

基于小波分解与重构方法研究电离层偶发 E 层

王栖溪¹ 牛俊² 方涵先² 范鑫³ 包赞¹

1(解放军 31010 部队 北京 100081)

2(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410000)

3(中国卫星海上测控部 江阴 214431)

摘要 电离层不规则体对卫星导航、通信、雷达系统等有重要影响。通过数值模拟及与实测数据的对比,论证基于小波分解与重构方法实现利用掩星数据反演电离层不规则体的可行性。以电离层偶发 E 层为例,利用国际参考电离层 (IRI) 模拟背景电离层电子密度分布,利用掩星探测的水平电子密度总含量 δ_{ht} 反演不规则体信息,并与模拟数据进行比较。对 2009 年 7 月 1–8 日的 COSMIC 掩星数据进行小波分解与重构,将结果与 SPIDR 提供的地面观测数据进行对比。数值模拟及与实测数据的对比结果均表明,该方法能够较为准确地得到电离层不规则体的高度和强度信息,这对于电离层不规则体研究具有重要意义。

关键词 偶发 E 层, 掩星反演, 小波分解与重构

中图分类号 P352

A New Ionosphere Sporadic E Research Method Based on Wavelet Decomposition and Reconstruction

WANG Xixi¹ NIU Jun² FANG Hanxian² FAN Xin³ BAO Yun¹

1(31010 Troops of PLA, Beijing 100081)

2(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000)

3(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431)

Abstract The ionospheric irregularities have important impact on the satellite navigation, communication, radar system *etc.* In this paper, the numerical simulation and observation data contrast are both carried out to validate the feasibility of wavelet decomposition and reconstruction method. Taking sporadic E for example, in numerical simulation, the background of the electron density distribution is simulated by the International Reference Ionosphere (IRI). Then the horizontal total electron density (δ_{ht}) is used in the inversion of the ionosphere irregularities, and the results are compared with the simulated data. With the wavelet decomposition and reconstruction method of observation data, the COSMIC occultation data from 1 to 9 in July 2009 have been compared with the

2021-01-27 收到原稿, 2021-07-28 收到修定稿

E-mail: wangxixi19920218@126.com. 通信作者 牛俊, E-mail: niujun@nudt.edu.cn

ground-based observation data provided by SPIDR. Both results show well accordance with the true value or observation which indicates the method is feasible for the inversion of ionosphere irregularities.

This is in great significance for the research of ionosphere irregularities.

Key words Sporadic E, Occultation inversion, Wavelet decomposition and reconstruction

0 引言

电离层中存在各种尺度的电子密度不规则结构,统称为电离层不规则体。其主要分布在电离层的 E 层和 F 层,表现为偶发 E 层(Sporadic E, Es)和扩展 F 层(Spread F, SF)。其中 Es 是一种常见的电离层低层不规则体结构,在 E 层中具有相对较高的电子密度,大尺度的 Es 范围可达到几十甚至几百 km^[1]; SF 是夜间 F 层电子和离子密度的一种不规则扰动,在电离层图上表现为描述的扩展^[2]。

电波在电离层中传播时会产生折射、反射、法拉第旋转等效应,使得信号发生失真、周跳等,电离层不规则体对电波传播的影响很大^[3-5]。随着科技发展,电离层对人类活动的影响越来越大,例如 Es 常常使得高频表面波雷达的回波信号产生大量杂波,还会大大减小超视距雷达的探测距离,这使得探测电离层不规则体并研究其发生发展的机理愈发重要。

近年来兴起的 GPS 掩星探测技术以其高垂直分辨率而成为探测电离层不规则体垂直分量信息的重要手段^[6]。电离层不规则体能够引起 GPS 的 L1 和 L2 信号强烈扰动, GPS 掩星接收机可以观测到该扰动,进而能够从其观测数据中提取出电离层不规则体信息。搭载于低地球轨道(LEO)卫星(地球探索微卫星载荷 CHAMP, 重力场恢复与气候实验卫星 GRACE, 气象、电离层和气候观测星座系统 COSMIC 等)上的 GPS 掩星接收机可提供全球、全天候、高分辨率的对流层和电离层参数测量数据,实现全球连续的电离层不规则体高时空分辨率探测研究^[7]。GPS 掩星电离层不规则体探测研究始于第一颗 GPS 掩星技术实验卫星(GPS / MET)的观测数据^[8-9]。利用掩星数据探测,通过对 TEC 剖面数据进行差分、平滑滤波得到电离层不规则体引起的小尺度 TEC 扰动,可以分析低电离层不规则体^[10-12]。此外,信噪比、超量相位和电子密度等 GPS 掩星观测数据也可用于探测反演不规则体。天地基联合分析技术可用来分析地基测量(例如垂测仪、地基 GPS、非相干散射雷达等)与掩

星观测的相关性,通过两条射线的交会定位可提取不均匀体位置信息^[4,13],由于扩展 F 的结构和原理更复杂多变,同时在地基数据的可验证性方面不如 Es,因此本文主要从数值模拟及与实测数据的对比两方面,对利用小波分解与重构方法实现掩星数据反演 Es 的可行性进行论证。

1 理论分析与数值模拟

1.1 小波分析

电离层掩星事件中,电子密度变化引起 GPS 信号相位延迟,根据相位延迟可以反演出 GPS 卫星与低轨卫星(LEO)之间的电子密度总含量。电离层中存在的电子密度不规则体会引起水平电子密度总含量的扰动,由于电子密度不规则体相对于电离层而言是小尺度的,因而认为其引起的电子密度总含量变化也是小扰动。如果能够从水平电子密度总含量中反演出这种小扰动,即可得到电离层电子密度不规则体信息。因此,研究的关键是如何提取电子密度总含量的小尺度扰动。

小波分析是一种有效的时频分析方法。小波变换的实质是令信号在一个时域和频域上,均具有局部化性质的平移伸缩小波权函数进行卷积,将信号分解成位于不同时间和频率上的各个成分。设 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换为 $\hat{\psi}(w)$, 当 $\hat{\psi}(w)$ 满足允许条件

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(w)|^2}{|w|} dw < +\infty \quad (1)$$

时,称 $\psi(w)$ 为一个基本小波或母小波。对基本小波 $\psi(w)$ 进行伸缩和平移后得到

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R; a \neq 0. \quad (2)$$

称其为一个小小波序列。其中 a 为伸缩因子或尺度因子, b 为平移因子。对于任意信号 $f(t)$, 其小波变换定义为

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (3)$$

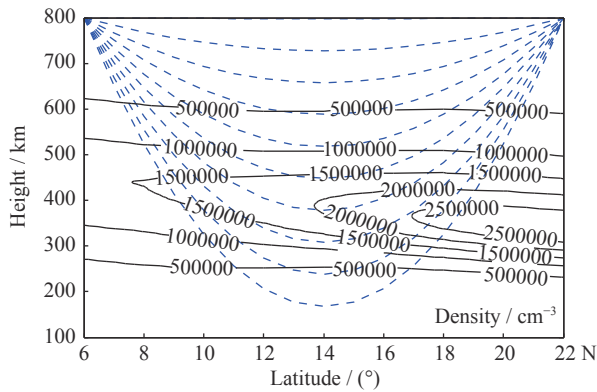


图1 模拟电离层背景场电子密度分布 (虚线为模拟掩星射线路径)

Fig. 1 Electron density distribution of the simulated ionosphere (The dotted line is the simulated occultation ray path)

其中 $W_f(a, b)$ 为小波变换系数, 其重构逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db. \quad (4)$$

利用小波分解与重构, 能够得到表征电离层背景场的低频变化, 进而得到电离层不规则体信息, 本文采用的小波基为 3 阶 sym 小波。

1.2 数值模拟

为研究小波分析方法在掩星反演电离层不规则体信息方面的可行性, 采用数值模拟对该方法进行验证。利用国际参考电离层 (IRI) 模拟电离层 2000 年 1 月 1 日 15:00 LT 的电子密度分布如图 1 所示。

Es 相对于电离层背景场是一个小尺度扰动, 因此选择模拟区域的一小部分进行扰动。模拟 1 中, 在 136~146 km 高度 (考虑边界效应的影响, 将模拟高度提高), 11°N~17°N 区间进行 500% 的电子密度增强, 形成类似于偶发 E 层的形态。如图 2 所示, 在 136~146 km 高度出现了一个电子密度集中区域。图 1 中虚线为模拟的掩星射线路径, 对模拟掩星路径上的电子密度进行积分, 得到模拟掩星事件的水平 TEC, 即 $\delta_{ht}(h)$ 随高度的变化。对 $\delta_{ht}(h)$ 进行小波分析与重构, 得到其低频分量 L_{ht} , 二者之差即为高频分量

$$H_{ht} = \delta_{ht} - L_{ht}. \quad (5)$$

小波重构结果如图 3 所示, 图 3(c) 为小波重构后得到的高频分量 H_{ht} (包含不规则体信息的分量) 随高度的变化。可以看出, 掩星事件发生时, 当 GPS 信号

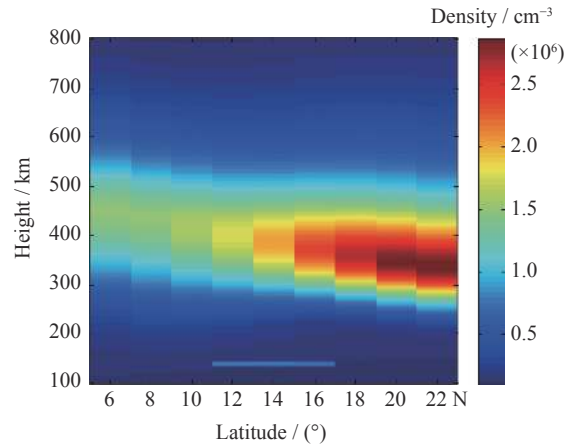


图2 模拟 1 电离层不规则体电子密度分布 (136~146 km, 11°N~17°N 区域; 500% 增强扰动)

Fig. 2 Electron density distribution of ionospheric irregularities in Simulation 1 (136~146 km, 11°N~17°N; 500% enhanced disturbance)

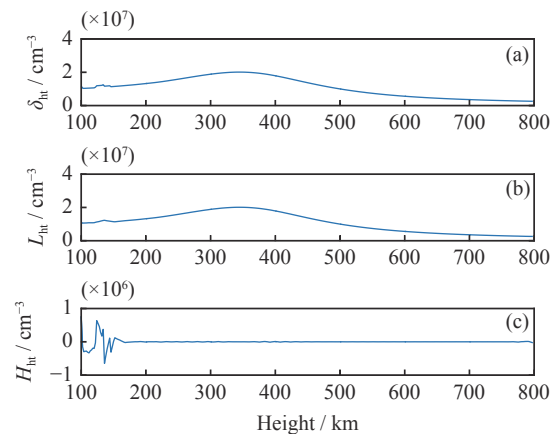


图3 模拟 1 的小波重构结果。(a) 原始 δ_{ht} 随高度变化, (b) 重构的低频分量 L_{ht} 随高度变化, (c) 高频分量 H_{ht} 随高度变化

Fig. 3 Wavelet reconstruction results of Simulation 1. (a) Original δ_{ht} variation with height, (b) low frequency L_{ht} of δ_{ht} , (c) high frequency H_{ht} of δ_{ht}

经过该区域, 水平电子密度总含量出现快速波动, 在其高频分量上表现为 136 km 高度附近存在波动极大值, 并且至 146 km 高度均有较大的波动, 与不规则体的位置对应。因此, 小波重构得到的高频分量能够反映电离层不规则体的位置信息。

为了验证小波重构能否反映 Es 层的尺度和强度信息, 分别进行了模拟 2 和模拟 3 扰动实验。其中, 模拟 2 扰动实验 (146~186 km, 11°N~17°N 区域;

500% 增强)结果如图 4 和图 5 所示;模拟 3 扰动实验 (136~146 km, 11°N—17°N 区域; 1000% 增强)结果如图 6 和图 7 所示。

图 4 和图 5 分别为模拟 2 的电子密度分布和小波分析结果, 模拟 2 中的增强范围为 146~186 km, 图 5(c) 显示的高频分量随高度的变化与模拟 1 有所不同, 波动区域大致为 142~184 km, 波动区域的距离与模拟不规则体尺度基本一致。结合模拟 1 的结

果, 小波分解与重构得到的高频分量波动与不规则体引起的水平电子密度总含量的突变相对应, 波动区域间隔大小反映了不规则体的尺度。

图 6 和图 7 分别为模拟 3 的电子密度分布和小波分析结果。模拟 3 的扰动区域与模拟 1 相同, 但其扰动幅度较大, 相应的水平电子密度总含量突变也较大, 这种变化反映在小波重构的高频分量波动强度上。小波重构结果如图 7 所示, 其高频分量波动位置

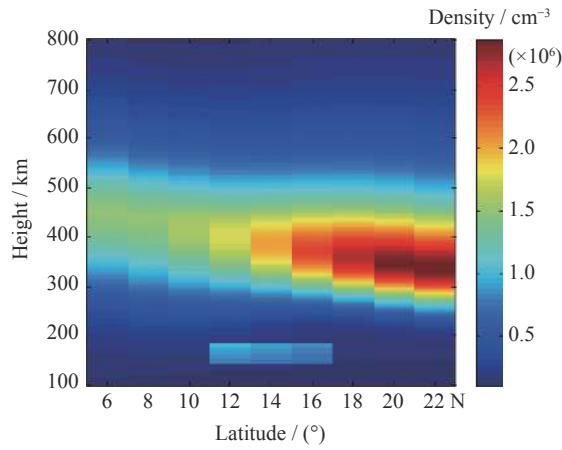


图 4 模拟 2 电离层不规则体电子密度分布 (146~186 km, 11°N—17°N 区域; 500% 增强扰动)
Fig. 4 Electron density distribution of ionospheric irregularities in Simulation 2 (146~186 km, 11°N—17°N; 500% enhanced disturbance)

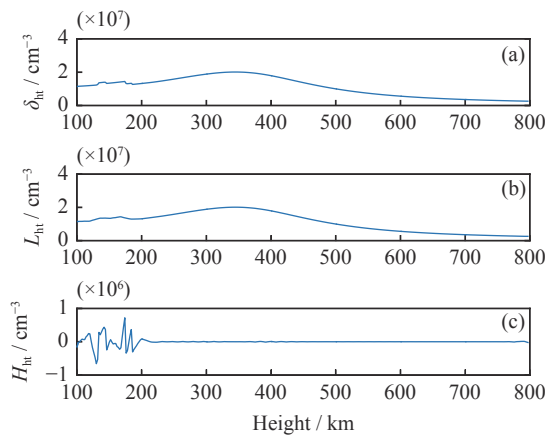


图 5 模拟 2 小波重构结果。(a) 原始 δ_{ht} 随高度变化, (b) 重构的低频分量 L_{ht} 随高度变化, (c) 高频分量 H_{ht} 随高度变化

Fig. 5 Wavelet reconstruction result of Simulation 2. (a) Original δ_{ht} variation with height, (b) low frequency L_{ht} of δ_{ht} , (c) high frequency H_{ht} of δ_{ht}

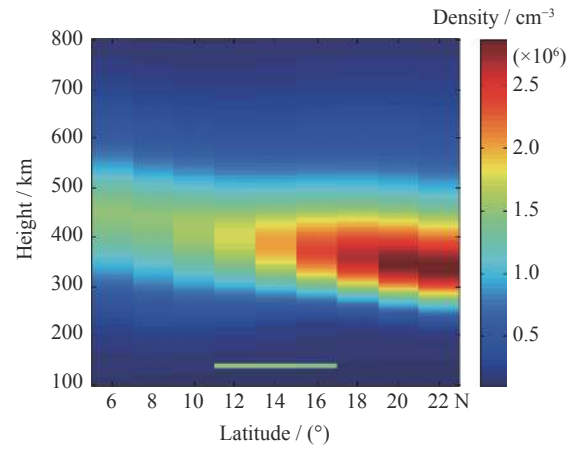


图 6 模拟 3 电离层不规则体电子密度分布 (136~146 km, 11°N—17°N 区域; 1000% 增强扰动)
Fig. 6 Electron density distribution of ionospheric irregularities in Simulation 3 (136~146 km, 11°N—17°N; 1000% enhanced disturbance)

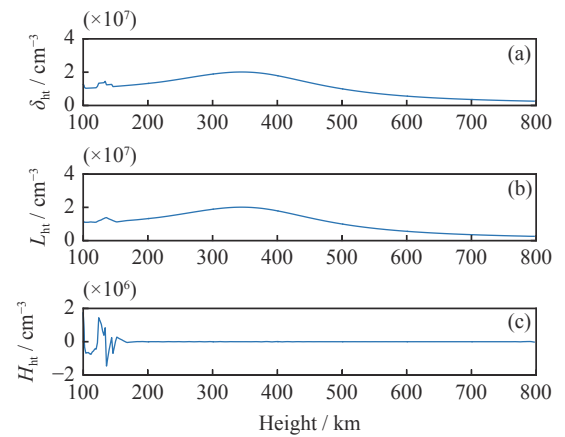


图 7 模拟 3 小波重构结果。(a) 原始 δ_{ht} 随高度变化, (b) 重构的低频分量 L_{ht} 随高度变化, (c) 高频分量 H_{ht} 随高度变化

Fig. 7 Wavelet reconstruction result of Simulation 3. (a) Original δ_{ht} variation with height, (b) low frequency L_{ht} of δ_{ht} , (c) high frequency H_{ht} of δ_{ht}

与模拟 1 一致,但是波动幅度却较大,接近模拟 1 的 2 倍左右,与模拟的扰动幅度变化一致。

综上所述,基于小波分解和重构方法能够有效提取不规则体引起的高频分量信息;高频分量波动所在高度与不规则体高度一致;高频分量波动强度与不规则体的强度成正比。

2 COSMIC 掩星数据分解与验证

利用 COSMIC 中心提供的掩星数据(ionprf)对电离层电子密度进行小波分解和重构,将结果与 SPIDR(Space Physics Interactive Data Resource)中心提供的偶发 E 层临界频率和临界高度地面观测数据进行匹配对比,进一步验证该方法的可行性。SPIDR 中心提供包括指数数据、台站数据、卫星数据、模式数据以及其他形式的空间天气、电离层和太阳活动方面的数据^{*}。这里使用的各地面观测站的数据观测时间周期有 15 min、30 min 和 60 min,为便于使用,对数据按小时取平均值。

利用 2009 年 7 月 1—8 日的掩星观测数据与全球 231 个地面观测站数据进行匹配,匹配原则为平均掩星切点位置与测站经纬度相差小于 1° 。由于数据较少,这里选取几组匹配结果进行验证说明。图 8 为 2009 年 7 月 4 日 18:00 UT 匹配的一次掩星事件中掩星切点与地面观测站 UK(FF051, 51.7°N , 1.5°W)的位置。

图 9 为对该次掩星事件数据进行小波分解和重

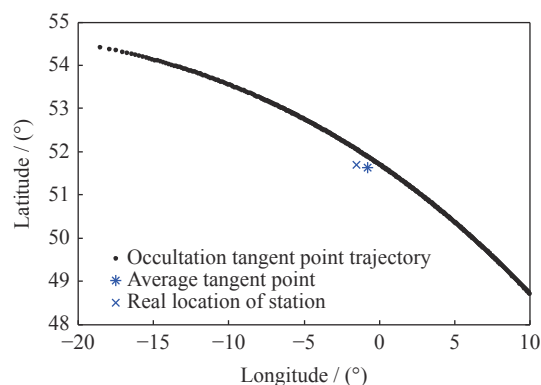


图 8 掩星切点轨迹和测站位置分布

Fig. 8 Distribution of occultation tangent point trajectory and location of station

构后得到的高频分量随高度的变化,从图 9 中可以看出:200~800 km 之间 H_{ht} 绝对值均接近 0,只有微小的浮动;在 80~150 km 区域,其变化较大,最大值在 100 km 附近,幅度为 3.8 TECU,这一结果表明在 100 km 高度附近有电离层不规则体 Es 的存在。图 10 为地面观测站当天的 Es 观测结果。地面观测数据显示,18:00 时 Es 的临频为 4.1 MHz,临频高度为 103 km,与小波分解结果较为一致。

表 1 给出匹配掩星事件的小波分解和重构后的高频分量与观测结果对比,从表 1 可以看出:高频分量最大值高度与观测值基本一致,FF051 站小波分解

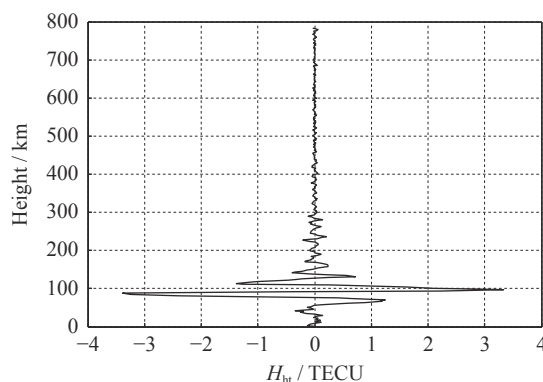


图 9 匹配掩星事件高频分量随高度的分布

Fig. 9 H_{ht} variation with height of the matching occultation

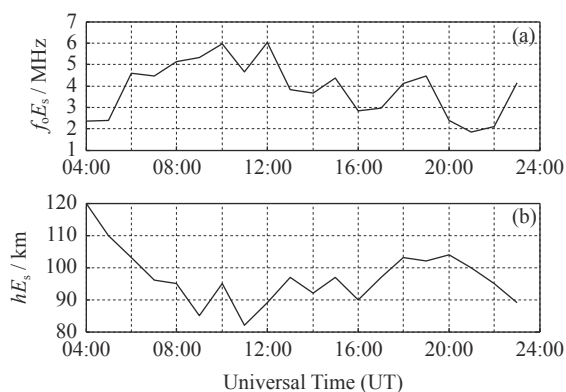


图 10 UK 站 2009 年 7 月 4 日的 Es 观测结果。

(a) Es 临频随时间的变化, (b) Es 临频高度随时间的变化

Fig. 10 Es observation results on 4 July 2009 of UK station. (a) Evolution of the critical frequency, (b) evolution of the height of critical frequency

^{*} <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp> (已停止提供数据)

表 1 匹配掩星事件小波分解结果与观测结果对比

Table 1 Comparison between wavelet reconstruction result of matching occultation and observation

测站代号	测站坐标	时间(UT)	临频/MHz	临频高度/km	高频分量 最大值/TECU	高频分量最大值 对应高度/km
FF051	(51.7°N, 1.5°W)	2009年7月4日 18:00	4.1	103	3.38	100
FF051	(51.7°N, 1.5°W)	2009年7月6 日 06:00	3.13	107	1.10	102
AT138	(38°N, 23.5°E)	2009年7月2日 02:00	2.25	97	0.186	80.6
EA036	(37.1°N, 6.7°W)	2009年7月7日 03:00	2.21	115	0.13	98
JG055	(54.6°N, 3.4°E)	2009年7月5日 06:00	3.55	112	1.02	109

误差在 5 km 以下, AT138 和 EA036 误差较大, 这可能是由于掩星点距离该站较远造成的; 高频分量最大值与临频成正比, 高频分量最大值越大, 对应的临频越大, 这说明高频分量最大值可反映电离层不规则体 Es 强度。

3 结论

通过数值模拟及与实测数据对比, 验证了小波分解与重构方法用于掩星反演电离层不规则体 Es 的可行性。数值模拟实验表明: 基于小波分解和重建能够有效提取不规则体引起的高频分量, 即电子密度梯度的剧烈变化; 高频分量波动所在高度与不规则体高度一致; 高频分量波动强度与不规则体的强度成正比。将实测数据小波分解结果与地面观测结果对比发现: 水平电子密度总含量高频分量最大值对应高度与电离层不规则体临频高度一致, 其大小与临频存在正比关系。以上结果表明小波分解与重构方法能够有效提取电离层不规则信息, 在掩星探测电离层不规则体方面具有广泛应用前景。

致谢 掩星数据由 COSMIC 中心提供, 地面观测数据由 SPIDR 提供。

参考文献

[1] MATHEWS J D. Sporadic E: current views and recent progress[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1998, **60**(4): 413-435

[2] GORDON W E. Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. *Proceedings of the IRE*, 1958, **46**(11): 1824-1829

[3] FENG M. Detection of High-Latitude Ionospheric Irregularities from GPS Radio Occultation[D]. Calgary: University of Calgary, 2010

[4] HOCKE K, TSUDA T. Gravity waves and Ionospheric ir-

regularities over tropical convection zones observed by GPS/MET Radio Occultation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(14): 2815-2818

[5] TSUDA T, HOCKE K. Using GPS satellites to study plasma irregularities[J]. *GPS World*, 2001, **12**(7): 34-36

[6] 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*, 2007, **112**(A7): A07308

[7] YUE X, SCHREINER W S, KUO Y H, et al. GNSS radio occultation technique and space weather monitoring[C]//Proceedings of the 26 th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, Tennessee: ION, 2013

[8] HAJJ G A, IBÁÑEZ-MEIER R, KURSINSKI E R, et al. Imaging the ionosphere with the global positioning system[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1994, **5**(2): 174-187

[9] LEITINGER R, LADREITER H P, KIRCHENGAST G. Ionosphere tomography with data from satellite reception of Global Navigation Satellite System signals and ground reception of Navy Navigation Satellite System signals[J]. *Radio Science*, 1997, **32**(4): 1657-1669

[10] HOCKE K, IGARASHI K, PAVELYEV A. Irregularities of the topside ionosphere observed by GPS/MET radio occultation[J]. *Radio Science*, 2002, **37**(6): 1101

[11] WANG Xixi, FANG Hanxian, NIU Jun. Analysis of ionospheric irregularities in F layer based on COSMIC data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, **59**(2): 419-425 (王栖溪, 方涵先, 牛俊. 基于COSMIC资料分析电离层F层不规则体结构[J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(2): 419-425)

[12] YEH W H, HUANG C Y, HSIAO T Y, et al. Amplitude morphology of GPS radio occultation data for sporadic-E layers[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(A11): A11304

[13] NIU J, FANG H X, WANG X X, et al. Analysis of the ionosphere irregularities in E region based on COSMIC occultation data[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **56**(9): 1895-1900

(责任编辑: 宋雅娜)