

GPS 掩星观测的发展及其在气象业务中的应用现状^{* 1}

马再忠^{1,2} 郭英华² 王 斌¹

MA Zaizhong^{1,2} KUO Ying-Hwa² WANG Bin¹

1. 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学国家重点实验室(LASG), 北京, 100029

2. 美国国家大气研究中心, 中小尺度实验室(NCAR, MMM Division), CO 80301, USA

1. *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100029, China*

2. *National Center for Atmospheric Research, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, Boulder, CO 80301, USA*

2009-01-05 收稿, 2009-03-12 改回.

Ma Zaizhong, Kuo Ying-Hwa, Wang Bin, 2011. The GPS radio occultation data and its current operational applications to the numerical weather prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(1):208-218

Abstract The Global Position System (GPS) radio occultation technique has emerged as a powerful and relatively inexpensive approach to sounding the global atmosphere in all weathers. As demonstrated by the proof-of-concept GPS meteorology (GPS/MET) experiment and more recently by the CHAMP and SAC-C missions, the GPS radio occultation (RO) sounding data are shown to be of high precision, accuracy and vertical resolution. On 15 April 2006, as the joint U. S. -Taiwan COSMIC/FORMOSAT-3 (hereafter COSMIC) mission, a constellation of six microsattellites was successfully launched, marking the beginning of a new era of GPS atmospheric remote sensing. Under this background, we review the objectives and status of the GPS satellite missions and present highlights of the GPS RO data applications to weather research. Especially we describe in detail the operational assimilation of COSMIC data in the numerical weather prediction models.

Key words GPS occultation observation, COSMIC, Data assimilation

摘 要 GPS 无线电掩星探测技术已经发展成为一种强有力的、相对经济的观测全球大气的方法。多年对 GPS/MET 概念卫星、CHAMP 和 SAC-C 等 GPS 掩星观测的研究表明, GPS 掩星观测资料与其他卫星资料相比具有很高的观测精度和垂直分辨率等优点, 并且 GPS 掩星观测不受天气状况的影响, 因此对其在天气预报及气候的应用有独特的优势。GPS 无线电掩星探测技术的发展, 特别是 COSMIC/FORMOSAT-3(简称 COSMIC)的成功发射, 标志着 GPS 大气遥感观测进入了一个崭新的时代。正是在这样的背景下, 文中首先对整个 GPS 卫星的历史发展及其观测特点进行一个总体性的回顾, 然后考察了 GPS 掩星观测资料在天气预报研究中的应用问题, 进一步详细地讨论了在数值天气预报中 COSMIC 掩星的业务资料同化。

关键词 GPS 掩星观测, COSMIC, 资料同化

中图法分类号 P405

1 引 言

随着数值模式能力的不断提高, 数值天气预报对人类生活的指导作用也日益明显。对于数值天气

预报来讲, 它的准确性不仅决定于一个能精确表征大气动力和物理能力的数值模式, 而且也决定于一个合理准确的数值模式初始场。最优的模式初始场可以通过同化所有可用的观测资料来获得。当前,

* 资助课题: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906009)和基金委创新研究群体科学基金(40821092)。

作者简介: 马再忠, 主要从事 GPS 资料同化及其应用、三维/四维变分资料同化。E-mail: zma@ucar.edu, zmaucar@gmail.com

使用广泛的观测资料主要来自于两个方面:常规观测和卫星观测。相比于常规观测,卫星观测具有不受人影响,观测范围广等优点。随着科技的不断进步,卫星观测的准确性有了明显的提高,已经在数值业务预报中得到了广泛的应用,并显示了良好的预报效果。

在卫星观测中,全球卫星定位系统(GPS)无线电掩星遥感技术(Kursinski, et al, 2000)给我们提供了一种全新的大气探测方法。近些年来, GPS 大气探测(或 GPS 气象学)已经成为国际上 GPS 应用的热点问题。根据 GPS 卫星资料接收方式的不同,可分为地基和空基两个应用方式。地基就是将 GPS 信号接收机安装在地面上,可以全天候地接收来自于 GPS 发射机的无线电信号,进而达到观测局地大气信息的目的。当前,地基的研究和应用技术已基本成熟,并从技术研究走向业务应用。空基方面,国际上一些国家和地区发射了配备 GPS 接收机的低轨卫星,用于掩星观测地球大气状态。作为卫星气象学的一个重要组成部分, GPS 掩星观测所获得的稳定覆盖全球对流层和平流层的温度、气压、水汽和空间电子浓度等廓线资料,对气象预报、气候变化和空间天气的研究与应用都具有重要的价值(Anthes, et al, 2000)。

GPS 空基探测技术用于地球大气研究始于 1995 年第一颗低轨卫星 MicroLab-1 的发射(Ware, et al, 1996),之后相继发射了 CHAMP(德国)、SAC-C(阿根廷)等装载 GPS 接收机的低轨卫星。这些 GPS 掩星观测的密度不高,制约了 GPS 掩星观测在数值天气业务预报中的应用。但是随着 COSMIC/FORMOSAT-3(以下简称 COSMIC)(图 1)在 2006 年 4 月的成功发射,全球每天可以进行大约 2000 个无线电掩星观测(Kuo, et al, 1998; Anthes, et al, 2000; Rocken, et al, 2000; Anthes, et al, 2008),大大增加了 GPS 观测的密度,达到准业务应用水平。本文就是基于 GPS 卫星资料发展的这个背景,回顾 GPS 掩星观测技术和总结 GPS 掩星观测资料的特点,讲述 GPS 掩星观测测量,讨论 GPS 掩星观测资料同化的发展,对于 GPS 掩星观测资料当前在业务系统中的应用问题和发展前景进行一些探讨。

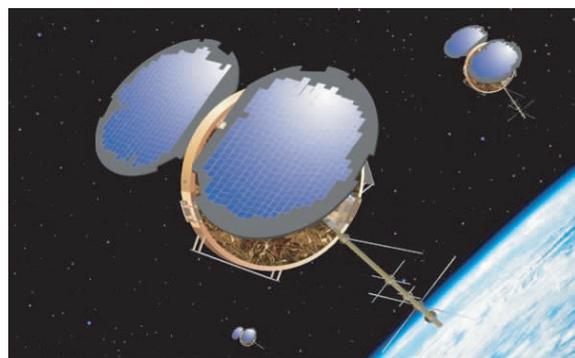


图 1 FORMOSAT-3/COSMIC 示意图
Fig. 1 Schematic diagram for the FORMOSAT-3/COSMIC mission

2 GPS 掩星资料观测技术及其特点

GPS 无线电掩星探测的根源可以追溯到早期的星际飞行探测技术上。在 20 世纪 60 年代初期,斯坦福大学和喷气推进实验室(英文简称 JPL)的一个科学团队将这种星际飞行探测技术应用到探测火星的大气及其相关属性上,无线电科学从此开始了星际探索的新篇章。在 GPS 掩星探测时代来临之前,将这种星际飞行探测技术应用到地球大气观测还是一个梦想。但是随着无线电观测技术的不断发展完善, JPL 实验室在 1988 年提出了第一个 GPS 掩星观测发展计划。虽然这个计划没有最后实行,但是它建立了 GPS 掩星探测地球大气的理念。在美国自然科学基金(NSF)的支持下,UCAR/NCAR 的科学家们在 1995 年成功地进行了 GPS 无线电掩星探测技术先驱性实验 GPS/MET(Ware, et al, 1996),并连续取得 2 年的 GPS 掩星观测资料。

GPS 无线电掩星探测技术主要是依据地球大气密度随高度的变化而引起无线电信号在穿过大气过程中产生的折射现象这个原理来探测大气状态及其属性的。GPS 卫星对地球大气的测量仪器包括安装在 GPS 星群上的发射机和安装在低轨卫星(Low Earth Orbiting, 简称 LEO)上的接收机两个部分。GPS 无线电信号首先从发射机发出(图 2),经过地球大气发生折射以后,只有当被安装在低轨卫星上的接收机接收到,才能完成一次 GPS 掩星观测,这个过程被称之为一次 GPS 掩星观测事件。根据 GPS 发射机和接收机的相对运动(“上升”或“下降”),一次 GPS 掩星观测事件能够完成一次对地球大气状态的垂直扫描过程(持续时间大约只需要

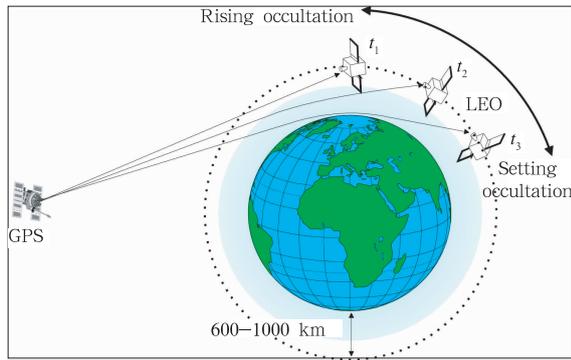


图2 GPS掩星事件示意图
Fig.2 Schematic diagram for GPS RO measurements

1—2 min),最后经过地面工作站进行资料处理,我们就可以得到GPS卫星对地球大气的一个垂直连续观测廓线信息。与其他卫星观测和常规观测相比,GPS掩星观测具有很多重要的观测属性,主要体现在以下几点(Anthes, et al,2000):

- (1) GPS观测不是获取点观测,而是获取射线路径的信息或沿其路径方向积分量的信息;
- (2) 具有很高的垂直分辨率(可达米级);
- (3) 云、雨等天气现象对GPS掩星观测的影响较小;
- (4) GPS掩星观测资料全球时空分布比较均匀;
- (5) 观测仪器长期稳定,无需进行误差偏离调整;
- (6) 间接测量大气热力状态,测量精度高,平均误差可达0.1 K;

(7) 廓线观测范围广,从大气层顶(100 km)到低层大气(多数观测可达接近地面1 km以内);

(8) 独立于其他卫星遥感观测,例如红外、微波等。

3 GPS掩星资料观测量

在探讨GPS掩星资料同化策略之前,我们首先需要清楚地了解GPS掩星资料的各种接收处理过程及其各种观测变量。关于GPS掩星观测资料的接收处理,许多科学家,比如Hardy等(1992)和Kuo等(2004)都进行了详细地论述,这里我们仅仅给出一个简要概括。图3是GPS掩星资料从无线电信号转换到实际大气变量观测资料的完整处理过程。在GPS无线电掩星观测过程中,GPS卫星连续发射两个L波段频率的无线电信号,分别为L1(1.57542 GHz,波长约为19 cm)和L2(1.2276 GHz,波长约为24.4 cm)。对于一次GPS掩星观测事件,在GPS接收机“上升”或“下降”的过程中,最初得到是两个频率(L1、L2)的电子信号的位相和振幅,然后这些观测能够被处理成各自在近地面点的折射角(α_1, α_2),通过电离层扣除订正处理,GPS因大气密度造成的折射角 α 就能够根据双频(L1和L2)无线电信号计算得到,该折射角被当作GPS/MET的原始观测。折射角与大气状况的关系是通过大气折射率来建立的。在大气球对称假设的前提下,就能够建立折射角 α 与折射率指数 n 的联系(Fjeldbo, et al, 1968,1971)

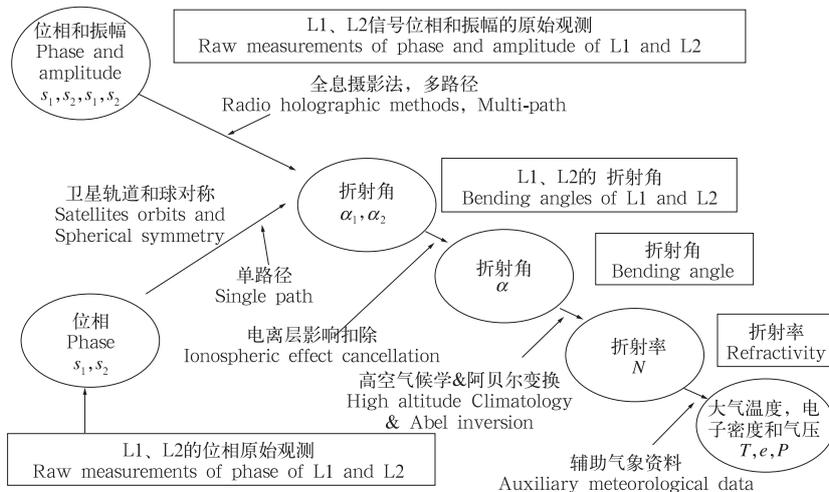


图3 GPS掩星观测资料观测链 (Syndergaard, 2006)

Fig.3 Illustration for the GPS radio occultation retrieval chain (from Syndergaard (2006))

$$\alpha(a) = -2a \int_a^{\infty} \frac{d \ln n(x)/dx}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx \quad (1)$$

这里 $x = rn(r)$ 是射线半径, $a = nr$ 是影响参数, r 是地球半径。通过阿贝尔变换,可以得到

$$n(x) = \exp\left(\frac{1}{p} \int_x^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da\right) \quad (2)$$

为了方便起见,通常采用大气折射率 N 而不是折射率指数 n 本身,其定义为

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (3)$$

最后通过大气折射率公式(Smith, et al, 1953)与地球大气变量联系起来

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{pq}{T^2(0.622 + 0.378q)} - 40.3 \times 10^6 \frac{n_e}{f^2} + 1.4W_w + 0.6W_i \quad (4)$$

其中 p 代表大气气压(单位: hPa), T 为大气温度(单位: K), q 代表比湿(单位: kg/kg)。 n_e 代表电离层电子密度(单位: m^{-3}), 也称之为电离层项, W_w 和 W_i 分别是大气中的液态水和冰晶项。由于在真实大气中,最后两项与前三项相比是小量,可以忽略不计。在电离层(60 km 以上)大气中,式(4)中的前两项也可以忽略不计,这样电离层电子密度 n_e 就能够从折射率测量中求出。对于中层大气以下,在扣除电离层的影响后只考虑前两项,式(4)可以简化为

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{pq}{T^2(0.622 + 0.378q)} \quad (5)$$

通过上述公式,就可以将 GPS 掩星观测折射率 N 与气象场中温度、湿度、气压等天气信息紧密地联系起来,进而达到观测大气状况的目的。

4 GPS 掩星资料同化

资料同化的目的是尽可能充分地选取观测资料的有用信息,并运用这些信息来优化模式变量(例如风、温度、湿度等)的初始场,进而达到提高天气预报水平的目的。在 GPS 掩星资料同化方面,由于所得到的 GPS 掩星观测主要是非常规观测资料(折射角、折射率等),所以主要采用三维、四维变分同化(Zou, et al, 2000; Healy, et al, 2006) 或集合卡尔曼滤波(EnKF)(Liu, et al, 2007)等方法直接同化 GPS 掩星观测资料。为了简单起见,这里仅仅以三维变分资料同化为例来描述 GPS 掩星资料的同化

过程。简单地讲,三维变分资料同化主要是对于一个包含有 GPS 卫星资料的观测算子进行极小化的过程

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}(x) - y)^T (\mathbf{O} + \mathbf{F})^{-1} (\mathbf{H}(x) - y) \quad (6)$$

这里 x 是需要求解的模式变量, x_b 是模式初猜场, y 是观测值,上标 T 表示矩阵转置,在此处就是要同化到初猜场中的 GPS 掩星观测信息(位相或折射角或反演的折射率或反演的大气温度、气压和湿度等)。 \mathbf{H} 代表将模式变量场从模式空间转换到观测空间的 GPS 观测算子(式(5)), \mathbf{B} 、 \mathbf{O} 和 \mathbf{F} 则分别代表背景场误差协方差、观测误差协方差和模式/观测算子的代表性误差矩阵。在 GPS 卫星资料同化中,根据 GPS 观测变量的不同,有很多 GPS 观测算子可供选择。经过很多科学家的努力(Eyre, 1994; Zou, et al, 1999; Kuo, et al, 2000; Syndergaard, et al, 2005),现在比较一致的看法是:直接同化折射角或折射率 N 是比较好的选择。但是根据不同的同化方法(三维变分、四维变分或集合卡尔曼等),在具体的 GPS 观测算子选择上,需要仔细考虑以下几点:(1)所要同化的 GPS 掩星观测变量尽可能地接近原始观测形式。这种做法的一部分原因是观测的误差结构可以简单地表述,另一部分原因是越是接近原始观测形式,观测变量应用的假设条件越少,观测值也就越准确;(2)所应用的观测算子要易于模拟 GPS 观测值;(3)GPS 观测算子的准确性(或者代表性);(4)GPS 观测算子的观测误差结构易于统计;(5)GPS 观测算子的代表性误差结构易于表征;(6)GPS 观测算子的计算代价问题,这一点对于 GPS 卫星资料业务化来讲尤其重要。

在 GPS 卫星资料同化中,根据计算的复杂程度,可以将各种观测算法归纳为 3 类:

(1) 复杂算法,主要包括射线追踪、射线打靶等算法。这类算法主要特点是根据 GPS 卫星(包括发射机和接收机)的实际运行情况,仔细考虑 GPS 射线信号的传播路径,进行相对很少的假设近似,进而求得 GPS 卫星观测和实际大气变量(温度、压强和湿度)的关系。这种方法同化的 GPS 卫星观测变量是折射角,Zou 等(1999)首次在 GPS 的三维变分资

料同化中采用了射线追踪法并发展了它的切线性和伴随算子, Liu 等(2003) 和 Healy 等(2006) 对射线追踪法进行了系统的检验和评估, 在模式分析和预报中都取得了很好的效果。

(2) 简单算法, 主要包括局地折射率和局地折射角等算法。相比于射线追踪法等复杂算法, 这类方法由于计算过程中近似程度大而具有易于发展、计算省时等优点, 同时计算精度不高的缺点也比较明显。特别是在气象场水平梯度大值区, 从模式模拟的 GPS 观测值会与真实的 GPS 观测值发生严重偏离, 大大降低了同化结果的精确度。

(3) 优化观测算法。对于 GPS 掩星资料同化而言, 射线追踪法因为精确考虑了 GPS 射线路径、发射机和接收机相对位置和速度等因素, 虽然计算精度很高, 但所需计算代价也很大, 难以满足业务预报的时效。为了平衡计算精度和计算代价之间的矛盾, 即在计算量增加不显著的前提下又尽可能地保持计算高准确度, 许多科学家近些年提出了很多优秀的计算方案, 比如 Poli 等(2004b) 提出的 Fargo 方案、Syndergaard 等(2005) 提出的 Refractivity Mapping 方案等。最近, Sokolovskiy 等(2005a, 2005b) 发展了一个非局地相延迟(本文简称 Non-local) 观测算子, 作为二维方案, 与射线追踪法相比, 既保持了较高的计算精度又大大节省了计算时间。

5 GPS 掩星资料在气象业务应用中的新方法

由于 GPS 掩星观测历史不长, 作为一种相对新型的卫星观测资料, GPS 掩星观测资料同化, 尤其是气象业务资料同化起步时间比较晚。在 2006 年 4 月 COSMIC 成功发射以前, GPS 卫星观测都是处于试验研究阶段。很多研究机构和气象业务部门都对 GPS 掩星资料同化进行了准业务测试, 其中包括 GPS 掩星资料质量控制、准确性和各种同化方法的选择。在 COSMIC 发射成功后, 由于 COSMIC 装载有 6 颗 GPS 接收机, 每天得到的 COSMIC GPS 掩星观测资料大量增加(可达 2000 个左右)。对 COSMIC GPS 资料初步的研究结果表明: 通过采用新的 GPS 信号处理技术, 与以前的 GPS 掩星观测资料相比, COSMIC GPS 资料不仅在质量上大有改善, 而且 COSMIC 观测大气的深度有了明显的提高

(大约 90% 的 GPS 观测廓线可以达到距离地面 1 km 以内), 以上这些优点为 COSMIC GPS 掩星资料业务化提供了有利条件。欧洲中心(ECMWF) 在 2006 年 12 月开始将 COSMIC 资料运用到业务预报中, 随后美国国家环境预报中心、英国气象局和法国气象局等相继在 2007 年 5 和 9 月将 COSMIC GPS 掩星资料业务化, 并取得了很好的正面效果。这些成果已经于 2007 年在美国 NCAR 举行的第 2 次 COSMIC 资料用户研讨会(Second FORMOSAT-3/COSMIC Data Users Workshop, 2007) 上发表。但是, 由于业务计算时效性等原因, 资料同化过程中大多采用简单省时、然而计算精度不高的 GPS 局地观测算子。因此, 在保证计算效率的前提下, 如何提高观测算子计算精度已经成为 GPS 业务资料同化中的重要科学问题。

为了克服 GPS 局地观测算子没有考虑气象场水平梯度的缺点, Sokolovskiy 等(2005a, 2005b) 设计了一个在保证计算效率的前提下更加精确的 GPS 非局地观测算子。Ma 等(2009a) 首次将非局地观测算子成功地植入到 NCEP GSI 业务资料同化系统(Wu, et al, 2002) 中, 并以 2005 年发生在美国墨西哥湾的飓风卡特里娜(Katrina) 为例设计了一个观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiment, 简称 OSSE)。为了客观地评价 GPS 局地观测算子和非局地观测算子在气象场水平梯度大值区的同化效果, 尽量减少人为因素的影响, 在整个 GPS 掩星折射率观测的模拟过程中, 所有卫星轨道参数都与实际的 COSMIC GPS 卫星观测一致。

在观测系统模拟试验中, 首先采用 4 km 分辨率 WRF-ARW 模式对飓风卡特里娜从 2005 年 8 月 27 日 00 时(世界时)起报, 进行 72 h 数值模拟, 作为“真实”大气。然后从“真实”大气中提取出 GPS 掩星折射率观测。具体做法是: 首先对于 24 h (28 日 00 时) 的预报场沿着南北方向穿过卡特里娜飓风中心作垂直切割, 获得其垂直剖面的气象场资料信息; 然后利用相关气象场资料信息, 通过阿贝尔变换计算公式求得 GPS 折射率观测及其相关信息, 比如位置、方位角等。图 4 给出了“真实”大气中沿着南北方向穿过卡特里娜飓风中心垂直剖面的温度、湿度和相应的 GPS

折射率,同时进一步模拟 GPS 观测位置也在图 4b 中给出。GPS RO1 观测位于卡特里娜飓风中心,在考虑气象场水平梯度大值区的同化对比试验中使用;而

GPS RO2 观测位于卡特里娜飓风外围,距离中心大约 300 km 处,目的是在考虑气象场水平梯度变化不大的区域进行同化对比试验时使用。

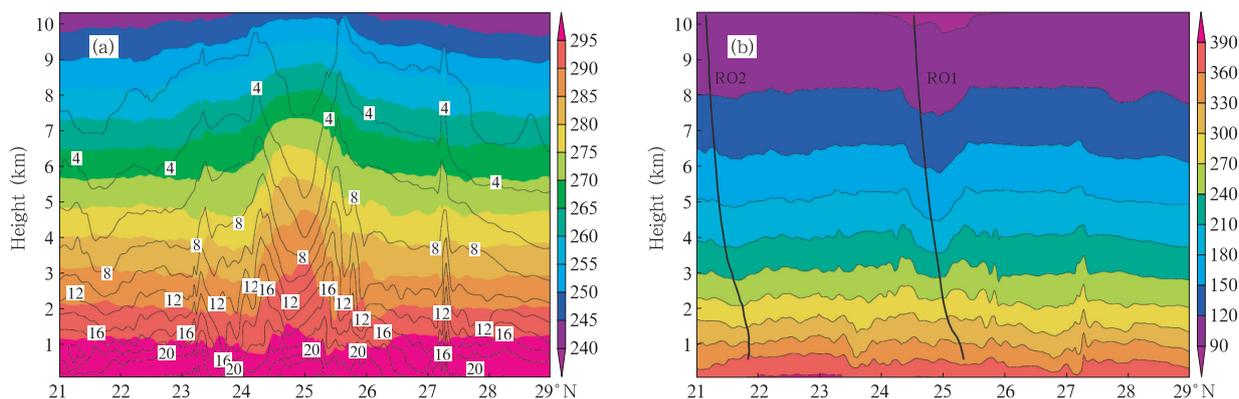


图 4 2005 年 8 月 28 日 00 时沿着南北方向穿过卡特里娜飓风中心的垂直剖面分析

(资料来源是 4 km 高分辨率 WRF 模式产生的“真实”大气; a. 温度(K)、湿度(g/kg);

b. 相应的 GPS 折射率, RO1 和 RO2 表示模拟的 GPS 观测位置)

Fig. 4 North-south cross section through the “eye” of Hurricane Katrina from the 4-km outputs reproduced by the WRF model at 00:00 UTC 28 Aug 2005 for (a) temperature (K, colors) and water vapor mixing ratio (g/kg, contours), and (b) refractivity; RO1 and RO2 are the simulated GPS RO soundings (black curves)

为了考察 GPS 局地和非局地观测算子在观测系统模拟试验中对初始场的同化效果,设计了以下 3 个试验:

(1)控制试验(简称 CTRL):对模式初始场不做任何资料同化。

(2)局地试验(简称 LOC):运用局地观测方案同化 GPS RO1。

(3)非局地试验(简称 NLOC):运用非局地观测方案同化 GPS RO1。

除了对分析场增量进行仔细分析以外,为了量化这两种 GPS 观测算子的同化效果,选定在飓风中心 250 km × 250 km 的区域内对 3 个数值试验(CTRL, LOC 和 NLOC)与“真实”大气的差值进行统计,计算出随高度分布的平均误差和均方根误差(图 5)。统计结果表明:无论是温度场还是湿度场,在 850—600 hPa 和 500—300 hPa 附近,NLOC 试验中的平均误差比 CTRL 试验和 LOC 试验都要小一些。通过 3 个试验的均方根误差对比,在温度场中,NLOC 同化试验在整个对流层都好于局地试验结果;而在湿度场中,NLOC 同化试验的优势主要是体现在对流层低层。

观测系统模拟试验结果表明:GPS 非局地观测

算子,特别是在气象场水平梯度大值区(比如锋面、强对流天气等)具有良好的同化效果,要优于在当前业务同化预报中普遍应用的 GPS 局地观测算子。为了全面考察 GPS 非局地观测算子的同化性能,我们还在气象场水平梯度小值区(图 4b 中 GPS RO2 位置,距离中心大约 300 km 处),重复以上对比试验,唯一区别就是用 GPS RO2 取代 GPS RO1 进行资料同化,结果发现在气象场水平梯度小值区两种 GPS 同化方法差别不大。

尽管在 OSSE 中 GPS 非局地观测算子已经展示了良好的同化性能,但是还需要在实际天气过程中进一步验证。为了这个目的,并考察 COSMIC GPS 卫星资料在实际天气过程中的应用能力,我们运用 GSI/WRF 循环同化系统对发生在美国西海岸的一次强降水过程进行了实际个例分析(Ma, et al, 2009b)。所选的实际降水个例是在 2006 年 11 月 7 日对美国西海岸造成强烈洪涝灾害的强降水过程。强降水主要发生在美国华盛顿州和俄勒冈州,某些测站的 24 h 降水量超过了近 100 年的降水记录。此次强降水天气过程主要是由于一个被称之为“大气河”(Atmospheric River, 简称为 AR)登陆以后造成的。从卫星观测得到的大气水汽分布(图 6)可以清晰地看到,在

大气自西向东运动的过程中,经常会出现从热带向副热带地区方向的相对狭窄的水汽输送带,长达 2000 km,宽约 1000 km,这就是所谓的“大气河”(Ralph, et al, 2004)。当 AR 向北运动遇到南下的冷锋时,强降水就会经常发生。这也是本次在美国西海岸造成强

烈洪涝灾害的强降水过程的主要原因。由于 AR 含有大量的水汽,在 AR 附近的气象场存在很强的水平梯度,所以我们选择此个例来考察 COSMIC GPS 探空资料的实用价值以及非局地方案在实际天气预报中的应用性。

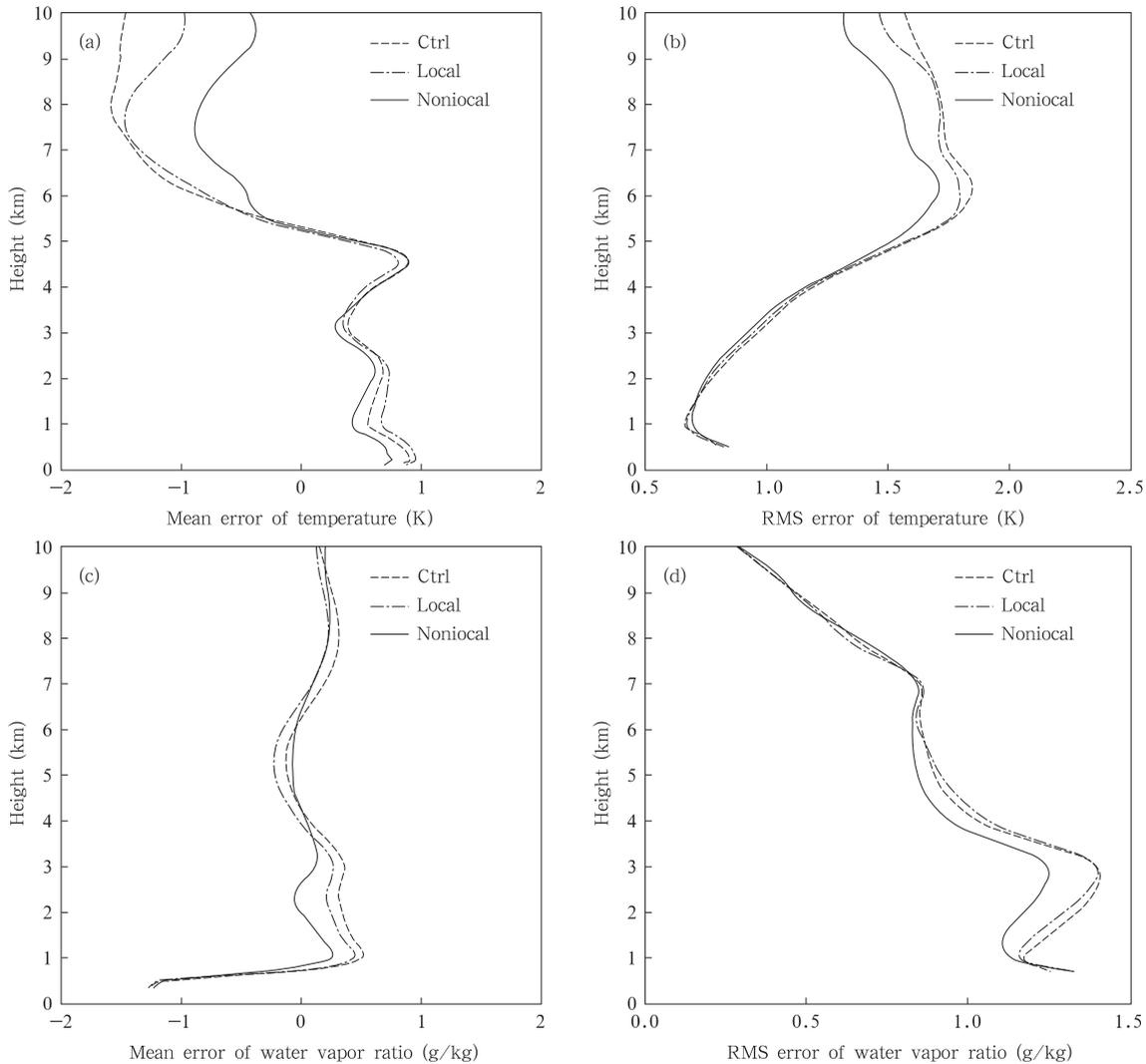


图5 在卡特里娜飓风中心 $250\text{ km} \times 250\text{ km}$ 的区域内对同化试验结果与“真实”大气的差值 (计算出温度场(a,b)和湿度场(c,d)随高度分布的平均误差(a,c)和均方根误差(b,d))

Fig. 5 Mean and root mean square (RMS) errors for T (a, b) and q (c, d) from the assimilation experiments, averaged over the $250\text{ km} \times 250\text{ km}$ box centered at the Hurricane Katrina center

在 AR 大气水汽辐合带模拟试验中,运用 WRF-ARW 区域模式作为预报模式,与 GSI 3DVAR 变分资料同化系统一起组成预报/同化系统。模式预报初始场是 NCEP GFS $1^\circ \times 1^\circ$ 的全球模式分析资料,网格数分别为 135×118 和 160×160 。同化在 36 km 分辨率上进行,模式层为 38

层,层顶高度为 50 hPa 。为了全面考察 COSMIC GPS 探空观测对 AR 大气水汽辐合带过程的作用,我们同样设计了 3 个试验:

(1)控制试验:同化除了 COSMIC GPS 探空观测的所有业务应用观测资料,包括所有常规观测和卫星观测。

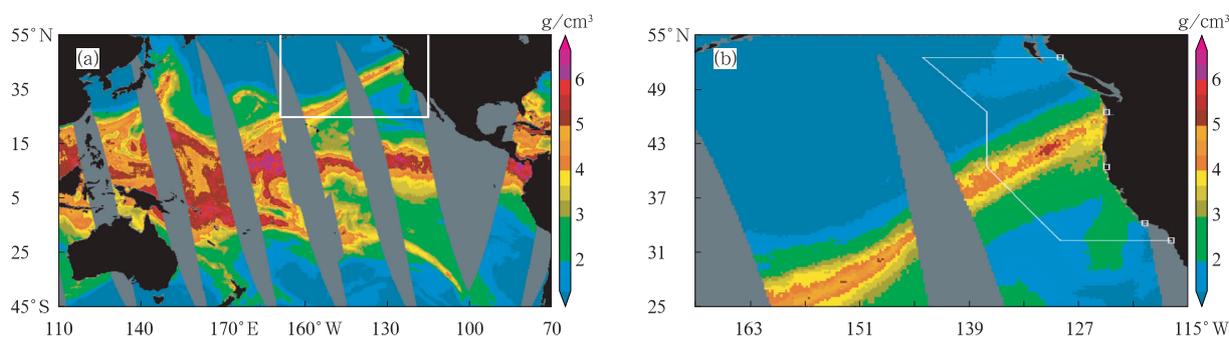


图6 2006年11月7日02—06时SSM/I卫星观测

(a. 美国西部东太平洋海区卫星观测的可降水量; b. 图a中白线所选区域)

Fig.6 Composite SSM/I satellite images between 02:00 and 06:00 UTC 7 November 2006

(a. the composite SSM/I image for the water vapor around the west coast of the US, b. for the white inset box in panel a)

(2)局地试验:控制试验所用观测 + COSMIC GPS,运用局地观测方案同化GPS探空资料。

(3)非局地试验:控制试验所用观测 + COSMIC GPS,运用非局地观测方案同化GPS探空资料。

我们首先从非局地观测同化结果中选取2006年11月7日12时AR大气水汽辐合带进行单时次同化分析(图7),呈西南—东北走向的可降水量被清楚地显示出来,强度、宽度和位置都与SSM/I卫星观测(图6)非常接近,在美国西海岸,AR大气水汽辐合带已经登陆。结果表明运用非局地观测算子的GSI三维变分资料同化系统能成功地捕捉到AR大气水汽辐合带的基本尺度特征(分布结构和强度),这些是在美国西海岸造成强降水的主要原因。

为了考察COSMIC GPS的作用,设计了一个24h预报试验,该试验采用12km高分辨率的WRF模式从11月6日12时预报到7日12时。图8给出3个模式预报试验的可降水量与SSM/I卫星观测的对比结果。可以很清楚地看到:控制试验(图8b)预报的AR大气水汽辐合带强度偏弱,在AR中心地区尤为明显。但是在同化COSMIC GPS掩星资料以后,无论局地同化方法还是非局地同化方法(图8c、8d),都能够增加AR大气水汽辐合带的强度,其中,特别是非局地同化试验结果更接近SSM/I卫星观测(图8a)。这与观测系统模拟试验的结论是一致的:在气象场水平梯度大值区内,与局地同化方法相比,非局地方法能够更好地同化GPS掩星观测资料。

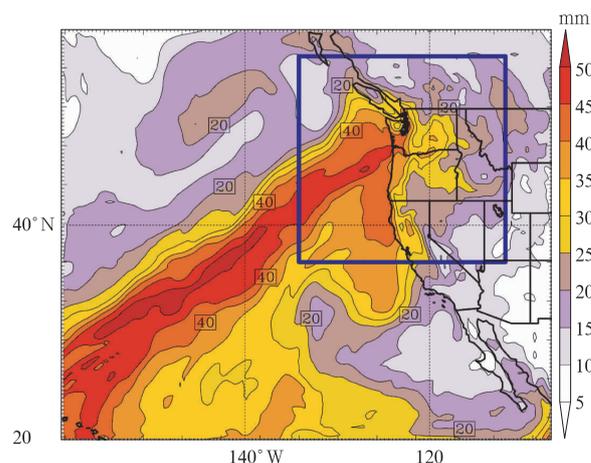


图7 运用GSI/WRF循环同化系统,分析2006年11月7日12时非局地同化试验产生的可降水量(红色区域为AR大气水汽辐合带中心区域)

Fig.7 Analysis of the PWV based on the GSI/WRF cycling assimilation experiment when the GPS RO soundings are assimilated with the non-local operator for 12:00 UTC 07 November 2006 (Red color is for the centre of atmospheric vapor convergence zone)

除了将3个试验与SSM/I卫星观测进行对比之外,我们还通过降水定量预报(QPF)详细研究了COSMIC GPS掩星观测对此次强降水的影响。24h累积降水量如图9。图9a所显示的是此次强降水的主要影响区域(美国华盛顿州和俄勒冈州),各雨量观测站的结果如图所示,黑框为大雨区。图9b是非局地试验和控制试验的QPF偏差对比结果。与观测进行比较,不难发现GPS非局地同化能提供更好的雨量预报,特别是对大雨区的预报。

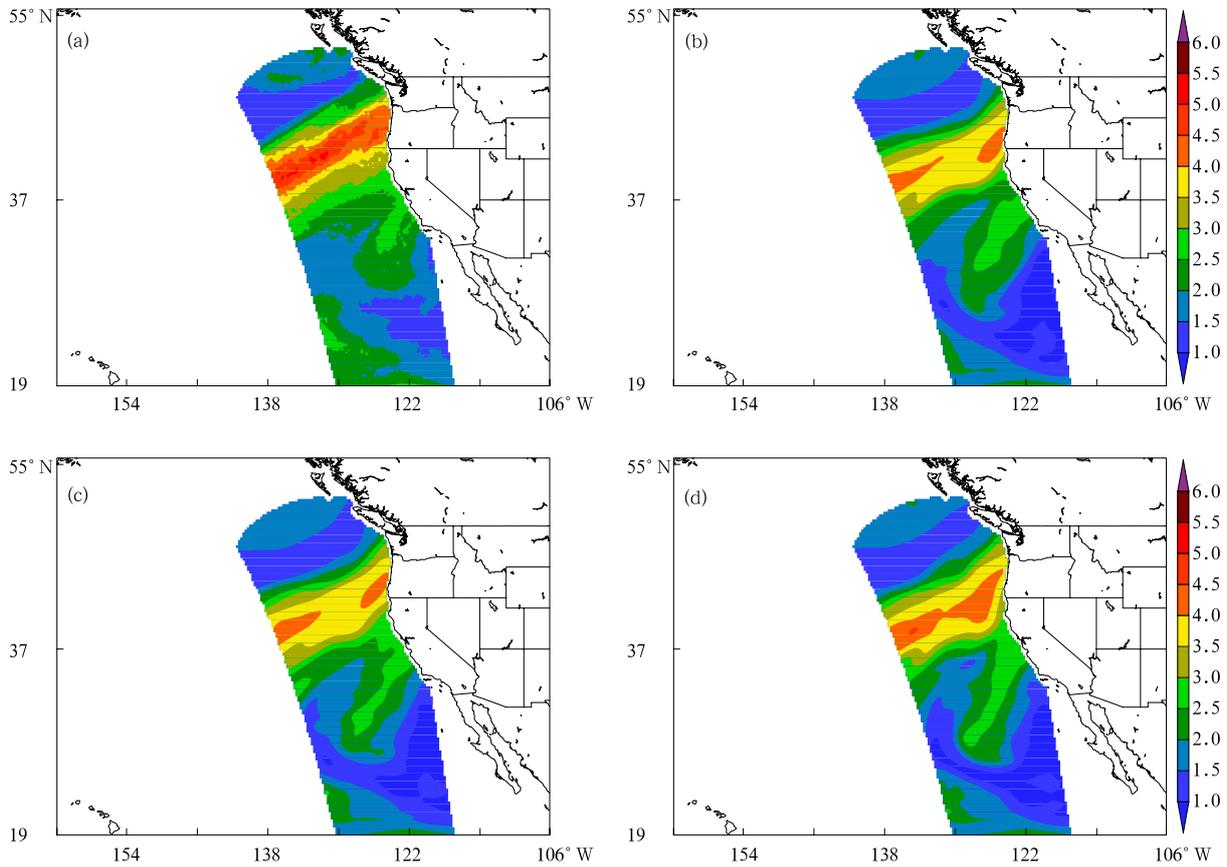


图 8 运用 2006 年 11 月 7 日 02 时 SSM/I 卫星可降水量(单位:cm)观测对 24 h WRF 模式预报进行产品检验 (a. SSM/I 卫星观测, b. 控制试验, c. 局地同化试验, d. 非局地同化试验)

Fig. 8 Verification of the forecast with SSM/I PWV observations (cm) at 02:00 UTC 7 November 2006. (a) SSM/I PWV observations; and the forecasted PWV based on (b) the CTRL run, (c) the LOC cycling experiment, and (d) the NLOC cycling experiment

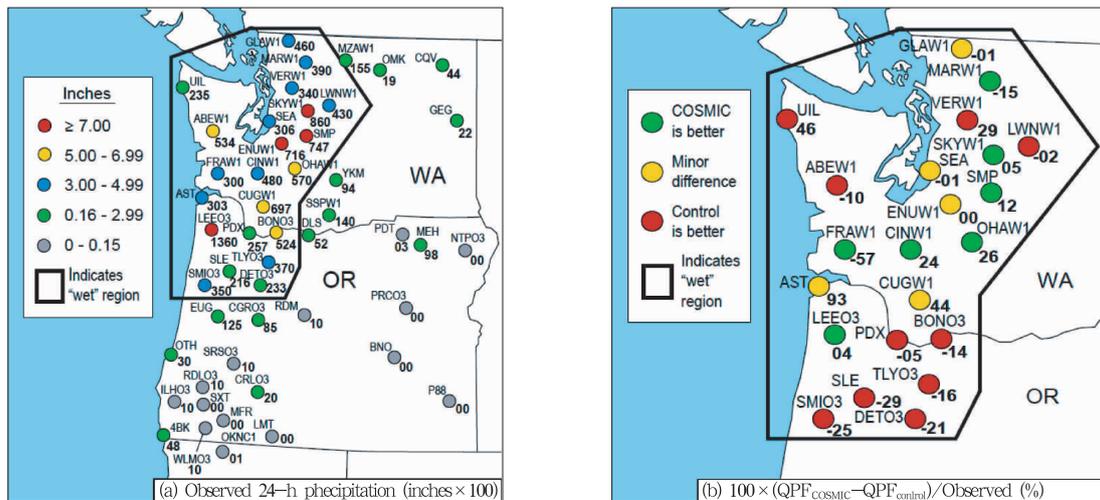


图 9 在美国华盛顿州(WA)和俄勒冈州(OR),运用降水定量预报(QPF)方法得到的 24 h 观测降水量 (单位:英寸)(a); GPS 非局地试验和控制试验的 QPF 偏差对比(b)

(各测站数值代表两个预报偏差被该测站观测标准化以后百分比。绿点表示 QPF 值为正, COSMIC GPS 非局地试验好的区域; 黄点为 QPF 值很小, 两者评分相差不多; 红点则表示 QPF 值为负, 代表控制试验好的区域)

Fig. 9 (a) Observed 24 h accumulative precipitation (inches) with the QPF method in Washington and Oregon states, US. (b) Comparison of the QPF bias between the forecasts with and without (NLOC) COSMIC data. (The numerical values represent the difference between the two forecasts, normalized by the total observed precipitation at that site. It is expressed as a percentage. Green spots are regions where COSMIC data improved the QPF relative to the control run, yellow is for regions where COSMIC data had negligible impact, and red is for regions where the non-local assimilation of COSMIC data worsened the QPF)

6 结论与讨论

本文简要地介绍了GPS掩星观测的发展历程、观测资料的特点以及在业务资料同化系统中的应用问题。在资料同化方法方面,很多研究表明直接同化GPS掩星的非常规观测产品(折射角或折射率)能够更加充分地利用GPS掩星观测,因此变分资料同化方法和集合卡尔曼滤波方法得到了广泛的关注。与4DVar和EnKF相比,3DVar具有计算代价小的优点,但是由于背景场协方差矩阵不具有对气象实况流场的依赖性(flow dependent),所以理论上其同化性能就不及4DVar和EnKF这两种方法。从长远来看,随着计算机模拟性能的提高,GPS掩星观测在4DVar和EnKF这两种同化方法中更能显示出对数值天气预报的提高效果。

在GPS掩星观测算子方面,我们根据计算效率的不同而将到目前为止所涉及的观测算子分为3类:(1)复杂观测算子;(2)简单观测算子和(3)优化观测算子。复杂观测算子计算精度高但计算量大,简单观测算子计算效率高但计算精度较差。以非局地观测方案同化为代表的优化观测算子综合考虑了前两种观测方法的优点,即与简单算子相比,其计算时间并没有明显增加,同时其计算精度又与复杂算子接近。对于GPS掩星观测资料业务化来讲,非局地观测算子具有很好的应用前景。

GPS掩星观测为人类探测地球大气、了解地球大气演变规律提供了一种崭新的观测途径。随着COSMIC GPS卫星接收机的成功发射,GPS掩星观测已经正式从试验卫星阶段步入了更高级的准业务运行阶段,开创了GPS掩星观测的新纪元。对于气象研究来说,这既是前所未有的机遇,同时也提出了应用一种新型卫星观测手段的新课题。

参考文献

Ahmad B, Tyler G L. 1998. The two-dimensional resolution kernel associated with retrieval of ionospheric and atmospheric refractivity profiles by Abelian inversion of radio occultation phase data. *Radio Sci*, 33:129-142

Anthes R A, Rocken C, Kuo Y-H. 2000. Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 11:115-156

Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. 2008. The COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: Early results. *Bull Amer Met Soc*,

89:313-333

Bear B R, Dutton E J. 1968. *Radio Meteorology*. Dover Publications Inc, New York

Bevis M, Businger S, Chiswell S, et al. 1994. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J Appl Meteor*, 33:379-386

Derber J C, Parrish D F, Lord S J. 1991. The new global operational analysis system at the National Meteorological Center. *Wea Forecasting*, 6: 538-547

Eyre J R. 1994. Assimilation of radio occultation measurements into a numerical weather prediction system. *ECMWF Tech Memo*, 199: 34pp

Fjeldbo G, Eshleman V R. 1968. The atmosphere of mars analyzed by integral inversion of the mariner IV occultation data. *Planet Space Sci*, 16: 1035-1059

Fjeldbo G, Kliore A J, Eshelman V R. 1971. The neutral atmosphere of Venus as studied with the mariner V radio occultation experiments. *Astron J*, 76: 123-140

Hajj G A, et al. 2002. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 64: 451-469

Healy S B, Thepaut J N. 2006. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132: 605-623

Hollingsworth A, Lönnerberg P. 1986. The statistical structure of short-range forecast errors as determined from radiosonde data. Part I: The wind field. *Tellus*, 38A: 111-136

Kuo Y-H, Zou X, Huang W. 1997. The impact of GPS data on the prediction of an extratropical cyclone: An observing system simulation experiment. *J Dyn Atmos Ocean*, 27: 439-470

Kuo Y-H, Sokolovskiy S V, Anthes R A, et al. 2000. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 11: 157-186

Kuo Y-H, Wee T-K, Sokolovskiy S, et al. 2004. Inversion and Error estimation of GPS radio occultation data. *J Meteor Soc Japan*, 82: 507-531

Kursinski E R, Hajj G A, Bertiger W I, et al. 1996. Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 127: 1107-1110

Kursinski E R, Hajj G, Schofield J, et al. 1997. Observing earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J Geophys Res*, 102: 23439-23465

Kursinski E R, Hajj G A, Leroy S S, et al. 2000. The GPS radio occultation technique. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 11: 53-114

Liu H, Zou X. 2003. Improvements to GPS radio occultation ray-tracing model and their impacts on assimilation of bending angle. *J Geophys Res*, 108: 45-48

Liu H, Anderson J L, Kuo Y-H, et al. 2008. Evaluation of a non-local observation operator in assimilation of CHAMP radio occultation refractivity with WRF. *Mon Wea Rev*, 136: 242-256

- Ma Z, Kuo Y H, Wang B, et al. 2009. Comparison of Local and Non-Local Observation Operators for the Assimilation of GPS RO Data with the NCEP GSI System; An OSSE Study. *Mon Wea Rev*, 137: 3575-3587
- Ma Z, Kuo Y H, Wang B, et al. 2011. Assimilation of GPS radio occultation data for an intense atmospheric river with the NCEP regional GSI system. *Mon Wea Rev*, (In press)
- Poli P, Joiner J. 2003. Assimilation experiments of one-dimensional variational analyses with GPS/MET refractivity. First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies, 515-520
- Poli P, Joiner J. 2004a. Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. I: Ray tracing. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 130: 2787-2805
- Poli P, Joiner J. 2004b. Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. II: A fast atmospheric refractivity gradient operator (FARGO). *Quart J Roy Meteorol Soc*, 130: 2807-2825
- Ralph F M, Neiman P J, Wick G A. 2004. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North-Pacific Ocean during the winter of 1997/98. *Mon Wea Rev*, 132: 1721-1745
- Rocken, C, Anthes R, et al. 1997. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 102: 29849-29866
- Rocken C, Kuo Y-H, Schreiner W S, et al. 2000. COSMIC system description. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 11: 21-52
- Second FORMOSAT-3/COSMIC Data Users Workshop, 22-24 October 2007 holding in Boulder (webpage: <http://www.cosmic.ucar.edu/oct2007workshop/program.html>)
- Shao H, Zou X. 2003. On the observational weighting and its impact on GPS/MET bending angle assimilation. *J Geophys Res*, 107: 1-28
- Smith E K, Weintraub S. 1953. The constants in the equation for atmospheric refractivity index at radio frequencies. *Proc IRE*, 41: 1035-1037
- Sokolovskiy S, Kuo Y-H, Wang W. 2005a. Assessing the accuracy of linearized observation operator for assimilation of the Abel-retrieved refractivity; Case simulation with high-resolution weather model. *Mon Wea Rev*, 133: 2200-2212
- Sokolovskiy S, Kuo Y-H, Wang W. 2005b. Evaluation of a linear phase observation operator with CHAMP radio occultation data and high-resolution regional analysis. *Mon Wea Rev*, 133: 3053-3059
- Syndergaard S, Kursinski E, Herman B, et al. 2005. A refractive index operator for assimilation of occultation data. *Mon Wea Rev*, 133: 2650-2668
- Syndergaard S, Kuo Y-H, Lohmann M S. 2006. Observation operators for the assimilation of occultation data into atmospheric models: A review. *Occultations Probing Atmos Clim*, 205-224
- Zou X, Vandenberghe F, Wang B, et al. 1999. A raytracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J Geophys Res, Atmos*, 104: 22301-22318
- Zou X, Wang B, Liu H, et al. 2000. Use of GPS/MET refraction angles in 3D variational analysis. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 126: 3013-3040
- Ware, et al. 1996. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results. *Bull Amer Met Soc*, 77: 19-40
- Wichert J, et al. 2001. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: First results from CHAMP. *Geophys Res Lett*, 28: 3263-3266
- Wu W-S, Purser R J, Parrish D F. 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon Wea Rev*, 130: 2905-2916