

文章编号: 1000-8349(2007)03-0236-13

GAIM 电离层同化方法进展

黄 斌¹, 郭 鹏¹, 洪振杰^{1,2}, 严豪健¹,
胡小工¹, 丁金才³, 张训械⁴

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030 ; 2. 温州大学, 温州 325027 ; 3. 上海中心气象台, 上海 200030 ; 4. 中国科学院 武汉数学与物理研究所, 武汉 430071)

摘要: 电离层是复杂的空间层结, 其变化受太阳活动强度、地球磁场等因素影响。随着空间技术发展的需求, 电离层天气变化成为目前空间天气预报最重要的内容之一。最近 10 年, 人们利用卫星在电离层观测方面取得了重大进展, 尤其引人注意的是: 无线电掩星观测技术正走向应用的新阶段, 加上已经建立的全球大量的地基 GPS 观测网, 它们不仅为电离层动力学模式研究提供了丰富的电离层资料, 而且为电离层预报提供了很好基础。因此, 电离层天气预报成为当前重要的、前瞻性的研究方向, 电离层资料同化是电离层预报最重要的研究内容之一。该文系统介绍这方面国际动态, 重点是美国的 USC/JPL 和犹他州大学开展全球电离层同化模型研究、全球电离层同化研究的进展, 以及在电离层天气预报中应用的初步成果。

关键词: 天体测量学; 电离层; 综述; 同化模型; 四维变分; 卡尔曼滤波

中图分类号: P129 **文献标识码:** A

1 引 言

当今, 无线电通讯和卫星导航已经在人们生活、军事等方面得到了最广泛应用。地球电离层环境对无线电波传播的影响越来越重要。例如: 电离层不均匀和扰动对高频无线电波的传播产生很大影响; 强烈的电离层环境扰动使得卫星导航系统的定位精度显著下降。国际空间天气组织认为, 迫切需要建立一个可靠的、精确的电离层特性和预报系统。一个成功的空间天气系统很大程度上依赖于: 1) 能够连续地获取与空间环境相关的全球电离层测量; 2) 能够用自相容的方法将各种观测数据结合到动力学模型中去。

当前, 空间天气的监测和预报状况有一些类似于半世纪前的常规气象监测和预报, 它们的观测在空间和时间上是不连续的, 解释它们的方法是最基本的。现在数值天气预报模式获得成功的主要原因是能获取全球大气层连续的、实时的观测资料(如气象卫星和探空气球资料),

收稿日期: 2006-05-18 ; 修回日期: 2006-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40605012), 浙江省自然科学基金资助项目(Y506040), 温州科技计划项资助项目(S20060025)

以及全球天气模型与数据同化算法的改进。

在过去的 30 年里, 电离层模型的基本原理 (包括与热层的耦合和非耦合作用) 已经取得很大的发展。模型的成功依赖于精确地获得太阳远紫外线 (Extreme Ultra-Violet, EUV) 辐射, 电离层热层密度、组成、温度, 电场, 中性大气风和极光沉降等动力学参数。这些动力学参数作为输入参数的同时, 也作为离化、动力、化学过程的控制参数, 进入碰撞等离子体动力学方程。如何获取连续的、全球分布的和近实时的观测输入数据, 已经成为电离层天气模型研究中的一个主要任务。

随着空间技术的发展, 空间环境探测正开始进入一个崭新的时代。科学家们已经在太阳活动研究和磁层扰动信息方面取得显著的成果, 并且已经逐步实现获得连续的、全球分布的、近实时的上层大气和电离层数据。全球定位系统 (GPS) 是一个很好的应用例子。目前全球 GPS 观测网已经包含 300 多个全球分布的国际 GPS 地球动力学服务 (International GPS Service for Geodynamics, IGS) 永久地面站, 并且地面站数目仍在快速地增加。如果加上区域网的成百上千个 GPS 接收机, 能组成一个强大的地基电离层监测系统。在今后的几年内, 用于电离层掩星的低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星的数目也将增加到近 12 个^[1], 它们能提供大量的、全球分布的、高垂直分辨率的电子密度场。结合其它观测数据 (如紫外 (UV) 气辉辐射测量)^[2], 这些数据将提供一个前所未有的、连续的、全球覆盖的和近实时的上层大气和电离层数据, 真正实现全球电离层同化。

近年来, 计算电离层层析 (computerized ionospheric tomography, CIT) 技术^[3] 和总电子含量 (total electron content, TEC) 映射技术^[4] 已经得到快速发展。这些数学方法可以反演视向 TEC 观测, 计算电离层状态变量 (如电子密度或垂直总电子含量剖面)。但是, 这两种方法没有考虑电离层物理过程, 从而限制了其预报的能力。

1995 年, 美国国家空间天气计划 (National Space Weather Program, NSWP) 执行的计划方案中已经把研究大尺度电离层特征, 以及小尺度等离子体密度不均匀性的日变化作为 NSWP 的主要目标之一。1999 年, 美国国防部把全球电离层数据同化定为 12 个综合大学优先研究 (Multidisciplinary University Research Initiative, MURI) 计划之一。MURI 项目支持了两个合作团队分别独立发展全球电离层同化模型。分别是南加利福尼亚大学 (University of Southern California, USC) 和喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 组成的团队, 以及犹他州大学 (Utah State University, USU) 组成的团队。他们研究各种电离层数据同化技术, 致力于建立全球电离层同化模型 (Global Assimilative Ionospheric Model, GAIM)^[5,6] 和全球同化电离层测量 (Global Assimilative Ionospheric Measurement, GAIM)^[7,8]; 这两个电离层同化模型都建立在一个随时间变化的全球电离层和等离子体层动力学模型基础上, 采用四维变分 (Four-dimensional Variational, 4DVAR) 同化技术或卡尔曼滤波技术, 进行各种类型实时或近实时观测资料的同化。但是, 他们在具体的技术路线上是不一样的。本文主要介绍 USC/JPL 开发的全球电离层同化模型, 以及他们得到的初步分析结果; 同时对 USC 的 GAIM 模型也做了简单的介绍。

数据同化技术是弥合理论模型和观测数据的有力工具。在气象上, 数据同化已经实施了几十年。测量资料通过同化过程融合到理论模型中, 使模型与数据相互匹配; 最终使数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 模式更加精确。类似于中性大气的同化模式 (解算和预报四维大气状态参数, 包括温度场、水汽场和风场等), 电离层同化模型完成解算和预报

四维电离层的电子密度场以及基本的动力学参数 (包括电子和离子的产生率、电动力和风场等) 的任务。全球电离层数据同化系统由以下几个部分组成: 1) 正演模型, 根据随时间变化的物理模型, 进行电离层动力学状态的传递, 它包括描述电离层动力过程的闭合方程组; 2) 数据预处理, 编辑和准备同化的数据; 3) 观测算子, 将模型状态空间映射到观测空间; 4) 优化模块, 调整模型状态或动力学参数, 使模型预报测量值和真实测量值之间的差最小。

2 USC/JPL 的 GAIM 系统

以下分别从两个方面介绍 USC/JPL 的 GAIM 系统。首先按照数据同化的处理模式描述 GAIM 的运作流程; 然后介绍 GAIM 的各个功能模块。

2.1 GAIM 的运作流程

目前, GAIM 的运作目标是提供实时或近实时电离层特性和短期预报 (1h~1d)。一个数据同化周期内的主要任务包括: 1) 数据预处理和质量控制; 2) 数据同化, 包括计算电子密度场和其他电离层变量 (包括中性大气风场, $E \times B$ 的漂移等动力学参数); 3) 数据统计分析; 4) 预报下一个数据同化周期的初始场。

2.1.1 数据预处理

GAIM 的设计要求保证它的操作环境适用于各种类型的电离层观测数据。表 1 给出可供 GAIM 使用的电离层观测数据详细列表。所有这些观测数据, 首先都应该经过预处理和编辑, 尽可能地减少野值和降低噪声, 提高数据的质量。例如, 地面站接收到 GPS 卫星信号中的延迟量可以计算卫星和地面站之间的 TEC。在数据预处理阶段, 找出显著不正常的的数据并剔除, 实现数据质量控制。还需要进行不同仪器之间的校准、对数据进行定标以尽可能地消除系统偏差。在本文中, 假设所有提供的数据都已经过初步的数据处理和质控, 并给出数据相应的观测误差。

表 1 GAIM 可同化的数据类型

探测器类型	测 量	数据覆盖	以前 / 目前仪器 (计划)
电离层探空仪	底部剖面, NmF2, HmF2	局部	DISS, SHIN
地基 GPS 接收机	地面接收机到 GPS 卫星 TEC	局部 / 区域 / 全球	TENET, CORS
空基 GPS 接收机	从 LEO 到 GPS 的视线 TEC	区域 / 全球	GPS/MET, CHAMP, SAC/C, IOX, COSMIC
临边 EUV 观测	O ⁺ 和中性粒子密度剖面	卫星轨道平面	LORAAS, SSUSI
横向追踪 EUV 扫描	中性粒子和 O ⁺ 密度剖面和 积分	全球	GUVI, SSUSI
用于卫星实地测量的 各种探测器	实地电子密度、电场和极光、 粒子沉降	全球 (沿卫星轨道 实地观测)	SSIES, SSJ/4
无线电信标	从卫星到地面站的视线 TEC	区域	C/NOFS

每个同化到 GAIM 中的数据类型, 要给出模型变量 (例如电子密度) 到观测量空间的映射。在系统控制理论中, 这种映射被称为观测算子。例如, 从精确测定的 GPS 卫星和地面站

的位置, 就可建立 GPS 地面站采集的 TEC 数据的观测算子。数据预处理结束后, 每个 TEC 测量量则可表示为 (t_k, y_k, H_k) , 其中 t_k 是观测时间, y_k 是测量值, H_k 是观测算子。

2.1.2 数据同化周期和预报

虽然 GAIM 系统是连续不断地采集和处理观测数据, 但是数据的分析或同化则是在时间上以周期的形式运行。通常以几个小时为一个周期。这种数据同化过程非常适合估算地球电离层动力学参数。绝大多数电离层动力学参数直接影响离子密度的变化率。因此, 为了能够修正动力学参数, 必须利用充分长的时间周期来监测电离层的变化。如图 1 所示, 在每一个数据同化周期的开始时段, 电离层的状态是由前一周期的中间时刻通过正演计算得到。前一周期的下一半的采集数据在新周期内被再次使用, 同时加入新采集的观测数据。目前, 对间隔型电离层数据同化采用的是 4DVAR 同化技术。通过固定时间间隔内采集的数据 (例如 4 h), 进行电离层动力学参数以及数据同化周期初始时刻电离层状态的估计。这个过程使得模型预报值与测量值达到最佳匹配。数据同化周期中时间段的重叠使得动力学参数和电离层状态的估计趋于稳定。通过电离层的基本物理模型, 可以外推测量时间段之后的电离层状态, 产生 2h 电离层预报 (目前 GAIM 只考虑短期的预报)。采用 4DVAR 同化技术以后, 则可以考虑完全非线性的模型参数估计问题。递推估计技术是利用模型方程的线性化, 得到电离层参数的统计优化估计。该技术的递推特征不需要储存大量的观测数据。采用递推估计技术进行数据同化可以实现一边采集数据, 一边进行连续的数据分析, 该方法也因此被称为连续数据同化方法。

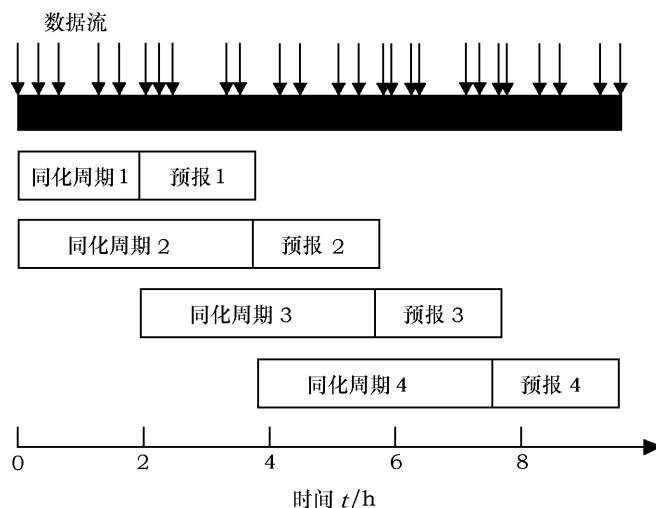


图 1 数据同化周期方案示意图

2.1.3 质量控制

自动化数据质量控制使用的主要工具是统计分析。递推估计方法 (如卡尔曼滤波) 明显依赖于观测误差和系统模型误差的概率假设。利用这些假设, 递推估计方法为模型变量改正的概率分布提供精确的预报。假设模型变量是不同空间分布的离子密度, 并且已知电离层模型和观测系统的统计概率, 就可以计算离子密度改正的期望值。通过改正统计量的监测, 可以检验统计假设的准确性。某些数据同化技术不能对物理模型和观测给出明确的统计假设, 绝大多数变分方法都属于这种类型。针对这些方法, 需要建立一个统计库, 得到模型改正的经验统

计特性。统计的意义在于：对大量样本的数据积累，必须以分段的形式进行统计分析。即使是连续数据同化技术，也依然存在数据同化的周期设定。数据同化周期的基本作用是统计、验证数据流，及时、合理地改正模型变量。

2.2 GAIM 的功能描述

以上介绍的是整个数据同化系统的处理流程或阶段。在数据同化的某些阶段使用了一些功能模块。例如，用电离层基本物理模型来调整电离层密度和动力学参数，使它们与观测量相匹配；同时也能用这些动力学模型进行电离层预报。从功能的角度，典型的电离层同化系统由以下几部分组成：电离层正演模型、动力学参数模型、数据预处理子系统、优化子系统和统计分析工具。图 2 说明了这些组件之间的关联。

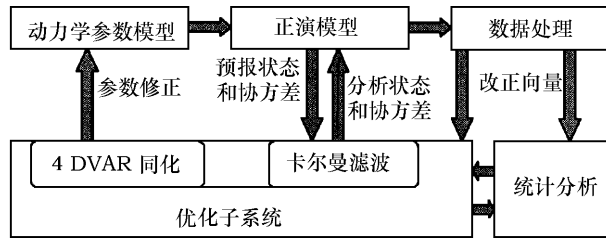


图 2 数据同化模型的主要组成部分

2.2.1 正演模型和动力学参数模型

基本数据同化模型的核心是正演模型^[9]。概括地说，正演过程是解等离子体的质量守恒方程和动力学方程；它们描述了 F 区内主要电离物质的产生、损耗、迁移的方程。很多电离层模型都普遍使用单一类型 O^+ 离子模型，而且不解能量守恒方程。利用模型线性带来的简化和快速计算方法，能有效地达到数据同化的目的。

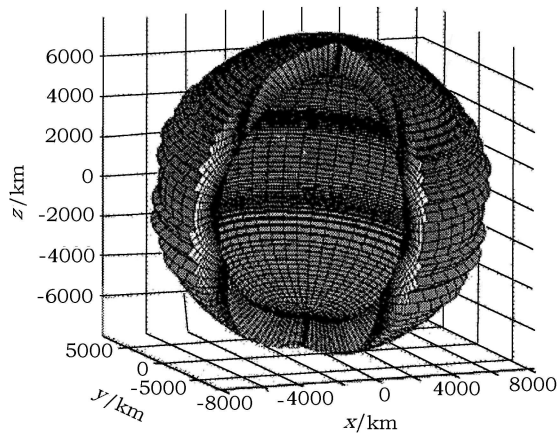


图 3 GAIM 的 3D 固定格点，欧拉坐标架是沿等地磁力线、等地磁势线和等地磁经度分割^[9]

USC/JPL 的 GAIM 中的电离层正演模型是一个全球的、随时间变化的三维模型；其中主要模型变量是离子密度。为了使计算简单化，GAIM 的目前版本仍然是单一 (O^+) 离子的电离层模型；在地固欧拉格点坐标架下求解质量守恒和动量守恒方程。坐标系选择如图 3 所示。一个轴平行于磁场，另外一个垂直磁力线。用有限元把电离层模型方程在变量空间上进行离散化和剖分。混合隐性和显性方法可以进行时间上的离散化。最后获得的正演模型是无条件稳定的，它保证电子密度是正确的。正演模型使用了一系列经验模型定义的动力学参数。因为电离层模型通常是与空间气候相关的，通过合理的参数化可以从空间气候背景中得到动力学参数的偏离。参数化的目的是，当计算动力学参数和它们的相关项时，减少优化向量的维数。例如，作为电离层动力学

的一个极为重要的参数, 电离层赤道等离子体垂直漂移 ($E \times B$ 漂移), 可以用磁场纬度的标量函数进行参数化。必须注意的是: 所有动力学参数的初始值, 以及模型的初始状态都是从气候模式中得到的。因此正演模型基本上是一个气候模型。但是, 应该指出采用了经验参数作为模式输入值, 能使求解方程变得简单, 但是不能保证方程组是闭合和自洽的, 从而成为模拟结果的主要误差来源。例如, 等离子体的漂移速度, 在模式中是固定的, 但是实际上它是随电子密度和温度变化而改变。采用完整的闭合方程组进行电离层模拟, 目前在理论和技术上还有一定的困难。

2.2.2 数据处理

数据处理子系统负责基本数据的预处理, 包括剔除野值和校准数据。该系统也产生一些辅助部分。它包括确定数据的采集时间、计算接收机与发射机的位置、以及计算每个数据采集点的观测算子等等。数据处理子系统的的功能是, 建立一个用于观测数据采集的精细模型。观测模型的作用是建立电离层变量 (例如电子和离子密度) 与探测仪器的输出量之间的连接。例如 L1 和 L2 频率的 GPS 测量的信号附加时间延迟, 它是地球电离层和中性大气层的折射而产生的。电离层观测模型建立了双频信号附加时间延迟与沿卫星和接收机之间视线上 TEC 的联系。一个好的观测模型必须能识别观测量和处理算法中可能存在的偏差和摄动; 然后执行校准步骤, 纠正已知偏差。最后, 观测模型还要赋予每个观测量适当的误差, 其中包括仪器误差、测量误差和未校准的系统误差等。由观测模型估计得到的测量值的误差水平将用于优化系统, 用来平衡不同模型变量的修正尺度。

2.2.3 优化子系统

正演模型利用最新的电离层状态和动力学参数, 计算下一时刻电离层状态; 然后用观测算子计算下一时刻预报观测数据; 获得真实观测数据以后, 将预报观测数据与它进行比较。它们之间的差被称为改正向量 (innovation vector)。优化子系统负责调整模型变量和动力学参数的值, 使由改正向量得到的预报观测更接实际观测。GAIM 目前正在考虑和设计的各种优化方案包括: 4DVAR 同化技术和递推估计技术 (例如卡尔曼滤波或广义卡尔曼滤波)。递推估计技术根据改正向量解算和预报四维时空电子密度场变化的最小统计估计, 但不能解算和修正动力学参数; 而 4DVAR 同化技术可以通过电离层动力学方程, 在修正电子密度场的同时得到动力学参数的最小方差估计。当然也可以考虑把这两种技术结合起来, 首先用卡尔曼滤波估算初始电子密度场; 再用 4DVAR 同化技术估算动力学参数, 并对下一个数据同化周期做出预报。通过改正向量的理论协方差矩阵与经验协方差矩阵的比较, 可以修正误差统计信息。根据正演模型以及改正量的置信区间和灵敏度之间的最终权衡, 优化子系统计算改正量。这种权衡的主导因素是各种误差的统计信息, 其中包括模型和观测误差。误差统计信息对模型变量和动力学参数向量更新的影响很大。一个错误的协方差会导致得到错误的解。

2.2.4 统计分析

下面, 转向讨论统计分析软件包以及应用于连续监测统计信息的准确性。由于电离层状态的真值, 例如电子密度和离子密度, 往往是不可能直接得到的; 统计分析软件包首先监测统计假设与改正向量观测统计的一致性。对于绝大多数的递推估计技术, 如果线性化是恰当的, 而且模型和观测的随机误差假设是无偏的, 就可以直接得到改正向量的协方差矩阵。改正向量的理论协方差矩阵和经验协方差矩阵之间的比较将对误差统计信息产生必要的修正。利用隐含统计 (观测量统计) 和经验统计的差异得到统计结论的关键是误差的正确建模。

正演模型、动力学参数模型、数据处理子系统的结合形成一个完整的电离层观测模拟系

统。一个可靠的模拟系统可以成为验证数据同化方法的非常有价值的工具。实际上，在一系列的观测系统模拟实验 (Observation System Simulation Experiment, OSSE) 中，这个模拟系统已经用于验证电离层数据同化算法的流程。该系统也可以用于评估从空间天气遥感探测获得的新的数据类型对精确空间天气全球监测和预报的潜在影响。

3 观测系统模拟实验

OSSE 是一个观测模拟实验，在模拟所研究的真实状态参数中适当地加入各种类型的噪声，然后进行同化，检验电离层数据类型和同化方法的效果。OSSE 采用 GPS 卫星和全球 GPS 接收网作为观测系统，采用 4DVAR 同化技术，同化模拟地基 GPS/TEC 观测数据，计算低纬地区的 $E \times B$ 漂移的天气变化^[9]。用地方时为自变量的多项式样条函数，把 $E \times B$ 气候漂移的扰动进行参数化。在模拟中，用漂移速度的扰动值产生模拟观测。电子密度和漂移速度的初始值从气候模型中获得。初步结果显示：4DVAR 变分同化技术能成功地估算出正确的扰动，并同时给出改进的电子密度计算值。图 4 显示的是赤道 $E \times B$ 漂移速度的计算例子。“气候”曲线表示由气候模型给出的、以地方时为自变量的漂移速度的先验值。“天气”曲线是相对于扰动的漂移速度，在 OSSE 中生成模拟的 TEC 观测数据。“估算”曲线则表示：GAIM 采用 4DVAR 同化技术同化模拟观测数据得到的漂移速度。从图 4 中可见“估算”曲线与“天气”曲线符合得相当好。结果还表明，仅使用地基 GPS/TEC 观测数据就可以估算赤道 $E \times B$ 漂移，改进电离层天气模型。关于 OSSE 的 4DVAR 同化的更详细的描述，请参见文献^[9]。

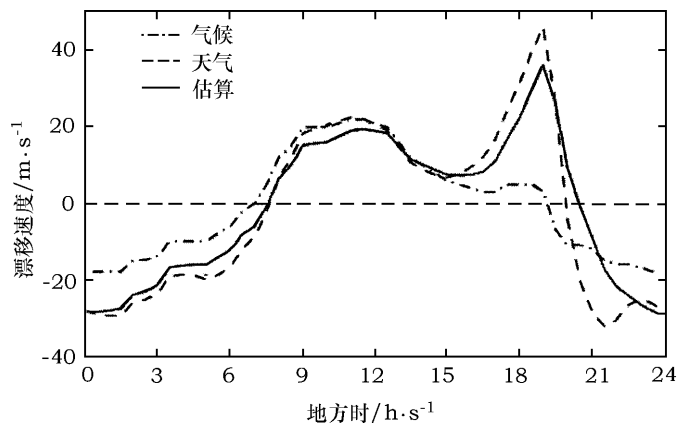


图 4 赤道 $E \times B$ 漂移速度的估算^[9]

4 GAIM 同化结果的验证

文献^[5]利用限带卡尔曼滤波技术，将 2002 年 3 月 22—24 日全球 98 个 GPS 地面站的 TEC 观测数据同化到 GAIM 系统；再将 GAIM 的同化分析结果分别与全球电离层图 (global ionospheric maps, GIM) 和 TOPEX 测量进行比较。GIM 是一种映射技术，它把电离层假设为 450 km 高度处的薄壳模型^[4]，二维的球面格点被固定在太阳磁坐标架上，将视向 TEC

测量值映射到天顶电离层的 VTEC。GIM 利用了平方根信息滤波 (square root information filter, SRIF) 技术, 来计算格点 VTEC。SRIF 相当于卡尔曼滤波, 但是用逆协方差的平方根改进矩阵条件数 (最大与最小特征值之间的比值), 因而有利于稳定计算值。GIM 不使用任何动力学模型, 完全取决于观测数据。在没有数据的区域, GIM 依赖于时间的连续性, 获得 VTEC 的解。双频海洋测高 (如 TOPEX) 测量可以得到卫星轨道以下的 VTEC^[10], 它可以作为一种独立的、有效的检验途径。图 5 表示 2002 年 3 月 22—24 日内所有 TOPEX

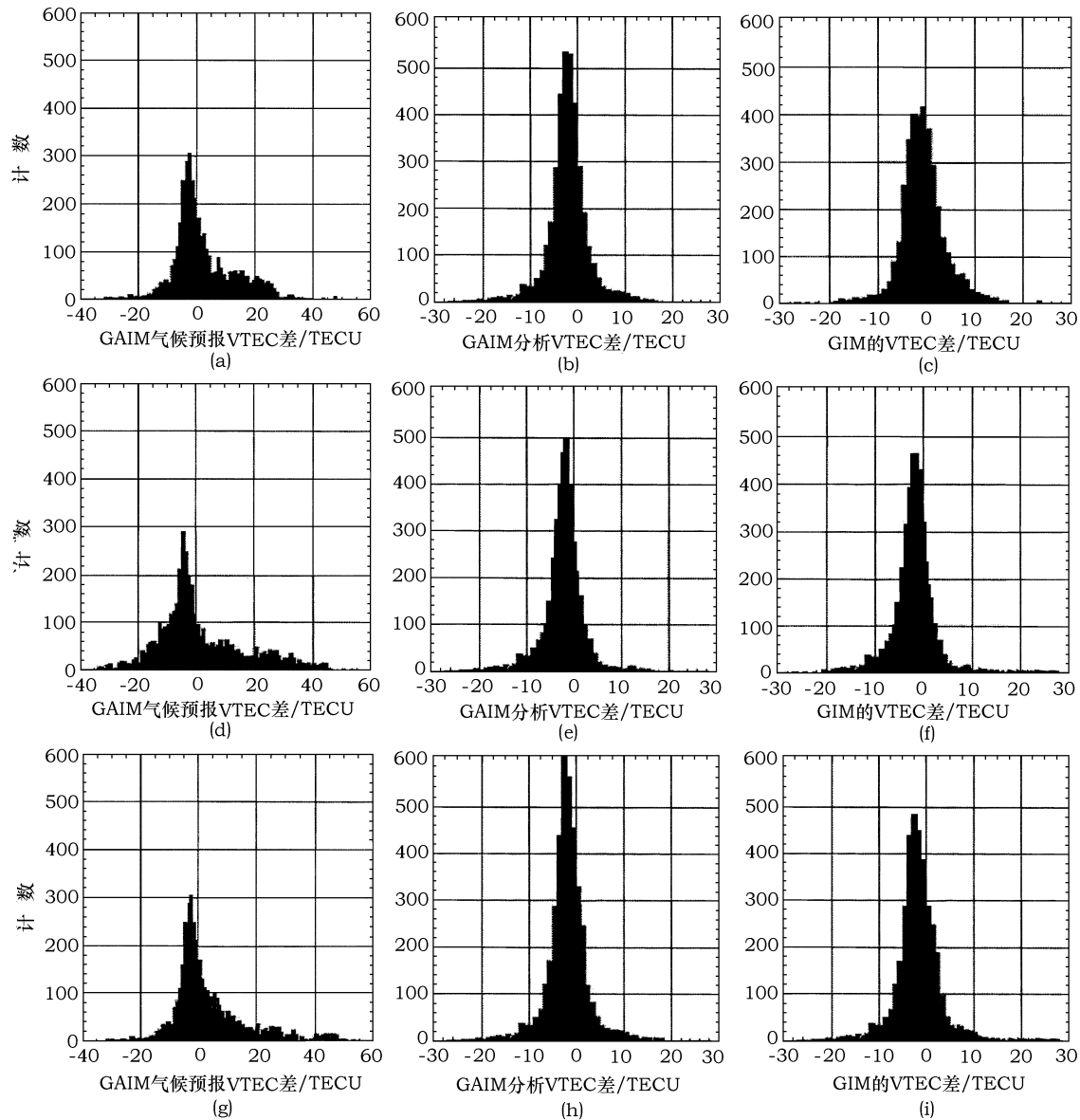


图 5 2002 年 3 月 22—24 日 TOPEX 获得的 VTEC 分别与 GAIM 气候、分析和 GIM 之间 VTEC 差的直方图^[5]

轨道获得的 VTEC 分别与 GAIM 气候预报 (图 (a)、(d)、(g))、GAIM 分析 (图 (b)、(e)、(h)) 和 GIM (图 (c)、(f)、(i)) 之间 VTEC 差的直方图。表 2 是直方图的统计。3 天 GAIM 分析与 TOPEX 之间 VTEC 的差的标准差 $\sigma_{\text{GAIM/A-TOPEX}} = 5.2 \text{ TECU}$ ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ e/m}^2$)，它明显好于 GAIM 气候 ($\sigma_{\text{GAIM/C-TOPEX}} = 13.8 \text{ TECU}$) 和 IRI 模型 (国际参考电离层模型) ($\sigma_{\text{IRI-TOPEX}} = 9.6 \text{ TECU}$)，稍微好于 GIM ($\sigma_{\text{GIM-TOPEX}} = 5.6 \text{ TECU}$)。相对于 TOPEX，GAIM 分析和 GIM 都偏小 1~2 TECU。由于 TOPEX 卫星是在 1 330 km 高度，而 GPS 卫星是在 20 000 km 高度，因此偏差是在 TOPEX 的误差估算以内。绝大多数地基 GPS/TEC 观测是在陆地上获得的，而 TOPEX 的 VTEC 仅在海洋上，远离 GPS 观测网的数据。但是，初步的检验结果显示 GAIM 的同化结果能显著地改进 IRI 模型结果和正演模型得到的气候分析结果。随着今后海洋上的电离层观测数据 (如 GPS 掩星观测) 加入到 GAIM 系统，期望能进一步改进同化结果。

表 2 2002 年 3 月 22—24 日，GAIM 气候 (GAIM/C)、GAIM 分析 (GAIM/A)、GIM 和 IRI 分别与 TOPEX 的 VTEC 差的统计

日期 (2002 年)	参 量	总数	平均值	标准差	最小值	最大值	TECU
							均方值
3 月 24 日	GAIM/A-TOPEX	3901	-1.3	4.4	-28.6	36	4.6
3 月 23 日	GAIM/A-TOPEX	4102	-1.7	6.1	-30.4	35.1	6.3
3 月 22 日	GAIM/A-TOPEX	3763	-2	4.9	-35	41.7	5.3
3 月 24 日	GIM-TOPEX	3901	-1	5.9	-36.7	36	6
3 月 23 日	GIM-TOPEX	4102	-1.2	5.7	-35	29.3	5.8
3 月 22 日	GIM-TOPEX	3763	-0.6	5.2	-30.7	28	5.2
3 月 24 日	GAIM/C-TOPEX	3901	6.4	14.2	-35	63.9	15.6
3 月 23 日	GAIM/C-TOPEX	4102	1.6	15.3	-45.5	55.8	15.4
3 月 22 日	GAIM/C-TOPEX	3763	2.3	10.8	-32	49.2	11
3 月 24 日	IRI-TOPEX	3901	3.3	8.8	-39.5	38.1	9.4
3 月 23 日	IRI-TOPEX	4102	2.2	11.1	-48.2	56.4	11.3
3 月 22 日	IRI-TOPEX	3763	0.8	8.3	-38.2	-32.5	8.3

5 犹他州大学 GAIM 模型

犹他州大学的 GAIM 模型是以一个以全球电离层和等离子层模型 (Ionosphere-Plasmasphere Model, IPM) [11] 和卡尔曼滤波技术为基础，同化各种实时或近实时的观测资料 [7]。目前模型包括 5 种离子： O_2^+ 、 N_2^+ 、 NO^+ 、 O^+ 、 H^+ ，覆盖中、低纬度。GAIM 完成之后，它将提供全球、区域或局部 ($25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$) 空间格点上的特性和预报。GAIM 最初的输出是一个从 90 km 到 35 000 km 连续分布的三维电子密度重构和电离层动力学参数 (中性大气风和密度、磁层和赤道上的电场和电子沉降模式)，同时也输出其他辅助参数，包括 F2 层和 E 层电子密度的峰值与相应的高度 $N_m F_2$ 、 $H_m F_2$ 、 $N_m E$ 、 $H_m E$ 、斜向 TEC 模型和垂直 TEC。

在它的规范模式中, GAIM 将为精确的电子密度重构给出高质量的分析结果。当加入新的模式、观测站和观测数据时, GAIM 也有模块结构, 使其可以方便地结合到数据同化方案中。整个系统涉及到模式结构、数据质量评估、数据同化、实时自动运行 GAIM 的可执行系统的设计和评定。

犹他州大学的 GAIM 是一个大的系统, 包括很多不同的算法。图 6 表示 GAIM 系统的结构图, 它包括 4 个步骤:

1) 从基本物理理论的电离层预报模型 (Ionospheric Forecast Model, IFM) [12] 中获取气候的电离层特性。IFM 目前由 Nebraska 的 Omaha 美国空军气候办公室 (Air Force Weather Agency, AFWA) 运作, IFM 所需要的电离层动力学参数由经验模型给出。IFM 的输入参数包括年、日、开始时间、运行时间、太阳活动指数 $F_{10.7}$ (通常值可取 158) 和从开始时间前 3 小时到运行结束时间段内的地磁指数 K_p 的变化 (宁静值为 2); 输出量是 90~1 600 km 的全球分布电子密度 N_e 的时间函数。

2) 从观测数据中选取适当的数据用于经验的动力学参数改正, 使动力学参数与测量值相匹配。再用经过改正的动力学参数运行 IPM, 获得新的全球分布的电子密度 N_e 。

3) 利用近似卡尔曼滤波技术, 将上一步从 IPM 得到的模拟结果和所有的获得的实时观测数据类型结合, 进行数据同化, 得到 90~35 000 km 连续的全球 N_e 分布重构。

4) 通过固定的全球输入模式, 正演 IPM 可以得到连续的预报。如果采用全球输入预报模式, 可以使模型预报更加准确。绝大多数输入模式在某种程度上与磁场活动变化 (K_p) 相关。已开发的 K_p 预报算法比固定的要好。 K_p 预报算法可以用于电场对流、粒子沉降和中性大气风模式预报。有了这些预报输入模式, 将能提供可靠的短期电离层预报。

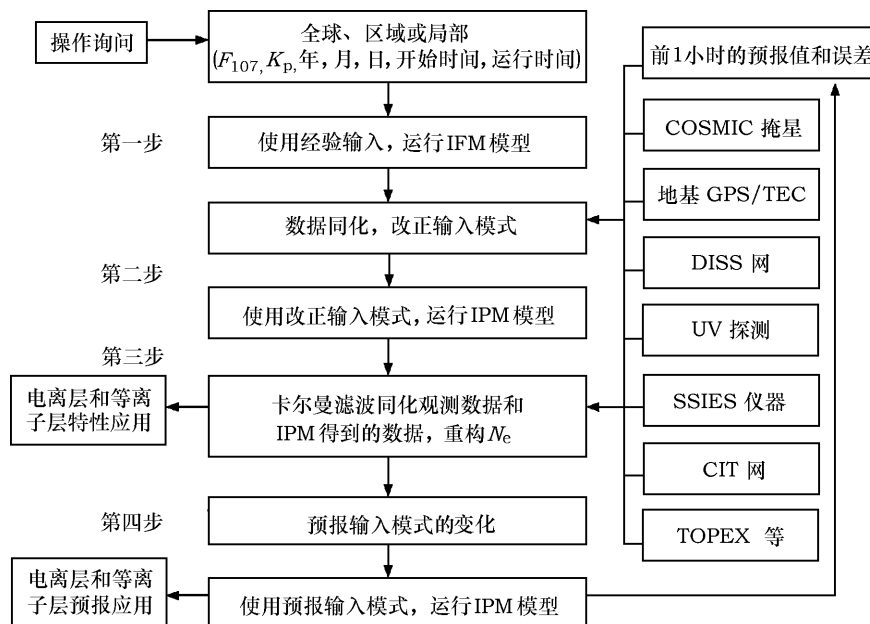


图 6 犹他州大学 GAIM 系统的结构图 [7]

GAIM 从 IFM、IPM 和卡尔曼滤波都获得了 N_e ，并提供给用户，但是，仅有卡尔曼滤波的结果是可以作为产品使用。每一个历元上这 3 个 N_e 值的比较可以提供电子密度重构过程的误差信息。这个信息是定量的，并不包含人为的密度梯度，可用于电离层预报。

GAIM 的输出网格是可变的，根据用户的需要，它可以是全球的、或区域的、或局部的。形式上，较小的输出网格有较好的空间分辨率，但这不是真实的。真实的分辨率由观测资料所决定。GAIM 具有同化大量新观测的功能，包括不同国家和地区的 GPS 接收机的斜向 TEC 观测。这样，对观测密度相对较高的某些国家或地区，电离层的重构就具有很高的分辨率。

GAIM 使用的 IFM 是基于物理模型的全球电离层数值模型。该模型计算 E 区高度上四种主要离子 (NO^+ , O_2^+ , N_2^+ , O^+)，F 区高度上两种主要离子 (O^+ , NO^+) 和两种次要离子 (O_2^+ , N_2^+)，E 和 F 区高度上离子和电子温度的四维结构。IFM 也在 F 层和电离层顶给出计算 H^+ 的简单约定。它的高度覆盖为 90~1 600 km，在 E 层的垂直分辨率为 4 km，F 层为 20 km。密度和温度的输出可以在地理坐标系或地磁坐标系，它们的纬度和经度分辨率分别为 3° 和 7.5° 。IFM 进行离子和电子的连续性方程、动量方程和能量方程的数值解。模型中考虑了如下物理过程：1) 由于密度和温度梯度、重力和两极电场产生的场列扩散 (field-aligned diffusion)；2) 由于磁层和动力电场的交叉场 (cross-field) 电动漂移；3) 紫外和远紫外太阳辐射、共振散射太阳辐射、星光和极光引起的离子产生率；4) 数值能量相关化学反应；5) 热层风；6) 中性成分的变化；7) 热导；8) 各种弹性和无弹性加热和冷却过程。IFM 也考虑了地磁和地理极的区别。

IPM 是为资料同化而设计的，它使用了分立的等离子流管。IPM 覆盖地磁纬度 $\text{N}60^\circ \sim \text{S}60^\circ$ 的区域，赤道上高度覆盖为 90~35 000 km。IPM 包括化学、辐射和传输过程，这与 IFM 类似；但是 IPM 自恰地包含了 H^+ 。在 E 区高度上，假设处于化学平衡， NO^+ 、 O_2^+ 、 N_2^+ 、 O^+ 的连续性方程在每一个格点上同时求解离子密度；在 F 区以及以上的高度上，使用一个混合 Euler-Lagrange 数值方案。 H^+ 和 O^+ 的连续性方程和动量方程是对每一个等离子流管，沿偶极磁力线求解，其中考虑了赤道电场和与中性大气的相互作用。

在 GAIM 的第二步中，利用观测资料改正动力学参数的主要思想是，有一些观测在确定某些动力学参数时作用明显。例如，在中纬度地区，经向中性风是物理模式电离层 / 等离子层模型的主要输入参数，因为 $h_m\text{F}_2$ 对经向风很敏感。总而言之，主要电离层动力学参数有：中性密度和风、磁层和赤道电场、极光沉降。如果有一些观测与这些参数相关，即可用于调整相应的动力学参数。概括地说，1) DMSF 卫星的电子沉降和等离子漂移的测量能分别用于调整^[13]和 Weimer 模型^[14]，这个过程能得到沉降和对流特性的时间变化^[15]；2) 数字式探测仪和其他与中性风相关的资料提供相应位置上中性风的特性，这些独立观测结合矢量球谐展开得到修正的全球风特性^[16]；3) 视向 UV 资料通过卡尔曼滤波同化到中性大气的模型中，得到全球中性分量的成分时变图 (O_2/N_2 的比率)^[17]；4) 白天磁力仪的测量和晚上的数字式探测仪可用于相应仪器位置赤道时变电场的测定^[18]，它们又可进一步用于调整赤道电场的 Scherliess 和 Fejer 经验模型^[19]。

6 小结和展望

GAIM 是一个与数值天气预报模型相当的全球电离层同化模型。它根据基本物理原理解释在带电粒子动力学约束下电离层离子和电子密度的时间和空间上的演化过程, 使用 4DVAR 同化技术和卡尔曼滤波方法同化各种类型的电离层观测数据。GAIM 仍然处于发展进程中。虽然系统的主要构件已经完成, 但是仍然需要在算法的精度和误差统计上做更细致的工作。未来的 GAIM 研究将包括 TEC 数据之外其他数据类型的同化、更广泛的统计比较和验证, 以及利用 4DVAR 和卡尔曼滤波之间信息的交流, 同时计算电子密度和一些电离层动力学参数。

电离层数据同化是一个崭新的课题。许多科学家和基金组织 (如美国国家科学基金会、美国国防部和美国宇航局) 已经意识到其重要意义。它可以满足导航、通讯和雷达等所需的精确电离层校正; 监测空间天气事件; 提高人们对太阳活动、磁暴和电离层之间耦合的物理过程的认识; 间接探测上层大气、磁和太阳活动。GAIM 的最初结果是振奋人心的, 继续深入发展将积累更多的经验。在下一个十年里, 随着电离层观测数量显著地增加, GAIM 模型将以前所未有的精确性和可靠性为改进全球电离层特性和预报提供有力的工具。

参考文献:

- [1] Hajj G A, Romans L J. *Radio Sci.*, 1998, 33(1): 175
- [2] Dymond K F, Budzien S A, Nicholas A C, et al. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106 (A12): 30315
- [3] Austin J R, Franke S J, Liu C H. *Radio Sci.*, 1988, 23(3): 299
- [4] Mannucci A, Wilson B, Yuan D, et al. *Radio Sci.*, 1998, 33(3): 565
- [5] Hajj G A, Wilson B D, Wang C, et al. *Radio Sci.*, 2004, 39: RS1S05
- [6] Wang C, Hajj G A, Pi X, et al. *Radio Sci.*, 2004, 39: RS1S06
- [7] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. *Radio Sci.*, 2004, 39: RS1S02
- [8] Scherliess L, Schunk R W, Sojka J J, et al. *Radio Sci.*, 2004, 39: RS1S04
- [9] Pi X, Wang C, Hajj G A, et al. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108: 1075
- [10] Jee G, Schunk R W, Scherliess L J. *Geophys. Res.*, 2004, 109: 301
- [11] Schunk R W. *Tech. Rep.*, Space Environ. Corp., Logan, Utah. 2002
- [12] Schunk R W, Sojka J J, Eccles J V. *Rep.* 1997, 98: 1
- [13] Hardy D A, Gussenhoven M S, Holeman E. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 4229-4248
- [14] Weimer D R. *J. Geophys. Res.*, 1995, 19: 595-608
- [15] Bekerat H A, Schunk R W, Scherliess L, Eccles V. Determination of ionospheric high-latitude drivers for GAIM using DMSP data, *Eos Trans. AGU*, 2001, 82(47): 958
- [16] Jee G R, Schunk W, Scherliess D L. *Eos. Trans. AGU*, 2001, 82(47): 961
- [17] Fuller-Rowell T, Minter C, Codrescu M. Data assimilation for neutral thermospheric species during geomagnetic storms, in *2002 Ionospheric Effects Symposium*, 2002: 239-247
- [18] Anderson D, Anghel A, Yumoto K, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(12): 1596
- [19] Scherliess L, Fejer B G. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 6829-6842

Progress in the Study on GAIM Assimilative Ionospheric Method

HUANG Cheng¹, GUO Peng¹, HONG Zhen-jie^{1,2}, YAN Hao-jian¹,
HU Xiao-gong¹, DING Jin-cai³, ZHANG Xun-xie⁴

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. School of Mathematics & Information Science, Wenzhou University, Wenzhou 325027, China; 3. Shanghai Central Weather Observatory, Shanghai 200030, China; 4. Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Ionosphere is a complex and dynamic space medium which is dominated by solar activity level, earth magnetic field factor etc. With the demand of the space technique development, the ionospheric weather change is now becoming a significant branch of the space weather forecast. Scientists have made much progress in ionosphere researches via the satellite technique in the past decade. Especially, the maturation and development of the global ground-based GPS observation networks and the spaceborne GPS radio occultation technique have provided abundant ionospheric measurements for study of the ionospheric dynamical model, which will become a foundation for the ionospheric forecast. Nowadays, the ionospheric weather forecast is becoming a prospective research aspect, and ionospheric data assimilation forms a main topic in the ionospheric weather forecast. This paper introduces the international trend of these aspects in detail. The main attention is paid to the Global Assimilative Ionospheric Model developed by a joint team of University of Southern California and Jet Propulsion Laboratory and that by Utah State University respectively, the progress in the study on the global ionospheric data assimilation, and the preliminary results in application of ionospheric weather forecast.

Key words: astrometry; ionosphere; review; data assimilation; 4DVAR; Kalman filter