

数字电离层建设的必要性

乐新安^{1,2}, 万卫星^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所; 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘要 实际应用中, 针对不同的电离层电波传播效应, 对不同的电离层参量特性, 需采用不同手段的观测或不同参量模式的预测预报, 解决不同的应用需求。这种“各自为阵”的方式不仅浪费资源, 应用效果也较差。为此, 本文提出了数字电离层概念, 即综合利用中国已有及已经立项的空地多源立体探测体系, 在电离层模式化研究的基础上, 通过数据融合和数据同化, 用数字化方式描述电离层状态参量过去、现在和未来的状况, 高效统筹解决各类工程应用中对不同电离层参量的需求。介绍了数字电离层建设的必要性和国内外现状, 重点说明了其主要内容和面临的技术瓶颈。

关键词 电离层; 数据同化; 高频通信; 北斗卫星导航系统

1 需求分析

地球高层大气中存在的中性原子和分子在吸收太阳紫外和极紫外辐射后, 离化形成电离层, 电离层白天的峰值电子数密度达 $10^{12}/\text{m}^3$, 足以影响无线电波的传播。电离层电子数密度除了受光离化作用影响外, 还会通过动力学和电动力过程与背景中性大气紧密耦合, 同时受到高能沉降和焦耳加热等来自磁层的能量注入影响, 以及潮汐等来自低层大气的波动作用, 呈现出时空尺度复杂多变的特点。图1给出了多源数据同化后得到的一个固定时刻全球电离层电子密度的空

间分布特点^[1], 图1(b)、(d)是对应的峰值电子密度和高度积分电子总含量地图, 这2个参量在实际应用中需求最频繁。可见, 全球电子密度呈现出显著的空间变化特征, 包括经纬度变化、高度变化等。电离层同时还有此图没有呈现出来的时间变化特征如周日变化、季节变化、太阳活动周变化甚至更长尺度的长期趋势等。在地磁扰动期间, 由于高纬能量注入的显著增加, 全球电离层会呈现剧烈的扰动。同时, 在高/低纬地区, 尤其在夜间, 会出现小尺度不均匀体, 造成穿越其间电波信号的闪烁。

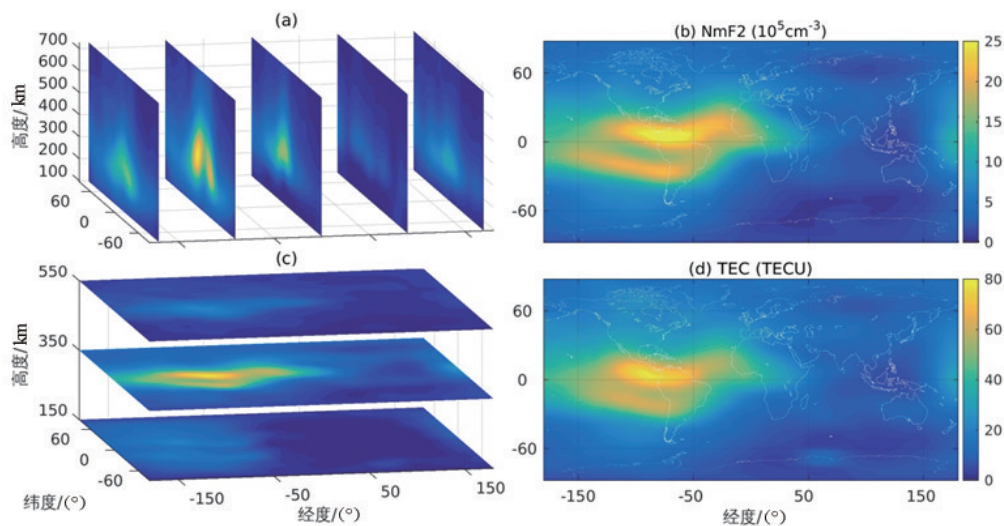


图1 同化得到的三维电子密度示例(a)(c)及对应的峰值电子密度地图(b)和电子密度总含量地图(d)
Fig. 1 Demonstration of assimilation derived 3D electron density (a) (c) and corresponding peak electron density map (b) and total electron content (TEC) map (d)

收稿日期: 2016-12-21; 修回日期: 2017-08-24

基金项目: 青年海外高层次人才引进计划; 中国科学院国防科技创新重点部署项目(KGFZD-135-16-01)

作者简介: 乐新安, 研究员, 研究方向为空间物理, 电子信箱: yuexinan@mail.iggcas.ac.cn; 万卫星(通信作者), 中国科学院院士, 研究方向为空间物理及行星空间环境, 电子信箱: wanw@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 乐新安, 万卫星. 数字电离层建设的必要性[J]. 科技导报, 2017, 35(19): 62-66; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.19.008

电离层中的大量自由电子会造成穿越其间的无线电波发生附加时间和相位延迟,同时也提供了通过电离层反射实现远距离通信的可能性,并对若干主要临近空间通信系统产生影响。实际应用中,需要知道电子密度分布的某些信息才能消除这些影响,主要包括:1) 北斗等导航定位系统。当卫星导航信号穿过电离层时,其间存在的大量电子通过折射的方式直接造成测量信号高达百米的延迟,对单频用户而言,需要知道电波射线路径上电子密度总含量进行电离层延迟校正正是提高定位精度的关键因素;同时电离层里存在的小尺度不均匀体通过散射的方式造成信号闪烁甚至失锁,影响了观测的精度和完好性。因此电离层是卫星导航定位系统不容忽视的重要误差源,并且其改正效果也直接影响着系统服务的可用性、精度及可靠性等核心性能指标。2) 短波通信。短波通信由于具有无中继、抗打击、远距离等特点,一直在缺乏有线网络设施的海洋地区、边疆地区具有极其重要的意义。并且,在重大灾害期间由于传统的基础设施可能受到破坏,短波通信通常是应急、救灾等重要的支撑手段。电离层环境及其变化,是制约短波通信效率和可靠性的重要瓶颈,实际应用中,需要知道通信区域峰高以下电子密度的分布,才能选择合适的通信频率、寻找最优的通信信道,进而提升短波通信效率、增加通信的可靠性。3) 天波超远程雷达。天波超远程雷达是基于电离层返回散射传播机理实现地平线外高达800~3500 km距离内、数百万 km^2 范围低、中、高空目标的探测。天波返回散射传播方式严重依赖电离层电子密度的分布特性,首先,根据返回散射测量的回波特性进而确定目标的位置和运动速度,需要知道电波路径上精确的电子密度分布特性;其次,电子密度的不均匀性可以引起电波的折射效应、法拉第效应和衰减效应,从而影响了回波的质量,造成目标检测的精度降低。4) SAR雷达成像观测。对于处于L波段或者更低频率的SAR雷达,电波传播路径上的电子密度会造成附加时间延迟,而成像区域电子密度时空梯度的存在则会造成成像的畸变,不均匀体则会造成信噪比下降进而影响成像精度。实际应用中,需要知道成像区域电子密度及其梯度的分布进行相应的效应补偿等。图2展示了电离层与这些通信系统的关系。表1则对这些具体应用中对电离层的需求及目前常用的方法进行了总结。

目前,以上的应用主要基于对应的电离层效应,对不同参量采用不同的观测手段、简化假设或经验模式的预测预报,解决实际应用需求,这种“各自为阵”的方式不仅浪费资源,应用效果也较差。一般来说,直接观测的精度很高,但是时空覆盖不全,不能给出任何需求时刻和地点的电子密度分布,且观测本身不具备预报能力。基于基本物理原理的理论模型可以给出全球尺度电离层的时空特征,也具备预报能力,但由于模式的不完备,模拟结果有时有相当大的偏差。数据同化系统则可以充分结合数据和理论模式各自的优势,生成既满足物理原理,又与观测接近的全球尺度电离层状态

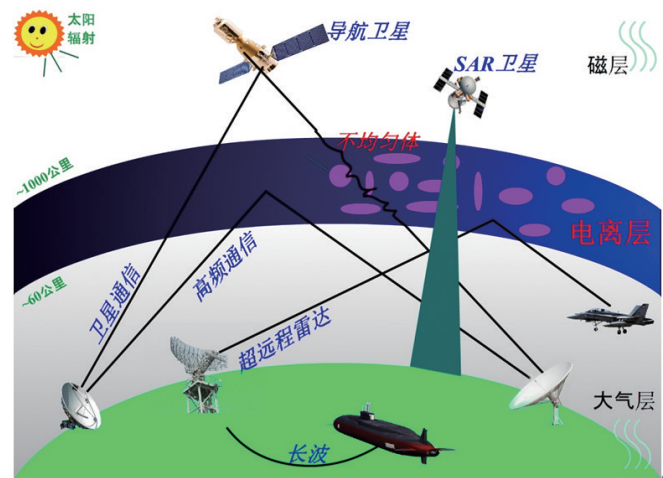


图2 电离层与各通信系统

Fig. 2 Ionosphere and multiple radio wave communication systems

表1 电离层在通信上常见应用的具体需求及目前常见解决方法

Table 1 Specific requirement of communication applications on ionosphere and current common solution

应用方向	具体需求	目前方法
导航卫星	传播路径电子总含量 (TEC)	地基TEC地图
短波通信	通信区域峰高以下电子密度剖面	地基临界频率地图
超远程雷达	电波路径上电子密度信息	基于马丁定律的地基辅助
SAR雷达	成像区域电波路径上斜TEC梯度	经验方法

的现报和预报,即数字电离层。除了以上实际应用需求驱动外,还有以下一些条件也促进了数字电离层建设。1) 观测的增多。经过几十年的发展,全球已经形成了比较完善的地基电离层探测网络,如测高仪台网、GNSS网络^[2]、气辉网络等,各个国家或地区出于科学或应用目的也建立了区域的密集观测网络等^[3]。另外,卫星探测也越来越多,包括无线电掩星、在轨密度/速度/温度/电磁场测量、遥感等手段,且呈现出星座化、微小型化等趋势^[4]。2) 模式的完善。经过近半世纪的发展,许多研究组或科研人员已经建立了多样化的电离层经验模式、理论模式等,且部分模式已经开源可以公开使用,如国际参考电离层(IRI)^[5]、美国大气研究中心的电离层热层电动力学耦合模式(TIEGCM)等^[6]。3) 数据同化方法的成熟。在大气和海洋领域,由于数值天气预报的应用需求,科学家们在数据同化方法上开展了广泛的研究,目前很多常用方法如变分法、(集合)Kalman滤波法、混合同化法等都比较成熟,可以直接借鉴^[7]。4) 计算机及网络技术的发展。计算能力的快速发展使得可以完成电离层模拟和数据同化时面

临的大规模计算和存储问题,同时网络的快速发展使得数据获取和传输变得快捷^[8]。

2 数字电离层

图3总结了数字电离层的具体模块及各模块间的关系。

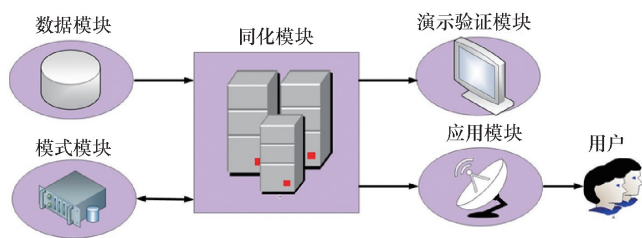


图3 数字电离层的具体组成模块

Fig. 3 Modules of numerical ionosphere

2.1 模式

模式是数字电离层的基础。模式是建立在基础研究之上、基于观测分析或者理论分析而得到的对电离层各状态参量时空变化的数学描述。常见的有基于数据的经验分析得到的经验模式和基于物理原理的理论模式。电离层理论模式涉及的物理模块可以简单划分为电离层模块、热层模块和电动力学模块;根据是否自洽求解,可以划分为耦合模式和非耦合模式。目前,常用的开源经验模式包括IRI、NeQuick,常用的开源理论模式有美国大气研究中心开发的热层-电离层-电动力学耦合模式。在数字电离层中,模式一方面为数据同化提供初始猜测场,同时在满足模式约束的情况下,把观测的影响由数据密集的地方向数据稀疏的地方传播(现报)及由过去向未来传播(预报)。根据使用数据同化方法的不同,数据同化中还需对模式的不确定性进行相应描述。图4给出了乐新安等^[8]开发的纯电层理论模式结构框图,可以看到,电离层理论模式主要基于数值化求解等离子体连续性方程、动量方程和能量方程,考虑的离子成分包括主要的原子离子和分子离子,同时太阳辐射、背景大气密度、温度、中

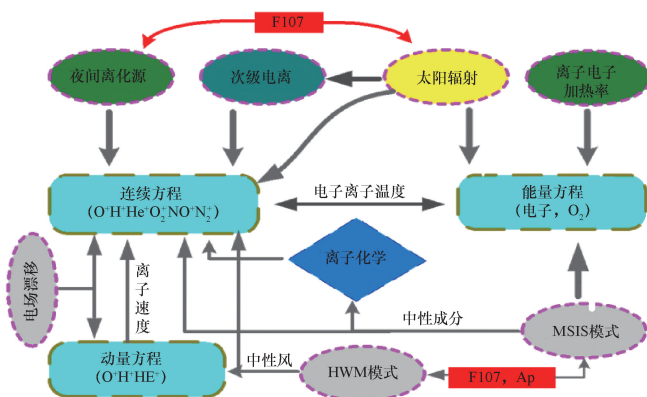


图4 典型电离层理论模式框架示例

Fig. 4 Examples of typical ionospheric theoretical model frameworks

性风场、电离层电场等参数则是通过参数化模式提供。

2.2 观测

观测是数字电离层的灵魂。所有能从模式计算结果通过正演方式得到的观测都可以同化到模式中。观测包括常规观测(如测高仪/非相干雷达观测的电子密度剖面)、非常规观测(积分电子总含量、频高图等)。数字电离层中观测的作用是对背景模式值进行修正、使同化后结果更接近真实状态,并为模式提供初始场进而向前预报。实际同化中,需要对每一种观测进行处理、质量控制、误差估算、观测算子(由格点向观测的映射)编写等。不同的观测由于观测原理和观测构型的不同,提供的电离层信息也不同。如:测高仪和非相干雷达可以直接提供观测区域附近几百千米范围内电离层的剖面信息;地基GNSS主要观测仰角大于0的射线积分电子总含量,故主要提供陆地上电离层的水平变化信息;天基GNSS掩星观测则具有较高的垂直分辨率,但水平分辨率较低;卫星在轨观测则主要提供沿轨道方向变化的电离层信息。图5给出了1天内6颗COSMIC掩星卫星观测的掩星切点分布和IGS地基GNSS台站在电离层高度穿透点的分布,同时标识了GNSS和测高仪台站的位置,可见天基观测具有较好的全球分布特征,但地基观测主要集中在陆地,在实际同化时,不同构型的天地基观测联合同化对获得准确的电离层同化结果至关重要^[1]。需要说明的是,数字电离层得到的电离层电子密度的精确程度取决于观测的数量,有些需求的解决则需要足够多的观测才能满足,如SAR雷达。

2.3 同化方法

作为数字电离层的桥梁,同化方法把观测和模式进行有效融合,使同化结果既满足观测又与模式描述的时空变化规律自洽。目前常用的数据同化方法如变分法、Kalman滤波等都是基于贝叶斯估计理论推导而来。具体使用上根据对背景误差协方差处理的不同而命名不同。大气和海洋领域已有成熟的方法可供借鉴使用。

2.4 演示验证

演示验证是数字电离层的结果诊断。数字电离层的结果需要进行合理的演示,并经过系统验证,才能进行后续的应用。验证包括:内符合检验,检验各种同化数据源是否合理的被同化进去及它们在最终结果中的效果;外符合检验,通过跟独立数据源直接比对,确定同化结果是否可靠。

2.5 应用

应用是数字电离层的最终目的。基于数字电离层系统,可生成以下数据产品:电离层再分析产品^[1],融合与同化历史观测资料获得的过去电离层参量;电离层现报产品,融合与同化当前观测资料获得的现在电离层参量;电离层预报产品,融合与同化当前观测资料,经预测获得的未来电离层参量。基于数字电离层的三维电子密度,可生成以下无线电通信产品:特定频率无线电波在特定路径上的电离层延迟修正;高频通信频率及最优发射角确定;长波导航和通信中的波导模式参数;卫星导航的完好性概率。

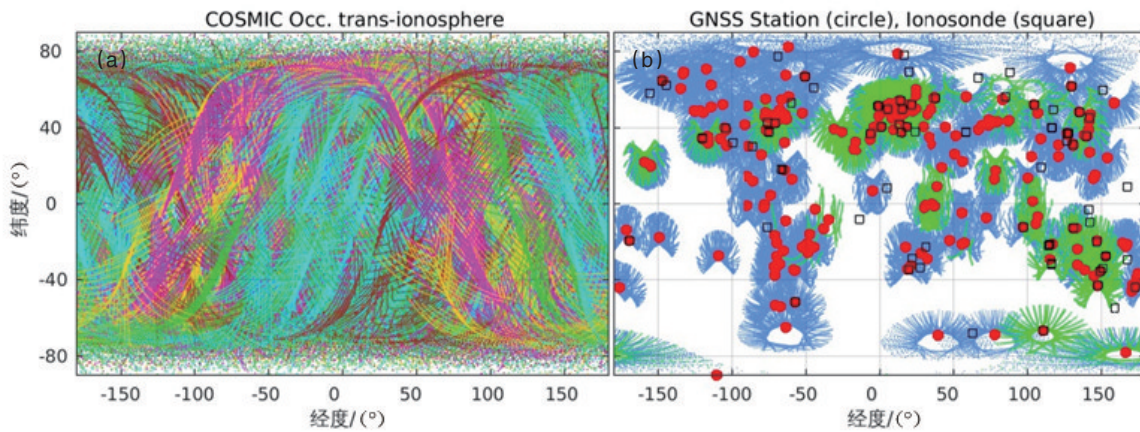


图5 1天内6颗COSMIC卫星观测掩星事件的分布(a)和IGS地基GNSS台站在电离层高度穿透点的分布(b)

Fig. 5 Distributions of radio occultation events observed by 6 COSMIC satellites during one day (a); Ionospheric pierce points of IGS GNSS stations (b)

3 研究现状及主要技术瓶颈

1999年,美国国防部支持南加州大学和喷气推进实验室(JPL)团队^[9]、犹他州立大学(USU)团队^[10],两个团队开发电离层同化模式(GAIM),目前USU-GAIM已经在美国空军空间天气业务中心实时运行,为用户提供高频通信条件和折射修正产品。通过对GAIM模式的初步评估,它明显比单纯的理论模式或者经验模式(如国际参考电离层IRI)的结果好得多,关于模式的评估工作还在CCMC等机构继续,但发展电离层同化模式来解决实际工程中的需求已经成为国际上的共识。目前,除了美国,国际上基于物理基础的电离层同化模式还没有得到发展和应用。在中国,中国科学院地质与地球物理研究所利用经验正交函数方法发展了中国区域的TEC地图模式^[11],中国科学院空间科学与应用研究中心利用GPS数据和经验模式开发了中国区域的电离层同化模式,并实现了业务化运行^[12]。中国气象局也开发了TEC的地图模型^[13]。电波所则基于国内测高仪观测生成临频等特征参量的地图供电波传播相关应用,并发布周报、月报等^[14]。

目前主要的技术瓶颈有4方面。

1) 目前电离层区域的观测主要集中在电离层电子密度,其他的参量相对较少。纯电层参量(如密度、温度)对过去“记忆力”相对较短^[15],相反背景中性大气对过去的记忆却可以长达1天至数天,因此对电离层的整体现报和预报需要利用全耦合理论模式,以期充分利用电子密度海量观测和中性大气记忆力长这两个特点,以达到对这个系统的主要参量最优化,实现精确现报和短期预报目标^[16]。包括NASA在内的机构近几年都加大了这方面研究的资助力度,以期提高电离层的短期预报能力。但由于该系统的复杂性,目前还没有成型可用的模式。大多数学者采用集合Kalman滤波算法^[17-19],通过集合结果统计电子密度与主要驱动参量之间的相关性来达到对这些参量的最优化目的,但是由于电离层维度较高,导致集合Kalman滤波面临超大规模计算与存储问题,离

实时或者业务化运行还有差距。

2) 电离层主要受太阳辐射控制,与低层大气相比,随时间变化更剧烈,在实际应用中,即使间隔0.5 h,在某特定区域的电离层已然发生了显著的变化,因此当把数字电离层应用到实际通信需求中,实时性要求高,目前尽管网络速度已经不是瓶颈,但是要满足实时的数据观测和传输,尤其是天基,还有相当的难度。

3) 除电离层“记忆力短”限制了预报尺度外,另外限制预报尺度的因素是电离层的外驱动能量过程,包括低层大气的波动上传和高纬能量注入。尤其在磁暴的时候,高纬能量注入直接决定了全球电离层扰动的幅度和形态,目前关于这些外驱动过程,大多数模式都是采用参数化的办法,这一程度上限制了电离层预报的能力,尤其是地磁扰动的时候,而扰动时恰恰是目前电离层电波修正中采用的经验模式效果变差时^[20]。

4) 电离层内存在的小尺度不均匀体通过多路径效应造成穿过其间的电波信号出现闪烁,进而造成观测精度的降低,影响系统的精度和完好性,因此实际需求中对不均匀体的现报和预报也至关重要。尽管不均匀体的出现有统计规律,但本质上还是很随机的过程,造成现报和预报都很困难,目前的数字电离层尚无法提供不均匀体的信息。

4 结论

随着人类空间活动的日趋频繁,对电离层电子密度精确描述的需求也越发强烈。随着与电离层相关的天地基多源观测体系的完善、电离层模型的成熟及计算能力的提高,可以借鉴数值天气预报的经验,采用数据同化的方法,把观测与模式有机结合起来,生成既满足基本物理原理又与观测符合的电离层现报与短临预报,统筹高效解决各类工程应用中对电子密度的需求。未来研究的重点是突破电离层短临预报技术。

参考文献 (References)

- [1] Yue X, Schreiner W S, Kuo Y, et al. Global 3D ionospheric electron density reanalysis based on multisource data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2012, 117(A9): 667–672.
- [2] Hu L, Yue X, Ning B. Development of the Beidou ionospheric observation network in China for space weather monitoring[J]. *Space Weather*, 2017, 15, doi:10.1002/2017SW001636.
- [3] Wang C. New chains of space weather monitoring stations in China[J]. *Space Weather the International Journal of Research & Applications*, 2016, 8(8): 1–5.
- [4] Yue X, Schreiner W S, Pedatella N, et al. Space weather observations by GNSS radio occultation: From FORMOSAT-3/COSMIC to FORMOSAT-7/COSMIC-2[J]. *Space Weather*, 2014, 12(11): 616–621.
- [5] Bilitza D, Mckinnell L A, Reinisch B, et al. The international reference ionosphere today and in the future[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(12): 909–920.
- [6] Richmond A D, Ridley E C, Roble R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 19(6): 601–604.
- [7] Evensen G. *Data Assimilation: The ensemble kalmanfilter*[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [8] 乐新安. 中低纬电离层模拟与数据同化研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
Yue Xinan. Modeling and data assimilation of mid- and low-latitude ionosphere[D]. Beijing: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [9] Wang C, Hajj G, Pi X, et al. Development of the global assimilative ionospheric model[J]. *Radio Science*, 2004, 39(1): 1–11.
- [10] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM)[J]. *Radio Science*, 2004, 39(1): 429–451.
- [11] 万卫星, 宁百齐, 刘立波, 等. 中国电离层 TEC 现报系统[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1040–1045.
Wan Weixing, Ning Baiqi, Liu Libo, et al. Nowcasting the ionospheric total electron content over China[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(4): 1040–1045.
- [12] Aa E, Liu S, Huang W, et al. Regional 3D ionospheric electron density specification on the basis of data assimilation of ground-based GNSS and radio occultation data[J]. *Space Weather—the International Journal of Research & Applications*, 2016, 14(6): 433–448.
- [13] Yu T, Mao T, Wang Y G, et al. Using the GPS observations to reconstruct the ionosphere three-dimensionally with an ionospheric data assimilation and analysis system (IDAAS)[J]. *Science China Technological Science*, 2014, 57(11): 2210–2219.
- [14] 欧明, 甄卫民, 徐继生, 等. 电离层多源数据同化方法研究[J]. *电波科学学报*, 2015, 30(1): 147–152.
Ou Ming, Zhen Weimin, Xu Jisheng, et al. Research on ionospheric multisource data assimilation method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(1): 147–152.
- [15] Jee G, Burns A G, Wang W, et al. Duration of an ionospheric data assimilation initialization of a coupled thermosphere-ionosphere model [J]. *Space Weather the International Journal of Research & Applications*, 2016, 5(1): 1–11.
- [16] Hsu C, Matsuo T, Wang W, et al. Effects of inferring unobserved thermospheric and ionospheric state variables by using an Ensemble Kalman Filter on global ionospheric specification and forecasting[J]. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 2015, 119(11): 9256–9267.
- [17] Yue X, Wan W, Liu L, et al. Data assimilation of incoherent scatter radar observation into a one-dimensional midlatitude ionospheric model by applying ensemble Kalman filter[J]. *Radio Science*, 2016, 42(6): 1–20.
- [18] Schunk R W, Scherliess L, Eccles V, et al. Space weather forecasting with a multimodel ensemble prediction system (MEPS)[J]. *Radio Science*, 2016, 51(7): 1157–1165.
- [19] Matsuo T, Lee I, Anderson J L. Thermospheric mass density specification using an ensemble Kalmanfilter[J]. *Journal of Geophysical Research—Space Physics*, 2013, 118(3): 1339–1350.
- [20] Lei J, Liu L, Wan W, et al. Modeling the behavior of ionosphere above Millstone Hill during the September 21–27, 1998 storm[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66(12): 1093–1102.

Necessity of numerical ionospheric construction

YUE Xin'an^{1,2}, WAN Weixing^{1,2}

1. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics; Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In real applications regarding ionospheric radio wave propagation, the community usually needs appropriate ionospheric parameters on a case by case basis, due to different methods, models, and requirements in the forecast. The kind of ‘lack of coordination’ way not only wastes resources but also degrades the application performance. In this paper we propose a new concept ‘numerical ionosphere’ to describe the past, present, and future of ionospheric parameters through assimilating multiple observations into the model to solve the demand of different ionospheric parameters in various engineering applications efficiently and comprehensively. Then, we address the necessity and status of numerical ionosphere development. Finally, we focus on the main content and technical bottleneck of numerical ionosphere.

Keywords ionosphere; data assimilation; HF communication; BDS

(责任编辑 傅雪)