

乐新安, 万卫星, 刘立波等. 基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层数值同化现报预报系统的构建—以中国及周边地区为例的观测系统模拟试验. 地球物理学报, 2010, 53(4):787~795, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.003

Yue X A, Wan W X, Liu L B, et al. Development of an ionospheric numerical assimilation nowcast and forecast system based on Gauss-Markov Kalman filter—An observation system simulation experiment taking example for China and its surrounding area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(4):787~795, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.003

# 基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层 数值同化现报预报系统的构建 ——以中国及周边地区为例的观测系统模拟试验

乐新安<sup>1,2</sup>, 万卫星<sup>1</sup>, 刘立波<sup>1</sup>, 宁百齐<sup>1</sup>, 赵必强<sup>1</sup>, 李国主<sup>1</sup>, 熊 波<sup>1</sup>

1 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

**摘 要** 本文给出了一个基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层数据同化系统的初步构建和试验结果. 我们选择中国及周边地区部分涉及电离层观测的台站(包括子午工程台站、中国地壳形变网和部分 IGS 台站)作为观测系统进行模拟试验, 背景场利用 IRI 模式, 观测值则由 NeQuick 模式计算得到. 我们的同化结果表明, 采用 Kalman 滤波算法, 把部分斜 TEC 同化到背景模式当中, 能够获得较好的同化结果, 说明我们设计的算法可行、所选择的各种参数比较合理, 采用 Gauss-Markov 假设进行短期预报也取得了较合理的结果. 本项研究经过进一步的改进和完善, 可以用来对中国地区的电离层进行现报和短期预报, 一方面满足相关空间工程应用, 另一方面可以提升现有观测系统的科学意义.

**关键词** 电离层, 数据同化, 卡尔曼滤波, 误差协方差

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.04.003

中图分类号 P352

收稿日期 2009-04-15, 2010-03-03 收修定稿

## Development of an ionospheric numerical assimilation nowcast and forecast system based on Gauss-Markov Kalman filter

—An observation system simulation experiment taking example for China and its surrounding area

YUE Xin-An<sup>1,2</sup>, WAN Wei-Xing<sup>1</sup>, LIU Li-Bo<sup>1</sup>, NING Bai-Qi<sup>1</sup>,  
ZHAO Bi-Qiang<sup>1</sup>, LI Guo-Zhu<sup>1</sup>, XIONG Bo<sup>1</sup>

1 Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 State Key Laboratory of Space Weather, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** In this paper, we constructed an ionospheric data assimilation system based on Gauss-Markov Kalman filter and gave some test results. We chose some ionosphere stations (including meridional project stations, China lithosphere deformation GPS network, part of IGS stations) in China and its surrounding area as observation system to do the simulation experiment. International Reference Ionosphere (IRI) is chosen to be the background model, while NeQuick model output is taken to be the observations. Our assimilation results show that it can get good estimation of ionosphere electron density by ingesting the observed slant TEC data into the model

by Kalman filter. It illustrates that our assimilation algorithm is feasible and the selected parameters are reasonable. We also obtained reasonable short time forecast results by Gauss-Markov assumption.

**Keywords** Ionosphere, Data assimilation, Kalman filter, Error covariance

## 1 引言

在整个日地空间环境中,电离层上连磁层、下接中层大气,并通过各种形式与这些层紧密地耦合在一起。剧烈的太阳活动爆发如耀斑、日冕物质抛射和地震、台风、核爆炸及灾难性天气激发的大气声重波等都会造成电离层的扰动,所以电离层堪称空间天气的显示屏,电离层天气是空间天气的重要组成部分。同时电离层还是人类空间活动的主要区域,其间所发生的各种过程,特别是能量、动量和质量的传输与剧烈扰动过程,将会对日益增多的空间飞行体本身及其与地面之间的通讯信道产生直接影响,并可能对人类的经济、军事活动及日常生活产生重要作用。随着人类空间活动的增多,为了满足相关领域日益增长的对电离层进行监测和预报的需求,一种在气象上已经运用成熟、但空间物理领域尚未使用的技术手段——数据同化技术,被人们引用到电离层研究和预报领域,并成为 21 世纪电离层研究的热点<sup>[1~5]</sup>。

数据同化简单来说就是一种把各种时空上不规则的零散分布的观测融合到基于物理规律的模式当中的方法。它把观测和模式所带来的两种不同但又“互补”的信息融合在一起,从而给我们产生一幅既逼近真实状态的又包括内在物理过程的四维的“运动的物理图像”。一般来说,同化必须要有效地利用各种有用的信息,而有用的信息包括三部分。(1)值,包括背景值和观测值。观测值包含随机扰动的值,不是准确值,既有观测误差,又有代表性误差。正因为不是精确的,所以我们才用各种理论去尽可能估计其真值;(2)不确定性。既然值是有误差的,那么误差本身也是个有用的信息。同化中如何考虑误差,本身也是个很热门的问题;(3)协方差。其实就是相关性。因为各种值既有物理的相关(就是物理规律)又有空间的相关,这些相关性本身也是有用的信息<sup>[1, 6]</sup>。

近年来,电离层数据同化得到了蓬勃的发展,归结起来有以下一些原因和前提条件:(1)随着人类空间活动的日益频繁,人们对空间天气的现报和预报

有了更高的要求,这中间就包括电离层天气。提高现报和预报的一个有效途径就是数据同化方法<sup>[7]</sup>。(2)最近十年来,电离层观测日益增多,并且随着计算机互联网技术的快速发展,这些数据的获取和共享变得异常便捷。(3)在过去的几十年里,已经有了相当多的成熟的电离层理论和经验模型。这为数据同化奠定了良好的基础。(4)数据同化方法在气象学和海洋学上已经取得了巨大的成功,积累了很多经验和成熟的同化算法如变分法、Kalman 滤波法等,电离层数据同化可以直接借鉴这些经验和方法<sup>[1]</sup>。

电离层数据同化最早可以追溯到 Richmond 和 Kamide 建立的电离层电动力学同化成像算法(Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics, AMIE)<sup>[8]</sup>。AMIE 基于最优估计理论,利用多手段多参量观测,包括地面磁力计观测的磁场和磁扰、卫星和雷达观测的电场和电流等,结合一定的经验模型,给出高纬电场、电流和磁扰的最佳估计值。在早期的电离层成像研究中,很多学者基于经验模式和观测值,利用一定的估计方法如最优估计理论、变分法、Kalman 滤波等,给出电子密度的三维分布,这也是数据同化的范畴<sup>[5, 9, 10]</sup>。近年来电离层数据同化模型发展最完善的要数美国喷气动力实验室—南加州大学全球同化电离层模式(the Jet Propulsion Laboratory/University of Southern California Global Assimilative Ionospheric Model, JPL/USC GAIM)和美国犹他州立大学全球电离层观测同化模式(the Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements, USU GAIM)<sup>[3, 4]</sup>。JPL/USC GAIM 是由美国喷气动力实验室和南加州大学共同开发的,利用的理论模型是在 SUPIM 的基础上发展的,只考虑了  $O^+$  的连续性方程和动量方程,但是忽略动量方程中的惯性项和时间变化项。剩下的背景参数如中性浓度、速度、太阳辐射和电场漂移等都是利用相应的经验模式获得。同化的方法有 Kalman 滤波和四维变分两种,利用 Kalman 滤波是为了给出电子浓度剖面的最优估计值,利用四维变分则同时估算模式的外驱动参量如中性风、电场漂移速度,便于更好地向前预报。该模式可以同化包括测高仪、GPS、卫星观测等多种数据源。经过

与独立的观测源进行比较验证,该数据同化模式能显著地提高模拟的精度,尤其是在缺少数据的海洋地区<sup>[3, 11]</sup>. USU GAIM 的背景模式是他们自己开发的一个全球理论模式——Ionosphere Forecast Model (IFM), IFM 自洽求解等离子体连续性、动量和能量方程,可以输出的高度范围为 90~1600 km<sup>[4]</sup>. 目前见到的该同化模式有两个版本,一个是 Gauss-Markov Kalman 滤波同化模式,另一个是简化状态 Kalman 滤波同化模式,这些模式也通过跟独立的观测数据作比较进行了有效性验证<sup>[12]</sup>. 关于这些同化模式的详细介绍可以参见相应的介绍文献<sup>[13]</sup>和 Bust 和 Mitchell 最近所作的综述<sup>[14]</sup>.

本文中,我们以中国及其周边地区的观测系统为例,构建了一个基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层数值同化现报预报系统. 尽管国际上已经有不少类似的研究成果,我们认为进行本项工作还是有很大的必要性,有以下一些原因:(1)电离层数据同化是一个应用研究,技术性强,但同时也需要很深的基础研究功底,因此别人的成果很难直接拿来应用.(2)电离层有很强的地域特性,因此构建适合中国地域特色的现报预报系统很有必要.(3)近年来,我国的电离层观测不断完善,如子午工程中的测高仪、非相干雷达、GPS 观测,中国地壳形变网的 GPS 观测等,充分利用这些观测,对中国上空的电子浓度进行很好的现报和预报,可以充分发挥这些观测数据的作用,提升这些观测系统的科学意义.(4)我们曾经利用中国科学院地质与地球物理研究所所属的分布在 120°E 上的 4 个 GPS 观测站,基于统计本征模的方法建立了中国地区的 TEC 现报和预报系统<sup>[15]</sup>,本研究可以看作是该研究的继续和升级.

## 2 网格划分、观测系统和背景模式介绍

如果做全球的同化系统,必然面临着超大矩阵的存储、转置、求逆等运算,对单个 PC 机而言很难完成,这里为了试验研究方便,我们选择中国及周边地区来构建同化系统. 网格划分时假设地球是圆形的. 表 1 中给出了经纬度和高度范围及间隔,其中高度间隔不是固定的,在底部较小,而在顶部电离层较大. 该网格覆盖了除部分南中国海外的所有中国领域. 图 1 给出了网格划分的示意图,这里是示意图,所以比真实的间隔要大,在数据同化中,我们假定同一个网格内的电子浓度是相等的.

表 1 网格划分的范围和间隔

Table 1 Range and interval of grid division

参数	经度(°E)	纬度(°N)	高度(km)
范围	60~140	0~60	60~1000
间隔	5	3	20~100

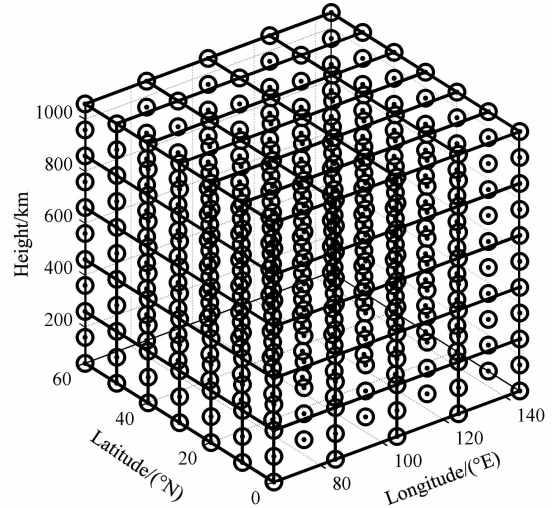


图 1 网格划分示意图

Fig. 1 Sketch map of grid division

本文进行的是观测系统模拟试验 (Observation System Simulation Experiment, OSSE), 观测系统模拟试验是指选择一些特定的观测系统, 对应的观测值由模式计算结果加上一定形态的扰动得到, 然后再把这些“观测值”同化到模式里面的一种试验, OSSE 可以检验同化方法的有效性, 可以检验观测系统的有效性, 是一种常用的试验手段<sup>[16]</sup>. 图 2 给出了本文可供选择的观测系统, 包括: 子午工程中的

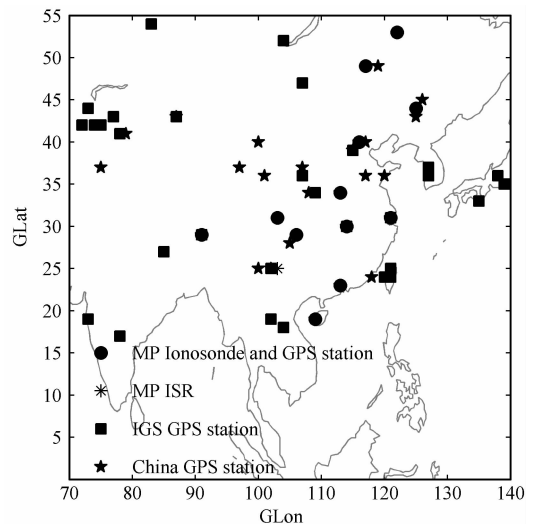


图 2 本文选择的观测系统示意图

Fig. 2 Sketch map of selected observational system

测高仪和 GPS 台站 12 个、子午工程中的非相干雷达台站 1 个、中国地壳形变网 GPS 台站 26 个、国际 GPS 服务中心 (IGS) 在中国及周边地区 GPS 台站 30 个, 其中这些不同的观测系统有部分台站是重合的。

本文的观测构型我们选取上述观测系统中所有 GPS 台站在 2 h 之内观测的 GPS 射线, 一般 GPS 接收机的采样间隔是 30 s, 对一条观测链路来说, 在

30 s 钟里运动的非常小, 对应同化系统的网格基本没有变化, 经过我们比较和计算, 取半个小时的观测间隔就可以了, 这样还可以极大地节省存储空间和减小计算量. 图 3 给出了我们选择的 GPS 接收机观测的射线的穿透点 (450 km 高度) 在 2 h 内的运动轨迹, 仰角的下限是  $5^\circ$ . 可以看到观测射线基本覆盖了我们选择的同化区域. 图 4 给出了这些观测射线在网格点中的分布.

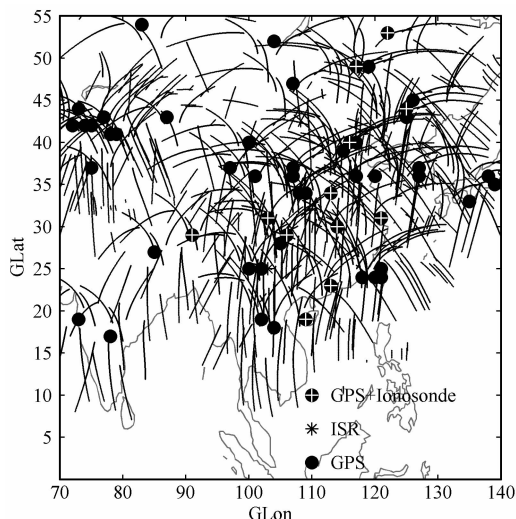


图 3 选取的观测 GPS 射线在穿透点高度 (450 km) 的轨迹 (2 小时)

Fig. 3 Track of selected GPS rays in the pierce point (450 km) during two hours

本文中, 背景场我们利用国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 提供. IRI 是一个目前被广泛使用和认可的国际参考电离层模型. 它是基于大量的地面和卫星观测的电离层参量拟合而成的一个经验模式. 它可以输出离子电子的浓度和温度随高度和太阳地磁活动的变化. 国际空间科学协会和无线电联盟都把它作为标准电离层模型. 国际上有一个由不同国家和地区的人组成的 IRI 工作组负责它的更新和相关的讨论研究. 目前它还处在发展和完善当中<sup>[17]</sup>. 观测值我们采用 NeQuick 模式计算得到, NeQuick 模型是由国际理论物理中心和奥地利格拉茨大学联合开发的一个经验电子浓度模型, 它基于 CCIR 电离层特性参量模型, 利用 Epstein 函数表征浓度剖面. 我们这里使用的是 NeQuick-ITUR, 它是国际电讯联盟 (ITU) 推荐给公众使用的版本<sup>[18]</sup>. 为了更好地体现同化效果, 使用 IRI 模式时我们采用 URSI 系数,  $F_{107}$  取 140, NeQuick 采用 CCIR 系数,  $F_{107}$  取 180, 计算的斜 TEC 加上一定的正态分布的扰动作为观测值. 两者

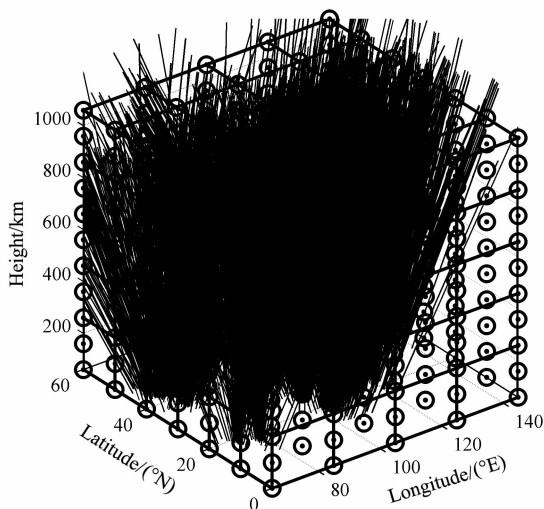


图 4 选取的观测射线在网格点中的分布

Fig. 4 Distribution of selected observation rays in the grid

$F_{107}$  取值有差别是为了更好地测试同化的效果.

### 3 数据同化方法介绍

数据同化发展到今天, 从最初的线性插值或多项式插值以及逐步订正法等发展到今天的最优插值、三维变分、四维变分以及众多的 Kalman 滤波方法, 已经走过了几十年的历程. 就其理论基础而言, 主要分为两类: 一类是基于统计学的估计理论, 如最优插值、Kalman 滤波、Kalman 光滑、集合 Kalman 滤波等. 另外一类是基于变分理论的方法. 其中 Kalman 滤波法由于不需要编写复杂的伴随模式, 概念简单, 容易实现, 同时能够显式地向前传递误差协方差, 给出时空统计最优解, 而受到人们的青睐. 卡尔曼滤波是匈牙利数学家 R. R. Kalman 在 1960 年提出的一种线性滤波和预测的新算法, 它通过递归算法高效地处理离散数据线性滤波问题<sup>[19]</sup>. 它的基本滤波公式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t^a &= \mathbf{x}_t^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_t^b), \\ \mathbf{K} &= \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}, \\ \mathbf{P}_t^a &= \mathbf{P}_t^b - \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_t^b, \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式中  $\mathbf{x}^b$  是背景场;  $\mathbf{y}$  是观测向量;  $\mathbf{H}$  是观测算子,使得模式向量向观测向量转换;  $\mathbf{P}^b$  是背景误差协方差矩阵;  $\mathbf{R}$  是观测误差协方差矩阵. 简单地讲,即分析后的模式态  $\mathbf{x}^a$  是通过背景场  $\mathbf{x}^b$  和观测增长(观测场与背景场的差异)  $\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^b$  之间的加权平均来估计的,权重是矩阵  $\mathbf{K}$ . 矩阵  $\mathbf{K}$  被称作为增益矩阵,它起到用观测增长在相对附近的模式格点上来调整背景场的作用. 一般而言,离观测点越近的模式格点要比远离观测点的模式格点受到观测值的影响(修正)要大. 给出了  $\mathbf{P}^b$ 、 $\mathbf{R}$  和观测点的信息(暗含在  $\mathbf{H}$  内),就可以求出分析误差协方差矩阵  $\mathbf{P}^a$ .

本文中背景模式是采用的经验模式,不具备向前预报的功能,我们采用人们常用的 Gauss-Markov 卡尔曼滤波来提供短期预报,它假设观测对背景场的修正随着时间的变化指数衰减,跟利用理论模式作背景场提供预报比较,这种处理更简单方便,有时甚至能获得更准确的短期预报效果<sup>[12]</sup>. 用公式表示就是:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{t+1}^a &= \mathbf{x}_{t+1}^b + \mathbf{L}\mathbf{K}(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_t^b), \\ \mathbf{L}_{i,j} &= \begin{cases} \exp(-\Delta T/\tau), & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{L}$  是一个对角矩阵,它表示在没有观测数据的情况下,随着时间的推移,先前观测对同化结果的影响指数的衰减. 其中  $\Delta T$  表示时间步长,  $\tau$  表示电离层的时间相关尺度,这里根据前人结果取  $5 \text{ h}$ <sup>[12]</sup>.

在数据同化中,准确地对背景场和观测值的误差及协方差进行描述直接决定着同化效果的好坏. 本文中我们结合我们以前的研究结果,对观测值不考虑协方差,误差跟观测的平方成正比(比例系数为 0.01);背景场的误差也跟背景值的平方成正比,因为我们更倾向于相信观测值,所以背景场的这个误差比例系数比观测值要大(比例系数为 0.1),背景场协方差采用简单的高斯模型,即背景场的相关性随着距离的增大指数衰减<sup>[5]</sup>. 本文中相关距离取为 100 km,即当两点的距离是 100 km 时,它们之间的相关系数下降到  $e^{-1}$ . 计算时取年积日为 180(北半球的夏季),世界时等于 5,对应  $120^\circ\text{E}$  的下午时段. 背景场和观测误差协方差用公式表示为

$$\begin{aligned} P_{ij} &= 0.1 \mathbf{X}_i^b \mathbf{X}_j^b e^{-d_{ij}/100}, \\ R_{ij} &= 0.01 \mathbf{y}^2 \delta_{ij}, \end{aligned} \quad (3)$$

$d_{ij}$  表示背景场两个点之间的距离. 本文中观测算子  $\mathbf{H}$  就等于 GPS 射线穿过每个网格点的长度.  $\mathbf{H}$  乘以背景场的电子浓度即等于该 GPS 射线的 TEC.

## 4 同化结果

图 5 给出了同化前、后观测路径上斜 TEC 跟观测(这里由 NeQuick 计算得到)结果差别的统计直方图,这里总共的样本(射线数)是 3100. 在没有同化前,背景值(由 IRI 计算得到)跟观测值相比显著偏小,这与我们太阳活动参数的取值有关. 当我们把这些观测 TEC 同化到背景场后,得到的结果跟观测的差别减小了很多,且呈正态分布,说明同化的结果是有效的.

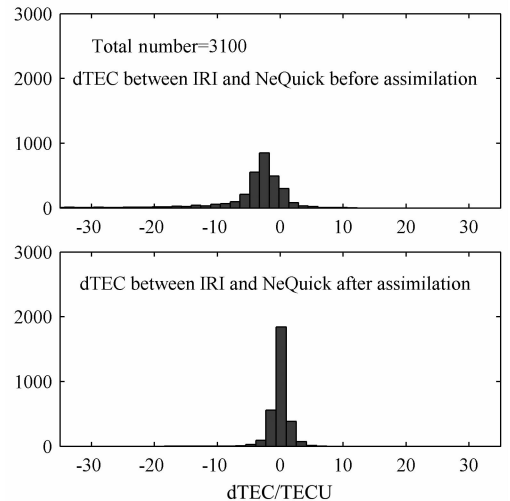


图 5 同化前、后观测路径 TEC 跟观测值的误差统计  
Fig. 5 Error statistics between background TEC and observed TEC before (up panel) and after (bottom panel) assimilation

图 6 给出了同化前、后网格点电子浓度跟观测值的相对误差的统计直方图. 可以看出,同化后背景场比观测值偏小的状况得到了明显改善,这说明把部分积分电子浓度同化到背景场中,可以对背景场的值进行有效的改善,达到了同化的效果.

为了进一步验证同化的效果,我们选取观测系统中 12 个测高仪台站的电子浓度剖面进行了对比,图 7 给出了对比结果,其中实线是背景值,虚线是观测值,点划线是同化结果. 可以看到大部分情况下同化结果都是介于观测值与背景场之间,利用独立数据源验证结果也表明了同化结果的有效性.

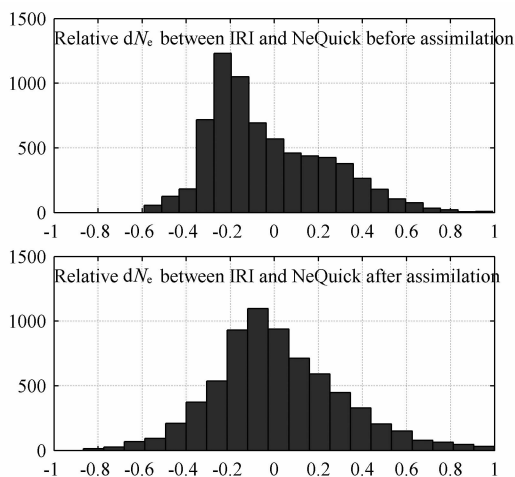


图 6 同化前、后网格点电子浓度跟观测值的相对误差的统计  
 Fig. 6 Error statistics between background and observed grid electron density before (up panel) and after (bottom panel) assimilation

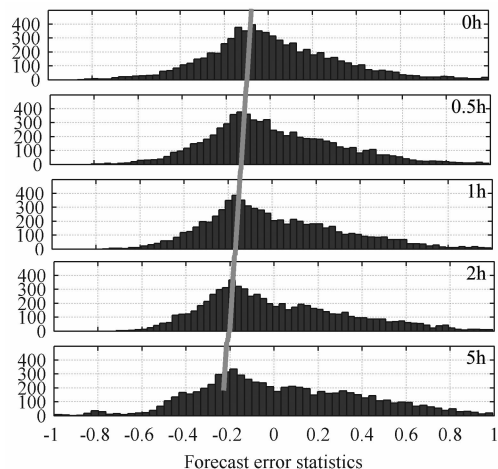


图 8 网格点电子浓度预报结果与观测结果相对误差的统计图,这里给出了 5 个时段的情况  
 Fig. 8 Statistical results of relative deviation between forecasted and observed grid electron densities for 5 selected times

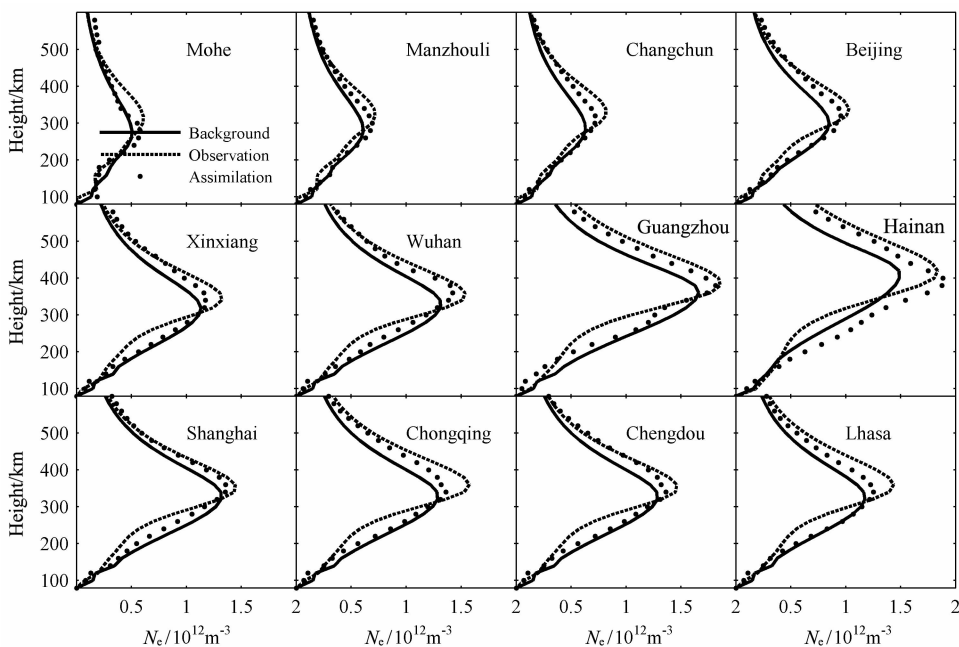


图 7 在 12 个测高仪台站的同化结果对比  
 Fig. 7 Assimilation results comparison in 12 ionosonde stations

### 5 预报结果

本文利用公式(2)所示的方法进行了简单的短期预报尝试,前向预报时间分别取 0.5、1、2、5 h,网格点预报结果跟观测结果相对误差的统计图在图 8 中给出.可以看到,随着预报时间的增长,预报误差也逐渐地变大,预报结果逐渐地偏离观测值而向背

景值靠拢.在短期预报中,如 1~2 h,还是有很好的效果.

### 6 讨论

#### 6.1 超大矩阵的存储、求逆运算等问题

在本文的研究中,背景网格点是 7350 个,同化射线数是 3100,因此  $P$  的维数是  $7350 \times 7350$ , $R$  的

维数是  $3100 \times 3100$ ,  $\mathbf{H}$  的维数是  $3100 \times 7350$ , 在同化过程中, 最大的计算量就是涉及这些矩阵的存储、转置、求逆、相乘等运算. 在我们这次试验研究中, 使用的是一般的双核(2 G 内存、2 G CPU)计算机, 在不进行任何简化和优化措施的情况下, 基本能满足计算. 但是在实际应用中, 观测数量远远比这个多, 为了获得更加精确的现报预报结果, 网格点的划分也要更加精细, 这种情况下, 计算量就会大大地增加, 除了采用更加高性能的计算机或者工作站来完成计算外, 有很多技巧可以帮助我们减少计算量.

同化中矩阵的存储主要是指  $\mathbf{P}$  和  $\mathbf{R}$  的存储, 因为它们要随着时间的推移而演化. 一般来说都不用考虑观测数据之间的误差相关性, 因此  $\mathbf{R}$  是巨大的稀疏矩阵, 可以采用稀疏矩阵的方式进行存储. 有时为了存储方便, 很多研究者甚至对  $\mathbf{P}$  采用人为截断的方式, 即当两点相隔一定的距离之后, 不考虑它们之间的相关性, 这样也可以采取稀疏矩阵的方式来存储  $\mathbf{P}$ , 大大节约了存储空间和提高了计算速度<sup>[20]</sup>. 在实际同化时, 最大的计算量莫过于公式(1)中涉及到的矩阵的求逆运算, 一般都要尽量避免, 最近在卡尔曼滤波同化中, 为了减少计算量, 很多人采用 SVD 分解的办法来求逆, 取得不错的效果<sup>[21]</sup>.

## 6.2 误差协方差的取法

数据同化结果可以简单地认为是观测值和背景场关于相应误差的加权平均, 因此误差的取法是否合适直接决定了同化结果的好坏. 一般来说我们不考虑观测数据之间的误差相关性, 即不考虑观测协方差, 观测误差一般包括仪器误差、代表性误差等, 观测误差的获取方式包括理论推算、通过观测统计等, 仪器误差还可以参考仪器制造商给出的误差<sup>[2]</sup>. 背景场误差一般包括模式误差、截断误差、计算误差等, 可以利用模式模拟结果进行统计得到<sup>[12]</sup>. 由于我们一般认为观测场的误差是不相关的, 这就意味着, 相关性这一有用的信息将唯一地由背景场的误差协方差来提供, 因此背景场的协方差的处理非常重要. 关于电离层的相关性, 目前并没有很好的结论, 前人一般都是假设电离层的空间相关性满足高斯分布, 即两点之间的相关性随着距离的增加指数的衰减, 但是衰减的快慢(即相关距离)并没有很好的结论<sup>[5, 22]</sup>. 我们曾经利用 GPS 观测统计分析了电离层的空间相关性, 发现电离层的相关尺度在不同的方向(经纬度和高度方向)有显著的不同, 且有明显的纬度、高度、太阳活动、季节、地方时变化<sup>[23]</sup>. 因此利用实际观测数据全面地统计分析电离层的空间

相关性, 建立相应的经验模式, 对电离层数据同化是非常必要的.

## 6.3 短期预报问题

对气象同化而言, 更多的是一个初值问题, 即同化结果为理论模式提供一个初始值, 继而利用理论模式向前预报, 这与气象模式的特点和成熟度有关. 在电离层领域, 电离层通过各种光化学、动力学过程与上下圈层紧密地耦合在一起, 同时还受背景中性大气的调制, 因此很多因素都对电离层的状态有控制作用, 主要包括中性大气浓度、温度和运动速度, 低纬和高纬地区的电场、极区的粒子沉降和对流电场等. 但是在实际模拟中, 我们很难实时获得这些因素, 一般只能通过经验模式计算得到, 而经验模式的结果与实际有一定的差距, 因此电离层理论模式对初始值并不敏感, 单纯的更新初始值来进行短期预报显然不可行, 为了提高短期预报能力, 我们还需要同时估算这些电离层的主要驱动参量, 如中性浓度、中性风、电场漂移速度等. 如 JPL/USC GAIM 同时利用最小二乘法估算电离层外驱动参量, 进而提高预报能力. 我们先前的研究结果也证明了这种思路的可行性<sup>[11, 16]</sup>. 另外一种提高短期预报能力较多的方法就是本文所采用的 Gauss-Markov 卡尔曼滤波, 假设观测的影响随着时间指数衰减, 对背景场是经验模式的情况, 这种方法比较合适, 如 IDA3D 数据同化模式, 有的背景场是理论模式的情况也采用这种短期预报方法, 如 USU GAIM<sup>[5, 12]</sup>.

利用 Gauss-Markov 卡尔曼滤波进行短期预报时, 一个关键的参数就是时间相关尺度的大小, 它衡量了前面观测对后面结果影响随时间衰减的快慢, 本文取 5 h 是参照了 USU GAIM 的取法<sup>[12]</sup>. 根据 Jee 等人的研究结果, 这个参数还有一定的纬度、高度和地方时变化, 因此关于这个参数还需要进行细致的模拟研究<sup>[24]</sup>.

## 6.4 应用到实际观测时要注意的问题

本文给的是观测系统模拟试验, 尽管取的是实际的观测构型, 但是观测值还是由模式计算得到的. 如果应用在实际观测中, 要注意: 首先对观测数据进行质量控制, 去除掉那些明显是错误的观测; 实际观测复杂多样, 需要对不同的观测数据分别构建相应的观测算符和合理的误差表述; 对使用最多的 GPS-TEC 数据来说, 实际应用中从观测数据文件解算出来的斜 TEC 含有卫星误差和接收机误差, 为了同化的方便, 我们可以假定短时间内这二者的误差是固定的, 把一个接收机对一个卫星连续观测的差同化

到模式中,以牺牲观测点数目来达到避免求误差的目的。

## 7 结论和展望

本文给出了一个基于 Gauss-Markov 卡尔曼滤波的电离层数据同化系统的初步构建和试验结果。我们选择中国及周边地区的部分涉及电离层观测的台站作为观测系统进行模拟试验,背景场利用 IRI 模式,观测值则由 NeQuick 模式计算得到。我们的同化结果表明,采用 Kalman 滤波算法,把部分斜 TEC 同化到背景模式当中,能够获得较好的同化结果,说明我们设计的算法可行、所选择的各种参数比较合理,采用 Gauss-Markov 过程进行短期预报也取得了较合理的结果。本项研究经过进一步的改进和完善,可以用来对中国地区的电离层进行现报和短期预报,一方面满足相关空间工程应用,另一方面可以提升现有观测系统的科学意义。

接下来的研究中,要进一步优化算法,测试同化系统的有效性,同时要选择真实的观测数据进行试验。另外还要采用理论模式作为背景模式,测试同化的效果,这部分工作正在进行中。

## 参考文献(References)

- [1] 乐新安. 中低纬电离层模拟与数据同化研究[博士论文]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所, 2008  
Yue X A. Modeling and data assimilation of mid- and low-latitude ionosphere [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2008
- [2] Yue X, Wan W, Liu L, et al. Data assimilation of incoherent scatter radar observation into a one-dimensional midlatitude ionospheric model by applying ensemble Kalman filter. *Radio Sci.*, 2007, **42**: RS6006, doi:10.1029/2007RS003631
- [3] Wang C, Hajj G, Pi X, et al. Development of the global assimilative ionospheric model. *Radio Sci.*, 2004, **39**: RS1S06, doi:10.1029/2002RS002854
- [4] Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J, et al. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM). *Radio Sci.*, 2004, **39**: RS1S02, doi:10.1029/2002RS002794
- [5] Bust G S, Garner T W, Gaussiran II T L. Ionospheric Data Assimilation Three-Dimensional (IDA3D): A global, multisensor, electron density specification algorithm. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: A11312, doi: 10.1029/2003JA010234
- [6] 王跃山. 数据同化——它的缘起、含义和主要方法. 海洋预报, 1999, **16**(1): 11~20  
Wang Y S. Data assimilation — Its cause, its meaning and
- main procedures. *Marine Forecasts* (in Chinese), 1999, **16**(1):11~20
- [7] 郭兼善, 尚社平, 张满莲等. 空间天气探测数据的同化处理. 中国科学 A, 2000, **30**(s1): 115~118  
Guo J S, Shang S P, Zhang M L, et al. Assimilation processing of space weather observed data. *Science in China (Series A)* (in Chinese), 2000, **30**(s1): 115~118
- [8] Richmond A D, Kamide Y. Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: technique. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**: 5741~5759
- [9] Howe B M, Runciman K, Secan J A. Tomography of the ionosphere: four-dimensional simulations. *Radio Sci.*, 1998, **33**(1):109~128
- [10] 徐继生, 邹玉华, 马淑英. GPS 地面台网和掩星观测结合的时变三维电离层层析. 地球物理学报, 2005, **48**(4): 759~767  
Xu J S, Zou Y H, Ma S Y. Time-dependent 3-D computerized ionospheric tomography with ground-based GPS network and occultation observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4):759~767
- [11] Pi X, Wang C, Hajj G A, et al. Estimation of E×B drift using a global assimilative ionospheric model: an observation system simulation experiment. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A2):1075~1088
- [12] Scherliess L, Schunk R W, Sojka J J, et al. Utah State University global assimilation of ionospheric measurements Gauss-Markov Kalman filter model of the ionosphere: model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: A11315, doi:10.1029/2006JA011712
- [13] 黄 斌, 郭 鹏, 洪振杰等. GAIM 电离层同化方法进展. 天文学进展, 2007, **25**(3): 236~248  
Huang C, Guo P, Hong Z J, et al. Progress in the study on GAIM Assimilative Ionospheric Method. *Progress in Astronomy* (in Chinese), 2007, **25**(3):236~248
- [14] Bust G S, Mitchell C N. History, current state, and future directions of ionospheric imaging. *Rev. Geophys.*, 2008, **46**: RG1003, doi:10.1029/2006RG000212
- [15] 万卫星, 宁百齐, 刘立波等. 中国电离层 TEC 现报系统. 地球物理学进展, 2007, **22**(4):1040~1045  
Wan W X, Ning B Q, Liu L B, et al. Nowcasting the ionospheric total electron content over China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, **22**(4):1040~1045
- [16] 乐新安, 万卫星, 刘立波等. 中低纬电离层理论模式的构建和一个观测系统数据同化试验. 科学通报, 2007, **52**(18): 2180~2186  
Yue X A, Wan W X, Liu L B, et al. Development of a middle and low latitude theoretical ionospheric model and an observation system data assimilation experiment. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2007, **52**(18):2180~2186
- [17] Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.*, 2001, **36**(2):261~275
- [18] Leitinger R, Radicella S, Nava B. Electron density models for assessment studies-new developments. *Acta. Geodet.*



- Geophys. Hung.*, 2002, **37**:183~193
- [19] Kalman R E. A new approach to linear filtering and predictions problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering (Series D)*, 1960, **82**:35~45
- [20] Bouttier F, Courtier P. Data assimilation concepts and methods. Meteorological Training Course Lecture Series, 1999, ECMWF
- [21] Evensen G. The ensemble Kalman filter: theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics*, 2003, **53**:343~367
- [22] Shim J S, Scherliess L, Schunk R W, et al. Spatial correlations of day-to-day ionospheric total electron content variability obtained from ground-based GPS. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113**: A09309, doi:10.1029/2007JA012635
- [23] Yue X, Wan W, Liu L, et al. Statistical analysis on spatial correlation of ionospheric day-to-day variability by using GPS and Incoherent Scatter Radar observations. *Ann. Geophys.*, 2007, **25**: 1815~1825
- [24] Jee G, Burns A G, Wang W, et al. Duration of an ionospheric data assimilation initialization of a coupled thermosphere-ionosphere model. *Space Weather*, 2007, **5**: S01004, doi:10.1029/2006SW000250

(本文编辑 何 燕)