

梁宏,曹云昌,梁静舒,等,2020. 地基 GNSS 遥感探测气象应用. 中国地震,36(4):744~755.

地基 GNSS 遥感探测气象应用

梁宏¹⁾ 曹云昌¹⁾ 梁静舒¹⁾ 万晓敏²⁾ 赵盼盼^{1,3)}
涂满红¹⁾ 王海深¹⁾ 胡姮¹⁾

1) 中国气象局气象探测中心,北京 100081

2) 中国气象局数值预报中心,北京 100081

3) 成都信息工程大学,电子工程学院,成都 610225

摘要 全球导航卫星系统(GNSS)给定位、导航和授时服务带来了革命性变化,同时其 L 波段(1160~1610MHz)微波信号可用于全球覆盖、高时间分辨率的大气、海洋和陆表参数遥感探测。基于信号类型,GNSS 遥感可分为折射信号遥感和反射信号遥感两大类;基于探测平台,GNSS 遥感可分为地基 GNSS 遥感、空基 GNSS 遥感和天基 GNSS 遥感三大类。随着我国自主建设的北斗卫星导航系统全面建成,GNSS 遥感将迎来新的发展机遇和挑战。本文回顾近 20 年地基 GNSS 遥感探测在气象领域的应用进展,展望其在气象领域下一步可能的应用。

关键词: 地基 GNSS 遥感 气象应用 折射信号遥感 反射信号遥感

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0744-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

卫星定位、导航和授时(PNT)已成为现代社会经济活动所必需的服务。目前提供全球服务的导航卫星系统包括美国全球定位系统(GPS)、中国北斗卫星导航系统(BDS)、欧洲伽利略系统(Galileo)和俄罗斯格洛纳斯系统(GLONASS),提供区域服务的导航卫星系统包括日本准天顶卫星系统(QZSS)和印度区域导航卫星系统(IRNSS)等,提供 PNT 服务的导航卫星总数量达到了 120 余颗。全球导航卫星系统(GNSS)发射的 L 波段信号(1160~1610MHz)覆盖全球,为高精度与高时间分辨率的大气、海洋和陆表参数遥感提供了必要技术手段(Teunissen et al,2017)。

GNSS 遥感具有全天候、高精度、高时空分辨率、自校准和低成本等优点,近 20 年来一直是国际遥感应用研究热点。按信号传播方式,GNSS 遥感可分为折射信号遥感和反射信号遥感(万玮等,2016)。折射信号遥感受为通过测量 GNSS 卫星信号穿过大气层发生的折射估计大气参数,如大气可降水量(Bevis et al,1992)和电离层电子总含量(Wilson et al,1993)等。

[收稿日期] 2020-06-21; [修定日期] 2020-09-08

[项目类别] 中国气象局气候变化专项(CCSF202045)、国家自然科学基金(41971377、41804023、41961144015)、中国大陆环境构造监测网络工程项目和国家重点研发计划(2017YFC1501802)共同资助

[作者简介] 梁宏,男,1978 年生,正高级工程师,主要从事 GNSS/MET 研究。E-mail:liangh@ema.gov.cn

曹云昌,通讯作者,男,1968 年生,研究员,主要从事 GNSS 遥感应用研究。E-mail:caoyc@126.com

反射信号遥感是通过测量 GNSS 卫星信号到达地面时发生的反射估计地表参数,如积雪深度(Larson et al,2009)、土壤湿度(Masters et al,2004)和植被含水量(Wan et al,2015)等。按探测平台,GNSS 遥感可分为地基 GNSS 遥感、空基 GNSS 遥感和天基 GNSS 遥感。地基 GNSS 遥感是指将 GNSS 信号接收设备放在地球表面的遥感技术。地基 GNSS 遥感起步最早,已成为大气和地表参数遥感探测技术手段的重要组成部分。国内地基 GNSS 网络包括中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)(甘卫军等,2012)、中国气象局地基 GNSS 气象探测网络(Liang et al,2015)和北斗地基增强网络(李作虎等,2014)等。国际上的地基 GNSS 网络包括国际 GNSS 服务(IGS)基准站网、美国板块边界观测网络(PBO)(Herring et al,2016)、日本国土地理院地基 GNSS 站网(GEONET)(Kometani,2005)和欧洲地基 GNSS 站网(Jones et al,2020)等。空基 GNSS 遥感是将 GNSS 信号接收设备放置在飞机、气球或飞艇等平台的一种遥感手段,例如美国机载掩星事件探测系统 GISMOS(Garrison et al,2007)、美国和法国联合开展的球载掩星探测实验 STRATEOLE-2(Kalnajs et al,2020)。天基 GNSS 遥感系统是将 GNSS 信号接收设备放置在卫星平台的一种遥感技术。天基 GNSS 遥感系统包括中国 FY-3C/3D 掩星探测系统(廖蜜等,2015;Cai et al,2017)、中国台湾与美国联合发射的 COSMIC-1(Anthes et al,2008)和 COSMIC-2 掩星探测系统(Schreiner et al,2020)、欧洲 Metop 掩星探测系统(Von Engeln et al,2009)和美国 CYGNSS 系统(Ruf et al,2016)。我国自主建设的北斗卫星导航系统于 2020 年全面完成,GNSS 遥感将面临新的发展机遇和挑战。本文回顾近 20 年地基 GNSS 遥感探测在气象领域的应用进展,展望地基 GNSS 遥感在气象领域下一步可能的应用。

1 地基 GNSS 折射信号遥感

1.1 对流层遥感应用

水汽是主要的自然温室气体,约 60%~70%的大气变暖由大气水汽变化所导致(Romm,2016;Guerova et al,2016)。水汽还是大气中最活跃的成分,其垂直和水平输送、空间分布以及相态变化决定着暴雨、洪涝等灾害事件的发生。但由于水汽时间变化快速、空间分布复杂、主要集中在离地面 5km 高度以下,探空(时空分辨率低)、微波辐射计(降雨条件下无法正常探测)、卫星可见光和红外遥感(严重受云影响)、卫星微波遥感(复杂陆表特征导致陆地上准确性低)、天基 GNSS 掩星探测(对流层低层探测精度低)等手段均难以准确获取高时空分辨率的大气水汽信息(Wulfmeyer et al,2015)。地基 GNSS 具有全天候、均一性好和低成本等独特优势,能满足高精度大气水汽探测的需求,其探测的大气可降水量(PWV)时间分辨率可达分钟级,甚至秒级,精度可达 1~2mm(Wang et al,2019;Jones et al,2020)。最近 30 年地基 GNSS 遥感技术广泛应用于对流层水汽探测,事实证明该技术是目前大气水汽探测的最佳技术之一(Wulfmeyer et al,2015)。

1.1.1 临近天气预报应用

随着全球气候变暖,极端天气气候事件发生频率呈增加趋势(Romm,2016),极端降水是其中之一。极端降水往往伴随着强对流发生,常引发洪涝灾害,造成严重经济损失和人员伤亡。国内外有不少研究是基于地基 GNSS 网络观测的 PWV 对极端天气进行监测和预警(表 1)。总体上,地基 GNSS 反演的水汽场变化与极端降水的关联可归为 3 个方面(Guerova

表 1 地基 GNSS 遥感的 PWV 应用于临近天气预报

案例	天气类型	文献
中尺度系统	极端降水	Brenot et al, 2013; 张恩红等, 2015; Moore et al, 2015; Sapucci et al, 2019
雷暴	闪电	Mazany et al, 2002; Kehrer et al, 2008
天气尺度系统	干线、气旋、大气河	Seco et al, 2012; Guerova et al, 2016; Wang et al, 2019; Liang et al, 2020

et al, 2016): ①PWV 变化与降水强度显著相关(梁宏等, 2010; Liang et al, 2020); ②水汽分布密集区容易激发锋面系统生成(de Haan et al, 2002); ③水汽变化可作为局地对流和雷电活动的前兆因子(Kehrer et al, 2008; Liang et al, 2020)。研究发现, 对流活动与水汽空间分布特征密切相关, 且水汽输送带在地形强迫抬升作用下常激发局地对流和雷暴(Brenot et al, 2013; Neiman et al, 2013; Sapucci et al, 2019)。因此, Moore 等(2015)基于高空间分辨率的二维 PWV 分布图预判强对流的发生, 并提供临近预报服务。国外学者基于闪电定位观测、电场仪测量的电场强度、地基 GNSS 遥感的 PWV 等气象参数构建了雷电活动预报模型, 该预报模型可实现提前 2h 和 9h 的雷电预警, 在服务航天活动中取得了良好效果(Mazany et al, 2002; Kehrer et al, 2008)。临近预报的工具标准化和探测时效提高是地基 GNSS 遥感的水汽产品应用于短临预报的重要途径。

1.1.2 数值天气预报应用

初始场的真实程度对数值天气预报准确性至关重要(Lorenz, 1965)。资料同化是目前提高初始场准确度的主要手段, 即将实时的观测资料与以前各时刻的观测所提供的信息(通过数值天气预报模式)结合起来, 以产生精确的、与模式协调的分析场(秦大河等, 2004)。目前常用的观测资料同化技术包括最优插值、三维变分和四维变分等。在同化的过程中, 被同化的观测会同时改变一定区域范围内的数个有关的模式变量。观测本身存在误差, 即仪器误差和代表性误差, 后者源自观测所代表区域与数值模式所能分辨区域不完全一致。因此, 即使采用相同的数值预报模式, 由于对观测误差处理的方法不同, 会导致不同的观测资料同化应用效果(Rabier, 2005; Bonafoni et al, 2019)。新观测资料同化应用的难点在于, 必须在所有现已业务同化观测的贡献基础上对预报改进表现出正效果, 该新观测资料才有同化应用价值。随着数值预报的发展, 对观测精度的要求也越来越高(Benjamin et al, 2018)。

不少研究和业务应用(表 2)表明, 同化地基 GNSS 观测的对流层产品对提高数值天气预报水平有重要作用。英国气象局和法国气象局是欧洲较早实现地基 GNSS 观测(天顶对流层总延迟(ZTD)或 PWV)业务同化应用的机构, 且两机构都报道了同化 ZTD 观测对全球模式和区域模式的预报均有明显正效果(Guerova et al, 2016)。英国气象局最新评估还表明, 就单个观测对数值天气预报改进效果而言, ZTD 观测的贡献在目前所有同化的观测中排名第二, 仅次于海洋浮标观测(Jones et al, 2020)。法国气象局数值预报系统 AROME 对 ZTD 同化应用结果表明, 随着模式分辨率的提高, 观测站的稀疏半径明显缩短, 同化站点数量提高了数倍(Moll et al, 2008)。在匈牙利 AROME 系统中, ZTD 观测的贡献在所有关于湿度的观测中最大(Guerova et al, 2016)。目前, 美国、日本和韩国等国的气象机构均把 ZTD 或 PWV 资料作为业务同化观测之一。在国内也有不少关于 ZTD 或 PWV 同化的研究或业务应用试验。基于我国自主研发的业务数值天气预报模式 GRAPES_RAFS 试验表明, 同化国内

表 2 地基 GNSS 对流层产品在数值天气预报模式中的同化应用

模式名称	同化观测	同化方法	机构	参考文献
NAE,UK4,UKV	ZTD	三维变分,四维变分	英国气象局	Bennitt et al,2012,2017;Jones et al,2020
RUC	PWV	最优插值	美国国家环境预报中心	Smith et al,2007
MM5	SPD*	四维变分	德国地学研究中心	Zus et al,2011GRAPES_RAFS,
GRAPES_GFS	PWV	三维变分,四维变分	中国气象局	Liang et al,2015;黄丽萍等,2017;本文
GSM/MSM	ZTD,PWV	四维变分	日本气象厅	Nakamura et al,2004;JMA,2019
LDAPS	ZTD	三维变分	韩国气象厅	Kim et al,2017
BJ-RUC	ZTD	三维变分	北京市气象局	仲跻芹等,2017
GDPS	ZTD	四维变分	加拿大环境与气候变化中心	Macpherson et al,2019AROME,
ERPEGE	ZTD	三维变分,四维变分	法国气象局	Guerova et al,2016;Hdidou et al,2020
HAROMIE	ZTD	三维变分	西班牙气象局	Arriola et al,2016

注:SPD*表示对流层斜路径延迟。

地基 GNSS 网的 PWV 产品后,小雨、中雨和大雨的预报水平均有明显改进(Liang et al,2015;黄丽萍等,2017)。中国气象局数值预报中心的 GRAPES 区域和全球模式分别于 2015 年和 2018 年实现了 PWV 观测业务同化应用,同化均基于三维变分技术。随着观测质量提升和数据处理算法的改进,2019 年 GRAPES 区域和全球模式每频次同化 PWV 观测数量约 5000 条,较往年提升了 10 倍,观测资料合格站点同化率超过 90%。最新基于四维变分同化的 GRAPES-GFS 全球同化预报系统批量实验结果表明,同化 PWV 观测后,北半球和东亚地区高度场和湿度场分析有所改善,7 天预报的东亚地区 500hPa 高度场距平相关系数提高,北半球和东亚地区 500hPa 高度场均方根误差减小。

基于小时快速更新循环系统可实现 ZTD 和 PWV 等产品的快速同化应用,该应用可称为基于数值预报模式的临近预报,要求 ZTD 和 PWV 等观测在半小时内或实时获取(de Haan,2013)。目前,欧洲 75%的气象机构实现了 1h 内提供 ZTD 产品(Jones et al,2020),日本和美国均实现了观测后 5min 内提供 ZTD 和 PWV 等业务化产品。目前中国气象局业务的 ZTD 和 PWV 产品为 1h 内提供,主要受限于原始观测数据的获取时效,未来通过升级地基 GNSS 观测传输网络,可实现 5min 内提供 ZTD 和 PWV 观测产品。

1.1.3 卫星遥感和探空观测检验以及气候变化研究

地基 GNSS 遥感探测的 PWV 通常作为基准,广泛应用于检验探空观测(梁宏等,2012;Zhang et al,2017、2019)、再分析资料(Zhang et al,2017、2018)、卫星遥感(Lu et al,2011;Mears et al,2018)等估计 PWV 的精度。相对于探空观测(通常每天探测 2 次),地基 GNSS 可多提供几十倍的 PWV 观测量,非常适合卫星遥感观测检验。我国地基 GNSS 遥感 PWV 产品为卫星观测改进做出了重要贡献。梁宏等(2006)基于青藏高原地基 GNSS 观测的 PWV,检验了美国 NASA 发布的 MODIS 卫星水汽产品,发现了该卫星水汽产品结果明显偏低,原因是估计算法有误,促使 NASA 及时改正估计算法。胡姮等(2018)基于青藏高原地基 GNSS 遥感观测的 PWV,检验了我国风云三号卫星遥感的 PWV 产品,发现风云三号 PWV 产品明显偏低。该结果帮助风云三号卫星 PWV 产品发布单位找出反演算法的不足,并改进卫星遥感产品。还有学者基于地基 GNSS 观测验证了静止卫星遥感的水汽产品,如

Birkenheuer 等(2005)比较了美国 GOES 卫星与地基 GNSS 遥感的 PWV。目前,我国地基 GNSS 遥感的 PWV 产品已成为气象卫星遥感相关产品检验的重要参考数据源。

水汽是基本的气候变量,地基 GNSS 探测技术是世界气象组织(WMO)全球气候观测系统(GCOS)计划重点推荐的水汽探测手段(GCOS,2015、2016)。地基 GNSS 遥感探测 PWV 始于 20 世纪 90 年代中期,目前已有 20 余年的观测积累,已初步用于气候变化研究(Guerova et al,2016;Jones et al,2020)。传统关于 PWV 长期变化是基于探空观测实现的,为了消除传感器换型带来的湿度探测误差,Dai 等(2011)提出了与传感器型号无关的历史探空观测数据均一化处理办法,基于该方法均一化的探空湿度时间序列得到了较好检验(Zhao et al,2012)。Zhang 等(2019)基于这一套数据分析了我国 PWV 变化趋势,结果表明 1991~2012 年我国 PWV 基本呈显著增加趋势,华南地区增加趋势最明显。同时,Zhang 等(2019)开发了基于地基 GNSS 遥感 PWV 订正探空 PWV 的方法,并用于我国 PWV 变化特征研究,结果表明 1991~2012 年我国 PWV 基本呈显著减少趋势。显然,由于探空观测固有的不均一性缺点,导致基于不同均一化算法得出的 PWV 变化趋势有明显分歧。为了解决探空观测不均一的问题,世界气象组织(WMO)将地基 GNSS 遥感列为 GCOS 系统高空基准观测网络(GRUAN)中的首选观测,并发布了观测指南(Shoji et al,2012)。虽然如此,天线和天线罩更换以及多路径效应对地基 GNSS 观测的 PWV 时间序列均一性有一定影响(Vey et al,2009)。Ning 等(2012)指出,在数据解算过程中采用较高的卫星截止高度角(如 25°),有利于消除多路径严重站点 PWV 的不一致性。因此,基于地基 GNSS 遥感反演的 PWV 时间序列需经过均一化处理之后,才能用于气候变化研究(Ning et al,2016;Klos et al,2018;Jones et al,2020)。

1.2 电离层遥感应用

空间天气是指太阳活动引起的日地空间环境,尤其是地球磁层和电离层中的扰动现象,这种扰动可能会引起地球空间环境的灾变,直接影响空间和地面现代技术系统正常运行,甚至危害人类健康(秦大河等,2004)。另外,台风、地震、海啸和火山爆发等自然灾害以及火箭发射等人为活动均可能导致电离层异常,从而电离层变化成为重大自然灾害预警预报和人类活动监测的一种潜在手段(姚宜斌等,2017;袁廷斌等,2017)。因此,可靠的电离层监测、预警和预报服务是现今社会经济活动所必要的。近 20 年地基 GNSS 遥感已成为电离层电子浓度变化监测以及有关空间天气事件影响研究的重要技术手段(Teunissen et al,2017)。李强等(2012)基于陆态网络开展了有关磁暴期间电离层扰动形态、大尺度电离层扰动、太阳耀斑导致的电离层骚扰以及低纬电离层不规则体结构等方面的电离层空间天气监测与应用研究。中国气象局国家空间天气监测预警中心负责我国及周边地区电离层电子总含量(TEC)业务监测和预警服务,定期发布 TEC 空间分布图等产品,为国内外航空(包括国际民航组织)、航天活动以及人类健康等提供空间环境监测和预警服务。中国气象局地基 GNSS 气象探测网络和陆态网络观测是该预警中心日常 TEC 等业务产品制作的基础数据源。

TEC 梯度监测对于无线电通讯、电力传输、精确定位、导航和生命安全等有重要意义(Teunissen et al,2017)。TEC 梯度异常具有时空特性,包括时间上和空间上的异常,电离层闪烁是 TEC 梯度时间异常的一个典型例子。Luo 等(2020)基于常规大地测量型接收机的 1Hz 观测数据,构建了电离层振幅闪烁指数(S_{4c}),该指数与传统电离层闪烁监测接收机提供

的振幅闪烁指数(S_4)具有较好的一致性,并应用于日落之后超级等离子体空腔结构导致的电离层闪烁监测,为目前大规模布设的大地测量型接收机应用于电离层闪烁监测提供了新的技术手段。对流层与电离层耦合机制也是地基 GNSS 观测应用研究方向之一,例如台风对电离层的扰动影响(Bauer, 1958;肖赛冠等, 2006;Ke et al, 2019)。台风可激发重力波,上传到电离层高度,从而对电离层产生扰动。毛田等(2009)利用我国地基 GNSS 观测资料分析了 2005 年台风“麦莎”对电离层 TEC 的影响,结果表明,在登陆前一天台风及其周边区域的 TEC 与月中值的差值可超出 5TECU。Lou 等(2019)基于陆态网络地基 GNSS 观测和卫星观测等数据,研究了台风活动与电离层不规则体活动之间的关联机制。

2 地基 GNSS 反射信号遥感

地基 GNSS 信号除了可以用于对流层和电离层遥感探测之外,还可以用于陆表参数探测,例如积雪深度、土壤湿度和植被含水量等。其原理是直接到达天线的折射信号与经地面反射后到达天线的信号叠加,形成干涉,即形成多路径信号,多路径信号的信噪比(SNR)可表示为振幅、天线相位中心距地面的高度、信号波长、反射角、相位、地表粗糙度和地表介电常数的函数(Larson et al, 2009)。虽然大地测量型天线具有抑制反射信号的功能,但卫星高度角低于 30° 时如果地面较为平坦,天线仍能接收到较强的反射信号。通过分离多路径信号的 SNR 可获得反射信号的 SNR,基于一定假设,采用最小二乘法即可估计振幅、天线相位中心离地面高度和相位,其中振幅变化与植被含水量密切相关,天线相位中心离地面高度与积雪深度密切相关,相位变化则与土壤湿度密切相关。地基 GNSS 反射信号的反射区域(即菲涅尔带)是一个狭长的椭圆,当天线相位中心离地面的高度和卫星高度角分别为 2m 和 10° 时,菲涅尔带的长度约为 20m。由于 GNSS 卫星轨道倾角约为 55° ,导致在北半球天线北面存在一个反射信号空白区,总体而言,地基反射信号遥感(GNSS-R)的探测面积约为 1000m^2 (表 3),明显大于接触式站点观测的面积(小于 1m^2),空间上更适合与单格点探测面积约 100km^2 的卫星观测相匹配。从探测准确度来看,地基反射信号遥感(GNSS-R)的积雪深度和土壤湿度的准确度可达 4cm 和 $0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$,比较接近于传统地面接触式探测的精度,明显优于卫星遥感探测,具有较好的业务应用前景。

表 3 GNSS-R 探测精度与其他观测手段比较

探测技术	探测范围	要素	准确度	文献
接触式站点探测	< 1m^2	积雪深度	1cm	中国气象局, 2020
		土壤含水量	$0.02\text{cm}^3/\text{cm}^3$	Miller et al, 2020
地基 GNSS-R	约 1000m^2	积雪深度	4cm	Larson et al, 2016
		土壤含水量*	$0.04\text{cm}^3/\text{cm}^3$	Larson et al, 2016
卫星遥感	约 100km^2	积雪深度	5~10cm	Jiang et al, 2014; Xiao et al, 2018
		土壤含水量	$0.04\sim 0.07\text{cm}^3/\text{cm}^3$	Kerr et al, 2016; Colliander et al, 2017

注: * 仅能探测地表层 5cm 深度的土壤含水量。

基于地基 GNSS 观测数据构建长时间积雪深度、土壤湿度和植被含水量等参数的长时间观测序列已成为国内外技术发展的趋势。Larson 等(2016)基于美国阿拉斯加 PBO 站点

的 GNSS 观测,开发了长达 14 年的积雪深度数据集,该数据集的时间一致性受观测仪器更换的影响较小,在气候变化对水资源供给影响和雪灾预防等方面具有重要应用价值。土壤类型和物理特性等复杂,土壤湿度空间变化大,即使在很小的区域(几十平方米)进行不同地点采样,其结果可能差别明显。地基 GNSS-R 土壤湿度探测技术较接触式站点观测具有更大的观测范围,在卫星土壤湿度产品精度检验方面具有一定的空间匹配优势。基于美国 PBO 站点 GNSS 观测反演的土壤湿度已应用于美国 SMAP、欧洲 SMOS 和 ASCAT 等卫星遥感土壤湿度产品检验(Larson et al, 2016; Chen et al, 2018)。Larson 等(2016)基于地基 GNSS-R 估计了反映植被含水量变化的归一化指数产品,并用于监测美国加州植被变化,发现该指数与年累计降水量有较好的对应关系,且时间分辨率可达逐日,较 MODIS 的植被指数产品更能清楚地反映植被生长的周期特征。

3 讨论与展望

地基 GNSS 遥感已成为气象探测的重要组成部分。目前,基于地基 GNSS 折射信号遥感探测的 PWV、ZTD 和 TEC 产品在临近天气预报、数值天气预报、气候变化研究和空间天气预警以及探空和卫星遥感观测检验等方面已实现较成熟的应用。在 10° 截止高度角的条件下, PWV 和 ZTD 反映的是以站点为中心、半径约 30km 倒圆锥体范围内水汽的平均变化,不能表示水汽分布各向异性特征。增加 ZTD 水平梯度估计,能更准确地描述站点上空水汽分布状况,尤其能有效反映大气干湿分布,对强对流预警有重要价值(Brenot et al, 2013),对人工影响天气也有潜在的应用价值。通常基于 ZTD、水平梯度、干/湿投影函数、水平梯度投影函数和后验残差等,估计对流层斜路径延迟(SPD)(Jones et al, 2020),然后基于三维层析技术反演大气折射率或湿度的三维空间分布。然而,三维层析技术需解决层析网格设计、SPD 反演算子设计、层析方程求解策略以及边界约束等问题(Guerova et al, 2016)。层析方程求解方法包括最小二乘法、卡曼滤波法和代数重构法等,即在附加一定先验信息(如数值天气预报模式分析场或探空观测等)的基础上,基于纯数学的方法估计大气三维折射率或湿度分布信息。相比而言,基于数值天气预报模式变分同化,除了数学修正之外,还包括物理过程的约束,有利于构建更合理的三维水汽场,且更方便数值天气预报应用(Zus et al, 2015)。因此,地基 GNSS 对流层观测直接同化到数值天气预报系统,产生更精确的大气分析产品或预报产品,在此基础上进一步服务于天气预报、洪水预警、人工影响天气、气候变化研究以及实时导航和定位等是未来重要应用方向之一(Benjamin et al, 2018; Jones et al, 2020)。电离层遥感产品亦可通过模式同化实现更合理的 TEC 梯度和三维电子浓度分布估计(Teunissen et al, 2017)。

地基 GNSS-R 除了可探测积雪深度、土壤含水量和植被含水量外,还可用于探测土壤冻融(Chew et al, 2017)、雪面温度(Jin et al, 2014)、湖泊水位(Bai et al, 2015)、海面高度(Clarizia et al, 2016)、海冰变化(杨明华等, 2014; Strandberg et al, 2016)以及海风海浪(杨东凯等, 2019)等,多频点和多星座信号联合应用有望进一步提高 GNSS-R 的探测精度(Zhou et al, 2019)。密集地基 GNSS 站网为地基 GNSS-R 遥感提供了丰富的数据源,但地基 GNSS-R 遥感技术的应用受到一定条件的限制,例如要求具有较平坦的自然观测表面。因此,今后在建设地基 GNSS 站过程中,应充分考虑地基 GNSS 折射和反射信号遥感的技術特点,尽可能

在自然下垫面建设永久性的地基 GNSS 站,以提高单站观测的气象应用效益。

陆态网络和中国气象局地基 GNSS 气象探测网络在我国灾害天气监测、数值天气预报和空间天气预警中发挥了重要效益。目前,2 个网络总共站点数约 1000 站(Liang et al, 2015),随着我国服务气象应用的地基 GNSS 网络的进一步发展(包括自建、共建和共享站),在中国西部和东部有望实现平均站间距分别小于 100km 和 50km,东部超大城市区域有望实现平均站间距小于 25km,可明显提高对中小尺度天气系统和空间天气的探测能力,从而有效提升地基 GNSS 观测在气象服务中的贡献。

致谢:匿名审稿专家对本文提出了建设性的修改意见,在此表示衷心感谢。

参考文献

- 甘卫军,李强,张锐,等,2012. 中国大陆构造环境监测网络的建设与应用. 工程研究-跨学科视野中的工程,4(4):324~331.
- 胡姮,曹云昌,尹聪,等,2018. 青藏高原大气可降水量单站观测对比分析. 气象学报,76(6):1029~1039.
- 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验. 应用气象学报,28(1):25~37.
- 李强,宁百齐,赵必强,等,2012. 基于陆态网络 GPS 数据的电离层空间天气监测与研究. 地球物理学报,55(7):2193~2202.
- 李作虎,杨强文,吴海玲,等,2014. 北斗地基增强系统建设与产业化发展. 高科技与产业化,(10):59~65.
- 梁宏,刘晶森,李世,2006. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析. 自然资源学报,21(4):526~534,677.
- 梁宏,刘晶森,张人禾,等,2010. 拉萨河谷大气水汽日变化特征. 水科学进展,21(3):335~342.
- 梁宏,张人禾,刘晶森,等,2012. 青藏高原探空大气水汽偏差及订正方法研究. 大气科学,36(4):795~810.
- 廖蜜,张鹏,毕研盟,等,2015. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验. 气象学报,73(6):1131~1140.
- 毛田,王劲松,杨光林,等,2009. 台风“麦莎”对电离层 TEC 的影响. 科学通报,54(24):3858~3863.
- 秦大河,孙鸿烈,孙枢,等,2004. 中国气象事业发展战略研究:总论卷. 北京:气象出版社,1~125.
- 万玮,陈秀万,彭学峰,等,2016. GNSS 遥感研究与应用进展和展望. 遥感学报,20(5):858~874.
- 肖赛冠,郝永强,张东和,等,2006. 电离层对台风响应的全过程的特例研究. 地球物理学报,49(3):623~628.
- 杨东凯,王翔宇,刘建华,等,2019. 北斗反射信号海风海浪反演系统与实验. 电子与信息学报,41(2):317~323.
- 杨明华,曹云昌,2014. 基于 GNSS-R 的后续海冰观测实验. 全球定位系统,39(4):51~54,68.
- 姚宜斌,张顺,孔建,2017. GNSS 空间环境学研究进展和展望. 测绘学报,46(10):1408~1420.
- 袁运斌,霍星亮,张宝成,2017. 近年来我国 GNSS 电离层延迟精确建模及修正研究进展. 测绘学报,46(10):1364~1378.
- 张恩红,曹云昌,王晓英,等,2015. 利用地基 GPS 数据分析北京“7·21”暴雨水汽特征. 气象科技,43(6):1157~1163.
- 中国气象局,2020. 地面气象自动观测规范. 北京:中国气象局,1~152.
- 仲跻芹,Guo Y R,张京江,2017. 华北地区地基 GPS 天顶总延迟观测的质量控制和同化应用研究. 气象学报,75(1):147~164.
- Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al, 2008. The COSMIC/Formosat-3 mission: early results. Bull Amer Meteor Soc, 89(3): 313~334.
- Arriola J S, Lindskog M, Thorsteinsson S, et al, 2016. Variational bias correction of GNSS ZTD in the HARMONIE modeling system. J Appl Meteor Climatol, 55(5): 1259~1276.
- Bai W H, Xia J M, Wan W, et al, 2015. A first comprehensive evaluation of China's GNSS-R airborne campaign: part II—river remote sensing. Sci Bull, 60(17): 1527~1534.
- Bauer S J, 1958. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes. J Geophys Res, 63(1): 265~269.
- Benjamin S G, Brown J M, Brunet G, et al, 2018. 100 Years of progress in forecasting and NWP applications. Meteor Monogr, 59: 13.1~13.67.
- Bennett G V, Johnson H R, Weston P P, et al, 2017. An assessment of ground-based GNSS zenith total delay observation errors and

- their correlations using the Met Office UKV model. *Quart J Roy Meteor Soc*, **143**(707):2436~2447.
- Bennett G V, Jupp A, 2012. Operational assimilation of GPS zenith total delay observations into the Met Office numerical weather prediction models. *Mon Wea Rev*, **140**(8):2706~2719.
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al, 1992. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J Geophys Res*, **97**(D14):15787~15801.
- Birkenheuer D, Gutman S, 2005. A comparison of GOES moisture-derived product and GPS-IPW data during IHOP -2002. *J Atmos Oceanic Technol*, **22**(11):1838~1845.
- Bonafoni S, Biondi R, Brenot H, et al, 2019. Radio occultation and ground-based GNSS products for observing, understanding and predicting extreme events; a review. *Atmos Res*, **230**:104624.
- Brenot H, Neméghaire J, Delobbe L, et al, 2013. Preliminary signs of the initiation of deep convection by GNSS. *Atmos Chem Phys*, **13**(11):5425~5449.
- Cai Y R, Bai W H, Wang X Y, et al, 2017. In-orbit performance of GNOS on-board FY3-C and the enhancements for FY3-D satellite. *Adv Space Res*, **60**(12):2812~2821.
- Chen F, Crow W T, Bindlish R, et al, 2018. Global-scale evaluation of SMAP, SMOS and ASCAT soil moisture products using triple collocation. *Remote Sens Environ*, **214**:1~13.
- Chew C, Lowe S, Parazoo N, et al, 2017. SMAP radar receiver measures land surface freeze/thaw state through capture of forward-scattered L-band signals. *Remote Sens Environ*, **198**:333~344.
- Clarizia M P, Ruf C, Cipollini P, et al, 2016. First spaceborne observation of sea surface height using GPS-Reflectometry. *Geophys Res Lett*, **43**(2):767~774.
- Colliander A, Jackson T J, Bindlish R, et al, 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sens Environ*, **191**:215~231.
- Dai A G, Wang J H, Thorne P W, et al, 2011. A new approach to homogenize daily radiosonde humidity data. *J Climate*, **24**(4):965~991.
- de Haan S, van der Marel H, Barlag S, 2002. Comparison of GPS slant delay measurements to a numerical model; case study of a cold front passage. *Phys Chem Earth Parts A/B/C*, **27**(4~5):317~322.
- de Haan S, 2013. Assimilation of GNSS ZTD and radar radial velocity for the benefit of very-short-range regional weather forecasts. *Quart J Roy Meteor Soc*, **139**:2097~2107.
- Garrison J L, Walker M, Haase J, et al, 2007. Development and testing of the GISMOS instrument. In: *Proceedings of 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Barcelona, Spain; IEEE, **2007**:5105~5108.
- GCOS, 2015. Status of the global observing system for climate. WMO/GCOS-195, 1~373 (2020-06-21). <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/status-of-global-observing-system-climate>.
- GCOS, 2016. The global observing system for climate: implementation needs. WMO/GCOS-200 (GOOS-214), 1~341 (2020-11-12). <https://public.wmo.int/en/resources/library/global-observing-system-climate-implementation-needs>.
- Guerova G, Jones J, Douša J, et al, 2016. Review of the state of the art and future prospects of the ground-based GNSS meteorology in Europe. *Atmos Meas Tech*, **9**(11):5385~5406.
- Hdidou F Z, Mordane S, Moll P, et al, 2020. Impact of the variational assimilation of ground-based GNSS zenith total delay into AROME-Morocco model. *Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr*, **72**(1):1~13.
- Herring T A, Melbourne T I, Murray M H, et al, 2016. Plate boundary observatory and related networks; GPS data analysis methods and geodetic products. *Rev Geophys*, **54**(4):759~808.
- Jiang L M, Wang P, Zhang L X, et al, 2014. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China. *Sci China Earth Sci*, **57**(6):1278~1292.
- Jin S G, Najibi N, 2014. Sensing snow height and surface temperature variations in Greenland from GPS reflected signals. *Adv Space Res*, **53**(11):1623~1633.
- JMA, 2019. Data Assimilation Systems. 1~38 (2020-06-21). https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2019-nwp/pdf/outline2019_02.pdf.

- Jones J, Guerova G, Douša J, et al, 2020. Advanced GNSS Tropospheric Products for Monitoring Severe Weather Events and Climate. COST Action ES1206 Final Action Dissemination Report. New York: Springer, 1~577.
- Kalnajs L, Haase J, Alexander M J, et al, 2020. Investigating the tropical tropopause layer and lower stratosphere with lagrangian long-duration balloon borne platforms during stratéole 2 (2020-06-21). https://igpppublic.ucsd.edu/~jhaase/strateole2/strateole2_whitepaper_v10.pdf.
- Ke F Y, Wang J L, Tu M H, et al, 2019. Characteristics and coupling mechanism of GPS ionospheric scintillation responses to the tropical cyclones in Australia. *GPS Solut*, **23**(2):34.
- Kehrer K, Graf B, Roeder W P, 2008. Global Positioning System (GPS) precipitable water in forecasting lightning at spaceport Canaveral. *Wea Forecasting*, **23**(2):219~232.
- Kerr Y H, Al-Yaari A, Rodriguez-Fernandez N, et al, 2016. Overview of SMOS performance in terms of global soil moisture monitoring after six years in operation. *Remote Sens Environ*, **180**:40~63.
- Kim E H, Lee E, Lee Y H, et al, 2017. Assimilation of GNSS data in KMA NWP models (2020-06-21). <https://cpaess.ucar.edu/meetings/cosmic-2017/abstracts/assimilation-gnss-data-kma-nwp-models>.
- Klos A, Hunegnaw A, Teferle F N, et al, 2018. Statistical significance of trends in zenith wet delay from re-processed GPS solutions. *GPS Solut*, **22**(2):51.
- Kometani T, 2005. GPS Earth observation network system. *J Japan Soc Precis Eng*, **71**(11):1339~1343.
- Larson K M, Gutmann E D, Zavorotny V U, et al, 2009. Can we measure snow depth with GPS receivers? *Geophys Res Lett*, **36**(17):L17502.
- Larson K M, Small E E, 2016. Estimation of snow depth using L1 GPS signal-to-noise ratio data. *IEEE J Sel Topics Appl Earth Observ Remote Sens*, **9**(10):4802~4808.
- Liang H, Cao Y C, Wan X M, et al, 2015. Meteorological applications of precipitable water vapor measurements retrieved by the national GNSS network of China. *Geod Geodyn*, **6**(2):135~142.
- Liang H, Zhang Y, Cao L J, et al, 2020. Temporal relations between precipitable water vapour and precipitation during wet seasons based on nearly two decades of data from the Lhasa River valley, Tibetan Plateau. *Int J Climatol*, **40**(3):1656~1668.
- Lorenz E N, 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, **17**(3):321~333.
- Lou Y D, Luo X M, Gu S F, et al, 2019. Two typical ionospheric irregularities associated with the tropical cyclones Tembin(2012) and Hagibis(2014). *J Geophys Res:Space Phys*, **124**(7):6237~6252.
- Lu N, Qin J, Yang K, et al, 2011. On the use of GPS measurements for Moderate Resolution Imaging Spectrometer precipitable water vapor evaluation over southern Tibet. *J Geophys Res*, **116**(D23):D23117.
- Luo X M, Gu S F, Lou Y D, et al, 2020. Amplitude scintillation index derived from C/N_0 measurements released by common geodetic GNSS receivers operating at 1Hz. *J Geod*, **94**(2):27.
- Macpherson S, Laroche S, 2019. Estimation of ground-based GNSS zenith total delay temporal observation error correlations using data from the NOAA and E-GVAP networks. *Quart J Roy Meteor Soc*, **145**(719):513~529.
- Masters D, Axelrad A, Katzberg S, 2004. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02. *Remote Sens Environ*, **92**(4):507~520.
- Mazany R A, Businger S, Gutman S I, et al, 2002. A lightning prediction index that utilizes GPS integrated precipitable water vapor. *Wea Forecasting*, **17**(5):1034~1047.
- Mears C A, Smith D K, Ricciardulli L, et al, 2018. Construction and uncertainty estimation of a satellite-derived total precipitable water data record over the world's oceans. *Earth Space Sci*, **5**(5):197~210.
- Miller J D, Gaskin G J, 2020. ThetaProbe ML2x principles of operation and applications, Macaulay Land USE Research Institute, Cambridge, UK, 1~20(2020-06-21). <http://www.environment.co.jp/ImpPro/DeltaT/DeltaThetaOperation.pdf>.
- Moll P, Poli P, Ducrocq V, 2008. Use of ground based GNSS data in NWP at Météo-France, e-GVAP expert team meeting(2020-06-21). <http://egvap.dmi.dk/workshop/5-assimilation-meteo-france-Moll.pdf>.
- Moore A W, Small I J, Gutman S I, et al, 2015. National weather service forecasters use GPS precipitable water vapor for enhanced situational awareness during the Southern California summer monsoon. *Bull Amer Meteor Soc*, **96**(11):1867~1877.

- Nakamura H, Koizumi K, Mannoji N, 2004. Data Assimilation of GPS precipitable water vapor into the JMA mesoscale numerical weather prediction model and its impact on rainfall forecasts. *J Meteor Soc Japan*, **82**(1B):441~452.
- Neiman P J, Hughes M, Moore B J, et al, 2013. Sierra Barrier Jets, Atmospheric rivers, and precipitation characteristics in Northern California: a composite perspective based on a network of wind profilers. *Mon Wea Rev*, **141**(12):4211~4233.
- Ning T, Elgered G, 2012. Trends in the atmospheric water vapor content from ground-based GPS: the impact of the elevation cutoff angle. *IEEE J Sel Topics Appl Earth Observ Remote Sens*, **5**(3):744~751.
- Ning T, Wickert J, Deng Z, et al, 2016. Homogenized time series of the atmospheric water vapor content obtained from the GNSS reprocessed data. *J Climate*, **29**(7):2443~2456.
- Rabier F, 2005. Overview of global data assimilation developments in numerical weather-prediction centres. *Quart J Roy Meteor Soc*, **131**(613):3215~3233.
- Romm J, 2016. *Climate Change: What Everyone Needs to Know*. New York, United States: Oxford University Press, 1~329.
- Ruf C S, Atlas R, Chang P S, et al, 2016. New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection. *Bull Amer Meteor Soc*, **97**(3):385~395.
- Sapucci L F, Machado L A T, de Souza E M, et al, 2019. Global Positioning System precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: a potential application to nowcasting. *Meteor Appl*, **26**(1):49~63.
- Schreiner W S, Weiss J P, Anthes R A, et al, 2020. COSMIC -2 radio occultation constellation: first results. *Geophys Res Lett*, **47**(4):e2019GL086841.
- Seco A, Ramfrez F, Serna E, et al, 2012. Rain pattern analysis and forecast model based on GPS estimated atmospheric water vapor content. *Atmos Environ*, **49**:85~93.
- Shoji Y, Braun J, Wang J H, et al, 2012. GRUAN Ground-based GNSS Site Guidelines (v1.0). GRUAN-TD-6, 1~26 (2020-06-21). <http://www.gruan.org/documentation/gruan/td/gruan-td-6/>.
- Smith T L, Benjamin S G, Gutman S I, et al, 2007. Short-range forecast impact from assimilation of GPS-IPW observations into the rapid update cycle. *Mon Wea Rev*, **135**(8):2914~2930.
- Strandberg J, Hobiger T, Haas R, 2016. Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data. *Radio Sci*, **51**(8):1286~1296.
- Teunissen P J G, Montenbruck O, 2017. *Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Cham: Springer, 1~1327.
- Vey S, Dietrich R, Fritsche M, et al, 2009. On the homogeneity and interpretation of precipitable water time series derived from global GPS observations. *J Geophys Res*, **114**(D10):D10101.
- Von Engeln A, Healy S, Marquardt C, et al, 2009. Validation of operational GRAS radio occultation data. *Geophys Res Lett*, **36**(17):L17809.
- Wan W, Larson K M, Small E E, et al, 2015. Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content. *GPS Solut*, **19**(2):237~248.
- Wang M H, Wang J X, Bock Y, et al, 2019. Dynamic mapping of the movement of landfalling atmospheric rivers over Southern California with GPS data. *Geophys Res Lett*, **46**(6):3551~3559.
- Wilson B D, Mannucci A J, 1993. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data. In: *Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Salt Lake City, 1343~1351.
- Wulfmeyer V, Hardesty R M, Turner D D, et al, 2015. A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles. *Rev Geophys*, **53**(3):819~895.
- Xiao X X, Zhang T J, Zhong X Y, et al, 2018. Support vector regression snow-depth retrieval algorithm using passive microwave remote sensing data. *Remote Sens Environ*, **210**:48~64.
- Zhang W X, Lou Y D, Cao Y C, et al, 2019. Corrections of radiosonde-based precipitable water using ground-based GPS and applications on historical radiosonde data over China. *J Geophys Res*, **124**(6):3208~3222.
- Zhang W X, Lou Y D, Haase J S, et al, 2017. The Use of Ground-based GPS precipitable water measurements over China to assess radiosonde and ERA-Interim moisture trends and errors from 1999 to 2015. *J Climate*, **30**(19):7643~7667.
- Zhang W X, Lou Y D, Huang J F, et al, 2018. Multiscale variations of precipitable water over China based on 1999~2015 ground-

- based GPS observations and evaluations of reanalysis products. *J Climate*, **31**(3):945~962.
- Zhao T B, Dai A G, Wang J H, 2012. Trends in tropospheric humidity from 1970 to 2008 over China from a homogenized radiosonde dataset. *J Climate*, **25**(13):4549~4567.
- Zhou W, Liu L L, Huang L K, et al, 2019. A new GPS SNR-based combination approach for land surface snow depth monitoring. *Sci Rep*, **9**(1):3814.
- Zus F, Wickert J, Bauer H S, et al, 2011. Experiments of GPS slant path data assimilation with an advanced MM5 4DVAR system. *Meteor Z*, **20**(2):173~184.
- Zus F, Dick G, Heise S, et al, 2015. A forward operator and its adjoint for GPS slant total delays. *Radio Sci*, **50**(5):393~405.

A Review of the Ground-based GNSS Remote Sensing in Meteorological Applications

Liang Hong¹⁾ Cao Yunchang¹⁾ Liang Jingshu¹⁾ Wan Xiaomin²⁾ Zhao Panpan^{1,3)}
Tu Manhong¹⁾ Wang Haishen¹⁾ Hu Heng¹⁾

1) Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2) Numerical Weather Prediction Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

3) School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

Abstract Global Navigation Satellite System (GNSS) has revolutionized the positioning, navigation and timing service for modern social activities. The L-band signals(1160~1610 MHz) emitted from GNSS satellites are available all over the world and can be used to retrieve the physical parameters related to atmosphere, ocean and land surface with high temporal and spatial resolutions. Based on signal types, the concepts of GNSS remote sensing include two categories, i.e. GNSS refractometry and GNSS reflectometry (GNSS-R). These concepts can also be classified into three categories: ground-based GNSS remote sensing, airborne GNSS remote sensing and spaceborne GNSS remote sensing based on different platforms. As the third generation of China Beidou GNSS system started to provide full service in summer of the year 2020, the GNSS users around the world may have more opportunities as well as face more challenges on further exploiting the multi-GNSS(GPS, BDS, GLONASS and Galileo) signals in civil service. In this study we make a comprehensive review of ground-based GNSS remote sensing for meteorological applications including weather nowcasting, numerical weather prediction, climate change, space weather monitoring and validations of satellite and radiosonde observations during recent two decades.

Keywords: Ground-based GNSS; Remote sensing; Meteorological application; Refractometry; Reflectometry