固定站有源定标器与雷达高度计星地路径 TEC 反演及与 GIM 的对比分析

邢晴[1,2]　王彩云[1]　郭伟[1]　杨世杰[1,2]　梁珍珍[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100190)

摘　要　针对卫星雷达高度计在轨定标中电离层延迟改正对高精度测高的需求，本文提出了一种基于固定站有源定标器和高度计在轨定标时星地瞬时路径反演电离层 TEC（Total Electron Content）的方法。本方法通过地面有源定标器与卫星高度计之间的双频延迟差分测量，在精确校准硬件延迟的基础上，获得了卫星轨道实际传播路径的高精度 TEC。与 IGS （International GNSS Service）GIM（Global Ionospheric Map）产品对比表明，本方法反演的路径 TEC 与 GIM 完整柱 TEC 存在 1~4 TECU 系统性差异，直接采用 GIM 进行高度计电离层改正将引入 2~9 毫米级别的误差。该研究为高度计电离层延迟改正提供了外部独立验证手段，对提升卫星高度计的在轨定标精度以及测高精度具有重要参考价值。

关键词　雷达高度计；有源定标器；电离层 TEC；全球电离层地图（GIM）

中图分类号　电离层物理 P352

最新录用

Path TEC Retrieval Based on Fixed Station Transponder and Altimeter and Comparison with GIM

Qing Xing[1,2]　Caiyun Wang[1]　Wei Guo[1]　Shijie Yang[1,2]　Zhenzhen Liang[1,2]

1 (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Satellite radar altimetry requires high-precision ionospheric delay correction to achieve accurate sea surface height measurements. The Global Ionospheric Map (GIM) provided by the International GNSS Service (IGS) is widely used for such corrections, but it integrates the total electron content (TEC) from the ground up to the GNSS satellite altitude (~20,000 km), whereas an altimeter signal only traverses the ionosphere up to the satellite orbit altitude (~970 km). This difference in integration limits can introduce systematic errors if GIM is directly applied. To address this issue, this paper proposes a method for retrieving ionospheric TEC along the instantaneous altimeter-to-transponder path during in-orbit calibration of altimeters using a fixed-station transponder. The method is based on dual-frequency (Ku-band at 13.58 GHz and C-band at 5.25 GHz) delay differential measurements between the ground transponder and the satellite altimeter. It obtains high-precision TEC along the actual satellite orbital propagation path through these dual-frequency delay differential measurements, based on precise calibration of hardware delays and tropospheric delays. The retrieved path TEC is integrated only up to the altimeter orbit height (approximately 970 km), which physically matches the altimeter signal propagation. The method is validated using ten in-orbit calibration experiments conducted with the HY-2B satellite at the Beijing Changping fixed station from May to October 2025. Each experiment lasts 2–3 seconds and provides 300–400 valid dual-frequency delay samples. The retrieved path TEC values are compared with collocated IGS GIM TEC values at the same epochs. Comparison with IGS GIM products reveals systematic differences of 1–4 TECU between the path TEC retrieved by this method and the GIM total column TEC, with a correlation coefficient of 0.987. The uncertainty of a single retrieved path TEC ranges from 0.1 to 0.5 TECU, and the root-sum-square total uncertainty is approximately 0.433 TECU. This study provides an external independent validation method for ionospheric delay correction, offering important reference value for improving in-orbit calibration accuracy and altimetric precision of satellite altimeters.

Key words Radar altimeter; Reconstructive transponder; Ionospheric TEC; Global Ionospheric Map (GIM)

1 引言

雷达高度计是卫星遥感领域重要观测载荷之一，通过测量从卫星到地面或海洋表面的信号往返时间来获取高度信息，是海洋测高、冰盖监测和地球动力学研究中重要观测手段。卫星测高代表性任务如 TOPEX/Poseidon、Jason 系列等利用高度计对海面波高进行了精密

测量和双频电离层延迟改正[1][2][3]，我国 HY-2 系列卫星的成功运行，进一步推动了高度计在业务化海洋观测中的应用。随着轨道精度、时钟系统和信号处理技术的不断完善，高度计测距精度提高，各类误差项逐渐成为限制观测性能的重要因素。

在高度计测距过程中，电磁信号传播延迟主要包括硬件链路延迟、大气对流层延迟和电离层延迟等组成部分。其中，对流层延迟主要由干空气和水汽引起，在微波频段内对信号频率不敏感。电离层中的自由电子对微波信号具有明显的色散效应，信号传播时间随频率不同而产生延迟差异，不同频率间的电离层延迟差可以被用来反演电离层总电子含量等关键参数，该方法已广泛应用于双频 GNSS 观测以及双频雷达高度计电离层延迟校正中，成为当前空间大气与导航定位领域的重要技术手段[4]。

作为表征电离层状态的关键参数，TEC 在卫星导航、无线电通信、空间天气监测等领域具有重要的应用价值[5][6]。国际 GNSS 服务组织(IGS)基于全球 GNSS 观测网，定期发布全球电离层地图(GIM)产品，为不同类型空间观测任务提供了统一的 TEC 参考[7][8][9][10]。已有研究对 GIM 产品精度和一致性进行了系统评估，表明其在全球尺度上具有较好的稳定性[11]，TEC 估计精度在 2.5~3.5TECU 范围内[12]。但尽管 GIM 等产品提供了广泛连续的 TEC 估计，由于其数据产品生成过程中经过空间插值和时间平滑处理，其结果在一定程度上反映的是区域平均意义下的电离层状态[13][14][15]，对局部地区和瞬态电离层变化的刻画存在局限[16]。需要指出的是，GIM 产品通常表征从 GNSS 卫星（约 20,000 km）至地面的完整电离层柱 TEC，而高度计实际观测信号仅穿过星下点特定高度的电离层路径。这种积分边界条件的差异导致两者物理意义不同，直接采用 GIM 进行高度计电离层改正可能引入系统性偏差[17]，但现有研究较少对此进行量化分析。

相较于基于大范围观测网反演得到的电离层产品，直接利用星地信号传播延迟进行分析，可直接地反映特定传播路径上的电离层影响特征。在高度计系统定标过程中，地面有源定标器作为特性已知的目标，常被用于高度计系统延迟和后向散射系数的检验。当高度计接收来自固定站有源定标器转发信号，其传播路径和星地几何关系相对稳定，并且定标器位于卫星星下点附近区域，星地信号传播路径近似为垂直方向，有效简化电离层映射函数的影响。另一方面，现代雷达高度计工作于多个频段，可同时获得不同频率信号的系统延迟观测量。在合理评估系统硬件链路延迟稳定性基础上，对对流层延迟等非色散型进行修正与消除，则不同频段系统延迟之间的差异主要反映电离层色散效应的影响。与基于海面散射回波测距结果的传统双频高度计方法相比，这类基于系统延迟观测的分析不依赖于回波波形特性，在一定程度上避免地表散射条件和海况变化对结果的影响。

基于上述认识，本文围绕高度计有源定标器观测数据，结合 Ku 波段（13.58GHz）和 C 波段（5.25GHz）系统延迟观测结果，首次提出了基于地面固定站重建型有源定标器的双频延迟差分电离层 TEC 精确反演方法。通过对系统延迟项的组成及时间变化特征进行分析提取其中的电离层延迟信息，结合独立电离层产品进行对比验证，量化分析了路径 TEC 与完整柱 TEC 的差异及其对测高精度的影响，实现了对高度计-有源定标器传播链路电离层延

迟的地面独立观测。

2 理论基础与双频路径 TEC 反演模型

电离层是由自由电子和离子组成的弱电离等离子体，其对微波信号传播具有显著色散效应。当电磁波频率远高于电离层等离子体频率时，电离层折射率可在冷等离子体近似下表示为：

$$n \approx 1 - \frac{40.3\, N_e}{f^2} \tag{1}$$

其中N_e为电子密度（$electrons/m^3$），f 为信号频率（Hz），常数 40.3 的单位为 $m^3 \cdot s^{-2}$，其物理意义为 $e^2/(4\pi\varepsilon_0 m_e) \approx 40.3$。电离层对微波信号的影响与频率平方成反比，这一频率依赖构成双频反演电离层延迟的物理基础。

当信号沿传播路径 s 穿过电离层时，由折射率偏离真空传播所引起的群时延表示为：

$$L_{ion}(f) = \frac{40.3}{f^2} \int_{path} N_e(s)\, ds \tag{2}$$

路径积分项定义为路径 TEC：

$$TEC_{path} = \int_{path} N_e(s)\, ds \tag{3}$$

得到电离层延迟与路径 TEC 之间的线性关系：

$$L_{iono}(f) = \frac{40.3}{f^2} TEC_{path} \tag{4}$$

上式中 TEC 为沿实际传播路径的电子密度积分量，不同于全球电离层地图产品中直接采用的垂直 TEC（VTEC）或单层模型下的等效柱 TEC。路径 TEC 直接反映星地链路实际传播过程中的电子含量。

2.1 有源定标器系统延迟观测模型

在雷达高度计系统定标过程中，地面有源定标器作为散射特性和几何位置已知的目标，可对高度计系统性能进行稳定、可控的检验。高度计发射信号经地面有源定标器接收、重建并转发至高度计接收，形成一条稳定的星地双程传播链路。这种模式下，信号传播路径明确，几何关系受控，观测结果中同时包含系统链路特性和大气传播效应信息，为高度计系统延迟分析提供重要数据来源。

最新录用

与传统基于海面回波的双频测距方法相比，定标器观测模式具有以下特点：信号路径确定性：定标器位置精确已知，传播几何由精密定轨数据确定，避免海面散射不确定性；波形独立性：不依赖回波波形重构，对海况变化不敏感；外部基准特性：定标器作为地面独立设备，可作为高度计测距性能的外部验证手段。

在定标器位置固定条件下，星地相对运动规律可通过精密定轨数据精确描述。通过星地时空匹配与精密定轨数据联合处理得到高度计系统延迟，定义为信号从高度计发射经定标器转发后返回高度计的总传播时间对应的等效距离。在这种观测模式下，不同频段f的系统延迟观测量可以表示为：

$$L^{f}(t)=L^{f}_{inst}+L_{trop}(t)+L^{f}_{iono}(t)+\varepsilon(t) \tag{5}$$

其中，L^{f}_{inst}是定标器相关的系统固定延迟项，与频率相关；$L_{trop}(t)$是信号在对流层中的传播延迟，与频率无关（非色散），在 Ku/C 波段差异可忽略；$L^{f}_{iono}(t)$为电离层传播延迟，与频率平方成反比，是双频差分的目标量；$\varepsilon(t)$表示随机噪声。

最新录用

2.2 对流层与电离层传播延迟特性

高度计发射的信号在大气传播时主要受到对流层和电离层两方面的影响。对流层位于地表约 10~12km 高度范围内，其折射效应主要由干空气和水汽引起。在微波频段内，对流层折射率对频率依赖性较弱，在 KU 波段和 C 波段条件下，对流层对信号传播延迟的影响可近似认为相同。对流层延迟分为干对流层延迟和湿对流层延迟，干对流层延迟变化相对平稳，湿对流层延迟受水汽含量影响较大。实际应用中天顶方向对流层延迟可以借助 GNSS 观测进行估计，并通过映射函数转换至实际传播路径。由于本文所采用的固定站有源定标器观测的星地传播路径近似垂直，对流层映射误差相对较小，为后续分析提供了有利条件。

电离层是地球高层大气中被部分电离的区域，分布于约 60~1000km 高度范围内，内部存在大量自由电子。当电磁波信号在电离层传播，自由电子的存在会改变介质的电磁特性，使得微波信号相位速度和群速度发生变化，引入额外传播时间延迟。电离层传播延迟用总电子含量（TEC）来定量描述。TEC 定义为沿电磁波传播路径上单位截面积内电子密度的积分，其单位是 TECU（1 TECU=$10^{16}\,electrons/m^{2}$）。在忽略高阶项影响情况下，电离层对微波信号产生的传播延迟与信号频率之间近似满足反比平方关系，可以表示为：

$$L_{iono}(f,t)=K\cdot\frac{TEC_{path}(t)}{f^2} \tag{6}$$

其中，K为常数，取值为 40.3，f为电磁波频率。

2.3 双频系统延迟差分与电离层影响分析

将高度计在同一时刻、同一星地传播路径下获取的 KU 和 C 波段系统延迟观测量分别记为$L^{C}(t)$和$L^{Ku}(t)$。双频系统延迟差分量为：

$$\Delta L(t)=L^{Ku}(t)-L^{C}(t) \tag{7}$$

将前述系统延迟模型代入上式可得：

$$\Delta L(t)=\left(L_{inst}^{Ku}-L_{inst}^{C}\right)+\left(L_{iono}^{Ku}(t)-L_{iono}^{C}(t)\right)+\Delta\varepsilon(t) \tag{8}$$

由于对流层延迟在两频段中近似相同，在差分过程中被有效消除；系统固定延迟项视为常数偏置，可通过长期统计平均或平静期观测精确标定，对时间变化分析影响较小。故双频系统延迟差分量的时间变化特征主要是由电离层传播延迟的频散差异所主导。

根据电离层延迟与频率的关系，进一步得到：

$$L_{iono}^{Ku}(t)-L_{iono}^{C}(t)=40.3\cdot TEC_{path}(t)\left(\frac{1}{f_{ku}^2}-\frac{1}{f_c^2}\right) \tag{9}$$

$$TEC_{path}(t)=\frac{\Delta L}{40.3\left(\frac{1}{f_c^2}-\frac{1}{f_{ku}^2}\right)} \tag{10}$$

双频系统延迟差分量与沿星地路径的电离层电子含量变化相关，在减去对流层延迟并考虑系统固定项影响后，得到残差序列反映电离层延迟的时间变化特征。

路径 TEC 反演的不确定度来源于双频差分延迟测量误差。根据误差传播定律，若差分延迟标准差为σ_{Δ}，则 TEC 反演标准差为：

最新录用

$$\sigma_{TEC}=\frac{\sigma_{\Delta}}{40.3\left(\frac{1}{f_{ku}^{2}}-\frac{1}{f_{c}^{2}}\right)} \tag{11}$$

该表达式表明，TEC 不确定度与频率差异因子呈反比关系，频率间隔越大，反演灵敏度越高。故 Ku 与 C 波段之间较大的频率差保证了电离层延迟差具有足够分辨能力。这一误差模型将在第四章中用于定量评估反演 TEC 的统计精度，并与 GIM 产品精度进行对比分析。

3 数据与处理方法

实验核心观测数据为 HY-2 卫星在搜索模式下接收的双频 I/Q 信号，搜索模式是为在轨定标专门设计的一种特殊工作模式，通过设置固定的收发信号间隔（发-发间隔 6.7824ms，发-收间隔 7ms），利用有源定标器转发延时将地面强散射体回波滤除，从而实现不受地域限制的高度计在轨定标实验。

首先要对星上星下数据进行信号匹配，采用了一种基于高度计和定标器数据的快速傅里叶变换波形形状匹配的方法，实现对高度计观测距离抛物线的补偿。根据精密定轨数据计算卫星和定标器之间的相对位置，截取几何距离最小值附近的一定时间窗作为有效观测段使得卫星-定标器路径近似垂直，这一简化在后续电离层映射处理中有重要意义。对流层延迟修正是必须考虑的一项，对流层折射效应由干湿对流层共同决定，可以影响微波信号的传播时间。本文采用全球导航卫星系统（GNSS）观测数据利用 Gamit/Globk 软件解算得到天顶对流层延迟（Zenith Tropospheric Delay , ZTD）作为对流层延迟改正量。在星地近垂直传播路径条件下，天顶对流层延迟可直接用于修正系统延迟序列，避免引入额外的不确定性的映射函数误差。系统硬件延迟则是高度计和定标器内部链路延迟共同决定的常数项，在短时间尺度内可视为恒定，通过在轨定标结果获得。本文采用实验前后多次定标结果的平均值作为硬件延迟改正量，确保标定精度。在数据处理过程中，需分别对 Ku 和 C 波段延迟序列减去对应的硬件延迟常数，防止后续双频差分处理引入不必要的频率偏置误差。在完成硬件延迟和对流层延迟改正后得到的双频延迟序列仅包含电离层延迟和随机噪声，为提高路径 TEC 反演的鲁棒性，本文对每段时间序列计算均值，以均值代表本次实验的延迟观测量，有助于减弱随机噪声的影响，使反演结果更具有统计意义。

根据双频差分基本原理，计算 Ku 波段与 C 波段修正后的延迟均值之差:

$$\Delta L=\overline{L}^{Ku}-\overline{L}^{C} \tag{12}$$

差分处理可以有效抵消全局无关误差项，按照第二章电离层色散关系进行路径 TEC 反演计算。路径 TEC 指沿卫星-定标器直线传播路径上电子浓度积分，积分上限为卫星轨道高度（约 970 km），而非 GIM 产品的 20,000 km 完整柱积分。

版权所有

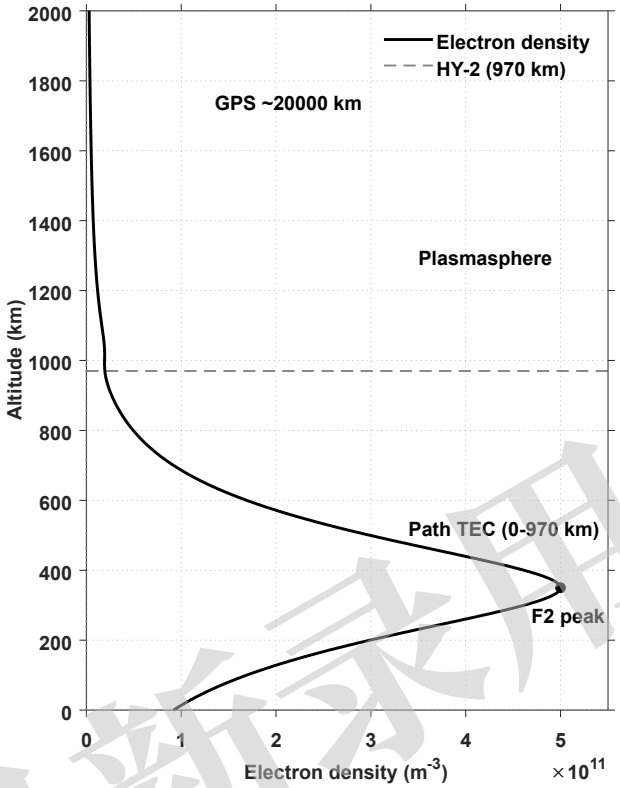


图 1 电离层电子浓度垂直剖面图

Figure 1 Vertical Profile of Ionospheric Electron Concentration

图 1 中展示了一个典型的中纬度日间电离层电子浓度随高度分布曲线（采用 α-Chapman 模型近似）。实线为电子浓度，虚线标记 HY-2 卫星轨道高度（约 970 km），GPS 卫星高度约 20000 km，为清晰展示电子浓度的主要分布特征，纵坐标范围设定为 0-2000 km。填充区域为 0-970 km 范围，对应本文反演的路径 TEC 积分区间。970 km 以上显示仍有不可忽略的电子浓度，主要来自顶部电离层和等离子体层的贡献。该图直观说明了 GIM 产品提供的完整柱 TEC（积分至 20000 km）必然大于本文的路径 TEC（积分至 970 km）。

在获得每次实验的路径 TEC 之后，需与获取的 GIM 产品对应的 TEC 数值进行对比分析。IGS 全球电离层地图（GIM）是目前国际上使用最广泛的电离层产品之一，通过全球 GNSS 观测结合多种反演算法生成，空间分辨率为经度 5°、纬度 2.5°，时间分辨率是 2h，提供垂直 TEC（VTEC）的全球分布。本文根据定标器固定地理位置直接提取 GIM 对应网格数据作为 TEC 参考，由于实验窗口极短，相对于 GIM 时间分辨率而言，直接采用时间最接近的

最新录用

GIM TEC 数据作为对比基准而不进行额外时间插值，既减少插值误差，也符合路径 TEC 的瞬时观测特征。

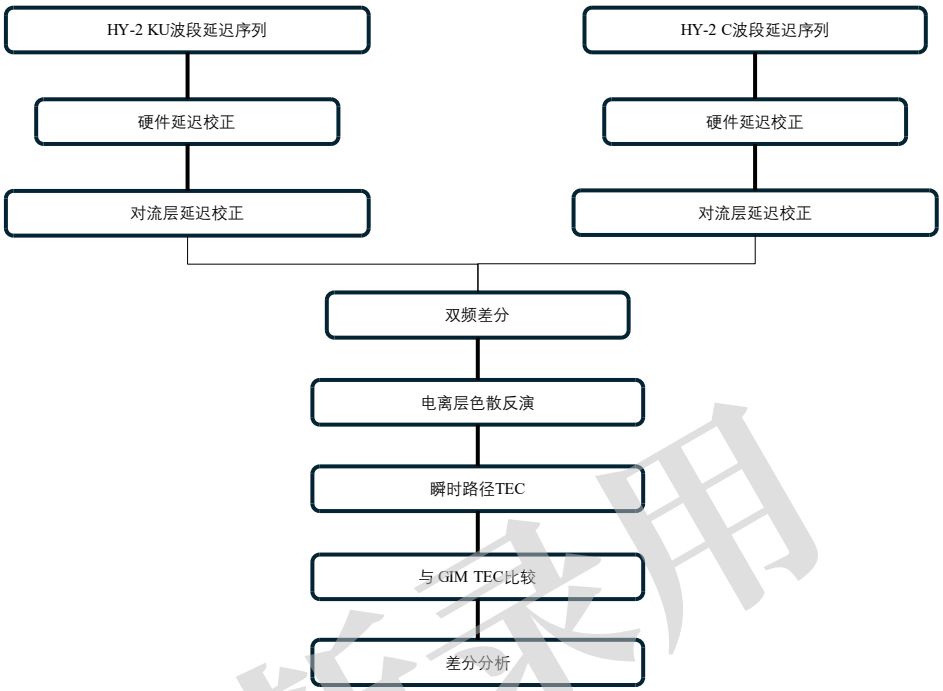


图 2 基于双频系统延迟差分的路径 TEC 反演流程图

Figure 2 Flowchart of path TEC retrieval based on dual-frequency system delay difference

最新录用

4 实验结果与分析

为验证基于双频系统延迟差反演路径 TEC 方法的稳定性与一致性，本文选取 HY-2B 卫星在 2025 年 5 月至 10 月期间在北京昌平固定站有源定标器观测条件下获取的双频系统延迟数据进行分析。定标器位于卫星星下点附近，星地传播路径近似垂直。单次实验持续时间约 2~3s，采样间隔固定，每段序列包含约 300~400 个采样点。为提取硬件延迟，需对每个脉冲依次扣除几何距离、对流层延迟和电离层延迟。其中，几何距离由精密定轨数据和定标器坐标计算，对流层延迟由现场 GNSS 观测解算，而电离层延迟则采用 IGS 发布的 GIM 产品提供的完整柱 TEC 值进行计算。经过修正后，每个脉冲得到一个瞬时硬件延迟估值，对一次实验所有脉冲取平均，得到该次实验的硬件延迟估值。GIM 提供的是从地面至 GPS 卫星高度（约 20000 公里）的完整柱 TEC，而本文最终反演的是从地面至 HY-2 卫星高度（约 970 公里）的路径 TEC。两者积分高度不同，物理意义不同。硬件延迟标定过程中引入 GIM 完整柱，相当于用一个已知的“长尺子”校准系统常数；而后续双频差分反演的是“短距离”路径 TEC，两者之间不存在直接的数值依赖关系。如图 3a、3b 所示，以一次典型实验为例，单次实验可获得约 300-400 个采样点。

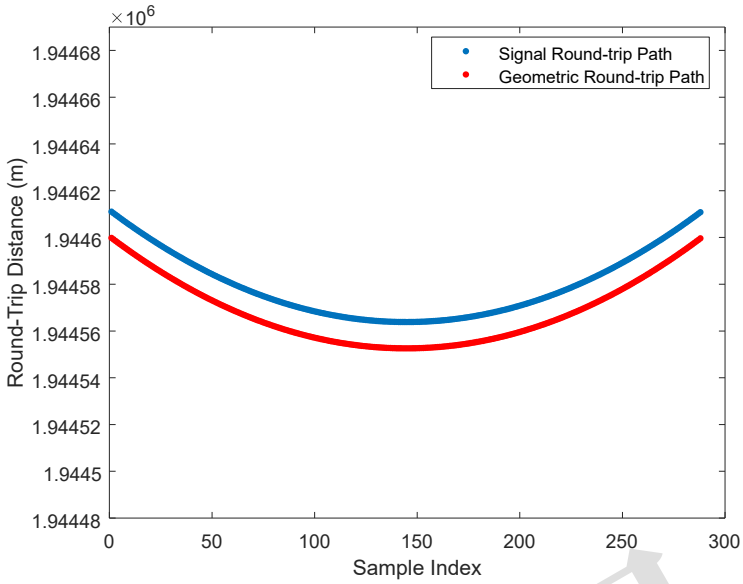


图 3a 星地之间信号距离与物理斜距对比图

Figure 3a Comparison of signal distance and physical slant range between altimeter and transponder

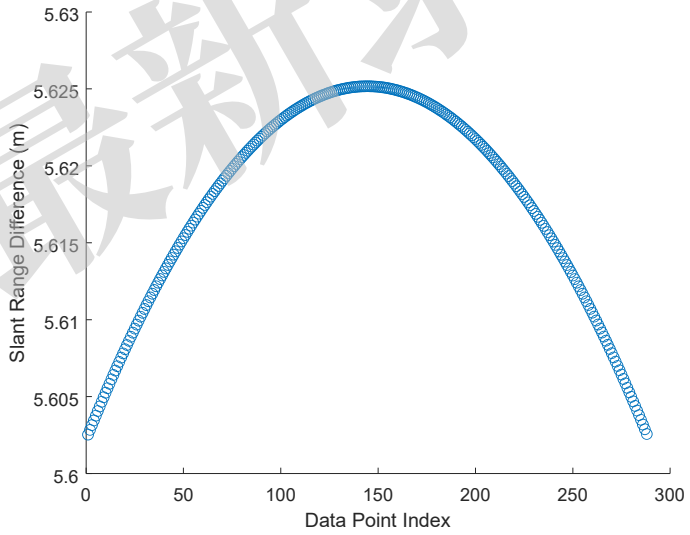


图 3b 高度计系统延迟

Figure 3b Altimeter system delay

对每个频段的原始延迟序列计算其均值作为本次实验的延迟观测量，其标准差则反映了序列的稳定性。图 4 中的每个散点正是通过这种方法，从每次实验的原始时间序列中计算出的均值点。

对原始系统延迟时间序列进行统计特性分析。统计结果表明，KU 波段高度计硬件延迟为 5.624m，标准差 0.021m，C 波段高度计硬件延迟为 5.770m，标准差为 0.031m。

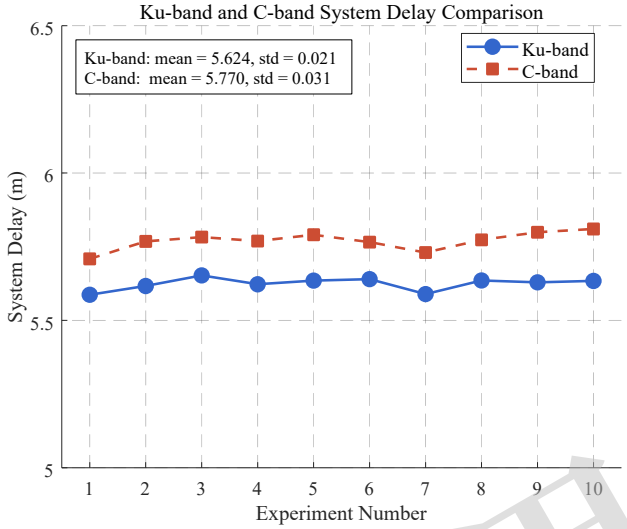


图 4 历次 KU 和 C 波段硬件延迟散点图

Figure 4 Scatter plot of hardware delays for Ku and C bands across multiple experiments

由图 4 可以看到两频段硬件延迟序列呈现近似平稳特征，为后续路径 TEC 反演提供可靠数据基础。

在完成硬件延迟修正后，计算每次实验双频差分延迟均值ΔL，基于电离层色散关系进行路径 TEC 反演，对十组实验数据进行计算得到路径 TEC。

进一步考虑反演的不确定度，根据误差传播原理，

$$\sigma_{TEC,i}=\frac{\sigma_{\Delta,i}}{40.3\left(\frac{1}{f_C^2}-\frac{1}{f_{Ku}^2}\right)} \tag{13}$$

其中$\sigma_{\Delta,i}$为差分标准差，得到单次实验 TEC 反演的不确定度为 0.1~0.5TECU，如图 5 所示，该结果表明基于系统延迟差分的路径 TEC 反演在统计精度上具有可比性。

最新录用

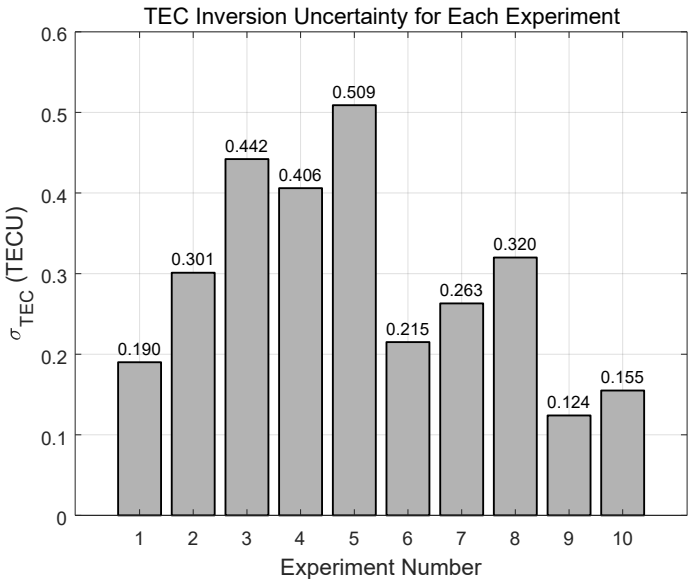


图 5 各次实验路径 TEC 反演不确定度柱状图

Figure 5 Bar chart of TEC inversion uncertainty for each experimental path

为分析路径 TEC 与全球模型产品之间的差异，选用 IGS 发布的全球电离层地图(GIM)作为参考。由于定标器位置固定，各次实验空间位置基本一致，且观测时间窗口仅 2~3s，相对于 GIM 的 2 小时分辨率可视为瞬时观测。因此本文采用与实验日期对应的最近发布时段 GIM 网格值作为对比 TEC。对各个实验日期提取 GIM TEC 值后，与前文计算的路径 TEC 对比如图 6：

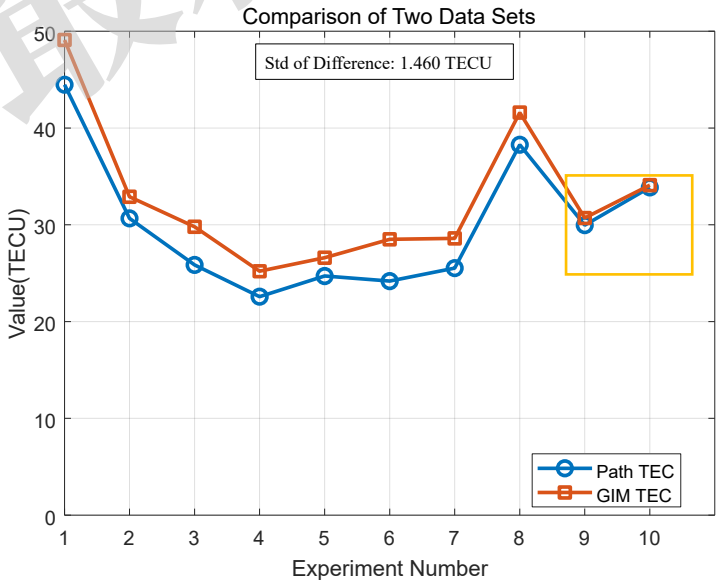


图 6 路径 TEC 与 GIM TEC 对比

Figure 6 Comparison between path TEC and GIM TEC

表 1 路径 TEC 与 GIM TEC 对比

Table 1 Comparison between path TEC and GIM TEC

实验序号	路径 TEC(TECU)	GIM TEC(TECU)	差值(TECU)
1	44.4783	49.1	4.6217
2	30.6626	32.9	2.2374
3	25.8512	29.8	3.9488
4	22.5752	25.2	2.6248
5	24.7042	26.6	1.8958
6	24.1802	28.5	4.3198
7	25.5256	28.6	3.0744
8	38.2715	41.6	3.3285
9	29.9629	30.7	0.7371
10	33.8596	34.1	0.2404

最新录用

从统计结果来看，路径 TEC 与 GIM TEC 之间标准差为 1.460TECU，相关系数达到 0.987，整体趋势一致，存在轻微系统性偏差。GIM TEC 结果略高于路径 TEC 整体的现象可能来自于高度积分范围与观测尺度差异。GIM 产品代表完整柱 TEC，并通过空间与时间平滑处理获得区域平均结果；而路径 TEC 为实际星地传播链路积分电子含量，而高度计传播路径仅积分至卫星轨道高度（约 970km），未包含更高等离子层区域电子贡献。根据典型电离层模型（如 IRI-2016），1000~2000 km 高度范围的电子含量约占 total TEC 的 5%~10%，这与观测到的 1~4 TECU 差异量级吻合。此外，GIM 产品在生成过程中进行了空间插值和时间平滑处理，其结果更接近区域平均意义下电离层状态。将反演路径 TEC 与地磁活动指数进行对比，发现在地磁暴期间（如第 9、10 次实验期间），路径 TEC 出现显著增强，当局地电离层梯度较大或电离层活动增强时，网格产品可能低估局部峰值，路径 TEC 则直接反映观测时刻真实传播延迟，当局地电离层存在梯度或短时波动，两者差异进一步显现。

为评估该差异对高度计定标的实际影响，将 TEC 差值转换为 Ku 波段延迟误差。根据电离层延迟与 TEC 关系，在 Ku 波段下 1TECU 约对应 2.2mm 路径延迟，若路径 TEC 与 GIM TEC 平均差异为 1.460TECU，则将引入约 3.212mm 延迟偏差，在当前高度计测距精度要求达到厘米级甚至毫米级的背景下，该误差对于高精度系统定标任务具有实际意义。以 HY-2 为例，其测距精度指标为±2 cm，3.212 mm 电离层误差约占总体预算的 10%~20%。

表 2 主要误差源分析

Table 2 Analysis of the main error sources

误差来源	误差量级	对应 TEC 误差（TECU）	影响说明
硬件延迟标定误差	Ku: 0.021 m, C: 0.031 m	0.281	系统常数偏移
定标器位置误差	高程: 0.0093 m	0.141	随机误差，影响几何距离计算
双频差分测量噪声	0.1~0.5TECU	0.293	主要随机误差来源
多普勒效应	0.2 cm	0.015	可忽略
固体潮	0.5 cm	0.04	可忽略

基于表 2 中的各项误差分析结果，可对路径 TEC 反演的总不确定度进行综合评估。硬件延迟标定误差主要由 Ku 和 C 波段硬件延迟的标准差决定，经误差传播后贡献约 0.281 TECU，表现为系统常数偏移，不影响路径 TEC 与 GIM 差异趋势的判别。定标器位置解算误差主要来源于 GNSS 静态观测的高程不确定性，属随机误差，可通过多次实验平均进一步抑制。双频差分测量噪声是反演不确定度的主要随机来源，其σ_{TEC}值介于 0.1~0.5 TECU 之间，优于 GIM 产品的标称精度（2~3 TECU）。多普勒效应和固体潮修正[18][19]误差分别为 0.015 TECU 和 0.04 TECU，量级较小，可忽略不计。将上述独立误差源按根和平方和（RSS）方法合成，得到路径 TEC 反演的总不确定度约为 0.433 TECU。该结果与图 5 中各次实验的不确定度量级一致，进一步验证了本文方法在不同电离层条件下均能保持稳定、高精度的反演性能。

综上所述，双频系统延迟差能够稳定反演沿星地传播路径的 TEC，反演精度与现有全球模型产品相当；同时，路径 TEC 与 GIM TEC 之间存在 1~4TECU 量级差异，该差异可由传播高度积分范围与模型平滑特性解释。从高度计系统定标角度看，基于有源定标器链路反演得到的路径 TEC 直接反映真实传播路径的电子含量，避免了 GIM 产品的高度积分范围差异和时空平滑效应，可以为高精度电离层延迟改正提供独立参考。

最新录用

5 结论

本文基于 HY-2 卫星在固定站有源定标器条件下获取的 Ku 与 C 双频系统延迟数据，建立了基于地面固定站有源定标器和高度计在轨定标的双频系统延迟差反演星地传播路径电离层总电子含量（TEC）的技术流程，并系统评估了路径 TEC 与 IGS 全球电离层地图（GIM）产品的差异及其对高度计定标的影响。在充分考虑硬件固定延迟与对流层延迟修正的基础上，利用电离层频率色散特性实现路径 TEC 反演，并与 GIM 产品进行了对比分析。

实验结果表明，双频系统延迟序列具有良好稳定性，基于差分延迟反演得到的路径 TEC 分布合理，其单次反演不确定度约为 0.1~0.5TECU，与当前 GIM 产品精度处于同一量级。路径 TEC 与 GIM TEC 整体趋势一致，验证了方法的有效性。对比分析发现路径 TEC 略小于 GIM TEC，平均差值约为 1.460TECU，该差异在物理上可由高度积分范围差异解释：GIM 产品代表完整柱 TEC，而高度计传播路径仅积分至卫星轨道高度。GIM 产品在时间与空间上的平滑处理亦可能导致局地瞬时变化被弱化，并且在地磁暴期间 GIM 产品精度受到影响，而本文方法基于实时星地链路观测，不受地磁暴影响，仍能保持稳定精度，这在空间天气监测和高精度定标中具有重要意义。

从高度计系统定标角度看，若直接采用完整柱 TEC 进行电离层改正，可能产生毫米级误差，在当前高精度测高任务背景下该量级不可忽视。相比之下，基于有源定标器链路反演得到的路径 TEC 更符合真实传播路径条件，可以为高度计电离层延迟修正与系统误差分析提供更加物理一致的独立观测依据。

综上，本文提出的基于固定站有源定标器的双频系统延迟差分反演路径 TEC 方法可以实现对高度计传播链路中电离层延迟的地面独立观测与毫米级误差量化，为测高载荷电离层误差评估提供了新的技术思路。未来工作可结合不同位置固定站，多星联合观测定标，探索固定站有源定标器在区域电离层监测中的潜力。

最新录用

参考文献

[1] IMEL D A. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, **99**(C12): 24895-24906

[2] DAVIES K. Ionospheric Radio[M]. London: Peter Peregrinus Ltd, 1990

[3] MANNUCCI A J, IIJIMA B A, LINDQWISTER U J, *et al*. GPS and Ionosphere[M]//STONE W R. Review of Radio Science 1996-1999. New York: Wiley-IEEE Press, 1999

[4] MIAO H L, QU R C, MAO P, *et al*. Research on an ionospheric delay correction method for the interferometric imaging radar altimeter based on improved GIM data[J]. *Journal of Spatial Science*, 2023, **68**(3): 373-383

[5] CHEN B Y, WANG X M, ZHANG Z T, *et al*. Time-dependent ionospheric tomography based on two-step reconstruction and node parameterization algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, **17**: 15789-15805

[6] LUO X M, LI Y J, DAI X L, *et al*. Difference and threshold analysis of scintillation index S_{4c} using GPS data from collocated stations at 30 s intervals during 2010-2023[J]. *GPS Solutions*, 2025, **29**(4): 201

[7] FELTENS J. The international GPS service (IGS) ionosphere working group[J]. *Advances in Space Research*, 2003, **31**(3): 635-644

[8] FELTENS J, SCHAER S. IGS Products for the Ionosphere[C]// IGS Analysis Centers Workshop. Darmstadt: ESOC, 1998, 225-232

[9] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J, *et al*. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, **83**(3/4): 263-275

[10] WARANT R, FOELSCHE U, AQUINO M, *et al*. Mitigation of ionospheric effects on GNSS[J]. *Annals of Geophysics*, 2009, **52**(3/4): 373-390

[11] ADIL M A, HADAS T, YANG H, *et al*. Quality assessment of the real-time global ionospheric maps following varying solar dynamics and a severe geomagnetic storm[J]. *GPS Solutions*, 2025, **29**(1): 58

[12] 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)

[13] FELTENS J, DOW J M. Realized and planned improvements in ESA/ESOC ionosphere modeling[C]//Proceedings of the 2006 IGS Workshop. Darmstadt: ESOC, 2006

[14] SCHAER S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System[D]. Berne: Astronomical Institute, University of Bern, 1999

[15] ZHANG H P, XU P L, HAN W H, *et al*. Eliminating negative VTEC in global ionosphere maps using inequality-constrained least squares[J]. *Advances in Space Research*, 2013, **51**(6): 988-1000

[16] ZHU F Y, ZHOU C. Modeling and accuracy evaluation of ionospheric VTEC across China utilizing CMONOC GPS/GLONASS observations[J]. *Atmosphere*, 2025, **16**(8): 988

[17] LIU A, WANG N B, DETTMERING D, *et al*. Using DORIS data for validating real-time GNSS ionosphere maps[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **72**(1): 115-128

最新录用

[18] PETIT G, LUZUM B. IERS Conventions (2010)[R]. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010

[19] XU Xiyu. Study on Spaceborne Radar Altimeter Erroranalysis and Calibration Technology[D]. Beijing: Graduate University Chinese Academy of Sciences (Graduate University Chinese Academy of Sciences), 2008 (徐曦煜. 星载雷达高度计误差分析和定标技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(中国科学院空间科学与应用研究中心), 2008)

第一作者简介：邢晴，女，2000 年生，汉族，河南安阳人，中国科学院国家空间科学中心硕士研究生，研究方向为电磁场与微波技术。E-mail：xingqing23@mails.ucas.ac.cn。



通讯作者简介：王彩云，女，分别于 1997 年和 2001 年获得西安电子科技大学通信与信息工程专业工学学士和工学硕士学位。现为中国科学院国家空间科学中心（北京）副教授。研究方向包括星载高度计定标与验证、合成孔径雷达及散射计。E-mail：wangcaiyun@mirslab.cn。



最新录用