

第十一届全国空间环境及其应用专题
研讨会

论文摘要集

目 录

NO. 1	智能驱动的空间环境数据应用新机遇	8
NO. 2	太阳和地磁活动对高层大气密度和卫星轨道的影响	9
NO. 3	火星辐射环境研究	9
NO. 4	空间天气对空间站长期运营影响分析及对策建议	10
NO. 5	中国空间站轨道运行安全态势及空间环境分析	10
NO. 6	我国空间站空间环境保障需求初步思考	11
NO. 7	空间站及探月任务空间辐射环境保障重点	11
NO. 8	中国载人空间站空间环境探测数据的处理和应用	12
NO. 9	L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜介绍	13
NO. 10	基于自主监测数据的地磁预警技术研究	16
NO. 11	利用预报误差拟合实现两行根数异常探测	16
NO. 12	用国际空间站上的阿尔法磁谱仪精确测量从 2011 到 2019 年, 磁刚度从 1 到 100GV 质子能量谱的周期变化	17
NO. 13	火星热层电离层耦合模式	18
NO. 14	火星上游太阳风预报系统	18
NO. 15	火星大气沙尘与潮汐耦合的频域分析	19
NO. 16	低太阳活动期间火星热层重力波谱分析	20
NO. 17	Simulation of transient topside layer in the Martian ionosphere	21
NO. 18	ENA imaging simulation of the distant planetary magnetosphere and the discussion of ENA emission cone of the solar wind	21
NO. 19	木星空间环境特点分析与研究	22
NO. 20	Three-dimensional particle-in-cell simulation of the solar wind interaction with asteroid 2016 HO ₃	23
NO. 21	嫦娥 7 号中性原子成像及其反演算法研究	24

NO. 22	月球着陆器定位方法及误差源影响探究.....	25
NO. 23	γ 射线暂现源监测器本底模型研究.....	25
NO. 24	我国宇航空间环境领域标准化工作进展.....	26
NO. 25	空间天气研究和预报中的大数据和人工智能.....	26
NO. 26	基于深度学习的动态磁图生成模型.....	27
NO. 27	太阳耀斑智能预报模型的磁图分辨率敏感性分析.....	30
NO. 28	基于 Ensemble-Unet 模型的全球 Nino3.4 指数预报.....	30
NO. 29	一种应用于耀斑预测中不平衡数据的选择性上采样方法：有提高模型性能 的潜力.....	31
NO. 30	基于极紫外数据的太阳耀斑智能预报模型.....	32
NO. 31	基于深度学习的太阳耀斑预报模型压缩.....	33
NO. 32	日冕物质抛射相似事件推荐.....	33
NO. 33	基于深度学习的日冕物质抛射渡越时间预报.....	34
NO. 34	基于概率模式指导的太阳风速度预报.....	35
NO. 35	基于极值理论的多分布太阳风速联合预测.....	35
NO. 36	基于可解释性机器学习的电离层等离子体泡的识别及相关性分析.....	36
NO. 37	利用 LSTM 集成模型进行热层质量密度的暴时预测.....	37
NO. 38	基于残差网络的热层密度深度学习模型.....	38
NO. 39	基于机器学习的 TID 气辉观测长期统计.....	38
NO. 40	一种轻量化的全球 TEC 预测模型.....	39
NO. 41	Plasma-Sheet Bubble Identification Using Multivariate Time Series Classification.....	40
NO. 42	基于 IncResUnet 的电离层等离子体泡的识别.....	41
NO. 43	基于高性能数据库的大规模科研计算工程化应用理念与实践.....	41
NO. 44	空间环境科学数据安全分级概念框架研究.....	44
NO. 45	基于相空间密度关联法的 FY3B 的跨卫星交叉定标.....	45

NO. 46	北斗 M04 与 GPS ns63 相对论电子在轨交叉定标研究	46
NO. 47	基于高分辨力光学图像的太阳黑子自动识别	47
NO. 48	基于 520km 球形卫星实测数据的暴时大气密度增强焦耳加热影响研究 ...	48
NO. 49	MUSER and IPS Telescopes for Space Environment Monitoing	49
NO. 50	中高层大气风场探测多普勒差分干涉仪研究进展	50
NO. 51	基于自主数据的日地因果链灾害环境及效应联合观测研究	50
NO. 52	行星际激波低频射电三维层析成像探测	52
NO. 53	溴化镧晶体与 SiPM 在“怀柔一号”(GECAM) 卫星项目中的应用	52
NO. 54	稻城太阳射电成像望远镜进展与展望	53
NO. 55	羊八井站回眸与展望	54
NO. 56	基于电子密度剖面的热层参数反演	55
NO. 57	夜气辉反演电离层 foF2 算法的精度分析	55
NO. 58	北方中纬高频雷达大型相控阵天线定标方法研究	56
NO. 59	利用一种带有保护管的新型朗缪尔探针进行低密度等离子体的可靠测量 .	56
NO. 60	ASO-S 卫星 HXI 载荷的在轨背景研究	57
NO. 61	大视场自适应光学技术进展及其在太阳高分辨力探测中的应用	58
NO. 62	空军临近空间天气保障需求及思考	59
NO. 63	临近空间大气密度扰动对高超声速飞行器气动热环境的影响	59
NO. 64	磁尾等离子体注入与卫星充放电事件联合探测数据分析	60
NO. 65	空间充放电诱发典型星用电路异常的实验研究	60
NO. 66	轨道参数对空间粒子影响及 KF01A 星实例分析	61
NO. 67	基于张衡一号高能粒子数据的太阳质子事件观测及质子对 MeV 电子污染评估	62
NO. 68	无人机载干涉成像全系统模拟试验与分析	66
NO. 69	超强太阳风暴引起的低纬度地区电网 GIC 建模和风险评估	66
NO. 70	空间环境与数字电力系统及其信息物理安全	67

NO. 71	基于张衡一号卫星高能粒子观测的空间环境应用研究.....	68
NO. 72	空间碎片激光移除技术.....	73
NO. 73	磁层空间环境模拟平台实验过程预研初步进展.....	74
NO. 74	高温流场环境下平装探针理论和实验研究.....	74
NO. 75	基于 DFPA 的计算成像技术及其空间目标探测应用研究.....	75
NO. 76	极区电离层-磁层耦合及其空间天气效应研究进展.....	76
NO. 77	全球磁层磁流体力学数值模式在空间天气的应用.....	76
NO. 78	电离层-高层大气理论模式研究进展.....	77
NO. 79	NCAR-TIEGCM 上边界高度扩展 (TIEGCM-X).....	78
NO. 80	基于多源观测的电离层建模与应用.....	78
NO. 81	电离层 F 区演化型带状不规则体观测研究.....	79
NO. 82	基于 COSMIC 掩星观测的偶发 E 层临界频率经验模型.....	80
NO. 83	基于 C86 异构超算平台暨 RHPIC-LBM 的太阳耀斑-CME 过程 GeV 能级高能粒子空间天气灾害研究.....	80
NO. 84	电子回旋谐波精细结构的观测与统计.....	82
NO. 85	逃逸层温度建模方法对比.....	83
NO. 86	地球低中纬电离层的条状隆起结构.....	84
NO. 87	太阳辐射指数构建及预测研究.....	85
NO. 88	基于 MSIS 和 TIEGCM 模型对磁暴期间热层大气密度的模拟研究.....	86
NO. 89	汤加火山爆发引起的电离层震荡研究.....	87
NO. 90	汤加火山爆发引发的电离层行进式扰动观测.....	87
NO. 91	中国区域纬度梯度特性研究.....	88
NO. 92	平流层准两年振荡中断期间重力波和行星波的活动特征分析.....	88
NO. 93	Verification of the Swarm dual-spacecraft field-aligned current and radial current estimates at low and middle latitudes.....	89
NO. 94	银河宇宙线引发的空间粒子辐射环境模拟.....	91

NO. 95	闪电通道等离子体数值模拟	91
NO. 96	等离子体层嘶声对太阳风动压脉冲快速响应的统计研究	92
NO. 97	Relation Between Latitude-dependent Sunspot Data and Near-Earth Solar Wind Speed	93
NO. 98	Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field	93
NO. 99	基于 Fortran 语言的地球辐射带数据同化模型	94
NO. 100	基于 Cluster 卫星观测的超低频波的纬向统计研究	95
NO. 101	LHAASO 及其空间环境预报性能研究	96
NO. 102	A New Concept to Measure the Ambipolar Electric Field Driving Ionospheric Outflow	96
NO. 103	火星电离层夜间电子密度分布特性与拟合	97
NO. 104	Es 统计特性研究	98
NO. 105	面向空间环境数据处理的分布式发布-订阅管理系统设计	98
NO. 106	偶极化锋面后哨声波调制高频静电波的过程	99
NO. 107	利用人工智能方法对 Dst 指数进行预报	99
NO. 108	空间环境对低轨道卫星表面电位及等离子体原位测量的影响	100
NO. 109	24 太阳周 (2009-2019 年) 期间 $Dst_{min} \leq -50$ nT 地磁暴的行星际源	101
NO. 110	基于经验和深度学习的太阳耀斑预报研究	102
NO. 111	增强太阳图像的图像特征提取与匹配算法在空间天气领域的研究与应用	102
NO. 112	$LaBr_3(Ce)$ 、 $LaBr_3(Ce, Sr)$ 和 $NaI(Tl)$ 三种晶体对 X 射线和康普顿电子的发光非线性及其本征分辨率的研究	104
NO. 113	基于序列到序列模型的空间环境人工经验预报综述文本生成技术研究	105
NO. 114	Swarm A 卫星观测的 ULF 波动分布特征	106
NO. 115	磁暴引起的电离层扰动对 C 波段 Sentinel-1 的观测误差影响	107
NO. 116	基于 MBI-E 模型预测热层大气密度	107
NO. 117	多太阳观测数据对 10.7cm 射电辐射流量影响分析	108

NO. 118	基于 COMSIC R0 数据获得中低纬电离层背景误差协方差矩阵.....	109
NO. 119	高分 5 号 02 星吸收性气溶胶探测器数据处理方法及结果验证.....	109
NO. 120	利用 STEREO 和 WIND 卫星的原位探测对共转流相互作用区的预报能力进行研究.....	111
NO. 121	地球电离层偶发 E 层的 27 天周期性变化.....	112
NO. 122	月尘带电运动研究.....	112
NO. 123	基于机器学习的闪电邻近预报与预测技术研究进展.....	113
NO. 124	临近空间大气经验模型研究现状及在中国区域的适用性评估.....	114
NO. 125	基于数据同化的地球辐射带电子通量预测的初步研究结果.....	114
NO. 126	Combined Scattering of Suprathermal Electrons by Whistler-Mode Chorus and Electromagnetic Ion Cyclotron Waves in the Low-Density Plasmatrough.....	115
NO. 127	基于机器学习和物理模式“双轮驱动”的临近空间环境预报研究.....	116
NO. 128	基于实测数据的低轨道大气密度反演方法研究.....	116
NO. 129	廊坊上空 MLT 区域大气湍流活动的短周期变化.....	117
NO. 130	日月轨道计算对 TLE 编目深空物体预报精度的影响.....	118
NO. 131	基于邻近掩星廓线的重力波三维分析及波源研究.....	119
NO. 132	基于 SuperMap 的月球专题制图系统设计与实现.....	119
NO. 133	Cavity mode wave frequency variation associated with inward motion of the magnetopause during interplanetary shock compression...	120
NO. 134	小行星深空探测中的行星保护概况.....	121
NO. 135	基于神经网络的 3 日 Kp 指数预报及事件归因分析.....	122
NO. 136	基于聚类算法的空间暗弱目标检测.....	122

NO.1

智能驱动的空间环境数据应用新机遇

邹自明

中科院国家空间科学中心

随着国家重大科技基础设施子午工程、中科院先进天基太阳天文台(ASO-S)、太阳风-磁层相互作用全景成像卫星(SMILE)等重大空间任务的实施推进,正在产生和即将产生规模巨大的空间环境科学数据,为其应用研究提供了源源不断的战略资源,我国的空间环境研究进入了利用自主数据的新时代。如何快速、准确、完整地利用好PB量级的大规模空间环境数据,充分发挥自主数据的科学价值,仍面临着一系列的挑战,如数据治理理论与标准缺乏、数据质量有待提升、智能驱动的数据应用工具供给不足等。

为此,科技部“国家重点研发计划基础科研条件与重大科学仪器设备研发专项”启动了科学数据专题项目。由国家空间科学数据中心牵头,中科院近地空间环境重点实验室、中科院粒子天体物理重点实验室、山东省光学天文与日地空间环境重点实验室等8家单位联合申请的“空间科学大数据智能管理与分析挖掘关键技术及应用”项目,于2022年9月正式批复立项。项目面向“空间科学领域数据的有效治理”和“大数据场景下领域自主数据的高效利用”两大挑战,聚焦空间环境、行星科学、高能天体物理等学科方向,构建科学数据治理的理论模型与标准规范,突破数据融合管理、智能检索、协同分析等关键技术,旨在形成一套空间科学数据,特别是空间环境数据全生命周期的智能软件分析工具和系统,探索解决领域科学数据高质量供给问题,促进自主空间科学数据的利用,撬动领域科研范式转型。

项目设置了“日地空间天气传播链事件识别与物理参量建模”课题,以子午工程、ASO-S卫星、SMILE卫星等自主空间环境观测数据为核心,着力解决海量观测数据下日地空间空间环境传播链上一系列典型事件特征挖掘、关联分析与动态建模问题,研发宁静太阳大气特征信息提取、太阳爆发事件识别与特征提取、磁层扰动与极光活动事件识别与特征提取、电离层参数反演与模型重构、中高层大气扰动事件识别与特征提取、电离层扩展F现象智能识别与分类相关软件工具,

研制空间环境领域标准数据集并在国家空间科学数据中心集成部署和示范应用，促进空间环境自主数据的分析利用，充分发挥空间环境数据的应用价值。

NO.2

太阳和地磁活动对高层大气密度和卫星轨道的影响

徐寄遥，罗冰显

太阳活动与空间天气学全国重点实验室 中科院国家空间科学中心

本报告将介绍利用 CHAMP、GRACE、TIMED/SABER、以及 MIPAS 卫星观测的中高层大气密度和温度探测数据，结合卫星精密定轨参数，研究太阳和地磁活动引起的高层大气密度的振荡和突然变化对卫星轨道的影响，以及这一影响随卫星轨道高度的变化。还将简要介绍在大气密度反演、预报、以及应用方面的研究进展。在此基础上，提出为提高中高层大气建模精度需要深入研究的科学问题的设想。

NO.3

火星辐射环境研究

郭静楠^{1, 2}，汪毓明^{1, 2}，张建¹

深空探测实验室，地球和空间科学学院，中国科学技术大学，安徽合肥

jnguo@ustc.edu.cn

中科院比较行星学卓越创新中心，安徽合肥

近地空间、宇宙深空甚或是月球火星将成为人类探索的下一个疆域乃至第二家园。然而，空间项目中面临的一大“无形的杀手”是空间高能粒子。这些高能粒子主要来自于行星辐射带、太阳爆发加速的粒子和银河系高能粒子；其中前两种粒子因其流量的突然和极端的变化，可以造成高空飞机、宇航卫星和飞船中的电子器件损耗和系统级的故障甚至导致整个任务的失败；对载人航天来说，也可能引发宇航人员的辐射中毒。另一方面，银河宇宙射线则是长期存在的、能量极高的、难以屏蔽的背景辐射，可以对长期的深空载人任务造成累积的辐射效应，引发人体的癌变、白内障、白血病等。因而对空间高能粒子的研究意义重大。此报告将简要概括一下空间辐射粒子的来源、特征、辐射危害、预报需求、探测需

求、以及探测仪器的发展现状。针对火星空间辐射环境，本报告将介绍火星空间辐射研究的最新观测和模型开发的进展。

NO.4

空间天气对空间站长期运营影响分析及对策建议

张庆祥 呼延奇 郑玉展

北京空间飞行器总体设计部，北京，100094

2022年随着“梦天试验舱”成功发射，并与“天和核心舱”成功对接，我国空间站建设任务告一段落，从2023年开始，空间站进入了长期有人驻留模式的应用新阶段。空间天气是影响航天器及航天员安全的重要因素，2025年前后，将进入新的太阳活动高年，我国空间站在空间天气影响下长期稳定运行成为迫在眉睫的重要任务。针对空间天气对空间站及航天员的影响，本文分析历史上空间天气事件及其影响，总结国内外主要航天国家空间天气相关领域未来发展趋势，汲取国际空间站空间天气防护设计和在轨运行的经验教训，提出空间天气对我国空间站长期运存在的风险和隐患，并提出后续空间天气监测及服务的对策建议。

NO.5

中国空间站轨道运行安全态势及空间环境分析

刘莹¹,鞠冰¹,刘荟萃¹,曹建峰¹

¹.北京航天飞行控制中心航天飞行动力学技术重点实验室，北京 100094

中国空间站于2022年底完成在轨建造，轨道运行高度约390公里，设计在轨飞行10年，具备延寿至15年的能力。空间站是我国高价值太空资产，其轨道运行安全威胁主要来自于非合作低轨航天器和空间碎片的抵近。此外，随着第25个太阳活动高年的临近，空间环境扰动日益频繁，低轨空间目标的轨道预报误差随之增大、碰撞风险也随之升高。因此，有必要对空间站的轨道运行安全态势及空间环境进行常态化监测，确保我空间站长期在轨运行安全。本文主要从星链星座部署状态、空间碎片演化状态、空间站附近威胁目标统计和空间环境信息统计四个方面进行分析，展示我空间站当前轨道运行安全态势，为后续空间站在

轨实施碰撞规避提供信息支撑。

关键词: 中国空间站; 星链星座; 空间碎片; 空间环境

NO.6

我国空间站空间环境保障需求初步思考

翁利斌,汪四成,牛俊,孟兴,盛峥

国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410073

2022 年底我国空间站完成主体建设任务转入常态化运行, 空间环境在空间站设计、材料研制、发射对接、出舱活动以及测运控等诸多环节均具有重要影响和作用。本文从我国载人空间站建设运行阶段空间环境实际保障需求出发, 围绕组合体轨道预报和维持、目标监视雷达探测修正以及航天员生命安全保障等方面, 分析中高层大气、电离层和高能粒子等要素对相关任务影响, 结合国内外现状提出载人空间站任务对空间环境参数及事件具体需求和初步思考。

关键词:中国空间站; 空间环境; 中高层大气; 电离层; 高能粒子

NO.7

空间站及探月任务空间辐射环境保障重点

陈东^{1,2}, 林瑞淋^{1,2}, 陈善强^{1,2}, 钟秋珍^{1,2}

中国科学院国家空间科学中心, 空间天气学国家重点实验室, 北京 100101;

中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100101

空间辐射环境是载人航天任务面临的主要挑战之一, 本文将分析我国空间站任务和探月任务空间辐射环境的特点, 结合目前的空间辐射环境监测预报能力, 探讨两类任务空间辐射环境保障的重点和方法策略。我国空间站的轨道倾角较低(相比国际空间站), 轨道上高能辐射主要分布在南大西洋异常区和地磁截止刚度相对较低的区域(北美洲北部和澳大利亚以南偏西的印度洋上空), 辐射强度和辐射分布都比较稳定, 普通的中小太阳质子事件和地磁暴对空间站辐射环境几乎没有影响, 只有在同时发生强质子事件和大地磁暴的极端条件下, 空间站辐射环境才会出现显著的增强。鉴于空间站舱壁具有足够的屏蔽厚度, 空间站任务辐射环境保障的重点是保障航天员出舱的辐射安全, 主要通过选择合适的出舱时间

窗口,尽可能降低航天员辐射暴露的风险。载人探月任务面临的辐射环境包括银河宇宙线、太阳质子事件和月表次级辐射,主要的辐射环境风险还是来自太阳质子事件。根据评估计算,在载人探月任务中,1次普通太阳质子事件对于舱外航天员就会产生癌变风险,出舱活动需要规避太阳质子事件,对于特大太阳质子事件,即使航天员处于舱内也面临可能受到大剂量辐照的风险,极端情况下甚至可能危及生命,探月飞行任务全程需要规避此类极端事件,长期的载人探月活动则需要进入专门的屏蔽装置进行辐射规避。载人探月任务辐射环境保障的重点是规避太阳质子事件,方法包括提供无质子事件窗口预报、质子事件能谱硬度、峰值通量、到达事件、持续时间等质子事件参数的精细化预报,为探月任务的质子事件风险规避提供支持。

关键词:空间辐射;辐射剂量;太阳质子事件;空间站;月球辐射环境。

NO.8

中国载人空间站空间环境探测数据的处理和应用

李志涛¹, 钟秋珍¹, 林瑞淋¹

中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气实验室, 北京 100190

国载人空间站携带有空间环境探测载荷,能够就位探测获取空间轨道高度的太阳、高能辐射环境、等离子体环境、大气环境等空间环境要素。快速处理生成高级数据产品,用于保障载人航天技术系统在轨运行安全和宇航员辐射环境安全;积累的大量历史观测数据,用于空间站轨道空间环境及其变化机理研究。

空间站核心舱携带粒子通量与太阳活动探测器、大气密度多向探测器,探测要素是太阳辐射、高能辐射和大气环境,于2021年5月开始开机探测。根据两个探测载荷的设计原理和空间环境变化规律,对初级探测数据进行及时的处理,生成太阳X射线流量、高能质子、高能电子、He离子、大气密度等5类空间环境产品。截至2022年11月,已经连续获取并处理探测数据1年多,获得空间环境高级探测数据达7GB,数据质量和精度都比较好。截至目前,已将太阳X射线流量、高能质子、大气密度等探测数据,应用于飞船发射安全期、航天员在轨辐射安全等空间站空间环境保障产品中;已将高能质子探测数据应用于地球辐射带的建模中。

问天实验舱于 2022 年 7 月发射升空，携带有能量粒子探测器和等离子体就位成像探测器，探测要素是高能辐射和等离子体环境。目前，已完成空间环境初级数据的处理流程，能够生成高能质子、中能质子、高能电子、中能电子、重离子、中子、等离子体成像、等离子体就位探测参数（H⁺/He⁺/O⁺密度、离子温度、漂移速度、电位、电子密度/温度）等 8 类空间环境产品。两个探测载荷预计将在 2023 年初开机，届时将为空间环境保障和研究提供更加丰富的探测要素数据。

关键词:太阳 X 射线；能量质子；能量电子；重离子；中子；等离子体；大气密度。

NO.9

L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜介绍

黄文耿¹ 董亮² 贾彦辉³ 赵明亮¹ 师立勤¹ 王晶¹

1 中国科学院国家空间科学中心 2 中国科学院云南天文台 3 中国电科第 54 研究所

太阳 10.7 厘米射电辐射流量（也称 F10.7 指数）对高色球和低日冕的状态非常灵敏，它与太阳极紫外（EUV）辐射有很好的相关性，是表征太阳活动水平的一个重要参量。F10.7 指数不仅在基础研究方面有广泛的应用，同时在航天工程应用方面也是不可或缺的指数，如影响轨道预报的热层大气密度模式、影响电波传播的电离层模式等，是很多空间环境应用模式所需的驱动指数。因此，F10.7 的实时监测具有重要的科学意义和实际应用价值。由于国内 F10.7 监测设备的老化，当前使用的 F10.7 数据主要来自国外，这种状况不利于自主数据的应用需求。

最近，中科院国家空间科学中心在河北廊坊新建立了一套 L&S 波段太阳射电流量精密监测望远镜，该望远镜主要针对 GNSS 导航的 L 波段频点和太阳 10.7 厘米 S 波段频点，主要目的是为了监测太阳 L 波段射电爆发事件和 F10.7 数据，为我国北斗导航卫星系统在内 GNSS 射电干扰事件提供警报服务和自主 F10.7 指数的实时获取。本报告简单介绍该套系统的结构组成、数据采集、定标方法、业务运行模式和数据质量评估结果等方面内容。通过近一年的试运行，结果表明，该系统工作稳定，无人值守，能实现天线的自动打开、跟踪、收藏、数据自动解算和反演等功能。与国际数据相比，相关系数为 95%，平均误差 5.42sfu，平均绝对百分比误差 4.17%，均方根误差 7.06sfu，能满足自主数据的获取和日常业务

化运行的需求。

关键词：F10.7，太阳射电监测，GNSS

The solar radio flux at 10.7 cm (2800 MHz)

平均绝对误差 MAE
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i|$$

平均绝对百分比差 MAPE
$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|F_i - O_i|}{O_i}$$

均方差根 RMSE
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}$$

相关系数 CC
$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}$$

评估结果：

MAE=5.42sfu

MAPE=4.17%

RMSE=7.06sfu

CC=0.947

太阳 F10.7 指数数据处理和定标

太阳 10.7 厘米射电辐射流量（或称 F10.7 指数）对高色球和低日冕的状况非常敏感，它与太阳极紫外（EUV）辐射有很好的相关性，是表征太阳活动水平的一个重要参量，是使用最广泛的太阳活动指数之一。另外，F10.7 是很多空间环境应用模式必需的驱动指数，如影响轨道预报的热层大气密度模式、影响电波传播的电离层模式等，F10.7 指数是航天工程应用中重要的空间环境指数。

因此，F10.7 的实时监测具有重要的科学意义和实际应用价值。由于国内 F10.7 监测设备的老化，当前使用的 F10.7 数据主要来自国外，这种状况不利于自主数据的应用需求。自主 F10.7 数据监测系统主要包括接收天线、数据采集、数据定标、业务运行模式等方面内容，其中数据定标和处理是数据质量的关键，以冷空定标方法为例，主要涉及数据采集和数据处理。

一、数据采集部分，包括：

1.噪声源数据获取，噪声源为标准的外部输入，此数据为噪声源接入接收机产生。

2.天线对准冷空的数据，此数据为天线偏开太阳两度时采集得到的数据。

3.再次跟踪太阳的观测数据，此数据为天线跟踪太阳采集得到的太阳射电辐射功率。

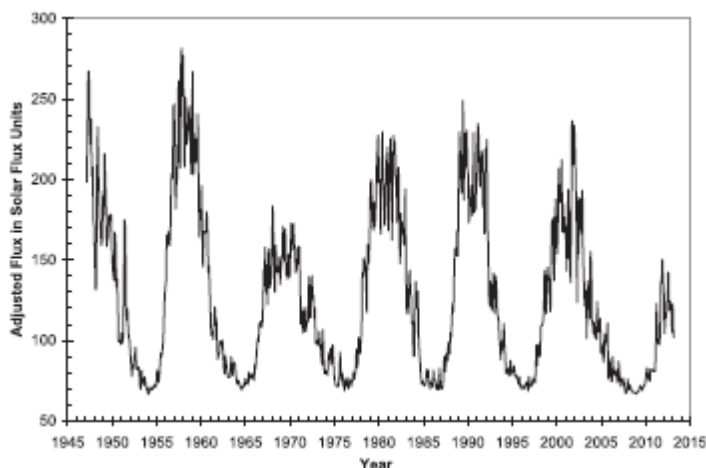
二、数据处理部分，包括：

1.将噪声源数据、冷空数据、跟踪太阳数据进行取平均值后输出，其中，噪声源数据记为 P_n ；冷空数据记为 P_{sky} ；太阳辐射数据记为 P_{solar} 。

2.输入当天国际公布的 F10.7 指数，用于计算自主数据和国际数据之间的修正因子 S_0 。

3.通过几天的数据进行训练，获得一个固定的较为合理 S_0 后，最后得到每天的自主 F10.7 的反演数据。

$$\text{an sfu} = 10^{-22} \text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$$



常用的太阳活动指数包括太阳黑子数 SSN 及 10.7 厘米射电辐射通量 F10.7
F10.7:太阳通量测量值,是对以1小时为中心的2800 MHz(波长为10.7 cm
的波长)为中心的100 MHz 带宽中的太阳无线电发射强度的确定。它以太阳
通量单位(sfu)表示,其中 $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 。

NO.10

基于自主监测数据的地磁预警技术研究

王晶¹,罗冰显¹,刘四清¹,师立勤¹,钟秋珍¹

1 中国科学院国家空间科学中心,北京 100190

空间环境直接影响航天器和通信导航系统的安全和效能发挥,如航天器计算机与内存系统翻转和失效;太阳电池损坏;航天员辐射安全威胁;无线电波干扰;信号闪烁;导航系统中断;临近空间飞行试验事故、失败;电力故障;通信电缆损坏等。空间环境密切关系到国家空间安全、海洋权益和战略预警安全等。空间技术系统的长寿命、高可靠性、安全有效运行已经成为建设空间强国的关键所在。减轻和避免空间环境对技术系统、空间活动和国家太空安全的影响和破坏的保障能力建设,将成为增强国家综合实力的一个新竞争点。

利用我国自主地磁监测数据,完成国际常用地磁 K_p 指数估算算法应用于我国地磁台站的效果评估;发展一种能有效识别地磁规则日变化的逐日变化特性、反映地磁扰动季节效应和地方时效应的,并适合我国地磁台网分布特性的单站地磁 K 指数估算方法,形成我国不同区域地磁扰动分布产品。并且在单站地磁 K 指数估算算法的基础上,通过综合分析我国不同地磁台站地磁扰动的地方时特性、纬度特性,建立地磁 K_p 指数估算算法,构建基于多站地磁监测数据的地磁暴警报模式,实现对地磁暴进行自主预警,保障空间各类航天装备的运行安全和效能发挥。

NO.11

利用预报误差拟合实现两行根数异常探测

张浩越^{1,2,3},赵春梅^{1,3,*},何正斌^{1,3}

- 1.中国测绘科学研究院大地测量与导航定位研究所, 北京, 100036;
- 2.辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新, 123000;
- 3.中国测绘科学研究院北京房山人卫激光国家野外科学观测研究站, 北京, 102406;

两行根数 (TLE) 是空间活动研究的重要数据源, 针对 TLE 精度未知且波动较大而导致的数据可靠性问题, 本文提出一种预报误差拟合的异常探测方法。首先在高斯混合模型 (GMM) 的基础上, 通过添加约束因子对概率密度函数进行修正, 改善预报误差的拟合能力。其次采用遗传算法 (GA) 对 TLE 样本进行 GMM 建模, 增强模型估计的泛化能力。最终根据模型计算数据的概率密度值实现 TLE 异常探测。为验证 TLE 异常探测的效果, 对典型卫星目标进行机动检测实验。结果表明: 利用预报误差拟合法可有效剔除 TLE 异常数据, 机动检测误检率由 57.9%降低至 46.3%, 对热层大气密度反演、弹道系数估计、碰撞预警等领域具有重要意义。

关键词: 异常探测; 高斯混合模型; 两行根数; 遗传算法

NO.12

用国际空间站上的阿尔法磁谱仪精确测量从 2011 到 2019 年, 磁刚度从 1 到 100GV 质子能量谱的周期变化

冯劼¹

1. 中山大学·深圳 理学院, 深圳 518107;

摘要: 质子是近地空间中最丰度最高的宇宙线。我们用国际空间站上的阿尔法磁谱仪测量了从 2011 年 5 月 20 日到 2019 年 10 月 29 日 (共 2824 天) 的宇宙线质子能谱的日变化。其磁刚度范围从 1GV 到 100GV。质子能谱在不同的时间尺度上存在变化。从 2014 年到 2018 年, 我们看到了 27 天的周期性变化。在 2016 年, 我们看到了 8 天和 13.5 天的更短周期。这三个周期的变化幅度随着磁刚度和时间变化。

关键词: 质子能谱; 周期; 国际空间站

NO.13

火星热层电离层耦合模式

任志鹏^{1234*}、刘耘博¹⁴、万卫星¹、魏勇¹⁴、乐新安¹²³⁴

1 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室 北京市/朝阳区 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京市/朝阳区 100029

3 中国科学院地球科学研究院 北京市/朝阳区 100029

4 中国科学院大学地球与行星科学学院 北京市/怀柔区 100049

火星一直是行星物理学研究的重点对象。由于大气化学成分等物理参数的差异,火星热层和电离层表现出与地球截然不同的,因此也是火星研究的热点之一。热层-电离层耦合理论模式把电离层与热层作为一个统一整体来分析和建模,在电离层/热层的研究中具有独特的优势,一直起着重要作用。为了为火星电离层与热层数值模拟奠定基础,以火星的电离层与热层耦合系统为核心目标,以国内的地球电离层热层耦合模式 GCITEM-IGGCAS 为基础,开展电离层与高层大气耦合理论模式研究以及相关的数值模拟方面的工作,构建火星的电离层-高层大气耦合理论模式。该火星电离层-高层大气耦合理论模式计划采用高度坐标系,纬度-经度分辨率为 5 度*7.5 度,在垂直方向上把 70~300 km 的火星电离层-高层大气分为 35 个等高面,模拟其高层大气的 4 种主要中性化学成分(CO₂、CO、O 和 N₂)的数密度、6 种次要中性化学成分(Ar、He、O₂、NO、N(4S)和 N(2D))的数密度、日侧电离层的主要离子(CO₂⁺、CO⁺、O₂⁺、O⁺、N₂⁺和 NO⁺)和电子的数密度、中性温度和中性风的三维时空分布。目前该模式的模拟结果与已有的火星观测和模拟基本一致。

NO.14

火星上游太阳风预报系统

王晶晶, 石育榕, 罗冰显, 刘四清, 孔令高, 麻继杰, 李文亚, 唐斌斌, 张爱兵, 李磊,
师立勤, 钟秋珍, 陈艳红

结合 2014 年 10 月至 2021 年 4 月 MAVEN 卫星对火星上游太阳风的观测、ACE 卫星和 DSCOVR 卫星对近地太阳风的观测,统计分析了地球和火星上游背

景太阳风的物理特性。基于中科院国家空间科学中心太阳活动与空间天气实验室预报中心的近地太阳风业务预报系统 (Wang et al. 2018), 建立了火星上游太阳风预报系统 (Wang et al. 2023), 并通过将模型预报的结果与实测数据对比分析的方法对模型的预报效果进行了评估。该预报系统可以预报地球和火星上游的太阳风参数, 其结果较好的符合了背景太阳风随着不同日地距离和太阳活动周的变化趋势。利用高速流突增 (HSE) 的识别方法对冕洞高速流的预报进行了分析, 该模型对地球、火星上游冕洞高速流的报准率 (hit rate) 分别达到 70.38% 和 66.37%, 速度峰值的平均绝对误差分别为 83.93km/s 和 65.91km/s, 速度峰值到达时间的平均绝对误差分别为 22.98 小时和 21.65 小时。结合我国天问一号等离子体观测数据, 对 2020 年 11 月至 2021 年 1 月的地球、火星、天问一号上游的太阳风数据和该模型预报的结果进行了对比, 结果表明该模型可以较好地预报地球、火星、火星探测器处的太阳风参数。

NO.15

火星大气沙尘与潮汐耦合的频域分析

张杰¹, 盛峥^{1, 2}

国防科技大学, 气象与海洋学院, 中国长沙 430010;

2. 通讯作者

火星大气受垂直层结间的气象变化耦合影响强烈。然而, 我们对沙尘和潮汐之间的垂直耦合仍然知之甚少。尽管涉及多个大气要素相互作用的多时间尺度动力学过程至关重要, 但对沙尘、潮汐、环流和重力波进行整体分析的工作还处于起步阶段。在此我们基于法国 LMD 实验室火星大气环流模式开展了沙尘暴与潮汐的垂直耦合实验。

在模式模拟的基础上, 我们利用偏定向相干性 (Partial Directed Coherence, PDC) 进行了频率域分析, 以确定在不同背景沙尘含量和重力波的频率域中, 沙尘、潮汐和环流是如何相互作用的。

上对流层和下中间层 (UTLM) 的纬向风将季节到次季节的沙尘信号向上传输到中间层的移动性日潮 (DW1), 其中纬向风起到类似中间介质的作用, 将沙

尘信号的能量传输到更高的 DW1。

我们将纬向风的半周年振荡(SAO)与中间介质作用区分开来。在沙尘、纬向风和潮汐的链条中，大气沙尘首先通过引起周期性逆温影响纬向风。

当季节到次季节的能量从沙尘信号传递到纬向风信号后，进一步传递到 DW1。随着粉尘含量的增加，这一链条逐渐加强。重力波的移除导致气候态背景下的影响链减弱，但在冷、暖背景下的影响链在半年尺度上并没有减弱，而在季节至次季节尺度上所有试验的影响链都变得更加显著。。

关键词: 潮汐; 沙尘; 火星大气垂直耦合; 纬向风作用; 重力波; 对抗现象; 火星大气模式...

NO.16

低太阳活动期间火星热层重力波谱分析

季倩倩¹, 盛峥¹

气象海洋学院 国防科技大学, 长沙 410073;

重力波 (GWs) 对于火星低层和高层大气之间的垂直耦合非常重要。饱和重力波将促进平均气流的加速和湍流的产生，从而引起能量、动量扩散输送。本研究基于搭载在火星大气和挥发性演变计划 (MAVEN) 上的中性气体和离子质谱仪 (NGIMS) 测量的 CO₂ 密度数据, 分析了低太阳活动期间第 35 火星年 (MY35) 火星热层中 GWs 的垂直波数谱特征, 并与较高太阳活动期的 MY33 作了比较。结果表明: 在火星热层获得的垂直波数谱密度与地球大气中半经验预测的饱和谱相似, 其对数频谱斜率在 -3 左右。重力波的平均谱密度在 160-200km 之间显示出饱和, 且随着海拔向上传播时衰减。相比于 MY33, MY35 中 GWs 活动更强且在向上传播过程中衰减更小, 说明在太阳活动低值期 GWs 经历了更有利的传播条件。同时, 发现 MY35 这一时期 GW 活动对地方时的依赖性与以往研究有所不同, 春季最强的 GW 发生在日侧的 6-12 小时内, 这表明低太阳活动期间火星热层中 GW 的振幅受背景温度的控制较少, 而受到其他因素的耗散作用影响, 如分子粘性和热传导。

关键词: 垂直波数谱; 重力波; 火星热层; 低太阳活动期; NGIMS

NO.17

Simulation of transient topside layer in the Martian ionosphere

A transient topsider layer (also named M3 layer, at ~160~220 km) could be measured frequently above the M2 layer in the Martian ionosphere. Statistical characteristics of the M3 layer shows that it is not radiated by the solar. Many candidate mechanisms are suggested to explain the formation of the M3 layer. However, how to produce the M3 layer is still one of many open scientific questions about the Martian ionosphere. This study used a one-dimensional model including photochemical production, loss and dynamic transport processes to simulate the transient topside layer in the Martian ionosphere. The M3 layer could be reproduced by the perturbed vertical drift of plasma in this study. The enhancement of electron temperature induced by dynamic process of plasma could facilitate the formation of the M3 layer. Results show that vertical transport process of plasma might be more crucial in producing the M3 layer in the topside Martian ionosphere.

NO.18

ENA imaging simulation of the distant planetary magnetosphere and the discussion of ENA emission cone of the solar wind

Li Lu^{1,2,3}, Qing-long Yu^{1,2,3}, Shuai Jia^{1,2,3}, Yuan Chang⁴, Zhong Xie^{1,2,3}, Jian Lan^{1,2,3}

1.Laboratory of Space Environment Exploration,National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences,Beijing 100190,China

2.Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration,Beijing 100190,China

3.Key Laboratory of Science and Technology on Space Environment Situational Awareness,CAS,Beijing 101499,China

4.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China

Whether the "ENA ribbon" image scanned remotely by IBEX-Hi at the lunar Resonance orbit really come from the heliopause that involves assessing the scale of solar wind particle energy loss throughout the solar system. The ENA imaging

simulation results at the Earth orbit show that the scale of the planetary magnetosphere with a telemetry distance of AU magnitude is too small to contribute to the IBEX-Hi ribbon. But the simulated effective ENA differential fluxes provide a reference for the physical scale evaluation of the huge magnetic structure in the heliopause. The ENA differential flux of "ENA emission cone" generated by the charge exchange between solar wind ion flow and local neutral gas near Earth orbit is also comparable to the measured peak of the IBEX-Hi ribbon, which may be the main ENA emission source of the ribbon measured peak. 2D ENA imaging measurements at Lagrange points proposed here can be used to investigate the ENA ribbon origination by using the energy spectral lag vs disparity of ENA images.

Key words Energetic Neutral Atom (ENA), telemetry image, Solar wind, Magnetosphere, Interplanetary Magnetic Field (IMF), heliosphere, heliopause, Planet

NO.19

木星空间环境特点分析与研究

王 铸

(北京空间飞行器总体设计部 北京 100094)

木星是太阳系中质量和体积最大、自转最快的行星，迄今为止，已发现了 79 颗木星卫星，木星系像微型的太阳系，探测木星有助于了解太阳系形成、演化和行星系的起源，木星探测是未来深空探测的热点之一。木星系空间环境极其复杂，木星的电磁辐射、磁场、重力场、大气层、微流星体等空间环境对探测器的影响是木星系探测难点之一。木星系空间高能粒子通量远高于地球空间，高能电子通量则比地球辐射带高 2~3 个数量级，低能质子的通量是地球的 10 倍，其产生的多种辐射效应是探测器设计中的需着重考虑的；木星磁场强度是地球的 20 倍，磁层空间范围比地球大 40 倍，可对探测器造成严重的表面充电效应，对探测器中高灵敏电磁设备的影响较大这也是木星探测与其他深空探测的不同之处；此外，木星重力场也是探测器轨道设计的必须考虑的因素；木星大气层、外逸层稀薄，存在多种原子对探测器的表面充电和侵蚀也是需认真对待，因此木星探测的空间环境特征是极其特殊的。本文从电磁辐射、高能粒子、重力场、磁场、

大气层等方面梳理木星系环境特点,分析了木星空间环境需重点考虑的影响因素,提出了未来木星探测空间环境研究的重点方向。

关键词: 木星 空间环境 分析研究

参考文献

- [1].高博宇 陈忠贵 周文艳.国外木星探测任务进展与分析.航天器工程, 2021.10:107-114
- [2].费涛 方美华 朱基聪 田鹏宇. 木星磁场及磁场模型的对比分析. 深空探测学报, 2019.4:150-155
- [3].魏强 胡永云. 木星大气探测综述. 大气科学. 2018 (7) :890-901
- [4].王建昭 邱家稳 霍卓玺.木星系环境特征与航天器防护设计研究.深空探测学报,2021 (10) :455-466
- [5].王建昭 张庆祥, 田 岱, 朱安文, 邱家稳. 木星系粒子辐射环境效应及防护关键技术. 航天器环境工程, 2019 (10) 500-510.
- [6].陈杨 宝音贺西 李俊峰. 木星探测轨道分析与设计.《天文学报》, 2012 (3) :1-10
- 王铸 男 1966.06 研究员 硕士生导师 卫星系统预研, 中国空间技术研究院总体设计部 北京市海淀区友谊路 104 号。 chwangzhu@sina.cn 13641093941

NO.20

Three-dimensional particle-in-cell simulation of the solar wind interaction with asteroid 2016 HO₃

Lianghai XIE^{1*,2}, Lei LI^{1,2}, Jindong WANG^{1,2}, Yiteng ZHANG^{1,2}, Bin ZHOU^{1,2} & Yongyong FENG^{1,2}

¹State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China;

²Joint Research and Development Center of Chinese Science Academy and Shen County, Shandong, 252400, China;

*Corresponding author (email: xielianghai@nssc.ac.cn)

Abstract: The recently discovered asteroid 2016 HO₃ is the most stable quasi-satellite of our Earth. Several missions to 2016 HO₃ have been proposed, including the Tianwen-2 mission of China. Here we study the solar wind interaction with 2016 HO₃ with three-dimensional particle-in-cell simulations. It is found that the sunlit surface can be positively charged to +10 V, and the shadowed surface is negatively charged to -40 V, with a maximum electric field of about 10 V/m near the terminator. There is a plasma wake behind 2016 HO₃, in which the ion density can be reduced by half even at 150 m downstream from 2016 HO₃. The plasma wake is confined by a Mach cone with a typical cone angle of about 6.5°, which is generally larger than the cone angle predicted by the self-similar plasma expansion theory. In addition, we find that both the surface charging and the wake structure can vary with different solar wind parameters. These results are helpful to understand the plasma and the electric field environment of 2016 HO₃, and have the general implications in studying the solar wind interaction with other airless small-bodies.

Keywords: 2016 HO₃, Solar wind interaction, Asteroid, PIC simulation

NO.21

嫦娥7号中性原子成像及其反演算法研究

于贤彩¹, 张贤国^{1,2,3}, 余庆龙^{1,2}

1.中国科学院国家空间科学中心, 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;

2.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;

3.空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

太阳剧烈活动会导致地球空间中发生灾害性空间天气(例如磁暴、亚暴), 对人类生存及生活产生严重的影响。这些空间天气的发生主要是磁层爆发性能量的转化与传输过程的响应。因此, 深入地认识磁层能量离子的分布演化, 掌握其动态演化和变化规律, 可以有效预报和监测空间天气, 降低其对人类社会的影响。中性原子成像是目前最为有效的远程遥感观测手段之一。该技术可以针对由空间高能离子与较冷中性原子发生共振电荷交换产生的能量中性原子(ENA)进行全局成像。这些能量中性原子不受地磁场控制, 保持原有能量和动量沿直线运动,

是空间能量离子的远程信息使者。因此,通过中性原子成像技术可以获取磁层能量离子的分布以及时空演化信息,进而帮助深入理解磁层能量的转化与传输过程。

虽然 ENA 成像是空间等离子体的一种重要遥测诊断工具,但是从 ENA 二维图像定量反演其生成离子源的三维空间分布是一个具有挑战性的问题。本文将介绍基于多视角 ENA 成像反演环电流离子三维分布的基本原理与方法,并针对该反演方法的局限性及其解决方案进行讨论。最后,对未来可以开展的科学研究与应用进行阐述。

关键词: 嫦娥 7 号; ENA 成像; 反演算法; 离子分布

NO.22

月球着陆器定位方法及误差源影响探究

刘山洪¹

1 北京航天飞行控制中心

嫦娥三号、嫦娥四号以及嫦娥五号均携带着陆器,精确确定着陆器的位置十分关键。针对月球着陆器定位中优化权的问题进行深入研究,提出了基于方差分量的最优权重定位方法,介绍了 VLBI 相位延迟提取方法和数据修正过程。嫦娥三号着陆器的月球表面位置不确定度在经纬度上分别约为 21.9 m 和 4.2 m。与固定权相比单日弧段的定位精度至少提高 53%。随着精度进一步提高,本研究数据集的划分还可以进一步细化,例如考虑天线俯仰角、天线热膨胀等,可针对每个天线建立起对应数据集。

NO.23

γ 射线暂现源监测器本底模型研究

王晨巍^{1,2}, 张娟¹, 郑世界¹, 赵海升¹, 熊少林¹

1.高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;

2.中国科学院大学, 北京 100049

随着引力波天文学的发展,寻找引力波电磁对应体要求对弱伽马暴更好的探测和定位能力,深空探测器具有几乎不存在地球遮挡的优点,且利用与近地卫星

组成的长基线可以实现对伽马暴的定位进行更好的约束,但不同的本底环境下伽马暴探测器的触发、定位、数据传输等过程都有所不同,在 DRO 轨道卫星上搭载 γ 射线暂现源监测器 (Gamma-ray Transient Monitor, 简称 GTM), 将使我国首次获得在深空探测宇宙天体高能辐射的能力,因此对其空间环境进行系统的估计十分必要,我们通过蒙特卡洛模拟的方式研究了 GTM 探测器对不同粒子环境的响应,建立了本底模型,得到了 DRO 轨道空间环境对 GTM 信号本底的预期贡献、影响以及随时间空间的变化,为 GTM 后续的载荷研制和科学运行提供了指导信息,对其他类似任务设计具有一定的参考意义。

关键词:GTM; 引力波电磁对应体; DRO; 本底模型

NO.24

我国宇航空间环境领域标准化工作进展

李昌宏¹, 沈自才², 钟秋珍¹, 王馨悦¹

1.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2.北京卫星环境工程研究所, 北京 100094

空间环境标准是宇航活动安全的重要保障。本文归纳分析了空间环境研究领域的研究内容,分析了当前的国际国内空间环境领域标准化工作的形势,介绍了我国空间环境标委会的工作情况,重点介绍了空间环境领域的国家标准体系及规划,提出了领域内标准化工作的展望

关键词: 空间环境; 标准化; 标准体系; 进展

NO.25

空间天气研究和预报中的大数据和人工智能

徐寄遥 胡晓彦 邹自明

中国科学院国家空间科学中心

随着空间天气研究的不断深入,以及大规模地基和卫星探测数据和种类的快速增长,对空间天气研究和应用提出了更高的要求。在科学研究方面,特别关注从太阳到地球空间的因果链的大尺度整体行为的研究,同时也非常关注对于特定区域的中小尺度精细结构和过程的研究。在预报和应用研究方面,特别关注从海

量探测数据中寻找特征参数或事件，开展实时的快速预报和警报。

目前空间天气研究中普遍采用的传统的基于人工经验或物理判据的事件识别方法已无法应对急剧增长的数据，海量观测数据中大量的信息很难得到充分的挖掘，对日-地复杂系统问题研究也遇到了瓶颈。人工智能等新技术的发展为解决大数据场景下的空间天气事件识别、物理过程研究与建模、实时预报预警等问题的解决提供了新的途径。

本报告将聚焦国内外空间天气研究和应用中大数据和人工智能应用，简要介绍我国在大数据与人工智能在空间天气中研究领域中的主要进展，其中包括利用大数据和人工智能技术开展对太阳活动、极光活动、地磁脉动、电离层扰动与电离层不规则体等空间天气研究领域关注的典型事件的自动识别与特征提取研究。还将简要介绍大数据和人工智能在空间天气预报应用方面的研究成果。

NO.26

基于深度学习的动态磁图生成模型

徐龙^{1,2}, 孙文青^{1,2}

1.中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气实验室, 北京 100190;

2.中国科学院国家天文台, 北京 100101

摘要: 韩国学者 Kim 等人 (ApJ, 2019) 将 Pix2pix 深度学习生成模型用于从 SDO/AIA 304A° 图像生成磁图, HMI 磁图作为输出标签。得到的模型用于太阳远端的磁图生成, 即以 STEREO EUVI 304A° 图像作为输入, 得到太阳远端的磁图数据。然而, 当我们将生成出来的磁图按照时间顺序连续播放的时候, 磁场会出现正负极的跳变或者强磁场区域的瞬时闪现。这种生成磁图的演化规律与观测磁图的演化规律并不符合。因此, 我们提出了加入时序演化约束的动态深度学习模型来生成磁图, 该模型的基准网络仍然为 Pix2Pix 模型, 但增加了时序模型对图像序列进行分析。结果表明我们提出的模型可以挖掘时序 EUV 图像中稳定的结构来生成磁图, 从而使得生成的磁图具备更加稳定的磁场结构并且其演化更加符合观测磁图的规律。

关键词: 光球磁场; 深度学习; 紫外极紫外!

1、背景

HMI 观测的是不同的物理参量, HMI 测量光谱线中的偏振以研究光层磁场, 而 AIA 提供 EUV 和 UV 带通的窄带成像, 以研究日冕和过渡区。这两者显然分布在不同的图像域中。当把源域中的 AIA 304A° 图像翻译成目标域中的磁图时, 这两者之间存在非常大的域间隔。其次, AIA 观测记录了太阳高空活动的源区, 如太阳耀斑和日冕物质抛射(CME), 而 HMI 观测光球的磁场。虽然 AIA 304A° 图像和 HMI 磁图在理论上存在映射关系, 但它们有完全不同的特点, 表现出不同步的演化节奏和不同的变化规律。一旦有太阳耀斑或者日冕物质抛射发生, 太阳耀斑或者日冕物质抛射的源区会在短时间内出现亮度和物质抛射的瞬时变化, 而相应的光球区域的磁场仍在小范围内演变。

因此, 我们从时序观测出发, 利用动态模型, 挖掘两个域之间的关联, 从而使生成的磁图序列, 能够与真实观测的时序变化步调一致。

具体地, 我们提出了一个基于卷积门控递归单元(Convolutional Gated Recurrent Units)的生成对抗网络, 通过用卷积门控递归单元(Gated Recurrent Units)来赋予 GAN 处理时间序列的能力。GRU 是一种轻型的递归神经网络(RNN), 在某些任务中优于 LSTM。

2、方法

我们提出的模型命名为 convGRU-pix2pix, 该模型通过整合条件 GRU 到 pix2pix 中, 如图 1 所示。该模型总体上是一个编码器-解码器系统, 其中编码器提取输入 AIA 图像的压缩特征/表示, 解码器解压缩特征以生成类似 HMI 的磁图, 而中间的卷积 GRU 单元将图像特征序列作为输入, 从输入中提取长期稳定的结构, 将其与短时精细变化分开。

3、实验结果

可以发现我们提出的 convGRU-pix2pix 模型的磁极和结构的波动比其他的小。例如, 图 2 中, 区域(a)为宁静区域, 而从 pix2pix 生成的第三列可以观察到明显的磁场出现; 虽然多通道 pix2pix 也接受图像序列的输入, 但它缺乏从序列中学习序列特征的机制, 导致磁极性的波动。实验表明 convGRU 模块对于捕捉输入序列的时序特征确实有意义。客观指标表明模型达到了最佳的 SSIM 和 PSNR(最小的 MSE), 此外, 我们的模型的总无符号通量相关系数、正通量相关系数和负通量相关系数分别达到了 0.88、0.87 和 0.89。它们都比其他模型大得

多，表明我们的模型与观测磁图高度一致。

参考文献（References）

[1]. Alexandre Szenicer, et.al., A deep learning virtual instrument for monitoring extreme UV solar spectral irradiance, Science Advances, 2021

[2]. Kim, Taeyoung, et.al., Solar farside magnetograms from deep learning analysis of STEREO/EUVI data , Nature Astronomy, 2019

[3]. W. Sun, L. Xu*, et al., A Dynamic Deep Learning Model for Generating Magnetogram Sequence from SDO/AIA EUV Image Sequence, The Astrophysical Journal Series. (ApJS), 2022.

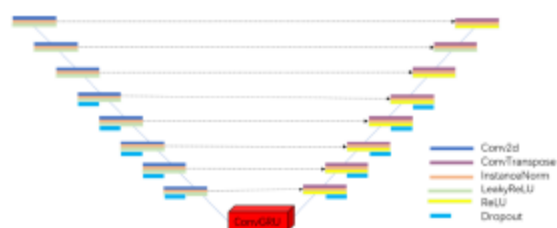
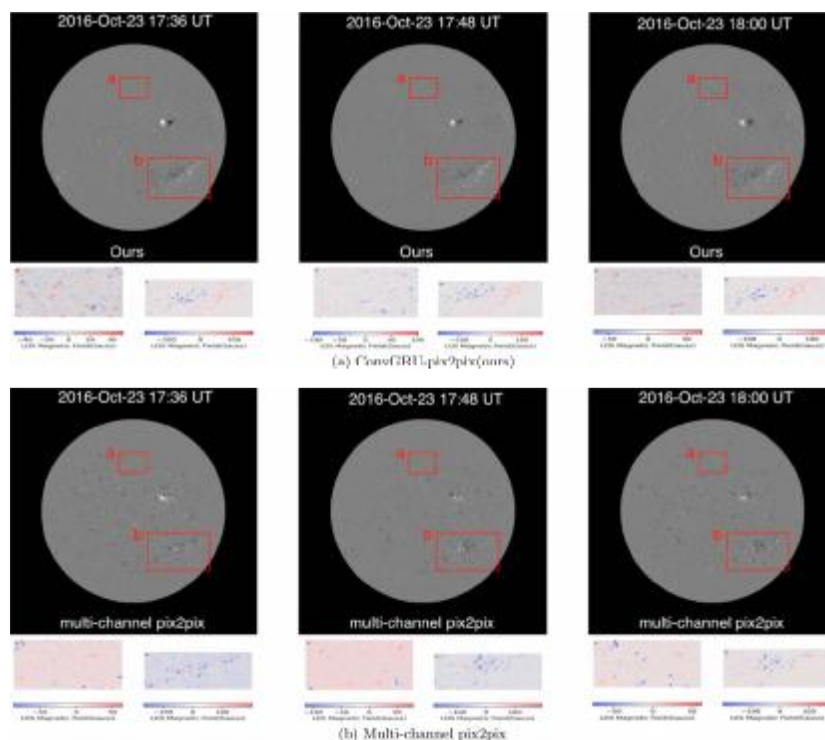


图 1、生成器的网络结构图



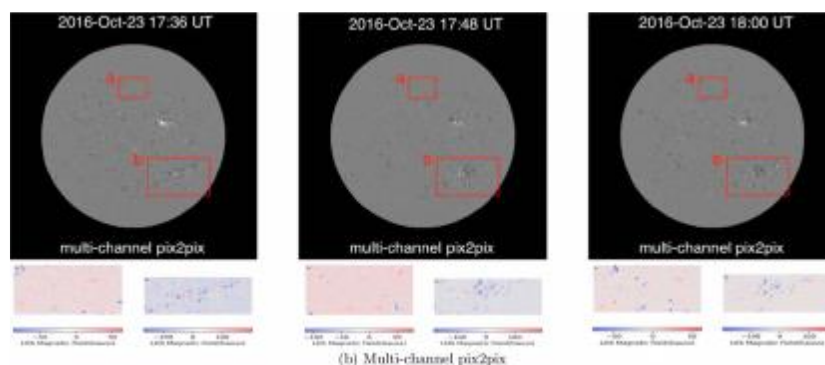


图 2、全日面磁图生成的可视化比较

NO.27

太阳耀斑智能预报模型的磁图分辨率敏感性分析

黄鑫

太阳耀斑是一种剧烈的太阳爆发活动，其影响在 8 分钟内到达地球附近，因此有必要建立短期太阳耀斑预报模型。太阳耀斑被认为是太阳磁能的积累和释放过程，所以目前太阳耀斑的先兆特征参量大多从活动区磁场观测数据中抽取。太阳活动区磁场的常规观测局限在光球层，而太阳耀斑发生在光球层上方的太阳大气中。日冕极紫外观测数据提供了太阳大气的多层次观测。本研究利用深度学习的特征自动学习能力，从活动区极紫外观测数据中提取太阳耀斑的先兆特征，并建立太阳耀斑预报模型。模型测试结果表明，基于活动区极紫外多波段数据的耀斑预报模型取得了良好的性能（模型 AUC 值能达到 0.9 以上）。

NO.28

基于 Ensemble-Unet 模型的全球 Nino3.4 指数预报

余荣霄

厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）现象是地球上最强、最显著的年际气候信号。它在全球气候预测和防震减灾中都扮演重要的角色。作为描述 ENSO 现象的重要指标，Nino3.4 指数可由海平面温度异常（SSTA）计算得出。因此，根据 SSTA 数据预测未来一段时间内的 Nino3.4 指数有着重要意义。为有效利用 SSTA 在时间和空间上变化信息，本文在卷积神经网络（CNN）模型的基础上，分析其热力图特点，提出增加上采样模块并结合空间注意力（SANet）、通道注意力（SENet）

和集成学习的思想建立 Ensemble-Unet 模型,使得模型能够多模态输出的同时保证 Nino3.4 的预报精度。实验结果表明, Ensemble-Unet 模型能有效地反映海平面温度异常 (SSTA) 的时间、空间变化过程,进而模型能够准确预报 Nino3.4 指数,具有对未来 20 个月的 Nino3.4 指数准确预测的能力。

关键词:深度学习;厄尔尼诺;Nino3.4; Ensemble-Unet

NO.29

一种应用于耀斑预测中不平衡数据的选择性上采样方法:有提高模型性能的潜力

刘四维^{1,2,3},王晶晶^{1,2*},李铭^{1,2,3},郭娟^{1,2},崔延美^{1,2},石育榕^{1,2},罗冰显^{1,2,3},刘四清^{1,2,3}

1.中国科学院 国家空间中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190;

2.中国科学院 空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;

3.中国科学院大学, 北京 100190

本研究集中在耀斑预报的数据准备阶段。如今, SHARP 参数已广泛用于开发耀斑预测模型。相对较少的强耀斑事件导致数据集不平衡,预测模型可能对不平衡数据敏感,并可能导致偏差和性能有限。在本研究中,我们采用了逻辑回归算法,基于 SHARP 参数开发了未来 48 小时的耀斑预测模型。该模型用五种不同的输入进行训练。第一种是原始的不平衡数据集;第二种和第三种是通过两种广泛使用的采样方法从原始数据集中获得的;第四种是对原始数据集使用加权分类器来分类。基于与 SHARP 参数相关的强耀斑出现的分布特性,我们建立了一种新的选择性上采样方法,并将其应用于混合区域(指由强耀斑事件和非强耀斑活动组成的混淆分布区域),以提取与耀斑相关的样本并将其添加小的随机值,并最终创建了大量接近真实数据的耀斑正例样本。由此,我们获得了第五个平衡数据集,旨在:1)提高混合区域的预测能力;2)增加模型的鲁棒性。我们对模型性能进行了比较,发现选择性上采样方法在强耀斑预测中具有提高模型性能的潜力,其 F1 得分达到 0.449,比其他方法高约 43%-61%。在数据准备阶段面临的挑战不止有活动区耀斑产率低带来的数据不平衡问题,还有事件强度和活动区时间上的不统一,目前采用了格拉姆角场(Gramian Angular Field)对参数预

报部分进行了实验,发现加入时序信息后,可以将48小时内的耀斑预报的准确率进一步提高。但后续核心工作,会集中在磁图处理方面,给机器学习工具提供更好的信息来源。SHARP数据网站上提供的矢量磁图数据包含有CCD(Charge-coupled Device)坐标和等积圆柱投影坐标(CEA),但对于全日面矢量磁图形态学特征来说,都有形变,我对磁图数据进行了重新投影,希望能在原来的磁图预报分类的基础上有更好的效果。下一步工作是尽快做成分辨率更高的图像数据集,并将其与磁参数预报结合成融合模型或决策树分类器,进一步提高模型的准确率。

关键词:太阳耀斑,太阳活动,光球磁参数,上采样,机器学习

NO.30

基于极紫外数据的太阳耀斑智能预报模型

孙得志^{1,2},黄鑫^{1,2}

1.中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100101;

2.中国科学院大学,北京 100101

太阳耀斑是一种剧烈的太阳爆发活动,其影响在8分钟内到达地球附近,因此有必要建立短期太阳耀斑预报模型。太阳耀斑被认为是太阳磁能的积累和释放过程,所以目前太阳耀斑的先兆特征参量大多从活动区磁场观测数据中抽取。太阳活动区磁场的常规观测局限在光球层,而太阳耀斑发生在光球层上方的太阳大气中。日冕极紫外观测数据提供了太阳大气的多层次观测。本研究利用深度学习的特征自动学习能力,从活动区极紫外观测数据中提取太阳耀斑的先兆特征,并建立太阳耀斑预报模型。模型测试结果表明,基于活动区极紫外多波段数据的耀斑预报模型取得了良好的性能(模型AUC值能达到0.9以上)。

关键词:太阳耀斑,预报,深度学习

NO.31

基于深度学习的太阳耀斑预报模型压缩

冯凯^{1,2}, 黄鑫¹

1.中国科学院 国家空间科学中心, 空间天气国家重点实验室, 北京 100190

2.中国科学院大学, 北京 10049

由于从卫星到地面传输大量数据存在的延迟, 太阳耀斑预报的及时性受到严重影响。为了避免这种影响, 我们希望在卫星上部署基于深度学习的太阳耀斑预报模型。因此相较于传输大量的观测数据, 传输预报结果将大大节省网络带宽, 减少预报延迟。然而, 深度学习模型有大量的参数, 因此它们需要大量的内存和强大的计算能力, 这阻碍了它们在内存和计算资源有限的卫星上的部署。因此, 在卫星上部署预报模型时, 非常有必要对其进行压缩。首先, 我们使用三种典型的压缩方法, 即知识蒸馏、剪枝和量化, 分别对太阳耀斑预报模型的压缩进行了研究。然后, 提出了一个集合压缩框架来更好地压缩太阳耀斑预报模型。实验结果表明, 集合压缩框架可以将预先训练好的太阳耀斑预报模型压缩到仅为其原始大小的 1.67%, 而预报精度没有明显的下降。

关键词: 深度学习; 太阳耀斑预报; 模型压缩; 卷积神经网络

NO.32

日冕物质抛射相似事件推荐

石育榕^{1, 2, 3}

1.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

2.中国科学院太阳活动与空间天气实验室, 北京 100190;

3.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections, CMEs) 是日地系统中的重要太阳爆发活动之一, 它能引起地磁扰动和与之相关的空间环境效应。预测 CMEs 是否会到达地球以及何时到达, 具有特殊的意义。首先建立了包含 CMEs 特征、源区位置坐标和太阳风参数在内共计 18 个物理特征的综合关联列表。基于该 CME 关联列表, 我们设计了一种基于推荐算法来预测 CMEs 到达时间的模型, 并推荐

最相似的历史事件。这 18 个物理量通过模型训练后，确定合适的权重。在测试集中，欧氏距离结果的平均绝对误差和均方根误差分别为 11.78 小时和 13.75 小时，达到了 CME Scoreboard 上发布的其它模型的平均水平，从而验证了推荐算法的可行性和有效性。此外，在 CME 到达时间预测实验的基础上，建立了 CME 是否到达地球的逻辑回归模型，计算并分析了 CME 特征的相关系数。此外，对于每个 CME，我们使用推荐算法筛选出最相似的历史事件，可以为后续分析和比较 CME 的对地效应提供参考。将推荐算法和逻辑回归应用在 CMEs 预报上，乃至空间天气预报上是一次全新的尝试，并希望将该模型应用在空间天气预报其它方面。

关键词:日冕物质抛射; 推荐算法; 逻辑回归

NO.33

基于深度学习的日冕物质抛射渡越时间预报

杨易¹,沈芳¹,李雨淙^{1,2}

1. 中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100190
2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)是太阳最剧烈的爆发现象之一, 喷发出的磁化等离子体能以高达每秒数千千米的速度传播, 到达地球时可引发地磁暴, 影响航空安全、卫星运行、通信系统、电力设施等。因此, 对日冕物质抛射的渡越时间进行预报, 从而采取必要的措施避免社会损失具有重要意义。通过白光日冕仪可以观测到 CME 在延伸的日冕中的形态和运动学特性, 从而预测其到达地球的渡越时间。本研究通过卷积神经网络(CNN)深度学习获取与 CME 渡越时间相关的 LASCO 日冕仪观测图像特征, 建立能够预测 CME 渡越时间的模型, 并研究了不同的超参数对预测结果的影响。在仅基于图像输入的 CNN 预测结果的基础上, 进一步加入 CME 初始速度的物理信息约束, 发现可以得到更小的预测误差。

关键词: 日冕物质抛射; 渡越时间; 卷积神经网络

NO.34

基于概率模式指导的太阳风速度预报

孙彦茹, 谢宗霞*, 余华龙, 胡清华

天津大学 智能与计算学部, 天津 300350

摘要: 太阳风在经过地球时会引发地磁暴现象, 从而影响地球上的短波通讯、电力传输安全, 对人们的生产生活产生影响。目前基于深度学习的太阳风速度预测方法侧重于构造不同的网络结构以提取更好的特征来提高性能。然而, 太阳风数据中蕴含着许多内在机制, 如由冕洞引起的低速、稳定太阳风和由日冕物质抛射引起的高速太阳风, 由于产生原因不同, 属于不同的模式。经过实验分析我们发现模型对不同模式数据的拟合能力不同, 我们引入分类首先对数据中的模式进行识别, 再进行回归预测。然而, 如果模式分类不正确, 将在错误的区间进行回归预测, 造成更大的误差。为了解决这个问题, 本文提出了概率模式引导回归 (PPGR)。我们在 PPGR 中引入了真类概率 (TCP) 提高分类的准确度。具体来说, 我们将太阳风速度预测问题重新表述为由不同模式引导的回归预测任务, 首先确定目标值可能属于哪种模式, 然后选择相应的模型来准确预测, 即 PPGR 采用分而治之的方法, 将传统的太阳风速度预测转化为两个更简单的子任务: 识别不同模式的分类任务和小区间回归任务。此外, 这两个任务被制定为统一的框架, 优化联合目标函数以平衡真类概率、分类任务和回归任务的影响。实验结果表明, 我们提出的 PPGR 策略可以提高太阳风速预报准确率, 在保证整体预测性能不下降的情况下, 同时提升高速太阳风和稳定太阳风的预测性能。 **关键词:** 太阳风速度预测, 概率模式, 同时分类和回归

NO.35

基于极值理论的多分布太阳风速联合预测

余华龙¹, 孙彦茹¹, 谢宗霞*¹

1.天津大学 智能与计算学部, 天津 300350

随着越来越多的高科技系统暴露于空间环境中, 空间天气对人类的影响越来越大, 尤其是极端空间天气成为人类社会的巨大威胁。目前已有的预测方法均是衡量整体的预测准确性, 而实际上通过对 2011-2016 年美国航空航天局 (NASA)

在日地拉格朗日 1 点 (L1) 采集的 OMNI 数据进行分析, 发现数据表现出严重的不平衡分布: 太阳平静时期产生的常态太阳风速度 ($v < 500\text{km/s}$) 较多, 太阳活动爆发时期产生的高速太阳风 ($v \geq 500\text{km/s}$) 出现的情况明显较少, 具有很明显的重尾 (heavy-tailed) 特征。不平衡的数据分布使得深度学习模型无法对高速太阳风特征进行准确建模, 进而不能得到令人满意的太阳风速峰值预测结果。

针对这一发现引入了“深度不平衡回归 (DIR)”模型对 L1 点的太阳风速度进行预测。该模型考虑到广义极值理论对重尾分布的有效估计, 通过一个混合分布, 对常态和高速太阳风两类事件分别建模。在一定的参数约束下, 实现了对两类事件的统一描述和联合预测, 获得两类情况之间的平衡预测性能, 从而提升高速太阳风速的预测准确率。

与当前方法相比, 三个评价指标: 均方根误差 (RMSE), 平均绝对误差 (MAE) 和相关系数 (CC) 均获得了较好的性能, 尤其是对于高速太阳风速度的预测性能获得了较为明显的提升。

关键词: 极值理论; 深度不平衡回归; 太阳风速度预测

NO.36

基于可解释性机器学习的电离层等离子体泡的识别及相关性分析

陈艳红¹, 李书馨^{1,2}, 陈洪³, 李伟夫³

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100090;
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 华中农业大学 武汉 430070

在电离层中存在着不同尺度的等离子体不均匀结构, 根据电离层探测技术表现有不同的形式, 在卫星就位观测中, 通常表现为等离子体密度的下降, 称为等离子体泡, 关于等离子体泡的形成机制, 特别是与垂直漂移之间的关系, 已经进行了多方面的研究。一般认为, 在低赤道纬度的扩散 F 层或赤道等离子体泡 (EPB) 是由等离子体中的瑞利-泰勒不稳定性引起的。但关于等离子体泡种子机制以及电场、中性风的具体作用机理, 并没有得到完全的解决。

本文首先提出了一种新的电离层等离子体泡检测方法。根据 ROCSAT-1 的数据, 对 1999-2004 年的等离子体泡进行了识别和统计研究, 并与之前的研究

进行对比,结果表明,识别出来的泡等离子体泡出现时间、季节等特征与以前的研究结论一致。

为了进一步探索等离子体泡和其他参量之间的相关性,我们使用了最小绝对收缩选择算子(LASSO)和稀疏可加模型(SpAM)来分析等离子体泡与多个参量之间的关系。结果表明,等离子体泡发生时确实伴随着垂直漂移的增加,证明了东向极化电场的存在,同时温度与等离子体泡的发生有关,这可能与等离子体泡上升过程中磁通量管的变化有关。此外,离子成分 NO^+ 也可能与等离子体泡有潜在的关系,这可能与中性风引起的成分改变有关。

关键词:等离子体泡;可解释性机器学习;垂直漂移

NO.37

利用 LSTM 集成模型进行热层质量密度的暴时预测

王培安^{1,2},陈洲²,王劲松³,邓晓华^{1,2}

1.南昌大学 资源与环境学院,南昌 330031;

2.南昌大学 空间科学与技术研究院,南昌 330031;

3.中国气象局 空间天气重点开放实验室 国家空间天气监测预警中心,北京 100081

如何在磁暴期准确预测热层质量密度一直是一个十分重要但具有挑战性的问题。文章利用基于深度学习技术的长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络与集成学习算法建立了一个有效且稳定的预测模型。为了客观地验证模型的准确性与泛化性,使用 GOCE 卫星数据用于训练,而 SWARM-C 卫星数据用于测试。文章利用 F10.7, Kp, Ap, Dst, SZA 等多种外部物理参数与时空信息参数直接驱动模型进行密度预测。结果表明,基于 LSTM 的集成学习模型(LSTM-based ensemble learning model, LELM)在不同的地磁活动水平下具有很好的鲁棒性。在 2014-2020 年的 75 次不同级别的磁暴事件中,LELM 的预测准确性明显优于经验模型 NRLMSISE-00。所有事件的均方根误差(RMSE)均降低 50%以上,超过半数降低 80%以上。其中,66 次中等磁暴平均降低 86.0%,7 次强磁暴平均降低 84.8%,2 次超强磁暴平均降低 91.6%。

关键词:热层质量密度;磁暴;LSTM;深度学习;集成学习;

NO.38

基于残差网络的热层密度深度学习模型

李文博 1,2, 刘立波* 1,2,3, 陈一定 1,3,4, 乐会军 1,2,3

1.Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China.

2.Heilongjiang Mohe Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China.

3.College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4.Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

热层是空间环境的重要区域,许多航天器轨道穿过其中,了解热层密度的特征和变化对航天器定轨与碰撞预警至关重要。热层密度特征的研究经常需要借助理论或经验模式模拟。受制于理论体系的不完备和统计学先验假设的限制,目前热层密度模型对低轨卫星观测数据中展示出的热层密度变化特征并不能很好的重现。因此需要寻找更好的数据处理/建模手段,以进一步挖掘热层观测数据的价值,促进我们对热层密度变化特征的理解。深度学习作为数据驱动型的非线性拟合技术在特征提取和回归拟合上有很强的能力,我们基于残差神经网络框架,使用 CHAMP 数据初步构建了热层密度深度学习模型,测试了不同激活函数对热层密度模型预测的影响。通过与 GRACE 卫星观测数据进行比较,相比于传统全联接网络,基于残差网络的深度学习模型可在尽可能保存 CHAMP 轨道处热层密度特征的前提下,同时很好的描述热层密度的经纬度变化及时间演化特征。通过输入不同的空间环境指数,使得残差网络模型可以区分不同纬度地区热层密度对空间天气事件的响应过程。

NO.39

基于机器学习的 TID 气辉观测长期统计

赖昌

我们首次使用机器学习方法分析了部署在中国兴隆的全天辉光成像仪观测

到的2011年10月至2021年12月夜间中尺度电离层行进式扰动(MSTID)的统计发生和传播特征。我们使用卷积神经网络和快速区域卷积神经网络算法开发了一个程序,以自动识别和提取630nm气辉光图像中的MSTID和形态特征。我们从76万张气辉图像中识别了611个MSTID事件,并获得了以下统计结果:(1)MSTID的年发生率与太阳活动呈显著负相关。(2)季节发生率显示出至点峰值(夏季大于冬季)。此外,夏季夜间每小时发生率的峰值时间为当地时间2200-2300,比冬季提前一小时。(3)水平波长和速度的年平均值分别为160-311km和98-133m/s;(4)在611个事件中,589个MSTID向西南传播,从方位角(从北向顺时针)200°到260°不等。15次事件发生在东北方向,均为周期性MSTID,其中大部分(12次)主要发生在4月至8月之间;(5)相对强度扰动的年趋势(%)与水平相速度呈负相关。

NO.40

一种轻量化的全球TEC预测模型

闫旭

预测全球TEC map是一项具有挑战性的时空序列预测问题。不同于预测MovingMNIST一类动态手写数据集,TEC map中的电离层结构不仅在空间位置上随时间变化,其自身形状也会随时间变化而改变。在磁暴等突发事件发生时,其位置以及结构会发生难以预料的突变,加大了预测的难度。现有工作在此类问题上已有了重大的突破,可以较为精确的对其进行预测,但此类模型复杂度较高,模型体积较大,计算资源占用量较大。本文为实现在较低模型复杂度下,仍可以达到近似预测效果的目的,引入self-attention ConvLSTM(SA-ConvLSTM)单元,提升单个ConvLSTM单元提取长距离的特征时空依赖性的能力,降低了整体模型的复杂度。我们还引入了空间物理的先验知识,对数据集进行处理,以保证轻量化模型可以对复杂的TEC map进行预测。模型以1小时为步长,单次预测时长最长为12小时。模型训练完成后,可以迭代预测较长天数的TEC map。我们分别在2014年(太阳活动高年)以及2016年(太阳活动低年)的磁暴以及地磁平静期间进行连续预测。磁暴期间预测,覆盖了磁暴的初始相、主相和恢复相。地磁平静期间,进行四天的连续预测。测试结果表明,在太阳活动高年的地磁平

静期间, 预测绝对误差低于 1.5TECU,测试期间绝对误差平均值为-0.04 TECU。在太阳活动低年的地磁平静期间, 预测绝对误差低于 1.5TECU, 测试期间绝对误差平均值为-0.15 TECU。在太阳活动高年的磁暴期间, 预测绝对误差低于 4.5TECU,测试期间绝对误差平均值为 0.28 TECU。在太阳活动低年的磁暴期间, 预测绝对误差低于 2.5TECU, 测试期间绝对误差平均值为 0.13 TECU。模型在磁暴期间仍有较好的精度, 在赤道电离层异常区(EIA)也可以较好的预测出其结构。模型展现出较好的潜力, 适当增加模型层数还可以提高模型精度。

关键词:电离层预报; 全球 TEC 预测; 轻量化模型; SA-ConvLSTM;

NO.41

Plasma-Sheet Bubble Identification Using Multivariate Time Series Classification

Xuedong Feng¹, Jian Yang¹

1.Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, China.

Correspondence to: Jian Yang (yangj36@sustech.edu.cn)

Xuedong Feng (12131165@mail.sustech.edu.cn)

Plasma-sheet bubbles play a major role in the earthward transport of magnetotail particles. The most remarkable feature of bubbles is their fast bulk flow velocities, along with reduced plasma density and pressure accompanied by magnetic field dipolarization. These bubbles can be identified based on in-situ observations, but subjective ambiguity necessitates human verification, due to confusion with other phenomena mostly associated with magnetic reconnection and plasma waves. In this study, we aim to employ machine learning techniques to detect bubbles automatically and without prior subject expertise. To identify bubbles, we combine three distinct techniques: MINImally RandOm Convolutional KErnel Transform (MINIROCKET), 1D convolution neural network (CNN), and Residual Network (ResNet). The imbalanced training dataset consists of bubble and non-bubble events with a ratio of 1:40 from 2007 to 2020. The results indicate that the accuracy of the all three models

is approximately 99%, and their precision, recall, and F_2 score are all above 80% for both the validation and test datasets. The three methods are combined with the intersection set as the minimum set of predictions and the union set as the maximum set. The union set can accurately identify 66.7% of plasma bubbles. The methods simultaneously reduce the number of false positives significantly. In the prediction of bubbles in observations made in year 2021 using union set, the bubbles obtained by the model are comparable to those discovered using traditional criteria and manual inspections.

Keywords: plasma-sheet bubble, multivariate time series classification, sample imbalanced, image identification

NO.42

基于 IncResUnet 的电离层等离子体泡的识别

韩冰

等离子体泡是赤道区域较为重要的电离层特征结构, 它会对高频通信、星地通信以及 GNSS 导航定位产生闪烁干扰, 所以对等离子体泡进行观测识别有重要的科学意义和应用价值。传统的研究方法是通过一段时间内的离子密度标准偏差检测等离子泡, 其具有一定的局限性。本文提出使用深度学习方法识别等离子体泡, 在 Unet 网络模型的基础上, 提出在模型中加入 Inception 模块, 提取更多的等离子体泡特征信息, 同时加入残差模块缓解训练过程中梯度消失的问题。实验结果表明, IncResUnet 模型在 F1-score 得分为 0.86, Recall 得分为 0.81, Precision 得分为 0.93, 相比传统识别方法有较大优势。

关键词: 深度学习; 等离子体泡; IncResUnet

NO.43

基于高性能数据库的大规模科研计算工程化应用理念与实践

肖舸, 刘艺博

总结多年工程实践与技术攻关中积累的经验, 发现底层数据能力不足是制约

地震、气象、空间等领域大规模工程计算效率的主要瓶颈，也是阻碍科研成果工程化、实战化的主要技术难题。其中，海量网格数据快速扫描、“实时+短临”数据高效计算、“rapid-final-random”多级产品同时计算是其中尤为突出的三大难题。

从底层数据能力入手，基于国产高性能数据库软件产品 NoSQLt，打造了支持读写分离、支持高并发访问、支持海量数据并发吞吐、支持广域数据传输“不丢、不乱、不多”、系统“不崩、不挂、不慢”的底层数据能力支持平台，以此为突破口，成功解决了一系列工程计算技术难题，成效显著。在国家气象局将过去需要 38 分钟的 TEC 反演计算耗时缩短到了 3 分钟以内。是目前国内唯一能够满足民航方面对计算播报时效性要求的计算平台。

通过 TEC 反演计算平台的工程实践案例，阐述如何应用实时大数据理念和技术，逐一解决科研算法工程应用过程中遇到的一系列具体工程技术难题，从而实现计算效率的大幅提升与科研成果成功投入工程应用。

TEC 高速反演计算平台的工程实现

TEC 反演计算是典型的背景场计算，遇到的主要工程技术难题与解决方案如下。

海量网格数据快速扫描与大规模并行计算问题

问题描述：

TEC 计算需要 1200 个基站（未来会扩建至 2500）的计算数据，每个基站内的计算，都需要访问与基站有交互的十几颗乃至几十颗卫星的数据，而星与星之间，基站与基站之间的计算相互独立。

星与站的组合形成一个巨大的网格矩阵，海量网格数据的快速扫描检索是提升计算效率的关键；然而，原始 RINEX 文件中为各个基站与多颗卫星的交互数据，原始数据中各个卫星数据混乱交错，导致检索与获取效率低下，无法满足时效性要求。

同时，相互独立的星、站计算，产生了巨大的并行计算压力，对底层数据系统提出了严峻挑战。

解决方案：

将 RINEX 数据进行了库内再组织，以星站组合为数据组织最小粒度，每个站对每颗星的交互数据由过去混乱交织变成了泾渭分明，极大提升了数据检索与

获取速度;

NoSQLt 支持多路客户端并发访问, 基于 NoSQLt 为 TEC 计算算法提供了大规模并行框架, 同时支持多达上百个线程进行完全并行的计算, 实现了“完成 N 个动作耗时 \ll 完成 1 个动作耗时 $\times N$ ”的真正高并发, 计算效率极高, 最终实现了用户的时效性要求。

“实时+短临”数据高效计算问题

工程技术问题描述:

TEC 计算需要参考每颗星过去 8 或 24 小时历史数据, 是典型的“实时+短临”数据计算, 由于星站规模巨大, 每次计算都要涉及海量历史数据的访问, 是制约计算效率的主要因素之一。

解决方案:

NoSQLt 不因历史数据增加导致性能变慢, 访问历史数据与访问实时数据检索速度接近, 因此能够保障 TEC 计算过程中极为关键的海量历史数据访问的效率。

“rapid-final-random”多级产品同时计算问题

问题描述:

TEC 计算播报业务, 除每 5 分钟一次的实时播报 (rapid) 以外, 还有定时 (一般为 3 个月) 的历史数据补算 (final), 以修正当时由于数据不全导致的精度问题; 同时还有可能根据业务需要, 随时指定任意历史时间点开始补算 (random)。三种业务运行在同一个平台上, 这种“rapid-final-random”多级产品同时计算, 对底层数据系统的稳定性, 多客户端支持能力提出了很高的要求。

解决方案:

NoSQLt 以自身的高稳定性确保业务的正常运转;

NoSQLt 支持多客户端并发访问, 能够在不影响实时播报业务的情况下实现定时或非定时的补算功能, 由于访问历史数据速度快且不会因数据规模变大而性能下降, 补算效率足以满足用户的需求。

其他工程技术问题

数据质量问题

TEC 原始数据为 RINEX 文件, 原始数据中存在大量数据错漏、重复、格式

错误等数据质量问题，对后续计算的效率影响极大。

解决方案:

结合用户提供标准 RINEX 文件，开发入库清洗工具，实现了原始数据的高速解析入库以及“入库即清洗”，有效解决原始数据质量问题，保证入库数据均可直接参与计算，为后续的高速计算提供了良好的数据基础。

数据不间断写入且压力不确定问题

TEC 计算，每一轮计算都要参考最新的数据，由于各种原因，分布全国各地的基站并不能保障每一轮都及时上传数据，实时播报业务系统需要在不确定的写入压力下，稳定地定时输出播报结果。

解决方案:

NoSQLt 支持读写分离，数据写入不影响检索读取效率，且写入数据立即可查，从而支持业务的正常运转。

NO.44

空间环境科学数据安全分级概念框架研究

许琦^{1,2}, 胡晓彦^{1,2}, 邹自明^{1,2} 佟继周^{1,2}

1.中国科学院国家空间科学中心 空间大数据技术研究室, 北京 100190;

2.国家空间科学数据中心, 北京 100190

建立多维度、全面覆盖空间环境数据资源特性的安全分类分级框架，形成领域数据安全分级规则与流程，是落实国家数据安全法要求，开展细粒度的领域数据安全分级管理工作的必要前提。空间环境科学数据资源具有多来源、多类型、多时空分辨率等特点，国家空间科学数据中心为满足学科应用、开放共享等多方面的需求，在调研数据安全相关政策、标准规范及数据安全管理和研究空间环境数据资源特征的基础上，提出了能够适用于各类空间环境科学数据的安全分级概念框架，定义了安全分级要素、级别划分规则和分级流程。在概念框架指导下，根据空间环境科学数据内涵开展数据特征识别，识别分级对象的观测区域及区域内的要素/目标的时空覆盖、数据分辨率和精度、数据规模、处理程度等特征要素，根据一个或多个特征要素组合后达到的一定条件或阈值，评估其对国家安全、公共利益、组织合法权益和个人合法权益的影响程度，判断最主要的安全

影响因素后给出数据安全级别建议,为空间环境领域数据安全分级工作的开展提供依据,为领域重要数据目录的形成提供支撑。

关键词: 空间环境数据管理; 数据安全; 数据分类分级; 数据安全分级管理;

NO.45

基于相空间密度关联法的 FY3B 的跨卫星交叉定标

朱昌波¹,张贤国²,倪彬彬³,张辉⁴,李兴冀⁵,宗位国⁶,李嘉巍⁶,黄聪⁶,张晨轩¹,项正³,王丽¹,
于贤彩¹,常峥¹,王春琴¹,张坤毅¹,孙越强¹,张效信⁶

1. 中国科学院国家空间科学中心 空间环境探测重点实验室 北京 100190
2. 中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190
3. 武汉大学 电子信息学院空间物理系 武汉 430072
4. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理院重点实验室 北京 100029
5. 哈尔滨工业大学材料学院极端环境材料和器件技术创新中心 哈尔滨 150001
6. 中国气象局国家卫星气象中心 空间天气重点实验室 北京 100080

地球外辐射带电子通量随时空变化剧烈,能够引起空间灾害事件。为了航天器或者电子设备的安全,需要辐射带模型来对剧烈变化的辐射带电子通量进行预报。卫星电子观测数据是构建辐射带模型的基础。近些年随着开展空间环境探测日益增多,国内外已获得了大量的高能电子观测数据,这些数据的综合为开展建模等研究工作提供了可能的数据支持。中国气象局发射的风云三号系列极轨卫星具有在轨时间长的优势,其所搭载了空间环境监测器 (SEM),能够给在 1~2 个太阳活动周期内连续观测辐射带粒子通量,并获得海量珍贵的国产自主数据。然而,在利用国产自主数据之前,需要将不同来源的卫星数据进行交叉定标,并形成符合统一标准的规范化数据。我们在相空间坐标系下利用相空间密度 (PSD) 关联法,对低地球轨道(LEO)风云 3B 卫星(FY-3B)和近赤道高偏心轨道(HEO)范艾伦探测器-A (VAP-A)测得的高能电子通量开展了跨卫星定标工作。VAP-A 提供投掷角分辨电子微分通量, FY-3B 提供投掷角平均电子微分通量。在计算 FY-3B 的 PSD 之前,我们介绍了一种基于仪器安装方向信息和 T89 磁场模型估计 FY-3B 局部投掷角的方法。在地磁暴期间,我们利用两颗卫星推断出的 PSD 关联点计算了三组 (μ , K , L^*) 下的定标因子,交叉定标因子随 (μ , K , L^*)

集合的变化而变化。交叉定标因子的数值表明FY-3B的电子微分通量高于VAP-A的电子微分通量。在地磁平静期,我们通过对FY-3B和VAP-A的非平均PSD的点的数量进行独立高斯拟合分析来进行定标。在磁暴期和磁平静期,对于满足 $\mu = 1.1 \text{ MeV/G}$, $K = 3 \text{ G}0.5\text{Re}$, $3.1 < L^* < 3.3$ 的电子,跨卫星交叉定标因子分别为0.76和0.78。对于 $\mu = 1.1 \text{ MeV/G}$ 、 $K = 3.5 \text{ G}0.5\text{Re}$ 、 $3.3 < L^* < 3.4$,磁暴期和磁平静期的交叉定标因子分别为0.76和0.72。对于 $\mu = 1.1 \text{ MeV/G}$ 、 $K = 4.0 \text{ G}0.5\text{Re}$ 、 $3.5 < L^* < 3.7$,磁暴期和磁平静期的交叉定标因子分别为0.86和0.46。FY-3B在高磁纬测得的经过定标的电子微分通量可用于辐射带电子动力学研究和辐射带数据同化建模。

关键词:相空间密度关联;交叉定标;风云三B

NO.46

北斗M04与GPS ns63相对论电子在轨交叉定标研究

王丽^{1,3}, 杨晓超^{1,2}, 戴磊^{1,2}, 王赤^{1,2}, 张焕新^{1,3}, 常峥^{1,3}, 张坤毅^{1,3}, 荆涛^{1,3}

1. 中国科学院国家空间科学中心
2. 空间天气国家重点实验室
3. 天基空间环境探测北京市重点实验室

全面了解辐射带对航空航天工程和空间天气具有重要意义。经过良好交叉校准的全球高能粒子观测数据对于地球辐射带模型建模以及磁层高能粒子动力学的研究至关重要。在本报告中,我们利用2012至2014年中国北斗定位导航系统(BD)的中地球轨道卫星M04星与美国全球定位系统(GPS)星座的ns63星的高能电子观测数据开展了在轨交叉定标研究,获得了两个系统之间的系统偏差。结果表明,M04和ns63相对论电子关联点的线性拟合斜率接近0.9,表明M04的电子观测与GPS的电子观测具有良好的一致性,M04提供了从1 MeV到2 MeV的高质量电子通量观测。利用多卫星同化观测的更密集电子能谱优势,我们研究了2013年3月两次连续磁暴期间电子能谱的演变,同化观测呈现的不同动力学特性表明,这些磁暴期间主导的物理过程不同,这直观地证明了M04和ns64观测值之间交叉校准的重要性以及同化观测值的有用性。这项工作展示了北斗与同类型应用卫星GPS相对论电子观测数据的比较结果,同时可以期待用本工作中

的交叉定标方法形成的大量同化观测数据集对于地球辐射带建模、空间天气预报及态势感知以及全面科学认识辐射带中电子动力学过程具有重要意义。

NO.47

基于高分辨力光学图像的太阳黑子自动识别

龚潇颖 1,2,3,4,饶长辉 1,2,3

1.中国科学院自适应光学重点实验室, 四川成都 610209

2.中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209

3.中国科学院大学, 北京 100049

4.中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049

随着大口径陆基太阳望远镜以及自适应光学系统的发展, 我们能获得越来越高分辨力的太阳光学图像。在光球层的高分辨力图像当中, 太阳黑子的精细结构(如: 本影、半影、亮桥), 能够被清晰地观察到。太阳黑子是磁场的聚集之处, 与耀斑等太阳活动的爆发有着密切的关系。因此对高分辨力光学图像进行自动识别研究将对空间天气预报以及太阳物理研究提供巨大的帮助。

在高分辨力太阳图像下, 黑子中的许多细节呈现的十分清晰, 因此直接使用灰度阈值法进行识别, 将产生大量的识别错误。针对该问题, 本研究设计了一种基于超像素分割的太阳黑子精细结构识别算法, 可以从高分辨力的光球层图像当中提取出黑子的本影、半影以及亮桥。该方法首先使用 SLIC 方法对图像进行预处理, 将其分割成为多个超像素, 每个超像素中的像素具有类似的特征。接下来, 将各超像素的灰度、纹理、位置特征进行融合, 增大隶属于不同精细结构的超像素间的特征差异。然后, 将黑子精细结构的识别问题转化为超像素的聚类问题, 利用混合高斯聚类得到初步的识别结果。由于超像素分割方法并不能分割出亮桥这种细小的结构, 因此在初步识别结果的基础之上, 使用形态学方法结合面积阈值以及位置信息提取出亮桥结构, 得到最终的黑子精细结构识别结果。为了适应不同角分辨率与视场的数据, 本方法还对相应的参数设计了自适应调节策略。

基于超像素分割的太阳黑子识别方法由于融合了多种特征进行识别, 因此该方法能取得准确的太阳黑子精细结构识别结果。此外, 由于将识别的搜索范围从

整个图像的像素数量缩减为了超像素的数量，因此能快速得到识别结果。

关键词：空间天气；太阳黑子自动识别；太阳高分辨力光学图像

NO.48

基于 520km 球形卫星实测数据的暴时大气密度增强焦耳加热影响研究

金煜姣¹,张贤国^{1,2,3,4}, 孟祥广^{1,3,4}, 李永平^{1,3,4}, 王馨悦^{1,3,4}

1.中国科学院国家空间科学中心, 空间环境探测重点实验室 北京 100190

2.空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

3.天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

4.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

磁暴期间, 太阳风和磁层相互作用的能量可从地球高纬注入, 引起热层大气密度的大幅扰动。中国科学院国家空间科学中心与海特公司联合研制的球形卫星--球球星于 2021 年 10 月 14 日成功发射, 轨道高度 520km, 搭载有轨道大气探测仪和精密定轨接收机, 能够通过原位探测和精密定轨反演获取高精度热层大气密度数据。本文通过分析暴时球球星在 520km 高度实测大气密度与焦耳加热的时空相关性, 研究焦耳加热的加热源区以及焦耳加热对热层大气密度扰动的影响。球球星入轨一个月后的最大轨道高度约 540km, 最小约 505km, 为避免轨道高度变化对大气密度的影响, 将球球星实测大气密度归一化到 520km 高度。为了剔除背景热层大气, 用暴时大气密度相对磁暴前一天密度的相对变化百分比代替绝对大气密度, 表征磁暴期间热层大气的密度增强。假设风场的影响可以忽略, 焦耳加热的计算主要由对流电场和皮德森电导率两部分决定, 本文通过 Weimer2001 电势模型获取对流电场, 分别通过风云三号和 DMSP 卫星获取实测沉降粒子通量数据。通过分析大气密度增强与焦耳加热对整个磁暴事件的时间响应得到二者的时间相关性。由大气密度增强和焦耳加热在不同纬度带特别是在极尖区等典型区域的空间分布可以得到焦耳加热的主要加热源区, 并且验证焦耳加热是热层大气密度的主要能量源和扰动源。进一步划分日夜侧研究密度增强和焦耳加热的空间分布得到二者在磁暴期间的地方时特性。

关键词:热层; 大气密度; 磁暴; 焦耳加热; 极尖区

NO.49

MUSER and IPS Telescopes for Space Environment Monitoring

颜毅华^{1,2}, 王威¹, 陈林杰¹, MUSER 与 IPS 望远镜团¹

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 天文与空间科学学院, 北京 100049

We introduce the recently built solar radio spectroscopy-imaging facilities, including near future developments and upgrades,} as well as the IPS (Interplanetary Scintillation) telescopes under construction in China for solar and heliospheric studies. MUSER (Mingantu spectral radioheliograph), covers 400 MHz-15 GHz frequency range which was established during 2009-2016 in Mingantu Observing Station at Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia of China, under the National Major Scientific Research Facility Program of China. At moment MUSER is composed of two arrays with MUSER-I covering 400 MHz-2.0 GHz with 40 4.5m mesh antennas and MUSER-II covering 2-15 GHz with 60 2m dish antennas. MUSER will be extended to have its third array MUSER-L covering 30-400 MHz frequency regime with 224 LPDAs (log-periodic dipole antennas) under the Meridian-II Project, which is a National Science Infrastructure Project of China, to be constructed in the current two years. MUSER will provide solar radio images monitoring the solar eruptions from solar surface into interplanetary space. An IPS telescope array is going to be built in the current two years under the same National Science Infrastructure Project of China, with the main IPS telescope of three 140 m \times 40 m cylinder antennas located in MUSER site and two 30m antennas in two nearby counties each about 200 km away. The working frequency will be at 327 MHz and 654 MHz with dual linear polarizations. The cylinder antennas will have a sky zenith angle of 60 degrees and be able to observe thousands of radio sources. The IPS telescope will provide important information about solar wind and solar eruptions from the Sun to the Earth environment. The MUSER and IPS telescopes at Mingantu Observing Station, National Space Science Center of Chinese Academy of Sciences will play important role in space weather studies and space environment monitoring.

关键词: 太阳射电望远镜; 射电日像仪; 行星际闪烁射电望远镜; 空间环境监测

NO.50

中高层大气风场探测多普勒差分干涉仪研究进展

冯玉涛

大气风场是理解地球大气系统动力学、热力学特性的重要参数,是气象预报、空间环境监测、气候学研究等必须的基础数据。基于测风干涉仪的被动光学遥感是中高层大气风场测量的主要技术手段。多普勒差分干涉测风技术是本世纪初由美国海军实验室提出的一种新型行星大气风场探测技术,经过近二十年的时间,多普勒差分干涉仪的基础理论、干涉仪设计、系统研制工艺、数据处理与风速反演等方面取得了一系列研究成果。本文梳理回顾大气风场探测多普勒差分干涉仪技术的国内外研究进展,讨论其技术特点和应用潜力,为未来大气风场被动光学遥感探测技术发展和我国大气风场探测领域任务规划提供参考。

NO.51

基于自主数据的日地因果链灾害环境及效应联合观测研究

张贤国^{1,2,3,4}, 宗位国⁵, 毛田⁵, 黄聪⁵, 倪彬彬⁶, 张坤毅^{2,3,4}, 孔令高^{2,3,4}, 付利平^{2,3,4},
李永平^{2,3,4}, 白伟华^{2,3,4}, 陈东^{1,3}, 朱昌波^{2,3,4}, 孙越强^{2,3}

1.空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

2.天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190

3.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190

4.中国科学院国家空间科学中心 空间环境探测重点实验室, 北京 100190

5.国家空间天气监测预警中心, 北京 100081

6.武汉大学, 武汉 430072

空间天气与人类生产生活的关系越来越密切。随着人类航天科技进步,人类生活越来越依赖天基系统,人类认知的边界不断拓展。空间天气是人类航天面临的主要威胁之一。运行于地球轨道的各类卫星不同程度遭受辐射环境影响而导致总剂量、单粒子、充放电等效应威胁其安全和性能;各类导航通信侦查遥感卫星受电离层扰动影响而导航定位误差增大、通信质量下降,进而导致效能下降;各类低轨道卫星、空间碎片受轨道大气扰动影响而引起轨道变化,导致应用卫星轨

道衰减而减寿甚至坠毁、碎片碰撞概率提升增加碰撞损伤风险。而对于深空探测，地球空间是人类离开地球摇篮、探索发现新现象、新资源、新空间的必经之地。同时，空间也是诸多前沿物理，例如核聚变、生命演化等研究的天然实验室。

日地空间天气系统是一个多时空尺度覆盖的多圈层、多要素耦合的复杂系统，需要多星多手段联合探测。日地空间天气扰动的源头是太阳。太阳活动导致物质和能量的剧烈释放，经行星际传播到达地球，通过光电辐射直接到达或日地相互作用的形式进入地球空间系统，引起磁层、电离层、热层扰动。天问一号、风云、北斗、空间站、希望一号等卫星均搭载了空间环境探测载荷，分别处于日地空间天气扰动因果链的不同区域，为我自主数据联合观测研究提供了很好的联合观测机会。天问一号位于火星轨道附近，可获取行星际太阳风参数；风云气象卫星，同步轨道 GEO 扼守外磁层进入内磁层的外边界，对外可对太阳遥感成像、磁尾等离子体注入监测，对内可长时连续凝视等离子体层、环电流、电离层、热层；低地球轨道极轨轨道把守辐射带内边界，对外监测粒子上行、沉降和辐射带起源演化，对内可快速全球覆盖实现电离层、热层遥感成像探测；北斗卫星位于辐射带中心位置，可以实时监测辐射带的剧烈扰动；空间站位于 380km 高度热层内，可以实时观测轨道大气变化。所有这些卫星太阳爆发探测、粒子辐射探测、磁层等离子体探测、电离层掩星和光学遥感探测、以及轨道大气探测的多星多手段联合探测数据，为日地空间天气全因果链联合探测研究提供了丰富的一手自主数据支撑。

本报告将从以下几个方面介绍自主空间天气监测数据的联合分析研究进展：

1、基于风云 LEO 极轨和 GEO 轨道卫星数据，联合天问一号、北斗、空间站、希望一号等全自主空间天气数据，分析我国首次全自主数据联合观测跨行星尺度太阳活动空间天气影响事件、2022 年初星链 40 颗卫星丢失事件；

2、介绍以风云数据为主，联合国内多星数据自主辐射环境动态建模，以及数据同化建模取得的进展，以及建模结果与 AP8AE8、AP9AE9 的对比；

3、介绍风云卫星数据在自主的空间环境扰动指数研究、单粒子事件分析中的应用研究进展。

关键词：空间天气，空间环境，空间环境效应，联合观测

NO.52

行星际激波低频射电三维层析成像探测

邓丽, 阎敬业, 沈芳, 赵新华

中国科学院国家空间科学中心

行星际日冕物质抛射 (CME) 传播机制、观测、建模是空间天气预报的主要挑战。行星际 CME 及其伴随激波在传播过程中会受到行星际磁场、太阳风高速流、日球电流片等大尺度结构的影响以及经历多个事件之间的相互作用等复杂过程, 因而预测其日地传播过程会有很大的不确定性。行星际激波卫星星座低频射电探测拟采用 1 颗主星和 8 颗微卫星携带低频干涉成像谱仪, 在空间形成约 100km 的虚拟口径, 利用星间干涉成像技术, 实现时间-距离-频率的三维层析成像, 进行射电源的快速定位和追踪。

在 5MHz~30MHz 范围, 射电信号主要来自高日冕区快速变化的小尺度激波辐射结构, 距离地球远; 在 10kHz~5MHz 范围, 射电信号主要来自缓慢演化的行星际大尺度激波结构, 距离地球变近。同一物理口径的空间卫星阵列, 其电口径随频率的变化, 可实现远端源区高精度定位和低频端高质量成像。针对行星际低频射电信号特征, 提出了基于微卫星星座探测的时间-距离-频率的三维层析成像方法。

由于传播过程中激波在不同频率上有明显不同的表现特征, 对应于日地空间中不同距离上表现的差异。因此, 对每一个时刻, 通过对不同频点进行切片成像, 获得不同频点的二维图像, 每个频点的图像反映了相应日地距离上的传播特征。通过高时间分辨率的连续成像探测, 即可动态获取激波在日地空间的连续传播过程, 为未来空间天气预报提供一种新的探测手段。

NO.53

溴化镧晶体与 SiPM 在“怀柔一号”(GECAM) 卫星项目中的应用

张大力, 安正华, 孙希磊, 李新乔, 熊少林 (代表 GECAM 项目组)

中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室

“怀柔一号”引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GECAM)项目的新成员

GECAM-C（也称为高能爆发探索者，HEBS）于2022年7月27日成功发射。GECAM-C用于监测10keV-5MeV的伽马射线暂现源。GECAM-A,B,C进行联合观测，将大大提高伽马射线暂现源的视场范围，时间和能谱测量精度。GECAM-C的伽马射线暂现源探测器（GTP）采用四英寸碘化钠加SiPM阵列读出方案。硅光电倍增管（SiPM）作为新兴的光电倍增器件，在核医学与地面辐射探测实验方面得到广泛应用。因为SiPM具有体积小，低工作电压低工作，量子效率高的优点，近年来逐步应用到空间探测领域。GECAM-C根据SiPM特点，研制了专门的SiPM阵列与前端放大器，并设计SiPM偏压调节方案，修正SiPM的温度效应以及多个探头间的增益不一致性。GTP已按照航天规范，完成了多项环境试验与标定实验。GECAM-C成功发射后，我们根据在轨测试的GRD本底数据，完成了GRD运行参数调整和优化。目前GRD在轨性能状态良好。由于空间辐照会对SiPM造成位移损伤，导致SiPM电流增加，因此对GECAM-C的SiPM状态进行了长期监测与分析，并与GECAM-B的SiPM状态进行了比较。

NO.54

稻城太阳射电成像望远镜进展与展望

武林¹, 阎敬业¹, 杨洋¹

1.中国科学院国家空间中心 太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100101;

对于地基大规模干涉阵列，随着科学探测所要求的观测分辨率越来越高，对干涉阵列的一致性需求也随之提高。但是系统硬件和工艺并不能实现足够高的阵列一致性要求，包括采样系统的时钟同步误差、接收电子学系统的温漂特性、接收链路物理一致性、接收天线一致性等，都会导致阵列的一致性问题。所以对于大规模干涉阵列，必须采用系统定标的手段解决阵列一致性问题。当前大规模地基射电天文干涉阵列对于系统误差的标定，主要采用已知天文源或卫星信标的外源定标方案，该方案的劣势主要在于无法做到对阵列一致性的实时定标，对于快速变化的系统误差无法进行有效校正。此外，射电天文领域中所采用的相位闭合、条纹搜索等定标方法，由于需要海量长时计算，对于需要进行实时高性能成像的设备并不适用。

子午工程二期圆环阵太阳射电成像望远镜是子午工程的标志性设备，其主要

任务就是观测空间天气扰动的主要源头-太阳,发现 CME 的源头并跟踪 CME 的传播和演化,为物理模型提供观测数据输入,为子午二期地磁暴及高能粒子探测设备提供源区及加速区数据,为行星际闪烁望远镜 IPS 提供 CME 驱动信息,并与 IPS 望远镜形成从太阳到地球的观测链条。设备是由 313 个单元天线均匀分布于 1km 圆周上形成圆环阵大规模干涉阵列。针对传统射电天文干涉阵列定标方案的所存在的问题,以及圆环阵设备的应用场景和定标需求,创新性的设计了基于中心定标以及多环相位定标相结合的定标方法,解决了大规模干涉测量系统高精度实时定标的难题。为了验证关键技术以及避免大规模系统建设返工的风险,研制了 16 单元的验证系统,通过对太阳活动区的定位观测,系统的关键功能及性能指标以及系统级高精度实时定标方法得到了充分验证,指标领先于国内外设备,针对太阳活动的干涉成像质量优于国际同频段太阳观测设备。

关键词:干涉阵列;高精度定标;子午工程;圆环阵

NO.55

羊八井站回眸与展望

卢红¹

1. 中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理中心, 北京 100049

西藏羊八井宇宙线国家野外观测研究站因 LHAASO (高海拔宇宙线观测站) 的建成和运行,即将移交中国科学院国家天文台。本文从: 1、建站背景; 2、历史经纬; 3、国之平台; 4、业界丰碑; 5、孕育未来等 5 个方面介绍了羊八井国际宇宙线观测站的建设历程和取得的丰硕成果。结合羊八井的高海拔、地势开阔、冬无积雪、交通便利、宜居宜研的特殊优势,根据其已有的实验项目和打下的坚实研究基础,为其未来的发展提出了几点实验拓展建议。如: 基于透镜的广角大气切伦科夫望远镜阵列哈达计划 (HADAR); 基于横贯南北极的多站 Muon 子探测器空间环境监测预报研究; 重现宇宙线空气簇射的多层复合式探测阵列等,以期抛砖引玉,进一步发掘和利用羊八井的科学潜能,继续建设和运行好这一利用西藏高原地理优势开展观天探微的多学科交叉研究平台。

关键词:西藏羊八井; 宇宙线; Muon 子探测

NO.56

基于电子密度剖面的热层参数反演

任志鹏^{1,2,3,4*}、李韶阳^{1,2,3,4}、乐新安^{1,2,3,4}、刘立波^{1,2,3,4}、魏勇^{1,2,3,4}、于婷婷^{1,2,3,4}

1 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室 北京市/朝阳区 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京市/朝阳区 100029

3 中国科学院地球科学研究所 北京市/朝阳区 100029

4 中国科学院大学地球与行星科学学院 北京市/怀柔区 100049

摘要: 电离层受到背景中性大气的控制, 电离层的状态能够反映背景热层中性大气的状态信息(如热层中性温度、密度、成分和热层风等), 本文提出了一种利用底部电离层电子密度观测数据反演热层大气温度以及成分等信息的新方法。该方法基于电离层模拟结果, 建立逃逸层温度 T 变化与电子密度剖面变化之间的函数关系, 并结合实测数据对 T 进行求解。为验证方法可靠性, 采用 Millstone Hill 的非相干散射雷达的观测数据进行验证, 证明了该方法的可靠性。基于该方法, 利用国内几台测高仪(北京、武汉、三亚)的底部电离层电子密度观测数据对不同区域的逃逸层温度进行了反演。

NO.57

夜气辉反演电离层 foF2 算法的精度分析

王文瑄

对于夜间电离层来说, 气辉 135.6nm 谱线主要是由 F 层的 O^+ 和电子的辐射复合过程以及 O^+ 和 O^- 的中性复合过程激发的, 该谱线的强度与电离层峰值电子密度 $NmF2$ 存在强相关性。本文的物理模型是基于夜间气辉 135.6nm 辐射强度与 F2 层峰值电子密度 $NmF2$ 的平方成正比的原理, 从而建立了适用于不同经纬度、地方时、季节和太阳活动下的反演算法。本文利用 DMSP 卫星上搭载的紫外光谱成像仪 (SSUSI) 实际观测的 135.6nm 气辉辐射强度对相应时空的电离层 F2 层临界频率 foF2 进行反演, 并将其与地基测高仪的探测结果进行了综合对比。研究表明, 在太阳活动高年 (2013 年), 相对误差小于等于 20% 的数据占比

92.99%，平均相对误差约为 7.08%；在太阳活动低年（2017 年），相对误差小于等于 20%的数据占比 80.76%，平均相对误差约为 12.64%。本文最后对该算法在太阳活动高低年的反演精度差异进行了进一步分析。

NO.58

北方中纬高频雷达大型相控阵天线定标方法研究

邓翔，蓝爱兰，阎敬业

空间天气学国家重点实验室，中国科学院国家空间科学中心 北京 100101

北方中纬高频雷达是由三站 6 部基于全数字相控阵技术的敏捷型地基相干高频雷达（Agile Dual Auroral Radar Network, AgileDARN）组成的电离层观测网，实现对中高纬度电离层的连续探测。相控阵单元天线的幅度和相位不一致性将会导致雷达发射波束和接收波束的指向偏移，副瓣电平抬高和天线增益下降等，最终严重影响雷达的探测精度。针对 AgileDARN 雷达相控阵天线幅度和相位不一致性展开研究，提出了一种基于线性最小二乘拟合和流星回波相结合的定标方法。线性最小二乘算法能获得较小的残差，流星回波具有高信噪比、易观测、持续时间长、具有平面波前等特点，实测数据表明两者的结合能获得较好的幅相不一致性校正结果。同时，利用无人机搭载点源来进一步验证上述方法的可靠性。

关键字：高频雷达 相控阵天线 定标 流星回波 线性最小二乘拟合

NO.59

利用一种带有保护管的新型朗缪尔探针进行低密度等离子体的可靠测量

谢新尧¹，李建泉^{1*}，李延辉¹，张清和¹

1.山东大学，空间科学研究院，山东威海，264209

E-mail of corresponding author: lijianquan@sdu.edu.cn

随着小卫星时代的来临，空间环境探测的重要性日益凸显。基于其操作简单以及原位测量性能优异等优点，Langmuir 探针逐渐成为卫星上常用的空间环境探测载荷之一。[1]尽管 Langmuir 探针无论是在实验室等离子体还是在空间等

离子体中均得到了广泛的应用,然而目前的 Langmuir 探针在准确测量等离子体方面仍面临着一定的挑战,特别是在面向空间环境低密度等离子体测量时,在传统的 Langmuir 探针结构中,探针传感器总会受到其尾部绝缘支架上悬浮鞘层的遮蔽作用,从而导致探针传感器上实际的等离子体收集面积无法准确获得,即形成所谓的“终端效应”。[2]在高密度等离子体中,这种“终端效应”或许可以忽略不计,然而在低密度等离子体中,探针的“终端效应”非常显著,最终将造成等离子体的电子温度以及电子密度等测量结果出现较大的偏差。在本研究中,我们通过对 Langmuir 探针的结构进行全面的优化设计,最大程度上减少探针“终端效应”对等离子体测量结果的影响。相关实验结果表明,传统的 Langmuir 探针得到的电子密度总是低于新型 Langmuir 探针得到的电子密度,特别是在电子密度约为 10^{11} m^{-3} 等离子体中,传统 Langmuir 探针测得的电子密度比新型 Langmuir 探针测得的电子密度低了约 15%,显示了我们研发的这种新型 Langmuir 探针在诊断低密度等离子体中有着巨大优势。此外,利用新型 Langmuir 探针,我们对灯丝放电等离子体的稳定性及其空间分布进行了测量。实验结果表明,灯丝放电等离子体具有良好的稳定性,并且在真空仓的径向分布中也有着良好的均匀性。

关键词: Langmuir 探针, 低密度等离子体, 灯丝放电, 电子密度

参考文献:

[1] Shen et al, The state-of-the-art of the China seismo-electromagnetic satellite mission, Science China Technological Sciences,2018, 61(5), 634.

[2] Wang et al , Effect of filament supports on emissive probe measurements, Review of Scientific Instruments, 2013, 84(1),210.

NO.60

ASO-S 卫星 HXI 载荷的在轨背景研究

陈灯意、刘伟、胡一鸣、张哲、伍健

ASO-S 卫星是国内首颗综合性的太阳天文台,计划在太阳第 25 活动峰年期间,对太阳耀斑、日冕物质抛射与太阳磁场实现在轨的同时观测。太阳硬 X 射线成像仪(HXI)是其上配置的三个核心载荷之一,主要瞄准太阳耀斑的观测研

究。

ASO-S 卫星已于 2022 年 10 月 9 日顺利发射升空，目前运行于 720km 太阳同步轨道。本报告将对 HXI 的空间环境开展研究，即 HXI 的空间环境中粒子的组成、空间分布和能量分布信息。本报告还通过仿真模拟 HXI 对空间环境粒子的响应，计算出 HXI 的在轨本底的组成比例和随时间的变化，进而有助于评估在轨本底对实际观测的影响和优化制定合适的在轨观测计划。

关键词：ASO-S 卫星；HXI；空间环境

NO.61

大视场自适应光学技术进展及其在太阳高分辨力探测中的应用

张兰强^{1,2}, 饶学军^{1,2}, 鲍华^{1,2}, 郭友明^{1,2}, 钟立波^{1,2}, 杨金生^{1,2}, 王成^{1,2}, 樊新龙^{1,2}, 冯忠毅^{1,2}, 饶长辉^{1,2,*}

1.中国科学院光电技术研究所, 成都 610209

2.中国科学院自适应光学重点实验室, 成都, 610209

地基大口径天文望远镜在观测时受到地球大气湍流的动态影响，其成像质量严重下降并且不断漂移，需要自适应光学技术对大气湍流引起的动态波前误差进行实时补偿，从而保持望远镜理想的成像性能。对于太阳等扩展目标而言，大视场自适应光学是地基望远镜实现大视场高空间分辨力成像的必要技术手段。大视场自适应光学技术，包括地表层自适应光学、多层共轭自适应光学等，在经过三十多年的理论发展和实验验证后，正逐步走向应用。项目团队为云南天文台 1 米新真空太阳望远镜研制的国内手套太阳多层共轭自适应光学系统也在 2023 年 2 月投入常规运行。本报告在简要介绍国外大口径太阳望远镜自适应光学技术研究现状的基础上，重点介绍我国大视场自适应光学技术的研究进展及其在太阳高分辨力成像观测中的应用情况，包括单层校正的地表层自适应光学技术，多层共轭自适应光学技术等，以及 NVST 上太阳 MCAO 系统对太阳大气的大视场高分辨力成像观测结果。

关键词：大视场自适应光学，太阳观测，高分辨力成像

* chrao@ioe.ac.cn

NO.62

空军临近空间天气保障需求及思考

李郢, 王京阳

93110 部队, 北京 100843;

临近空间天气保障作为空天战场环境保障的重要组成部分, 与航空航天、通信导航、防空反导、侦查监视、预警探测等武器装备的作战使用和性能发挥息息相关。有效利用临近空间环境和天气特点, 形成空天战场信息优势可以影响战争的进程, 甚至决定战争的胜负。因此, 加强临近空间天气保障能力建设是适应空军空天一体化发展的迫切需要。本文通过系统梳理空军临近空间天气保障需求, 总结近年来开展空间天气业务和实施临近空间天气保障过程中, 在科学认知、能力提升和军民融合三个方面存在的主要问题, 提出应对措施和建议。

关键词: 临近空间天气; 保障需求; 存在问题

NO.63

临近空间大气密度扰动对高超声速飞行器气动热环境的影响

程旋^{1,2}, 肖存英³, 杜涛⁴, 胡雄^{1,2}, 杨钧烽^{1,2}

1.中国科学院国家空间科学中心, 空间天气学国家重点实验室临近空间应用中心, 北京 100190;

2.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;

3.北京师范大学, 北京 100875

4.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076

近年来, 高超声速飞行器技术的快速发展对临近空间大气环境的感知、建模和应用提出了更高的要求。

在临近空间高超声速飞行技术的发展方面也面临着诸多实际的困难, 主要在于航空航天领域与空间环境领域之间的交叉, 导致环境与飞行器相互作用方面的问题缺乏深入研究, 量化关系还不明确或不可靠。本研究基于 TIMED/SABER 2002 年至 2018 年大气密度观测数据, 统计分析了 20~-80 km 大气密度波动对

高超声速飞行器飞行热环境的影响。根据驻点热流估算方法给出的大气密度变化量与热流变化量之间的关系,定性和定量分析了不同月份大气密度相对美国标准大气的变化量引起的热流变化量在垂直和水平方向的分布特征。研究表明,1) SABER 大气密度月均值计算的热流相对 USSA76 在夏季半球中高纬度地区偏高,在冬季半球偏低。在夏季半球高纬度地区约 80 km 附近存在热流增量的极大值,南半球夏季的极大值高于北半球夏季,尤其在南半球 1 月份,热流偏高可达 32.2%。在经度方向,热流分布在夏季半球差异较小,冬季半球差异较大;2)考虑真实大气中存在的扰动时,在南半球和北半球夏季 80 km 附近, SABER 大气密度预测的热流分别比标准大气偏高可达 40.7%和 36.6%。在经度方向,大气扰动引起的热流经向分布差异显著。在飞行器设计时,大气扰动的影响不能忽略;3)高超声速飞行器飞行应避免在夏季穿越南半球和北半球,规避热流增加带来的风险。

关键词: 临近空间; 大气扰动; 影响效应

NO.64

磁尾等离子体注入与卫星充放电事件联合探测数据分析

王斌

63921 部队

介绍北斗卫星上搭载的等离子体探测载荷,以及该载荷探测到的部分磁层亚暴事件及磁尾等离子体注入事件,分析此类事件和电离层闪烁以及卫星充放电事件之间的关联性,以及此类数据在北斗稳定运行系统以及空间天气事件预警系统的应用情况。

NO.65

空间充放电诱发典型星用电路异常的实验研究

陈睿^{1,2}, 袁润杰^{1,2}, 韩建伟^{1,2}, 梁亚楠¹, 陈钱¹, 王璇^{1,2}

1.(中国科学院国家空间科学中心, 太阳活动与空间天气国家重点实验室北京 100190)

2.(中国科学院大学 北京 100049)

国内外大量的航天工程实践发现,空间带电粒子导致的充放电效应始终是空

间环境诱发卫星故障的主要方式之一，且宏观影响与单粒子故障极易混淆，均主要为星用电路产生数据或逻辑状态跳变、工作模式非受控切换、逻辑运行或执行操作等故障，如欧洲 TELECOM2 系列通信卫星、美国的 SNPP 卫星等。遗憾的是，截至目前，相对于较成熟的单粒子效应损伤理论，长期以来国际上主要关注充放电环境、充电理论、和地面模拟试验方法等中上游充放电问题，但是针对下游放电脉冲如何影响关键器件和电路，又如何诱发异常的机理研究明显不足且缺乏深度，导致航天电子设备充放电效应影响的故障诊断、试验评估和防护设计方法存在漏洞，致使大量的航天工程应用中将充放电效应诱发的故障简单归结为单粒子效应，但是改进设计后的产品依然故障不断，这种局面对数量较多、遭受充放电辐射威胁严重的中高轨航天器造成重大隐患。本文以典型星用存储电路、线性电路、电源电路和模数转换电路为例，利用中科院空间中心自主建立的空间充放电效应模拟实验装置，国内率先实验研究揭示了空间充放电效应诱发电路故障的表现特征、与电路被作用方式及途径的关系及机理、与干扰源特性的关联性及其机理三方面的基本规律、综合特征及作用机制，其研究成果为卫星空间充放电效应试验、防护设计技术的进步提供有力的理论和基础数据支撑。

关键词：空间充放电效应；星用电路故障；实验研究

NO.66

轨道参数对空间粒子影响及 KF01A 星实例分析

吴优，孔林，韦树波，张雷，陈茂胜

长光卫星技术股份有限公司， 长春 130000;

为研究轨道参数对空间粒子影响，对轨道倾角和轨道高度进行仿真分析。结果表明范艾伦带电子、太阳质子积分通量在 70° 倾角达到最大，范艾伦带质子在 40° 倾角高能段积分通量最大，LET 积分通量曲线随着轨道倾角增大而增大。范艾伦带电子、太阳质子积分通量随轨道高度增大而增大，范艾伦带质子在 10000 km 轨道上积分通量最大。高能段 ($>300 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$) 相差不大。通过对 KF01A 星实例分析，范艾伦带质子主要集中在南大西洋区域，银河宇宙射线产生的离子能量最大可达 20 GeV，但积分通量较低。当离子能量大于 100 MeV 时， 1 g/cm^2 屏蔽材料失效。铝材剂量深度曲线表明，当铝材厚度从 0 增长到 4.5 mm 过程中，

对总剂量屏蔽效果较为明显,当进一步增大铝材厚度时,需要平衡屏蔽效果和增加质量的代价。

关键词: 电子积分通量; 质子积分通量; 离子积分通量; LET 能谱; 剂量-深度

NO.67

基于张衡一号高能粒子数据的太阳质子事件观测及质子对 MeV 电子污染评估

张振霞¹, 王璐^{1,2}, 泽仁志玛¹, 申旭辉¹

1.应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

2.中国科学院大学 应急管理科学与工程学院, 北京 100043;

电磁监测试验卫星张衡一号于 2018 年 2 月发射入轨, 卫星上搭载的高能粒子探测器 (HEPP), 可以提供高分辨率的地球辐射带质子、电子观测数据; 同时, HEPP 还可以监测太阳活动期间耀斑产生的 X 射线辐射 (Li et al., 2019)。HEPP 为研究空间天气、地震等灾害事件提供了良好的数据基础。太阳活动会对空间环境造成剧烈的影响, 包括太阳耀斑、质子事件、日冕物质抛射等。联合 POES 卫星和 GOES 卫星的同期观测数据, 我们报告了卫星在轨期间, 几次伴随着耀斑的太阳质子事件, 并分析了事件的形成机制 (Wang et al., 2022)。HEPP 对质子和电子的鉴别效率均达到 90% 以上, 但污染和识别错误还是不能完全避免的, 对于载荷数据质量的检查和评估有助于数据的科学使用。利用太阳质子事件期间的观测数据, 我们评估了质子对 MeV 电子的污染水平, 结果表明质子错误识别的百分比不超过 0.22%, 质子污染仅占 L=4 处电子总数的 10%。这说明, HEPP 可以提供高精度的可靠观测数据, 符合设计预期 (Zhang et al., 2022)。

太阳爆发向空间抛射大量的物质和能量, 通常以增强的电磁辐射、高能带电粒子流和高速等离子体云的形式表现出来。三种能量形式到达地球的时间不同, 第一波是增强的电磁辐射, 以光速运行, 约 8 分钟到达地球; 第二波是高能带电粒子流, 以亚光速运行, 约几十分钟到达地球; 第三波是高速等离子体云, 会在爆发后几天到达地球空间。这三轮攻击会造成磁层、电离层和高层大气环境的剧

烈扰动，引发一系列空间天气灾害事件。基于张衡一号卫星的观测，我们报告了卫星在轨期间三个典型的空间天气事件，分别是：2020年11月29日，一个伴随着M4.4级耀斑的缓变型太阳质子事件；2021年5月28日，一个C9.4级耀斑带来了一次脉冲型太阳质子事件；2021年10月28日起，多次剧烈的太阳活动引起了地磁暴和太阳质子事件（Wang et al., 2022）。

载荷数据质量评估和检查也是一项重要的工作，我们介绍了HEPP载荷的仪器参数和粒子识别方法。通过与GOES卫星和POES卫星的观测结果进行比较，我们验证了HEPP载荷的数据具有充分的可靠性。利用太阳质子事件期间的数据，我们提出了一种评估了质子对MeV电子的污染水平的方法。首先，我们假设质子质子和电子相互污染的能量范围是邻近的，例如，对8-9MeV电子的污染大多来自于8-9MeV的质子。其次，我们假设在太阳质子事件发生期间，太阳活动几乎没有直接引起电子的增强，所有的增加电子完全来自于质子污染，通过验证GOES卫星的数据，在太阳质子事件期间，并没有发现MeV电子的显著增强。因此，可以认为HEPP在质子事件期间观测到的MeV电子完全来自于质子污染。最后，我们还假设这种错误识别在的发生概率在L值4到9的壳层是基本一致的。最终结果表明，质子错误识别的百分比不超过0.22%，质子污染仅占L=4处电子总数的10%，验证了HEPP的数据可靠性（Zhang et al., 2022）。

关键词：张衡一号卫星；太阳质子事件；空间环境；

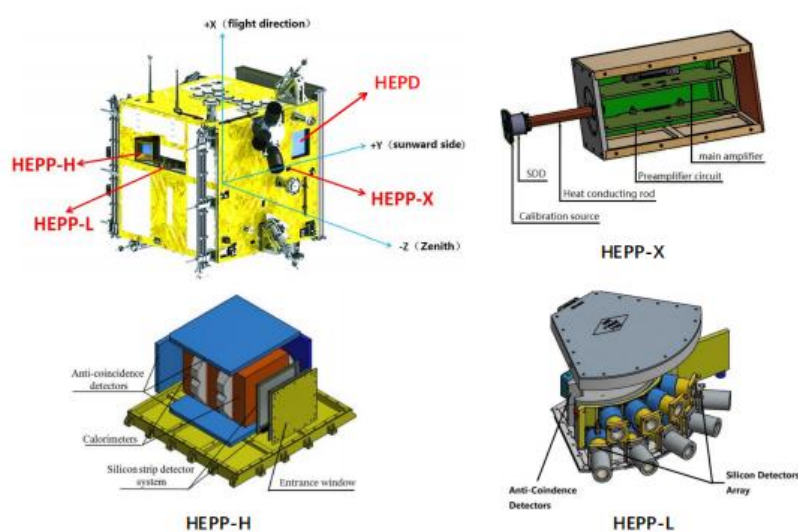


图1 张衡一号卫星 HEPP 载荷 (Li et al., 2019)

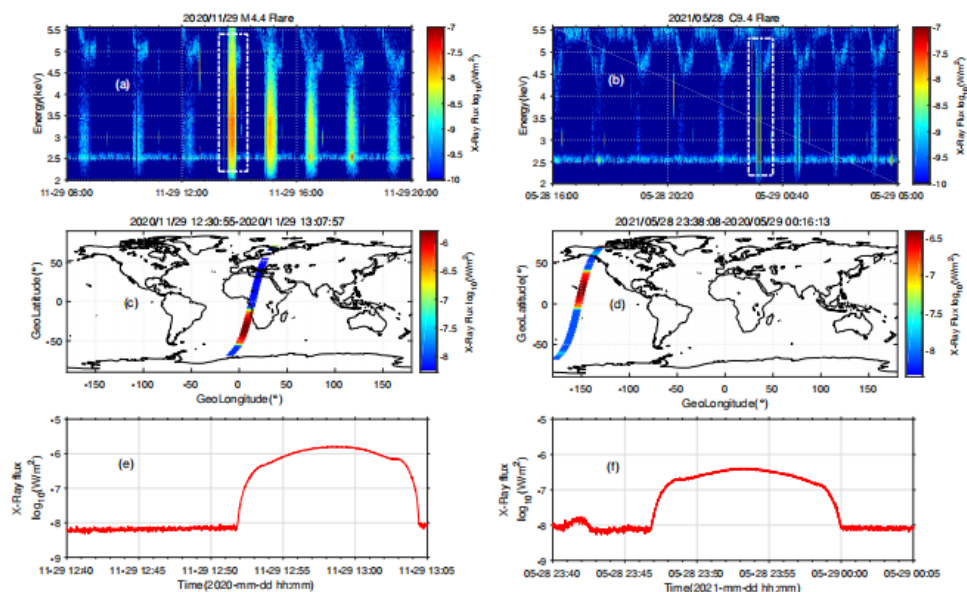


图2 张衡一号观测的两次耀斑，左侧为2020年11月29日的M4.4级耀斑，右侧为2021年5月28日的C9.4级耀斑（Wang et al., 2022）

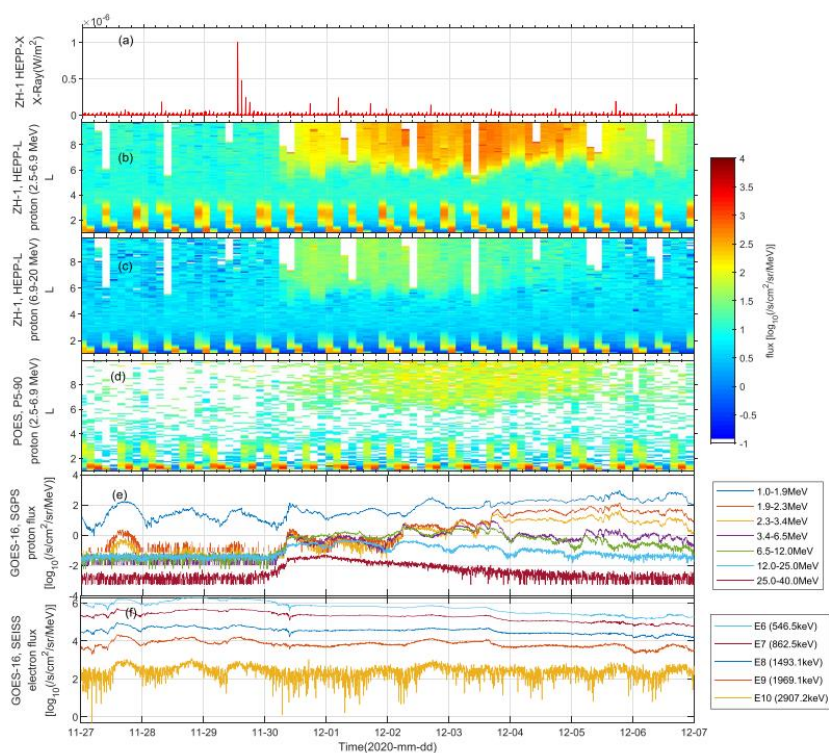


图3 2020年11月27日至2020年12月10日发生的太阳质子事件期间，ZH-1、GOES、POES的观测结果（Zhang et al., 2022）

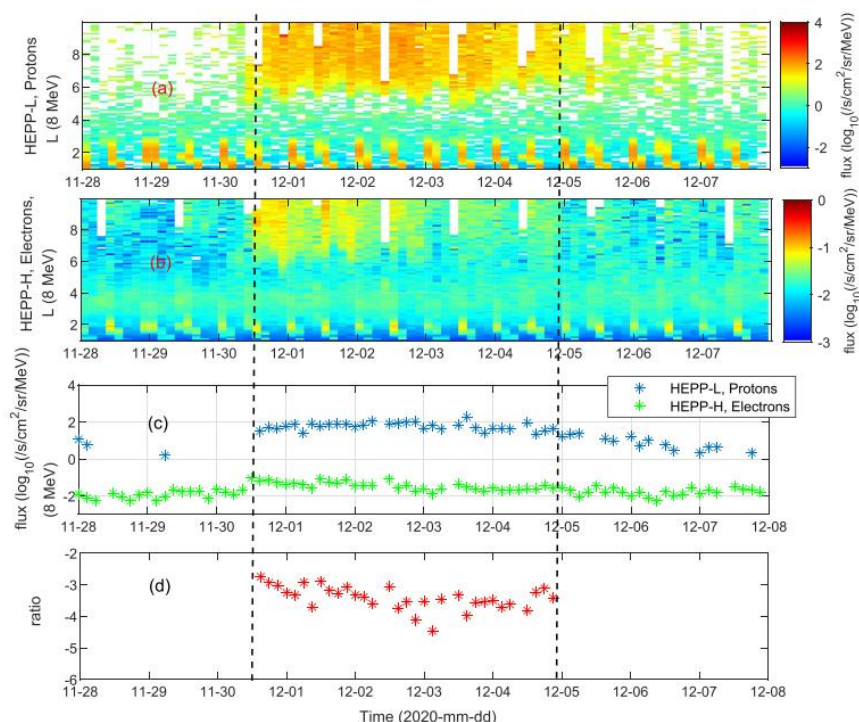


图4 张衡一号 HEPP 载荷 8-9MeV 的质子和电子通量以及电子错误识别的比例
(Zhang et al., 2022)

参考文献(References)

- [1]Li, X. Q., Xu, Y. B., Liang, X. H., et al. (2019). The high-energy particle package onboard cses. *Radiation Detection Technology and Methods*. 3, 22 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41605-019-0101-7>
- [2]Wang, L., Zhang, Z. X., Shen, X. H., et al. (2022). Effects of solar proton events associated with X-ray flares on near-earth electron and proton fluxes based on ZH-1 satellite observations, *Frontiers in Earth Science*.10:895561. doi: 10.3389/feart.2022.895561
- [3]Zhang, Z., Li, X., Wang, L., Zhima, Z., Shen, X., Yuan, S., et al. (2022). Evaluation of the proton contamination to MeV electrons by solar proton events based on CSES observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030550. <https://doi.org/10.1029/2022JA030550>

NO.68

无人机载干涉成像全系统模拟试验与分析

胡雅斯¹, 邓丽¹, 段然¹

1.中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

超长波波段的电波波长为十米到几百米,如果要在超长波波段对宇宙射电信号实现高分辨率成像,天线口径通常需要达到波长数百倍乃至数千倍以上,传统的单天线方法不再适用。月球背面是在日地空间中开展超长波观测的最佳地点。空间分布式被动微波干涉成像技术的主要思想是利用分布式卫星星座,在深空实现超大的干涉测量基线替代大口径天线,实现对宇宙射电源的高分辨率成像。为促进方案优化,需在卫星在轨部署前开展充分的地面试验,对空间分布式干涉测量系统的关键技术进行验证。基于无人机机载干涉阵列外场试验平台,通过无人机搭载有效载荷,模拟多星绕月自主编队飞行,无人机搭载的载荷之间要进行通信,则需要各自携带的天线能对准。在飞行过程中,无人机姿态受风力影响,为保证在飞行试验过程中,天线能始终对准,通信正常。本文提出天线指向对准分析的算法,在开展实地飞行试验前,用模拟器模拟风力,测试获取无人机姿态数据,开展风力对全系统试验的通信对准偏差分析,为现场实地飞行试验提供决策依据。

关键词:干涉;无人机;机载;对准

NO.69

超强太阳风暴引起的低纬度地区电网 GIC 建模和风险评估

张佼佼^{1,2}, 於益群³, 陈婉清^{4,5}, 王赤^{1,2}, 刘颖^{1,2}, 刘春明⁴, 刘连光⁴

1.中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气实验室, 北京

2.中国科学院大学, 北京

3.北京航空航天大学, 北京

4.华北电力大学, 北京

5 国家电网杭州余杭供电公司, 杭州

GIC 会对高压输电网,油气管道,高铁等地面长距离导电设备的安全运行造

成威胁。电网中的 GIC 会引起变压器过热，励磁和无功损耗增加，威胁电网的安全运行，严重时甚至引起变压器损毁和电网瘫痪，造成巨大的经济和社会损失，如，1989 年的加拿大魁北克大停电事故就是太阳风暴引起电网瘫痪最典型的事例。一般认为，高纬地区由于地磁扰动剧烈，电网受 GIC 侵害的风险较高。但近些年来随着科学技术的不断发展，电网规模、负荷日益增加，中低纬度地区电网受到 GIC 影响的报道日益增多。但是，超强太阳风暴侵袭地球时，中低纬度地球电网的 GIC 到底会有多强？造成的后果将有多严重？这些地区是否需要投入力量进行电网防护？这些都是悬而未决的问题。另一方面，我国地处中低纬度地区，目前已经建成了世界上电压等级最高、传输距离最长、负荷最高的输电网络，极端空间天气条件下，这些电网中 GIC 的预测和模拟研究对保障电网在极端空间天气条件下的安全运行具有重要意义。

该研究建立了基于全球三维 MHD 模型的中低纬度地区电网 GIC 计算模型，利用该模型我们模拟研究了一次卡林顿级别超强太阳风暴（2012 年 7 月 23 日太阳风暴事件）侵袭地球时，我国广东 500 kV 电网的 GIC 变化情况，进而对 GIC 引起的电网风险情况进行了评估。研究表明，一旦该超强太阳风暴袭击地球，广东电网 54 个电网节点中产生的 GIC 最强将超过 300 A，这是该电网目前为止已监测到过的最强 GIC 的 3 倍多，幅度与 1989 年魁北克电网事故中 GIC 的幅度相当。如果电网不采取任何保护措施，GIC 引起的电网瘫痪风险将非常大。研究强调对中低纬度地区电网 GIC 的监测，预报，防护的必要性。研究建立的电网 GIC 预测模型可以实现对太阳风-磁层-电离层-地磁扰动-电网 GIC 作用过程的全链条展示，在未来电网规划，电网 GIC 预测、预警及风险评估，减灾防灾等方面具有潜在的应用价值。

NO.70

空间环境与数字电力系统及其信息物理安全

赵俊华
香港中文大学

本专题将探讨人工智能在空间环境预报中的应用。随着人工智能技术的不断发展，其在空间环境预报领域中的应用也逐渐得到了广泛关注。通过机器学习算

法等人工智能技术,可以对大量的空间环境数据进行分析和处理,并对未来的空间环境进行预测,为卫星、飞船等空间活动的安全和稳定提供更加精准的预报和预警。

本专题将重点介绍人工智能在空间环境预报中的应用现状和未来发展趋势。我们将讨论如何通过人工智能技术实现空间环境预测的自动化和智能化,以及如何解决人工智能在空间环境预报中面临的挑战和局限性。

此外,我们还将探讨如何加强数据共享和开放,建立多学科交叉的研究平台,推进人工智能与空间科学、大气科学等领域的融合和协作。通过这些努力,我们可以进一步推动人工智能空间环境预报技术的发展,为空间活动的安全和稳定做出更大的贡献。

本次交流旨在促进学术交流和合作,推动人工智能技术在空间环境预报领域的应用和发展,期待能共同探讨和分享研究成果和心得,共同推动人工智能技术在空间科学领域的应用和发展。

NO.71

基于张衡一号卫星高能粒子观测的空间环境应用研究

张振霞^{1*}, 李新乔², 申旭辉¹, 泽仁志玛¹, 楚伟¹, 王璐³

1.应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

2.高能物理研究所, 中科院

3.中科院大学

作者信箱: zxzhang2018@163.com

我国张衡一号卫星搭载了高能粒子探测器,在国内外同类探测器中的几何因子最高,可以以更高的探测效率观测地球辐射带以及南大西洋异常区的较大能量范围的高能电子和质子,拥有高能量分辨率、粒子鉴别效率和较高投掷角分辨率。该卫星还搭载了 X 射线监测器,所以还可以观测耀斑期间的 X 射线及其引发的太阳质子事件。给研究空间天气等自然灾害事件研究提供了非常好的机会。

磁暴期间,相对论电子(MeV 能量)在槽区(L=3)发生通量显著增强,由哨声波加速导致。

基于 ZH-1 和 Van Allen Probes 卫星观测(图 1, 2),磁暴发生时,电离层层

顶被压缩到了接近 $L=2.5$ 附近, 振幅 81-126 nT 的合声波也被观测到出现在这么底的磁壳层附近。利用弹跳平均的准线磁暴发生时, 电离层层顶被压缩到了接近 $L\sim 2.5$ 附近, 振幅 81-126 nT 的合声波也被观测到出现在这么底的磁壳层附近。性扩散方程的扩散系数分布和二维数值模拟, 我们发现, 回旋共振扩散系数在较小投掷角 (20-50 度) 具有较大的投掷角扩散和动量扩散分布。另外, 相空间分布函数在 $L^*=3-4$ 出现了显著的峰值。所以, 我们认为, 合声波加速是引起极低磁壳层相对论电子通量的潜在因素。

磁暴期间, 30-600keV 电子在内辐射带 ($L<2$) 的通量增强了 2-3 倍, 主要由磁声波共振加速。

而且增强电子对应的投掷角范围在 50-80 度, 且形成了 butterfly 形状的投掷角分布。经过准线性波粒相互作用理论及其数值模拟发现, 我们认为磁暴期间在内辐射带出现的几百 keV 电子的通量增强主要是由磁声波的加速起主要作用。这一机制以前曾被提出过, 但是没有被直接验证。据我们所知, 我们应该是第一次给出了直接的观测证据。

磁暴发生前后, 30-100MeV 质子在辐射带的外边界发生了丢失现象, 由磁场线弯曲散射导致。

这一现象验证了以前提出的观点: 当磁力线曲率半径与粒子的回旋半径接近时, 就会发生粒子的散射 (即失捕获), 见图 3。

太阳耀斑期间, 张衡一号卫星能够检测到 X 射线及其引发的太阳质子事件。结合 GOES 卫星的观测, 我们对近三年以来的太阳耀斑进行了详细分析, 研究了太阳质子事件和 X 射线观测的到达时间差别及其峰值之间的关系, 以及太阳质子能量和到达时间之间的关系等。并利用该太阳质子事件, 对 MeV 电子探测的质子污染进行了评估, 发现质子污染水平均在 10% 以下, 高能粒子探测器对 MeV 电子通量的观测数据可靠。见图 4。

张衡一号卫星对地基 VLF 电磁发射信号及其引起的高能粒子沉降也进行了观测研究。与 DEMETER、POES、Van Allen Probes 卫星观测结果吻合。但是利用张衡星的观测优势, 可以观测更宽投掷角的粒子沉降效应。见图 5

我们利用该高能粒子探测数据和电磁场数据, 研究了 2022 年 1 月份汤加火山爆发期间观测到的电磁场扰动和高能粒子通量增强现象。见图 6。

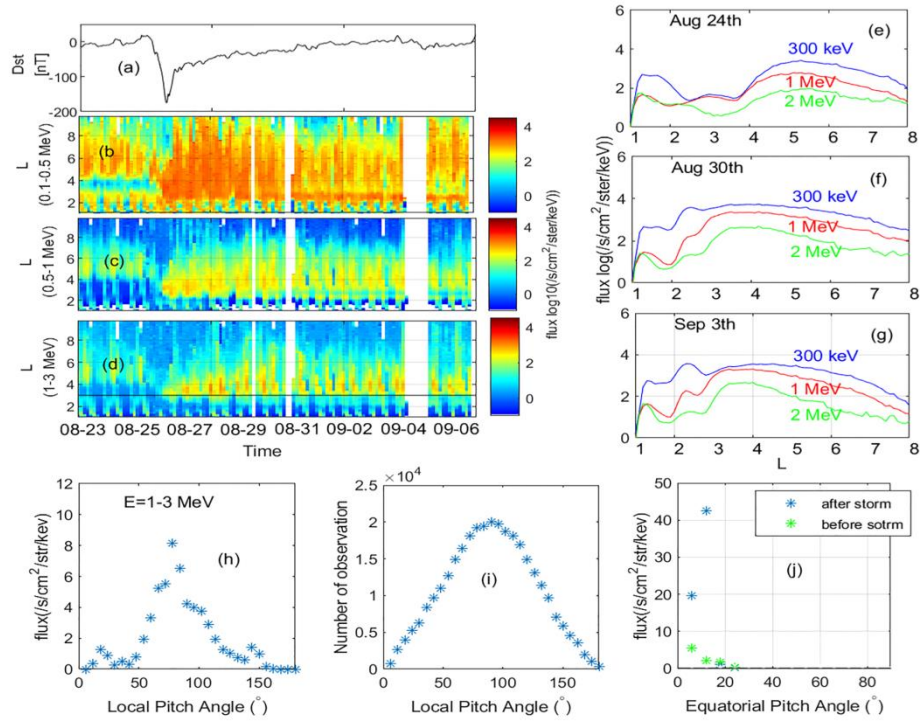


图 1.张衡一号卫星观测的 2018 年 8 月磁暴期间高能电子增强 (Zhang Z. X. et al., 2020, GRL)。

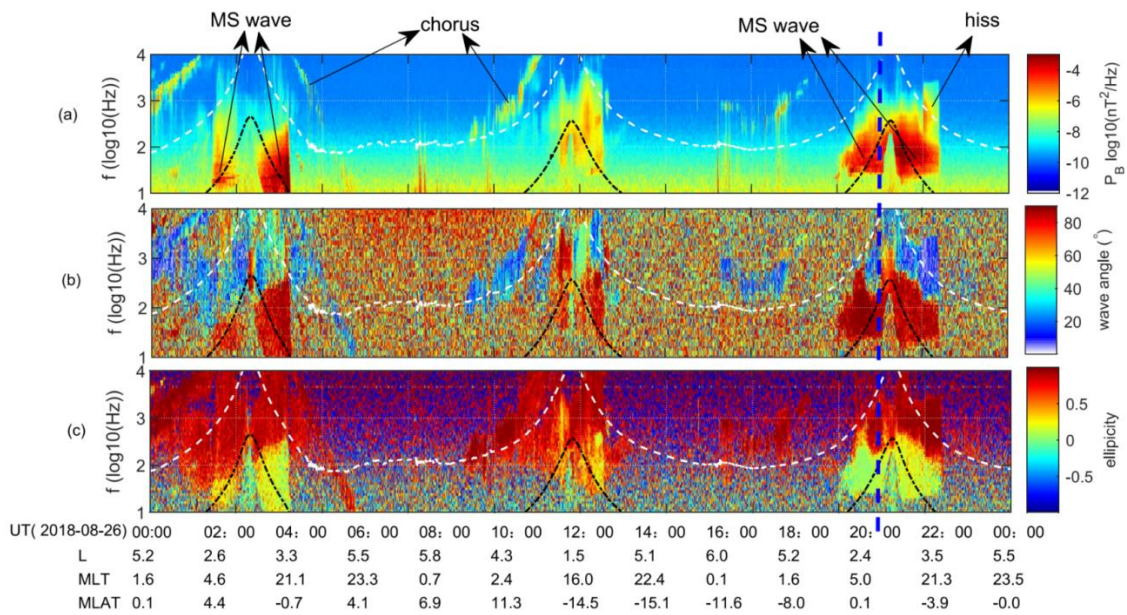


图 2.Van Allen Probes 卫星观测的 2018 年 8 月磁暴期间电磁波激发 (Zhang Z. X. et al., 2021, JGR)。

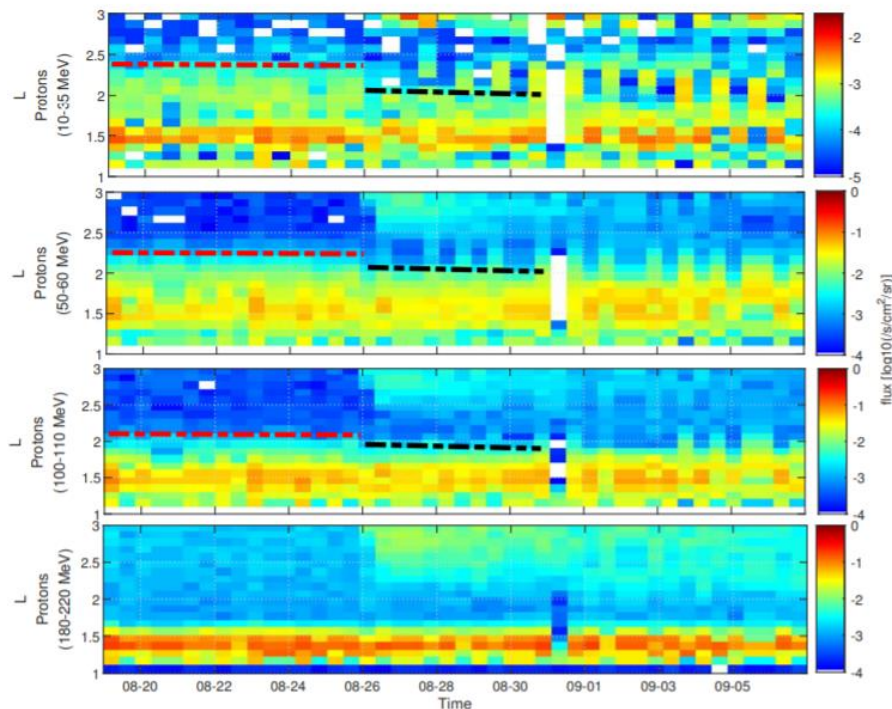


图 3. 张衡一号卫星观测的磁暴发生前后, 30-100MeV 质子在辐射带的外边界发生了丢失现象 (Zhang Zhen-xia et al., 2021, CPB)。

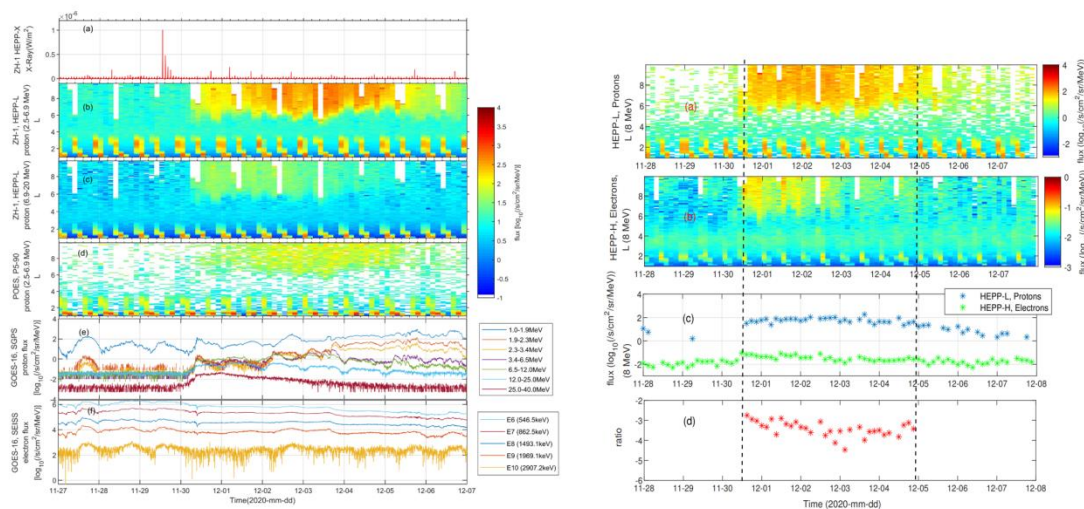


图 4. 左图: ZH-1、POES、GOES 卫星对 2020 年 11 月 X 级耀斑和太阳质子事件的观测。右图: 利用该太阳质子事件, 对 MeV 电子探测的质子污染进行了评估, 发现质子污染水平均在 10% 以下, 高能粒子探测器对 MeV 电子通量的观测数据可靠。(Zhang Z. X, et al., 2022, JGR)

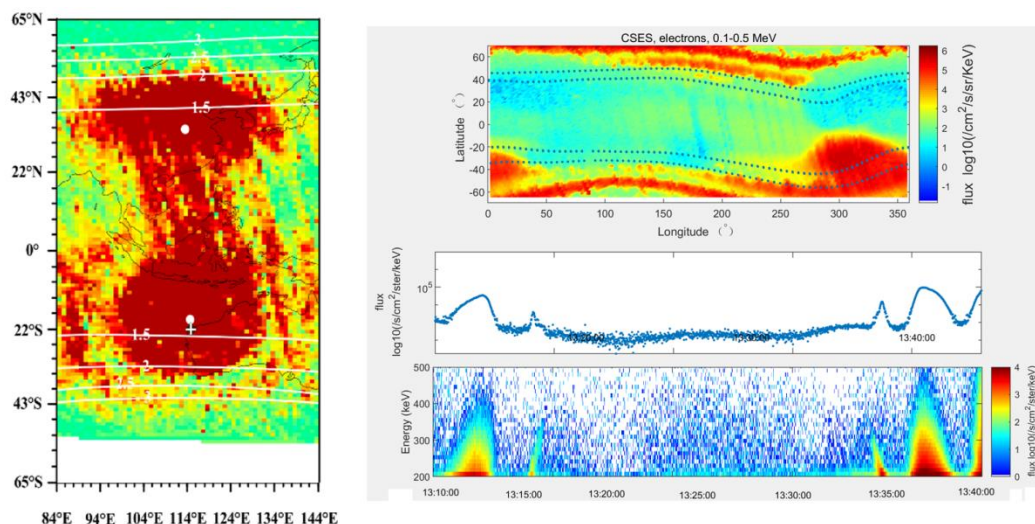


图5. 张衡一号卫星对NWC地基VLF信号在电离层中的信号及其沉降粒子观测。

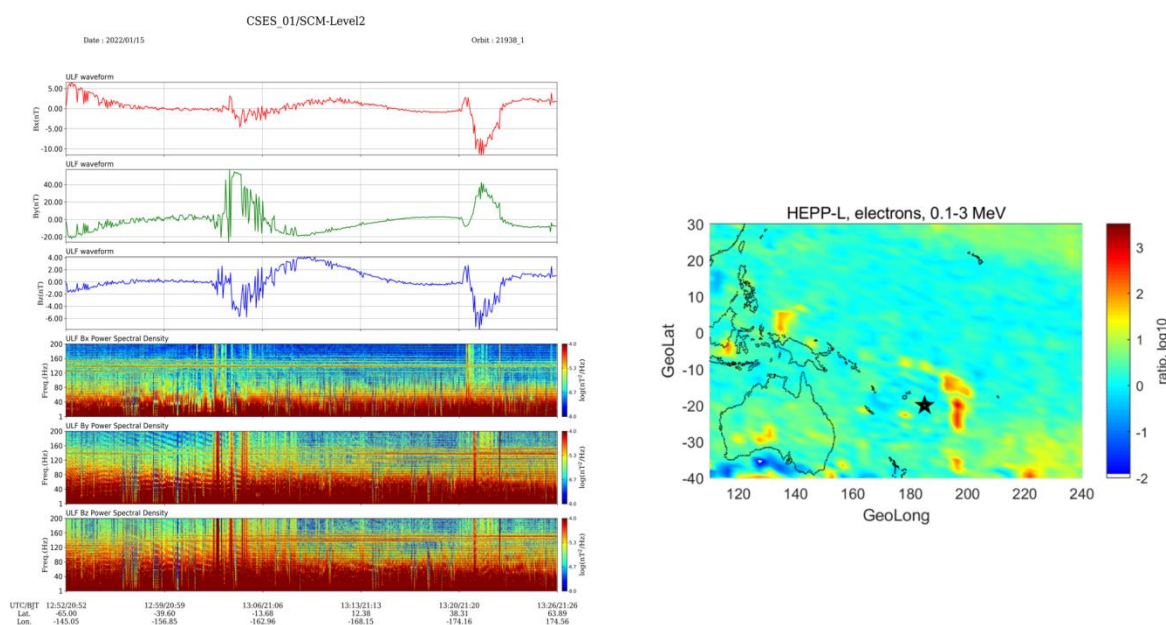


图6. 利用ZH-1号高能粒子探测数据和电磁场数据，观测到2022年1月份汤加火山爆发期间观测到的电磁场扰动和高能粒子通量增强现象。

发表论文:

(1) Zhang, Z., Li, X., Wang, L., Zhima, Z., Shen, X., Yuan, S., et al. (2022). Evaluation of the proton contamination to MeV electrons by solar proton events based on CSES observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030550, <https://doi.org/10.1029/2022JA030550>

(2) Zhang, Z., Xiang, Z., Wang, Y., Ni, B., & Li, X. (2021). Electron acceleration by magnetosonic waves in the deep inner belt ($L = 1.5-2$) region during

geomagnetic storm of August 2018. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029797. <https://doi.org/10.1029/2021JA029797>

(3) Zhang Zhenxia, et al. (2021), Numerical simulation of chorus-driving acceleration of relativistic electrons at extremely low L-shell during geomagnetic storms, *Chin. Phys. B* 30(10), 109401

(4) Zhang Zhenxia, Shen Xuhui et al., (2021), Proton loss of inner radiation belt during geomagnetic storm of 2018 based on CSES satellite observation, *Chin. Phys. B*, 30, 12: 129401

(5) Zhang Zhenxia, et al. (2020), Chorus acceleration of relativistic electrons in extremely low L-shell during geomagnetic storm of August 2018. *Geophysical Research Letters*, 47, 2019GL086226

(6) Zhang Zhenxia. (2018), Observed Propagation Route of VLF Transmitter Signals in the Magnetosphere, *Journal of Geophysical Research - Space Physics*, 23, (7) , 5528-5537

(7) Wang L, Zhang Z*, Shen X, Li X, Liang X, Zhima Z, Chu W, Guo F, Zhou N, Chen H and Wei D (2022) Effects of Solar Proton Events Associated With X-Ray Flares on Near-Earth Electron and Proton Fluxes Based on ZH-1 Satellite Observations. *Front. Earth Sci.* 10:895561.

作者信箱: zxzhang2018@163.com

NO.72

空间碎片激光移除技术

杨孟婕 1,2,李同 1,2,张景豪 1,2,赵思思 1,2,郑国宪 1,2,沈振民 1,2,王子豪 1,2,郑永超 1,2

1.北京空间机电研究所, 北京, 100094;

2.中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室, 北京, 100094

空间碎片是空间环境的主要污染源,近年来由于人类活动产生的空间碎片显著增多,已严重威胁到航天器的在轨安全。针对以上问题,最有效且一劳永逸的方法是针对空间碎片实施主动清除。本文阐述了关系激光碎片清除技术路线的空间碎片目标特性探测与测量重点研究内容,分析梳理了国内外空间碎片移除技术

发展,给出了激光碎片清除阶段性任务及关键技术。

关键词:空间碎片,主动移除,激光移除

NO.73

磁层空间环境模拟平台实验过程预研初步进展

何向磊、毛傲华*、杨光、王晓钢、魏修熠

哈尔滨工业大学空间环境与物质科学研究院、物理学院,黑龙江哈尔滨 150001

*Email: aohuamao@hit.edu.cn

哈尔滨工业大学正在建设一个新的国家重大科技基础设施的磁层空间环境实验平台装置:空间等离子体环境模拟研究系统(SPERF),并计划今年开始科学实验研究,现已启动实验过程预研,主要包括:三维非对称磁重联实验模拟(AREX),辐射带偶极场波-粒子物理过程实验模拟(DREX),磁尾等离子体过程实验模拟(TREX)的数值与理论分析研究。

AREX实验主要模拟研究与空间磁层和行星际等离子体相互作用所对应的非对称重联动力学过程。通过改变装置的等离子体位形,可以得到一系列与地球磁层相关的非对称三维磁重联过程,包括实验模拟不同行星际条件下的磁重联过程。DREX实验主要模拟研究合声波激发及扫频性质和带电粒子加速机制。通过改变背景等离子体各向异性参数激发不同性质的合声波谱。TREX实验主要模拟研究快驱动磁重联及磁尾高速流及偶极化锋面的传播性质等。我们将报告对这些实验过程进行数值模拟预研的最新结果。

关键词:AREX-3D, SPERF,三维磁重联,地球磁层,磁重联地面实验,

致谢:空间与实验室等离子体中的磁重联:计算机模拟与唯象模型(4221101267)

NO.74

高温流场环境下平装探针理论和实验研究

余鹏程¹,刘宇^{1,2},雷久侯^{1,2}

1.中国科学技术大学地球与空间科学学院,中国科学院地球空间环境重点实验室,合肥;

2.中国科学院比较行星学卓越研究中心,合肥

针对临近空间再入等离子体黑障鞘套和我国未来实施的火星着陆探测任务需求,突破传统朗缪尔探针电极裸露绝缘的构型问题,研制新型曲面共形式平装探针诊断技术。在传统朗缪尔探针理论的基础上,针对平装探针的内在特殊位形造成的鞘层扩张效应和外在场下的等离子体碰撞效应和高流速干扰,发展平装探针数据理论计算模型;并在静态科大空间等离子体实验装置和动态电弧风洞中完成平装探针的性能测试、数据采集和实验验证,结果表明,平装探针修正后的数据与其它探测设备进行比对,误差很小且具有很好的一致性。最终服务航天等离子体鞘套探测重大需求。

关键词: 流场; 等离子体; 平装探针

NO.75

基于 DFPA 的计算成像技术及其空间目标探测应用研究

张丽莎, 薛芳, 刘彦丽

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

近年来,各国航天活动日益频繁,随之而来空间目标的数量和种类不断增加,严重影响卫星安全,因此,对空间目标进行探测各国空间态势感知的重要研究内容。计算成像技术成为近年来目标探测技术的研究热点,在多维度信息感知、三维成像、逆光探测等领域应用日益广泛。结合 DFPA 器件,将计算成像技术应用于空间目标探测、长积分时间稳定成像、空间目标交汇快速成像、快照式光谱成像等方向。基于 DFPA 的新型红外计算光谱成像系统,集成了计算光学与数字化焦平面技术,在系统内实现了任务导向的可编程敏感谱段中心和带宽,在不牺牲时间-空间分辨率的基础上获取光谱信息,实现时-空-谱多维信息的协同感知。该系统克服传统光谱仪探测效率低、无法快照获取空间-光谱立方体信息、编码混叠重构速度慢、光谱信息冗余高利用率低等难题,适用于空间目标时-空-谱特性数据库的在轨实时更新、目标特征光谱信息的快速获取,可大幅提升对空间目标的探测识别能力。

关键词: 像素级数字化探测器; 时空谱协同成像; 空间目标; 计算成像

NO.76

极区电离层-磁层耦合及其空间天气效应研究进展

张清和^{1,2}, 邢赞扬¹, 王勇¹, 马羽璋¹, 王翔宇¹, 张端¹等

1.山东大学 空间科学研究院, 威海 264209;

2.中科院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100190

报告聚焦极区电离层-磁层耦合及其空间天气效应研究, 系统总结了报告人所在团队的相关研究进展, 主要包括:1) 在极地高层大气中发现伴有超强能量注入的新现象——“太空台风”, 揭示了其形成机理, 指出其为日地能量传输新途径, 更新了对太阳风-磁层耦合的认识; 2) 厘清了不同行星际磁场条件(IMF)下极区电离层等离子体云块的形成机理和演化特征, 完整观测实证了不同IMF条件下磁层大尺度对流循环(Dungey循环)过程, 获取了太阳风-磁层能量耦合特征时间等, 提升了对该循环的系统认知; 3) 探明了一类具有强闪烁的热等离子体云块, 指出传统闪烁指数算法易受对流影响而在极区不适用, 提出了克服该局限的替代方法, 为极区电离层新闪烁指数的提出与电离层闪烁建模预报奠定了基础; 4) 依据不均匀体研究、探测与建模一手高时空分辨率原位观测数据的需求, 研发了适用于微小卫星的小型化电离层等离子体探测载荷, 将为极区空间环境精细化探测、研究与建模及预报提供自主数据。

关键词:极区电离层-磁层耦合, 太空台风, 等离子体云块, 电离层闪烁, 等离子体探测

NO.77

全球磁层磁流体力学数值模式在空间天气的应用

郭孝城¹, 乐嘉文, 王宇贤, 习心悦, 王赤

1.中国科学院国家空间科学中心 空间天气国家重点实验室, 北京 100190;

2.中国科学院大学 空间和天文学院, 北京 100049

源于太阳表面的太阳风向外传播, 接近地球时与地球磁场相互作用形成磁层。在太阳风作用下, 磁层内部发生各类复杂的物理现象进而影响地球附近的空间环境, 引起空间天气的变化。从因果链来看, 通过上游太阳风条件的变化就能对磁

层内部的空间环境进行预报,由于电离层对内磁层具有一定反馈,所以理论上通过物理建模太阳风与磁层-电离层的相互作用就能够得到空间环境的数值预报。随着计算机计算能力的提高,从上世纪90年代开始对地球磁层的全球磁流体力学数值模拟已经逐渐成熟,并与其他区域空间物理模式结合组成空间天气预报框架,开始进入空间天气预报的业务领域;如BAT-R-US全球磁层模式已经被美国国家海洋大气管理局(NOAA)采用作为空间天气数值预报的模式,提供地磁活动和磁层全景提前0.5-1小时的数值预报。这里我们将基于已发展的具有自主知识产权的全球磁层磁流体数值模型,完善和发展相应的空间天气数值预报模式;在L1点太阳风条件的输入下,我们将尝试对磁层近地空间环境的变化进行数值预报,并与观测进行对比分析。

关键词:磁层;磁流体力学;数值模拟;空间天气预报

NO.78

电离层-高层大气理论模式研究进展

任志鹏^{1,2,3,4}

1 中国科学院地质与地球物理研究所地球与行星物理重点实验室 北京市/朝阳区 100029

2 中国科学院地质与地球物理研究所北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京市/朝阳区 100029

3 中国科学院地球科学研究院 北京市/朝阳区 100029

4 中国科学院大学地球与行星科学学院 北京市/怀柔区 100049

地球电离层-中高层大气作为大气圈与空间环境的过渡区,是大气科学和空间科学的交叉研究领域。电离层-中高层大气理论模式及其数值模拟可以突破实验观测的限制,又能够比理论分析更为全面细致地重现电离层与中高层大气的各种物理和化学过程,在电离层于中高层大气的研究中表现出独特的优势,并可以服务于电离层-中高层大气研究数值预报等空间天气应用。中国科学院地质与地球物理研究所在电离层-中高层大气理论模式领域进行了持续的探索,先后开发了系列的地球电离层和中高层大气理论模式,本文对主要对GCITEM-IGGCAS电离层热层耦合模式情况及其近期发展做了介绍。

NO.79

NCAR-TIEGCM 上边界高度扩展 (TIEGCM-X)蔡毅徽¹, 乐新安¹, 王文斌²

1.中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理院重点实验室, 北京 100029

2.High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

传统的电离层-热层系统通用数值模式的上边界高度太低, 这极大地限制了其对顶部电离层/热层的研究。在这项研究中, 我们将美国国家大气研究中心热层-电离层-电动力学通用环流模式 (NCAR-TIEGCM) 成功地向上扩展了四个标高, 根据太阳活动其上边界高度从 400-600 公里扩展至 700-1200 公里, 命名为 TIEGCM-X。TIEGCM-X 模拟的顶部电离层和热层与从顶部测高仪和卫星拖曳数据得出的电离层/热层的观测结果非常吻合。此外, TIEGCM-X 模拟的中性密度、温度和电子密度在形态上与扩展前的 NCAR-TIEGCM 模拟结果差别不大。由 TIEGCM-X 模拟的赤道电离异常 (EIA) 的纬度-高度分布更加合理。在磁暴事件中, TIEGCM-X 的热层响应与 NCAR-TIEGCM 相似。然而, 在一些中低纬地区, TIEGCM-X 模拟的电离层磁暴效应比 NCAR-TIEGCM 的更强, 甚至是相反的, 因为 TIEGCM-X 包含更多的封闭磁场线。DMSPP 的观测结果证明, TIEGCM-X 的电离层磁暴效应更加合理。经过充分验证的 TIEGCM-X 在电离层/热层研究中具有重要的潜在应用, 如对磁暴的响应、低纬度动力学和数据同化等。

关键词: NCAR-TIEGCM; 高度扩展; EIA; 磁暴; 顶部电离层/热层

NO.80

基于多源观测的电离层建模与应用

甄卫民, 欧明, 陈龙江, 张宇航

中国电波传播研究所, 青岛 266107

近年来, 随着天地基无线电探测网络的日渐完善, 全球形成了更加完善的电离层立体观测系统, 各类电离层观测资料正日渐丰富, 有力促进了电离层特征参量模型构建及现报、预报等领域的发展。在天地基电离层海量探测数据的基础之上, 中国电波传播研究所 (CRIRP) 利用机器学习算法, 在电离层 foF2 和 hmF2 参量建

模和参数估计方面取得了积极的研究进展；同时，利用 IGS 地基 GNSS 和全球电离层无线电探测网(Global Ionospheric Radio Observatory, GIRO)的实时数据，在云计算平台上构建完成了一个近实时的全球电离层数据同化和预报系统。系统目前能够实现全球电离层 TEC 和电子密度的现报和预报，数据产品的经度、纬度和高度方向空间分辨率为 $5^{\circ} \times 2.5^{\circ} \times \sim 25\text{km}$ ，时间分辨率为 1 小时，该系统的建立可为空间物理研究及相关无线电系统应用提供数据支撑。

关键词：电离层、大数据、机器学习、数据同化

NO.81

电离层 F 区演化型带状不规则体观测研究

孟兴, 翁利斌, 牛俊, 汪四成

国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410073

一般情况下，赤道扩展 F (ESF) 不规则体在电离层 F 区底部生成，且在雷达回波的距离-时间-强度 (range-time-intensity, RTI) 图中表现为高度范围超过 50 千米的羽毛状结构。通过利用位于中国低纬地区的富克和三亚甚高频雷达，在日落发生时的 F 区中观测到了演化型带状不规则体结构。一个有趣的现象是这种带状结构在 400 千米以上的较高高度处生成，然后上升到更高的高度且没有纬向漂移。带状结构存在的时间小于 25 分钟，这在富克甚高频雷达每一个波束观测回波的距离-时间-强度图中是一致的。电离层 F 区中带状不规则体结构的多普勒速度比较大，但是谱宽很窄。在带状结构出现的过程中，还观测到了明显的幅度闪烁 ($S4 > 0.2$)，TEC 快速波动 ($ROTI > 1.0$) 和区域型扩展 F 现象。这说明在顶部电离层中生成的带状不规则体结构与赤道等离子体泡 (EPBs) 有关联。在等离子体泡上边界发生的交换不稳定过程可能是顶部电离层中演化型带状不规则体结构生成的机制。

关键词：赤道扩展 F；顶部电离层；带状回波；交换不稳定

NO.82

基于 COSMIC 掩星观测的偶发 E 层临界频率经验模型

牛俊

国防科技大学气象海洋学院

电离层偶发 E 层是电离层 E 区高度(~90-120km)范围出现的高电子密度的不规则体,盛行于夏季半球的中纬度地区,针对偶发 E 层的建模对导航定位、短波信道建模等具有重要意义。由于缺乏大量全球尺度的偶发 E 层强度观测,限制了对偶发 E 层强度的全球建模。近年来的研究表明,无线电掩星观测可用于偶发 E 层强度的反演。本文利用 2007-2012 年 COSMIC 无线电掩星数据,构建了偶发 E 层临界频率的中低纬度经验模型。模型结果与 16 个不同纬度站的电离层测高仪观测结果吻合较好。总体而言,该模式对偶发 E 层强度的气候变化特征具有较好的模拟能力,模拟结果较观测而言偏高约 0.23MHz。此外,本文还分析了模型输出的偶发 E 层强度时空变化特征,与已知的偶发 E 层特征具有较好的一致性。但是,该经验模型目前可能只适用于气候态的偶发 E 层研究,进一步的改进方法在后续研究中开展。

NO.83

基于 C86 异构超算平台暨 RHPIC-LBM 的太阳耀斑-CME 过程 GeV**能级高能粒子空间天气灾害研究**朱伯靖^{1,2,3,4} 李燕^{1,2} 王武⁵ 颜辉⁶ 马志阔^{1,2,3}

1.中国科学院云南天文台,昆明,650216

2.中国科学院天文大科学研究中心,北京,1000123

3.中国科学院大学,北京,100049

4.空间天气学国家重点实验室,北京,1000190

5.中国科学院计算机网络信息中心,北京,10083

6.中山大学国家超算中心广州中心天河 2 号,广州,510006

现有卫星光谱观测数据表明:太阳活动中的耀斑-CME 现象是产生 GeV 能级极端高能粒子最主要原因之一,这些极端高能粒子随太阳风在行星际空间传播,会对行星际空间电磁环境产生重大影响,是造成空间灾害天气的最重要原因,不

但会对在轨飞行器安全产生严重影响,甚至还会对包括电力设施在内的地面电磁环境产生灾难性破坏。

我国以深空探测为代表的空天研究领域中,为保障在轨飞行器电磁环境安全,亟需一套高能粒子自主预警系统来服务于空间天气灾害预报,近年来随着空间探索领域的快速发展,这种需求也变得日趋迫切;但迄今为止,以 NASA 为代表国际相关机构虽已有较为成熟基于观测数据太阳风暴预警系统(NASA Prediction Model),但专门针对高能粒子空间电磁环境预警系统仍是空白。

作为典型天文地学和计算机科学交叉问题的极端高能粒子预警系统,其研发涉及到理论研究(耀斑-CME 中 GeV 高能粒子成分、起源、加速机制)、观测研究(不同成分、不同丰度、不同同位素多粒子共同作用)、数值研究(高性能超算软硬件平台、高效算法)等多领域研究,需要开展基础前沿多学科交叉、多学科优势(数理科学-太阳物理、地球科学-空间物理、计算机科学等)互补的实质性研究才能实现和完成。

本系列研究工作在具有自主知识产权的统计力学框架下等离子体统计物理科学新方法(同时描述等离子体宏观流动、微观粒子、磁场与带电流/粒子耦合属性; RHPIC-LBM) 暨 C86 异构超算平台上,针对耀斑环湍流演化区开展不同丰度、多成分、不同同位素和不同电离度粒子起源和加速机制方面研究;开展自主知识产权的预警系,提供 GeV 高能粒子实时预报,为我国深空探测提供高能粒子预警服务。

本文中,以中国科学院东升一号(CPU-GPU)异构平台暨国家超算中心天河 2 号平台为计算平台,在满足 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)条件下,开展耀斑环硬 x 射线、g-射线产生区,微观运动学尺度粒子运动湍流与电磁场湍流相互作用到宏观动力学尺度等离子体带电流体(电子流体、质子流体)湍流与电磁场湍流相互作用连续耦合尺度动力学和运动学耦合,粒子加速过程中的粒子轨迹、电磁场拓扑结构、粒子加速能量精细数值实验研究:

1.几何精细:模拟区空间尺度 10Mm 量级,空间分辨率要至少达到特征尺度的量级(离子特征尺度下在 80m 量级,电子特征尺度下在 0.1m 量级);研究区域时间尺度在小时量级,时间分辨率至少达到特征时间尺度量级(离子特征时间尺度在 0.1s 量级,电子特征时间尺度在 0.0001s 量级);

2.物理精细: 研究问题在动力学尺度、运动学尺度所遵循和满足的基本物理控制方程不同;

通过分析湍流引起的粒子间相互作用和粒子与运动的电磁场相互作用自洽耦合物理过程(湍流引起的粒子间相互作用过程中, 粒子运动会使电磁场有变化, 会引起电磁场变化; 变化电磁场会对粒子运动有影响, 电磁场变化会引起粒子运动变化)中的湍流演化会使粒子与电磁场的相互作用出现非线性过程和共振现象, 理清连续耦合尺度电子和质子运动湍流与磁场湍流自洽相互作用耦合连续尺度物理中的运动粒子方向与电磁场的方向(是平行于磁场, 还是垂直于磁场), 获得 GeV 能级高能粒子产生的证据, 从数值实验角度证实考虑共振的粒子-波相互作用湍流加速机制是一种与现有电场加速、费米加速(一类及二类; 激波加速, 也称不考虑粒子波相互左右的湍流加速)完全不同的独立加速机制。得到质子、电子多组分同位素加速机制与太阳耀斑-CME 事件定量关系, 为 GeV 高能粒子空间天气灾害事件预警提供了“起源”方面解释; 研究结果为后续研究的自主知识产权的空间天气高能粒子实时预警服务提供了理论支持和基础。

关键词:太阳耀斑-CME 过程 GeV 能级高能粒子产生机制; GeV 能级高能粒子空间天气灾害; 统计力学框架下等离子体统计物理科学新方法; 东升一号暨天河 2 号超算平台!

NO.84

电子回旋谐波精细结构的观测与统计

刘斯^{1,2}, 陈雅丹¹, 杨奇武¹, 肖伏良^{1,2}

1.长沙理工大学 物理与电子科学学院, 长沙 410114;

2.长沙理工大学 空间等离子体物理研究所, 长沙 410114

电子回旋谐波(ECH)是地球磁层中一种非常常见的波动, 通常为电子回旋频率整数倍之间的静电波动。 现有研究认为 ECH 波能够造成几个电子伏特的电子沉降, 导致弥散极光。我们检查了 2012 年 10 月 1 日到 2016 年 12 月 31 日的范艾伦探测器数据, 发现 ECH 波也会出现与合声波类似的上升调和下降调精细结构, 且持续时间也与合声波分立结构可比。统计结构表明, ECH 扫频结构几乎都出现在第一带, 且与合声波不同的是 90%以上为下降调。增长率计算表明,

电子损失锥分布的变化，能够改变所激发的 ECH 波中心频率。这种扫频结构的形成也可能反映了在 ECH 激发中的非线性过程。因为 ECH 频率的变化，则与之共振的最小电子能量也将改变，从而影响空间 ECH 波与电子的共振过程，本文为进一步理解 ECH 在地球空间中的激发以及如何影响空间电子环境提供了观测支持。

NO.85

逃逸层温度建模方法对比

杨旭^{1,3}, 朱小谦¹, 雷久侯², 翁利斌¹, 阮海炳⁴

1.国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410000;

2.中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

3.宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043;

4.南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210000

本文利用 MSIS 经验模式以及 CHAMP 和 GRACE 卫星反演的热层大气密度数据，得到了卫星轨道上对应的逃逸层温度结果。在此基础上，借助 TIEGCM 和 MSIS 模式得到的逃逸层温度的前 5 阶基模态，利用主成分分析和多项式回归预测方法分别构建了 TIEGCM-Exospheric Temperature Model (TIEGCM-ETM) 和 MSIS-ETM。另外，利用一种稀疏数据的主成分分析方法同样对逃逸层温度进行分解，并构建了 ETM。三种模型的基模态能够较好反映出热层的昼夜变化、季节变化、纬度变化等规律，而且重构的模型都能够较好重现热层大气密度变化。通过在 SWARM-C 和 GRACE-Follow-On (GRACE-FO) 上独立检验以上三种模型的预测精度，发现采用新的逃逸层温度模型相比于 MSIS 固有的逃逸层温度模型有了极大提高，利用三种模型得到的大气密度预测值均方根差均不超过 23%，而 MSIS 的结果超过 57%，相比之下提升了 2 倍以上。

关键词：逃逸层温度；主成分分析；多项式回归；MSIS；TIEGCM

NO.86

地球低中纬电离层的条状隆起结构

万欣

中山大学

在2017年9月8日至9日地磁暴期间,利用多达6颗低轨卫星的就位观测,还原了一种位于低中纬地区的共轭条状隆起结构,这一结构位于SED的基底但显著与中纬SED羽状结构和低纬EIA分离。以隆起结构峰区附近的的锐度为标准,这些隆起结构事件可进一步分为锐型和钝型。这些隆起与先前报道的等离子体密度肩形结构既有相似之处,也有不同之处,极大的丰富了对磁暴期间中低纬电离层的理解。对于隆起结构的发生特征和可能的机制总结如下:

a) 条状隆起为SED基底内部的精细结构,该结构与SED羽状结构分离。

b) 条状隆起的纬向范围在经度上可能达到 150° ,经向范围在纬度上仅在 1° 至 5° 之间变化(120~600 km),这表明前人研究总结的电离层肩形结构(例如Tsurutani et al., 2004)可能只是带状隆起的经向切片观测。

c) 对于某个半球而言,两三个分立的隆起会以簇的形式在中低纬聚集。然而,这一簇状分布并不总是共轭的。由于隆起结构并无对应的磁场信号,这显示出其与其他已知电离层结构的巨大差异。

d) 两种类型的隆起结构显示出明显磁偏角控制下的经度依赖性,在整体上,隆起结构倾向于发生在磁偏角向东的区域,在此区域,西向中性风将对赤道向等离子体流产生更强贡献,并进一步增强了赤道向等离子体堆积效应。

e) 钝型隆起主要出现在午后日落附近,持续时间不到4小时,而尖锐隆起则在所有可观测的地方时均有出现,持续时间超过24小时。

f) 隆起结构的的主要离子组成是较轻的 H^+/He^+ ,而不是 O^+ ,隆起结构所处的不变纬度和L值呈下降趋势,与等离子体层顶的向地收缩类似,但隆起结构所处磁力线的L值显著低于等离子体层顶的L值。

a) 隆起结构的诸多发生特征表明,等离子体层离子下沉(沿场线或跨场线)和扰动中性风可能是主要原因。

而在2021年11月3日至6日的地磁暴事件期间,网格化TEC地图首次记录了北美地区条状隆起的完整演化过程。通过采用来自Swarm A、B、DMSP F16、F17、F18和ICON的卫星观测,研究展示了与条状隆起结构有关的一些重要发

现。主要研究成果总结如下：

a) 五颗低轨卫星持续性的检测到隆起结构事件，持续时间从 11 月 4 日 07:00UT 至 11 月 6 日 20:00UT，对应地磁暴的主相和恢复相阶段，覆盖范围包括了太平洋-美洲-大西洋板块。

b) TEC 地图记录了 11 月 4 日和 11 月 5 日夜间条形凸起特征的出现过程。11 月 4 日，大尺度 TEC 斑块状结构不断缩小，使其逐渐演化为条状隆起结构。11 月 5 日，ICON 的离子成分数据证实了条状隆起的持续性，即：尽管 TEC 地图未能持续性检测到隆起结构，但这并不意味着隆起结构的消亡。对 TEC 观测而言，随着低纬 TEC 的衰退和高纬 TEC 的保持，条状隆起得以在 TEC 地图中更清晰的显现。

c) 中纬度等离子体带状结构的收缩/变窄（条状隆起的形成）是由于扰动赤道中性风驱动的场向离子输运增强所致。换言之，条状隆起中纬度等离子体带状结构的磁暴期形态。

d) 赤道和低纬地区并未出现增强的喷泉效应，所以其与条状隆起的形成无关。

e) 条状隆起的维持可能与其 H⁺主导性有关，即通过电荷交换反应产生的化学损失可能被来自等离子体层的持续性离子注入所补偿。

NO.87

太阳辐射指数构建及预测研究

钟秋珍^{1,2} 苗娟^{1,2} 陈光明^{3,4}

1. 太阳活动与空间天气国家重点实验室，中国科学院国家空间科学中心，北京 100190

2. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室，北京 100190

3. 北京航天飞行控制中心，北京 100094

4. 航天飞行动力学技术重点实验室，北京 100094

S10、M10、Y10 等太阳辐射指数代表不同波段太阳电磁辐射对地球高层大气的加热，是目前 JB2008 等新型大气密度模型的输入参数，以有效提升太阳输入地球高层大气的能量的参数化能力。目前我国无法获取实时的太阳辐射指数，无法将新型大气密度模型实时应用于大气密度预测、定轨、轨道预报等飞行控制任务中。利用太阳 X-ray、EUV、FUV、MUV 等不同波段的太阳辐射流量数据，

分析与不同太阳辐射指数以及热层大气密度变化之间的关系,通过函数拟合构建太阳辐射指数 S10、M10、Y10 指数的反演模型,可准实时计算 S10、M10、Y10 等太阳辐射指数,采用经验统计等方法开展短期预报研究,并分析太阳辐射指数反演和预报的误差。

关键词 太阳辐射指数; JB2008

NO.88

基于 MSIS 和 TIEGCM 模型对磁暴期间热层大气密度的模拟研究

岳超, 刘晓佳

西安航天宏图信息技术有限公司

热层大气密度是空间大气环境的重要参数,与低轨飞行器所受的大气阻力密切相关。对大气密度做出精确预报,才能提高飞行器轨道预报的精确度。本研究基于大气经验模型 MSIS2.0 和三维全球电离层-热层耦合物理模型 TIEGCM2.0,对历史严重磁暴、大磁暴和小磁暴时期的热层大气密度进行模拟,并分析了模拟结果与 CHAMP 卫星反演观测的差异。选取严重磁暴时期为 2003 年 11 月 19 日至 22 日,最大 A_p 值超过 140;大磁暴时期为 2006 年 11 月 26 日至 24 日,最大 A_p 值超过 90;小磁暴时期为 2008 年 3 月 21 日至 4 月 13 日,最大 A_p 值超过 30。模拟结果表明:1)在整个模拟时间段内,两种模型的模拟结果均比 CHAMP 反演结果高,其中 TIEGCM2.0 高出 30%,MSIS2.0 高出 25%。2)在 TIEGCM2.0 的模拟实验中,采用不同的空间分辨率并未对模拟结果产生显著差异。3)在磁暴发生期间,MSIS2.0 的模拟结果显著低于 TIEGCM2.0 模拟值和 CHAMP 观测值,导致其与观测值的均方根误差和相关系数均低于 TIEGCM2.0。以上结果表明,经验模型和物理模型对磁暴期间热层大气密度响应存在较大差异。

关键词:热层大气密度, TIEGCM, MSIS, 磁暴

NO.89

汤加火山爆发引起的电离层震荡研究

张佼佼

中国科学院国家空间科学中心

2022年1月15日04:15 UT 太平洋岛国汤加王国境内洪阿哈阿帕伊海底火山(20.546S, 175.390W)发生猛烈喷发,火山爆发引发的海啸席卷太平洋地区。同时,火山喷发也引起了强烈的电离层波动反应。利用相干散射雷达和数字测高仪探测到此次火山爆发引起的北半球两组特征明显不同的电离层震荡。第一组电离层震荡比引起海啸的大气压力波提前3个多小时被观测到。研究发现,第一组电离层震荡的源区在火山爆发的北半球共轭点,火山爆发产生的电场通过磁力线共轭作用被迅速传递到北半球共轭点并造成北半球电离层震荡。在这一阶段,亚洲扇区高频雷达探测到最大的电离层震荡多普勒速度超过100m/s,发生在电离层F区。探测到的第二组电离层震荡源区在火山爆发处,主要由火山爆发产生的大气压力波直接传播到北半球,通过大气中性成分与电离成分相互碰撞引起,这一阶段最大电离层震荡多普勒速度超过150m/s,发生在电离层E区,电离层震荡速度随高度升高而减弱。通过高频雷达与数字测高仪联合观测还发现火山爆发引起的电离层垂直高度最大抬升约100公里,电离层最大垂直运动速度超过60m/s。

NO.90

汤加火山爆发引发的电离层行进式扰动观测

丁锋^{1,2,3}, 李肖霖^{1,2,3}, 乐新安^{1,2,3}, 毛田⁴, 熊波⁵, 宋茜⁴

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

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院,北京 100049;

3.北京空间环境国家野外科学观测研究站,北京 100029;

4. 中国气象局国家卫星气象中心,北京 100081;

5. 华北电力大学数理系,保定 071003

本文利用中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)提供的中国区域密集GNSS-TEC (Total electron content, TEC)观测数据,对2022年1月15

日由汤加火山爆发引发的电离层行进式扰动(Traveling Ionospheric Disturbances, TIDs)在中国区域的二维精细结构进行了观测研究, 并通过与该扰动在其他地区观测的比较, 分析了此次火山爆发事件引发的扰动的长距离传播机制。观测结果表明, 在中国发现了由火山爆发引发的两种不同尺度的 TID, 其中一种速度约为 361m/s, 振幅约 1.3TECU, 周期约 38min; 另一种速度为~264m/s, 振幅约 0.6TECU, 周期约 20min。这两种扰动的速度与重力波 L0 和 L1 模的模拟结果一致, 是重力波 L0 和 L1 模波能向上泄漏传播到电离层高度引发的。相比于 L0 模, L1 模的幅值相对较弱, 通常可以忽略不计。此次火山爆发释放了巨大能量, 重力波 L1 模振幅增强使得该波模引发的扰动能够在电离层中被探测到。

关键词:电离层; GNSS; 电离层行进式扰动

NO.91

中国区域纬度梯度特性研究

杨雨嫣

中国科学院地质与地球物理研究所

以往对电离层空间结构的研究主要是定性的分析, 很少从定量的角度来研究这些特征。在此次工作中, 我们利用 GNSS TEC 观测数据研究了中国扇区 10°-50° N 的纬度梯度特征。研究结果显示纬度梯度在 EIA 峰值两侧以及 45°-50° N 纬度带较为显著, 梯度数值的主要范围为-6~4 TECu/degree。研究分析了 2018 年 10 月 27 日到 2022 年 7 月 31 日时段的 TEC 数据集以探究此区域纬度梯度的地方时、季节以及太阳辐射依赖性。分析结果显示 EIA 峰值两侧区域的纬度梯度在白天时段较大, 表现出分季大于至季的半年变化分量及冬季大于夏季的年变化分量, 并且有随太阳活动增强的强依赖性。而在 45°-50° N 处, 纬度梯度则在夜晚时段更加明显, 表现出至季强于分季的半年变化分量及秋季大于春季的年变化分量, 并且在太阳活动较低的时期更为显著。

NO.92

平流层准两年振荡中断期间重力波和行星波的活动特征分析

何阳¹, 朱小谦¹, 盛峥¹

1.国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073

热带平流层纬向风场由于东西风相位的交替下降而具有准两年振荡(QBO)的周期性规律,是气候预测的重要参照。热带平流层风场的准两年振荡在2015/2016年以及2019/2020年的北半球冬季发生了中断(分别写作15/16D和19/20D),这对其可预测性带来了挑战并引发了广泛的关注。我们利用西太平洋地区六个站点上空2013年-2018年的无线电探空仪观测对对流层(2-14km)和低平流层(18-28km)的惯性重力波(IGW)的活动特征进行了统计分析。结果表明,对流层的惯性重力波具有更加广泛的频率分布,上传波和下传波数量接近,东向传播和西向传播的波也没有明显偏向性;在平流层,由于背景风场的滤波效应,惯性重力波更集中于东向传播的低频波,波源在对流层。对流层重力波活动具有明显的年际变化特征,冬季最强,雨季最弱,平流层重力波活动在准两年振荡相位转换期间有所增强,对应强烈的东向风切变。在2015/2016准两年振荡中断期间,对流层波源激发更加强烈的惯性重力波向上传播,达到平流层后,具有较慢相速度的波由于低于平均流而被吸收,在平流层低层耗散动量,产生额外增强的西向强迫,进一步促进西风QBO相位中东风相位的发展。基于MLS卫星数据,我们探究了2015/16以及2019/20中断事件背后来自中纬度的行星波活动特征,发现导致赤道地区纬向风场逆转的行星波贡献均源自赤道向传播的强烈的波包,并伴随着向西移动。强烈波包出现的时间和2016年的主要最终增温(major final warming)、2019年小型爆发性增温(minor SSWs)的时间相吻合,显示出两者之间的联系性。

关键词:准两年振荡;平流层;重力波;行星波

NO.93

Verification of the Swarm dual-spacecraft field-aligned current and radial current estimates at low and middle latitudes

Fengjue Wang¹, Hermann Lühr², Chao Xiong^{1,3}, Yunliang Zhou¹

1. Department of Space Physics, School of Electronic Information, Wuhan University, 430072 Wuhan, China.

2. GFZ German Research Centre for Geosciences, Section 2.3, Geomagnetism,

Telegrafenberg, 14473 Potsdam, Germany.

3. Hubei LuoJia Laboratory, 430079 Wuhan, China.

Ionospheric currents have widely been investigated by using magnetic measurements from low-Earth orbiting (LEO) satellites. However, the assumptions of deriving currents from the magnetic measurements have not always been well considered. In this study we performed a detailed analysis of the ionospheric radial current (IRC) and inter-hemispheric field-aligned current (IHFAC) estimates at equatorial and low latitudes derived from the single-satellite and dual-spacecraft (dual-SC) approaches of ESA's Swarm constellation. We found for most of the cases, the IRCs and IHFACs derived from both approaches show consistent latitudinal profiles. However, there are several cases with discrepancy exceeding 5 nA/m² between two approaches. On average, the diurnal variations of IHFACs from both approaches agree well with each other for all seasons. But the amplitudes of single-satellite results reach only about 70% of those from the dual-SC. This difference is attributed to the fact that only the magnetic field B_y component is utilized in the single-satellite approach, while both B_x and B_y components are considered in the dual-SC approach. Above the magnetic equator, the IRCs derived from single-satellite approach show clear tidal signatures, while such signature cannot be found in the IRCs from dual-SC approach. We interpret these tidal-signature of IRCs as spurious results, caused by equatorial electrojet contributions to the $[\Delta B]_y$ component. The dual-SC derived IRCs show notable differences between ascending and descending orbits. Such differences might be due to a violation of the assumed perfect calibration of Swarm A and C. We suggest a systematic spacecraft-fixed bias in the along-track magnetic field component (B_x) between Swarm A and C. By interpreting the IRC differences we obtain bias values of ΔB_x reaching 1 nT. Our results reveal that ionospheric currents are better characterized by the dual-SC approach. But comparison with single-satellite current estimates can help to identify weakness.

NO.94

银河宇宙线引发的空间粒子辐射环境模拟

罗熙¹, 宋小健¹, 霍然¹

山东高等技术研究院 济南

银河宇宙线是一类来自于银河系, 并且广泛存在于日球层中的高能带电粒子, 其引发的空间粒子辐射环境会严重影响航天活动。数值模型模拟空间粒子辐射环境经济且灵活, 是预报, 评价空间粒子辐射环境的重要手段。

在本研究中, 我们基于宇宙线传播方程开发了宇宙线粒子在日球层中的数值传播模型, 利用 PAMELA 卫星和国际空间站上 AMS-02 实验观测到的宇宙线能谱数据, 校正了数值模型中的参数进而模拟了 2006 年到 2017 年全日球层中电荷数小于 29 的银河宇宙线各成分能谱数据。最后借助 GEANT4 软件计算出了全日球层中人体所受的辐射剂量随时空的变化。

关键词:银河宇宙线; 空间粒子辐射; 数值模型

NO.95

闪电通道等离子体数值模拟

刘旭晖

武汉大学

The air inside the lightning channel can be almost completely ionized into the plasma because of the strong current and extremely high temperature. The process of electron density diffusion and disappearance around the core lightning channel is simulated to describe the distribution variation of the plasma in this study. The simulation is based on the ambipolar diffusion and electron-ion loss models, dividing the process and determining the parameters according to the physicochemical state of the electron-ion reactions. The species, proportions of the starting plasma ion, and the values of electron density, temperature, pressure, ambipolar diffusion coefficient, and electron-ion compound coefficient over time and space are discussed. Through the computer numerical simulation, the spatiotemporal distribution characteristics of the electron density in the lightning plasma are obtained. Based on it, the corresponding

curve between the frequency of the vertical incident electromagnetic wave and the corresponding reflective time of the lightning channel is further drawn. Some lightning detection results of the active radar also verify the rationality and accuracy of the simulation. The results of this study can be a meaningful scientific reference to explore the atmospheric effect of lightning. And in engineering practice, it can provide a useful foundation for the design of the active lightning detection radar.

NO.96

等离子体层嘶声对太阳风动压脉冲快速响应的统计研究

金字玥¹, 刘倪纲², 苏振鹏³, 肖伏良¹

1.长沙理工大学, 长沙, 413000

2.中山大学, 珠海, 510275

3.中国科学技术大学, 合肥, 230026

等离子体层嘶声被认为是控制地球外辐射带结构和演化的主要等离子体波动之一。近年来的研究工作表明, 太阳风动压变化可能是控制等离子体层嘶声演化的一个重要的因素。但是, 现有工作缺乏统计研究探索一般规律。本文基于磁层和太阳风观测数据, 统计了等离子体层嘶声对太阳风动压脉冲的快速响应特征。统计结果表明, 强正动压脉冲主要导致嘶声振幅增强, 强负动压脉冲总是导致嘶声振幅减弱, 而弱正、负动压脉冲偶尔导致嘶声振幅无明显变化。基于等离子体层嘶声的内源生成机制, 正(负)动压脉冲引发磁层收缩(膨胀), 绝热加速(减速)源区热电子, 进而影响等离子体层嘶声的增长过程并导致其快速增强(减弱); 基于外源机制, 正(负)动压脉冲触发合声的增强(减弱), 通过改变源区波动强度进一步影响等离子体层嘶声的演化。等离子体层嘶声对于太阳风动压脉冲的响应呈现磁地方时不对称性, 嘶声的瞬时减弱或消失(激发或增强)大多发生在向阳(背阳)侧。研究结果对于理解太阳风扰动对地球等离子体层嘶声的调控作用有着重要意义, 有助于辐射带环境预报模型的发展和完善。

关键词: 等离子体层嘶声; 太阳风动压脉冲; 波粒相互作用

NO.97

Relation Between Latitude-dependent Sunspot Data and Near-Earth Solar Wind Speed

焦琦融^{1,2} 刘文龙^{1,2} 曹晋滨^{1,2}

1.北京航空航天大学空间与环境学院, 北京 100101;

2.空间环境监测与信息处理工业和信息化部重点实验室, 北京 100101

太阳风是日地空间环境的重要组成部分,受太阳活动的影响随着太阳周期性变化。我们利用格兰杰因果关系检验方法和机器学习预测方法研究了纬度相关的太阳黑子数据对太阳风速的影响。研究表明,低纬度的太阳黑子数据对太阳风速影响较大,降低黑子数据的纬度范围,年平均太阳风速与太阳黑子数之间的时间延迟将减小。考虑到纬度和时间的影响,我们建立了一个机器学习模型来预测太阳风速。研究发现,该模型在输入不同纬度的太阳黑子数据以及在不同时间尺度上预测结果表现不同:太阳风速受到低纬度的太阳黑子的影响更强;太阳黑子数据对30天平均太阳风速预测结果的影响比日平均值更大。此外,在加入低于 7.2° 纬度太阳黑子数据后,太阳风速度日平均值和30天平均值的预测结果分别提了0.23%和12%。太阳风速度日平均值预测模型的最佳相关系数为0.787。

关键词:太阳黑子; 太阳风速度; 机器学习

NO.98

Unusual shrinkage and reshaping of Earth's magnetosphere under a strong northward interplanetary magnetic field

Xiang-Yu Wang^{1,2}, Qing-He Zhang^{1,*}, Chi Wang², Yong-Liang Zhang³, Bin-Bin Tang², Zan-Yang Xing¹, Kjellmar Oksavik^{4,8}, Larry R. Lyons⁵, Michael Lockwood⁶, Qiu-Gang Zong⁷, Jing Liu¹, Yu-Zhang Ma¹, and Yong Wang¹

1 Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai, Shandong 264209, China.

2 State Key Laboratory of Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.

3 The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, Maryland 20723, USA

4 Birkeland Centre for Space Science, Department of Physics and Technology, University of
Bergen, Bergen N-5020, Norway

5 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of California, Los Angeles, CA
90095, USA

6 Department of Meteorology, University of Reading, Reading RG6 6BB, UK

7 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, China

8 The University Centre in Svalbard, Longyearbyen N-9171, Norway

*To whom correspondence should be addressed. Email: zhangqinghe@sdu.edu.cn

The Earth's magnetosphere is the region of space where plasma behavior is dominated by the geomagnetic field. It has a long tail typically extending hundreds of Earth radii (RE) with plentiful open magnetic fluxes threading the magnetopause associated with magnetic reconnection and momentum transfer from the solar wind. The open-flux is greatly reduced when the interplanetary magnetic field points northward, but the extent of the magnetotail remains unknown. Here we report direct observations of an almost complete disappearance of the open-flux polar cap characterized by merging poleward edges of a conjugate horse-collar aurora (HCA) in both hemispheres' polar ionosphere. The conjugate HCA is generated by particle precipitation due to Kelvin-Helmholtz instability in the dawn and dusk cold dense plasma sheets (CDPS). These CDPS are consist of solar wind plasma captured by a continuous dual-lobe magnetic reconnections, which is further squeezed into the central magnetotail, resulting in a short "calabash-shaped" magnetotail.

NO.99

基于 Fortran 语言的地球辐射带数据同化模型

罗陶荣¹, 曹兴¹, 倪彬彬¹, 付松¹, 王晓宇¹

1.武汉大学电子信息学院, 武汉 430072

开发地球辐射带的数据同化模式, 实现对辐射带电子的演化过程快速而准确地重建, 对于空间天气预报具有重要意义。结合范阿伦卫星的辐射带电子观测数

据和辐射带三维扩散模型,采用卡尔曼滤波算法,我们自主开发了基于 Fortran 语言的辐射带电子三维数据同化模型(Data Assimilative Model of Outer Radiation belt Electrons, DAMORE)。本报告将首先介绍 DAMORE 模型的程序架构,并基于 DAMORE 模型重点研究 2018 年 8 月不同能量和投掷角的辐射带电子通量三维同化结果。结果表明,同化结果与观测数据吻合得很好,具有合理重构辐射带电子分布变化过程的良好能力。通过计算、比较不同能量和 L*处辐射带电子通量的观测值和同化结果之间的均方误差、平均绝对误差、平均误差和相关系数,进一步验证了基于 FORTRAN 语言的 DAMORE 同化模型的可行性和准确性。

关键词 辐射带电子; 范阿伦卫星; 三维数据同化; Fortran 语言

NO.100

基于 Cluster 卫星观测的超低频波的纬向统计研究

晏丽^{1,2}, 刘文龙^{1,2}, 张典钧^{1,2}, Theodore E. Sarris³, 涂蔚超⁴, 李忻璘³, 童鑫^{1,2}, 杜迎帅^{1,2}, 张钊^{1,2}, 王子羽^{1,2}, 曹晋滨^{1,2}

1. School of Space and Environment, Beihang University, Beijing, China.

2. Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing of MIIT, Beihang University, Beijing, China

3. Laboratory for Atmospheric & Space Physics, University of Colorado Boulder, Boulder, CO, USA.

4 Department of Physics and Astronomy, West Virginia University, Morgantown, WV, USA.

Pc5 波段的超低频波在磁层中普遍存在,且可以通过径向扩散加速电子。Cluster 卫星拥有极向的椭圆轨道,可以提供内磁层全地方时不同纬度的数据,帮助研究超低频波的纬向分布规律。我们利用 Cluster 卫星从 2001 年 4 月到 2019 年 12 月的近 19 年的磁场数据,计算了磁场 Pc5 波极向模、环向模和压缩模这三种模式的强度,得到了内磁层全地方时磁场 Pc5 波三种模式强度的纬向分布的统计结果。我们发现极向模和环向模的强度在磁赤道最小,且其强度随着纬度的增加而增加。而压缩模的强度在磁赤道最大,且其强度随着纬度的增加而减弱。此外,我们发现极向模和环向模在夜侧高纬地区强度最大,而压缩模在日侧和夜侧近磁赤道地区强度最大。且极向模和环向模在高纬地区也表现出很强的晨昏不对

称性,即晨侧的强度要强于昏侧。内磁层超低频波纬向分布规律的研究可以帮助我们进一步探究全球的径向扩散对加速外辐射带高能粒子的效率的影响,并帮助我们建立更准确的径向扩散模型和辐射带模型,以辅助空间天气的预报。

关键词: 超低频波, 径向分布, 辐射带, 粒子加速, Pc5

NO.101

LHAASO 及其空间环境预报性能研究

南云程¹, 陈松战¹, 冯存峰², 曹臻¹

1.中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049;

2.山东大学 前沿交叉科学青岛研究院, 青岛 266237

LHAASO 是宇宙线空气簇射探测的大型专用装置。用于 TeV-100PeV 宇宙线的测量,是全球性能最优的探测装置,包括原初成分鉴别能力、能量和方向测量精度。本工作介绍用~50 TeV 宇宙线被太阳遮挡的效应,精确测量行星际磁场,监测其日变化,并精确测量了与 OMNI 在 1AU 处测量结果之间的时间提前量,提供了对大型磁暴的预报可能性。进一步将瞄准 LHAASO 对具体磁暴事件的预报研究。

关键词: 高海拔宇宙线观测站(LHAASO); 宇宙线; 太阳阴影; 空间环境预报

NO.102

A New Concept to Measure the Ambipolar Electric Field Driving Ionospheric Outflow

Kun Li, Stein Haaland, and Yong Wei

Over the last few decades, the role of ionospheric outflow for the loss of atmospheric constituents, as a plasma supplier to the magnetosphere and hence for the evolution of the Earth's atmosphere has been recognized. A substantial amount of the outflow is

thought to be caused by the presence of an ambipolar electric field aligned with the open magnetic field lines of the polar region.

To better understand how the changes in outflow are influenced by the solar and geomagnetic activity, it is critical to get a better understanding of the impact of this electric field, and to be able to measure it under various conditions. However, such measurements are not possible with present techniques. In this paper, we propose a new technique to measure the tiny electric field. This technique builds on existing instrument technology but extends the capability to measure the very small electric fields. We present the underlying design concept and demonstrate that this concept is viable and able to measure the very small ambipolar electric fields thought to play a key role in the polar wind

NO.103

火星电离层夜间电子密度分布特性与拟合

葛春雨¹, 黄朝艳¹, 张宇¹, 禹旭敏²

1.南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 211100;

2.中国空间技术研究院 西安分院空间微波技术国家级重点实验室, 陕西 西安 710100

本文利用 MAVEN 卫星探测数据, 分析了太阳天顶角 (Solar Zenith Angle, SZA)、海拔高度和空间磁场对火星电离层夜间电子密度的影响。结果表明: (1) SZA=90° ~115° (晨昏) 电子密度下降较快, 主要受昼夜传输影响, SZA=115° ~180° (深夜) 主要受电子沉降作用, 电子密度变化较慢; (2) 电子密度分布与空间磁场无明显相关性; (3) 电子密度峰值出现在 130~170km, 160km 以下受电子沉降影响显著, 200km 以上电子密度变化平缓。基于分层分组开展了 300km 以下电子密度拟合研究。SZA=90° ~115°, 采用分层拟合, 对 120~200km 段采用 6 阶多项式拟合, 电子密度峰值最高可达 $1.1 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$, 对 200~300km 段采用 4 阶多项式拟合。SZA=115° ~180°, 采用 6 阶多项式拟合, 电子密度峰值基本小于 $2 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ 。

关键词:火星; 夜间电离层; MAVEN; 电子密度; 拟合

NO.104

Es 统计特性研究

陈春

中国电波传播研究所, 青岛 266000

Es 是发生在电离层 E 层高度上的偶发不规则结构, 且我国是 Es 的高发区, 对短波通信影响很大. 利用中国电离层垂测网的 foEs 数据, 分析了中国地区 Es 的空间分布特性及其传播模型. 本文利用中国电离层垂测网多年的垂测数据, 对中国地区 Es 发生率、Es 遮蔽、强 Es 区域出现概率分布、Es 出现概率预测以及 Es 传播特性进行了深入分析, 得到一些有意义的结论.

关键词: Es; foEs; 短波通信

NO.105

面向空间环境数据处理的分布式发布-订阅管理系统设计

覃润楠¹, 张修杜¹, 李世豪¹, 王鹏博¹, 董靖如¹, 樊泽宇¹, 李政辉¹, 任敬义¹

1. 中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100191

针对卫星在轨空间环境效应探测、地面系统数据中转管理、大型试验实时监控显示等节点中海量空间环境数据在传输、共享、处理分析、存储等方面的巨大压力, 构建面向空间环境数据全生命周期管理的分布式发布-订阅管理系统 (Distributed Publish/Subscribe System, 简称 DPSS)。借助大数据云计算平台技术, 设计了一套基于云平台的空间环境与效应监测数据集成化订阅管理与快速分析方法, 为航天器实时在轨健康监测、风险快速预报预警提供重要支撑。实地航天器数管实验结果表明, DPSS 系统各层平均时延 0.54s, 单日吞吐量达到 100GB 量级时数据丢帧率限制于 0.05%、数据破损率限制于 0.02%, 具备数据发布与订阅响应迅速、多源异构数据高吞吐稳定性、系统组件部署灵活、系统各节点独立解耦等优点。

关键词: 空间环境效应探测; 分布式; 云平台; 发布-订阅系统

NO.106

偶极化锋面后哨声波调制高频静电波的过程

陈祖政¹, 俞江¹, 王晶¹, 何兆国¹, 刘倪纲¹, 崔峻¹, 曹晋滨²

1.中山大学 行星环境与宜居性研究实验室, 珠海 519082;

2.北京航空航天大学 空间与环境学院, 北京 100191

尽管偶极化锋面后的哨声波和静电波已经被广泛研究了,但是它们之间的相互作用过程还不清楚。利用高分辨率的 MMS 卫星数据,我们展示了偶极化锋面后两个哨声波调制高频静电波的事例研究。频率在电子回旋频率和电子振荡频率之间的高频静电波沿着背景磁场传播,在(反)平行传播的哨声波波谷(峰)附近被探测到。高频静电波的波幅与哨声波的相当,但是能量密度比哨声波的低两个数量级。我们的分析发现,哨声波由电子的各向异性分布地激发产生,高频静电波由哨声波通过朗道共振产生的电子束激发产生。我们的研究促进了空间等离子体中波波相互作用过程和跨尺度过程的理解。

关键词: 哨声波; 高频静电波; 偶极化锋面

NO.107

利用人工智能方法对 Dst 指数进行预报

刘俊延¹

1 中国科学技术大学, 合肥 230026

地磁扰动指数(Disturbance storm time index, Dst index)是空间天气预报中衡量地磁活动强弱的重要参数。Dst 指数的精确预测有助于规避灾害性空间天气事件的危害,是空间天气预报领域的研究热点之一。

利用人工智能时序预测领域中的 TCN(Temporal Convolutional Network)神经网络,我们采用行星际磁场、太阳风速度、质子密度等行星际太阳风参数,搭建了一个 Dst 指数预测模型。仅使用单一模型,我们的预测结果精准度就非常接近使用多个复杂模型协同预测的最优结果。对于未来 1 小时 Dst 指数的预测,预测值与真实值之间的均方根误差 RMSE 为 2.876nT,平均绝对误差 MAE 为 2.003nT,相关系数 r 达 0.9846,模型可以预测出几乎所有的磁暴事件并且没有误报。

过去借助神经网络来预测 Dst 的方法虽然取得了很高的准确度,但其复杂的

内部结构使得我们很难从中得到有用的物理信息。我们的模型在不牺牲准确度的同时大幅简化了预测模型的复杂度，更容易从中获取有用的物理信息。我们借助IG(integrated gradient)算法进一步分析了我们的模型，得到了各个输入参数对最终的Dst指数预测结果的影响。在输入参数中，过去的Dst指数、行星际磁场z分量、太阳风速度是影响最大的三个物理量；在时间尺度上，越近的时间节点影响越大，超过两小时的输入就基本没有影响了。

相对于传统的预测方法，我们仅使用单个神经网络就达到了多个复杂模型共同使用才达到的高准确度，这一简化的模型可以帮助我们更好的去理解神经网络的实现细节、了解其背后的物理过程。

NO.108

空间环境对低轨道卫星表面电位及等离子体原位测量的影响

郑宇豪¹，熊超^{1,2}，江海程¹，朱子渊¹，尹凡¹

1.武汉大学电子信息学院，武汉 430072；2. 湖北珞珈实验室，武汉，430079

随着空间科学与航天技术的发展，卫星已成为对地观测与空间环境监测的重要手段。因此，保障卫星在轨期间安全有效的运行及观测的准确性便成了空间科学与卫星制造领域的热点问题。由于卫星表面材料的几何形状、介电特性及光照条件等因素的不同，在与空间等离子体相互作用之下卫星表面与卫星地电位之间会充电产生电位差；当电位差达到一定阈值后，将产生静电放电。该充放电过程将直接通过电磁辐射对星载电子设备产生影响，甚至造成电路故障，威胁整个卫星的安全。在地球中、高轨道卫星高度分布着众多的能量粒子，前人对此高度上卫星表面的充电特征展开了详细的研究，但对于低轨道卫星表面电位的变化研究则很少涉及。本研究利用处于400-500公里高度上的欧空局Swarm星座（三颗卫星）观测数据，对其表面电位的分布特征及与空间环境影响的关系展开了详细的分析。我们的结果表明：Swarm卫星平台电位存在显著的太阳活动、季节与地方时分布特征，在大西洋异常区的电位要显著低于其它中低纬度地区。同时，我们对Swarm星载朗缪尔探针测得的等离子体密度数据进行分析，发现在太阳活动低年，星载朗缪尔探针反演得到的等离子体密度数据要远大于地基非相干散射雷达的观测值，原因是在Swarm星载朗缪尔探针的反演算法中，离子成分被假

定为 100%的氧离子 (O^+)。在太阳活动低年, 由于电离层的收缩, 导致较轻的离子 (比如 H^+) 进入到 Swarm 卫星高度, 从而使得星载朗缪尔探针反演等离子体密度值过高。基于多年地基非相干散射雷达的观测数据, 进一步建立了对 Swarm 等离子体原位测量值的修正模型。

关键词: 低轨卫星, 电位, 朗缪尔探针, 等离子密度

NO.109

24 太阳周(2009-2019 年)期间 $Dst_{min} \leq -50$ nT 地磁暴的行星际源

邱世灿^{1,2}, 章志庸²

1. 长安大学 地质工程与测绘学院地球物理系, 西安 710054;

2. 中国科学技术大学 中国科学院地球空间环境重点实验室, 合肥 230026

在本次研究中, 我们分析了 24 太阳周 (2009-2019 年) 期间发生的 149 个中强地磁暴 (即 $Dst_{min} \leq -50$ nT), 并确定了它们可能的行星际源。其中, 有 20 个强地磁暴 -200 nT $< Dst_{min} \leq -100$ nT, 2 个超强地磁暴 $Dst_{min} \leq -200$ nT。我们发现, 共转相互作用区 (CIRs) 引起了 37% (55/149) 地磁暴, 行星际日冕物质抛射 (ICMEs) 导致了 30% (45/149) 地磁暴, 而鞘区 (SH) 造成了 15% (23/149) 地磁暴。与此同时, 18/20 的强地磁暴是由与行星际日冕物质抛射相关的结构 (ICME、SH 和 SH + ICME) 引起的, 而 CIR 只造成了 2/20 的强地磁暴。我们研究发现, 这两个超强地磁暴都是由 SH + ICME 引起的。我们的研究结果还表明, 在太阳活动的不同阶段发生的地磁暴是由不同的行星际结构主导的, 这与以往的研究结果一致。与 23 太阳周相比, 在 24 太阳周下降和低年阶段, 没有 CIR 引起的强地磁暴事件; 在下降阶段, 由 ICME 引起的中强地磁暴事件的比例下降, ICMEs 也没有引起超强地磁暴事件; 在上升阶段, 强地磁和超强地磁暴事件都没有发生。

关键词: 地磁暴; 行星际源; 日冕物质抛射; 行星际日冕物质抛射; 共转相互作用区

NO.110

基于经验和深度学习的太阳耀斑预报研究

李铭

中国科学院国家空间科学中心

近年来,虽然各种深度学习技术被应用于搭建空间天气预报模型,但在模型建立过程中,大量的太阳爆发和磁特性的相关先验知识被忽略了。通过将耀斑产生的先验知识整合到卷积神经网络结构(CNN)中,我们开发了一个旨在预测太阳耀斑的结合先验知识的深度神经网络模型。我们选取了2010年5月至2018年12月的SDO/HMI SHARP的视线磁图数据。我们统计了太阳耀斑与活动区面积和磁性类型之间的关系。在将先验知识整合到CNN中时,我们考虑了三个方面:1)在将SHARP的磁图填充为正方形时,保持磁场结构不变(数据预处理);2)根据不同的耀斑生产率将数据样本分成两个子集(样本分组);3)将活动区面积作为额外的输入参数加入到CNN中(额外输入参数实现)构建纯CNN模型、融合模型1和融合模型2来预测未来48小时内的M级或以上耀斑,分别涉及数据预处理、数据预处理和样本分组,以及所有这三个方面。融合模型2增加了最多的先验知识,其性能最好。我们的结果表明,先验知识在构建深度学习耀斑预测模型中可以发挥重要作用。在未来,采用结合先验知识的深度神经网络将是进一步提高其他空间天气事件预测性能的有效途径。

关键词 耀斑预报,深度学习,卷积神经网络,先验知识

NO.111

增强太阳图像的图像特征提取与匹配算法在空间天气领域的研究与应用

王睿^{1,2,3} 包黎莉^{1,3} 蔡燕霞^{1,3} 师立勤^{1,3}

1.空间天气学国家重点实验室 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 100049)

3.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

增强现实(Augmented Reality, AR)技术能够将可视化的三维模型与现实融

合,增强人们对现实的体验与理解,目前已应用于各行各业中。借助于 AR 技术,可以将太阳、近地空间环境态势仿真模型融合到预报会商室或航天员太空训练场馆内,从而使用户更具有沉浸感;通过 AR 技术也可以更直观地向大众宣传空间天气科普知识,提高科普教育效果。本文将增强现实技术应用在空间天气领域,以增强太阳图像为例,针对太阳图像表面大量模糊、明暗对比不明显的颜色过渡区域易产生局部特征点堆叠的问题,首先探索了尺度不变特征变换 (Scale-invariant feature transform, SIFT) 算法、加速稳健特征 (Speeded-up robust features, SURF) 算法、二进制鲁棒不变可伸缩关键点 (Binary robust invariant scalable keypoints, BRISK) 算法、快速特征点提取与描述 (Oriented fast and rotated brief, ORB) 算法四种应用于太阳图像的适用性,对四个算法在匹配准确率、运行时间和特征点丰富度三个维度的表现进行实验分析。实验表明, SIFT 算法在匹配准确率表现最好,但运行时间最长; ORB 算法运行时间最短,但其匹配准确率表现最差。四个经典算法都无法直接应用于增强太阳图像中。因此,本文利用两帧匹配法 (Two-Frame matching method),将 SIFT 算法的高准确率优势以及 ORB 算法的低运行时间优势相结合,提出了 SIFT-TF-ORB 方法。两帧匹配法利用了视频的时间相关性,即连续相邻两帧之间具有高相似度,因此具有最短运行时间的 ORB 算法的准确率可以满足对连续相邻两帧之间图像特征提取与匹配的精度要求。基于两帧匹配法, SIFT-TF-ORB 方法默认初始目标图像与输入视频帧之间存在较大差距,使用 SIFT 算法进行目标图像的识别以及模型的注册,识别成功后使用 ORB 算法计算当前帧与其前一帧之间的累计变换矩阵,以此完成后续的模式注册与跟踪。本文进一步将 SIFT-TF-ORB 方法应用于增强太阳图像中,实验效果表明 SIFT-TF-ORB 方法在保证高识别率的同时,降低了运行时间,可将 SIFT-TF-ORB 方法移植到手机等移动设备上,实现更为便捷的移动增强现实系统,同时也可将 SIFT-TF-ORB 方法扩展应用到其他类型的空间天气数据中。

NO.112

LaBr₃(Ce)、LaBr₃(Ce,Sr)和 NaI(Tl)三种晶体对 X 射线和康普顿电子的发光非线性及其本征分辨率的研究

封佩宜

指导教师：卢红、孙希磊、安正华

(中国科学院高能物理研究所 100049)

溴化镧晶体是一种很有发展前景的新型无机闪烁晶体，具有高光输出、高能量分辨率和高时间分辨率，能量线性较好，且发光衰减时间短。碘化钠晶体是一种性能优良的传统无机闪烁晶体，除了具有出色的发光性能外，它对 X 射线和 γ 射线均有良好的分辨能力。LaBr₃ 和 NaI 闪烁体的这些特性在闪烁机理研究、核光谱学、核医学、伽马射线天文学中的三维成像、安全和遥感、伽马测井、环境监测等领域有非常广泛的应用。

能量分辨率是表征闪烁体性能的重要参数之一，为量化各种因素对总能量分辨率的贡献，需要研究最终导致闪烁体总能量分辨率的整个物理过程。采用康普顿符合技术 (CCT) 来实现对闪烁体性能的研究，这一方法最初由 Valentine, J.D. 团队提出，并设计出闪烁体光产额非线性表征仪 (SLYNCL) 的第二代仪器。Roemer K.和 Swiderski L.等人对这种传统的 CCT 技术进行了改进，所用到的实验器材只需放射源、一个散射探测器、一个 HPGe 探测器以及后续的数据采集系统即可。这种方法称为广角康普顿符合技术 (WACC)，既可以在相对弱源的情况下得到较高的事例率，也允许通过使用数小时内的数据在宽能量范围内表征闪烁体的能量分辨率和响应非线性。这项技术的开发促进了对能量分辨率、能量响应非线性与电子能量三者之间关系的深入研究。

近几年，Kaintura S.和 Ranga V.也采用 WACC 技术实现了对 LaBr₃(Ce)、LaCl₃(Ce) 以及 CeBr₃ 闪烁体性能的研究，对本征分辨率来源的分析与 Moszynski M., Swiderski L.等人的观点几乎一致，但缺乏低能端 (<100keV) 数据点。直至今日，对于较低能区域的研究还不够充分，存在未知情况。由于不同的能量沉积方式，闪烁体对伽马射线和电子的响应显然是不同的。目前已发表的相关文章中多为伽马光子入射闪烁体的研究，当单能电子射入闪烁体时，其响应非线性与本征分辨率之间的具体关系还未可知。为充分了解这些闪烁体材料的局

限性和潜力,对其本征分辨率与非线性的研究仍有重要的意义。

本工作旨在采用广角康普顿符合技术(WACC)及X光机研究LaBr₃(Ce)、LaBr₃(Ce,Sr)和NaI(Tl)三种闪烁体在3keV~300keV中低能量范围内的响应非线性,三种晶体之间进行相互比较。结合Geant4 Monte Carlo Simulatin研究闪烁体中能量沉积及发光这两个过程,分析非线性和本征分辨率之间的关系,进而分析本征分辨率可能的来源。

NO.113

基于序列到序列模型的空间环境人工经验预报综述文本生成技术研究

罗冠霆^{1,2,3} 邹业楠^{1,3} 蔡燕霞^{1,3} 师立勤^{1,3}

1. 空间天气学国家重点实验室 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 100049)
3. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

人工预报是空间环境预报的重要组成部分,包括过去24小时空间环境综述和短期空间环境预报。在制备人工预报产品时,预报员往往需要分析大量的空间环境监测数据,任务繁重,同时可能会由于个人经验偏差造成失误。利用基于深度神经网络的自然语言生成技术,智能化生成预报产品的文本内容,可以协助预报员生成高质量的预报产品。本文针对“空间环境综述”部分,在分析了历史综述中各类空间环境要素描述特点的基础上,将综述文本内容按照其特征分为短期描述型、持续描述型和因果关系描述型三类。针对以上三种文本特征类别,提出了利用基于序列到序列框架的深度神经网络方法实现空间环境要素综述文本的自动生成,并以太阳耀斑与太阳活动区、质子事件、由冕洞引发的地磁暴事件为上述三种文本类型的代表开展实验。监督学习的训练目标文本均采集自1999-2012年的NOAA的RSGA(Report of Solar and Geophysical Activity)产品中的对应空间环境要素综述文本。太阳耀斑与太阳活动区综述生成实验的输入特征选取了过去24小时的耀斑列表和活动区参数,生成模型采用BART预训练语言模型。质子事件综述生成实验的输入特征选取了过去24小时的5min高能质子通

量采样序列,同时在数据序列中提取了事件的时间、峰值等描述质子事件轮廓的特征参数,生成模型采用 Transformer 模型。地磁暴事件综述生成实验的输入特征选取了过去 24 小时的地磁 Kp 指数,地磁暴事件归因表征参数,生成模型采用 Transformer 模型。针对模型的训练结果,提出了包含空间环境要素覆盖率、准确率、语句长度等多因素的文本生成质量评估方法。实验结果表明,本文的模型可以生成具有高度内容覆盖率、准确性和连贯性的空间环境综述文本,可协助预报员生成高质量的空间环境预报产品。

NO.114

Swarm A 卫星观测的 ULF 波动分布特征

徐春雨¹ 熊超¹ Hermann Lühr² 王丰珏¹

1.武汉大学 电子信息学院 空间物理系 电离层与磁层研究室,武汉,430072;

2.GFZ-German Research Centre for Geosciences, Section 2.3, Geomagnetism, Telegrafenberg,
14473 Potsdam,Germany.

超低频(ULF)波的研究是能量传输的一个重要环节,近地轨道卫星(LEO)为 ULF 波中的 Pc3 波(16mHz-200mHz)的观测提供了便利,Heilig 等人[2007, 2016]和 Balasis 等人[2015]都利用卫星(CHAMP、Swarm)的短期数据进行过超低频(ULF)波特征的分析。本文展示了由 Swarm A 卫星观测到的一个超低频波,并利用该任务从 2014 年 5 月 1 日到 2020 年 4 月 30 日期间 7 年的数据,统计分析得到了 16mHz~200mHz 的超低频波事件磁纬度分布、磁地方时分布、经度分布、年分布以及季节分布情况,并根据这些情况分析得到了 16mHz~200mHz 的超低频波具体的分布规律。分析结果说明,这类超低频波事件主要分布特征如下: 1.在磁地方时 6 时到 17 时左右,夜侧也有分布,但是分布较少; 2.具有很好的季节分布,主要分布在夏季和冬季,春秋季节较为少见; 3.有显著的关于磁赤道对称分布的特征,且在 $5 < |MLAT| < 20$ 较为集中; 4.在南大西洋有一个明显的分布较弱的区域。

关键词: Swarm 卫星; 超低频波; 数据统计;

NO.115

磁暴引起的电离层扰动对 C 波段 Sentinel-1 的观测误差影响朱艺洵¹, 熊超^{1,2}

1. 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072;

2. 湖北珞珈实验室, 武汉 430079

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 能够实现全天时、全天候对地实施观测, 是目前常用的测量手段之一, InSAR 技术的提出使得大范围的精密测量成为了可能。但 SAR 成像精度仍难以避免某些误差的影响, 例如磁暴的突发干扰。磁暴是全球范围内地磁场的剧烈扰动, 强磁暴会对电离层产生扰动, 电离层扰动则会严重影响 SAR 成像精度, 并在 InSAR 测量中引入大量误差。为检测由磁暴引发的电离层扰动是否会对 SAR 图像产生影响, 同时基于 C 波段卫星的相关研究缺乏的事实, 欧空局发射的 Sentinel-1 卫星和 InSAR 技术被用于验证本文猜想。位于美国佛罗里达州的磁暴期前后的 Sentinel-1 SLC 数据被用于实验, 通过实验结果可知, 处于磁暴期的数据通过 D-InSAR 技术求得的干涉图会产生有规则的相位伪影, 但位于非磁暴期的干涉图并未产生相位伪影等特殊条纹。与同期的 Swarm A 卫星的 Ne 实测数据及 GNSS 实测数据相比, 证明了磁暴对 C 波段 SAR 产生影响的事实。但相位伪影的产生无疑会增加图像解译难度并引入测量误差, 甚至会遮蔽地表真实信息。为消除磁暴对 SAR 图像带来的影响, 补偿由电离层扰动引发的方位向偏移, 本文使用频谱分割法实现了对磁暴下 C 波段 Sentinel-1 的电离层误差校正。

关键词: SAR; 磁暴; 频谱分割法; 电离层

NO.116

基于 MBiLE 模型预测热层大气密度

潘倩

武汉大学

在这项研究中, 基于双向长短期记忆神经网络 (BiLSTM) 和多层感知器 (MLP) 的集合学习算法建立了一个预测热层质量密度的模型 MBiLE。我们使用从飞行高度约为 450 公里的 Swarm C 的机载加速度计得出的热层密度来训练

和构建模型。正如预期的那样，MBiLE 模型的预测与 Swarm C 的观测结果很一致。我们进一步检查了 MBiLE 模型在更大高度范围内的预测，并与 Swarm B（在大约 500 公里处飞行）、CHAMP（在大约 350 公里处飞行）和 GOCE 卫星（在大约 250 公里处飞行）的观测结果进行比较。例如，与来自 GOCE 的观测数据比较，模型的预测决定系数被证明为 0.96，均方根误差为 2.537×10^{-12} 。比较结果表明，我们的 MBiLE 模型具有良好的鲁棒性和泛化性，可以实现覆盖广泛高度范围的热层密度预测。

In this study, an ensemble learning algorithm based on a bidirectional long and short-term memory neural network (BiLSTM) and a multilayer perceptron (MLP) is used to build a model for prediction of the thermospheric mass density, MBiLE. We use the thermospheric density derived from the onboard accelerometer of Swarm C, which flies at about 450 km, for training and constructing the model. As expected, the MBiLE model predictions agree well with the Swarm C observations. We further checked the MBiLE model predictions at a wider altitude range, and compared the predictions with observations from the Swarm B (flying at about 500 km), CHAMP (flying at about 350 km), and GOCE satellite (flying at about 250 km). For example, for comparison with observations from GOCE, the prediction coefficient of determination of the model proved to be 0.96 with a root mean square error of 2.537×10^{-12} . The comparison show that our MBiLE model has good robustness and generalization, and can achieve the prediction of thermospheric density covering a wide altitude range.

NO.117

多太阳观测数据对 10.7cm 射电辐射流量影响分析

刘开静

中国科学院云南天文台

太阳 10.7cm 波长（2800MHz）的射电辐射流量 $F_{10.7}$ 指数是重要的空间天气指标，但其受太阳活动及爆发等影响，给预测带来了一定的困难。为此，本文研究分析了太阳 $F_{10.7}$ 指数的两个潜在影响因素，从太阳黑子面积（sunspot Area）

和 X-ray 流量两个可直接观测指标数据入手, 分析了 2022 年 8 月 14 日至 2022 年 10 月 19 日 (67 天) 的新建廊坊监测望远镜和国际公布数据与他们的相关性, 分为包含了耀斑爆发的时段和扣除耀斑爆发的时段。

分析发现, 扣除耀斑爆发时段, 太阳 $F_{10.7}$ 指数与 sunspot Area 和 X-ray 流量的正相关性较高, 新建廊坊监测望远镜观测数据与 sunspot Area 和 X-ray 流量的相关系数为 0.7373、0.3512; 国际公布数据与 sunspot Area 和 X-ray 流量的相关系数为 0.5722、0.3330; 而采用包含了耀斑爆发时段分析上述两个相关性均有下降, 新建廊坊监测望远镜观测数据与 sunspot Area 和 X-ray 流量的相关系数降为 0.6486、0.3115; 国际公布数据与 sunspot Area 和 X-ray 流量的相关系数降为 0.4743、0.3173。由此, 在耀斑爆发时产生的伴生射电爆发也会在 $F_{10.7}$ 频段产生, 会影响其预测值。

NO.118

基于 COMSIC RO 数据获得中低纬电离层背景误差协方差矩阵

韩婷苇

中国科学院地质与地球物理研究所

电离层数据同化技术是通过多种观测数据结合模式背景场资料, 利用同化算法, 综合得到一个“最优”的结果来更好的描述电离层的状态, 其中背景误差协方差矩阵是决定加权比例和调制范围的关键因素。但许多数据同化工作, 都是基于无偏高斯分布的某些假设从气候统计推断出的电离层相关长度的时不变的静态背景误差协方差, 这样很大程度上限制了同化系统的可靠性和准确性。本文基于 COSMIC-1 掩星 2006-2017 年数据及 COSMIC-2 掩星 2018-2022 年大量数据的统计分析, 得到了不同时间、不同季节、不同太阳活动水平下的多维度电离层相关性信息。这个相关性对理解引起电离层变化的物理机制非常重要, 同时可以为下一步进行精细数据同化做铺垫。

NO.119

高分 5 号 02 星吸收性气溶胶探测仪数据处理方法及结果验证

张卓^{1,2,3*}, 王咏梅^{1,2,3}, 王维和⁴, 王后茂^{1,2,3}, 许健¹

- 1.中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
- 2.天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190;
- 3.中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;
- 4.国家气象局卫星气象中心, 北京 100081

吸收性气溶胶指数提供具有吸收性的气溶胶颗粒存在与否及大致的强度信息,能够有效观测沙尘、工业排放、生物质燃烧及火山烟尘等大气污染物,高分空间分辨率的吸收性气溶胶指数产品对大气污染观测及防治起到重要作用。搭载在高分 5 号 02 星上的吸收性气溶胶探测仪于 2021 年 9 月 7 日升空并开始在轨运行,经过几个月的初期在轨测试后,反演获得了有效的吸收性气溶胶指数观测结果。吸收性气溶胶指数的反演方法是,利用实际大气紫外波段的两个臭氧吸收较弱的通道测得大气层顶辐射值比值的对数同纯瑞利大气下的相应值相减得到的残差。根据不同类型气溶胶的光学特性,吸收性气溶胶会产生正值 AAI,而云、地表反射率、散射性气溶胶产生小的负值或者零值 AAI。AAI 是一个无量纲半定量值,其大小主要反映污染物的有无和大致污染程度。反演过程中使用 SciTRAN 辐射传输模型,利用 354nm 和 388nm 波长对,初步剔除厚云像元,获得初步全球 AAI 分布,利用观测值和模拟值之间的差异,筛选出太平洋海区晴空像元,并统计计算这些晴空像元的 AAI 平均值,以此作为背景值进行扣除,获得最终的 AAI 结果。针对华东地区的严重污染天气,以及塔克拉玛干沙漠地区的沙尘区域进行反演分析,同 Tropomi 结果进行对比分析。结果显示观测区域污染物分布形态同 Tropomi 观测结果基本一致,由于高分 5 号 02 星为上午星,而 Tropomi 搭载在下午星上,二者观测结果污染物区域分布细部特征略有区别。目前吸收性气溶胶探测仪星下点空间分辨率为 2km*4km,从空间分辨率上相较于 Tropomi 产品具有很大优势,污染物分布特征更加清晰。GOME-2 所搭载的卫星过境时间同吸收性气溶胶探测仪相差约半小时,二者污染物分布观测结果具有良好的一致性,由于 GOME-2 获得的产品空间分辨率过低,无法提供清晰的污染物分布细部特征,因此不能进行进一步对比。经一系列对比验证,可以确定吸收性气溶胶探测仪获得的观测结果同 GOME-2 和 Tropomi 的观测结果相符合,且在空间分辨率方面能够体现更大的优势。

关键词: 高分 5 号 02 星,吸收性气溶胶探测仪,吸收性气溶胶指数,Tropomi, GOME-2

NO.120

利用 STEREO 和 WIND 卫星的原位探测对共转流相互作用区的预报能力进行研究

迟雨田¹, 申成龙¹, Christopher Scott², 徐孟娇¹, Mathew Owens², 汪毓明¹, Mike Lockwood²

1.中国科学技术大学, 合肥;

2.雷丁大学, 英国

流相互作用区(SIRs)是由来自日冕洞的快速太阳风和慢速太阳风相互作用形成的。SIRs 存在时间较长, 一般可持续几个太阳自转周或者更长时间。如果 SIRs 以 27 天周期重复出现, 它们也可以被称为共旋流相互作用区(CIRs)。CIRs 是引起重现性地磁暴的主要行星际源, 可能改变地球周围的高能粒子环境和电离层构成, 对电力系统、GPS 导航、卫星通讯等日常生活所依赖的高科技系统构成威胁。因此, 提前对 CIRs 到达地球的时间和磁场、速度、密度等重要参数进行预报, 对降低灾害性空间天气对现代社会重要基础设施的影响至关重要。利用 STEREO-B 和 Wind 卫星的原位观测数据, 通过假设 CIRs 结构是稳定的、理想的结构, 研究 2007-2014 年卫星的经度和纬度差对 CIRs 等空间天气预报能力的影响。研究发现, 58.9%的被 STEREO-B 卫星观测到的 CIRs 可以到达地球附近。随着 STEREO-B 与 Wind 卫星的经度和纬度差逐渐增大, 准确预报 CIRs 的比例从 100%逐渐降低到 20%左右。统计结果表明, 航天器的纵向和纬度分离对 CIRs 预报的准确度有显著影响。当经度差小于 30°, 纬度差小于 5°时, 93.2%的 CIR 事件可以被准确预报。当经度差大于 60°时, 50%左右的 CIR 事件无法被准确预报。因此在位于地球轨道后 30°的位置放置太阳风检测卫星(如环日全景探测计划 Solar Ring mission (Wang et al., 2020)), 可以提高地球的空间天气的预报能力, 并减少丢失或“错误警报” CIRs 的风险。

关键词: 空间天气预报, 共转流相互作用区

NO.121

地球电离层偶发 E 层的 27 天周期性变化

于秉坤¹, Christopher J. Scott², 薛向辉³, 乐新安⁴, 迟雨田¹, 窦贤康⁵, Mike Lockwood²

1. 深空探测实验室, 合肥;

2. University of Reading, Berkshire, UK;

3. 中国科学技术大学, 合肥;

4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京;

5. 武汉大学, 武汉

电离层偶发 E 层是 90 到 130 公里垂直高度区域中稠密的电离层不均匀体, 其中包含的离子成分几乎全部由 Fe⁺, Mg⁺, Ca⁺, Na⁺等长寿命的金属离子组成。利用子午工程空间环境地基台站的电离层数字测高仪数据和卫星的无线电掩星数据, 发现地球电离层偶发 E 层存在着与太阳自转相关的 27 天周期性变化, 表明偶发 E 层除受到背景风场的垂直风剪切作用和水平运输的作用外, 还受到太阳风高速流和重现性地磁活动的影响。

关键词: 电离层; 偶发 E 层; 太阳自转周

NO.122

月尘带电运动研究

李宗焯¹ 何兆国¹

1. 中山大学 行星环境与宜居性研究实验室, 珠海 519000;

月尘环境对探月工程中航天员的健康和探测器性能造成重要的威胁, 我们有必要对月尘的运动规律进行深入研究。月尘在月球表面运动的自然机制主要由静电运输造成: 由于太阳风等离子体以及太阳紫外线光子的作用, 月表的月尘颗粒带有电荷, 同时也会在月表形成电场(鞘层), 故带电月尘颗粒在电场力的作用下可于月表运动。本文基于卫星观测的太阳风数据, 利用 PIC(Particle In Cell)方法构建月球表面鞘层的电势分布模型, 研究了月尘颗粒在不同鞘层中的运动情况以及月尘密度/速度的动态分布, 并得到以下结论: 1. 在低纬度区域, 月表主要受太阳辐射影响, 光电子从辐射区发射出来, 光电子鞘层占主导, 月表电势为正

值,且电势随高度的增加而减小;在高纬度区域,月表受太阳辐射影响较小,受太阳风等离子体影响较大,等离子体鞘层占主导,月表电势为负值且电势随高度的增加而增加;2. 太阳辐射入射角越小,月尘颗粒运动越剧烈,悬浮所能达到的高度越高。接近晨昏线附近的尘埃悬浮高度远高于向阳面大入射角下的月尘悬浮高度;3. 尘埃密度会随高度的增加而减少,且晨昏线附近较高高度(>100m)的尘埃密度比其他区域尘埃密度大。本研究可为人们深入了解月球尘埃运动及未来的探月工程、载人登月等提供技术参考。

关键词:月尘;鞘层;运动机制;PIC模拟

NO.123

基于机器学习的闪电邻近预报与预测技术研究进展

尹文杰¹,周晨¹

1.武汉大学电子信息学院电离层实验室, 武汉 430072;

闪电放电作为一种发生在大气中的自然现象,对平民的生命和财产造成了巨大的威胁,因此引起了人们对雷电预报的广泛关注。由于闪电的产生与复杂的微观物理过程有关,提高雷电预测系统的准确性需要充分利用各种气象参数。由于机器学习(ML)技术的快速发展和气象数据的爆炸性增长,促使许多研究人员利用数据驱动的模式进行雷电预报。机器学习作为与“大数据”应用结合的最佳方法技术,在各种建模预测的工作中,相比传统方法,取得了的突破性进展与性能表现。本研究分析了不同的预测方法,包括传统的数值参数化方法和机器学习方法。为了利用这些经典方法里面的领域知识,我们详细研究了经典参数化方法的优点和缺点。气象数据爆炸不仅带来了大量的数据,同时如何利用气象中的多源数据,结合不同的气象数据中包含的各种信息也成为了一个亟待解决的问题。不同的数据类型拥有不同的特点,这给数据融合带来了困难。然而,对于机器学习方法来说,挖掘与利用分布在不同数据源中的时空关联性是十分可行的。同时,机器学习预测闪电的模型的可解释性、可信度等也成为了机器学习在实际应用中的热点问题。通过回顾近年来在闪电邻近预报与预测技术的研究进展,对面临的挑战与应对进行探讨,将有利于促进机器学习技术在闪电预报领域更好、更稳定的发展。

关键词: 闪电临近预报与预测; 机器学习;

NO.124

临近空间大气经验模型研究现状及在中国区域的适用性评估

程旋^{1,2,3}, 杨钧烽^{1,2,3}, 张依鸣^{1,2,3}, 吴止境^{4,5}, 柳丹^{1,2,3}, 王建美^{1,2,3}, 肖存英⁶, 胡雄^{1,2,3}

1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;
2. 太阳活动与空间天气国家重点实验室, 北京 100190;
3. 中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室, 北京 100190;
4. 航天工程大学, 北京 101416;
5. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;
6. 北京师范大学, 北京 100875

大气经验模型是简单、快速获取临近空间大气数据的重要工具, 对临近空间飞行器技术的研究和应用非常重要。本文综述了国内外典型临近空间大气经验模型的研究现状, 包括美国标准大气、COSPAR 参考大气系列模型、质谱仪非相干散射雷达系列模型、水平风场模型、全球参考大气模型和中国参考大气模型等, 并对模型的发展历程和特点进行了总结, 分析了国内外模型发展的差距。利用 TIMED/SABER 卫星观测数据统计获得的多年月均值, 分别对常用的临近空间大气经验模型 (USSA-76、CIRA-1986、MSIS 2.0、GRAM-95 和 GJB5601-2006) 在中国区域的适用性进行了定量评估, 结果表明, 模型在中国区域的适用性从高到底依次为: MSIS2.0、GJB5601-2006、GRAM-95、CIRA-86 和 USSA-76, 所得结论为我国临近空间大气经验模型的建模、优化、选择和使用提供参考。

关键词: 临近空间; 大气模型; 温度; 密度; 中国区域; 适用性

NO.125

基于数据同化的地球辐射带电子通量预测的初步研究结果

雷源¹, 倪彬彬¹, 曹兴¹, 付松¹, 罗陶荣¹, 王晓宇¹

1. 武汉大学电子信息学院空间物理系, 武汉 430072

大部分航天器在运行过程都会穿越地球辐射带, 受到各种能量粒子的影响。

辐射带中的高能电子又被称为“杀手电子”，能导致卫星单粒子效应，诱发卫星运行故障，同时还会对在轨空间站和航天员造成威胁。因此，开展辐射带电子通量分别变化的预测工作具有重要意义。数据同化方法能有机结合卫星就位观测和数值计算模式的各自优势，获得的电子通量重构结果既考虑了卫星观测结果的实际性和潜在误差，又具备辐射带数值模式结果在能量、投掷角和时空分布上的完整性。基于 Van Allen Probes、GOES 等多颗卫星的观测数据和三维辐射带数值模式，我们采用卡尔曼滤波方法对辐射带电子通量的时空分布进行了重构。基于同化结果，进而尝试开展提前量分别为 1 天、2 天和 3 天的辐射带电子通量预测，并对预测结果进行了评估。结果表明，我们的模型能较合理预测不同能量和不同投掷角的辐射带电子通量的时空变化过程，发展潜力大。但是，随着预测时间的增长，电子通量变化的预测准确率逐渐降低，有待进一步改进。

关键词：地球辐射带；电子通量；数据同化；预测分析

NO.126

Combined Scattering of Suprathermal Electrons by Whistler-Mode Chorus and Electromagnetic Ion Cyclotron Waves in the Low-Density Plasmatrough

Based on the observation from Van Allen Probes, we report an event of intense and simultaneous

electromagnetic ion cyclotron (EMIC) and chorus waves inside the low-density plasmatrough. By calculating the scattering rates and performing the diffusion simulations, we for the first time evaluate the combined scattering of suprathermal electrons by EMIC and chorus waves in the low-density plasmatrough. Landau acceleration of suprathermal electrons by EMIC waves is mainly restricted at large pitch angles while their scattering loss by chorus waves occurs at small pitch angles well below 90° . When EMIC and chorus waves are simultaneously present, the scattering of suprathermal electrons by the two waves is very different from that by each type of waves alone. EMIC waves play a complementary role in the scattering of

suprathermal electrons by chorus waves, which facilitate the scattering of suprathermal electrons over all pitch angles. The near-equatorially minor suprathermal electrons are firstly scattered toward intermediate pitch angles by EMIC waves and further toward the loss cone by chorus waves. Our results highlight the complementary role of different types of magnetospheric waves in the suprathermal electron scattering, which potentially have vital

implications for the dynamics of suprathermal electrons in the planetary magnetosphere.

NO.127

基于机器学习和物理模式“双轮驱动”的临近空间环境预报研究

陈洲¹, 刘祎¹

1.武汉大学电子信息学院电离层实验室, 武汉 430072;

临近空间是中性大气层-电离层-热层的耦合区域, 是地球圈层耦合系统中重要的一环。临近空间环境既受到对流层活动的影响, 又受太阳活动和宇宙射线的影响, 使得临近空间环境复杂多变。为研究临近空间环境的变化, 我们先基于多尺度回归模型的层状贝叶斯网络算法, 对天基/地基观测结果和 WACCM 模型结果进行数据同化, 得到相对准确的临近空间环境参数。在此基础上, 再结合卷积神经网络方法, 对临近空间环境参数进行预测, 得到全时空分布的临近空间环境参数。最后, 我们对得到的临近空间环境数据集进行了大气波动研究, 从中计算得到的全球大气波动与前人研究结果一致, 证实了临近空间环境预报模型的准确性。

关键词: 临近空间环境; 机器学习; 物理模式; 同化技术;

NO.128

基于实测数据的低轨道大气密度反演方法研究

于欢欢 沈鸣 高鹏骐 郭效忠 杨大陶 赵有

中国科学院国家天文台 北京 100101

影响低轨空间目标轨道星历精度的重要因素之一即为大气密度精度。截至目前,现有大气密度模型均不能保证在任何情况下都能稳定的表征大气密度实际变化,其误差范围可能从 10%到 200%。进一步提高大气密度模型精度成为极需致力解决的重要问题。本文利用积累到的低轨空间目标高精度激光及 GPS 观测数据,基于不同经验大气密度模型,通过精密轨道解算方法确定不同大气密度模型对空间目标精密轨道确定精度影响并解算卫星精密轨道星历和大气阻力系数;然后通过取均值的方式估算空间目标弹道系数,利用实测大气密度数据及不同卫星精密轨道星历信息等进行大气密度反演方法研究。研究结果表明,在太阳和地磁活动平静期,通过精密轨道星历反演得到的大气密度与其它各模型大气密度相比误差在 10%~30%左右,利用激光测距数据通过精密轨道星历反演获取大气密度的方法可行。在太阳活动较高年,反演得到的大气密度与各模型大气密度误差在 50%~80%左右;在地磁扰动期间,反演得到的反演大气密度相比各模型大气密度误差大误差在 80%左右。

关键词: 大气密度反演; 激光测距; 精密轨道; 大气密度模型

NO.129

廊坊上空 MLT 区域大气湍流活动的短周期变化

王泽伟^{1,2}, 肖存英^{1,2}, 胡雄³, 杨钧峰³, 程旋³, 徐轻尘³

1.北京师范大学 天文与天体物理前沿科学研究所,北京 102206;

2.北京师范大学 天文系,北京 100875;

3.中国科学院国家空间科学中心 空间天气国家重点实验室,北京 100190

本文研究了 MLT 地区的大气湍流活动以及大气湍流活动与大气波动活动的关系。我们利用 2019 年 7 月至 2020 年 6 月廊坊 MF 雷达(39.4°N,116.7°E)的数据和 NRLMSIS 2.0 计算大气波动活动和大气湍流能量耗散率的参数。大气湍流能量耗散速率在不同高度受不同周期的调节,各个高度均存在 12h 和 24h 周期变化。在低海拔地区,存在更多的周期变化;在较高的海拔,12h 的周期变化比 24h 的周期变化更明显,8h 的周期变化也更明显。通过大气湍流能量耗散率与大气潮汐波活动对比,可以看出潮汐波对大气湍流能量耗散率有影响,并且在高海拔地区,

潮汐波对湍流能量耗散率的影响更明显。大气湍流能量耗散率的变化模式与大气重力波活动相似，湍流能量耗散率和大气重力波活动均表现出显著的半年变化。

关键词:MLT 区域; 湍流层顶; 大气湍流

NO.130

日月轨道计算对 TLE 编目深空物体预报精度的影响

郭效忠¹, 沈鸣¹, 高鹏骐¹, 于欢欢¹, 赵有¹

中国科学院国家天文台, 北京 100121;

双行根数 (TLE) 作为一类广泛使用的空间物体编目数据, 其预报精度和误差特性是空间碎片环境碰撞预警研究中所关注的问题之一. TLE 编目的使用通常是配合 SGP4/SDP4 模型进行轨道预报的, 对 TLE 编目深空物体来说, 轨道预报过程主要考虑了带谐项 J_2 、 J_3 、 J_4 摄动、第三体日月摄动和特殊轨道共振问题修正等. 其中, SDP4 模型在第三体摄动计算过程中, 对日月轨道的近似计算采用了长期进动根数和简单平运动的方式, 该方法在外推 10 天左右时, 会存在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 左右的日月位置偏差. 如果我们选用更加精确的日月轨道计算方法, 来改进日月初始位置估计, 并根据日月运动规律的不同, 对太阳轨道采用简单的平运动近似, 对月亮轨道采用直接计算真近点角近似, 则可以减小二者位置误差, 在外推 10 天时, 采用修正后的轨道计算方法, 对日月的位置偏差分别减少到约为 $1' \sim 2'$ 和 $15' \sim 20'$ 的量级. 我们还使用激光测距卫星 Etalon-1、伽利略卫星导航系统 Galileo 23 卫星的精密预报星历, 进行轨道预报的算例对比分析, 结果表明对这两者来说, 它们的 TLE 编目在轨道预报时, 存在明显的位置误差异常变化趋势; 在日月轨道计算改进后, 如果使用“重新定轨”的方式可以得到的“改进”编目, 具有更加精确的轨道预报结果.

关键词: 空间碎片; SGP4 模型; 轨道预报

NO.131

基于邻近掩星廓线的重力波三维分析及波源研究曾炫云¹

1.长沙理工大学, 长沙 410000

在构建全球大气模式工作中,重力波参数化至关重要。但由于卫星水平分辨率和覆盖范围的限制,重力波波长和动量通量的估算较多停留在一、二维维度,全球范围内的重力波三维分析一直是有待解决的重要问题。我们利用气象、电离层及气候星座观测系统(COSMIC)2006-2007年卫星结伴飞行的有利条件,通过时空相近的平流层温度垂直廓线组,探讨利用多通道最大熵(MMEM)算法对重力波进行三维分析的优化过程。相比传统方法,MMEM克服了数据水平分辨率不足的问题,在三维空间中获得较为真实的动量通量。动量通量在夏季亚热带和冬季高纬度地区表现出极大值,揭示了夏季亚热带可能的对流源和冬半球高纬可能的山地波。我们还发现了之前少有报道的,动量通量在夏季高纬表现出极大值的现象。这些都为探讨不同纬度、季节重力波波源的激发机制,为全球环流模式(GCM)中重力波参数化提供理论和建模依据。

关键词:重力波;平流层;临近空间

NO.132

基于 SuperMap 的月球专题制图系统设计与实现刘磊¹,孙光德¹,万刚^{*1},丛佃伟¹,袁梨幻¹,范亚博¹

1.航天工程大学,北京 101416;

针对月球形貌与空间环境专题信息的制图应用,基于 SuperMap iObjects .NET 进行二次开发,设计实现了月球专题制图系统。系统基于 C/S 架构,使用 PostGIS 数据管理引擎和 USGS ISIS3 开源工具库实现了月球专题数据的存储、转换和管理,使用 iObjects .NET 组件工具实现了月球专题数据的展示、检索、投影转换、专题符号制作、地图设计与打印,以及系统管理等功能,并使用系统完成了月球形貌专题图、月球空间环境专题图的制作。

关键词:月球专题图; SuperMap iObjects; 组件式 GIS 开发;

NO.133

**Cavity mode wave frequency variation associated with inward
motion of the magnetopause during interplanetary shock
compression**

Dianjun Zhang^{1,2}, Wenlong Liu^{1,2*}, Zhao Zhang^{1,2}, Xinlin Li³, Theodore E Sarris^{3,4}, Jerry
Goldstein^{5,6}, Rezvov Dmitry⁷

1 School of Space and Environment, Beihang University, Beijing, China

2 Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing of MIIT,
Beihang University, Beijing China

3 Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado Boulder, Boulder, CO,
USA

4 Department of Electrical and Computer Engineering, Democritus University of Thrace, Xanthi,
Greece

5 Space Science and Engineering Division, Southwest Research Institute, San Antonio, Texas,
USA

6 Department of Physics and Astronomy, University of Texas San Antonio, Texas, USA

7 Arctic and Antarctic Research Institute, St.Petersburg, Russia

*Correspondence to: Wenlong Liu (liuwenlong@buaa.edu.cn)

Abstract: A cavity mode wave, referring to a trapped or radially standing fast mode wave between different magnetospheric boundaries, has been developed in theory and reported in observation studies. In this study, we present an interplanetary shock (IPS)-induced cavity mode wave event observed outside the plasmasphere on 31 August 2017 with multispacecraft measurements. The phase delay of 90 degrees between the azimuthal electric field and compressional magnetic field indicates that the fast-mode wave triggered by the IPS is a standing wave, presumably radially trapped in the cavity between the magnetopause and plasmopause. Taking advantage of the location of VAP-B spacecraft right outside the plasmopause and the AARI ground-based high-latitude array mapped in the noon sector, it is suggested that the

observed compressional wave associates to cavity mode with its inner boundary at the plasmopause and its outer boundary at the magnetopause. The peak frequency of the wavelet spectrum of the compressional magnetic field increases from 10.5 to 12.5 mHz, which is consistent with the theoretically calculated cavity eigenfrequencies before and after the IPS. We also provide the first evidence that the peak frequency of the cavity mode increases due to the inward motion of the magnetopause during IPS compression.

NO.134

小行星深空探测中的行星保护概况

马珺, 张兰涛, 尹钊, 徐侃彦*,

中国空间技术研究院, 北京空间飞行器总体设计部, 载人航天微生物实验室, 北京 1000194

为了深空探索过程中避免地球和地外星球之间微生物和生命体的交叉性污染, 行星保护将具体实施前向污染防护和后向污染防护。空间研究委员会根据飞行任务的目标和飞行任务的类型(飞越、轨道器或着陆器)界定了五个行星保护类别。值得关注的是, 所有的小行星深空探测中采样返回任务都属于第五类行星保护, 该类行星保护分为限制性返回和非限制性返回两种情况, 针对这两种返回情况的区分方法, 国际负责行星保护工作组确定了与其评估相关的六个参数, 其中包括液态水、能源物质、有机化合物、温度、辐射强度和地球流通物质, 并制定了六个问题, 根据回答这六个问题, 来判读第五类行星保护的限制性返回还是非限制性返回情况, 这将帮助我们确定小行星深空探测中探测器本身及其装备过程中的行星保护要求, 以及明确小行星采样返回样品的处理与操作方式。为了推动未来我国小行星深空探测中的行星保护实施进程, 本文介绍了第五类行星保护类别的判断方法与案例, 并提出了未来我国小行星探测任务中小行星保护的建议。

关键字: 小行星; 行星保护; 第五类行星保护

*为通讯作者, xukanyan@sina.com

NO.135

基于神经网络的3日Kp指数预报及事件归因分析

王听雨^{1,2}, 陈艳红², 刘四清², 罗冰显²

1 中国科学院大气物理研究所

2 中国科学院国家空间科学中心

Kp 指数在空间科学中有广泛的应用, 一方面它能反映地磁扰动状况, 另一方面 Kp 指数是电离层模型、大气密度模型和轨道预报等模型的输入参数。因此构建 Kp 指数预报模型将有利于这些模型或者参数化过程的进一步发展。目前国内 3 天尺度上的 Kp 指数预报仍然依赖于对太阳的观测以及预报员的经验判断, 没有可应用的预报模型。因此本文引入了 Kp 指数的历史信息, 重现性信息, 以及位于太阳风观测信息来构建一个神经网络模型, 用于进行 3 天较长时间序列的 Kp 指数预测。同时本文也引入了积分梯度算法, 从输入神经网络的初始状态和历史信息中提取出对预报 Kp 指数具有关键贡献的变量, 以此来提高预报系统的物理可解释性。

NO.136

基于聚类算法的空间暗弱目标检测

徐晨钰¹, 郑伟²

中国科学院国家空间科学中心 中国科学院复杂航天系统电子信息技术重点实验室, 北京 100190;

为保障空间安全, 远距离的空间目标监视预警具有重要意义。在远距离观测条件下, 目标能量表现微弱, 易受到来自环境和成像过程中的噪声污染, 最终造成多帧图像在接受面叠加后的有效点扩散函数形态发生变化, 难以显著的将目标与背景区分开。当前的目标检测方法大多针对的是边缘轮廓清晰、有明显纹理特征的自然图像, 而远距离观测时, 例如望远镜观测的星图、空间碎片等常常表现为点目标特征, 难以利用常规方法对其进行检测。针对上述问题, 本文提出一种基于聚类算法的暗弱点目标检测方法, 将聚类学习的方法与目标固有的空域特征相结合, 以解决暗弱点目标检测中目标特征稀缺的问题。首先对暗弱点目标在受到干扰后的多帧成像过程进行建模, 并对最终的成像结果进行了仿真实验, 然后将数据进行降维操作, 将原本的三维图转换为散点图, 而后进行两次离群点去除后送入聚类模型, 利用聚类算法识别出目标以及目标的中心位置。本文方法在仿真

数据上进行了实验,能够对信噪比 1 左右的点目标进行检测。随后又在真实数据上进行了实验,能够完成相同的效果,并与其他方法进行了比较,证明了本文方法的有效性和优越性。

本文的主要工作如下:

1、建立了暗弱目标成像模型,对暗弱目标在受到扰动后的多帧成像表现进行了仿真实验。

2、本文创新地将暗弱点目标检测建模为图形学中的离散点找中心的问题。利用图像中的点的分布关系,提取目标区域的点的距离特征,找出目标图像的中心,实现对暗弱点目标的检测。

关键词:点目标;聚类算法;机器学习;目标检测;低信噪比;暗弱目标