功率测量误差包括两接收机射频通道的放大倍数误差(固定值可标定去除)、AD 量化位数误差、数字滤波器、下变频和 FFT 等误差。由功率差造成的角度θ_1的测量误差与角度值相关。例如在 90°和 0°附近,功率的微小偏差会造成角度的剧烈变化。以约 45°为例,功率测量值浮动 10%,幅度变化 3.3%,角度测量误差范围为±6.6%。

卫星姿态的变化误差。卫星姿态趋于稳定,姿态角误差约 0.1°左右,造成的法拉第旋转角误差可以忽略不计。

船舶姿态的变化误差。选取的船舶一般处于平稳航行状态,航行过程中船身摆动一般也很小,约为 1°。船身摆动可能造成天线摆动,使得极化面发生偏转,造成的法拉第旋转角最大误差约为 1°。

船舶的位置误差。AIS 报文自带 GPS 坐标,其中单条报文坐标精度优于 100 m,如果奇/偶报文联合解析,坐标精度优于 20 m。由于船舶与卫星的相对距离为 100 km 量级,因此造成的法拉第旋转角误差可以忽略不计。

卫星星历误差。卫星星历误差中卫星的位置和速度变化误差为 100 m 量级。卫星的速度约为 7.5 km·s^{-1},船舶与卫星的相对距离为 100 km 量级,卫星位置及速度的变化误差造成的法拉第旋转角误差可以忽略不计。

磁场强度B_{avg}误差。虽然电离层有几百千米厚度,但是电离层的大多数电子实际集中在一个相对薄的层中,因此式(22)中的地磁场强度分量b_z可以简化为薄层中的平均地磁场强度分量B_{avg}。磁场强度B_{avg}误差大小与电离层薄层高度的选取有关。一般情况下,电离层薄层高度的变化会引起最大 3.2°的穿刺点经纬度差异和最大 9.62% 的电离层模型精度误差,进而引起磁场强度B_{avg}变化。

3 实验验证

选取天拓五号卫星上的 AIS 数据进行实验验证。2020 年 8 月 23 日卫星上接收到的 AIS 数据如图 6 所示。

利用 STK 载入天拓五号卫星的星历获取 2020 年 8 月 23 日 05:00 UT 卫星的位置和速度信息。卫星经度为 121.157°W,纬度为 15.495°S,高度为 497.811 km,纬度变化率为 0.063229 (°)·s^{-1},经度变化率为 0.013092 (°)·s^{-1},高度变化率为–0.006980 km·s^{-1}。

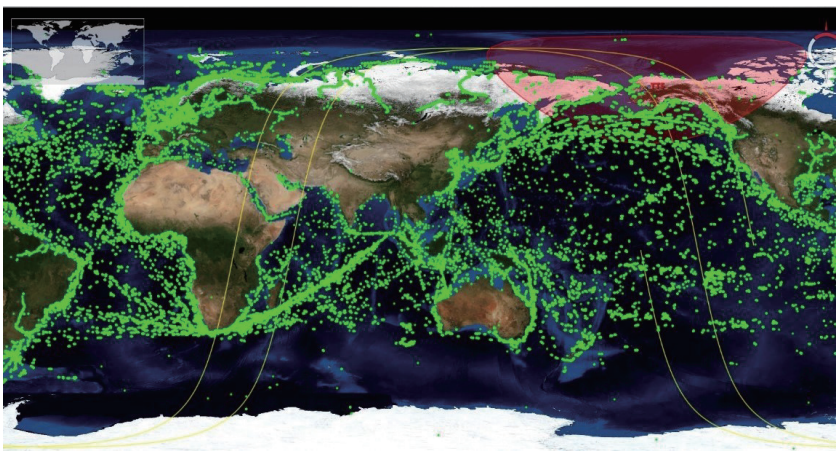


图 6 根据 2020 年 8 月 23 日天拓五号卫星接收到的 AIS 数据得到的船舶分布位置

Fig. 6 Distribution of ships based on the AIS data received on the Tiantuo V satellite on 23 August 2020

如图 7 所示，为方便查找相同的 AIS 报文，将 2020 年 8 月 23 日解析好的 AIS 报文导入数据库，选取 05:00 UT 时相同的两条 AIS 报文，分别为表中第 2 行和第 4 行。船舶 MMIS 码为 477108800，经度为 128.3945°W，纬度为 16.6300°S。

根据式(8)，平面 1 与平面 3 的夹角为 91.0286°，近似垂直。根据式(9)，AIS 信号传播的方向向量与平面 3 的法向量夹角为 28.9486°，近似平行。如图 8 和图 9 所示，为获取功率信息，将解析好的 AIS 报文信息导入 Excel 文件中显示。如图 8 和图 9 所示，选取的 A 机报文序号为 59130，接收功率的 16 进制码为 02 F3，对应功率值为–111.0814 dBm。选取的 B 机报文序号为 62641，接收功率的 16 进制码为 09 E3，对应功率值为–105.8505 dBm。

天拓五号卫星上的 AIS 天线为±45°交叉极化天线。两天线的全方向图如图 10 所示，可以看出两天线方向图对称，且两天线的安装方向与主瓣偏向相反。图 10 中坐标轴与图 2 中坐标系 1 的坐标轴相对应。

根据式(11)可求出 1.2 节规定的仰角 φ 为 55.0646°。根据式(12)可求出 1.2 节规定的方位角 θ 为 90.8541°。对照图 10 的天线方向图可以得知两

originaltime	file_id	MessageID	RepeatIndicator	MMSI	NavigationalStatus	RateOfTurn	SOG	PositionAccuracy	Longitude	Latitude
2020-08-23 05:00:00	2	1	0	477108800	0	0	13.6	0	-128.3945	-16.6300
2020-08-23 05:00:00	2	1	0	440989000	0	-128	2.8	1	-123.0226	-13.8308
2020-08-23 05:00:00	1	1	0	440847000	8	0	3.3	1	-132.4729	-10.7145
2020-08-23 05:00:00	1	1	0	477108800	0	0	13.6	0	-128.3945	-16.6300
2020-08-23 05:00:00	1	1	0	440989000	0	-128	2.8	1	-123.0226	-13.8308
2020-08-23 04:59:59	1	1	0	440751000	0	0	4.4	1	-125.0172	-13.9510
2020-08-23 04:59:59	2	1	0	636092711	0	0	17.0	0	-139.7411	-15.3366

图 7 数据库中 2020 年 8 月 23 日天拓五号卫星两个接收机解码的 AIS 报文信息

Fig. 7 AIS message information decoded by the two receivers of Tiantuo V satellite on 23 August 2020 in the database

	Originaltime	Type	Power	MMSI	Longitude	Latitude
59126						
59127	2020/8/23 4:59	A1	0B-DC	477108800	-128.391	-16.6282
59128	2020/8/23 4:59	A0	01-72	477108800	-128.3916	-16.6285
59129	2020/8/23 4:59	A0	11-BE	477108800	-128.3928	-16.6291
59130	2020/8/23 5:00	A1	02-F3	477108800	-128.3945	-16.63
59131	2020/8/23 5:00	A0	09-B7	477108800	-128.3951	-16.6302
59132	2020/8/23 5:00	A0	01-C4	477108800	-128.3963	-16.6308
59133	2020/8/23 5:00	A1	00-84	477108800	-128.3968	-16.631

图 8 2020 年 8 月 23 日天拓五号 A 机解码的 AIS 报文信息

Fig. 8 AIS message information decoded by A machine of Tiantuo V on 23 August 2020

	Originaltime	Type	Power	MMSI	Longitude	Latitude
62637						
62638	2020/8/23 4:59	B0	09-D5	477108800	-128.3928	-16.6291
62639	2020/8/23 4:59	B1	04-FE	477108800	-128.3933	-16.6294
62640	2020/8/23 4:59	B0	04-100	477108800	-128.394	-16.6297
62641	2020/8/23 5:00	B1	09-E3	477108800	-128.3945	-16.63
62642	2020/8/23 5:00	B0	08-D5	477108800	-128.3951	-16.6302
62643	2020/8/23 5:00	B1	00-6C	477108800	-128.3968	-16.631
62644	2020/8/23 5:00	B0	01-81	477108800	-128.3975	-16.6313

图 9 2020 年 8 月 23 日天拓五号 B 机解码的 AIS 报文信息

Fig. 9 AIS message information decoded by B machine of Tiantuo V on 23 August 2020

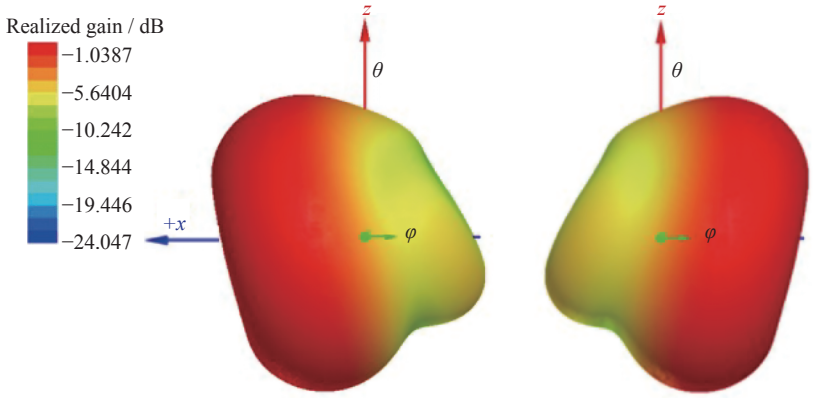


图 10 双 AIS 天线的全方向图（左边为 AIS 天线 1 方向图，右边为 AIS 天线 2 方向图）

Fig. 10 Omni-directional pattern of dual AIS antennas (The left side of the figure is the pattern of AIS Antenna 1, and the right side is the pattern of AIS Antenna 2)

天线的增益近似相等,不用考虑到式(10)的计算中。

根据式(10)可求出θ_1为 45.0512°。根据式(14)可求出θ_2为 28.7046°。根据式(15)可求出法拉第旋转角Ω为 73.7559°。根据式(19)可得 IPP 坐标为(15.7276°S, 123.0625°W)。电离层薄层的高度选取为 350 km,通过查询 IGRF 可得 IPP 处的磁场强度为 1.5535×10^{-5} T 根据式(23)可以求出 TEC 的值为 9.2052 TECU。本次实验使用欧洲定轨中心(CODE)的 TEC 数据与本方法测量的 TEC 数据进行对比,CODE 采用全球近 200 个 GPS 接收站的数据,反演垂直于地表方向的电离层总电子量[18–20]。图 11 显示的是 2020 年 8 月 23 日 05:00 UT CODE 的 TEC 全球分布,其中在 (15°S, 120°W)、(17.5°S, 120°W)、(15°S, 125°W)、(17.5°S, 125°W) 位置处的 TEC 值分别为 8.8 TECU、8 TECU、9.7 TECU、8.6 TECU。为使 CODE 与本方法的 TEC 数据在时间和位置上精确对应,使用双线性插值法对 CODE 数据进行时空插值,可以得到 05:00:00 UT 时刻 CODE 在 (15.85°S, 123.74°W) 处的 TEC 值为 9.1083 TECU,对比 05:00 UT 时刻本方法在 (15.85°S, 123.74°W) 处探测到的 TEC 值,二者相差 0.0969 TECU。

CODE 主要是通过陆基观测获取 TEC 数据,为确保本方法的 TEC 观测环境与 CODE 尽可能一致,选取船舶位置位于陆地边缘的 AIS 数据进行实验。由于目前该方法还没有实现自动化,找到满足 1.1 节条件的 AIS 数据耗时巨大,因此本文只找到 20 组满足 1.1 节条件的 AIS 数据进行 TEC 测量实验。表 1

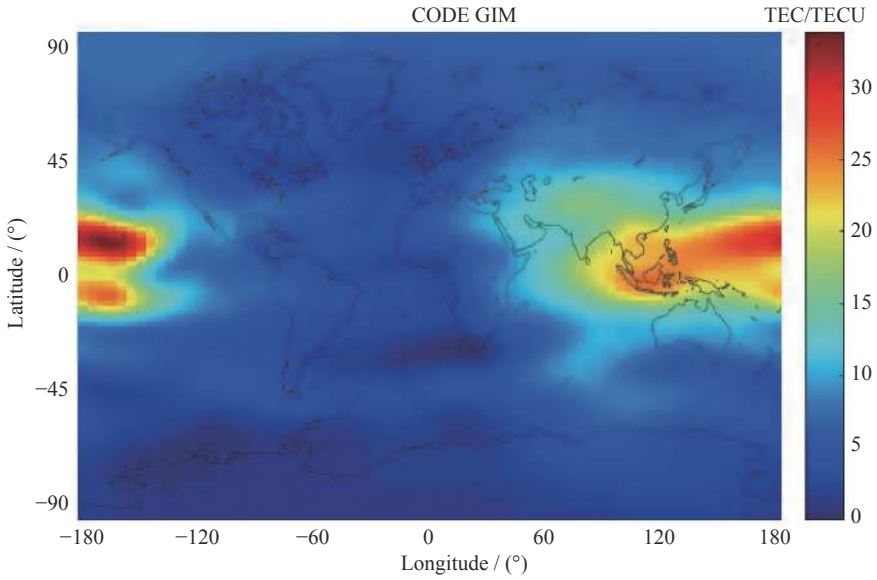


图 11 2020 年 8 月 23 日 05:00 UT 的 CODE 的 TEC 分布

Fig. 11 TEC distribution of CODE at 05:00 UT on 23 August 2020

表 1 本方法与 CODE 的 TEC 值对比

Table 1 Comparison of TEC value by this method and CODE

方法	时间(UT)	磁场强度/T	穿刺点位置坐标	法拉第旋转角/(°)	TEC/TECU
本方法	05:00:00	1.5535×10^{-5}	(15.73°S, 123.06°W)	73.7559	9.2052
CODE	05:00:00	—	(15.73°S, 123.06°W)	—	9.1083
本方法	05:00:03	1.8379×10^{-5}	(15.76°S, 123.79°W)	84.5386	8.9128
CODE	05:00:03	—	(15.76°S, 123.79°W)	—	9.2120
本方法	05:00:08	1.8408×10^{-5}	(15.50°S, 123.81°W)	99.4584	10.4760
CODE	05:00:08	—	(15.50°S, 123.81°W)	—	9.3140
本方法	04:59:58	1.8168×10^{-5}	(15.97°S, 123.71°W)	83.1421	8.8674
CODE	04:59:58	—	(15.97°S, 123.71°W)	—	9.1265

续表 1

方法	时间(UT)	磁场强度/T	穿刺点位置坐标	法拉第旋转角/(°)	TEC/TECU
本方法	04:59:55	1.8422×10^{-5}	(15.91°S, 123.77°W)	87.9944	9.2616
CODE	04:59:55	—	(15.91°S, 123.77°W)	—	9.1937
本方法	06:00:04	-3.3630×10^{-5}	(30.76°S, 31.63°E)	84.4790	4.8706
CODE	06:00:04	—	(30.76°S, 31.63°E)	—	4.8267
本方法	05:59:59	-3.2258×10^{-5}	(30.54°S, 31.67°E)	84.1913	5.0604
CODE	05:59:59	—	(30.54°S, 31.67°E)	—	4.8901
本方法	06:00:01	-4.4421×10^{-5}	(30.58°S, 34.98°E)	109.2740	4.7696
CODE	06:00:01	—	(30.58°S, 34.98°E)	—	5.3581
本方法	06:00:00	-4.5150×10^{-5}	(31.85°S, 34.68°E)	99.8255	4.2841
CODE	06:00:00	—	(31.85°S, 34.68°E)	—	5.0065
本方法	05:54:16	1.5267×10^{-5}	(10.82°S, 45.16°E)	87.7469	11.1440
CODE	05:54:16	—	(10.82°S, 45.16°E)	—	11.7851
本方法	05:53:39	1.6164×10^{-5}	(8.84°S, 45.33°E)	90.7516	10.8190
CODE	05:53:39	—	(8.84°S, 45.33°E)	—	12.2485
本方法	05:52:44	1.2077×10^{-5}	(5.39°S, 44.53°E)	90.4933	14.5290
CODE	05:52:44	—	(5.39°S, 44.53°E)	—	12.7368
本方法	05:52:32	1.6347×10^{-5}	(4.36°S, 45.21°E)	98.7884	11.7170
CODE	05:52:32	—	(4.36°S, 45.21°E)	—	12.9979
本方法	05:51:55	1.7622×10^{-5}	(1.99°S, 45.50°E)	115.5008	12.7080
CODE	05:51:55	—	(1.99°S, 45.50°E)	—	13.3356
本方法	05:32:02	2.5009×10^{-5}	(68.90°N, 58.05°E)	92.5313	7.1737
CODE	05:32:02	—	(68.90°N, 58.05°E)	—	7.4917
本方法	05:32:00	2.4395×10^{-5}	(67.54°N, 56.38°E)	108.8953	8.6543
CODE	05:32:00	—	(67.54°N, 56.38°E)	—	7.6025
本方法	05:31:56	2.5113×10^{-5}	(69.35°N, 59.29°E)	87.8939	6.7860
CODE	05:31:56	—	(69.35°N, 59.29°E)	—	7.4290
本方法	10:02:41	3.2143×10^{-5}	(54.66°N, 155.21°E)	110.3466	6.6562
CODE	10:02:41	—	(54.66°N, 155.21°E)	—	7.8275
本方法	10:02:58	3.6254×10^{-5}	(56.34°N, 152.97°E)	109.2740	6.3535
CODE	10:02:58	—	(56.34°N, 152.97°E)	—	7.7258
本方法	10:03:34	3.3470×10^{-5}	(58.46°N, 153.22°E)	103.8324	6.0112
CODE	10:03:34	—	(58.46°N, 153.22°E)	—	7.5037

给出了本方法测量的 TEC 值与 CODE 提供的 TEC 值的对比。

在这 20 组数据对比中，本文方法与 CODE 的 TEC 值最大相差 1.7922 TECU，最小相差 0.0439 TECU，平均 TEC 差值为 0.7620 TECU，标准差为 0.5309。

4 结论

提出了一种依靠星载 AIS 数据实现 TEC 测量的方法。实验证明，该方法测量的 TEC 值与 CODE 提供的 TEC 值平均相差 0.762 TECU，相比传统的 TEC 测量方法需要部署较多地面站的问题，具有无需部署地面站的优点。

参考文献

[1] LIU Z Z. Ionosphere Tomographic Modeling and Applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements[D]. Calgary: University of Calgary, 2004

[2] BERNHARDT P A, SIEFRING C L. New satellite-based systems for ionospheric tomography and scintillation re-

gion imaging[J]. *Radio Science*, 2006, **41**(5): RS5S23

[3] KRANKOWSKI A, ZAKHARENKOVA I, KRYPIAK-GREGORCZYK A, *et al*. Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC over the European region and validated by ionosonde data[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, **85**(12): 949-964

[4] LEI J H, SYNDERGAARD S, BURNS A G, *et al*. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: preliminary results[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A7): A07308

[5] ZI Haifeng, MEN Zhirong, CHEN Junli, *et al*. Accuracy evaluation of NeQuick-2 model for faraday rotation estimation of space-borne SAR[J]. *Aerospace Shanghai*, 2020, **37**(5): 79-85 (訾海峰, 门志荣, 陈筠力, 等. 针对星载SAR法拉第旋转估计的NeQuick-2模型精度分析[J]. 上海航天, 2020, **37**(5): 79-85)

[6] ZHAO Zhibo, REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong, *et al*. Regional ionospheric modeling and accuracy assessment using GNSS/LEO satellites observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, **46**(2): 262-269,295 (赵智博, 任晓东, 张小红, 等. 联合GNSS/LEO卫星观测数据的区域电离层建模与精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, **46**(2): 262-269,295)

[7] TSAI L C, LIU C H, TSAI W H, *et al*. Tomographic imaging of the ionosphere using the GPS/MET and NNSS data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, **64**(18): 2003-2011

[8] MEYER F, BAMLER R, JAKOWSKI N, *et al*. The potential of low-frequency SAR systems for mapping ionospheric TEC distributions[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3**(4): 560-564

[9] JEHLE M, FREY O, SMALL D, *et al*. Measurement of ionospheric TEC in spaceborne SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, **48**(6): 2460-2468

[10] ZHAO Haisheng, XU Zhengwen, WU Jian, *et al*. New hybrid method for high resolution TEC measurement with the tri-band beacon[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(2): 201-207 (赵海生, 许正文, 吴健, 等. 三频信标高精度TEC测量新方法[J]. 空间科学学报, 2011, **31**(2): 201-207)

[11] CUSHLEY A C, NOËL J M. Ionospheric tomography using ADS-B signals[J]. *Radio Science*, 2014, **49**(7): 549-563

[12] CUSHLEY A C. Ionospheric Tomography Using Faraday Rotation of Automatic Dependent Surveillance Broadcast (UHF) Signals: Ionospheric Measurement from ADS-B Signals[D]. Kingston: Royal Military College of Canada, 2016

[13] CUSHLEY A C, NOËL J M. Ionospheric sounding and tomography using automatic identification system (AIS) and other signals of opportunity[J]. *Radio Science*, 2020, **55**(1): e2019RS006872

[14] VAN DER PRYT R, VINCENT R. A simulation of the reception of automatic dependent surveillance-broadcast signals in low earth orbit[J]. *International Journal of Navigation and Observation*, 2015, **2015**: 567604

[15] LIU Chen, LIU Changjian, BAO Yadong, *et al*. Effects of ionosphere shell height on ionospheric modeling[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2018, **38**(1): 37-47 (刘宸, 刘长建, 鲍亚东, 等. 电离层薄层高度对电离层模型化的影响[J]. 空间科学学报, 2018, **38**(1): 37-47)

[16] SMITH D A, ARAUJO-PRADERE E A, MINTER C, *et al*. A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the ionosphere[J]. *Radio Science*, 2008, **43**(6): RS6008

[17] WARDINSKI I, SATURNINO D, AMIT H, *et al*. Geomagnetic core field models and secular variation forecasts for the 13 th International Geomagnetic Reference Field (IGRF-13)[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, **72**(1): 155

[18] FENG J D, HAN B M, ZHAO Z Z, *et al*. A new global total electron content empirical model[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(6): 706

[19] JEE G, LEE H B, KIM Y H, *et al*. Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: ionospheric perspective[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A10): A10319

[20] LI Zishen, WANG Ningbo, LI Min, *et al*. Evaluation and analysis of the global ionospheric TEC map in the frame of international GNSS services[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, **60**(10): 3718-3729 (李子申, 王宁波, 李敏, 等. 国际GNSS服务组织全球电离层TEC格网精度评估与分析[J]. 地球物理学报, 2017, **60**(10): 3718-3729)

(责任编辑: 宋雅娜)