

GPS 无线电掩星资料同化技术研究

国防科学技术大学研究生院

分类号 TP399

学号 10060098

UDC

密级 公 开

工学硕士学位论文

GPS 无线电掩星资料同化技术研究

硕士生姓名 朱孟斌

学 科 专 业 计算机科学与技术

研 究 方 向 大规模科学与工程计算

指 导 教 师 张卫民 研究员

国防科学技术大学研究生院

二〇一二年十一月

Research on GPS Radio Occultation Data Assimilation

Candidate: Zhu Mengbin

Advisor: Prof. Zhang Weimin

A thesis

**Submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering
in Computer Science and Technology
Graduate School of National University of Defense Technology
Changsha, Hunan, P.R.China**

November, 2012

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位论文是我本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写过的研究成果，也不包含为获得国防科学技术大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文题目： GPS 无线电掩星资料同化技术研究

学位论文作者签名： 朱启斌 日期： 2012 年 11 月 13 日

学位论文版权使用授权书

本人完全了解国防科学技术大学有关保留、使用学位论文的规定。本人授权国防科学技术大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅；可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密学位论文在解密后适用本授权书。）

学位论文题目： GPS 无线电掩星资料同化技术研究

学位论文作者签名： 朱启斌 日期： 2012 年 11 月 13 日

作者指导教师签名： 张 飞 日期： 2012 年 11 月 13 日

目 录

摘 要	i
ABSTRACT	ii
第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 GPS 掩星技术基础	3
1.2.1 基本掩星技术介绍	3
1.2.2 GPS 掩星计划	4
1.2.3 GPS 掩星同化基础 ^[6]	6
1.3 GPS 掩星算子研究现状	11
1.3.1 折射率算子研究现状	11
1.3.2 弯曲角算子研究现状	13
1.4 资料同化技术研究现状	14
1.4.1 资料同化技术基础	14
1.4.2 WRF 三维变分同化系统	15
1.5 主要工作及论文结构	17
第二章 基于一维折射率算子的 GPS RO 资料同化	19
2.1 折射率因子的选择	19
2.1.1 基础研究情况	19
2.1.2 折射率因子	21
2.2 折射率因子值三维变分同化试验	25
2.2.1 WRF-3DVAR 中折射率算子实现	25
2.2.2 观测资料介绍	28
2.2.3 试验设计与模拟结果	30
2.2.4 结果分析与讨论	33
2.3 本章小结	34
第三章 基于一维弯曲角算子的 GPS RO 资料同化	35
3.1 一维弯曲角算子的变分同化实现	35
3.1.1 正演算子的变分实现	35
3.1.2 切线性和伴随模式算子	39
3.2 一维弯曲角算子的三维变分同化及台风预报试验	43
3.2.1 模式参数设定与观测资料	43

3.2.2 试验设计与结果	45
3.3 一维弯曲角算子的全球四维变分同化系列试验	50
3.3.1 试验数据简介	50
3.3.2 分析场偏差试验	51
3.3.3 GPS 对全球中期预报效果的影响	52
3.3.4 GPS 资料对台风路径预报的影响	53
3.4 本章小结	54
第四章 GPS 掩星二维弯曲角算子	55
4.1 基本算法介绍	55
4.1.1 二维 GPS 掩星算子研究回顾	55
4.1.2 二维弯曲角算法 I	58
4.1.3 二维弯曲角算法 II	59
4.2 二维弯曲角算子的变分同化初步实现	60
4.3 二维弯曲角算子分析	64
4.3.1 二维弯曲角算子的计算开销	64
4.3.2 二维弯曲角算子的实际优势	65
4.4 本章小结	66
第五章 观测误差模型	67
5.1 GPS 掩星折射率观测误差	67
5.2 GPS 掩星弯曲角观测误差	71
5.2.1 观测误差模型	71
5.2.2 相关观测误差	72
5.3 本章小结	73
结 束 语	75
致 谢	77
参考文献	79
作者在学期间取得的学术成果	86

目 录

表 2.1 GPS 掩星观测数据分类..... 29

表 2.2 COSMIC 科学要求..... 29

表 2.3 空基 COSMIC 探空资料廓线列表（部分） 30

表 4.1 1D 和 2D 算子计算开销统计表 64

表 5.1 旧同化系统拟合标准偏差及切断值设置（引自 Cucurull, 2010）^[43] 67

表 5.2 新同化系统适合标准偏差及切断值设置（引自 Cucurull, 2010）^[43] 71

表 5.3 Met Office 弯曲角观测误差模型 71

图 目 录

图 1.1 各种观测资料的贡献值	2
图 1.2 南半球 100hPa 温度预报 RMS 误差统计	2
图 1.3 GPS 掩星示意图	4
图 1.4 GPS 掩星计划卫星示意图	5
图 1.5 GPS RO 资料处理流程图	9
图 1.6 WRF 模式系统流程图（引自 WRF 官网）	17
图 1.7 WRF 模式系统中数据同化系统示意图（引自 WRF 官网）	17
图 2.1 GPS 掩星事件原理示意图	19
图 2.2 COSMIC 的 6 颗卫星每天提供的全球观测（可达 2500 个掩星事件）	28
图 2.3 CDAAC 的功能架构图（引自 CDAAC 官网）	29
图 2.4 WRF 模式折射率试验双层区域图	31
图 2.5 折射率预报影响试验台风路径图	32
图 2.6 非理想气体影响试验统计结果图	33
图 3.1 同化系统垂直模式层及系统数据结构结构图示	36
图 3.2 代价函数的迭代最小化过程图	41
图 3.3 同化区域的掩星事件位置分布图	45
图 3.4 台风路径对比图	45
图 3.5 台风中心气压（左）和最大风速（右）对比图	46
图 3.6 台风初始时刻表温、海平面气压和风对比图（nogps（左），ba（右））	47
图 3.7 台风初始时刻 850hPa 相对湿度对比图（nogps（左），ba（右））	47
图 3.8 台风 24 小时预报表温、海平面气压和风对比图（nogps（左），ba（右））	48
图 3.9 台风 24 小时预报 850hPa 相对湿度对比图（nogps（左），ba（右））	48
图 3.10 台风 120 小时预报表温、海平面气压和风对比图（nogps（左），ba（右））	49
图 3.11 台风 120 小时预报 850hPa 相对湿度对比图（nogps（左），ba（右））	49
图 3.12 同化引入的一天中掩星事件的全球位置分布	50
图 3.13 北半球位势高度和温度分析场偏差	51
图 3.14 南半球位势高度和温度分析场偏差	51
图 3.15 10 月份热带地区 850hPa 高度场预报对分析均方根和距平相关系数	52
图 3.16 9 月份亚洲 850hPa 高度场预报对分析均方根和距平相关系数	53
图 3.17 全球四维变分同化系统一维弯曲角算子台风预报影响试验	53

图 4.1 二维弯曲角算子主要组成部分的流程图	61
图 4.2 利用 Runge-Kutta 方法计算弯曲角的流程图	63
图 5.1 NH 冬季 GPS RO 和模式模拟量差值的平均和标准偏差	69
图 5.2 NH 夏季 GPS RO 和模式模拟量差值的平均和标准偏差	70
图 5.3 南半球垂直相关观测误差试验距平相关系数 ^[61]	73

摘 要

全球定位系统(Global Positioning System, 简称 GPS)的无线电掩星技术(Radio Occultation, RO)能提供一种大气观测资料, 其具有准实时、不受云雨影响、高垂直分辨率、不需要校验和平均分布于全球等优良特性。高时空分辨率的空基 GPS 资料, 能有效改善数值天气预报模式的温度场、湿度场以及其他要素初始场的质量, 对提高模式的预报能力起到了积极的作用。

本文认真研究了 GPS RO 资料的变分同化技术, 分四章分别从四个方面对 GPS RO 资料变分同化的关键技术的基本算法、具体实现、试验结论等进行了详细的阐述和讨论。

局地一维折射率算子是最容易实现的掩星观测算子, 并且在弯曲角算子中也需要计算出局地折射率的值, 所以针对折射率算子因子取值的讨论是完全有必要的。经过试验发现采用三项表达式要精确于两项表达式, 同时对于 Rueger 提出的因子仍然存在不足, 有待试验进一步进行验证。

一维弯曲角算子的变分同化实现是本论文的重点和主要工作。在全球四维变分资料同化系统中实现一维弯曲角算子不但要实现正演算子, 还要实现其相应的切线性算子和伴随算子, 其中伴随算子的实现是极其关键和重要的。在全球变分资料同化试验中引入 GPS 掩星资料后对南北半球位势高度分析场的影响十分明显, 针对 2011 年 9 月和 10 月进行 WMO 标准的月平均统计检验对比试验显示, GPS RO 观测能减小全球中期预报对分析的均方根误差, 预报第 8 天的距平相关系数可以提高 10%左右。同时用同化 GPS RO 资料后产生的分析场连续作为台风预报的初始场, 台风的路径更加接近实际路径且预报效果更加稳定。

二维弯曲角相对于一维弯曲角算子具有在中低对流层更加精确的优势, 但是其计算量增加非常大, 并且对于一个弯曲角廓线, 其主要部分在高对流层和平流层, 中低对流层的占比和精确度都不高, 所以, 其对系统预报整体性能的提升并不明显。

最后, 针对 GPS RO 中最重要的掩星观测误差统计模型进行了详细的分析、试验和讨论, 同时针对折射率和弯曲角观测误差分别分析并实现了详细的误差模型, 针对弯曲角的相关误差模型将是未来研究的重点。

关键词: GPS RO; 变分同化; 弯曲角算子; 观测误差

ABSTRACT

GPS Radio Occultation (RO) technology offers us a new type of observation data with the advantage of near real time, no cloud and rain impact, high vertical resolution, no need to check and global averaged distribution. High time-space resolution GPS RO data can improve the temperature fields, humidity fields and other initial fields. GPS RO data have positive effects to the model forecast skill scores.

This thesis focuses on GPS RO data assimilation methods. We provided the basic algorithms, concrete implementations and the experiments in detail and we discussed the results, and then draw conclusions in a scientific way.

1D Local refractivity operator is the most nonaccurate but the easiest implemented operator. There also exists the refractivity operator in the bending angle operators. So it is necessary to discuss the value of refractivity parameters. The three term SW53 expression is more accurate than two term expression. RU02 parameters has some problems in theory, we need more experiments to research on it.

The emphasis and main work of this thesis is the variational assimilation implementation of 1D bending angle operator. In a 4D-VAR system, we can not only care about forward model operator. The implementation of tangent linear operator and adjoint operator is the most important part. After introducing GPS RO data in global variational data assimilation experiments, it has obviously positive impact on the geopotential height of south hemisphere and north hemisphere. The RMS of global medium-range forecast is reduced. The improvement of anomaly correlation coefficients is statistically significant at the 10% level. In the typhoon forecast impact experiment, the path and strength of the typhoon with GPS RO data is actually better than that without GPS RO data in 24 hours forecast and 120 hours forecast.

2D bending angle operator is more accurate than 1D operator in low and middle troposphere, but its computation cost is actually high. And 1D operator is perfectly adequate enough in upper troposphere and stratosphere. As the bending angle observations are mainly in upper troposphere and stratosphere, there is no significant improvement in the system.

Finally, the most important part of GPS RO data assimilation is the observation error model. It is time and latitude dependence. We discussed and built the observation error model of refractivity and bending angle. This will be the emphasis of my future research.

Key Words : GPS RO, Variational Data Assimilation, Bending Angle Operator, Observation Error

第一章 绪论

1.1 研究背景

数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 是一个典型的初/边值问题, 给定对当前大气状态的估计 (初值) 和合适的地面及侧边界条件, 模式将能模拟 (预报) 出大气的演变结果。1951 年 Charney 基于正压涡度方程成功进行了第一次预报^[1], 1954 年瑞典首次进行数值天气预报业务, 6 个月后美国实现了首次实时 NWP 业务, 现在数值天气预报质量取得了惊人的进展。随着数值预报模式的日益完善, 初值的问题显得愈加重要, 显然, 初值的估计越精确, 预报的质量就越好。因此, 资料同化也越来越受到人们的重视。资料同化的目的是利用现有的所有信息来定义一个最大可能精确的大气 (海洋) 运动状态^[2]。

数值天气预报模式的预报能力取决于两方面: 一方面是数值模式对于复杂的大气动力和物理过程描述和刻画完美程度; 另一方面是用于模式积分的初始场的准确度。现在提高数值天气预报准确度和可用预报时效的方法, 除了改进数值模式的动力架构、提高分辨率及采用先进物理参数化方案之外, 改善模式初始场质量也是一个重要的途径。

数值天气预报技术的不断改进和日趋完善以及超级计算机技术突破带来的计算能力的快速提高, 以及大气中各种物理过程研究的日益深入和建模精度不断提升, 数值天气预报模式能够越来越准确地描述大部分天气过程的演变和发展过程。但是, 这些由偏微分方程描述的物理模式却常常因为初值不理想而难以得到更加精确的数值解。背景场资料和观测资料提供物理数值模式的初始场, 所以建立良好的适合模式的初始场必须满足两个基本要求: 一是背景场值必须在时间和空间上与观测值接近; 二是必须满足大气非静态动力学方程和统计学原理。卫星、雷达等遥感技术的发展使得非常规观测资料迅速增多, 并且具有覆盖全球、时空密度大等优点。资料同化问题就是利用一切有用的信息, 包括不同分辨率和类型的观测资料, 采用某种数学方法准确地计算出某一时刻的大气、陆地或者海洋状态, 为数值预报模式提供一个最优化的初始场, 以提高数值预报效果。资料同化包括以下两层基本含义: 一是如何合理地利用各种精度不同的非常规观测资料, 把它们与常规观测资料融合为一个有机的整体, 为数值预报提供一个更好的初始场; 二是如何综合利用不同时次的观测资料, 将这些资料中所包含的时间演变信息转化为要素场的空间分布状况^[3]。其中, 变分同化方法能够同化所有类型的大气观测资料, 由于可以使用复杂的观测算子, 因此对模式变量非直接或非线性相关的观测量的同化更容易。

GPS 无线电掩星技术则提供了另一种观测资料, 其具有准实时、不受云雨影响、高垂直分辨率、不需要校验和平均分布于全球等优良特性。当无线电波经过大气时, 受到大气密度影响, 使得信号在路径上产生折射, 因此借由无线电掩星信号的时间延迟, 再经过许多假设条件, 可以反演出许多有用的大气信息。因此, 高时空分辨率的空基 GPS 资料, 能有效改善数值天气预报模式的温度场、湿度场以及其他要素初始场的质量, 对提高模式的预报能力能起到积极的作用。

国外的观测资料敏感性试验表明, GPS 掩星资料对同化系统的贡献仅次于微波温度和红外高光谱资料, 超过了高空报和飞机报, 已成为十分重要的资料。图 1.1 展示了各种观测资料对同化系统的贡献值^[4]。

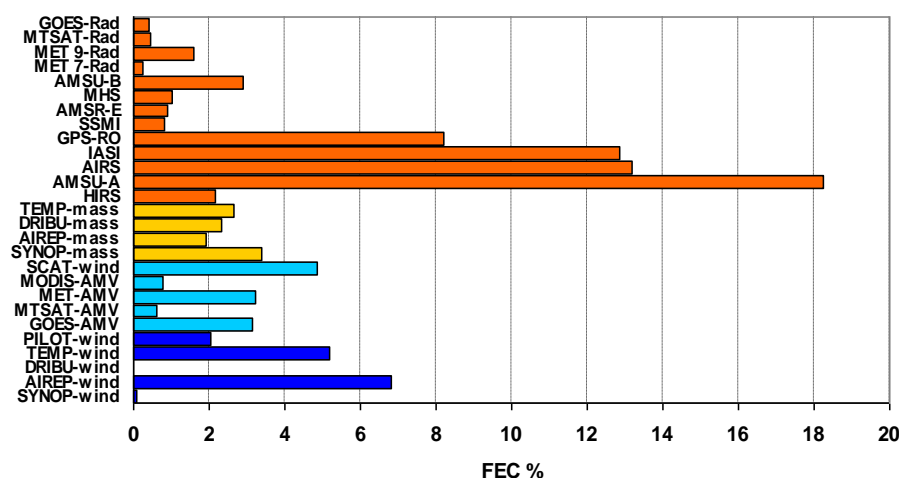


图 1.1 各种观测资料的贡献值

欧洲中期数值天气预报中心 (ECMWF) 的观测资料控制试验表明, GPS 掩星资料对南半球 100hPa 温度预报效果的改进十分明显^[5]。

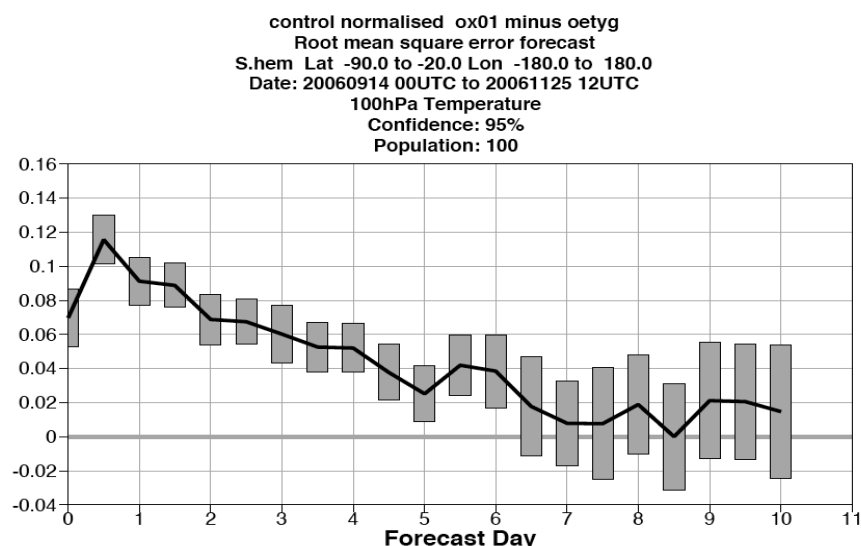


图 1.2 南半球 100hPa 温度预报 RMS 误差统计

基于全球定位系统的无线电掩星技术研究始于 1995 年, 至今已成功执行了多

个 GPS 掩星资料测量计划, 包括 GPS/MET、CHAMP、SAC-C 和 COSMIC。其中, 2006 年台湾与美国合作发射的六星座 FORMOSAT-3/COSMIC 系统, 已经接近实时地提供 GPS 无线电掩星观测数据, 为运行中的数值天气预报系统提供了每天大约 2500 次掩星事件的观测数据, 而能反演出良好大气状态的资料不少于 1500 笔。这样高密度的观测, 已经是目前全世界气球探空观测数量的两倍, 对世界各国气象业务预报带来了可观的效益, 对一般大气科学研究更是提供了绝佳的机会。

1.2 GPS 掩星技术基础

1.2.1 基本掩星技术介绍

随着空间探测技术的发展, 渐渐发展出了一种新的空间大气探测技术——GPS 无线电掩星技术。GPS 无线电掩星技术能提供高精度、高分辨率、覆盖全球的地球电离层和中性层大气廓线, 具有全天候、费用低和无系统漂移等优点。GPS 无线电掩星技术与常规大气探测技术(如大气探空、特定雷达)不同, 它利用 GPS 卫星和地球低轨卫星与地球的相对运动造成的掩星过程中特定波长的无线电波穿透大气而引起的无线电信号折射, 利用在此过程中无线电波产生的相位延迟和相应的振幅差异, 从中获得不同高度的路径差异及频率等信息, 通过这些信息, 利用相应的大气学原理, 可以反演出电离层电子密度信息、中性层大气温度、压力、湿度等参数廓线。目前 GPS 掩星技术已经成功应用于数值天气预报和大气探测等气象研究领域。

GPS 表示全球定位系统, GPS 在 20 世纪 80 年代和 90 年代早期开始应用。GPS 最初的设计是为了美国军方的精确定位, 共由距地球表面约 20200 千米高度的 6 个轨道上运行的 24 颗卫星组成。这些卫星以两个 L 波段频率持续发射无线电电磁波, 电磁波的传播路径(也叫射线)经过大气层时受大气折射率的影响而弯曲。使用 GPS 无线电掩星(Radio Occultation)技术可以测量这些电磁波射线的总弯曲度。由于大气折射率是大气温度、水汽和液态水含量的函数, 因此, GPS 无线电掩星资料包含了大气状态信息。

GPS 发射两个 L 波段频率($f_1=1.57542\text{GHz}$ 和 $f_2=1.22760\text{GHz}$)的无线电信号。无线电信号在真空中的传播路径是一条直线, 但实际射线从 GPS 卫星发射, 途经地球电离层和中性大气层时, 受电离层电子密度和中性层大气折射率的影响, 路径有一定程度的弯曲, 从而使这些信号到达低轨接收卫星的时间得到延迟。由于知道卫星的精确位置与相对运行速度, 所以根据相对运动方程可以推导得到总的弯曲角值。由于 GPS 卫星和低轨接收卫星的相对运动, 从电离层到中性大气层顶再到地球表面的整个电离层和中性大气层都有射线穿过。因此, 可以获得弯角的

垂直廓线。GPS 无线电信号的波长较长，大约为 20cm。因此，这些信号传播途经大气层时不受气溶胶和云雨的影响。

通过把两个波段的信号传播延迟量进行线性组合，可以消除电离层的影响。剩余的无线电信号传播延迟量便仅仅包含中性大气中大气折射率的影响。资料同化是一个反演过程，通过同化 GPS 无线电信号传播延迟量资料，便可以得到中性大气中大气折射率的分布情况。

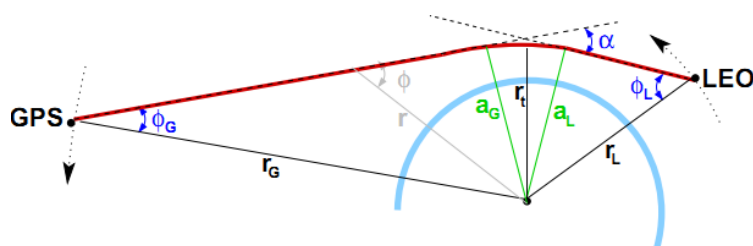


图 1.3 GPS 掩星示意图

下面列出了 GPS 无线电掩星技术中的一些专有名词：

1) 弯角 (α)

无线电信号的传播射线在低轨接收卫星位置与 GPS 发射卫星位置处的两切线方向之间的角。

2) 切点 (P_t)

射线上最接近地球表面的点。

3) 影响因子 (a)

地球中心到射线之间的最短（垂直）距离。

4) 掩星平面 (occultation plane)

由 GPS 卫星的位置、低轨接收卫星的位置和射线在近地面点的局地曲率中心三点定义的那个平面。

1.2.2 GPS 掩星计划

GPS 由 24 颗卫星组成。每个 GPS 卫星轨道都是具有约 55° 倾角的圆形轨道其周期为 12 h，局地高度为 20200 km。一个低轨地球卫星 (LEO) 上的 GPS 接收器每天可以观测到几百个以上的几乎均匀分布全球的掩星资料。资料的水平分布主要依赖于低轨卫星轨道的倾角与周期。低轨卫星高度大约为 800 km。

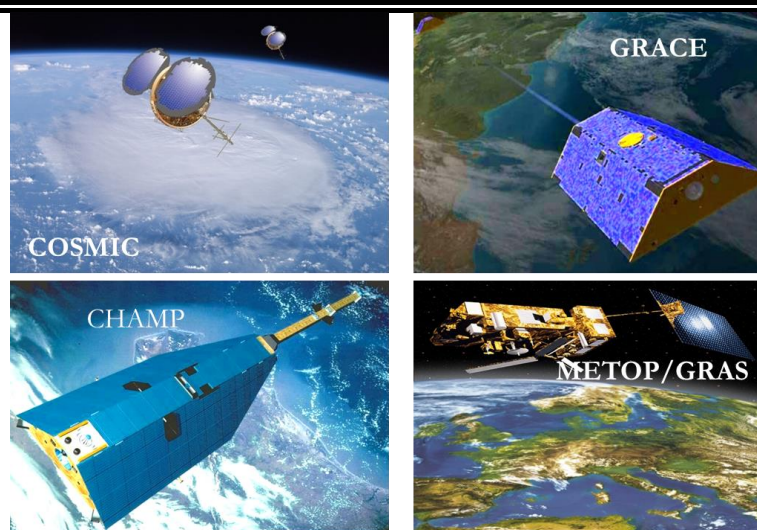


图 1.4 GPS 掩星计划卫星示意图

至今, 已经成功执行了多个 GPS 掩星资料测量计划 (GPS RO mission)。图 1.2 中展示了其中的 COSMIC、GRACE、CHAMP 和 METOP/GRAS 四个掩星卫星。GPS/MET 是最早的 GPS 掩星计划试验。GPS/MET(UCAR)接收器乘载 MicroLab-1 卫星于 1995 年 4 月 3 日被发射到 730 km 高度的圆形低轨轨道, 每天可得到 100~150 个掩星垂直廓线, 直到 1997 年 2 月任务结束, 总共得到 10853 个掩星廓线。丹麦气象局 1999 年发射了丹麦的第一颗卫星 *Ørsted*, 并一直运行到现在, 每天提供一定数量的掩星廓线。随后, 德国地学中心 (GFZ) 的 CHAMP 计划于 2000 年 7 月成功实施, 经过十年两个月零四天的运行, 总共接收了 58277 个掩星廓线, 于 2010 年 9 月 19 日任务终止。阿根廷和 NASA 等多国合作的 SAC-C 于 2000 年 11 月 21 日发射成功, 每天可提供大约 250 个掩星垂直廓线。随后, GFZ 和 UTCSR 以及 JPL 合作的 GRACE 双星计划于 2002 年 3 月 17 日成功展开。2006 年 4 月 15 日, 台湾/美国合作计划 FORMOSAT-3/COSMIC 发射成功。GPS/MET、CHAMP 和 SAC-C 都只有一个 GPS 掩星资料接收器。与这些早期的 GPS 卫星计划不同, COSMIC 由 6 个 GPS 掩星资料接收器组成, 每天可得到约 1500 个几乎均匀分布的全球掩星垂直廓线, 这个数字是全球探空资料的 3~4 倍。同时, 2006 年 10 月, EUMETSAT's Polar System(EPS)三星计划中的第一颗 METOP-A 发射成功, 每天提供了超过 600 个掩星廓线数据。TerraSAR-X 是德国用于对地观测的图像分辨率可以达到 1m 的 X 波段卫星, 携带有 IGOR GPS 接收器, 于 2007 年 7 月 14 日发射成功, 每天提供大约 100 个廓线。C/NOFS 是美国空军于 2008 年 4 月 16 日发射的主要用于研究和预报地球电离层闪烁的卫星, 搭载有 GPS RO 接收设备, 每天提供超过 150 个掩星廓线。

如此众多的掩星计划的开展, 提供了大量的 GPS RO 资料, 虽然现在 GPS RO 资料同化技术仍处于研究和验证阶段, 进入实际数值天气预报业务系统运行中的

掩星资料还非常少，但是，由于 GPS RO 技术实现相对简单，并且从目前的研究成果来看，GPS RO 资料同化带来的都是正效果，而且计划中的或已经开始实施的掩星计划数量非常的多，所以 GPS RO 在不久的将来会有更大的发展和进步。

1.2.3 GPS 掩星同化基础^[6]

1.2.3.1 GPS 资料预处理

GPS 无线电掩星技术的原始资料 (raw data) 是光学路径长度 L_1 和 L_2 。它们是折射指数 n 沿着射线路径的线积分：

$$L_1 = \int_{GPS}^{LEO} n(f_1) ds, L_2 = \int_{GPS}^{LEO} n(f_2) ds \quad (1.1)$$

这里，大气折射指数 n 由大气局地折射率 N^{LOC} 决定：

$$n = 10^{-6} N^{LOC} + 1 \quad (1.2)$$

局地折射率 N^{LOC} 是电离层密度函数 N_e 和大气温度 T 、干空气气压 P_d 和水汽压 P_w 的函数：

$$N^{LOC} = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{P_w}{T} + k_3 \frac{P_w}{T^2} - C \frac{N_e}{f^2} \quad (1.3)$$

局地折射率 N^{LOC} 的表达式 (1.3) 右端前三项，即 $k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{P_w}{T} + k_3 \frac{P_w}{T^2}$ ，代表中性大气的贡献，第四项，即 $-C \frac{N_e}{f^2}$ ，则代表电离层的贡献。在电离层中，折射指数 $n < 1$ ，并且局地折射率的值与频率有关；在中性大气中，折射指数 $n > 1$ ，局地折射率的值与频率无关。

在真空大气中，光学路径长度等于 GPS 与 LEO 的几何距离 R_{GL} 。所以，GPS 观测的光学路径长度与 R_{GL} 的差表示实际大气对光学路径长度的影响。本文将这个量定义为过剩光学路径长度 (excess phase)：

$$\Delta L_1 = L_1 - R_{GL}, \quad \Delta L_2 = L_2 - R_{GL} \quad (1.4)$$

对于近地面点高度在对流层顶以上的射线，穿透电离层光学路径长度是负值 (10~100 m)。因为中性大气超过电离层的影响，因此，光学路径长度在对流层顶附近变为正值，在近地面增加到约 1km。

由于电离层折射率的一阶近似反比于频率的平方，因此，可以通过用相同时间的两个频率的光学路径长度观测资料 L_1 和 L_2 的线性组合，消除电离层对 GPS 资料的影响：

$$L = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (1.5)$$

这里， L 是没有电离层影响的光学路径长度。

同样地，可以通过 ΔL_1 与 ΔL_2 的线性组合得到消除电离层作用的 excess phase ΔL ：

$$\Delta L = \frac{f_1^2 \Delta L_1 - f_2^2 \Delta L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (1.6)$$

订正后的光学路径长度 (ΔL_F) 相当于几乎没有电离层情况下的观测。因此， ΔL 总是大于零，并且在最高处的值非常小。1 mm 的光学路径长度已经小于数据噪声引起的误差。

过剩多普勒频移 (Excess Doppler Shift) 可从光学路径长度的时间导数得到：

$$f_d = -fc^{-1} \frac{d\Delta L}{dt} \quad (1.7)$$

式中 c 是真空中光速。

根据过剩多普勒频移资料，利用全球定位系统发射卫星和低轨接收卫星的位置和运转速度信息，在大气为球对称的假定条件下，可以推导出射线的总弯角。下面简单描述一下具体步骤。

根据卫星几何分布和光学原理，Excess Doppler Shift：

$$f_d = f \left(\frac{c - n_{LEO} \vec{v}_{LEO} \cdot \vec{u}_{LEO}^t}{c - n_{GPS} \vec{v}_{GPS} \cdot \vec{u}_{GPS}^t} - 1 \right) \quad (1.8)$$

式中 \vec{v}_{LEO} ， \vec{v}_{GPS} 为卫星速度向量； \vec{u}_{LEO}^t ， \vec{u}_{GPS}^t 代表射线切向量的单位向量。

将卫星速度矢量做如下分解：

$$\vec{v}_{LEO} = v_{LEO}^n \mathbf{n} + v_{LEO}^r \mathbf{r} + v_{LEO}^t \mathbf{t} \quad (1.9)$$

式中 v_{LEO}^n 表示射线平面的卫星速度分量； v_{LEO}^r 为射线平面的卫星径向速度分量； v_{LEO}^t 代表射线平面的卫星切向速度分量。Excess Doppler Shift 与卫星速度向量之间的关系为：

$$f_d = f \left(\frac{c - n_{LEO} (v_{LEO}^r \cos \varphi_{LEO} - v_{LEO}^t \sin \varphi_{LEO})}{c - n_{GPS} (v_{GPS}^r \cos \varphi_{GPS} - v_{GPS}^t \sin \varphi_{GPS})} - 1 \right) \quad (1.10)$$

式中 φ_{LEO} 是 LEO 卫星半径与 \vec{u}_{LEO}^t 的夹角； φ_{GPS} 是 GPS 卫星半径与 \vec{u}_{GPS}^t 的夹角。

假定影响因子在 GPS 发射卫星和低轨接收卫星处相等： $a_{GPS} = a_{LEO}$ （即 $r_{GPS} n_{GPS} \sin \varphi_{GPS} = r_{LEO} n_{LEO} \sin \varphi_{LEO}$ ）。因为在 GPS 发射卫星和低轨接收卫星处折射率指数近似等于单位值，即 $n_{GPS} \approx 1$ ， $n_{LEO} \approx 1$ 。所以，有 φ_{GPS} 与 φ_{LEO} 的第二个关系：

$$r_{GPS} \sin \varphi_{GPS} = r_{LEO} \sin \varphi_{LEO} \quad (1.11)$$

可以从公式 (1.10) 和公式 (1.11) 求解出 φ_{GPS} 与 φ_{LEO} ，从而得到影响因子：

$$a = r_{GPS} n_{GPS} \sin \varphi_{GPS} \quad (1.12)$$

和弯角：

$$\alpha = \varphi_{GPS} + \varphi_{LEO} + \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_{GPS} \cdot \mathbf{r}_{LEO}}{r_{GPS} r_{LEO}}\right) - \pi \quad (1.13)$$

假定地球大气状态呈（近似）球对称分布，弯角（作为影响因子 a 的函数）与折射率指数（作为半径 r 的函数）之间具有一一对应的函数关系：

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_0}^{\infty} \frac{\frac{d \ln n}{dr}}{\sqrt{n^2 r^2 - a^2}} dr \quad (1.14)$$

式（1.14）即所谓的 Abel 变换。这里， a 是影响因子，并定义为射线渐近线与折射率中心之间的垂直距离。对于给定的射线，影响因子是常量。 r_0 是切点半径，定义为从近地面点到局地曲率中心的距离。

切点半径 r_0 与影响因子 a 和折射率指数 $n(r_0)$ 在切半径处满足以下关系：

$$r_0 = \frac{a}{n(r_0)}, \quad a = r_0 n(r_0) \quad (1.15)$$

已知弯角函数 $\alpha(a)$ ，可以通过所谓的 Abel 反演得到非局地折射率指数 $n(a)$ ：

$$n^{GPS}(r) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\alpha(x)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx\right) \quad (1.16)$$

从而求得大气的 GPS 折射率：

$$N^{GPS} = 10^6(n-1) \quad (1.17)$$

本文定义 N^{GPS} 为 GPS 非局地折射率。

在水汽对总折射率影响较小的区域（大气温度低于 250K），可以通过状态方程（ $p = \rho R_d T$ ）从 GPS 测得的折射率直接得到空气密度：

$$\rho_{dry} = \frac{k_1 N}{R_d} \quad (1.18)$$

在第二章中将用到上式得到折射率因子值 k_1 ，并对其得出的方法进行相应的讨论。从而通过静力方程与状态方程得到所谓的 GPS 干空气反演气压与温度：

$$p_{dry}(r_0) = \int_{r_0}^{\infty} \rho_d(r) g(r) dr, \quad T_{dry}(r_0) = \frac{p_d(r_0)}{R_d \rho_d(r_0)} \quad (1.19)$$

在水汽对总折射率影响不能忽略的情况下，通过一维变分，可以得到所谓的 GPS 湿空气温度和湿度反演 T_{wet} 和 q_{wet} 。

以上所述的 GPS 掩星资料处理过程可以总结如图 1.6：

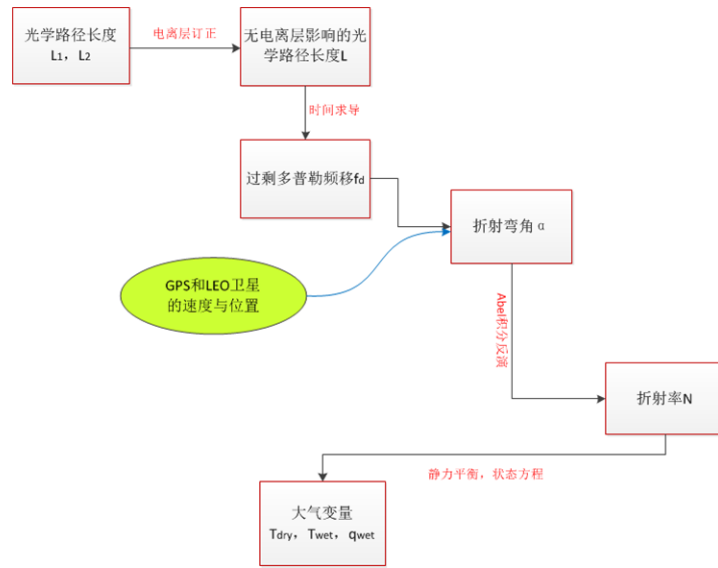


图 1.5 GPS RO 资料处理流程图

1.2.3.2 预处理质量控制

在进行资料同化前，一个必不可少的步骤是质量控制。质量控制不仅要把观测误差太大的资料去掉，而且要把观测算子还不能模拟好的资料或模式分辨率还不能分辨的小尺度变化资料去掉。质量控制要找出的离群资料（outliers）可以通过先研究大量观测资料本身以及观测资料与模式模拟之间的差别的统计特征和统计分布结构来分辨，再找出合理的理论根据来确认，最后设计实际可行方案。

质量控制常用的一个方法是找出所谓的离群资料，即离开平均值的距离比较大的那些资料。因此，离群资料通常是该资料离开资料样本 $(X_i, i=1, 2, \dots)$ 的平均值的距离根据标准差的值来决定的。然而，离群资料本身可以对资料的平均值和标准差有很大的影响，从而影响离群资料的识别。为了减小这种可能性，离群资料的识别可利用所谓的双权重平均值 \bar{X}_{bw} 和双权重标准差 $BSTD$ ：

$$\bar{X}_{bw} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M)(1 - w_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - w_i^2)^2} \quad (1.20)$$

$$BSTD(X) = \frac{[n \sum_{i=1}^n (X_i - M)^2 (1 - w_i^2)^4]^{0.5}}{|\sum_{i=1}^n (1 - w_i^2)(1 - 5w_i^2)|} \quad (1.21)$$

式中 M 是中位数， w_i 是权重函数。用 MAD 表示绝对偏差中位数（即 $|X_i - M|$ 的中位数），则权重函数 w_i 定义为

$$w_i = \frac{X_i - M}{7.5 \times MAD} \quad (1.22)$$

GPS 掩星资料的质量控制可由下面四个步骤完成。

第一步：范围检查

由于电离层误差与对流层上层相反，因此首先进行范围检查，即对每个垂直廓线的数据作如下检查，如果 $\alpha < 0$ 或者 $N < 0$ ，则剔除该资料。

第二步：数据一致性检验

计算每个数据的 Z-score:

$$Z\text{-score}: Z_i = \frac{|X_i - \bar{X}|}{BSTD(X)} \quad (1.23)$$

式中 X_i 代表弯角 α_i 或者折射率 N_i ，下标 “i” 代表第 i 个观测资料， \bar{X} 是双权重平均， $BSTD(X)$ 双权重均方差。分别以 Z-score 大于 3，4 和 5 的标准确定可疑异常资料（即离群资料），可疑异常资料量和对应的观测值与用大尺度分析场温度和水汽计算得到的模式模拟值进行对比后发现，折射率的离群资料多于弯曲角的离群资料。观测值与模式模拟值相差很远的资料基本都在第二步去除了，这是非常理想的结果。因为这一步质量控制式（1.23）是对资料本身做的，并没有输入任何模式模拟的值。

第三步：与背景场的相容性检验

计算下面变量的 Z-score:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\alpha^{obs} - \alpha^{model}}{\alpha^{model}}, \quad \frac{\Delta N}{N} = \frac{N^{obs} - N^{model}}{N^{model}} \quad (1.24)$$

Z-score 大于 4 的资料视为可疑异常资料。

第四步：对称性检验

对流层底层的掩星观测资料可能存在负的系统误差。为此，对通过以上三步的资料误差进行对称性检验。对称性检验只对 4 km 以下的资料进行。记集合

$$XL_\alpha = \{\alpha: \alpha^{obs} - \alpha^{model} < 0\}, \quad XG_\alpha = \{\alpha: \alpha^{obs} - \alpha^{model} > 0\} \quad (1.25)$$

根据集合 XL_α 和 XG_α ，构造一下两个数据集:

$$YL_\alpha = \{-\alpha: \alpha \in XL_\alpha\}, \quad YG_\alpha = \{-\alpha: \alpha \in XG_\alpha\} \quad (1.26)$$

则数据集 $XL_\alpha \cup YL_\alpha$ 和数据集 $XG_\alpha \cup YG_\alpha$ 都是对称的。分别计算这两个数据集的双权重标准方差 $BSTD_L$ 和 $BSTD_G$ ，并取

$$BSTD = \min\{BSTD_L, BSTD_G\} \quad (1.27)$$

为原数据集的标准方差。最后，计算每个资料的 Z-score。Z-score 大于 3 的资料定为可能错误资料。

1.3 GPS 掩星算子研究现状

1.3.1 折射率算子研究现状

欧洲及北美地区最早开始研究 GPS 掩星气象学,从 1995 年第一颗试验性质的 GPS 掩星低轨卫星发射开始,欧洲及北美地区就一直致力于将 GPS 掩星资料同化进数值天气预报业务系统中,并取得了令人瞩目的成果。

Zou 等(1995)^[7]和 Kuo 等(1997)^[8]将 GPS RO 折射率资料同化进模式中,使得模式的温度和湿度更接近真实状态,改善了数值天气预报模式的预报结果。Huang 等(2005)^[9]利用 MM5 3DVAR 同化了 4 到 5 笔的 GPS RO 折射率资料,针对 2001 年的 Nari 台风和 2002 年的 Nakri 台风进行同化模拟实验,发现 GPS RO 资料对于台风路径及降水预报都有正影响。

Ma 等(2009a)^[10]首次将非局地观测算子成功地植入到 NCEP GSI 业务资料系统中,并以 2005 年发生在美国墨西哥湾的飓风卡特里娜(Katrina)为例设计了观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiment, OSSE)。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。

Cucurull (2010)^[11]将 GPS RO 折射率资料应用于全球模式业务预报,有效地改善等压面的重力位势高度及风速,进而提高预报准确度。

我国台湾地区位于太平洋西部,其受到西北太平洋热带涡旋影响巨大,由于 GPS 无线电掩星资料具有不受云雨影响、高垂直解析度、无需校验且平均分布于全球等优良特性^[12](Anthes 等, 2000),台湾地区和美国率先开展了 COSMIC 计划,发射了六颗 GPS 掩星低轨卫星到太空,其每天可提供全球观测密度均匀分布的掩星事件约 1500~2000 个,促进和推动了全球 GPS 掩星气象学研究的发展和进步。

王(2004)亦利用 MM5 3DVAR 同化德国卫星 CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload)的折射率资料,改善了 2001 年 Nari 台风与 2003 年杜鹃(Dujuan)台风的短期天气预报^[13]。

吴(2007)利用 MM5 4DVAR 同化 CHAMP 和 COSMIC 的折射率资料,探讨 GPS RO 资料对于 2003 年杜鹃台风以及 2006 年珊珊台风预报的影响,研究显示 GPS RO 资料能改善初始场^[14]。

陈(2008)发展出非局地折射率同化算子,并将其导入到 WRF 3DVAR,探讨 GPS RO 资料对 2006 年的珊珊(Shanshan)台风预报的影响,发现了 GPS RO 的同化效益能增加模拟后期大雨预报的技术得分,而非局地同化算子也提高了存在强烈大气水平梯度的区域的同化能力^[15]。

蔡(2009)指出以 MM5 4DVAR 的方法同化虚拟涡旋与 COSMIC 折射率资料,

对台风强度及分析场有较大的修正从而降低路径误差^[16]。连(2009)利用 WRF 3DVAR 同化各种卫星资料(如:下投式探空(Dropsonde)、SSM/I、QuikSCAT 及 COSMIC),讨论 2008 年 6 月两个梅雨事件及三个台风个案,发现 COSMIC 折射率资料对温度场和水汽场有较大的修正量,使得模拟的降雨量较接近观测结果^[17]。吕(2010)发现同化 COSMIC 折射率资料有效提高了梅雨个案降水预报的准确度^[18]。

在我国大陆地区,气象工作者们亦在 GPS 掩星技术上做出了巨大的努力,也取得了很大的进步。为我国自行进行 GNSS 掩星低轨卫星的发射及后续资料处理工作积累了大量成果和经验。

上海天文台对于 GPS 掩星资料的一维变分同化方法及无线电掩星开环反演技术做了一定的研究,得出其与相应位置的探空数据相吻合且分布比探空数据广,所以应用到业务系统肯定能改善预报结果的结论^[19]。

中国气象科学研究院唐细坝等已经将 GPS 掩星资料反演得出的温度和水汽资料同化进了 GRAPES-3DVAR 系统当中,并对台风个例进行预报模拟,研究结果表明 GPS 掩星资料的加入有助于提高 GRAPES 的全球预报能力^[20]。

中科院大气所成巍等通过在区域暴雨预报模式(AREM)的后向映射四维变分同化系统(AREM-B4DVar)中引入 GPS 掩星折射率局地和非局地两种观测算子,使得该系统具备了同化全球定位系统(GPS)掩星折射率资料的能力,并采用 COSMIC 计划探测得到的 GPS 掩星折射率资料和常规探空资料对 2007 年 7 月 4 日至 5 日发生在我国江淮流域的暴雨个例进行了同化预报试验。结果表明在同化系统中采用局地和非局地两种观测算子,加入 GPS 掩星折射率资料后均可以提高观测资料附近初值的分析质量,从而在改进 24 小时的降水预报中起到正效果。基于非局地观测算子的掩星折射率资料同化可以通过大气非局地的约束,进一步改进基于局地观测算子掩星折射率资料同化的不足。在常规资料的基础上加入掩星折射率资料,可以使同化系统进一步改进初值分析质量和 24 小时预报效果,尤其能更好地发挥非局地观测算子的作用^[21]。

解放军理工大学气象学院盛峥等通过对 GPS 掩星折射率进行一维变分同化得到的气压、温度、水汽压廓线与德国地学研究中心(GFZ)公布的气象观测资料进行对比和分析,证实了 GPS 掩星资料的合理同化对数值天气预报可进行有效地改进,并提出将弯曲角作为下一步的同化研究方向^[22]。

南京信息工程大学文伟俊等利用 WRF 模式及其三维变分同化系统,同化了 COSMIC 和 CHAMP 掩星反演的大气 wetprf 格式资料,并对台风“圣帕”进行了路径、强度、降水等方面的预测,表明对“圣帕”的路径和强度改进不明显但对降水结构有较大的调整,说明同化该资料在水汽方面回馈较大。12 小时的间歇同

化试验说明不断加入 GPS 掩星资料对“圣帕”预报有正影响^[23]。

1.3.2 弯曲角算子研究现状

Eyre (1994) 考虑了同化 GPS 无线电掩星观测的各种可能的方法, 提出了一种计算开销很低, 同化作为影响因子 a 的函数的弯角 α 的二维正演模式^[24]。Palmer (1998) 利用这个模式来研究由一维和二维算子计算出来的弯曲角的差异, 并且发现最大的差异发生在水平折射率 ($N = 10^{-6}(n-1)$) 梯度的二阶导数较大的时候^{[25][26]}。

Liu 和 Zou (2003) 分别比较了从卫星上的射线向量直接得到几何弯曲角和从假定在 GPS 和 LEO 上具有相同值的影响因子通过多普勒位移得到弯角值。后者称为“伪弯角”。他们提出了一个同化伪弯角的观测算子, 初始模拟多普勒位移, 然后转换多普勒值来计算出伪弯角可以降低正演模式误差^[27]。

Poli 和 Joiner (2004)^[28]和 Poli (2004)^[29]研究了和 Eyre (1994)^[24]描述的相近的弯曲角算子, 得出了采用二维算子可以在切点附近 18km 的范围内减少观测减去模拟值的标准偏差约 10% 的结论。然而, 通常在低对流层他们的弯曲角误差估计明显偏低, 因为他们没有将采用影响因子 a 来决定射线切点高度的误差看做正演模式误差。

Sokolovskiy(2005)^[30]和 Syndergaard(2005)^[31]分别提出线性化非局部相位 2D 算子和线性化非局部折射率 2D 算子。这些算子能部分合理地解决大气折射率水平梯度各向异性的影响, 并减少计算时耗。

英国气象局 (Met Office) (Healy 等, 2005) 通过相应的简单一维观测算子所做同化 CHAMP 掩星资料的预报影响实验已经证明 GPS 掩星观测资料能够提高低对流层对无线电波温度观测量分析和预报的符合度^[32]。

Healy 和 Thépaut(2006)通过 4DVAR 将 GPS RO 弯角资料同化到 ECMWF 全球模式中, 提供了高准确度的温度信息, 并证明了这有助于提升温度预报的准确度, 特别是南半球 300 到 50 hPa 高度的区域^[5]。

Healy 等(2006)在 CHAMP 无线电掩星观测研究小组的领导下, 对 2004 年 6 月 1 日到 7 月 31 日的 CHAMP 掩星观测进行了四维变分同化预报影响试验。CHAMP 的弯曲角分别采用一维和二维弯曲角观测算子进行同化, 这样的对比试验使得二维算子潜在的优点得到了验证^[33]。

ECMWF 已经将一维弯曲角算子应用于四维变分同化业务系统当中, 在其他资料匮乏的区域得到了很好的效果, 并且在进行二维弯曲角算子的试验, 测试二维弯曲角算子在四维变分同化业务中的实际效果。

1.4 资料同化技术研究现状

1.4.1 资料同化技术基础

气象资料同化是一种资料分析技术，即为了得出给定时刻大气真实状态的最优估计值，利用大气随时间演变的规律及物理特性的一致性作为约束，把观测信息加入到模式的过程。客观分析是实现资料同化的重要步骤，最具代表性的客观分析方法有：多项式插值法、逐步订正法、最优插值法、变分方法、卡尔曼滤波法。

在早期的 NWP 试验中，Richardson 和 Chamey 用手工插值的方法将观测资料插值到规则的网格点上为数值预报提供初始场。资料同化的历史可追溯到最初简单的空间内插，基于二维多项式插值方案，Panofsky 发展了第一个客观分析方法，将观测资料拟合到规则的网格点上，但由于观测资料的数量远低于预报模式的自由度而且时空分布很不均匀，观测资料的空间插值远不能满足需要，使其在投入使用半年后（1958 年 4 月）就退出了数值预报业务系统客观分析的行列，现在它仅在某些特殊的情况下用来构造初始场。Bergthorsson, Doos 和 Cressman 随后发展了以经验为基础的逐步订正方法（SCM），融合了背景场和观测两种信息，但权重只和距离有关，有很强的随意性，一般用来做单变量分析^[34]。另外，经验成分较多的 Nudging 技术的出现是资料同化的一个较大进步，应用分析误差的线性最小方差估计理论，可以得到统计上最优的分析场，并可进行多变量分析，Lorence 用矩阵的形式提供了包括高度场、风场在内的最优插值的真三维方案，统计意义上讲，它是一种均方差最小的线性插值方法，权重考虑了背景场和观测误差的统计特征。在变分方法出现以前长期占据资料分析的统治地位。

新型非常规观测资料的出现和迅速增加使得其与模式变量之间不再是线性关系，使得线性空间插值方法无法得到资料分析的“最优”解。上个世纪八十年代中期，数学中变分理论的成熟使得变分资料同化技术开始在资料同化领域展露头角。变分同化由 Saaki 在 1970 年引入资料同化领域，其利用背景场误差和观测误差等统计学信息，采用最优化方法，求解目标泛函的极小值而得到总分析误差最小的最优解。三维变分同化的观测资料被限制在某个时刻，优化的目标是这个时刻的最优分析场，因此并不构成整个时间段上的最优分析场。四维变分同化则将同化窗口内的多个时刻的观测资料考虑进来，以整个时间段的模式状态量作为优化对象，不是寻找空间中的一点，而是搜寻与已有观测资料最匹配的模式空间的一条轨迹，确保模式和同化时间窗内的观测资料的一致性。四维变分同化中背景误差结构可以进行隐式调整，反映出环流随时间改变，但其需要开发伴随模式，这个是十分复杂的工作，形成了四维变分同化发展最大的阻力。

卡尔曼滤波方法 (Kalman Filter) 是上个世纪六十年代由数学家 Kalman 提出的。该方法建立在线性系统、白噪声和高斯分布条件下递归分析误差的方差最小值以得到最优分析值。这个递归过程无需存储所有资料, 而是不断进行自我更新, 使得得到的分析值一直保持最优。同样, 卡尔曼滤波方法考虑了背景误差协方差矩阵随时间的演变, 但由于需要同时更新误差协方差矩阵, 所以其计算量大得惊人, 即使现在最快的超级计算机也无法满足其计算量的要求。而集合卡尔曼滤波 (EnKF) 则是采用一组资料同化循环作为一个集合来估计预报误差协方差, 随着集合预报思想的发展, 用集合样本来估计背景误差协方差矩阵, 解决了误差协方差矩阵预报困难的问题。虽然计算代价大大下降, 但仍是 OI 和 3DVAR 的 10-100 倍, 但因其不需要发展切线性和伴随模式, 被认为是资料同化家族中将来最有前途的一个, 目前还处在研究阶段, 尚未投入到大规模业务应用 (Kalnay E., 2003) [35]。

上面介绍的所有方法都有自己的优缺点, 实际应用中采用哪种方法进行同化取决于多方面的因素, 其中包括采用的模式精确度和观测资料的质量、可用的计算资源, 以及所要达到的精度等。目前三维变分同化在数值天气预报业务和研究中得到了广泛的应用。四维变分同化只在极少数数值预报中心进行了业务化, 而计算代价高昂的卡尔曼滤波及集合卡尔曼滤波方法则没有推广到业务中。不过, 随着研究的深入和巨型机水平的不断提升, 在不久的将来, 更加精确的同化方法将成为主流并得到实际业务运行。

1.4.2 WRF 三维变分同化系统

当前数值天气预报中心采用的业务同化系统大多是变分同化系统, 主要有三维变分同化系统和四维变分同化系统。变分同化数学基础理论和控制论联系十分紧密, 变分资料同化可抽象为最优控制论中的泛函问题。其过程包括: 泛函的选择、预报模式及相应的切线性、伴随模式计算和极小化方法。理想化变分同化模型首先要在假设观测和背景场具有无偏的高斯误差条件下构造度量模式分析值最优性的目标函数, 利用贝叶斯定理推导出来。

变分方法的实质是以代价函数及其极小化来表述和解决最小二乘问题。三维变分同化的目标函数定义为:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y^o - H(x))^T R^{-1}(y^o - H(x)) \quad (1.1)$$

目标函数梯度则定义为:

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x_b) + \mathbf{H}^T R^{-1}(y^o - H(x)) \quad (1.2)$$

其中, \mathbf{H}^T 是线性化观测算子的伴随矩阵。正演算子 H 和伴随算子 \mathbf{H}^T 是决定

$J_o(x)$ 的极小值的关键算子，变分同化的一个重要优点就是：测量值与模型值的比较发生在观测变量空间，而不在分析变量空间。通过观测算子，实现同化表示成分析变量函数的任何观测测量。

变分方法与传统的统计最优化插值方法相比，优势在于：变分方法更能体现复杂的非线性关系；背景场包含了同化时刻之前的观测信息，使得分析结果更加连续；变分同化更具有物理的相关性和动力学的一致性；无需筛选观测资料类型，能使用所有有效可用观测；能自由确定误差协方差矩阵，因此对于新型观测数据有更强的应用能力。理论上，由于可以使用复杂的观测算子，变分同化方法几乎可以同化所有类型的观测资料，可以同化非模式变量，使得大量的非常规观测资料能够得以更好的应用，弥补常规观测资料的不足。

在 GPS 掩星资料同化的过程中，正演算子及其相应伴随算子的应用，决定了数据同化的效果，可以选择同化大气折射率 (Refractivity) 或弯角 (Bending Angle) 来取代水汽或温度。

WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式是由美国环境预测中心(NCEP)，美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构中心着手开发的一种统一的中尺度天气预报模式。该模式分为 ARW(the Advanced Research WRF)和 NMM(the Non-hydrostatic Mesoscale Model)两种，即研究型和业务型两种形式，本文介绍和使用的为 ARW WRF。

WRF 为完全可压缩非静力模式，水平方向采用 Arakawa C 网格，比 MM5 模式采用的 Arakawa B 网格解析重力波更加合理。WRF 提供了多种高分辨率地形和下垫面资料，垂直方向分为地形-气压坐标和高度坐标（理想模块）。模式采用欧拉非静力平衡方程，同时保留静力平衡选项作为控制方程，采用分隔时间积分的四阶 Runge-Kutta 算法。其积分区域、水平分辨率、垂直方向层数及微物理过程可以进行调整以适应不同天气过程的需要。其微物理过程包括：Thompson 方案、WSM3-6 方案、Eta 格点尺度云和降水方案、Lin 方案及 Kessler 方案；行星边界层（PBL）方案包括 YSU 方案、MRF 方案和 MYJ 方案等；大气辐射过程方案有：快速辐射传输模式(RRTM)长波方案、ETA GFDL 长波及短波辐射方案、MM5 短波辐射方案、Goddard 短波辐射方案，陆面模式(Surface Layer Scheme)包括 LSM 5 层热扰动方案，Noah 陆面模式，RUC 陆面模式。

WRF 包括四个模块：标准初始化（SI）模块，资料同化模块（WRF-VAR），预报模式（WRF）和后处理模块（WRF-POST）。具体结构见图 1.7。其中，SI 模块用来处理标准格点资料及地形资料；资料同化模块用来对各种常规及非常规观测资料进行三维或四维变分同化；预报模式对积分区域的大气过程进行积分预测；后处理模块用来对预报模式输出进行后处理分析，将模式变量转换到等压或



The diagram illustrates the data flow and components of the WRFDA system. It shows the integration of background data, observations, and model outputs.

Background Data Flow:

- Background Preprocessing (WPS, real)** feeds into x^b .
- Background Error (geo_bc)** feeds into B_0 .
- x^b feeds into **Update Low BC (UPDATE_BC)**.
- x^b also feeds into x^{lbc} .
- x^{lbc} feeds into **Update Lateral BC (UPDATE_BC)**.
- x^f (Cycled Background) feeds into **Update Lateral BC (UPDATE_BC)**.
- Update Lateral BC (UPDATE_BC)** feeds into **Forecast (WRF)**.

Observation and Model Output Flow:

- Observation Preprocessing (OBSPROC)** feeds into J^o, R .
- J^o, R feeds into **WRFDA**.
- WRFDA** feeds into x^d .
- x^d feeds into **Update Lateral BC (UPDATE_BC)**.
- Update Lateral BC (UPDATE_BC)** feeds into **Forecast (WRF)**.

Other Components:

- Cold-Start Background** feeds into **WRFDA**.
- Background Error (geo_bc)** feeds into B_0 .
- B_0 feeds into **WRFDA**.

Legend:

- Blue boxes: Supported by WRFDA Team

理论上，在同化系统中添加一个观测算子需要修改的部分包括目标函数中的 y^o 和 $H(x)$ 以及梯度函数中的 \mathbf{H}^T ，就是正演模式和伴随模式，以及观测变量。

全文总共分为 6 章，内容安排如下：

第一章：绪论。首先介绍了课题的研究背景和研究意义，然后阐述了该研究

领域的国内外发展动态，总结了资料同化技术、GPS 掩星技术和 WRF 模式及其三维变分同化系统的基础知识，最后详细介绍了本文的研究内容以及所做的主要工作。

第二章：基于一维折射率算子的 GPS RO 资料同化。详细介绍了一维弯曲角算子的变分同化实现，针对折射率因子的不同取值进行了相应的讨论，并且利用 WRF 三维变分同化系统对三组不同的折射率算子形式进行了同化试验和台风预报模拟试验，得出三项表达式要比两项表达式更加精确，同时，之所以将折射率放在第二章主要是整篇论文的结构的需要，对于折射率因子讨论的起因在于一维弯曲角算子中需要取折射率的值，由于可以做一维折射率算子的同化试验，所以将折射率放在了第二章。

第三章：基于一维弯曲角算子的 GPS RO 资料同化。针对一维弯曲角算子，该算子是本文的核心工作，本章详细介绍了一维弯曲角算子在全球四维变分同化系统中的实现。利用 WRF 模式对一维弯曲角算子进行了 GPS 掩星数据同化试验，并设计对比试验将同化后的分析场数据用于台风“纳纱”的五天预报试验，得到了积极的结果。同时针对一维弯曲角算子，利用全球四维变分同化系统进行了全球的同化系列试验，得出了非常明显的正效果。

第四章：GPS 掩星二维弯曲角算子。介绍了二维弯曲角算子的基本原理和算法实现。对二维弯曲角算子的计算规模进行了估计并与一维弯曲角算子的计算规模进行了对比。详细分析了二维弯曲角算子相对于一维弯曲角算子的优势所在，为二维弯曲角算子在全球四维变分同化系统的应用提供了大量可靠的数据。

第五章：观测误差模型。本章详细介绍了 GPS 掩星数据折射率观测以及弯曲角观测的观测误差模型，针对各自的观测误差模型做出相应的质量控制模型。

第六章：结束语。针对本文所做的工作进行总结，分析了其中还存在的问题，并对下一步的工作方向进行了详细的阐述。

第二章 基于一维折射率算子的 GPS RO 资料同化

一维折射率算子是 GPS RO 资料同化的一种实现方法，同化的是折射率资料，同时一维折射率算子也是一维弯曲角算子的一个组成部分，所以将“一维折射率算子”和“折射率因子的选择”这两部分一起写做独立的“基于一维折射率算子的 GPS RO 资料同化”章节，是作者研究工作的重要组成部分。本章为了验证折射率算子不同形式的准确度和对预报效果的影响，针对不同的折射率因子取值和算子形式进行了详细的阐述和讨论，通过对不同折射率因子及算子形式进行了台风预报试验，分析了不同折射率因子及算子形式对预报的影响。

2.1 折射率因子的选择

2.1.1 基本情况

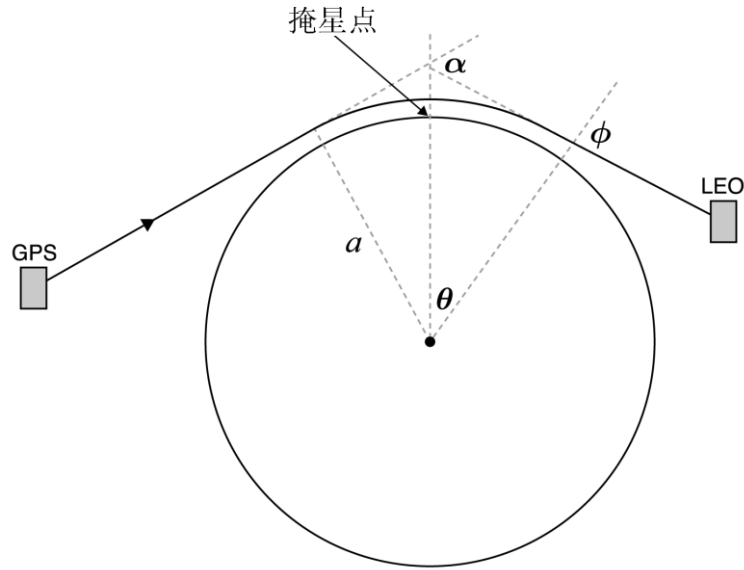


图 2.1 GPS 掩星事件原理示意图

GPS 无线电掩星技术的原始资料（raw data）是光学路径长度 L_1 和 L_2 （optical path length 或 phase path）。它们是折射指数 n 沿着射线路径的线积分：

$$L_1 = \int_{GPS}^{LEO} n(f_1) ds, L_2 = \int_{GPS}^{LEO} n(f_2) ds \quad (2.1)$$

这里，大气折射指数 n 由大气局地折射率 N^{LOC} 决定：

$$n = 10^{-6} N^{LOC} + 1 \quad (2.2)$$

局地折射率 N^{LOC} 是电离层密度函数 N_e 和大气温度 T 、干空气气压 P_d 和水汽压 P_w 的函数(Thayer(1974))^[36]：

$$N^{LOC} = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_w}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{P_w}{T^2} \right) Z_w^{-1} - C \frac{N_e}{f^2} \quad (2.3)$$

局地折射率 N^{LOC} 的表达式 (2.3) 右端的前三项，即 $k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{P_w}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{P_w}{T^2} \right) Z_w^{-1}$ ，其中 P_d 是干空气压强、 P_w 是水汽压强、 T 是绝对温度，代表中性大气的贡献；第四项，即 $-C \frac{N_e}{f^2}$ ，则代表电离层的贡献。 k_1 、 k_2 、 k_3 是大气折射率常数， Z_d^{-1} 和 Z_w^{-1} 为非理想气体的压缩因子。

在电离层中，折射指数 $n < 1$ ，并且局地折射率值与频率有关；在中性大气中，折射指数 $n > 1$ ，局地折射率值与频率无关。

上面(2.3)式中的前两项是干湿密度项，分别代表干湿分子的极化能力，第三项取决于水蒸汽分子固有的偶极距。式子中的非理想气体项通常从原始方程中忽略，在高湿度条件下通常引入 $N_d=0.04$ ppm 的干空气项误差和 $N_w=0.1$ ppm 的湿空气误差项。通过忽略压缩因子，干空气项引入的误差是和干空气项精度的量级是相同的。而湿空气项引入的误差比湿空气项本身的误差要小很多。

传统上，通过采用大气压 P ，其中 $P=P_d+P_w$ ，三项表达式通常被简化为一个两项表达式，折射率常数通常采用 Smith 和 Weintraub (1953) [37] 给出的值：

$$N \approx 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) + 3.73 \times 10^5 \left(\frac{P_w}{T^2} \right) \quad (2.4)$$

上式中， P 和 P_w 以 mb 为单位， T 以 K 为单位，表达式缺少了中间一项。在 GPS RO 气象学社区中广泛使用表达式(2.4)。同时，ECMWF 和 NCEP 现行系统中也是采用这个方程。由于简化的二元折射率表达式在数值形式和物理方式上不如三项表达式更精确，所以针对之间的差异进行了分析和试验。

其中最关键的是 k_1 、 k_2 、 k_3 因子的选择，它们的值一般是通过经验确定。关于值的选择，有一个很长的列表清单表示这些指标在频谱中微波频率范围内的不确定性，在 Rueger (2002) 的论文中有对不同取值的详细讨论[38]，这里作者总结一下在 GPS 社区中引用最多的取值。

GPS RO 观测的一个主要的特点是他们不需要采用偏差订正而能够被同化进业务数值天气预报系统和再分析系统，这是因为同化的 GPS RO 观测资料通常是从一个原子钟时延精确测量得到的弯曲角廓线或折射率廓线。另外，GPS 资料正演问题比卫星辐射观测的同化更加直接，极大程度上是因为不确定分光谱学的参数和假定的良好混合气体浓聚物是准确的。实际上，GPS RO 观测的正演模式的准确需要凭经验得到折射率因子，但是这些值的可靠性却是特别的高。ECMWF 和 Met Office 业务运行应用的折射率因子的值来自于 1953 年的 Smith 和 Weintraub

(SW53)，而且最近的一些研究工作增加了它们的精度，例如，Hasegawa 和 Stokesberry (1975) (HS75)^[39]和 Bevis 等 (1994) (BEV94)^[40]。尤其是对文章中 k_1 因子的值有一个普遍一致的观点。 k_1 涉及到折射率中干空气的贡献， $k_1=77.6 \text{ KhPa}^{-1}$ ，这个值是在 GPS RO 研究中最有效的平均值。然而，Rueger (2002) (RU02) 提出了一组新的“最佳平均”折射率因子值，并且新的 k_1 因子比平均值大 0.05%。新的因子值基于对从 19 世纪 50 年代到 19 世纪 70 年代的试验工作的一个科学周密的重新计算。RU02 也考虑到空气中二氧化碳含量的提高而进行了一个很小的订正，但是此处这个订正是次要的。RU02 对于 GPS RO 弯曲角和折射率观测算子的未来开发有着重要的含义。

在数值天气预报系统中，法国气象局第一次对采用 Rueger 因子的 GPS RO 数据进行监测，但是他们并没有在同化试验中应用。Rueger 因子现在在加拿大环境署进行了业务化应用 (Aparicio 和 Deblonde, 2008)^[41]。ECMWF 最近进行了预报影响试验，以比较 SW53 因子和 RU02 “最佳平均”因子。在业务化 GPS RO 观测同化系统中采用 Rueger 的因子，发现 RU02 因子使大气的平均状态降低了 0.1K。这个温度的下降降低了北半球无线电探空温度和高度的短期预报偏差，但是提高了热带和南半球的偏差。试验显示降温主要由“ k_1 ”折射率因子的改变引起的。有趣的是，提高的偏差相对于南半球的无线电探空，和 Josep Aparicio (加拿大环境署) 在 2008 年 ECMWF/GRAS SAF 研讨会上提到的结果十分地相似。Aparicio 用 Rueger 因子进行业务化，但是为了减少相对于无线电探空的位势高度偏差，也将 GPS RO 算子中的非理想气体因素考虑进去了 (Aparicio 等, 2009)^[42]。还有就是，NCEP 最近报告了 RU02 k_1 值中的一些问题，建议这个值过大 (Cucurull, 2009)^[43]，同样，NCEP 也采用了 BEV94 因子值。

文章给出了在数值天气预报系统影响实验中应用 RU02 因子的困难，通过调整标准值 (例如：SW53/HS75/BEV94) 和 RU02 的 k_1 值之间的差异。这一部分显示 k_1 因子值比一致认为的情况有更大的不确定性。本章首先详细描述从不同文章的折射率观测得到折射率因子值的时候产生的微小的数值差异的原因，解释了二氧化碳的贡献率是否考虑进因子值的问题。本章分析研究了在 GPS RO 观测算子中折射率因子的选择和非理想气体影响之间的关系。本章引入和比较了 SW53, BEV94 和其他文章中给出的折射率因子的标准值和 RU02 的新的估值，期望弥合 k_1 因子值之间的差异。预报影响试验检测了 SW53 和 RU02 因子的敏感度，包含非理想气体影响的分析在下一部分给出，结果和讨论在最后给出。

2.1.2 折射率因子

2.1.2.1 二氧化碳含量的影响

Rueger 的论文详细和通俗地回顾和描述了无线电折射率因子。为了将已经发表的论文中的一些问题表述清楚，本节只给出与 GPS 无线电掩星同化问题相关度最大的要点。本节总结分析了已发表论文中不一致的结果，但并没有对个别实验的精度进行重新试验。在 Cucurull (2009) 的论文中给出了折射率因子的讨论。

忽略非理想气体的影响，大气折射率 N 可以近似为一个三项表达式：

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (2.5)$$

其中， P_d 是干空气压强 (hPa)， e 是水汽分压 (hPa)，并且 T 是温度 (K)。 k_1 ， k_2 和 k_3 是通过经验数值得到的。另一种形式的折射率方程是：

$$N = k_1 \frac{P}{T} + k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (2.6)$$

P 是整体大气压 ($P = P_d + e$)， $k_2' = k_2 - k_1$ 。SW53 利用了第二种模式，得到了下面的三项表达式：

$$N = \frac{77.6P}{T} - \frac{6.0e}{T} + \frac{3.75 \times 10^5 e}{T^2} \quad (2.7)$$

简化式(2.7)，通过将第二项乘以 $273/T$ ，合并第二项和第三项，给出下式：

$$N \approx \frac{77.6P}{T} + \frac{3.73 \times 10^5 e}{T^2} \quad (2.8)$$

ECMWF 和 Met Office 使用的就是上式。本章的主要兴趣点在于 $k_1 = 77.6$ 这一项。这一项是由 1951 年发表的确定干空气绝缘系数的三个实验的均值得到的。SW53 引入了这个值的不确定性， $k_1 = 77.607 \pm 0.013 \text{ KhPa}^{-1}$ 不确定度为 0.02%。GPS 气象学社区广泛使用 SW53 的 k_1 值，但是最近的研究订正了 k_1 的值。例如，从 1951 年到 1970 年，HS75 和 BEV94 对 20 个实验的结果进行过统计分析。HS75 提出 $k_1 = 77.600 \pm 0.032 \text{ KhPa}^{-1}$ ，BEV94 从地基 GPS 研究中得到 $k_1 = 77.60 \pm 0.05 \text{ KhPa}^{-1}$ 。还有，Kursinski 等(1997)估计一般情况下 SW53 公式中干空气的不确定性低于 0.06%，在 500 hPa 以上低于 0.03%^[44]。因此， $k_1 = 77.6$ 已经成为 GPS 气象学应用的“标准值”。

RU02 与 HS75 和 BEV94 采用了相似的统计学分析方法，并且产生了一组新的“最佳平均”折射率因子。这组折射率因子由 Rueger 认为最可靠的试验的加权平均值计算得出。从 HS75 和 BEV94 的所有试验中的 11 个试验以及从 1977 年的一个附加的新实验中采集数据，并根据 Rueger 对试验数据的再分析，给出公式：

$$N = \frac{77.6848P}{T} - \frac{6.3896e}{T} + \frac{3.75463 \times 10^5 e}{T^2} \quad (2.9)$$

另外, RU02 考虑到大气中二氧化碳的含量从 0.03% 上升到 0.0375%, 因此调整了 k_1 的值。这个调整使公式变为:

$$N = \frac{77.6890P}{T} - \frac{6.3896e}{T} + \frac{3.75463 \times 10^5 e}{T^2} \quad (2.10)$$

二氧化碳的增长带来的 k_1 的变化为 0.0042 KhPa^{-1} , 大约有 0.005% 的增长。RU02 估计了新的最佳平均 k_1 值的不确定性小于 0.02% (0.015 KhPa^{-1})。RU02 和标准值 ($k_1=77.6$) 之间 k_1 因子的差值为 $\Delta k_1 = 0.089 \text{ KhPa}^{-1}$, 增长率为 0.115%, 比 RU02 引入的不确定性大 5 倍。 k_1 因子值的变化对于 GPS 无线电掩星数据同化作用非常明显, RU02 的值应用在高对流层及以上正演模式的弯曲角中产生了一个 0.115% 的系统性增长^[45]。在同化过程中, 这个高度和位置的观测被给予最大的权重。为了提供一个统计学上鲁棒的 k_1 的估值, 作者本质上做了相同的试验, 采用可以得到的相同试验数据, 因此 RU02 给出的 k_1 值和 HS75 及 BEV94 给出的值之间的不一致和试验数据无关。造成差异的两个原因是非常明确的^[43]。第一, k_1 值的部分差值可以归因于一个简单的数值不一致, 因为其假定 $0^\circ\text{C}=273\text{K}$, 利用 $k_1=NT/P$, 从观测 N 中得到 k_1 的值。众多的作者采用了这个近似, 包括 SW53, HS75 和 BEV94。因此, 在众多论文作者给出的从实验当中得到的 k_1 的值, RU02 的值系统性的偏大——通过 $273.15/273$ 或相等的 0.055%。相对于 HS75 和 BEV94 给出的采用同样试验得到的 k_1 值, 这个原因几乎造成了 k_1 值差异的 50%。

第二个原因是 HS75 和 BEV94 给出的得到因子值的大气是含有二氧化碳的自由干空气 (注意 SW53 考虑了 0.03% 的二氧化碳含量, 而其原始数据为 0.02%)。这些 k_1 因子应该应用在一个四项的折射率公式中, 添加一个明确考虑到大气二氧化碳含量对折射率贡献的新项。这个基本事实在 BEV94 中没有提到, BEV94 用的是三项表达式, 但是在 HS75 中提到了二氧化碳的贡献。RU02 的 k_1 值包含了 0.0375% 的二氧化碳含量。包含 0.0375% 的二氧化碳含量使 k_1 值提高了约 0.02。如果将这个改动和 0°C 转换的误差合并, 那么 HS75 和 BEV94 的 k_1 的值将从 $k_1=77.60$ 增加到 $k_1 \approx 77.66$, 是 $\Delta k_1 = 0.089 \text{ KhPa}^{-1}$ 值的 $2/3$ 。

余下的 k_1 值之间的差异可能是由于数据的选择造成的。RU02 只是使用了 HS75 和 BEV94 做的二十个试验中的九个试验的数据。比如, RU02 怀疑由可见光或者红外线计算出来的折射率数据存在误差而没有采用这些数据, 因为可见光或红外线使得到的 k_1 值的差值变低。总之, RU02 提出的 k_1 因子比标准值更加鲁棒和可靠。

2.1.2.2 非理想气体影响

另一个使因子更加复杂的情况是计算 k_1 时包含非理想气体的影响。一般情况下，大部分作者希望通过假定密度公式 $\rho = P/RT$ 而忽略非理想气体影响从一系列的 N 的观测利用公式 $k_1 = NT/P$ 得到 k_1 的值。“这些值是真实状态而不是理想气体状态”，但是他们却用理想气体方程得到 k_1 。同样的，Boudouris (1963) 给出的数据是“针对温度和压强经过 Van der Waals 真实气体订正的”^[46]。然而，Boudouris 并没有给出关于订正的特性和大小的详细信息。

Thayer (1974) 引入了一个更一般的折射率三项表达式：

$$N = \frac{k_1 P_d}{Z_d T} + \frac{k_2 e}{Z_w T} + \frac{k_3 e}{Z_w T^2} \quad (2.11)$$

其中， P_d 是干空气气压， Z_d 和 Z_w 分别是干空气和水汽的压缩系数。压缩系数是由于考虑到非理想气体的影响，例如，分子大小的有限性和相互作用，并且他们是压强、温度和水汽压的一个函数。在正常的大气状态下，压缩率小于 1，所以包含它们的方程计算得到的 N 值偏大，式(2.11)的一个复杂形式是如果通过忽略非理想气体影响得到压缩系数，它们并不是真正的常数，因为每个因子包含压缩系数，压缩系数本身是一个大气状态的函数。

Thayer (1974) 从 N 的观测值得到 k_1 时包含了非理想气体影响^[36]。实际上，Thayer 是从与 SW53 用的相同的试验数据和折射率值得到的 k_1 的估计值，其中 $N = 288.04 \pm 0.05$ ，但是订正的过程中使用的是 $0^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$ 。因子通过公式 $k_1 = (NTZ_d)/P$ 得到，其中 $1/Z_d = 1.000588$ 是在压强 $P = 1013.25 \text{ hPa}$ 和 $T = 273.15 \text{ K}$ 的情况下得到的干空气压缩系数的倒数，计算得到的 k_1 的值是：

$$k_1 = 288.04 \times \left(\frac{273.15}{1013.25 \times 1.000588} \right) = 77.604 \quad (2.12)$$

可以注意到一个有趣的现象，由于假定 $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$ 引起的 SW53 误差几乎完全被消除，通过忽略非理想气体影响而带来的附加误差，当 $P = 1013.25 \text{ hPa}$ ， $T = 273.15 \text{ K}$ 时， $(273.15/273) = 1.000549$ 和 $1/Z_d = 1.000588$ 。这意味着 Thayer 和 SW53 的 k_1 的值有着良好的统一性。然而，这些值应该不同，因为它们是在不同的折射率方程的公式中得出的。Kursinski 等 (1997) 基于他们对于 SW53 的 k_1 因子小于“0.03%百帕”的误差估计，和 Thayer 的表达式进行了对比^[44]。然而，需要注意的是，和 SW53 一样，RU02 怀疑 Thayer 的 k_1 值，因为它部分基于无线电波长的优化观测而得出，这个方法会降低 k_1 计算值的偏差。Cucurull (2009) 在一个不包含压缩系数的折射率方程中测试了 Thayer 折射率因子。这个测试方法是有问题的，因为它们应用在一个包含压缩系数的方程中，所以 Thayer 因子的值变小了。

RU02 从实验的 N 值中得到 k_1 的值的过程不包括非理想气体的影响, Rueger 确认是否引入压缩系数需要进一步的研究。引入一个压缩系数 $Z_d = 1/1.000588$ 将会使 RU02 的最佳平均值从 $k_1 = 77.689$ 减少到 $k_1 = 77.643$ 。RU02 讨论如果 k_1 值将要在像公式 (2.11) 包含压缩系数的 N 的表达式中应用, 那么在得到 k_1 的值时要包含非理想气体影响。相反地, 如果是忽略非理想气体影响得到的 k_1 , 它应该在不包含压缩系数的 N 的表达式中应用 (公式 (2.6))。由于是在 $P = 1013.25$ hPa 和 $T = 273.15$ K 时计算同样的折射率值, 因此在偏差和因子的使用上是一致的, 但是由于压缩系数是压强和温度的一个函数, 所以一般这些方法得到的结果会有十分微小的不同。

2.2 折射率因子值三维变分同化试验

2.2.1 WRF-3DVAR 中折射率算子实现

2.2.1.1 一维折射率算子

相对于弯曲角资料同化, 大气折射率廓线同化的最大优点是观测算子简单, 计算量低。在利用 Abel 变换计算大气折射率时, 作为近似, 从弯曲角得到的折射率可以看成是信号路径上的“平均”折射率, 即在信号路径的近地点附近的区域给予较大的权重。因此对于折射率同化, 有两个选择, 即局地折射率观测算子同化和非局地折射率观测算子同化。

a) 局地折射率观测算子同化

局地折射率观测算子为:

$$N^{LOC} = F_l H_N(T, p, q) \quad (2.13)$$

其中, $H_N(T, p, q)$ 即为折射率 N , 可完成模式网格点上非球对称折射率的计算, F_l 将模式网格点上的折射率插值到射线的近地面切点位置。

采用该算子的优点是计算简单, 缺点是球对称假定在条件不满足的情况下引起较大误差。

b) 非局地折射率观测算子同化

局地折射率观测算子用近地面切点位置处垂直廓线的大气折射率来逼近观测大气折射率廓线, 因此当大气参数或折射率水平梯度较大时, 将带来较大的误差。为解决这一问题, 近年来国内外研究采用近似模拟射线路径上大气折射率廓线的观测算子进行折射率同化:

$$N^{NON-LOC} = \mathbf{F} H_N(T, p, q) \quad (2.14)$$

其中 $H_N(T, p, q)$ 即为折射率 N , 可完成模式网格点上非球对称折射率的计算; \mathbf{F} 为

将大气折射率转换为弯曲角的线性化非球对称正演算子； \mathbf{I} 为线性化球对称反演算子。

忽略不完美的气体影响，一个有 3 项关联折射率到大气参数的表达式(2.5)。其中， k_1 ， k_2 和 k_3 的取值都是经验值。计算在观测位势高度层上的折射率 N 需要将公式 (2.5) 应用到压力，湿度和温度的背景场廓线中并且将结果插值到观测高度。

折射率算子计算折射率的过程分为以下几个步骤。

(1) 计算水蒸气分压力。在每一个背景场层中，水蒸气压力 e 来自于比湿 q ：

$$q = \frac{r}{1+r}; \quad r \text{ 是水蒸气的干混合比, 定义为: } r = \varepsilon_w \left(\frac{e}{p-e} \right); \quad \text{由上面的两个公式得}$$

$$\text{到了 } e \text{ 和背景场比湿 } q \text{ 和压强 } p: \quad e = p \left(\frac{q}{\varepsilon_w + (1-\varepsilon_w)q} \right).$$

(2) 计算折射率 N 。 N 的表达式方程被用来计算在背景场垂直层折射率廓线 $N(Z)$ ，来自于压力，温度和水蒸气分压的背景场廓线。

(3) 将折射率插入到观测位势高度层中。在背景场位势高度层 Z 上面计算的折射率值 N 被插入到需要的观测高度，以能够直接和观测量进行比较。在每一个观测高度 k ，输出折射率 *refrac* 利用下述公式进行计算：

$$\ln(\text{refrac}(k)) = \ln(N_j) + \frac{\text{geop}(k)_y - \text{geop}(j)_x}{\text{geop}(j-1)_x - \text{geop}(j)_x} (\ln(N_{j-1}) - \ln(N_j)) \quad (2.15)$$

其中观测层 k 在背景场模式层 $j-1$ 和 j 之间。

采用线性化非局部观测算子有如下特征：简化的射线轨道不随折射率分布而变化，从而避免了二维弯曲角同化中每一步迭代都需要重新计算射线轨迹的问题，因此计算量仅比局部折射率算子增加一点，但远小于弯曲角同化计算；同时解决了折射率水平梯度，其精度好于局部折射率算子，但略逊于二维弯曲角观测算子。

对于 WRF-3DVAR 来说，一维折射率观测的同化采用的是简单的局地折射率算子，是在模式背景场网格点上实现的，而不是在观测点上进行的变分同化。其实现过程前两步（1）计算水蒸气分压力和（2）计算折射率是完全相同的，差别就在第（3）步的实现上，WRF-3DVAR 中，并不是将模式背景场格点上的折射率插值到观测点的位势层中，而是将观测的折射率廓线的值通过三维插值算法插值到模式背景场网格点的位势高度层上，在模式背景场网格点进行数据同化。

根据前面 2.1 节对于折射率因子的讨论，修改 k_1 、 k_2 、 k_3 因子的值，准备了三个不同的折射率因子值变分同化的 WRF-3DVAR 程序，SW53 二项表达式、SW53 三项表达式和 RU02 表达式。在修改程序的过程中，需要将 WRF-3DVAR 中已经实现的 SW53 二项表达式修改为 SW53 三项表达式和 RU02 三项表达式，需要修改模式中的折射率因子的值，并增加一个计算项。这个计算项需要在正演算子、切

线性和伴随模式中同时添加，这样才能得出正确的结果。

2.3.1.2 一维折射率同化的资料来源

WRFDA-3DVAR 中根据资料的格式的不同，可以进行两种格式资料的三维变分同化处理：LITTLE_R 格式资料同化和 NCEP BUFR 格式资料同化。一般的气象组织和机构提供的观测资料，尤其是卫星观测的资料格式常用的无非有两种，一种是 NetCDF 格式的观测资料，它是由美国大学大气研究协会（University Corporation for Atmospheric Research, UCAR）的 Unidata 项目科学家针对科学数据的特点开发的，是一种面向数组型并适用于网络共享的数据的描述和编码标准。一种是 BUFR（Binary Universal Form of the Representation of Meteorology Data）气象数据通用二进制格式，是气象领域广泛使用的一种数据格式。BUFR 格式一般用于存储不是标准的格点数据，所以通常用于观测数据的存储。欧洲和美国各自提出了自己的 BUFR 格式编码规范，欧洲和美国的 BUFR 格式编码是互相不兼容的，所以，在处理 BUFR 格式编码的时候，需要分清楚 BUFR 格式编码是欧洲的还是美国的。其中，NCEP BUFR 格式是美国 NCEP（National Centers for Environmental Prediction）提供的 BUFR 格式编码观测数据资料。

LITTLE_R 格式资料同化是指将 NC 或者 BUFR 格式的观测资料通过格式转换软件转化成 LITTLE_R 格式资料，然后将 LITTLE_R 格式资料通过 obsproc 程序转换为 ASCII 格式观测资料，最后放入到 WRF-3DVAR 中进行数据同化。

NCEP BUFR 格式的资料在 WRF-3DVAR 系统中是可以直接进行同化的。WRF-3DVAR 中读取 NCEP BUFR 资料的程序是一个独立体系，可以直接将 NCEP BUFR 格式编码的资料进行解码，读取到观测向量当中。

针对 GPS 无线电掩星资料，其数据来源主要有两个途径：一个是 CDAAC（COSMIC Data Analysis and Archival Center）提供的 COSMIC 资料，其资料格式以 NC 格式编码为主，可以使用第一种同化方式将 GPS 无线电掩星观测的 NC 格式资料转化成 LITTLE_R 格式资料进行数据同化；另一个是 NCEP 提供的 BUFR 格式的 GPS 无线电掩星观测资料，其中包含了 CHAMP、COSMIC、METOPA、CNOFS、GPSMET、GPSMETAS、GRACE、SACC、TSX 等全球绝大部分掩星观测资料，其中掩星资料比例位居前列的是：COSMIC 掩星资料 62.05%，METOPA 掩星资料占 14.31%，CHAMP 掩星资料占 7.21%，SACC 掩星资料占 6.33%，GRACE 掩星资料占 4.12%，TSX 掩星资料占 4.11%。WRF-3DVAR 中读取 GPS 掩星 BUFR 资料的程序是独立的，其将每一层均看做一个观测，读入到 iv 变量中，由于是区域模式，而且每次同化的只是一个时次的观测，所以资料量非常的小，NCEP 将一天的掩星数据分成了四个时次。

GPS RO 数据的三维变分同化试验采用的是 NCEP 的一个时次的掩星观测资

料，因为其包含了几乎现在仍在运行的绝大部分掩星的观测资料，下面对其中占比最大的 COSMIC 资料特点进行介绍

2.2.2 观测资料介绍

因为三维变分同化试验中采用的是 COSMIC 观测资料，下面对 COSMIC 计划以及 COSMIC 资料做一个详细的介绍。

COSMIC 全称为 The Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate，COSMIC 是 6 颗低轨道微卫星构成的星座系统，接收 28 颗 GPS 定位卫星发射的 1.58 及 1.23 千兆赫 (GHz) 无线电信号。每颗卫星重量约为 40 kg，搭载三个科学仪器：（1）气象用全球定位系统接收器 (GPS/MET Receiver)，（2）小型电离层光测器 (TIP)，（3）三频率指标信号仪 (Tri-Band Beacon)，用来建立全球大气重要参数的实时观测作业网络。从 2006 年 7 月 28 日开始，COSMIC 可提供全球约 2500 个掩星点的大气和电离层的观测资料和反演的要素廓线，资料的垂直分辨率在平流层为 1.5 km，在低对流层平均为 0.5 km，一天提供的资料量达 12GB。COSMIC 的主要目标为：（1）增进全球及地区性天气预报作业的精确度；（2）增进太空天气的监控预报能力及电离层动态监控等相关用途；（3）提供气候研究及全球变化的研究资料；（4）提供地球重力及卫星轨道研究资料等。

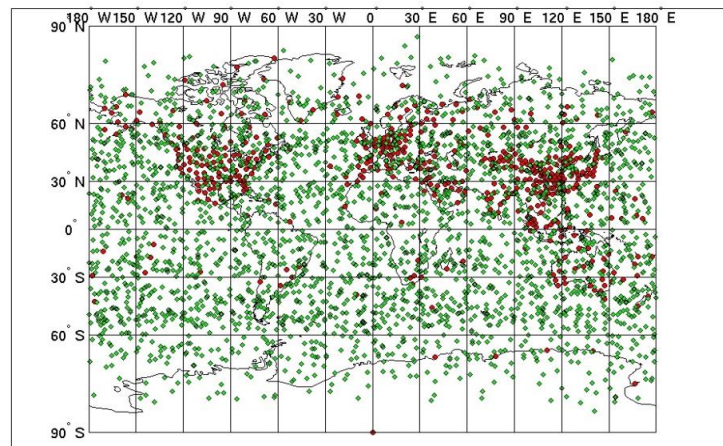


图 2.2 COSMIC 的 6 颗卫星每天提供的全球观测（可达 2500 个掩星事件）

COSMIC Data Analysis and Archive Center (CDAAC) 负责 COSMIC 数据的分析工作。CDAAC 计算两种解决方案：一个近实时 (near-real-time) 解决方案被用作天气和空间天气监测和预报应用和一个更精确和更好验证的后处理解决方案用来做气候和大气研究。COSMIC 后处理数据通常在 6 周之后可以下载，COSMICRT 的近实时观测通常可以在几小时之后得到。

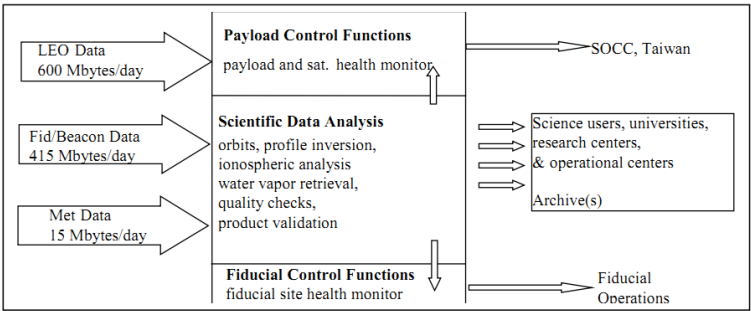


图 2.3 CDAAC 的功能架构图（引自 CDAAC 官网）

CDAAC 提供多种数据，根据数据的处理的等级可以分为四类，如下表所示：

表 2.1 GPS 掩星观测数据分类

等级	定义	内容
Level 0	原始数据	各个设备观测的原数据
Level 1a	根据辅助资料定位的数据	相位延迟和多普勒频移；GPS 和 LEO 的轨道参数，地面控制站等辅助信息
Level 1b	标定后的初级数据	弯曲角和碰撞参数廓线；精密轨道数据
Level 2	标定数据反演的数据	反演的大气要素廓线，地面气压，数据质量

COSMIC 后处理数据主要有两种数据产品在文件名中可以看出：2009.2650--所有文件类型到 atmObj，包含 leoOrb，comClk，occTab 和 2010.2640--所有文件类型开始于 atmPhs，包含 atmPrf，werPrf。COSMIC 实时数据提供从 2010.335 到现在的数据。现在 CDAAC 提供大约 1800 个中性大气廓线每天，这个数值低于计划中的 2500 个日廓线数量。主要的原因是：（1）一些卫星仍没有在它们的最终轨道上，CDAAC 每 5 个小时下载一次数据。为了避免接收器内存溢出，一些数据被定时清除；（2）在轨道上升过程中，精确轨道确定（Precise Orbit Determination）是不可能的；（3）L2 剩余相位动态范围问题；（4）高频率数据代沟。

COSMIC 科学要求和技术实现如下表所示：

表 2.2 COSMIC 科学要求

COSMIC 科学要求		
数据参数	科学要求	备注
GPS 掩星垂直分辨率	0.3-1.5 km	接近地表 0.3km，45km 处 1.5km
GPS 掩星水平分辨率	300-600 km	锋面处更小，有大的倾斜
弯角廓线	1.5e-6 rad	主要被剩余电离层误差和数据噪声限制
折射率廓线	<1%	在 10-30km 之间达到 0.2%
温度廓线	1 deg C	在 0-40km 高度范围，假定是干空气
水汽廓线	<1-10%	在 0-5km 之间，假定模型温度误差 1-2 deg；误差在 5-10 处更大

位势高度 vs. 气压	10-20 m	在 0-30km 之间（在有最大日光的时候更差）
电子密度廓线	<1-20%	廓线质量在 F2 处顶峰-其他地方可能更差；被水平梯度限制
GPS TEC	0.001TECU	相关 TEC（完全~3-5 TECU）
TBB TEC	0.003TECU	相关 TEC（完全~1-3 TECU）
TIP 峰值对于 F2 密度，NmF2	<1-10%	在高电子密度区域表现更好，只在地球夜面工作
磁力计测量	10nano-tesla(nt)	精确度在 1Hz 频率，500 nt 精确
Scintillation GPS	n/a	100 Hz SNR 数据用来决定 S4
Scintillation TBB	n/a	50-1000 Hz SNR 数据
LEO 位置	~10 cm	3-D rms 位置误差
LEO 速度	<0.1 mm/s	相关速度误差对于成对的卫星将会小一些

COSMIC 探空资料部分廓线的探测高度范围及垂直分辨率和分层数的列表如下所示：

表 2.3 空基 COSMIC 探空资料廓线列表（部分）

资料名称	探测高度(km)	垂直分辨率(m)	分层数	资料格式
atmPrf	0~60	4	3000-5000	CDF
wetPrf	0~60	100	400	CDF
bfrPrf	0~60	197	300	Binary
ionPrf	1.5~800	~2800	300	CDF

2.2.3 试验设计与模拟结果

2.2.3.1 “纳沙”台风介绍

我国地域辽阔，天气过程多种多样，我国东南部地区以及台湾、海南地区在夏季受到西北太平洋热带气旋的影响巨大。台风所伴随的强风和暴雨经常会酿成严重的灾害，给人们的生产生活以及生命财产安全带来巨大的不便和损失，因此准确的台风预报对于我国人民生命财产安全来说十分重要。台风的生成与发展发生在广阔的洋面上，然而在一般的传统观测中，海面上的观测资料比较缺乏，无法提供足够的观测资料以有效掌握台风的结构与发展。目前主要依赖遥感技术（卫星及雷达等）提供广大洋面上的天气资料。

编号 1117 的热带风暴“纳沙”（英文名：NESAT，名字来源：柬埔寨，名字意义：渔夫）是 2011 年第 17 号热带风暴，于 9 月 24 日上午在西北太平洋洋面上生成，9 月 26 日夜间和 29 日 7 时两度加强为强台风，是今年以来登陆我国强度最强的台风（以强台风级别登陆海南），也是 6 年来登陆海南的最强台风。

2.2.3.2 模式参数设定

本实验采用 WRF 的涡旋跟随模式，双层区域移动嵌套，图 2.4 中的双层区域

图整幅图是最外层区域，里面黑色方框是嵌套区域，嵌套区域是随着台风移动的，外层区域中心位于北纬 20.5° ，东经 125.5° 。外层区域网格数为 250×250 ，分辨率 15km ；内层区域网格数 301×301 ，分辨率 5km 。内层区域的起始网格点为 90, 40。垂直解析度为不等间距共 55 层，模式层顶为 10hPa 。

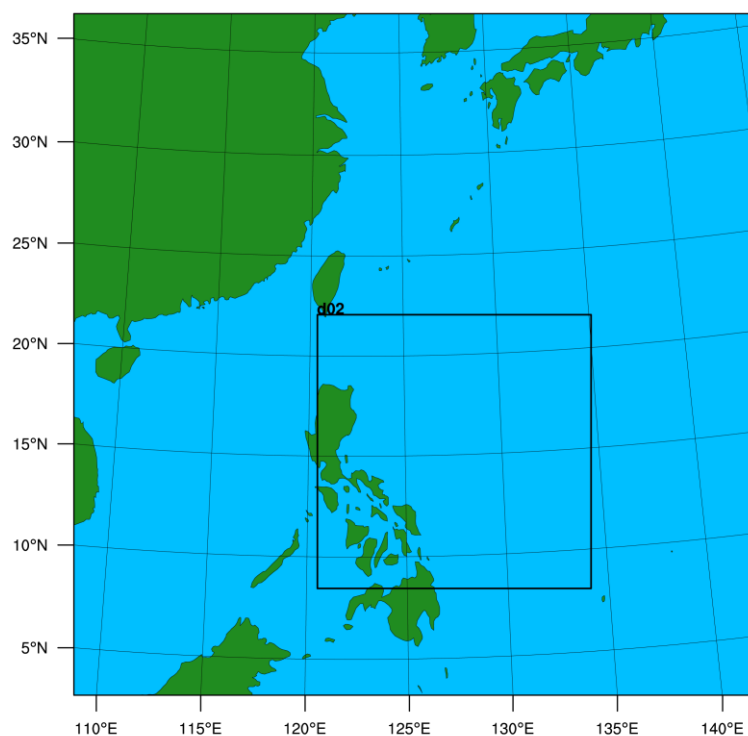


图 2.4 WRF 模式折射率试验双层区域图

WRF 采用的版本是 3.3.1 版，微物理方案采用 WSM6 框架，这个框架是拥有适合高分辨率模拟的冰、雪和霰的过程。采用 RRTM 长波辐射框架，Goddard 短波辐射框架，行星边界层采用 YSU 框架，积云参数化方案则采用 Kain-Fritsch 框架，积分时间步设定为 60s。

涡旋跟随选项设置，涡旋位置计算时间间隔为 15min，最大涡旋速度为 50m/sec ，与涡旋位置计算时间间隔一同使用来寻找显得涡旋中心位置。移动网格允许到达粗网格边缘的距离为 8 个粗网格。这个参数被用来定位压缩网格的中心点，使得所有网格随着热带气旋一起移动。跟踪涡旋的气压层为 50000Pa 。移动一个网格的时间为 10min，这个选项可能会在热带气旋仍旧十分微弱的时候对算法的追踪效果起到一定的作用。

在资料同化部分，采用 WRF-3DVAR 3.3.1 版，背景误差使用 NCEP 背景误差协方差矩阵（cv_option=3），有关背景误差中各个控制变量的调整系数，全部使用系统默认值。同化的时刻为 2011 年 9 月 25 日 12 时，同化的时间窗口为 2011 年 9 月 25 日 9 时到 15 时。“纳沙”台风的起报时间设定为 2011 年 9 月 25 日 12 时，终止时间为 2011 年 9 月 30 日 12 时。

2.2.3.3 台风路径试验及非理想气体影响试验

区域预报影响试验比较 SW53 两项的折射率正演算子与 SW53 提供的三项表达式因子、RU02 提供的因子的不同，对同化结果产生的影响。因此，设计 SW53 两项折射率正演算子试验为控制试验（CNTL），SW53 三项表达式（SW53）和 RU02 三项表达式（RU02）为对比试验。

区域预报影响试验的内容为通过同化折射率廓线建立新的分析场，并进行 5 天的预报，分析不同的 K 值因子以及两项和三项表达式对于热带气旋天气过程的影响。经过试验，得到的路径结果如下所示：

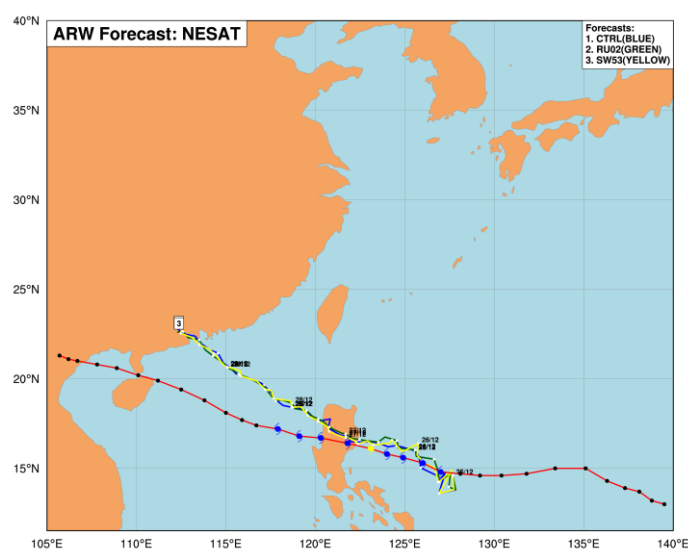


图 2.5 折射率预报影响试验台风路径图

图 2.5 中控制试验 CNTL 是标号 1 的蓝色路径线，RU02 是标号为 2 的绿色路径线，SW53 是标号为 3 的黄色路径线，台风路径图中的红色长线为实际台风路径。仔细分析 24 小时预报路径，可见 SW53 三项表达式属于二项表达式和 RU02 表达式两者预报结果的中间路径，相比更接近实际的路径，此时路径的不同是最明显的。分析 120 小时预报的整体路径，虽然在 24 小时之后的路径重合部分比较多，但是从细微的路径上的不同仍可以得出和 24 小时预报路径分析结果相一致的结论。由路径试验结果可以得出 SW53 二项表达式不如三项表达式精确，因为 SW53 二项表达式就是 SW53 三项表达式的一个近似，而 RU02 对折射率因子的调整偏大，在计算折射率因子值的方法上 RU02 仍存在问题。依据本次实验的结果，SW53 三项表达式是一个较好的选择。

本实验针对折射率进行三维变分同化试验，共同化了外层区域一个时次（同化窗口 6 个小时）的 8 个掩星事件，由于折射率因子值之间的差异所造成的最后计算得到的折射率的差异其实是十分微小的，但是在三个实验的台风路径仍表现出一定的差异，说明折射率因子值的选择对折射率的计算及最终的模式预报影响

较大，选择一个正确的折射率因子有助于提高数据同化及模式预报的结果。

非理想气体影响试验是运行单独的正演模式程序生成两种不同折射率结果，分别利用的是 SW53 的表达式以及考虑非理想气体影响的 SW53 表达式，记为 SW53_NONIDEAL，分别生成理想气体折射率 Ref_{SW53} 和非理想气体折射率 $\text{Ref}_{\text{SW53_NONIDEAL}}$ 。其中， $(\text{Ref}_{\text{SW53_NONIDEAL}} - \text{Ref}_{\text{SW53}})$ 的差值以及 $(\text{Ref}_{\text{SW53_NONIDEAL}} - \text{Ref}_{\text{SW53}}) / \text{Ref}_{\text{SW53}}$ 的平均值经过对 2012 年 4 月 10 日一天 METOP/GRAS 的 710 个掩星背景场廓线计算统计结果如下图所示：

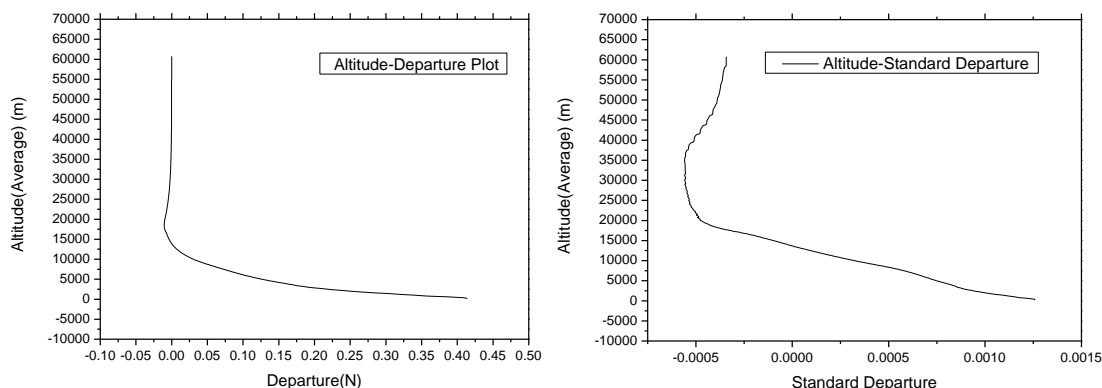


图 2.6 非理想气体影响试验统计结果图

由图 2.6 可见，主要差异在对流层中展现出来，尤其是在低中对流层差异很大，这是由于低中对流层的温度、压力和湿度较大，计算得到的折射率值较大引起的差异较大，这样的差异会导致在低对流层进行同化的时候，对分析场的调整会较大，从而影响模式预报的结果。

2.2.4 结果分析与讨论

本章的对于折射率因子的讨论源于在实现四维变分同化系统中的一维弯曲角算子时，其中计算折射率值部分采用哪种公式更佳考虑。对于简化的 SW53 二项表达式和 SW53 三项表达式可以明确的表明三项表达式要比现在各个业务系统中应用的二项表达式要更加的精确，并且计算量几乎是一样的。

ECMWF 的 Sean Healy 采用一系列的预报影响试验研究了同化弯角过程中折射率因子 (SW53 和 RU02) 的分析和预报敏感度。发现 RU02 因子的使用产生了一个在 300hPa 以下系统性的降温，并且对短期预报产生了一个混合的效果影响。通常情况下，预报得分对于两个因子是中性的，但是对于热带和南半球的温度和位势高度观测的预报得分，RU02 因子要差一点，主要是由于在对流层中温度偏差的增大导致的^[47]。

实际上，RU02 因子存在两个问题：1) 从观测 N 得到 k_1 时，假定 $0^\circ\text{C}=273\text{K}$ ；2) 系数只对于干燥的含二氧化碳的空气是有效的。另外，RU02 的最佳平均值可

能的限制是得到其折射率因子值得过程忽略了非理想气体的影响, 需要注意的是忽略非理想气体影响需要进行进一步的分析和试验。当得到折射率因子的时候忽略非理想气体影响产生的因子和大气状态是弱相关的。而且, 在 GPS RO 进行同化的时候, 大气压缩率同样需要包含到流体静力学方程的积分当中。

Aparicio 等(2009)最近证明了采用 RU02 因子的 GPS RO 折射率正演模式包含非理想气体影响之后, 减小了相对南半球的无线电探空位势高度观测的短期预报偏差^[42]。但是 ECMWF 在弯曲角正演模式中重新设定了这个考虑非理想气体影响的 RU02 因子值之后, 显示这个因子的试验结果和忽略非理想气体影响的 SW53 的控制实验的结果相近。当大气压缩率系数既包含在流体静力学方程积分当中, 也包含在折射率因子计算估值公式中的时候, RU02 的 k_1 值减少到了 77.643^[47]。

从以上的分析研究中可以看出, 在某些情况下, 当系统采用 SW53 值时, 可能会以错误的原因得到正确的结果。然而, 这不能分散本章对于 k_1 折射率因子的估值方法以及不确定度到底是多少的这个最基本问题的关注程度。

因此, 区域的 WRF-3DVAR 变分同化系统中和四维变分同化系统中仍旧采用了 SW53 的三项表达式来求取折射率。

2.3 本章小结

本章的内容源于在实现三维和四维变分同化系统中的一维弯曲角算子时, 其中计算折射率值部分采用哪种公式更佳考虑, 同时作为变分同化系统中一维折射率算子的折射率因子取值的讨论, 将局地折射率算子和折射率因子的选择作为作者研究的主要内容展现在了本章。

本章的研究了局地折射率算子的基本算法以及针对折射率因子具有不同选择的原因并分析获取折射率因子值的试验的科学性及合理性; 针对折射率因子值的选择以及 SW53 二项表达式和三项表达式的精确性做了相应的试验工作。由于时间有限的关系, 作者展示了因子取值不同的折射率算子的区域预报影响试验和折射率正演算子非理想气体影响试验。试验结果显示, 采用 SW53 的三项表达式要比二项表达式更加的精确。针对 SW53 和 RU02 的因子值, 研究发现 SW53 折射率因子值的表现要优于 RU02 的因子取值而且更加稳定, 因此三维变分同化系统和四维变分同化系统均采用了 SW53 三项表达式的折射率因子取值。

本章未能进一步评估不同的折射率因子对于四维变分同化系统中一维弯曲角算子的影响。这将在后续工作中进行进一步的完整的试验和效果评估。

第三章 基于一维弯曲角算子的 GPS RO 资料同化

由于弯曲角与折射率可通过 Abel 变换相互转换, 从原理上讲, 对弯曲角或折射率廓线资料分别采用一维观测算子进行同化时结果应当是相同的。但相对于折射率, 弯曲角的同化具有以下优点: 首先资料更为“原始”, 具有观测误差特性相对简单、资料处理早期就引入先验信息, 从而减少了物理假设的误差; 其次折射率廓线计算过程中 Abel 逆积分过程中上限设置不确定性所造成误差的传播较难定量估计, 采用弯曲角资料进行同化则可避免此问题。本章通过对在四维变分同化系统和 WRF-3DVAR 中实现基于一维弯曲角算子的 GPS 掩星弯曲角资料同化, 针对全球和区域模式分别进行了分析场偏差试验、GPS RO 资料对中期预报效果试验和台风路径及强度预报影响试验, 验证了 GPS RO 弯曲角资料的同化对预报的实际影响。

3.1 一维弯曲角算子的变分同化实现

3.1.1 正演算子的变分实现

一维弯曲角观测算子为:

$$\alpha = H_{\alpha} F_l H_N(T, p, q) \quad (3.1)$$

其中, $H_N(T, p, q)$ 即为 N , 可完成模式网格点上非球对称折射率的计算, F_l 将模式网格点上的折射率插值到射线的近地面切点位置; H_{α} 表示根据近地面切点位置折射率, 利用 Abel 变换得出弯曲角的计算过程。

利用 Abel 变换观测算子进行弯曲角资料同化, 虽然可以避免折射率计算过程中所带来的误差, 但由于在计算过程中同样采用球对称假设, 仍不能充分考虑大气变化的水平梯度。其优点是计算量略大于折射率廓线资料同化计算量, 但远小于二维射线追踪观测算子计算量。

首先介绍一下模式类型——混合 sigma 垂直层。对于四维变分同化应用程序, 背景场数据采用的是基于大气压强的垂直坐标模式, 所以, 在每一个模式层上计算出压强 P 是十分有必要的。每一个模式层的位势高度 Z 可以利用流体静力学方程计算出来:

$$Z(p) = Z(p_{sfc}) - \frac{R_{dry}}{g_{wmo}} \int_{p_{sfc}}^p T_v d \ln p \quad (3.2)$$

其中, $Z(p_{sfc})$ 是表面位势高度, R_{dry} 是干气体常数, g_{wmo} 是 WMO 标准重力加速度, T_v 是虚温。

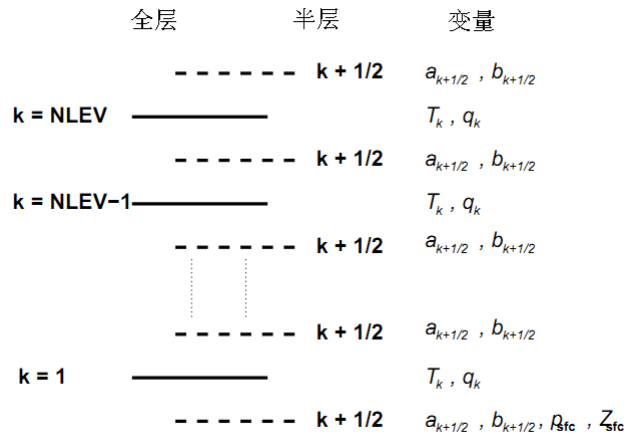


图 3.1 同化系统垂直模式层及系统数据结构结构图示

图 3.1 显示的是垂直模式层的概要图解说明以及系统的有关数据结构。大气被分成了 $NLEV$ 层，在这些层上定义了温度 T 和湿度 q 。这些层是通过层与层之间接触面（半层（half-levels））的压强进行的定义。每一个半层的大气压强不是直接存储的，而是通过表面气压 p_{sfc} 和存储在每一个半层中的层系数 $a_{k+1/2}$ ， $b_{k+1/2}$ 计算得出的：

$$p_{k+1/2} = a_{k+1/2} + b_{k+1/2} p_{sfc} \quad (3.3)$$

其中， $0 \leq k \leq NLEV$ 。每一层的气压则可以利用下面公式计算：

$$pres = \frac{1}{2}(p_{k-1/2} + p_{k+1/2}) \quad (3.4)$$

其中， $1 \leq k \leq NLEV$ 。层系数是通过 Level2d 数据（表(2.1)）提供的。

每一层的位势高度 Z_k 是根据 Simmons 和 Burridge（1981）的算法计算出来的^[48]。流体静力学方程的离散化是的半层的位势高度可以利用下面公式计算出来：

$$Z_{k+1/2} = Z_{sfc} + \sum_{j=1}^k \frac{R_{dry}(T_v)_j}{g_{wmo}} \ln\left(\frac{p_{k-1/2}}{p_{k+1/2}}\right) \quad (3.5)$$

其中， $1 \leq k \leq NLEV$ 。位势高度的层值通过插值法给出：

$$Z_k = Z_{k-1/2} + \alpha_k \frac{R_{dry}(T_v)_k}{g_{wmo}} \quad (3.6)$$

其中，插值因子 $\alpha_k = 1 - \frac{p_{k+1/2}}{\Delta p_k} \ln\left(\frac{p_{k-1/2}}{p_{k+1/2}}\right)$ ，其中 $1 \leq k \leq NLEV$ ， $\alpha(NLEV) = \ln(2)$ ，

半层之间的压强差用下式表示：

$$\Delta p_k = p_{k-1/2} - p_{k+1/2} \quad (3.7)$$

每一层的虚温 T_v 可以从背景场温度 T 和比湿 q 通过下面公式计算出来，

$$T_v = T \left[1 + \left(\frac{R_{vap}}{R_{dry}} - 1 \right) q \right] \quad (3.8)$$

其中, R_{vap} 是水汽的气体常数。

假定地球大气状态呈 (近似) 球对称分布, 弯角 (作为影响因子 a 的函数) 与折射率指数 (作为半径 r 的函数) 之间具有一一对应的函数关系:

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_i}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (3.9)$$

将 $x=nr$ 带入公式 (3.9), 可以得到:

$$\alpha(a) = -2a \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dx} dx \quad (3.10)$$

要计算一维弯曲角廓线, 分为以下几个步骤:

(1) 计算折射率廓线

在每一个背景场层上的折射率 N 需要利用折射率算子进行计算, 首先计算背景场位势高度层上的水蒸气分压, 然后计算背景场位势高度层处的折射率。

计算在观测位势高度层上的折射率 N 需要将公式 (2.5) 应用到压力, 湿度和温度的背景场廓线中并且将结果插值到观测高度。

在每一个背景场层中, 水蒸气压力 e 来自于比湿度 q :

$$q = \frac{r}{1+r} \quad (3.11)$$

其中, r 是水蒸气的干混合比, 定义为:

$$r = \varepsilon_w \left(\frac{e}{p-e} \right) \quad (3.12)$$

由公式 (3.11) 和公式 (3.12) 得到了 e :

$$e = p \left(\frac{q}{\varepsilon_w + (1-\varepsilon_w)q} \right) \quad (3.13)$$

公式 (2.5) 被用来计算在背景场垂直层折射率廓线 $N(Z)$, 来自于压力, 温度和水蒸气分压的背景场廓线。在背景场位势高度层 Z 上面计算的折射率值 N 被插入到需要的观测高度, 以能够直接和观测量进行比较。

在每一个观测高度 k , 输出折射率 $N(k)$ 利用下述公式进行计算:

$$\ln(N(k)) = \ln(N_j) + \frac{geop(k)_y - geop(j)_x}{geop(j-1)_x - geop(j)_x} (\ln(N_{j-1}) - \ln(N_j)) \quad (3.14)$$

其中观测层 k 在背景场模式层 $j-1$ 和 j 之间。

(2) 计算背景场影响因子

每一个背景场层的影响因子利用折射率的值 N 通过公式 (3.15) 计算得出影响

因子 $impact$ 的值:

$$impact = nr = (1 + 1 \times 10^{-6} N)(n + R_c) \quad (3.15)$$

(3) 计算弯曲角廓线

公式 (3.10) 可以通过下面的近似进行简化:

$$\frac{d \ln(n)}{dx} \approx 10^{-6} \frac{dN}{dx} \quad (3.16)$$

上述简化是有效的, 因为折射率非常的小, 并且:

$$\sqrt{x^2 - a^2} \approx \sqrt{2a(x - a)} \quad (3.17)$$

公式 (3.17) 是有效的, 因为折射率标高相对于地球半径非常小, 那么可以得出公式 (3.18):

$$\alpha(a) = -\sqrt{2a} 10^{-6} \int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{x-a}} \frac{dN}{dx} \quad (3.18)$$

假定折射率在背景场层之间随着 $x=nr$ 以指数形式变化, 这将推导出在 j 和 $j+1$ 层之间对于折射率梯度的计算公式:

$$\frac{dN}{dx} = -k_j N_j \exp(-k_j(x - x_j)) \quad (3.19)$$

$$k_j = \frac{\ln(N_j / N_{j+1})}{(x_{j+1} - x_j)} \quad (3.20)$$

其中 k_j 的值需要为正, 因此最小正值为 $k_j^{min}=10^{-6}$, 一个更严格的约束是 k_j 不能大于 $0.157N_j$, 这就避免了当大气接近超折射状态时在四维变分同化系统中遇到非线性问题。

将公式 (3.19) 带入到公式 (3.18) 中, 得到一个在 j 和 $j+1$ 层之间的弯曲角表达式:

$$\Delta\alpha_j = 10^{-6} k_j N_j \exp(-k_j(x_j - a)) \sqrt{2a} \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{\exp(-k_j(x - a))}{\sqrt{x - a}} dx \quad (3.21)$$

通过变量变换:

$$\Delta\alpha_j = 10^{-6} \sqrt{2\pi a k_j} N_j \exp(-k_j(x_j - a)) [\text{erf}(\sqrt{k_j(x_{j+1} - a)}) - \text{erf}(\sqrt{k_j(x_j - a)})] \quad (3.22)$$

其中, 误差方程 erf 表示如公式 (3.23):

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (3.23)$$

在某一个影响因子下的总得弯角值通过加和在 a 和背景场廓线的最高处之间的每一层的贡献值得到。在模式顶层的射线弯曲角利用公式 (3.24) 计算得到:

$$\Delta\alpha_{top} = 10^{-6} \sqrt{2\pi a k_j} N_j \exp(-k_j(x_j - a)) [1 - \text{erf}(\sqrt{k_j(x_j - a)})] \quad (3.24)$$

3.1.2 切线性和伴随模式算子

根据变分同化的基本原理，四维变分同化是基于模式和观测以及背景场的距离的代价函数的最小化，在最小化的过程中需要代价函数及其梯度。其实现的过程中除了正演算子以外，还需要同时实现该正演算子的切线性算子以及切线性模式的伴随模式算子。切线性模式提供了一个计算上有效的方法（尽管是近似方法），从代价函数来计算模式的轨迹。伴随模式是一个计算代价函数梯度的十分有效的工具。

在 4D-VAR 中，代价函数可以表示如下：

$$J = \underbrace{\frac{1}{2}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b)}_{J_b} + \underbrace{\frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (H_i M_i[\mathbf{x}_0] - \mathbf{y}_i)^T \mathbf{R}_i^{-1} (H_i M_i[\mathbf{x}_0] - \mathbf{y}_i)}_{J_o} \quad (3.25)$$

其中， \mathbf{B} ：背景场误差协方差矩阵； \mathbf{R} ：观测误差协方差矩阵（仪器+插值+观测算子误差）； M ：正演非线性预报模式（模式状态量的时间演化，下标 i ）； H ：观测算子（从模式空间到观测空间）。

$$\min J \Leftrightarrow \nabla_{\mathbf{x}_0} J = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b) + \sum_{i=0}^n \mathbf{M}'^T[t_i, t_0] \mathbf{H}_i'^T \mathbf{R}_i^{-1} (H_i M_i[\mathbf{x}_0] - \mathbf{y}_i) = 0 \quad (3.26)$$

其中， \mathbf{H}'^T 是观测算子的切线性伴随模式算子， \mathbf{M}'^T 是预报模式的切线性伴随模式算子。变分同化系统采用的是增量化四维变分同化方法，在增量化四维变分同化方法中，代价函数是以增量的形式进行最小化的：

$$\delta x_i = M'[t_0, t_i] \delta x_0 \quad (3.27)$$

任何时刻 t_i 的模式变量定义为： $x_i = x_{ii} + \delta x_i$ ， $x_{ii} = M(t_0, t_i)x_{t_0}$ 。 x_i 是进行线性化过程的轨迹（在 $t=0$ 时， $x_i = x_b$ ）。

4D-VAR 代价函数可以被近似为一个一阶公式：

$$J(\delta x_0) = \frac{1}{2} \delta x_0^T B^{-1} \delta x_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (H_i' M'[t_0, t_i] \delta x_0 - d_i)^T R^{-1} (H_i' M'[t_0, t_i] \delta x_0 - d_i) \quad (3.28)$$

其中 $d_i = y_i - H_i(x_{ii})$ 是利用非线性模式和观测算子计算出的偏差。代价函数的梯度的最小化为：

$$\min J \Leftrightarrow \nabla_{\delta x_0} J = B^{-1} \delta x_0 + \sum_{i=0}^n M'^T[t_i, t_0] H_i'^T R^{-1} (H_i' \delta x_i - d_i) = 0 \quad (3.29)$$

M' 和 H_i' 是最小化过程中计算增量更新时用到的切线性模式（迭代过程）。 M'^T 和 $H_i'^T$ 式对于初始态得到代价函数梯度用到的伴随模式。

在一阶近似中，控制变量的扰动 δx （初始态）的演变对应于切线性模式：

$$\delta x_i = \left[\frac{\partial M_i(x)}{\partial x} \right]_{x_{i-1}} \delta x_{i-1} = M_i' \delta x_{i-1} \quad (3.30)$$

其中, i 是时间步。初始状态附近的代价函数的扰动是:

$$\begin{aligned} \delta J(x_0, \delta x_0) &= \frac{1}{2} \delta x_0^T B^{-1} \delta x_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (H_i' \delta x_i - d_i)^T R_i^{-1} (H_i' \delta x_i - d_i) \\ &= \frac{1}{2} \delta x_0^T B^{-1} \delta x_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (H_i' M_i' M_{i-1}' \cdots M_0' \delta x_0 - d_i)^T R_i^{-1} (H_i' M_i' M_{i-1}' \cdots M_0' \delta x_0 - d_i) \end{aligned} \quad (3.31)$$

其中, H_i' 是 H_i 关于 x_i 的线性化, $d_i = y_i - H_i(x_i)$ 是来自观测的偏差。

对于 δx_0 , 其代价函数的梯度为:

$$\begin{aligned} \nabla_{\delta x_0} J &= B^{-1} \delta x_0 + \sum_{i=0}^n (H_i' M_i' M_{i-1}' \cdots M_0')^T R_i^{-1} (H_i' M_i' M_{i-1}' \cdots M_0' \delta x_0 - d_i) \\ &= B^{-1} \delta x_0 + \sum_{i=0}^n M_0'^T \cdots M_{i-1}'^T M_i'^T H_i'^T R_i^{-1} (H_i' M_i' M_{i-1}' \cdots M_0' \delta x_0 - d_i) \\ &= B^{-1} \delta x_0 + \sum_{i=0}^n M'^T [t_i, t_0] H_i'^T R^{-1} (H_i' \delta x_i - d_i) \end{aligned} \quad (3.32)$$

通过寻找使得公式 $\nabla_{\delta x_0} J = 0$ 的 δx_0 的值得到优化的初始扰动的值。初始态的代价函数的梯度通过伴随解决方案在时刻 $t=0$ 时给出。

由此可得伴随算子的定义为: 对于任何线性化算子 M' , 均存在一个伴随算子 M^* , 比如:

$$\langle x, M' y \rangle = \langle M^* x, y \rangle \quad (3.33)$$

其中, \langle, \rangle 是一个标量积, x, y 是这个乘积定义域内的空间向量或函数。定义在欧几里德空间的内积可以写作: $M^* = M'^T$ 。那么, 在时刻 $t=0$ 的代价函数的梯度通过同一时刻的伴随方程 $\nabla_{\delta x_0} J = -x_0^*$ 的解给出。

一般情况下, 初始猜值 x_0 的取值和背景场 x_b 是相等的, 因此, 初始扰动 $\delta x_0 = 0$, 那么, 代价函数的梯度便可以简化为:

$$\nabla_{\delta x_0} J = - \sum_{i=0}^n M'^T [t_i, t_0] H_i'^T R^{-1} d_i \quad (3.34)$$

伴随系统的求解流程如下:

$$\begin{aligned} x_{n+1}^* &= 0 \\ x_0^* &= M_1^* x_1^* \\ x_i^* &= M_{i+1}^* x_{i+1}^* + H_i^* R^{-1} d_i, i=1, \cdots, n \end{aligned} \quad (3.35)$$

然后, 通过逐步替代解 x_i^* 到 x_0^* 的表达式中得到公式 (3.36):

$$\begin{aligned}
x_0^* &= M_1^*(M_2^*x_2^*) + M_1^*H_1^*R^{-1}d_1 \\
&= M_1^*(M_2^*(M_3^*x_3^*)) + M_1^*M_2^*H_2^*R^{-1}d_2 + M_1^*H_1^*R^{-1}d_1 \\
&= \dots
\end{aligned} \tag{3.36}$$

最终，重新组合公式并考虑到 $x_{n+1}^* = 0$ ， $M^* = M'^T$ ， $H^* = H'^T$ ，可以得到公式 (3.37)：

$$x_0^* = \sum_{i=0}^n M'^T[t_i, t_0] H_i'^T R^{-1} d_i \Rightarrow x_0^* = -\nabla_{\delta x_0} J \tag{3.37}$$

总之，可以通过伴随模式的后向积分得到控制变量（初始态）的代价函数的梯度值。

从以上方法可以推导出增量化四维变分算法的迭代步骤如下：

1. 正演模式积分得到 J ；
2. 伴随模式后向积分得到 ∇J ；
3. 如果 $\|\nabla J(x_m)\| \leq \varepsilon$ 便停止；
4. 计算下降方向 D_m （牛顿法，共轭梯度法）；
5. 计算步长 ρ_m ： $J(x_m + \rho_m D_m) = \min_{\rho} J(x_m + \rho D_m)$ ；
6. 更新初始态： $x_{m+1} = x_m + \rho_m D_m$ 。

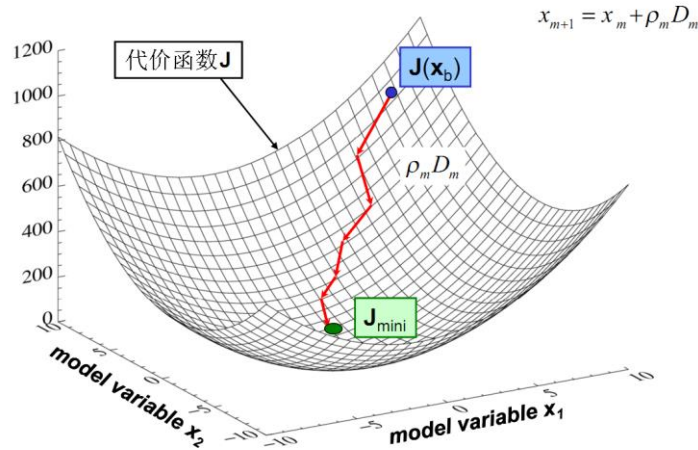


图 3.2 代价函数的迭代最小化过程图

由上述切线性和伴随模式算子的基本原理，对于四维变分同化系统的一维弯曲角算子的切线性算子和伴随算子是根据上述基本原理进行开发的。对于切线性模式算子，可以在正演模式算子的基础上分为以下几步进行：

1. 计算位势高度和几何高度的切线性，因为位势高度是大气压强和温度的一个函数，大气压强和温度是背景场提供的。几何高度 $h = \frac{R_{earth} \times geop}{\frac{g_{sfc}}{g_{wmo}} \times R_{earth} - geop}$ ，那么

几何高度的切线性模式为:

$$h_{il} = geop_{il} \times \left(\frac{R_{earth}}{(g_{sfc} / g_{wmo}) \times R_{earth} - geop} + \frac{R_{earth} \times geop}{((g_{sfc} / g_{wmo}) \times R_{earth} - geop)^2} \right) \quad (3.38)$$

2. 计算折射率函数的切线性, 折射率 N 的公式为公式 (2.5), 那么这个三项式的切线性算子为:

$$N_{il} = \frac{k_1(P_{il} - e_{il})}{T} + \frac{k_2 e_{il}}{T^2} + \frac{k_3 e_{il}}{T} - \left(\frac{k_1 P_d}{T^2} + 2 \frac{k_2 e}{T^3} + \frac{k_3 e}{T^2} \right) \times T_{il} \quad (3.39)$$

其中, P_{il} 是大气压的切线性值, $e_{il} = e \times \left(\frac{P_{il}}{P} + \frac{q_{il}}{q} - \frac{q_{il} \times e \times (1 - \varepsilon)}{P \times q} \right)$, e_{il} 是部分水汽压的切线性值。

3. 计算影响因子的切线性, $impact = (1.0 + 1.0 \times 10^{-6} \times N) \times (h + roc + undulation)$ 其中, roc 是指掩星事件中地球的曲率半径, $undulation$ 是掩星事件中位势高度的波动值。那么, 影响因子的切线性公式为:

$$impact_{il} = 10^{-6} \times N_{il} \times (h + roc + undulation) + h_{il} \times (1.0 + 10^{-6} \times N) \quad (3.40)$$

4. 计算弯曲角 α 的切线性公式, 参考正演模式中一维弯曲角的求取过程, 可以得到其切线性模式, 其中首先要求取的是 Abel 变换的切线性模式, 然后记 $factor = 10^{-6} \times \sqrt{2\pi a} \times \exp(k_j(x_j - a))$, $Zerf = erf(\sqrt{k_j(x_{j+1} - a)}) - erf(\sqrt{k_j(x_j - a)})$ 则可以得到:

$$\begin{aligned} \alpha_{il} = & \alpha_{il} + x_{jil} \times factor \times \sqrt{k_j} \times N_j \times Zerf \times k_j \\ & + Zerf_{il} \times factor \times \sqrt{k_j} \times N_j \\ & + k_{jil} \times factor \times N_j \times Zerf \times \left(\frac{0.5}{\sqrt{k_j}} + \sqrt{k_j} \right) \times (x_j - impact) \\ & + N_{jil} \times factor \times \sqrt{k_j} \times Zerf \end{aligned} \quad (3.41)$$

伴随模式算子是切线性模式算子的转置, 即一个逆的求取过程, 针对一维弯曲角, 基于其切线性模式算子的伴随模式算子的计算过程如下:

1. 利用 α 角的伴随模式算子, 计算对于每一个影响因子的弯曲角积分, 首先对于每一个影响因子计算弯曲角积分, 然后计算模式层之间折射率及 nr 的指数级衰减。通过 Abel 变换的伴随模式算子, 得到 nr_{ad} 。

2. 通过首先得到的模式层上折射率指数和半径的乘积 nr_{ad} , 计算模式层上的几何高度和半径的伴随模式, 其中需要注意的是用到半径是用来将位势高度转换到几何高度, 同时重力加速度是随着纬度发生变化的。

$$N_{ad} = N_{ad} + 10^{-6} \times nr_{ad} \times (h + roc + undulation) \quad (3.42)$$

$$h_{ad} = h_{ad} + nr_{ad} \times (1.0 + 10^{-6} \times N) \quad (3.43)$$

$$geop_{ad} = geop_{ad} + h_{ad} \times \left(\frac{R_{earth}}{(g_{sfc} / g_{wmo}) \times R_{earth} - geop} \right) + \frac{R_{earth} \times geop}{((g_{sfc} / g_{wmo}) \times R_{earth} - geop)^2} \quad (3.44)$$

$$P_{dry-ad} = P_{dry-ad} + \frac{N_{ad} k_1}{T} \quad (3.45)$$

$$e_{ad} = e_{ad} + N_{ad} \times \left(\frac{k_2}{T^2} + \frac{k_3}{T} \right) \quad (3.46)$$

$geop_{ad}$ 是模式层的位势高度的伴随值, h_{ad} 是模式层几何高度伴随值, P_{dry-ad} 是干气压的伴随值, e_{ad} 是部分水汽压的伴随值。

3. 最后通过得到的以上的干气压的伴随、湿气压的伴随得到温度、气压和比湿的伴随模式:

$$T_{ad} = T_{ad} - N_{ad} \times \left(\frac{k_1 P_{dry}}{T^2} + 2 \frac{k_2 e}{T^3} + \frac{k_3 e}{T^2} \right) \quad (3.47)$$

$$P_{ad} = P_{ad} + e_{ad} \times \left(\frac{q}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q} \right) \quad (3.48)$$

$$q_{ad} = q_{ad} + e_{ad} \times \left(\frac{P}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q} - \frac{P \times q \times (1 - \varepsilon)}{(\varepsilon + (1 - \varepsilon)q)^2} \right) \quad (3.49)$$

$$GEOP_{ad} = GEOP_{ad} + geop_{ad} \quad (3.50)$$

至此, 一维弯曲角作为一个独立的同化算子便加入到了全球四维变分同化系统当中, 对于 WRF-3DVAR 的区域变分同化系统, 三维变分同化系统的一维弯曲角算子是四维变分同化版本的一个简化版本, 因为三维变分同化相对于四维变分同化简化了对于位势高度的处理。WRF-3DVAR 中一维弯曲角算子的加入方法与四维变分同化系统的加入方法最大的不同是, WRF-3DVAR 中是在背景场层上进行的弯曲角的数据同化, 而四维变分同化系统是在观测层上进行的弯曲角的数据同化。这样便引起了在增量模式化方法中计算弯曲角梯度等增量的时候所用的方法不同, 三维变分同化中弯曲角观测数据需要进行稀疏化, 这样就造成了对弯曲角的观测数据一定程度上的浪费。

另外, 对于无论是折射率还是弯曲角的观测来说, 质量控制是十分重要的部分, 针对折射率和弯曲角的观测误差估计以及质量控制将在第五章中进行详细的介绍。

3.2 一维弯曲角算子的三维变分同化及台风预报试验

3.2.1 模式参数设定与观测资料

3.2.1.1 模式参数设定

本实验所采用的台风为“纳沙”台风，详细情况请参考 2.2.3.1 节。本实验的模式参数设定和折射率的三维变分同化试验中的模式参数设定相同，除“纳沙”台风的起报时间和试验组之外的 WRF 模式及 WRF-3DVAR 的模式参数设定均可参考 2.2.3.2 节。

“纳沙”台风的起报时间设定为 2011 年 9 月 25 日 12 时，终止时间为 2011 年 9 月 30 日 12 时。总共设计三个试验，其中 CNTL 为控制组试验，没有同化任何观测；REF 为只同化折射率资料，采用的是一维局地折射率算子；BA 为一维弯曲角算子，只同化弯曲角资料。

3.2.1.2 观测资料

WRF-3DVAR 拥有直接同化 NCEP BUFR 辐射数据的同化接口。这些辐射数据可以通过 NCEP 的公共 FTP 服务器接近实时得进行下载（大约 6 小时延迟），可以满足科研目的和一些实时应用的需求。现在 WRF-3DVAR 可以读取来自 NOAA ATOVS 仪器的数据（HIRS, AMSU-A, AMSU-B 和 MHS），EOS Aqua 仪器的数据（AIRS, AMSU-A）和 DMSP 仪器的数据（SSMIS），还有 GPS 无线电掩星数据。注意 NCEP 辐射 BUFR 格式资料是通过仪器名称进行分类的，每一个文件都包含全球辐射（通常转化为亮温）和一个 6 小时同化窗口。

NCEP 提供的卫星观测资料包括 AMSUA、AMSUB、HIRS3、HIRS4、MHS、AIRS 和 GPSRO 资料等。其中最重要的是 GPSRO.BUFR 包含 6 颗 COSMIC、GRACE-A/B、CHAMP 和 METOP/GRAS 等主流掩星星座系统提供的掩星数据，为三维和四维变分数据同化试验提供了大量的观测数据。

图 3.3 中的圆圈标识代表掩星事件，图 3.3 显示了在试验同化区域内该同化时间窗口内的掩星事件个数和掩星事件的位置分布。三维变分同化试验同化掩星事件个数为 8 个，每个掩星事件在垂直方向上分为 300 层，高度从八百多米直到五十千米。

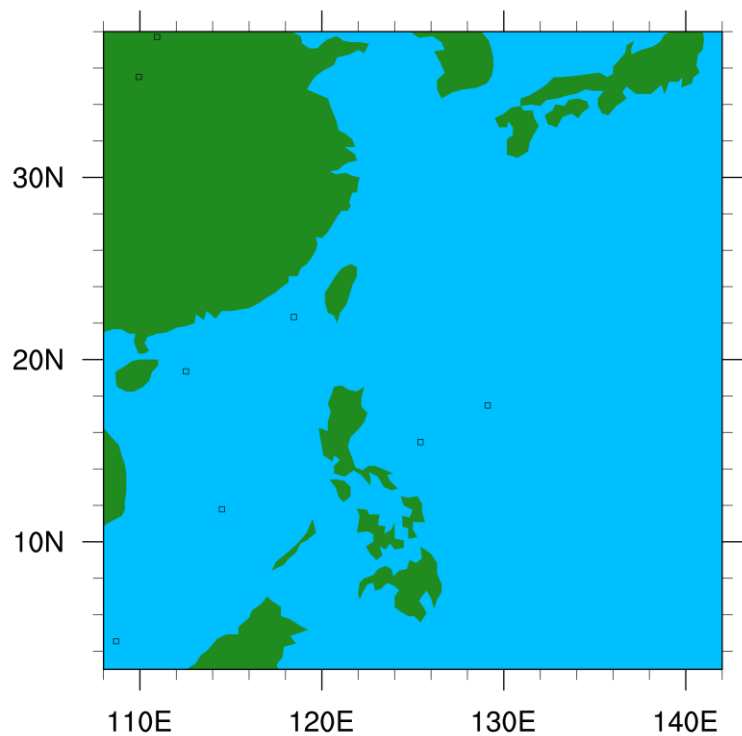


图 3.3 同化区域的掩星事件位置分布图

3.2.2 试验设计与结果

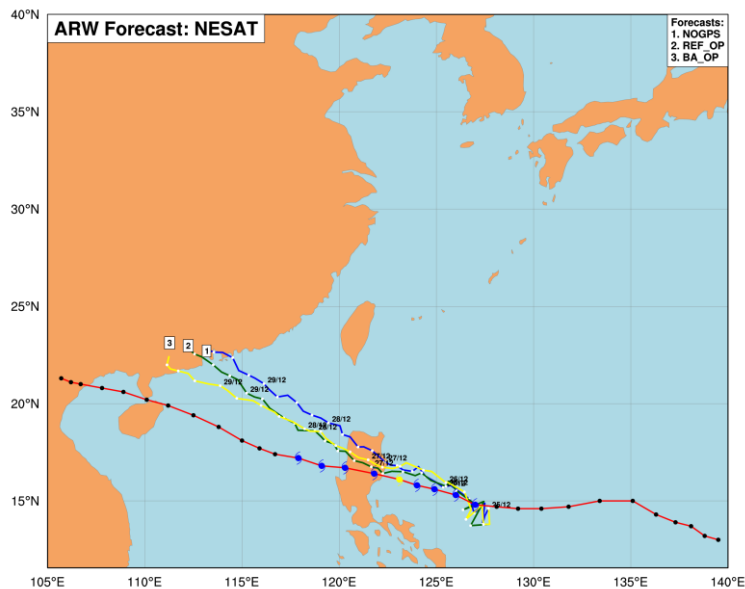


图 3.4 台风路径对比图

图 3.4 中标号 1 的蓝色路径线代表控制试验 CNTL 的台风路径，标号 2 的绿色路径线代表一维折射率算子同化折射率试验的台风路径，标号 3 的黄色路径线代表一维弯曲角算子同化弯曲角试验的台风路径，无标号的红色长路径线代表台风的实际观测路径。从台风路径图来看，无 GPS 掩星资料同化的模式预报路径明显

偏离了实际路径，而同化了 GPS RO 资料之后（无论是采用一维弯曲角算子还是一维折射率算子）模式预报路径在 24 小时预报的路径结果上差异较小，但是在 24 小时之后的预报效果上，同化 GPS RO 资料之后的预报路径相比没有同化 GPS RO 资料的路径则有了明显的调整和改善，更加接近实际路径。而对比采用一维弯曲角和一维折射率的同化效果，在 29 日 00z 时之前，两者路径差异较小，但是在 29 日 00z 时之后，采用一维弯曲角算子同化的 GPS 无线电掩星资料的预报路径要明显好于采用一维折射率算子的同化的模式预报结果。

以上路径预报的结果可以从台风的强度和最大风速的预报上找到相应的原因。图 3.5 分别是台风的中心最低气压和最大风速随时间的变化图，图 3.5 横坐标一个点代表预报过程中的 15 分钟，标有“nogps”的黑线代表控制试验 CNTL，没有同化任何 GPS RO 资料，标有“ba”的红线代表同化 GPS RO 弯曲角资料试验，标有“ref”的蓝线代表同化 GPS RO 折射率资料试验。由图 3.5 可以看出，从 24 小时预报的情况来看，其强度和最大风速的差异是非常之小的，但是在 24 小时之后，三者发生了变化，同化了 GPS 掩星资料的预报的结果和没有同化 GPS 掩星资料的预报结果产生了较大差异，在 29 日 00z 时之前，一维弯曲角同化后的预报结果和一维折射率同化之后的预报结果差异不大，但是 29 日 00z 之后，两者的预报结果产生了不同，相对来说，一维折射率同化后的预报台风强度小于没有同化 GPS 掩星资料的预报台风强度，一维弯曲角同化后的预报台风强度要小于一维折射率同化之后的预报的台风强度，并且根据观测数据及路径，此时，一维弯曲角同化后的预报台风强度要更接近于台风的观测实际强度，因此，才有路径图上 29 日 00z 之后一维弯曲角同化后的预报路径更接近于台风的真实路径。

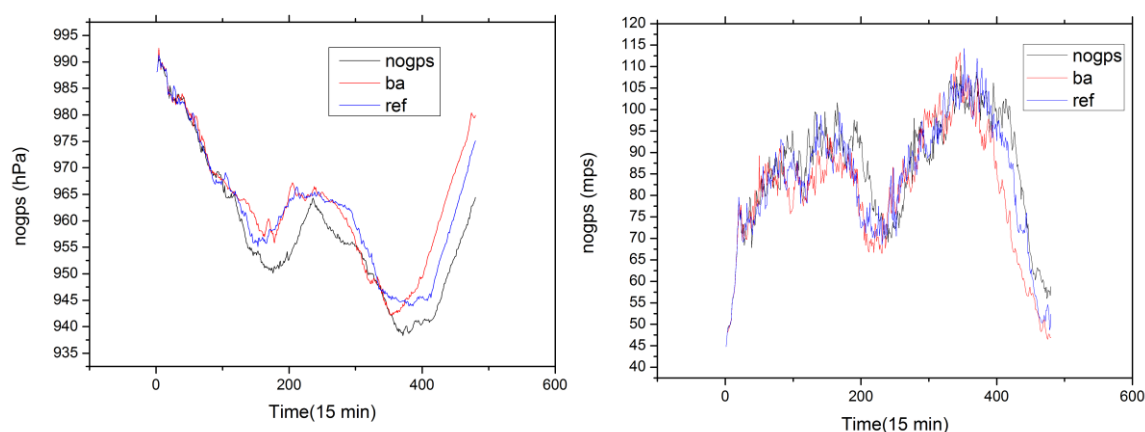


图 3.5 台风中心气压（左）和最大风速（右）对比图

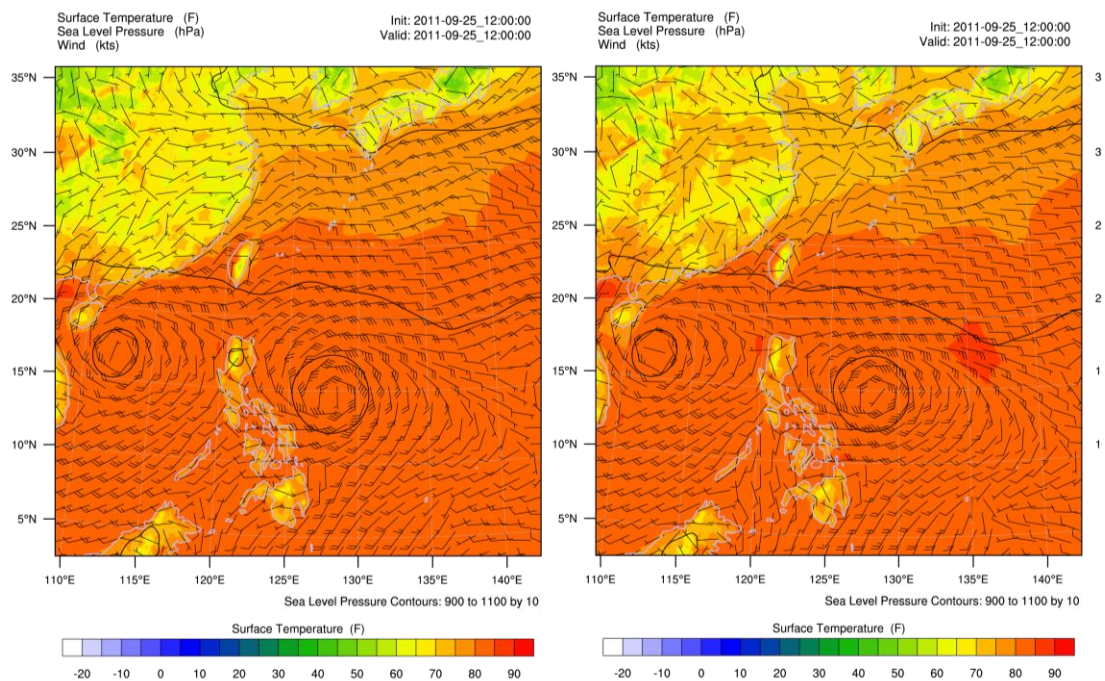


图 3.6 台风初始时刻表温、海平面气压和风对比图（nogps（左），ba（右））

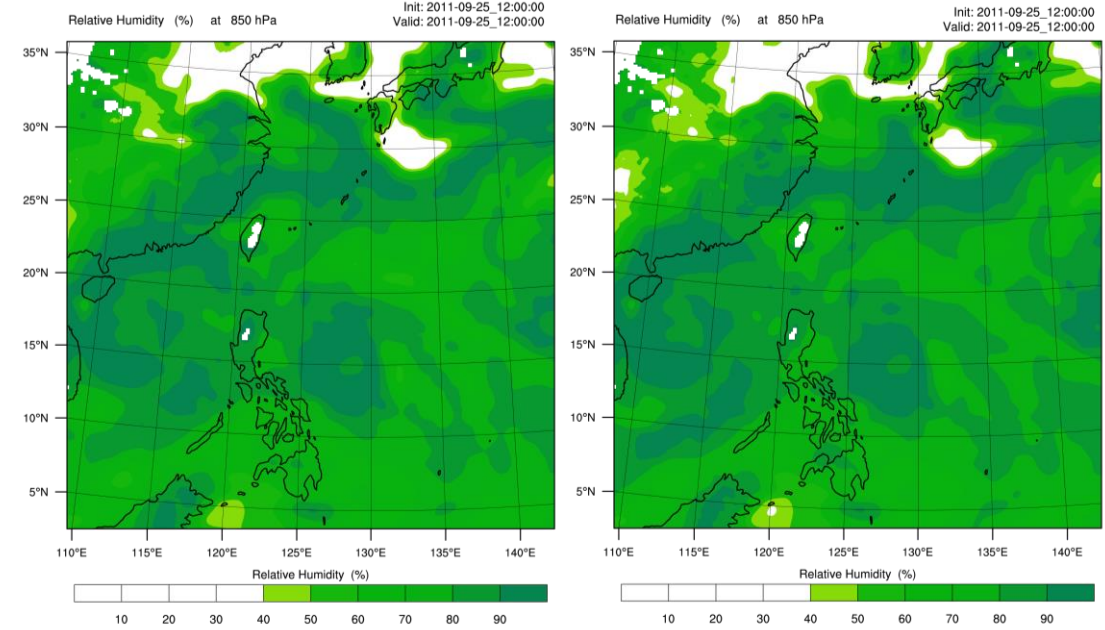


图 3.7 台风初始时刻 850hPa 相对湿度对比图（nogps（左），ba（右））

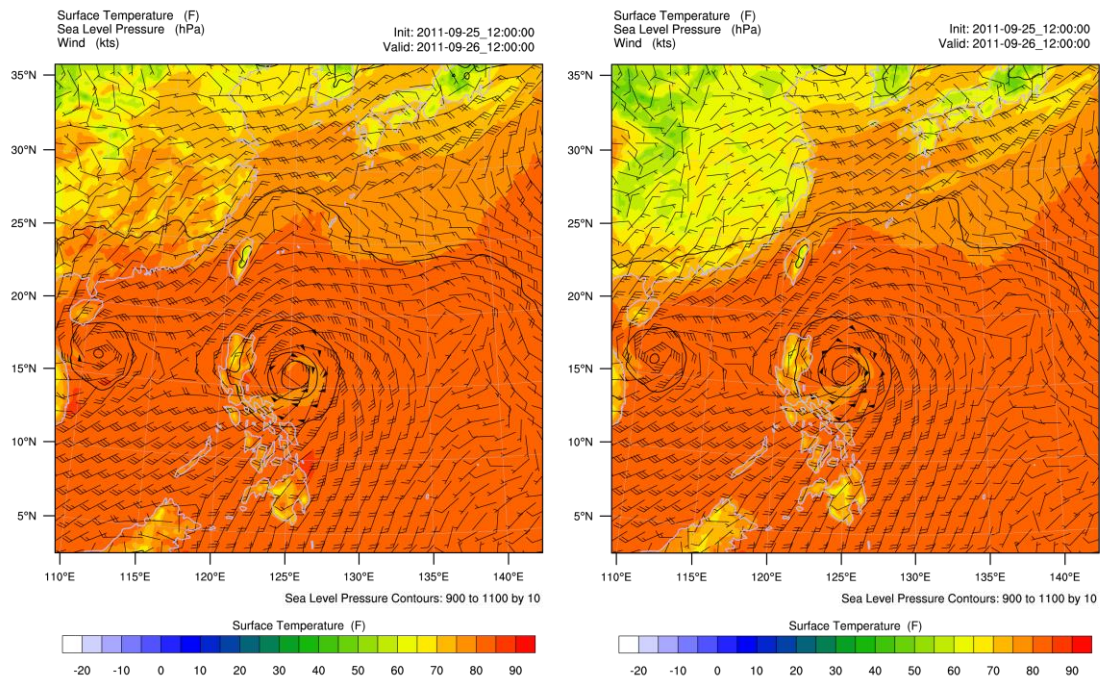


图 3.8 台风 24 小时预报表温、海平面气压和风对比图 (nogps (左), ba (右))

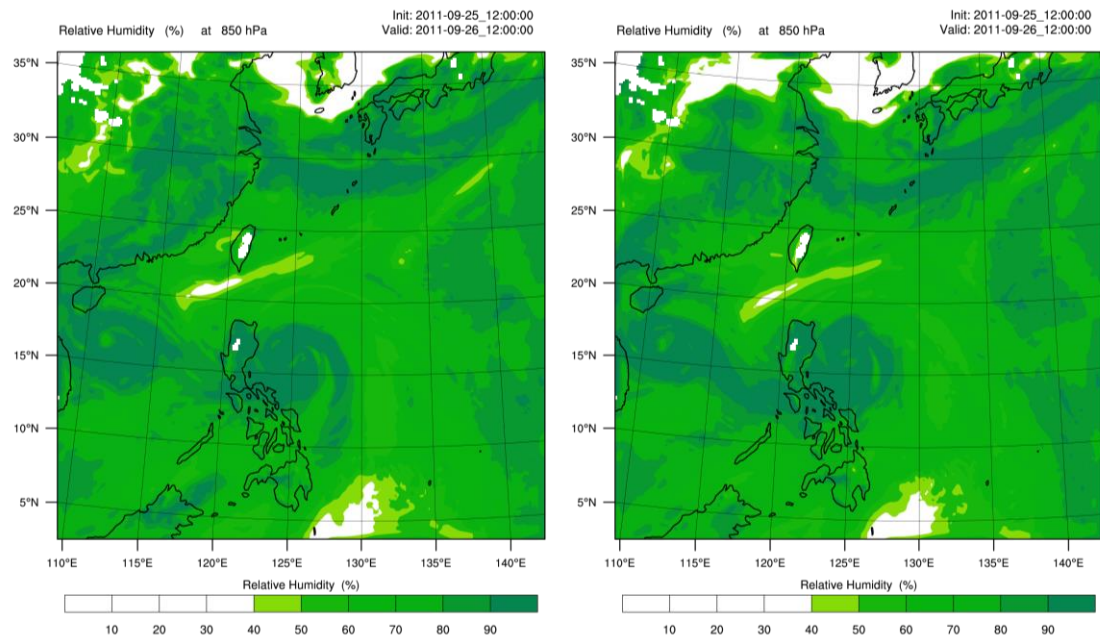


图 3.9 台风 24 小时预报 850hPa 相对湿度对比图 (nogps (左), ba (右))

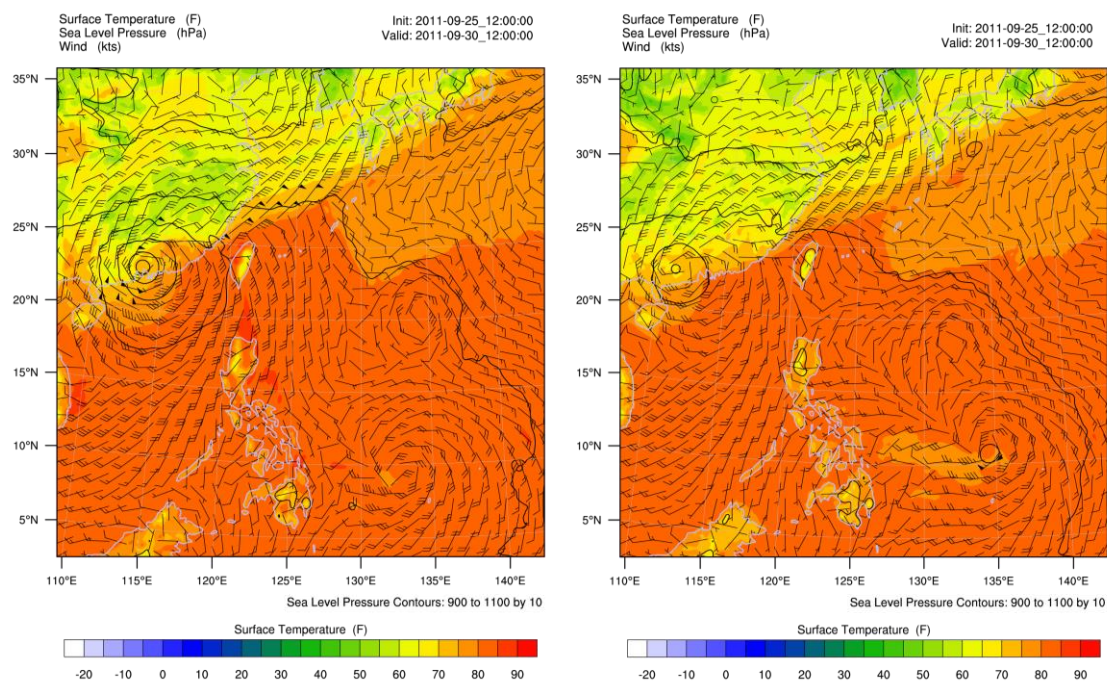


图 3.10 台风 120 小时预报表温、海平面气压和风对比图 (nogps (左), ba (右))

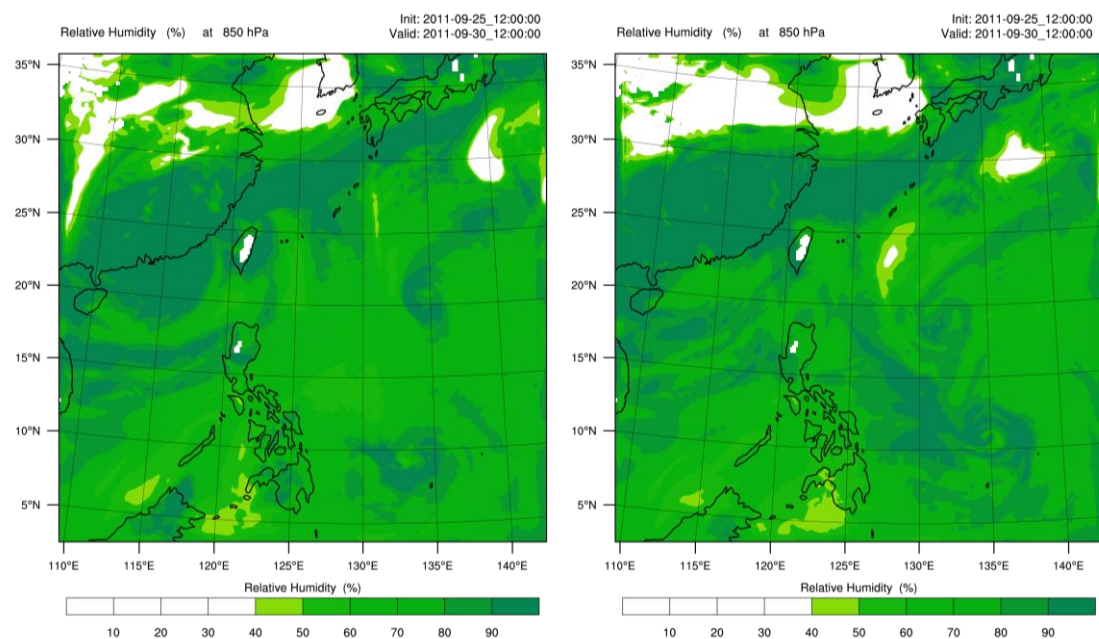


图 3.11 台风 120 小时预报 850hPa 相对湿度对比图 (nogps (左), ba (右))

图 3.6 到图 3.11 分别展示了初始时刻、24 小时和 120 小时预报时的表温、海平面气压、风及 850hPa 相对湿度的对比图。其中每一幅图的左面标号“nogps”的图代表没有同化 GPS RO 资料的控制试验 CNTL 的结果，右面标号“ba”的图代表同化 GPS RO 弯曲角资料的试验结果。

由初始时刻的对比图可以看出，在背景场同化 GPS 掩星资料之后产生的分析场与原始背景场进行比较，对表温和相对湿度有一定的调整，但是对风场和气压

的调整和作用十分的微小，这和 ECMWF 以及 NCEP 的研究的结论是一致的。

分析 24 小时和 120 小时预报表温、海平面气压和风对比图以及 850hPa 相对湿度对比图，可以知道 24 小时预报的结果有无同化 GPS 掩星资料有一定差异，其对表温、海平面气压和 850hPa 湿度有一定的改善，但是 120 小时预报结果可以明显看出，采用一维弯曲角算子同化 GPS 掩星资料的台风的风速和表面温度分布小于没有同化 GPS 掩星资料的台风风速和表面温度分布，说明采用一维弯曲角算子同化 GPS 掩星资料的台风预报强度小于没有同化 GPS 掩星资料的台风预报强度。这和台风路径图以及台风中心最低气压和最大风速的预报结果是相同的。

因此，可见在三维变分中同化 GPS 无线电掩星资料可以对背景场的温度以及相对湿度进行一定的调整，使其更接近于真实值，并因此对模式预报的结果产生正相关的影响，增加模式预报的准确度。此次做的是台风的个例实验，得出正相关效果，如要将 GPS 掩星资料一维弯曲角应用于实际的区域三维变分同化及模式预报的业务当中，仍需要做出大量的实验验证 GPS RO 弯曲角资料的加入对同化预报的效果。

3.3 一维弯曲角算子的全球四维变分同化系列试验

3.3.1 试验数据简介

试验引入了包括 6 颗 COSMIC、GRACE-A/B、CHAMP 和 METOP/GRAS 在内的全球主要掩星的 GPS 掩星数据。

在 12 小时的同化窗口内大约引入了一千余个掩星事件，每个掩星事件包含 300 个弯曲角，稀疏化后为 66 个，合计可用资料量为 4 万多个，与高空报相当。

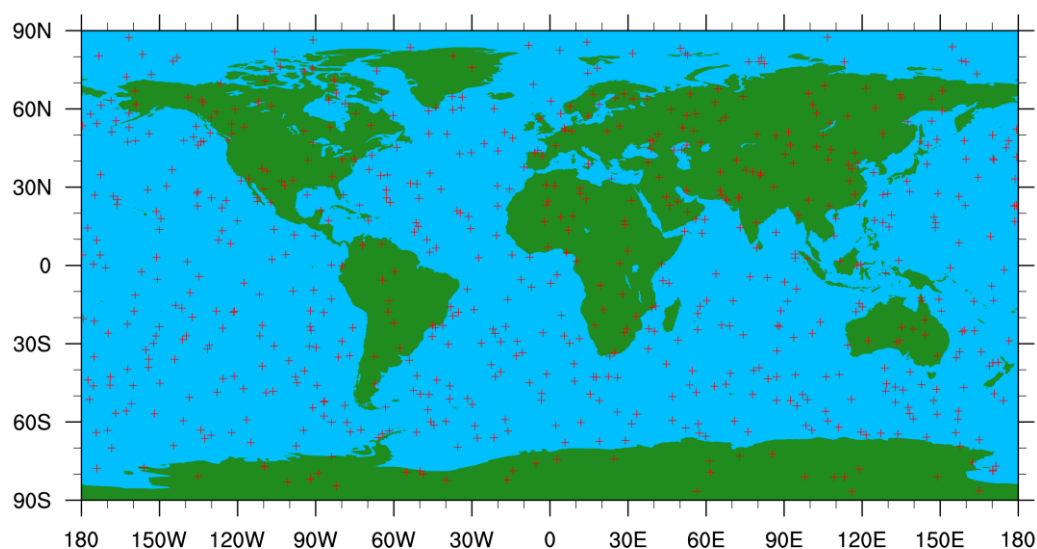


图 3.12 同化引入的一天中掩星事件的全球位置分布

3.3.2 分析场偏差试验

利用一维弯曲角算子引入 GPS 掩星资料之后同化的结果和实际探空（与真实值非常接近，偏差很小）进行比较，得到对北半球位势高度和温度分析场偏差的影响，图 3.13 和图 3.14 中虚线代表没有同化 GPS RO 数据的试验结果，黑色实线代表同化未稀疏的 GPS RO 数据的试验结果，红色的实线代表同化稀疏后的 GPS RO 数据的试验结果可以得到其对高度场的正影响十分明显。

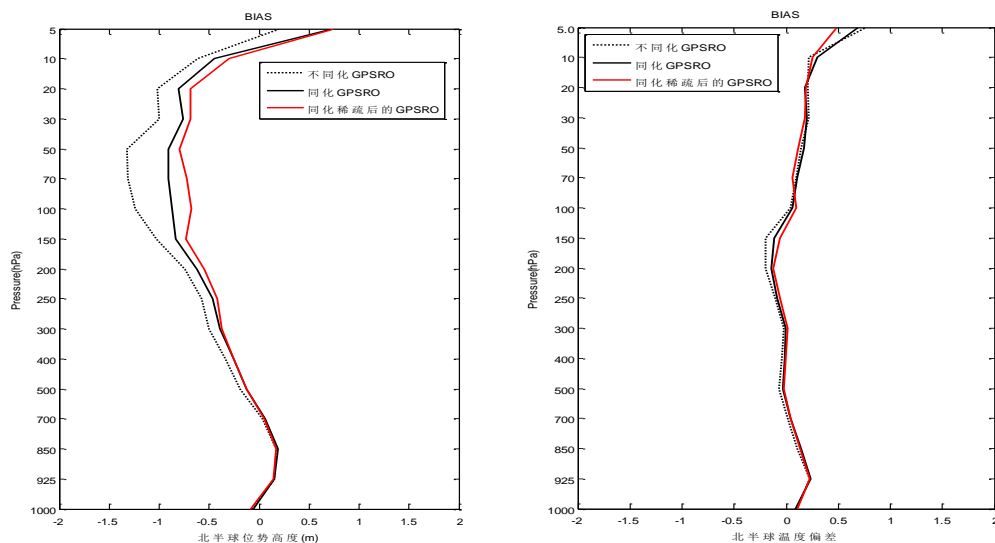


图 3.13 北半球位势高度和温度分析场偏差

利用一维弯曲角算子引入 GPS 掩星资料之后对南半球位势高度和温度分析场偏差的影响如图 3.14 所示：

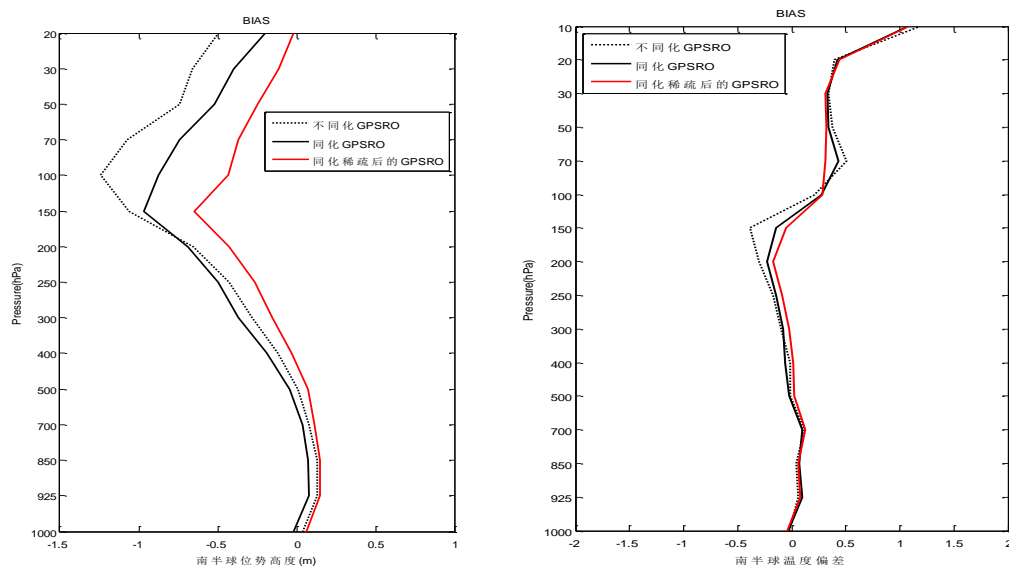


图 3.14 南半球位势高度和温度分析场偏差

对比南北半球同化 GPS 无线电掩星资料后对位势高度和温度偏差的影响, 可以得到加入 GPS 无线电掩星资料对于南半球位势高度的订正要大于对于北半球位势高度的订正。分析其原因, 是因为相对于北半球而言, 南半球常规观测资料偏少, 这就是南半球的偏差要大于北半球的原因, 因此 GPS 无线电掩星资料的加入对于南半球的订正会比北半球大。

同时, 图 3.13 和图 3.14 中显示同化 GPS 掩星数据和同化稀疏化的 GPS 掩星数据, 同化稀疏化的 GPS 掩星数据的订正要大于同化 GPS 掩星数据, 这是因为每一个掩星事件在垂直层上有 300 层, 其忽略了掩星点的漂移, 而模式层只有 91 层, 观测层和背景场层之间会有相关性, 这便是弯曲角的垂直相关误差造成的。对 GPS 掩星数据进行稀疏化之后, 只保留模式层附近的观测层, 这样会减少观测和背景场之间垂直方向的相关性, 得到更好的试验效果。弯曲角的垂直相关误差模型将在第五章进行详细的分析和研究。

3.3.3 GPS 对全球中期预报效果的影响

在全球气象资料四维变分同化系统中增加 GPS 弯角同化能力, 利用全球谱模式系统对比增加 GPS 的预报的影响。针对 2011 年 9 月和 10 月进行 WMO 标准的月平均统计检验对比。图 3.15 和图 3.16 中带星号的绿色实线是未同化 GPS RO 资料的试验结果, 带圆圈的蓝色实线是同化 GPS RO 资料之后的试验结果。

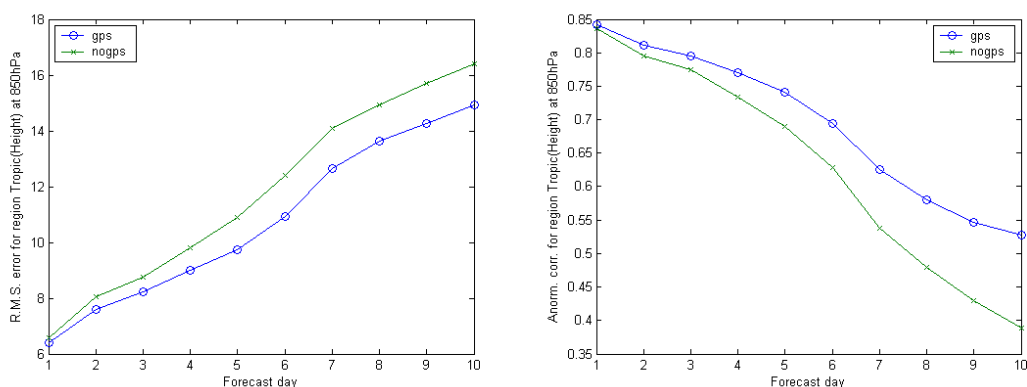


图 3.15 10 月份热带地区 850hPa 高度场预报对分析均方根和距平相关系数

从图 3.15 中看到同化 GPS RO 数据降低了 10 月份热带地区 850hPa 高度场对分析的中期预报均方根误差, 得到 10 月份热带地区 850hPa 高度场预报第 8 天的距平相关系数提高了 17%。

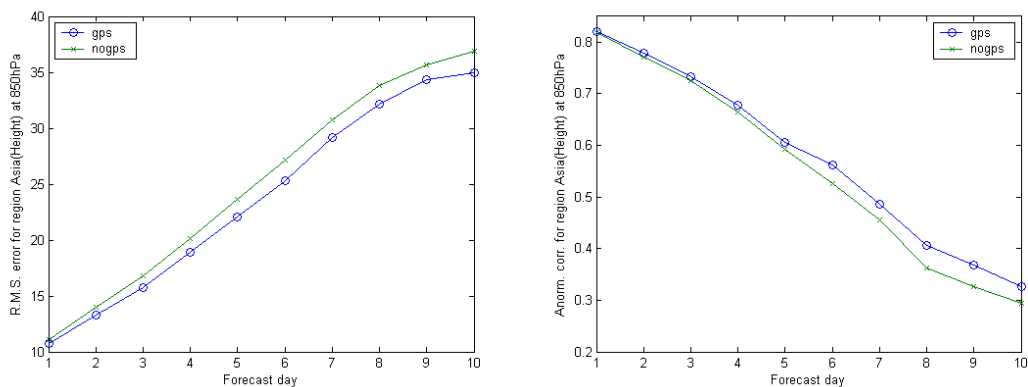


图 3.16 9 月份亚洲 850hPa 高度场预报对分析均方根和距平相关系数

根据 9 月份亚洲地区和 10 月份热带地区加入 GPS RO 资料前后均方根误差和距平相关系数的统计检验结果，其对于预报的影响是正相关的，其减少了均方根误差，提高了距平相关系数，尤其是在第 6 天之后的效果更加明显。

3.3.4 GPS 资料对台风路径预报的影响

选择 2011 年 10 月 11 日影响菲律宾和我国南海的热带风暴——“榕树”，采用全球四维变分同化系统提供初始场，采用全球谱模式进行台风的模式预报，以 10 月 12 日 00z 时作为起报点。控制预报试验是采用常规和 ATOVS 卫星资料业务流程的预报结果，添加 GPS 掩星资料试验是从 10 月 1 日开始在控制预报试验的基础上增加所有的 GPS 掩星资料数据。

GPS 掩星资料对台风路径预报试验结果绘成图 3.17:

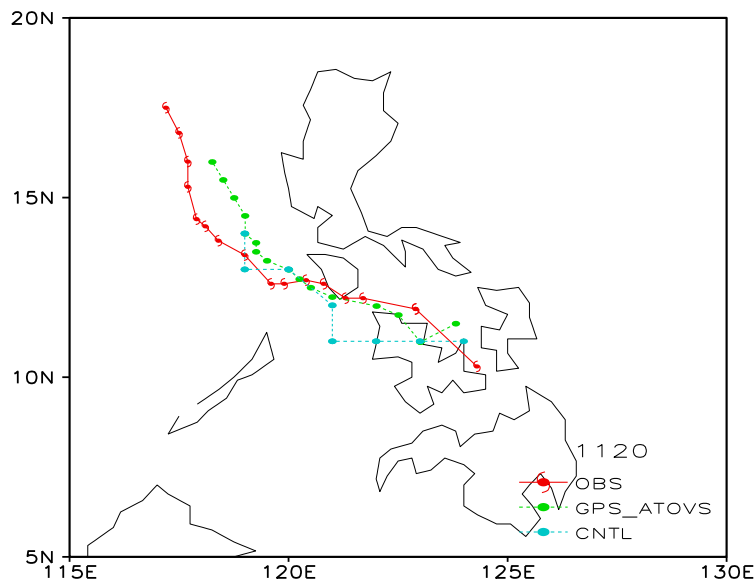


图 3.17 全球四维变分同化系统一维弯曲角算子台风预报影响试验

图 3.17 中标号为 OBS 的红色实线是台风的观测实际路径，标号为 GPS_ATOVS 的绿色虚线是同化 GPS RO 资料和 ATOVS 资料后的台风路径，标号

为 CNTL 的蓝色虚线是没有同化 GPS RO 资料的控制试验路径结果。由台风的预报路径可以看出, 增加 GPS 掩星资料以后, 路径的预报更加稳定, 与实际观测路径更加接近, 这与区域三维变分同化台风预报试验的结果是一致的。

3.4 本章小结

本章是整篇论文中最关键和核心的章节, 作者最主要的工作在本章中得到了体现。本章内容主要分为三个部分, 第一部分是一维弯曲角算子在全球四维变分同化系统中的实现, 其中详细介绍了增量四维变分同化系统的运行原理和一维弯曲角算子的具体实现过程以及其中需要注意的问题, 并将一维弯曲角算子同样实现到了 WRF-3DVAR 的变分同化系统当中, 简要介绍了两者实现方式的不同之处; 第二部分在 WRF-3DVAR 区域三维变分同化系统中采用一维弯曲角算子引入 GPS RO 资料针对台风“纳沙”的进行预报影响试验, 对比了无 GPS RO 资料同化、一维折射率算子和一维弯曲角算子同化 GPS RO 资料的不同效果, 得到了一维弯曲角算子对于台风路径和台风强度的预报的改善明显, 且优于一维折射率算子的改善效果的结果; 第三部分是针对全球四维变分同化系统中一维弯曲角算子引入 GPS RO 资料的效果做了三个相关的验证试验: 分析场偏差试验验证了一维弯曲角算子引入 GPS RO 弯曲角资料对南北半球位势高度和温度分析场偏差的影响, 可以得到其对高度场的正影响十分明显; GPS 对全球中期预报效果的影响试验中, GPS RO 资料提高了中期预报的距平相关系数, 减小了均方根误差, 正效果非常明显; GPS RO 资料的加入提高了台风路径预报的稳定性和准确度。

大量的试验结果显示 GPS RO 资料的加入, 其效果是正相关的, 并且是显而易见的。其系统预报的鲁棒性和准确率还需要进一步在业务系统中连续不断的实践和运行来得到业务化的效果验证。

比一维弯曲角算子更加精确的算子是二维弯曲角算子, 但是和一维弯曲角算子相比, 二维弯曲角算子有自己的优势和缺点, 这部分工作将在第四章中进行详细讨论。

第四章 GPS 掩星二维弯曲角算子

为了研究相对于一维算子，二维弯曲角算子具有哪些优势和不足，通过对一维和二维弯曲角算子的计算开销，计算弯曲角精度等方面进行了试验对比，并着重分析了二维算子的实际优势和不足。

4.1 基本算法介绍

4.1.1 二维 GPS 掩星算子研究回顾

从 2006 年开始，为了在业务数值天气预报系统中同化 GPS 掩星资料，METOP 和六星座系统 COSMIC 上的 GRAS 仪器将会提供近实时的 GPS 无线电掩星观测数据。GPS/MET 和 CHAMP 的 GPS 无线电掩星试验已经表明观测技术可以在 7km 到 25km 的高度上提供亚开尔文精度的温度信息，观测数据是全球分布的，拥有全天候适应能力和良好的垂直分辨率。理论研究表明，GPS 无线电掩星观测和先进的红外探测器提供的辐射观测提供了互补的温度信息。此外，最近英国气象局 (Met Office) 和 ECMWF 采用一维观测算子同化 CHAMP 卫星观测的预报影响试验表明，GPS RO 观测可以提高低平流层的无线电探空仪温度测量的预报和分析能力。同时，通过第三章中三维和四维变分同化系统进行的针对一维弯曲角引入 GPS RO 资料的预报影响试验也充分表明了 GPS RO 资料可以对位势高度和温度偏差进行矫正，降低全球和区域范围内的预报的均方根误差，提高预报的距平相关系数，从而提高预报的准确率。与已经在业务中心同化进系统的传统的卫星观测相比，这些结果是通过非常少量的 GPS 无线电掩星观测资料得到的，所以 GPS RO 资料同化在将来观测资料大大增多的情况下将会有更好的应用。

GPS 无线电掩星观测能够有力的提供低对流层的临边平均水汽信息，但是需要发展更先进的观测处理和同化方法，使得这个水汽信息可以应用在数值天气预报系统当中。例如，一个现在比较活跃的研究领域是开环跟踪的应用，主要是因为它能够提高低对流层测量的质量。另外，大量的二维 GPS 无线电掩星观测算子已经被提出来了，目的是减小低对流层正演模式的误差。本章将对采用二维弯曲角观测算子的 GPS 无线电掩星观测同化方法进行详细介绍和分析。

在概括 GPS 无线电掩星的二维算子最近的工作之前，为了弄清楚这部分，提供一些关于同化的预处理过程中的变量——通常是弯曲角或者折射率——的详细信息是非常有必要的。在 Melbourne 等 (1994) 和 Kursinski 等 (1997) 中给出了更加详尽的基本物理描述和观测的处理过程^{[26][44]}。之前的图 2.1 中展示了观测的几何学结构。在一个 GPS 卫星和一个低地球轨道卫星 (LEO) 之间传播的无线电

信号作为大气层和电离层的折射率指数梯度的一种结果被弯曲了。电离层的弯曲可以通过标准方法移除，这里就不再深入讨论了^[49]。在 LEO 上测得的无线电信号因为卫星的相对运动是有多普勒位移的，但是多普勒位移通过弯角 α 将射线路径上的弯曲度进行特征化和校正。从多普勒位移得到 α 是一个不适定问题。通过一个先验假设，影响因子 a 在 GPS 和 LEO 卫星上拥有相等的值，上述不适定问题被简化为了适定问题。这就允许同时得到 α 和 a ，给出卫星位置和速度的精确的计算和判断（Kursinski 等，1997）^[44]。物理上，影响因子 a 和经典量子的角动量相似，它被定义为射线路径上的任何一点：

$$a = nr \sin \phi \quad (4.1)$$

其中， n 是折射率指数， r 是半径， ϕ 是射线向量和本地矢径之间的角度。如果折射率指数场是对称的，影响因子的值沿着射线路径是常数。当这些都成立的时候，折射率指数 n 作为一个高度的函数，可以从弯曲角的廓线（指数）中采用 Abel 转换方程得到作为影响因子的函数， $\alpha(a)$ 。

Eyre（1994）考虑了同化 GPS 无线电掩星观测的各种可能的策略，提出了一种计算开销低廉的同化弯角 α 作为影响因子 a 的函数的二维正演模式^[24]。正演模式在假定的切点的水平位置上而不是一个卫星的水平位置上计算弯曲角，利用得到的影响因子 a 来决定射线切点的高度。首先，一维算子通过二维掩星平面来计算射线路径——采用极坐标（ r 和 θ ）。然后，通过这个二维平面的弯曲角的值就被计算出来了。Palmer（1998）利用这个模式来研究由一维和二维算子计算出来的弯曲角的差异，并且发现最大的差异发生在水平折射率（ $N=10^{-6}(n-1)$ ）梯度的二阶导数较大的时候^{[25][26]}。然而，当得到的影响因子 a 被用来在一维和二维模式中决定射线切点高度的时候，正演模式误差会比一维算子减去二维算子的差值还要大很多，因为这个简化明确假定了沿着射线路径 a 是一个常量（Healy，2001）^[50]。注意，观测从多普勒位移到弯曲角的预处理过程是基于 a 在 GPS 和 LEO 上有相等的值的弱约束，只需要二维折射率梯度关于切点折射对称即可。

Liu 和 Zou（2003）区别比较了通过卫星上的射线向量直接得到几何弯曲角和通过假定在 GPS 和 LEO 上具有相同值的影响因子从多普勒位移得到弯角值。后者有时被称为“伪弯角”。Liu 和 Zou 概括了一个同化伪弯角的观测算子，初始模拟多普勒位移，然后转换多普勒值来计算出伪弯角。通常情况下，这更接近观测的预处理过程，因此，这种方法应该可以降低正演模式误差。然而，Liu 和 Zou 在得到多普勒位移时引入了一系列的简化假定，例如，从假定的切点位置开始射线积分并且不需要射线路径和卫星相交。作为这些假设的结果，和由于相对粗糙的数值天气预报模式的应用导致的正演模式误差^[51]，Liu 和 Zou 也不能找到伪弯角和传统弯角之间明显的差异。在预报影响试验中采用的是二维算子，但是它们没有

使用最新的观测数据集, 因此 Liu 和 Zou 的预报分数比期望中数值的要低^{[27][52]}。

Poli 和 Joiner (2004) 和 Poli (2004) 研究了一个和 Eyre (1994)^[24]描述的相近的弯曲角模式, 显示采用二维算子可以在切点附近 18km 的范围内减少观测值减模拟值的标准偏差约 10%。然而, 通常 Poli 和 Joiner 在低对流层的弯曲角误差估计明显偏低, 因为 Poli 和 Joiner 没有将采用影响因子 a 来决定射线切点高度的误差看做正演模式误差^{[28][29]}。

Syndergaard 等(2005)提出了一个“非局地”折射率算子。这个方法是通过由 Abel 方程得到的 GPS RO 折射率廓线应该被解释为“中尺度沿轨平均”的想法引发的 (Melbourne 等 1994)^{[26][31]}。这个算子由两步组成。第一, 假定通过掩星平面的是一个直线路径来计算相位延迟廓线, 通过 Abel 方程转化这些延迟。这个正演-反演计算提供了一个用来计算从 NWP 模式中得到的折射率值的二维核心算法。Syndergaard 通过一个理想化的锋面区域的仿真, 指出了在某些情况下求得的折射率的误差的减少的数量级的大小。然而, 至今仍没有结果显示这个非局地算子和一维折射率算子相比在合适的观测下在统计学上会产生一个明显的提高。同时该方法在由影响因子 a 得到的切点高度上对误差不敏感的原因仍不明确, 也不清楚这个误差作为正演-反演过程的一部分应该被订正的原因。Sokolovskiy 等(2005)提出直接同化中间相位延迟量, 但是被证明这个方法和采用非局地折射率算子具有相同意义和效果, 尽管 Sokolovskiy 提出同化相位可能是一个计算更高效的方法^[30]。

这些方法中的任何一种方法都没有比采用合理的二维算子同化弯曲角更加精确。实际上, 无论是非局地折射率算子还是相位法都需要对观测进行额外预处理为折射率, 这些都使得观测误差变得复杂, 并且会引入额外的相关关系。然而, 采用这些算子同化 GPS RO 观测与二维弯曲角算子同化 GPS RO 弯曲角观测相比, 有两个主要的好处: 非局地折射率算子或者相位算子不需要计算模式层顶以上的 NWP 信息, 并且它们的计算开销相对较小。实际应用中, 这些问题并不是应用二维弯曲角算子的主要障碍。例如, ECMWF NWP 模式层顶(2006 年 2 月时达到 65km 到 80km 高度)之上的弯曲角可以通过一个解析表达式非常精确的计算出来, 并且这不是正演模式误差的主要来源 (HT06)^[5]。

Sean Healy 等 (2006) 在 CHAMP 无线电掩星观测研究小组的指导下对 2004 年 6 月 1 日到 7 月 31 日的 CHAMP 掩星观测进行了四维变分同化预报影响试验。CHAMP 的弯曲角分别采用一维和二维弯曲角观测算子进行同化, 这样的对比试验使得二维算子的潜在的优点得到了验证。试验中考虑了两种计算开销较小的二维弯曲角观测算子。第一种可以被看做是一维算子的直接继承, 第二种是基于微分方程的四阶 Runge-Kutta 的数值解来定义折射进入大气层的射线路径以求取弯曲角的值^[33]。

4.1.2 二维弯曲角算法 I

第一种方法基于 Eyre(1994)的早期工作,但是这种方法也可以被看做是 HT06 中描述的一维算子的派生。二维和一维算子之间最大的不同是前者在二维平面上利用水平位置上的垂直折射率梯度计算射线弯曲角 θ , 然而后者总是在“掩星点”上利用折射率梯度来计算弯曲角 (Kuo 等 2004) [53]。

观测的几何结构在图 2.1 上显示出来。通过掩星点的经度和纬度定义这个二维平面并定义了一个观测相对于北方的方位角。NWP 的廓线信息在以掩星点为中心的掩星平面上的 31 个相等的空间位置上析取出来。廓线位置之间方位角的空间间隔为 $\Delta\theta_p = 6.27844 \times 10^{-3}$ 弧度, 相对于地球表面 40km 的水平分隔, 所以总的平面部分的宽度是 1200km ($30 \times 40\text{km}$)。计算出折射率 N 和半径 r 在每一个水平位置上的每一个模式层的值。然后, 将折射率 N 插值到一个有 250 个点和 250m 间距的固定的垂直网格结构上, 假定 $\ln N$ 随半径线性变化, 在 250m 网格点上计算出折射率和半径的乘积 $x = r(1 + 10^{-6}N)$ 的值。

明确表示出观测算子中任何的简化或者近似都十分的重要。假定切点——在地球表面以上 3-4km 的射线切线高度, 定义了观测廓线中的每一条射线的切线的水平位置, 这意味着忽略了切点漂移。一项最近的研究表明, 中纬度地区射线切点在地球表面和 10km 高度之间的水平位置的漂移约为 80km。这表明低对流层的切线位置的误差在 40km 左右。第二个主要的假设来自于影响因子 a 的切点高度 r_t 。其中 $r_t = a/n_t$, n_t 是切点处的折射率指数。注意, 在 Poli (2004) 提出的算子中应用了该假定, 同时, 在 Syndergaard 等(2005)和 Sokolovskiy 等(2005)提出的方法中也隐含了这个假定。

弯曲角计算按照下面的步骤进行。假定在第 i 垂直层射线路径上的一点有一个角坐标 θ 。在第 i 层和第 $(i+1)$ 层上的 N 和 x 被插入到 θ 中, 通过积分给出第 i 和第 $(i+1)$ 层之间的部分路径的弯曲角:

$$\Delta\alpha(a) = -a \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\frac{d \ln n}{dx}}{(x^2 - a^2)^{1/2}} dx \quad (4.2)$$

经过部分简化后, 这个积分可以以高斯误差方程的方式进行求解。角位置的变化可以写作:

$$\Delta\theta = \Delta\alpha - \Delta\phi \quad (4.3)$$

其中, $\Delta\phi$ 是射线向量和本地矢径向量之间的变化角。它可以用以下方程近似:

$$\Delta\phi \cong \sin^{-1}(a/x_{i+1}) - \sin^{-1}(a/x_i) \quad (4.4)$$

然后影响因子通过水平折射率指数梯度的模式计算来进行更新。

$$\Delta a = \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right)_r \Delta s \cong \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right)_r \times \left(\frac{r_i + r_{i+1}}{\sin \phi_i + \sin \phi_{i+1}}\right) \times \Delta \theta \quad (4.5)$$

重复这些步骤直到射线到达 62.25km 处 250m 垂直网格的顶部。模式层顶之上的弯曲角可以通过一个基于互补的误差方程的解析表达式精确计算出来。总的弯曲角是将沿着切点和 LEO 之间的路径部分的弯曲角和沿着切点和 GPS 之间的路径的弯曲角加起来得到的值。

4.1.3 二维弯曲角算法 II

方法 II 基于求解定义射线路径的微分方程。它采用与方法 I 中相同的水平网格。另外，因为步长会作为模式的一部分而被调整，所以折射率 N 和半径 r 在全模式层进行计算，并不需要将其插入到 250m 垂直网格中。和方法 I 相同的是，切点漂移被忽略了，同时用影响因子来决定切点的高度。

弯曲角的计算基于圆形极坐标下定义射线路径的组合方程的数值解^[54]。

$$\frac{dr}{ds} = \cos \phi \quad (4.6)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\sin \phi}{r} \quad (4.7)$$

$$\frac{d\phi}{ds} = -\sin \phi \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial r}\right)_\theta \right] + \frac{\cos \phi}{nr} \left(\frac{\partial n}{\partial \theta}\right)_r \quad (4.8)$$

其中， s 是沿着射线路径的距离， n 是折射率指数， ϕ 是本地矢径向量和射线路径切线之间的角度。实际上，公式 (4.8) 能够通过假定 $1/n \sim 1$ 进行简化，在射线弯曲度最大的切点， $\phi \simeq \pi/2$ ，所以 $\cos \phi \times (\partial n / \partial \theta)_r \simeq 0$ 。物理上，由于在切点附近射线路径几乎和 $(\partial n / \partial \theta)_r$ 平行，所以这一项非常小。射线弯曲度由垂直于路径的折射率梯度引起。因此，公式 (4.8) 可以简化为：

$$\frac{d\phi}{ds} \simeq -\sin \phi \left[\frac{1}{r} + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial r}\right)_\theta \right] \quad (4.9)$$

试验显示通过这些近似引起的弯曲角误差小于 0.05%。方程组利用四阶 Runge-Kutta 方法求解，步长沿着射线路径进行调整。考虑射线路径在第 i 和第 $(i+1)$ 模式层之间的部分，路径被分成了 m 步，定义半径增长为 $\Delta r = (r_{i+1} - r_i) / m$ ， r_i 和 r_{i+1} 为第 i 和第 $(i+1)$ 模式层上的半径值。同时，选择步长 Δs ，使得 r 的变化近似为 Δr 。在切点处，步长给定为 $\Delta s = \sqrt{2r_i \Delta r}$ ， r_i 是切点处的半径值。通常情况下，步长给定为 $\Delta s = \Delta r / \cos \phi$ 。半径折射率梯度在假定模式层之间的折射率随高度以指数的方式进行变化的情况下进行计算。模式层顶以上的弯曲角采用方法 I 中提出的解析方法进行求解。

上面展示的是射线追踪观测算子，射线追踪方法被称作“理论上最好的观测算子”，但是却被认为要应用在业务化的数值天气预报系统中是不切实际的，因为这个算子的计算开销十分大^[29]。

4.2 二维弯曲角算子的变分同化初步实现

第三章叙述的是一维弯曲角算子，一维的情况就意味着模拟是在一个单一的位置进行，并且引入了“水平梯度误差”。二维算子的引入可以减少正演模式误差，尤其是在低对流层。4.1 节详细描述了二维弯曲角算子的基本理论和两种算法。现在已经实现了二维弯曲角的正演模式、切线性模式以及伴随模式代码的编写，但是还没有加入到全球四维变分同化系统当中进行系统调试。这里将详细介绍射线追踪法二维弯曲角算子的具体的实现步骤。

这个模式在一个“二维掩星平面”中提取一系列的点中的处于同一位置的背景场压强、温度、湿度和位势高度的廓线来模拟弯曲角。通过掩星点处的经度和纬度，和相对于观测的相对于北方的方位角定义二维掩星平面。ECMWF 数值天气预报同化系统对二维正演算子进行了扩展预报影响实验。ECMWF 的结果显示采用二维算子在低对流层中观测减去背景场（O-B）弯曲角差值的标准偏差可以减少 7% 左右。关于这次试验的更详细的讨论可以参考 Healy (2008)^[55]。

二维弯曲角算子比一维算子更加复杂，是因为在二维掩星平面中，径向折射率梯度 $\frac{\partial n}{\partial r}$ 作为水平位置 θ 的方程变化。其基本原理已经在 4.1.3 节中进行了详细的阐述。四维变分同化系统中的二维弯曲角算子应用四阶 Runge-Kutta 方法来求解射线路径方程，这个方程应用在水平梯度被认为非常大的低对流层和对流层中，但是在高对流层中仍然为一维弯曲角进行计算。这种混合的方法减少了计算开销，但是如果需要的话，完全可以进行一个完整的二维弯曲角计算。射线路径方程的积分起始于假定的切点位置，而不是其中之一个卫星。而且，需要注意的是在二维弯曲角计算中应用到了两个近似：

1. 忽略切点漂移，意味着所有弯角的切点都被假定为拥有相同的水平位置；
2. 观测的影响因子被用来决定切点的高度。

这些近似将会在二维算子的未来版本中得到解决。

二维算子的主要步骤在图 4.1 中进行了展示，可以总结为以下几步：

1. 计算二维网格模式层上的水蒸气分压；
2. 计算模式层上的折射率 N ；
3. 计算模式层上几何高度 h 和半径 r 的值；
4. 计算模式层上折射率-半径的乘积 nr ；

5. 计算作为影响因子 a 的函数的弯曲角 α 。

注意，1-4 步实质上是一维方法的直接继承。一维廓线的计算是在平面上的水平位置上进行的。然而，为了更加的清楚透明，计算的细节将会在这里重复呈现。

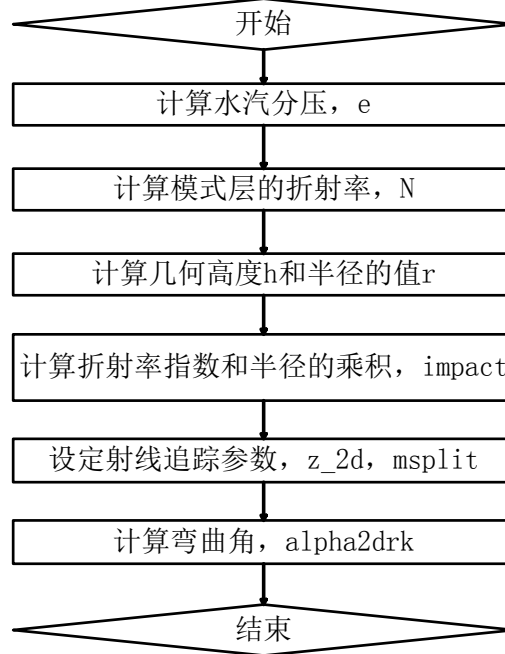


图 4.1 二维弯曲角算子主要组成部分的流程图

1. 计算水汽分压

二维平面的每一个模式层上的水蒸汽压强 e 从比湿 q 的定义中得到, q 的定义为公式 (3.11)。其中, r 是水蒸气的干混合比, 定义为公式 (3.12)。公式 (3.11) 和公式 (3.12) 得到了 e 的表达式, 公式 (3.13)。

2. 计算折射率

利用公式 (2.5) 及来自于背景场廓线的压强 P 、温度 T 和水蒸汽分压 e 计算模式层的折射率 N 。关于折射率因子 k_1, k_2, k_3 值的讨论在第二章中有详细的论述。

3. 计算几何高度和半径的值

利用纬度转换方程将位势高度 Z 转换为几何高度 h :

$$h(Z, \phi) = \frac{R_e Z}{\frac{g}{g_{wmo}} R_e - Z} \quad (4.10)$$

其中, R_e 是地球半径, g 是地表出的重力加速度, ϕ 是纬度 (Mahoney, 2001) ^[56]。

半径值通过公式 (4.11) 给出:

$$r = h + u + R_c \quad (4.11)$$

其中 u 是波动值, R_c 是曲率半径。

4. 计算背景场影响因子

影响因子，也称为折射率指数和半径的乘积，在二维平面上的每一个模式层上可以采用折射率的值 N ，通过公式 (4.12) 计算得到：

$$impact = nr = (1 + 1 \times 10^{-6} N)r \quad (4.12)$$

5. 计算弯曲角

在程序代码中有两个参数是固定不变的。整数 $msplit=4$ 在射线追踪法中用来管理步长，增加 $msplit$ 的值能够减小步长并增加算子的开销。现在的设置对于变分同化系统的垂直网格结构是合理的。实数 z_2d 定义了利用一维近似来计算弯曲角的高度。现在设置的值为 10km。这样做的动机是复杂的二维计算只需要在水平折射率梯度较大的对流层进行，而 10km 以下对流层湿度较大，所以水平折射率梯度也较大。并且，一系列的研究证明在平流层一维算子已经完全足够了。

$$\frac{dr}{ds} = \cos \phi \quad (4.13)$$

公式 (4.13) 的解在弯曲角正演模式中在子程序 `gpscalc_alpha2drk` 中执行计算。它通过将弯曲角作为二维平面折射率值的观测影响因子的方程来计算弯曲角。这里需要注意的是二维弯曲角算子用到了前面提到的两个近似。`gpscalc_alpha2drk` 中弯曲角的计算过程如下叙述：切点的水平位置被初始化为二维平面的中心廓线，射线切点半径通过在中心廓线的影响因子 a 和背景场（模式）折射率的值利用公式 $r_t = a / (1 + 10^{-6} N)$ 计算得到。注意，如果射线的切点高于指定的高度 z_2d ，二维射线追踪法将默认采用纯一维弯曲角的计算方法。然而，如果射线切点低于指定的高度 z_2d ，将采用一个求解射线路径微分方程的数值的，射线跟踪方法计算从切点到指定 z_2d 高度部分的路径。射线跟踪在假定的切点处开始计算，而不是在其中一个卫星处开始计算。通过计算切点两边的射线路径的弯曲度，然后将这两个值加和起来得到整体的弯曲角。

切点每一边的弯曲角的计算如图 4.2 所示。一个四元向量 $zy(:)$ 包含如下的变量 $(r - r_t, \theta, \phi, \alpha_{1/2})$ 初始化为：

$$\begin{aligned} r - r_t &= 0 \\ \theta &= 0 \\ \phi &= 0 \\ \alpha_{1/2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.14)$$

其中， $r - r_t$ 是高于切点的高度， θ 是平面的角度位置， ϕ 是射线路径和本地矢径向量之间的夹角， $\alpha_{1/2}$ 是沿着射线路径部分的弯曲角。下标 1/2 表示这只是路径一边的弯曲角。需要注意的是，在切点的水平位置处采用约定好的 $\theta = 0$ 。

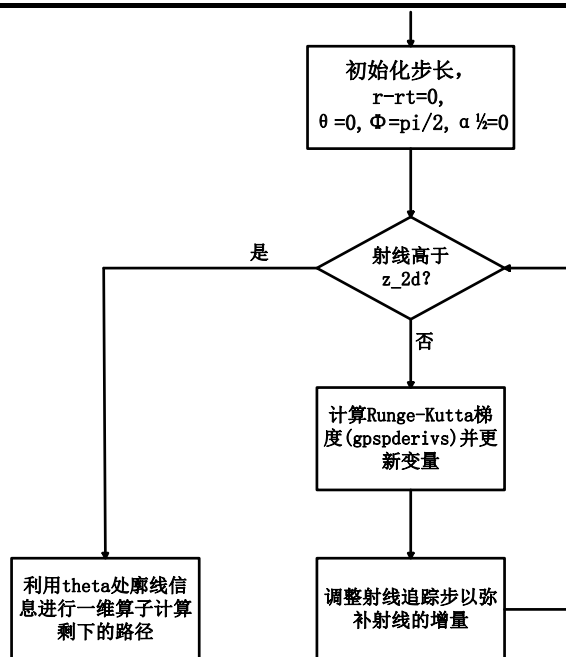


图 4.2 利用 Runge-Kutta 方法计算弯曲角的流程图

射线路径方程的数值求解采用四阶 Runge-Kutta (RK4) 方法 (Press 等, 1992) [57]。在平面 (r, θ) 上任意点的上面四个变量的计算是在 gpspderivs 程序中进行的。这个程序计算了下面的梯度:

$$\frac{d(r-r_t)}{ds} = \cos \phi \quad (4.15)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{\sin \phi}{r} \quad (4.16)$$

$$\frac{d\phi}{ds} \cong -\sin \phi \left[\frac{1}{r} + \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_\theta \right] \quad (4.17)$$

$$\frac{d\alpha_{1/2}}{ds} = -\sin \phi \left(\frac{\partial n}{\partial r} \right)_\theta \quad (4.18)$$

其中, s 是沿着射线路径的距离, n 是折射率指数。在 gpspderivs 中, 线性插值廓线信息到 θ 中, 然后假定折射率在模式层之间指数变化, 用来计算径向梯度。最大的折射率梯度值为 $0.15N$ units/m。

在 RK4 中标准算法是, 每一个积分步中调用四次 gpspderivs [57], 然后计算梯度的加权平均值。这个加权平均梯度用来向前一步计算向量 $zy(:)$ 。代码这样编写以使在垂直模式层之间有 $msplit=4$ 步, 并且步长 zh 可以调整以在模式层之间每一步得到大致相等的径向增量。整个求解过程不断重复直到射线高度超过 z_{2d} , 然后采用一维弯曲角算法计算剩下的路径。

在高度 z_{2d} 之上的弯曲角通过积分相似的一维弯曲角方程来计算,

$$\Delta\alpha_{1d}(a) = -a \int_{R_c+z_{2d}}^{\infty} \frac{\frac{d \ln n}{dx}}{(x^2 - a^2)^{1/2}} dx \quad (4.19)$$

利用最近的模式廓线到射线高度与 z_{2d} 相等的角位置 θ 来计算这个积分。采用高斯误差函数的方法来求解这个积分，具体步骤见 3.1.1 节。

4.3 二维弯曲角算子分析

4.3.1 二维弯曲角算子的计算开销

测量一维弯曲角算子和二维弯曲角算子的计算开销的原理和方案是这样的：由于还没有将二维弯曲角算子实现到四维变分同化系统和 WRF-3DVAR 变分同化系统当中，并不能进行变分同化系统的一维算子和二维算子的计算开销对比。所以，此处只进行算子正演模式计算开销的对比。分别采用一维弯曲角算子的正演模式和二维弯曲角算子的正演模式对 10 个大气背景场廓线进行计算，模拟出各自的弯曲角然后写入到输出文件当中。这里只采用 10 个大气背景场廓线是由于背景场文件获取的限制。运行正演算子的电脑的配置是 Intel(R) Core(TM) 2 CPU T5600，主频 1.83GHz，内存 1.50GB，系统为 Fedora 17 RC。分别运行正演算子各 10 次，统计结果如表 4.1 所示：

表 4.1 1D 和 2D 算子计算开销统计表

算子	类型	十次运行时间统计结果（单位：s）										平均值
1D	real	0.085	0.08	0.08	0.08	0.08	0.081	0.078	0.081	0.081	0.079	0.0805
	user	0.056	0.053	0.053	0.051	0.059	0.058	0.054	0.049	0.057	0.055	0.0545
	sys	0.027	0.024	0.025	0.028	0.02	0.02	0.022	0.029	0.023	0.022	0.024
2D	real	0.267	0.269	0.269	0.269	0.27	0.269	0.27	0.269	0.27	0.269	0.2691
	user	0.242	0.245	0.246	0.244	0.242	0.241	0.241	0.241	0.238	0.241	0.2421
	sys	0.023	0.022	0.022	0.024	0.026	0.027	0.028	0.026	0.03	0.027	0.0255

其中，**real** 是时钟时间——从开始到完成调用的时间。这个是包含其它进程用的时间片段和进程花费的阻塞时间（例如，等待 IO 完成的时间）的所有消耗的时间。**user** 是进程中用户模式代码（核心之外）花费的 CPU 时间总和，这个只是执行进程的实际 CPU 时间，其它进程和进程花在阻塞上的时间并没有计算在内。**sys** 是进程中花费在核心上的 CPU 时间之和，这意味着核心中的系统调用执行的 CPU 时间，和运行在用户空间的库函数是不同的，但是和“**user**”一样，这个只是进程用的 CPU 时间。其中，**user+sys** 将显示进程所花费的实际的 CPU 时间。

因此正演模式算子处理 10 个背景场廓线的实际 CPU 时间分别为，一维算子： $0.0545+0.024=0.0785$ s，二维算子： $0.2421+0.0255=0.2676$ s。这便是正演模式算子的基本处理时间对比，但是实际的同化系统中所处理的背景场廓线的数量级将远远大于本测试中提供的 10 个背景场廓线。而且在变分同化系统当中，正演模式算

子还有相应的切线性算子和伴随算子，三者相加的计算开销才是变分同化系统中该算子的实际开销。所以实际开销会比正演模式单独的开销高三倍以上，可见二维算子的计算开销相对于一维算子开销的增长的确非常大。

由此可见，在采用纯二维弯曲角算子的情况下，二维算子的计算开销要远远大于一维算子的计算开销。针对巨大的计算开销，天河巨型机的 CPU+GPU 加速的体系结构无疑是开展二维算子并行化研究的巨大的优势和资产。在天河巨型机的体系架构下，可以开展针对二维弯曲角算子算法的 GPU 加速研究，将二维弯曲角算子的计算速度提高到实际业务运行中可以接受的应用水平，这将是一个十分有意义的工作。

4.3.2 二维弯曲角算子的实际优势

从二维弯曲角算子和一维弯曲角算子的实现算法上来讲，二维弯曲角算子在计算精度上肯定是大大优于一维算子。但是由于时间的原因，并没有将二维弯曲角算子实现到全球四维变分同化系统当中，无法进行变分同化系统中对二维弯曲角算子实际优势的试验验证，这里阐述一下 ECMWF 所做的预报影响试验以及其得到的结论。

Sean Healy 等(2006)在 CHAMP 无线电掩星观测研究小组的领导下对 2004 年 6 月 1 日到 7 月 31 日的 CHAMP 掩星观测进行了四维变分同化预报影响试验。CHAMP 的弯曲角分别采用一维和二维弯曲角观测算子进行同化，这样的对比试验使得二维算子的潜在的特点得到了验证^[33]。

试验表明二维弯曲角算子的计算开销并不是高得让人望而却步，并且在南北半球的低对流层，二维弯曲角算子减小了 5% 左右的弯曲角观测场减去背景场 (O-B) 的均方根误差。热带低对流层的 O-B 的分布偏差值较小，但是第一猜值的质量控制过程减少了 2%~3% 的观测，从而减少了 20% 的偏差。从 24 小时到 120 小时预报来说，采用一维和二维算子同化 CHAMP 观测相对于南半球无线电探空温度观测而言，提高了 300, 200, 100 和 50hPa 层的分析场和预报场。低对流层的位势高度和相对湿度的预报得分是中性的，但是 24 小时到 48 小时的预报中，南半球 500hPa 位势高度场的距平相关系数得到了一个微小的提高。然而，对于这两个月 CHAMP 观测的一维和二维算子试验之间并没有明确的统计检验的不同。

ECMWF 做的另外一个针对 2007 年 7 月 1 日到 7 月 28 日的 28 天的同化试验，结果显示针对北纬 30° 到北纬 60° 之间的区域，二维算子减少了 8% 的标准偏差。

由此可知，二维弯曲角算子的优势不可能一次试验就能体现出来，仍然需要大量的试验进行验证，就目前而言，由于在高对流层和平流层的弯曲角观测被给予了最大的权重，全球四维变分同化系统中采用一维弯曲角算子同化 GPS RO 资

料对于业务运行等就已经表现得很好，二维弯曲角算子的优势主要体现在低对流层中，作者后续的主要工作就是利用二维弯曲角算子将弯曲角观测引入到四维变分同化系统当中。

4.4 本章小结

本章首先介绍了二维弯曲角算子的基本算法和适用于全球四维变分同化系统的代码实现方式，但是，由于时间关系并没有加入到四维变分同化系统当中进行预报影响试验和计算开销试验等一系列的试验。本章针对二维弯曲角正演模式算子单独进行了分析，其中针对一维和二维正演算子进行了计算开销的试验，并对得到的结果进行了分析，针对二维弯曲角的实际优势，介绍了 ECMWF 的针对 CHAMP 掩星资料的一维二维算子同化预报影响试验的详细情况，得出了二维算子对于同化系统的影响和优势只在中低对流层较大，在高对流层和平流层，一维算子和二维算子的精度差别并不大，但是二维算子的计算开销要远远大于一维弯曲角算子。作者在接下来的主要工作的一个重要组成部分就是将二维弯曲角算子实现到四维变分同化系统当中，并通过一系列的试验来验证二维弯曲角算子的影响和作用。

第五章 观测误差模型

在变分同化系统中，除了背景误差协方差矩阵（**B**）对于最佳分析场的影响非常大之外，使用适当的观测误差协方差矩阵，对于价值函数也相当重要。然而对于不同的模式分辨率，不同的观测变量，不同的时间等皆应有其相对应的误差矩阵，决定调整分析增量对于观测所提供的资料的权重大小，将能更进一步的改善模式初始场。本章通过对四维变分同化系统中 GPS 掩星资料折射率和弯曲角观测误差的估计，对比了不同的观测误差模型，以求能够进一步改善模式初始场。

5.1 GPS 掩星折射率观测误差

由于 COSMIC 现在是全球掩星计划中提供数据量最大的掩星数据。而且掩星数据的观测误差的统计来说差异不会太大，这里以 COSMIC 数据的统计结果为例，讲述折射率算子的质量控制过程。

直到 2007 年末掩星卫星才到达预定的最终轨道，JCSDA 2009 年初更新了 COSMIC 观测的质量控制过程和误差特征矩阵，实现了一个更加优化的质量控制过程。在掩星卫星未到达预定轨道之前，业务代码中同化 GPS RO 数据使用的原始的质量控制结构基于 2006 年 11 月的统计结果，那时的掩星事件数量非常少并且其卫星还没有达到最终的预定轨道^[43]。

更新之前的数据同化系统中折射率的质量控制基于 2006 年 11 月的观测和模式模拟值的统计学对比。质量控制过程基于观测的经纬度的值应用到每一个观测（表 1）。然而，不同纬度范围和垂直高度之间的转变并不是这些值的一个平滑函数。另外，这些统计数值是在 COSMIC 的卫星还没有到达最终轨道的时候得到的，而且没有考虑到模式方法的季节依赖性。

表 5.1 旧同化系统拟合标准偏差及切断值设置（引自 Cucurull, 2010）^[43]

几何高度 (km)	拟合标准偏差(%)	切断值 (标准偏差的倍数)
>30	——	拒绝所有观测
25-30	1	3
8-25	0.5(NH 和 SH)	4
	0.7(TR)	
	-0.25z+0.25(NH)	
<8	-0.3z+3.5(TR)	3
	-0.2z+2.0(SH)	

JCSDA 最近更新了应用于 GPS RO 观测的质量控制过程。新的质量控制过程基于两个不同季节的模式和观测数据的统计学对比。对于北半球（NH，纬度高于

20N), 热带 (TR, 纬度在 20S 和 20N 之间) 和南半球 (SH, 纬度低于 20S) 的统计结果在图 5.1 和图 5.2 中针对 NH 冬天和 NH 夏天分别列了出来。在两幅图中, 数据被限制在了 1km 的水平层中。在折射率的观测和模式第一猜值 (一个 6 小时预报) 之间的平均差值以及这些差值的标准偏差以折射率的百分比的形式表示出来。在同化折射率的值之前, 在时间和空间上将模式变量插值到观测的位置 (Cucurull 等, 2007)^[58]。NH 冬天的情况显示了 40km 以上的数据, 因为 CDAAC 将这个时间段的折射率廓线的海拔高度提高到了 60km, 而 NH 夏天的情况则没有。

冬天和夏天这两个季节的主要不同时在海拔高度 25km 以上和 10km 以下。在 10km 和 25km 之间, 并没有明显的季节依赖性。研究发现折射率的差值的标准偏差只是纬度的函数。实际上, 观测和模式部分差值的标准偏差作为纬度函数的图显示其在赤道周围良好的对称性。这样便可以用一个余弦函数来拟合标准偏差函数。在 10km 到 25km 的海拔范围内 GPS RO 观测具有较高的精度, 去除一个观测的“切断值”(或者称为阈值)被设置为标准偏差值的 3 倍。

电离层残差和气候权重降低了 25km 以上反演折射率的精度, 另外, 由于使用 Abel 逆变换将弯曲角转换成折射率, 折射率误差可能是垂直相关的 (Kursinski et al. 1997)^[44]。这些影响可能会随着大气的状态而变化, 因此寄期望于这两个季节统计学上的差异。更重要的是, CDAAC 报告了一个在处理夏季平流层廓线数据时的 BUG。对于所有的季节, 尽管在更高的海拔上有更大的标准偏差, 在 25km 和 30km 之间观测的切断值被设置成了同一个值, 并且通过和 10-25km 范围内用的相同的余弦函数给出。即使现在 CDAAC 提供高于 60km 的观测, 但是由于同化系统的限制也不会使用高于 30km 的观测。

在 5km 和 10km 之间, 图 5.1 和图 5.2 清楚的列出了观测和模式模拟量差值的海拔和季节相关。由于在这个海拔范围内, GPS RO 数据仍拥有较高的精确度, 其统计学差异仍可归因于模式。尽管考虑到了季节和纬度范围, 在观测点的位置, 模式模拟和观测的差值作为温度的函数的图表仍显示具有相似的统计学模式。因此, 这个海拔范围的质量控制被设定为与插值到观测位置的模式温度是相关的。其切断值仍然设置为三倍差值的标准偏差的值。

在 5km 以下, 系统负偏差和标准偏差的增大在图 5.1 和图 5.2 中有明确显示。热带地区得到的值会更大, 这就使得热带地区的大气球对称假设 (总是在处理观测时假定) 显得无效。另外, 超折射和其它未知状况可能会影响观测的质量。对于这个海拔范围, 平均了冬夏两季并且设定质量控制是纬度相关的。因此采用余弦函数来近似作为纬度的函数的差值的标准偏差。然后, 一个标准偏差的值作为切断值。通过平均季节间的差异, 冬天的观测比夏天要多一点。因为冬天相对于夏天来说, 观测很少被超折射和水平折射率多向性 (主要由水汽梯度引起) 影响。

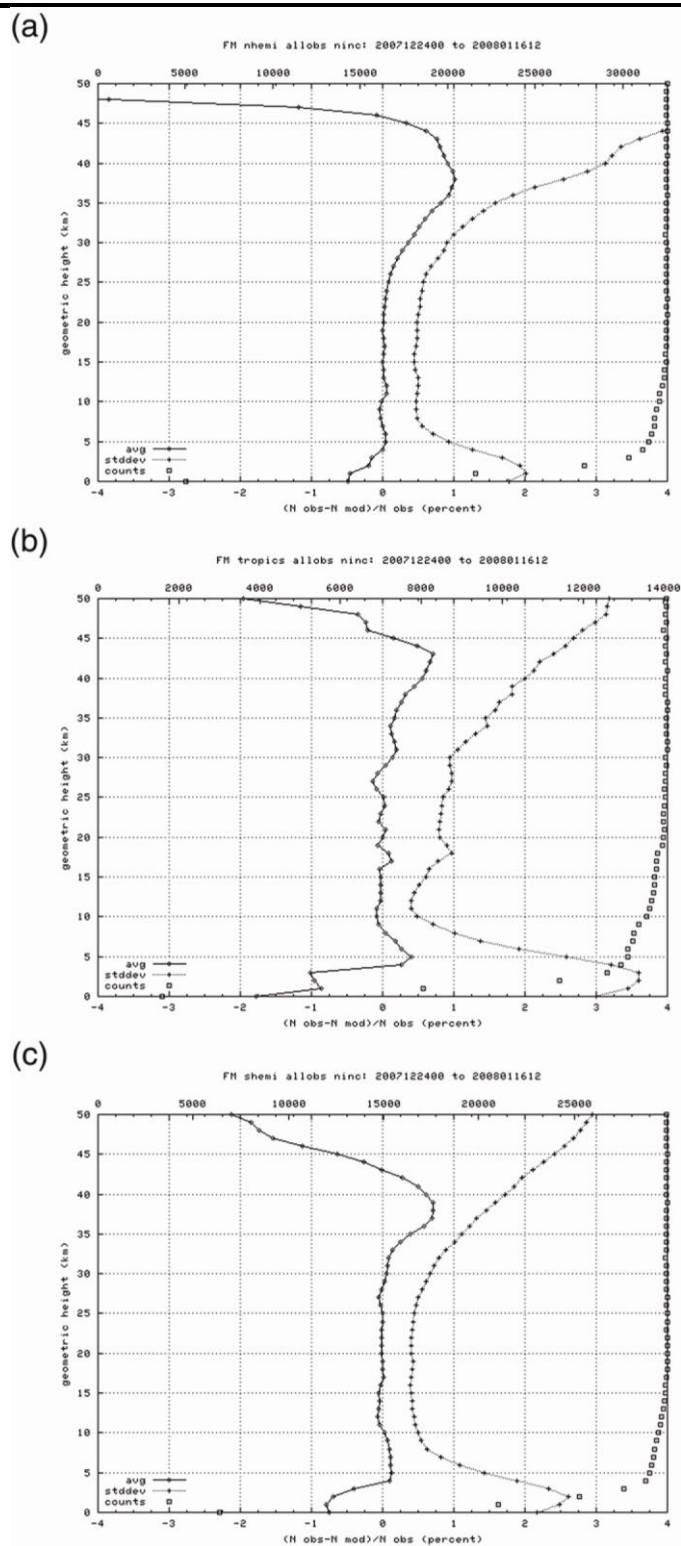


图 5.1 NH 冬季 GPS RO 和模式模拟量差值的平均和标准偏差在几何高度上的分布 (引自 Cucurull, 2010) [43]

(a)NH(20°N 以北), (b)TR(20°S~20°N), (c)SH(20°S 以南)

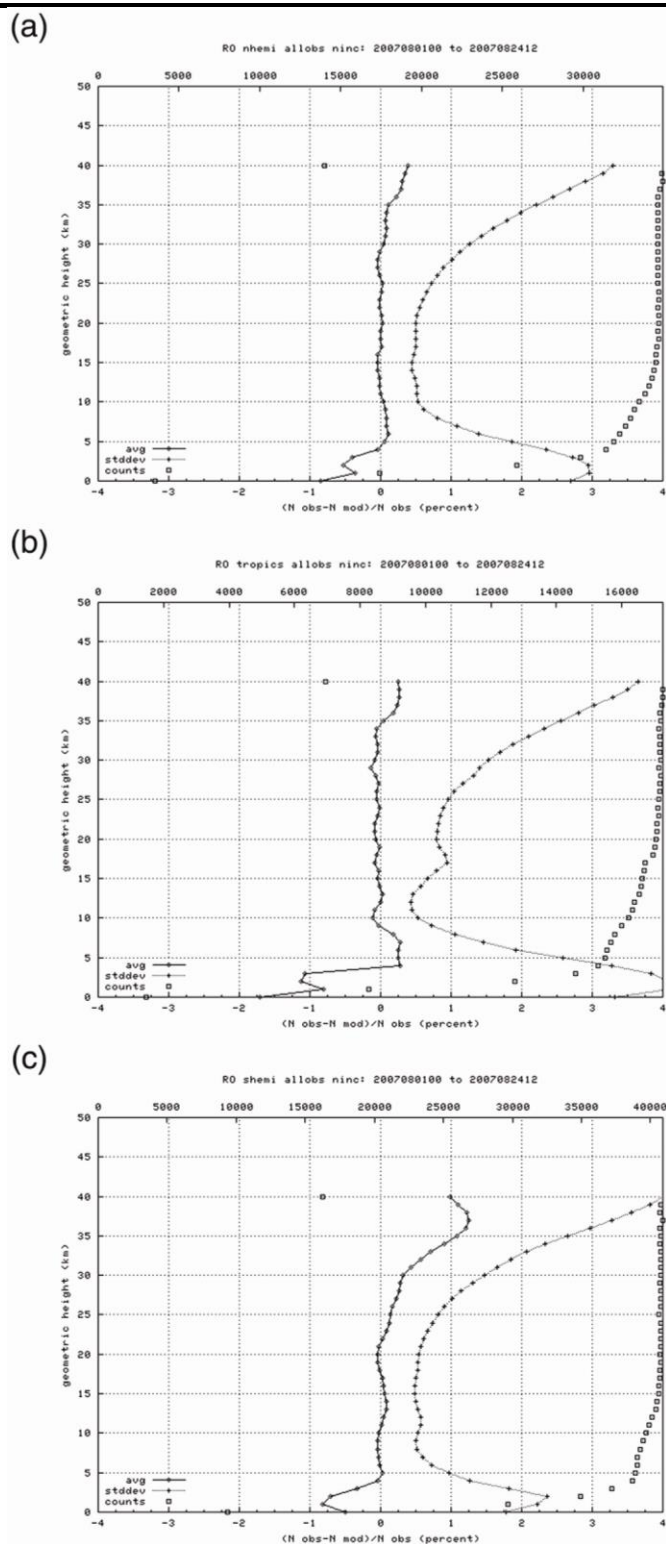


图 5.2 NH 夏季 GPS RO 和模式模拟量差值的平均和标准偏差在几何高度上的分布（引自 Cucurull, 2010）^[43]

(a)NH(20°N 以北), (b)TR(20°S~20°N), (c)SH(20°S 以南)

对于四种不同海拔高度的质量控制结构的详细情况在表 5.2 中进行了总结。在实际代码中, 海拔范围的变化被平滑化, 因此, 切断值是高度的一个连续函数。

表 5.2 新同化系统适合标准偏差及切断值设置（引自 Cucurull, 2010）^[43]

几何高度 (km)	适合标准偏差(%)	切断值 (标准偏差的倍数)
>30	——	拒绝所有观测
25-30	$0.25 + 0.5 \cos(\lambda)$	3
10-25	$0.25 + 0.5 \cos(\lambda)$	3
	$0.5(T \leq 240K)$	
5-10	$0.001T^2 - 0.455T$	3
	$+52.075(T > 240K)$	
<5	$1 + 2.5 \cos(\lambda)$	1

5.2 GPS 掩星弯曲角观测误差

5.2.1 观测误差模型

GPS RO 资料首先进行的便是观测高度范围的控制。现在 GPS 掩星观测的高度可以达到 60km 以上，针对不同高度的掩星资料的可信度不同，质量控制过程设定了一个高度范围，在这个范围以外的掩星观测资料就会被拒绝。在折射率同化算子中，这个高度被设定为 30km，这一点在 5.1 节进行了详细的阐述。由于弯曲角比折射率更加原始，所以针对弯曲角在 WRF-3DVAR 和四维变分同化系统中设定对弯曲角观测的高度限制为 50km，针对弯曲角观测的各项试验（参见第三章）也证明 50km 以下弯曲角观测的可信度是非常的高，所以，弯曲角的高度限制在 50km 以下。

弯曲角的观测误差模型相对于折射率是比较简单的。这里引进了两个弯曲角观测误差模型，分别由英国气象局（Met Office）和欧洲气象中心（ECMWF）开发。由于 ECMWF 的观测模型相对来说比较简单，首先介绍 ECMWF 的预定义观测误差百分比模型。

$$E_{bangle}(j) = 0.2 + (0.001 - 0.2) \times \text{Min}(\text{impact}(j) / 10000.0, 1.0) \quad (5.1)$$

ECMWF 模型采用的是预定义的误差百分比，其误差和影响因子与 10000.0 的比值是相关的。

Met Office 模型相对于 ECMWF 的模型复杂在于其预定义的误差百分比是随着纬度变化的，其模型如下：

表 5.3 Met Office 弯曲角观测误差模型

```
height = (/ -0.01e5 m, 0.0 m, 0.025e5 m, 0.1e5 m, 0.7e5 m /)
IF (ABS(latitude) >= 60.) ! 高纬度
    frac = (/ 0.2, 0.2, 0.08, 0.02, 0.02 /)
IF (ABS(latitude) > 30. .AND. ABS(latitude) < 60. ) ! 中纬度
```

```

frac = (/ 0.2, 0.2, 0.11, 0.02, 0.02 /)
IF (ABS(latitude) <= 30.) ! 低纬度
    frac = (/ 0.2, 0.2, 0.15, 0.02, 0.02 /)

ilev = MAXVAL(WHERE(impact(j) > height(1:5)))
Ebangle(j) = frac(ilev) + (frac(ilev+1)-frac(ilev)) &
    /(height(ilev+1)-height(ilev))*(impact(j)-height(ilev))

```

对比 ECMWF 和 Met Office 的模型，Met Office 采用的模型似乎更加合理，模式误差是要随着纬度的变化而发生变化的。但是，从业务应用的角度，ECMWF 既然仍在采用自己的模型，肯定是有自己的理由。从客观上来判断，ECMWF 采用的模型和 Met Office 的模型在实际业务应用中的差别是极其微小的。经过四维变分同化系统分别对这两个模型进行同化预报影响试验，结果显示两个模型的差异是可以忽略不计的，所以，全球四维变分同化系统中采用的是 ECMWF 的观测误差模型。

5.2.2 相关观测误差

在第三章的分析场偏差试验中研究展示了弯曲角的垂直相关误差对分析场的偏差产生的具体影响。引入相关最主要的问题在于对于组合观测以及正演模式误差相关矩阵仍理解得不够深入。在平流层，相关主要是由弯曲角处理过程中引入的误差所决定的。弯曲角是通过对相位延迟观测进行时间求导得到的。这个过程有限差分近似和相位延迟一起可以引入相当大的负相关^{[59][60]}。然而，需要注意的是微分是在 50Hz 的相位数据上进行的，每 10 米左右就会有一个垂直采样数据。在系统中同化的弯曲角典型的都有 200m 左右的垂直分层，如果垂直稀疏化的话，可能会距离更大。原理上来讲，如果相位延迟在小于 200m 的垂直范围内被平滑化，那么负弯曲角误差相关可以被减小，但是这样可能会增加噪声水平。在对流层，这种相关可能是由相关正演模式误差决定的。一维弯曲角算子最大的误差之一是利用观测提供的影响因子来得到切点高度。在有很强的水平梯度的区域，这个近似将会引入正相关误差。

基于以上的考虑，ECMWF 的 Sean Healy 研究了三个相关误差模型^[61]。第一个模型假定相关随着影响因子的间隔距离以指数级衰减，形式是：

$c(i, j) = \exp\left[-\frac{|a_i - a_j|}{H}\right]$ ；其中，所有垂直间距 $H=1000\text{m}$ 。

第二个模型期望参数化负相关。在整个垂直间距层上，非对角项是 $c(i, i+1)=0.5$ ， $c(i, i+2)=0.2$ ， $c(i, i+3)=c(i, i+4)=c(i, i+5)=-0.3$ ， $c(i, i+6)=-0.1$ ，当 $j>6$ 时， $c(i, j)=0.0$ 。

第三个模型假定在影响高度 10km 以下假定了 $H=500\text{m}$ 的指数衰减，在 10km

以上采用负相关模型。相当于前两个模型的组合形式。

Sean Healy 分别将以上三个模型记为：“exp”，“neg”，“mix”。将这三个模型和无相关模型（“uncorr”）进行对比试验，数据采用 2006 年 12 月 15 日 00 时到 2007 年 2 月 18 日 00 时。相关误差协方差矩阵的结果是负相关的，要想和无相关试验产生同样好的预报影响非常的困难。例如，图 5.3 显示的南半球（纬度 $-90^{\circ} \sim -20^{\circ}$ ，经度 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ）500hPa 高度的距平相关系数。负相关模型产生了最差的结果，在对流层导致了最大的温度增量。

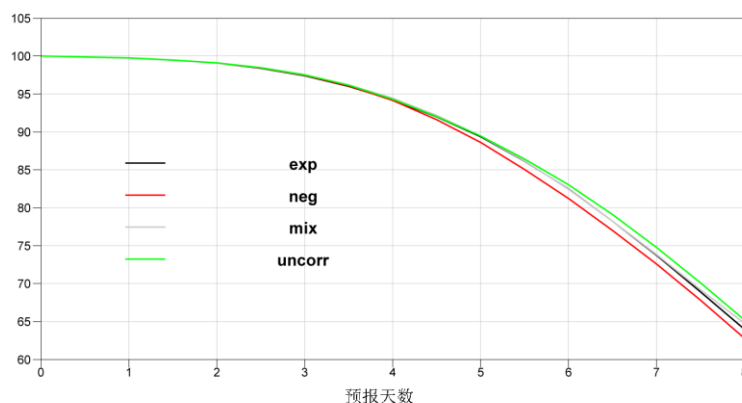


图 5.3 南半球垂直相关观测误差试验距平相关系数^[61]

这些结果显示基于一些特定的假定简化的相关矩阵对于彻底研究垂直误差相关是不够精确的。作者未来的工作需要进一步理解组合观测/正演模式误差相关矩阵，估计正演模式误差组成的一个可能的方式是基于 1D-2D 弯曲角算子的统计学差异。

5.3 本章小结

本章通过对 GPS 掩星折射率和弯曲角观测误差的统计值，分别估计出了折射率和弯曲角观测误差模型，用于 GPS RO 资料同化中的至关重要的质量控制。折射率的观测误差模型是季节、纬度、高度相关的，其切断值是根据不同高度的观测误差的倍数来取值的，弯曲角的观测误差模型是影响因子即高度相关的，切断值的取值是有一定的模型来决定的，同时针对弯曲角的相关观测误差，作者经过试验发现，对于相关误差模型的理解还不充分，效果并不理想，这是未来工作的一个重要研究方向。

结 束 语

本文采用“GPS 无线电掩星资料同化技术研究”这个题目以及五章的结构，除第一章属于绪论之外，其余四章每一章均详细阐述 GPS RO 资料同化的一种关键技术，目的是为了充分和全面的展示作者在硕士期间所做的研究工作及所取得的成果，同时，本论文也想成为对于国内 GPS RO 资料同化技术研究进展和趋势的一个全面且详细的介绍和总结。

国外的观测资料敏感性试验表明，掩星资料对同化系统的贡献仅次于微波温度和红外高光谱，超过了高空报和飞机报，已成为十分重要的资料。GPS 掩星观测能够获取平流层和上对流层的温度、低对流层的湿度信息，受云或降水的影响很小，没有校准上的问题；垂直分辨率很高，平流层为 1.5 公里，对流层为 0.5 公里以下，全球分布均匀；观测精度高、稳定性好，随机误差小于 1K，系统误差小于 0.2K；观测的花费相对低廉，时空分辨率的提高也相对容易。

现在世界上实施的掩星计划主要有 COSMIC、GRACE-A/B、CHAMP、METOP/GRAS、TerraSAR-X 和 C/NOFS 等，每天提供大约 3000 个左右的掩星廓线，为 GPS 掩星技术的研究提供了大量的数据。

文章从一维折射率算子开始，一维弯曲角算子，二维弯曲角算子，层层深入，不断提高算子的准确度，但是同时也带来了算子的复杂度及计算量的提升。

文章首先从一维折射率算子入手，针对 SW53，HS75，BEV94 和 RU02 四种不同因子值的由来及其差异的原因进行了细致的分析，对 SW53 的近似两项表达式和精确三项表达式及 RU02 的因子进行了台风路径预报影响试验，表明 SW53 三项表达式要比两项表达式更加精确，同时比 RU02 的因子更加稳定。由于一维弯曲角算子也要用到折射率的计算公式，所以，一维弯曲角算子中折射率的计算采用的是 SW53 的三项表达式。

一维弯曲角算子的基本算法及其在区域三维变分同化系统和全球四维变分同化系统中的具体实现是论文的核心内容。在变分同化系统当中，不单要实现正演算子，还要实现切线性算子和伴随算子，其算法的复杂度比较大。对其实现的重点难点切线性算子和伴随算子的实现具体过程和步骤进行了详细的说明和阐述。在实现四维变分同化系统中一维弯曲角算子的同时，也在三维变分同化系统中实现了一维弯曲角算子，并分别针对 WRF-3DVAR 系统和全球四维变分同化系统进行了台风预报影响试验、分析场偏差试验和全球中期预报影响试验。WRF-3DVAR 区域台风预报影响试验中，弯曲角资料的同化对台风路径和台风强度的预报都有改善，并且和折射率资料相比更优。引入 GPS 掩星资料后对南北半球位势高度分析场的影响十分明显。针对 2011 年 9 月和 10 月进行 WMO 标准的月平均统计检

验对比试验显示, GPS 对全球中期预报分析均方根误差是减小的, 同时可以提高预报第 6 天之后的距平相关系数。同时在分析场中连续不断的加入 GPS RO 资料作为台风预报的初始场, 台风的路径更加接近实际路径同时预报效果更加稳定。

一维弯曲角算子的弯曲角是在模式层上的平均值, 相对于二维弯曲角算子计算出的弯曲角来说精度就稍微差一些(差距很小), 但是二维弯曲角算子的计算开销较大, 相对于弯曲角数据同化来说, 在低和中对流层中(系统定为 10km 以下)采用二维弯曲角算子提高精度, 在 10km 以上采用一维弯曲角算子, 这种复合的方法意在在一维弯曲角算子误差较大的中低对流层采用二维算子提高精度, 同时对于整体计算量不至增加过大, 给巨型机的运算能力带来巨大的负担。将二维弯曲角算子实现到全球四维变分同化系统中将是作者在完成本论文之后的主要工作。

同化系统中对于观测资料的质量控制至关重要。针对弯曲角和折射率的观测误差特性, 分别分析研究了折射率的观测误差模型和弯曲角的观测误差模型。同时, 在弯曲角同化的试验中, 作者受到了相关观测误差的影响, 稀疏化的掩星观测资料的改善效果要远远优于未稀疏化的掩星观测, 作者针对弯曲角的相关观测误差模型进行了研究和试验, 但是结果并不令人满意, 针对组合观测和正演模式误差相关矩阵仍需要做进一步的研究。

由于时间的关系, 关于 GPS 无线电掩星资料同化技术仍有很多具体的工作还没有实施和完成, 在完成硕士期间的学习和研究之后, 作者要继续读取本校的博士学位, 在博士期间, 作者将继续致力于完善和实施本论文的未完成的研究和工作, 实现为国内 GPS RO 资料同化技术的发展和进步贡献自己的一份力量。

致 谢

“宝剑锋从磨砺出，梅花香自苦寒来”，两年半的硕士生涯即将结束，回顾在科大生活的两年，每一个情景，每一个片段都历历在目，永生难忘。这两年半中，我经历过失望、郁闷、苦楚，也经历了成功、喜悦和兴奋，我成长了，成熟了。

首先也是最应该感谢的是我的导师张卫民研究员！第一次见到张老师的情景仍然十分清晰。两年半的学习科研生活中，张老师在我学习、科研和生活上等各个方面给予了我无微不至的关怀和莫大的鼓舞。是张老师深切细致的开导和鼓励，帮我度过了在我 24 岁的人生中最阴暗、最无助、最悲伤的日子。张老师宽厚正直的为人，深厚渊博的知识，科学严谨的治学态度，乐观豁达的处事风格，精益求精、废寝忘食的工作作风深深的影响和感染了我。张老师不仅在学业与科研上要求我要严谨勤奋、科学创新，而且在道德品质、为人处事方面对我也提出很高的要求。能称为张老师的学生，可以说是一种缘分，同时也是我的幸运。我还会在张老师的指导下进行博士课题的研究，一日为师，终身为父，我会一直以张老师作为我的榜样和前进的目标及动力！

感谢宋君强所长在我攻读研究生期间给予的帮助、支持和关怀。

特别感谢曹小群老师在我课题研究中给予的帮助和指导，曹老师宽厚谦逊的为人处事，严谨科学的科研态度，一丝不苟、勤奋努力的工作作风给予了我巨大的震撼和深刻的影响。

特别感谢吴忠元老师、刘柏年老师、高红霞老师、罗雨博士及赵延来老师在我搬到 407 之后，我们亦师亦友，感谢他们在我的科研课题研究，日常生活给予我的巨大的帮助和关怀，让我很快了解了气象学、数据同化、GPS 掩星等等的专业知识及相应的科研方式方法，使我能够很快的进入科研状态并取得一定的进展。

感谢 611 教研室的赵自春老师、赵军老师、吴建平老师、张理论老师以及其他各位老师对我课题的指导 and 帮助。感谢老赵老师以其特有的耐性，一遍一遍不厌其烦的承受着我找他要光盘等设计保密工作的事情。感谢赵军老师、吴建平老师及其他老师对我课题的相关研究内容提出的宝贵的建议，老师们严谨的工作作风、认真的工作态度让我受益终身。

感谢刘海师兄、尚卫卫师兄、余意师姐、皇群博师兄、贾雄师兄、覃耀磊师兄从我进入师门以来，对我的指导和关怀。感谢教研室的韩望乙，李大力，吴勇文，彭国栋，刘芳，我们经常在一起讨论科研中遇到的问题，互相交流想法。

感谢学员五队的吴志修队长、丁文政委、李佩江政委，以及五队的全体同学，他们和我一起走过了研究生阶段的美好时光，给我留下了许多美好的回忆！

在此我要特别感谢李紫阳、闫安、张龔、赵争业、朱湘、王琳、熊达鹏在我

平时学习、生活中对我的关心和照顾，我也觉得十分幸运，在科大遇到了这样一群义气、可爱、交心的战友和同学，祝他们在以后的人生道路上一帆风顺！

感谢我的父母，是他们含辛茹苦、不计回报的养育才使我拥有了美好的今天。在我的成长中的每一步，都凝聚着父母伟大无私的爱，正是由于他们对我的支持，我才能够心无旁骛的度过我的人生各个阶段的求学生涯。在此，对我的父母和亲爱的家人们道一声：谢谢，你们辛苦了！

最后，再一次向所有人表示我诚挚的感谢！！！！

参考文献

- [1] Charney J. G. Dynamical forecasting by numerical process [M]. Compendium of Meteorology . American Meteorological Society, Boston, MA. 1951.
- [2] Talagrand O. Assimilation of observations, an introduction [J]. *J. Met. Soc. Japan*. Special Issue, 1997, 75: 191-209.
- [3] 沈桐立, 田永祥, 葛孝贞. 数值天气预报 (修订版) [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 第一章.
- [4] Cucurull, L., J. C. Derber, R. Treadon and R. J. Purser. Preliminary impact studies using global positioning system radio occultation profiles at NCEP [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2008(136): 1865-1877.
- [5] Healy, S. B. and J. N. Thépaut. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2006(132): 605-623.
- [6] 邹晓蕾. 资料同化理论和应用 (上册) [M]. 北京: 气象出版社, 2009: 第六章.
- [7] Zou, X., Y.-H. Kuo, and Y.-R. Guo. Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic adjoint model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1995(123): 2229-2249.
- [8] Kuo, Y. H., X. Zou, and W. Huang. The impact of GPS data on the prediction of an extra tropical cyclone: An observing system simulation experiment [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 1997(27): 439-470.
- [9] Huang, C. Y., Y. H. Kuo, S. H. Chen, and F. Vandenberghe. Improvements on typhoon forecast with assimilated GPS occultation refractivity [J]. *Weather Forecast.*, 2005(20): 931-953.
- [10] Ma, X. X., Y. R. Guo, Y. H. Kuo, and H. C. Lin. Observation error statistics of spaced-based GPS RO in WRF-Var system and numerical experiments for typhoon Dujuan [J]. *The Seventh WRF Users' Workshop*, 2006: P4.4. , Boulder, Colorado.
- [11] Cucurull, L.. Improvement in the Use of an Operational Constellation of GPS Radio Occultation Receivers in Weather Forecasting [J]. *Wea. & Forecasting*, 2010(25): 749-767.
- [12] Anthes, R. A., C. Rocken, and Y.-H. Kuo. Applications of COSMIC to meteorology and climate [J]. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2000(11): 115-156.
- [13] 王洁如. 侵台台风之 GPS 折射率 3DVAR 资料同化及数值模拟 [D]. 台湾: 国立中央大学大气物理研究所, 2004: 1-108.
- [14] 吴俊泽. 利用 MM5 4DVAR 模式同化掩星折射率资料及虚拟涡旋探讨台风数值模拟之影响 [D]. 台湾: 国立中央大学大气物理研究所, 2007: 1-70.
- [15] 陈舒雅. GPS 掩星观测资料同化及对区域天气预报模拟之影响 [D]. 台湾: 国立中央大学大气物理研究所, 2008: 1-137.

-
- [16]蔡金成.卫星资料与虚拟涡旋四维变分同化对台风数值模拟的影响[D].台湾:国立中央大学大气物理研究所, 2009: 1-87.
- [17]连嘉欣.资料同化对台湾地区台风和梅雨模拟之影响[D].台湾:国立中央大学大气物理研究所, 2009: 1-81.
- [18]吕佳龙.同化 GPS 掩星及其他观测资料对梅雨模拟之影响[D].台湾:国立中央大学大气物理研究所, 2010: 1-118 页。
- [19]徐贤胜, 郭鹏, 徐桃玲, 洪振杰.GPS/LEO 无线电掩星开环反演技术[J].物理学报(Acta Phys. Sin.), 2010, Vol. 61, No.19(2012), 199202。
- [20]唐细坝.GPS 无线电掩星观测数据的同化试验[D].北京: 中国气象科学研究院, 2008: 1-60.
- [21]成巍.后向映射四维变分同化方法及 GPS 掩星资料同化应用研究[D].北京: 中国科学院研究生院大气物理研究所, 2012: 1-107.
- [22]盛峥, 方涵先, 刘磊, 黄思训.GPS 掩星折射率的一维变分同化[J].解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, Vol.7, No.1: P80-83.
- [23]文伟俊.GPS 掩星资料三维变分同化对台风预报的改进实验[D].南京: 南京信息工程大学气象学院, 2008: 1-48.
- [24]Eyre, J. R.. Assimilation of radio occultation measurements into a numerical weather prediction system [J]. Technical Memorandum No.199, European centre for Medium-range Weather Forecast, Reading, UK, 1994.
- [25]Palmer, P.. Analysis of atmospheric temperature and humidity from radio occultation measurements [D]. PhD thesis, University of Oxford, 1998.
- [26]Melbourne, W. G., and Coauthors. The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring [J]. JPL Publ. , 1994, 94-18: 156 pp.
- [27]Liu, H. and X. Zou. Improvements to GPS radio occultation ray-tracing model and their impacts on assimilation of bending angle [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003(108): 4548.
- [28]Poli, P. and J. Joiner. Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. I: Ray tracing [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, , 2004(130): 2787-2805.
- [29]Poli, P.. Effects of horizontal gradients on GPS radio occultation observation operators. II: A fast atmospheric refractivity gradient operator (FARGO) [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2004(130): 2807-2825.
- [30]Sokolovskiy, S., Y. H. Kuo, and W. Wang. Assessing the accuracy of linearized observation operator for assimilation of the Abel-retrieved refractivity: Case simulation with high-resolution weather model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2005(133): 2200-2212.
-

-
- [31]Syndergaard, S., E. Kursinski, B. Herman, E. Lane, and D. Flittner. A refractive index operator for assimilation of occultation data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2005(133): 2650-2668.
- [32]Healy, S. B., A. M. Jupp, and C. Marquardt. Forecast impact experiment with GPS radio occultation measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005(32): L03804.
- [33]Healy, S. B., J. R. Eyre, M. Hamrud and Jean-Noël Thépaut. Assimilating GPS radio occultation measurements with two-dimensional bending angle observation operators [J]. EUMETSAT/ECMWF Fellowship Programme Research Report No.16, 2006.
- [34]王跃山.客观分析和四维同化——站在新世纪的回望(II), 客观分析的主要方法(1) [J], 气象科技, 2006(1): P1-9。
- [35]Kalnay, E.. Atmospheric modeling, data assimilation and predictability [M]. Cambridge University Press, United Kingdom, 2003,364.
- [36]Thayer, D.. An improved equation for the radio refractive index of air [J]. *Radio Sci.*, 1974(9): 803-807.
- [37]Smith, E. K., and S. Weintraub. The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies [J]. *Proc. IRE*, 1953(41): 1035-1037.
- [38]Rüeger, J. M.. Refractive index formulae for electronic distance measurement with radio and millimetre waves [J]. Unisurv Rep. S-68, School of Surveying and Spatial Information Systems, University of New South Wales, Sydney, NSW, Australia, 2002: 52 pp.
- [39]Hasegawa, S., and D. P. Stokesbury. Automatic digital microwave hygrometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1975(46): 867-873.
- [40]Bevis, M., S. Businger, S. Chiswell, T. A. Herring, R. A. Anthes, C. Rocken, and R. H. Ware. GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1994(33): 379-386.
- [41]Aparicio, J., and G. Delblonde. Impact of the assimilation of CHAMP refractivity profiles in environment canada global forecast [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2008(136): 257-275.
- [42]Aparicio, J., G. Deblonde, L. Garand, and S. Laroche. The signature of the atmosphere compressibility factor in COSMIC, CHAMP and GRACE radio occultation data [J]. *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1029/2008JD011156, 2009.
- [43]Cucurull, L.. Improvement in the use of an operational constellation of GPS radio-occultation receivers in weather forecasting [J]. *American Meteorological Society*, doi: 10.1175/2009WAF2222302.1, 2010.
- [44]Kursinski, E. R., G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997(102): 23 429-23 465.
-

-
- [45]Lewis, H.. Refractivity calculations in ROPP [J]. *GRAS SAF Report*, 2008, 5.
- [46]Boudouris, G.. On the index of refraction of air, the absorption and dispersion of centimeter waves by gases [J]. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1963(67D): 631-684.
- [47]Healy, S. B.. Refractivity coefficients used in the assimilation of GPS radio occultation measurements [J]. *GRAS SAF Report*, 2009, 09.
- [48]Simmons, A., and D. Burridge. An energy and angular momentum conserving vertical finite difference scheme and hybrid coordinate [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1981(109): 758-766.
- [49]Vorob'ev, V., and T. Krasil'nikova. Estimation of the accuracy of the atmospheric refractive index recovery from doppler shift measurements at frequencies used in the NAVSTAR system [J]. *USSR Phys. Atmos. Ocean, Engl. Transl.*, 1994(29): 602-609.
- [50]Healy, S.. Radio occultation bending angle and impact parameter errors caused by horizontal refractive index gradients in the troposphere: A simulation study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001(106): 11875-11889.
- [51]Cohn, S.. In introduction to estimation theory [J]. *J. Met. Soc. Jap.*, 1997(75): 257-288.
- [52]Zou, X., H. Liu, R. Anthes, H. Shao, J. Chang, and Y.-J. Zhu. Impact of CHAMP radio occultation observations on global analyses and forecasts in the absence of AMSU radiance data [J]. *J. Met. Soc. Jap.*, 2004(82): 533-549.
- [53]Kuo, Y. H., T. K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes. In version and error estimation of GPS radio occultation data [J]. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 2004(82): 507-531.
- [54]Rodgers, C.. Inverse methods for atmospheric sounding: Theory and practice [M]. World Scientific Publishing, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, 2000.
- [55]Healy, S. B.. Forecast impact experiment with a constellation of GPS radio occultation receivers [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 2008(9), doi:10.1002/asi.169.
- [56]Mahoney, M. J.. A discussion of various measures of altitudes [Z], 2001, <http://mtp.jpl.nasa.gov/notes/altitude/altitude.html>.
- [57]Press, W., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P.. Numerical recipes in C-The art of scientific computing [M], Cambridge University Press, Cambridge, New York, 1992, 2nd edn.
- [58]Cucurull, L., J. C. Derber, R. Treadon and R. J. Purser. Assimilation of Global Positioning System radio occultation observations into NCEP's Global Data Assimilation System [J]. *Mon Wea. Rev.*, 2007(135): 3174-3193.
- [59]Cucurull, L., J. C. Derber, R. Treadon and R. J. Purser. Assimilation of Global Positioning System radio occultation observations into NCEP's Global Data Assimilation System [J]. *Mon Wea. Rev.*, 2007(135): 3174-3193.
- [60]Poli, P., P. Moll, D. Puech, F. Rabier, and S. Healy. Quality control, error analysis,
-

-
- and impact assessment of formosat-3/cosmic in numerical weather prediction [J]. *Terr. Atmos. Ocean.*, In press, 2008.
- [61]Healy, S. B.. Assimilation of GPS radio occultation measurements at ECMWF [J]. GRAS SAF Workshop on Applications of GPSRO Measurements, 16-18 June 2008.
- [62]黄清勇,朱延祥.FORMOSAT-3/COSMIC 科学研究简介 [J].台湾:大气科学, 2004(32): 293-328。
- [63]黄清勇,周涛,郭勉之.GPS 掩星折射率资料同化对于台风模拟之影响[J].台湾:大气科学, 2007(35):135-150。
- [64]Andersson, E., and H. Järvinen. Variational quality control [J]. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1999(125): 697-722.
- [65]Anthes, R. A., and T. T. Warner. Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meso-meteorological studies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1978(106): 1045-1078.
- [66]Anthes, R. A., and Coauthors. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2008(89): 313-333.
- [67]Ao, C., T. Meehan, G. Hajj, A. Manucci, and G. Beyerle. Lower troposphere refractivity bias in GPS occultation retrivals. *J. Geophys. Res.*, 2003(108), doi:10.1029/2012JD003216.
- [68]Bergthorsson, P. and B. Doos. Numerical weather map analysis [J]. 1955(7): 329-340.
- [69]Charney, J. G., Fjotoft, R. and Von Neumann,J.. Numerical integration of the barotropic vorticity equation[J]. 1950(2): 237-254.
- [70]Chen, S.-H., F. Vandenbergh, and C.-Y. Huang. Error characteristics of GPS retrieved refractivity using a simulation study [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2006(84): 477-496.
- [71]Chen, S.-Y., C.-Y. Huang, Y.-H. Kuo, Y.-R. Guo and S. Sokolovskiy, 2009: Assimilation of GPS refractivity from FORMOSAT-3/COSMIC using a nonlocal operator with WRF 3DVAR and its impact on the prediction of a typhoon event [J]. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2009(20): 133–154.
- [72]Cressman, G P. An operational objective analysis system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 1959(87): 367-374.
- [73]Cucurull, L., Y.-H. Kuo, D. Barker, and S. R. H. Rizvi. Assessing the impact of simulated COSMIC GPS radio occultation data on weather analysis over the Antarctic: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, 2006(134): 3283-3296.
- [74]Cucurull, L. and J. C. Derber. Operational implementation of COSMIC observations into NCEP's global data assimilation system [J]. *Wea. & Forecasting*. 2008(23): 702-711.
-

- [75]Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli. Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2005(131): 3385-3396.
- [76]Kueh, M.-T., C.-Y. Huang, S.-Y. Chen, S.-H. Chen and C.-J. Wang. Impact of GPS radio occultation soundings on prediction of Typhoon Bilis (2006) land falling Taiwan [J]. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, 2006(20): 115-131.
- [77]Kuo, Y.-H., X. Zou, S.-J. Chen, Y.-R. Guo, W. Huang, R. Anthes, D. Hunt, M. Exner, C. Rocken, S. Sokolovskiy. A GPS/MET sounding through an intense upper-level front [J]. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 1998(79): 617-626.
- [78]Kuo, Y. H., S. V. Sokolovskiy, R. A. Anthes, and F. Vandenberghe. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2000(11): 157-186.
- [79]Kuo, Y. H., W. S. Schreiner, J. Wang, D. L. Rossiter, and Y. Zhang. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005(32), L05817.
- [80]Kuo, Y.-H., H. Liu, Y.-R. Guo, C.-T. Terng, and Y.-T. Lin. Impact of FORMOSAT-3/ COSMIC Data on Typhoon and Mei-yu Prediction [Z], *National Taiwan University (NTU) Department of Atmospheric Sciences 50th Anniversary Book*, 2008.
- [81]Kursinski, E. R., G. A. Hajj, K. R. Hardy, L. J. Romans, and J. T. Schofield. Observing tropospheric water vapor by radio occultation using the global positioning system [J], *Geophys. Res. Letter*, 1995(22): 2365-2368.
- [82]Kursinski, E. R., G. A. Hajj, W. I. Bertiger, S. S. Leroy, T. K. Meehan, L. J. Romans, J. T. Schofield, D. J. McCleese, W. G. Melbourne, C. L. Thornton, T. P. Yunck, J. R. Eyre and R. N. Nagatani. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the GPS [J], *Science*, **1996**(271): 1107-1109.
- [83]Kursinski, E. R.. The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results [D], Ph.D. thesis, CIT, Pasadena, California, 1997.
- [84]Kursinski, E. R., G. A. Hajj, S. S. Leroy, and B. Herman. The GPS radio occultation technique [J]. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2000(11): 53-114.
- [85]Leroy, S. S.. Measurement of geopotential height by GPS radio occultation [J], *J. Geophys. Res.*, 1997(102): 23,429-23,465.
- [86]Panofsky, H. A.. Objective weather map analysis. *Z meteor [J]*., 1949(6): 386-392.
- [87]Richardson, Lewis F.. *Weather Prediction by Numerical Process* [M]. Cambridge University Press, 1922, 236.
- [88]Rocken, C., and Coauthors. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(D25), 29 849-29 866.
- [89]Rocken, C., R. Anthes, M. Exner, D. Hunt, S. Sokolovskiy, R. Ware, M. Gorbunov,

-
- W. Schreiner, D. Feng, B. Herman, Y. H. Kuo, and X. Zou. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997(102), 29849-29866
- [90]Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers. A description of the advanced research WRF version 2 [Z]. NCAR technical note NCAR/TN-468+STR, 2005, 100 pp.
- [91]Sokolovskiy, S., Y. H. Kuo, and W. Wang, 2005b: Evaluation of a linear phase observation operator with CHAMP radio occultation data and high-resolution regional analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2005(133): 3053-3059.
- [92]Ware, R. et al.. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996(77): 19-40.
- [93]Wee, T.-K., and Y.-H. Kuo. Assimilation of CHAMP and SAC-C radio occultation data using MM5 4D-VAR [J]. *Joint NCAR/MMM CSU/CIRA Data Assimilation Workshop*, Sept. 19th, 2005, in Boulder, Colorado.
- [94]Wickert, J., C. Reigber, G. Beyerle, R. Konig, C. Marquardt, T. Schmidt, L. Grumwaldt, R. Galas, T. K. Meehan, W. G. Melbourne, and K. Hocke. Atmosphere sounding by GPS radio occultation: first results from CHAMP. *Geophys. Res. Lett.* 2001,28(17), 3263-3266.
- [95]Zou, X., F. Vandenberghe, B. Wang, M. E. Gorbunov, Y. H. Kuo, S. Sokolovskiy, J. C. Chang, J. G. Sela, and R. Anthes. A ray-tracing operator and its adjoint for the use of GPS/MET refraction angle measurements. *J. Geophys. Res.*, 1999(104): 22301-22318.
- [96]Zou, X., B. Wang, H. Liu, R. A. Anthes, T. Matsumura, and Y. J. Zhu. Use of GPS/MET refraction angles in 3D variational analysis [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2000(126): 3013- 3040.
- [97]Zou, X. and Q. Xiao. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2000(57):836-860.

作者在学习期间取得的学术成果

- [1] Zhu Mengbin, Zhang Weimin, Li Dali, 2012: An Atmosphere State Computation System Based on Radio Occultation Data. 2012 Fourth International Conference on Computational and Information Sciences, Volume 3, 916-918, Chongqing, China.