

刘瑞源, 刘国华, 吴 健等. 中国地区电离层 f_oF_2 重构方法及其在短期预报中的应用. 地球物理学报, 2008, 51(2): 300 ~ 306
Liu R Y, Liu G H, Wu J, et al. Ionospheric f_oF_2 reconstruction and its application to the short-term forecasting in China region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 300 ~ 306

中国地区电离层 f_oF_2 重构方法及其 在短期预报中的应用

刘瑞源¹, 刘国华^{2,3}, 吴 健⁴, 张北辰¹, 黄际英³, 胡红桥¹, 徐中华¹

1 中国极地研究中心, 上海 200136

2 中国船舶重工集团第 723 研究所, 扬州 225001

3 西安电子科技大学理学院, 西安 710071

4 中国电波传播研究所, 新乡 453003

摘 要 提出了一种适合于中国地区电离层 f_oF_2 的重构方法——以中国参考电离层为背景的改进克里格法. 该方法把 f_oF_2 的估计值与中国参考电离层模型值之差值的相对值作为区域化变量, 引入电离层距离, 采用克里格法实现区域电离层重构. 与直接利用 f_oF_2 进行克里格重构相比, 以中国参考电离层为背景场保持了电离层的区域特征, 提高了重构的准确性和稳定性. 利用我国电离层垂测台站网的数据对该方法应用于中国地区的重构精度进行了评估. 该方法与单站预报的自相关分析法相结合可实现中国地区电离层 f_oF_2 短期预报.

关键词 电离层重构, 电离层预报, 克里格法, 中国参考电离层

文章编号 0001-5733(2008)02-0300-07 中图分类号 P352 收稿日期 2007-04-25 2007-12-10 收修定稿

Ionospheric f_oF_2 reconstruction and its application to the short-term forecasting in China region

LIU Rui-Yuan¹, LIU Guo-Hua^{2,3}, WU Jian⁴, ZHANG Bei-Chen¹,
HUANG Ji-Ying³, HU Hong-Qiao¹, XU Zhong-Hua¹

1 Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

2 The 723 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Yangzhou 225001, China

3 Science School, Xidian University, Xi'an 710071, China

4 China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang 453003, China

Abstract The CRI based Kriging method has been proposed for reconstruction of ionospheric f_oF_2 in China region. In this method the regional variate is adopted as the relative difference between the estimated and the CRI modeled values of f_oF_2 . Introducing the ionospheric distance the regional ionospheric reconstruction can be realized by using the Kriging method. The CRI based Kriging method would improve the accuracy and stability in the regional ionospheric reconstruction as compared with the straight f_oF_2 reconstruction. Based on the systematic measurements of the Chinese Ionosonde Network computer simulations of the ionospheric reconstruction have been done for different solar activity years, months and hours, which give the estimates of the reconstruction accuracy in China region. This method, combined with the autocorrelation method for single

station, will practise the short-term forecasting of f_oF_2 in China region.

Keywords Ionospheric reconstruction, Ionospheric forecasting, Kriging method, China reference ionosphere

1 引言

电离层 F_2 层临界频率 f_oF_2 是最重要的电离层特征参数之一,它不仅随时间而且随空间而变化.在已知区域内有限个电离层台站的 f_oF_2 (实测值或预报值)的情况下,如何内插/外推得到整个区域上 f_oF_2 的数值,这就是所谓的区域电离层重构问题,它是区域电离层现报/预报的核心问题.长期以来,国内外学者对区域重构问题进行了大量研究,并总结出多种方法.其中克里格法是由南非金矿地质学家 Krige^[1]提出的一种计算矿产储量的方法,后来法国学者 Matheron^[2]对克里格法进行了详细研究,使之更加完善.从统计意义上说,克里格法是从变量的相关性出发,在有限区域内对区域变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法.与实测数据相比较,表明克里格法优于最近距离插值、距离平方插值等任何一种线性插值方法^[3],它比样条插值法、趋面法等都好^[4].Stanislawski 等人^[5,6]改进了克里格法,引入电离层距离并应用于欧洲的电离层区域重构.

我国有着分布合理的电离层垂测站网,从 20 世纪 50 年代起就进行常规观测,能够提供 f_oF_2 , $M(3000)F_2$ 等电离层特征参量,目前已经建立了适用于中国及周边地区的长期预测的中国参考电离层模型^[7,8]和适用于武汉、海南等地的经验模型^[9,10].最近在电离层重构和短期预报方面作了某些尝试,刘瑞源等^[11]提出了在短期预报中引入等效电离层指数 I_{ce} 的设想,王世凯等^[12]在电离层区域重构中将国际参考电离层作为背景电离层,李志刚等^[13]提出了一种适用于全球的电离层电子含量预报方法,万卫星等^[14]建立了一种用于中国电离层 TEC 现报系统.但直至目前,尚未形成适合中国地区的电离层 f_oF_2 重构方法及相应的电离层短期预报方法.

本文提出一种适合于中国地区电离层 f_oF_2 重构的方法——以中国参考电离层为背景的改进克里格法,利用我国电离层垂测站网太阳活动高年和低年的观测数据,对该方法应用于我国地区的重构精度进行定量估计.最后,讨论该方法如何应用于中国地区的电离层短期预报.

2 中国地区电离层 f_oF_2 重构方法——以中国参考电离层为背景的改进克里格法

2.1 用克里格法进行电离层区域重构的基本计算公式

设 $Z(x)$ 为区域化变量,满足二阶平稳条件,即随机变量 $Z(x)$ 的空间分布规律不因位置而改变,协方差函数 $c(h)$ 和变异函数 $\gamma(h)$ 存在且仅与两点之间的距离 h 有关.

已知在区域内几个实测点上的数值 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 克里格法是求区域内任一点 x_0 的估计量 $Z_p(x_0)$, 即求一组权重系数 λ_j 使得加权平均值

$$Z_p(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

成为待估平均值 $Z(x_0)$ 的线性无偏、最优估计量.为此,权重系数 λ_j 和拉格朗日乘数因子 μ 应满足克里格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j c(x_i, x_j) - \mu = c(x_i, x_0), \\ i = 1, 2, 3, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1. \end{cases} \quad (2)$$

解上述 $n+1$ 阶线性方程组,求出权重系数 λ_j 和拉格朗日乘数因子 μ , 代入(1)式即可得到位置 x_0 上的克里格估计量 $Z_p(x_0)$.

将克里格法用于电离层区域重构,设 $Z(x, y)$ 为电离层的特性参量,已知区域内 N 个观测站的电离层特性参量的值 $Z(x_i, y_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 则区域内任一点 (x_0, y_0) 的克里格估计量 $Z_p(x_0, y_0)$ 可表示为

$$Z_p(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i, y_i), \quad (3)$$

其中 W_i 为权重系数.

引入电离层距离 d , 两点 $i(x_i, y_i)$ 和 $j(x_j, y_j)$ 之间的电离层距离 d_{ij} 定义为

$$d_{ij} = \sqrt{[\text{Lot}(i) - \text{Lot}(j)]^2 + [\text{SF} \cdot (\text{La}(i) - \text{La}(j))]^2}, \quad (4)$$

其中 $\text{Lon}(i)$ 和 $\text{La}(i)$ 分别为 i 点的经度和纬度, SF 为尺度因子, 以考虑变异性/相关性在纬度方向和经度方向的差别, SF 通常取值 0.8 到 4 之间, 经过计算表明, 在大多数情况下为 2 左右.

变异函数采用通过原点的线性型, 于是

$$\chi(x_i, y_i; x_j, y_j) = \chi(d_{ij}) = kd_{ij}. \quad (5)$$

在方程组 (2) 中, 用变异函数代替协方差函数, 可得到用于电离层区域重构的克里格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N d_{ij} W_j + \mu = d_{i0}, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{j=1}^N W_j = 1. \end{cases} \quad (6)$$

该方程组与变异函数的斜率无关, 即线性模型的斜率并不影响重构的结果.

2.2 电离层重构方法有效性的估算

采用交叉验证法 (Cross validation) 来检验电离层重构的有效性. 首先假定某个电离层站的特性参量未知, 使用周围其他站点的值进行克里格估计, 以估计值 $f_oF_2(\text{Est})$ 和实测值 $f_oF_2(\text{Meas})$ 之差的均方根值 σ (称为重构误差) 作为评估重构方法优劣的标准:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [f_oF_2(\text{Est}) - f_oF_2(\text{Meas})]^2} \quad (7)$$

其中 N 为参加评估的样本数.

另一种做法是计算重构的相对误差 (百分误差),

$$\alpha(\%) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [(f_oF_2(\text{Est}) - f_oF_2(\text{Meas})) / \overline{f_oF_2}]^2} \times 100, \quad (7')$$

其中 $\overline{f_oF_2}$ 为相应时刻的月平均值.

如果区域内有 M 个观测站用于电离层重构, 可轮流假设其中某一个站的特性参数为未知, 用其他 $M-1$ 个观测站的值进行克里格估计, 并用式 (7) 计算重构误差 σ_i , 那么整体的重构误差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sigma_i^2}. \quad (8)$$

2.3 中国地区电离层 f_oF_2 重构方法的形成

实际的电离层特性参量不是一个理想的平稳随机变量, 在确定实用的重构方法时, 引入背景电离层可显著地降低重构误差, 特别是在已知观测点较少的情况下更是如此. 我们在中国地区电离层 f_oF_2 重构方法中采用中国参考电离层 (CRI) 为背景场. CRI 是我国的一项国家标准, 它规定了我国上空 60 ~ 1000 km 范围内宁静电离层的电子密度、电子温度、

离子温度、离子成分等主要参数月中值的计算方法^[7]. 其特点是: 在中国和周边地区 (65°N ~ 40°S, 60°E ~ 150°E) 采用亚大地区 F_2 电离层预测方法^[8] 计算 f_oF_2 和 $M(3000)F_2$; 引进一个新的电离层预测指数 I_c , 提高了预测精度; 与国际参考电离层 IRI 兼容. 在重构方法形成中选取下列 4 种不同的区域化变量:

(1) $Z(x, y) = \text{RDF} = (f_oF_2(x, y) - \overline{f_oF_2}(x, y)) / \overline{f_oF_2}(x, y)$, 其中 $\overline{f_oF_2}$ 为 CRI 计算所得的背景电离层;

(2) $Z(x, y) = \text{DF} = f_oF_2(x, y) - \overline{f_oF_2}(x, y)$, 其中 $\overline{f_oF_2}$ 为 CRI 计算所得的背景电离层;

(3) $Z(x, y) = f_oF_2(x, y)$;

(4) $Z(x, y) = R_{12}(x, y)$, 其中 $R_{12}(x, y)$ 为利用 $f_oF_2(x, y)$ 经由国际参考电离层 (IRI)^[15] 反演得出的等效太阳活动性指数.

对上述 4 种 $Z(x, y)$, 用克里格法进行电离层重构, 一致折算到 $f_oF_2(x, y)$ 的估值, 并利用 (7) 和 (8) 式计算重构误差. 计算中所采用的数据是中国电离层垂测站网太阳活动高年 (2000 年) 和低年 (1996 年) 的 f_oF_2 的观测数据. 各垂测台站的地理坐标见表 1. 表 2 给出了 2000 年 12 月的计算结果. 从表中的数据可得出: 这 4 种方法中, 方法 ③ 效果最差, 这是因为它简单地直接用 f_oF_2 进行克里格重构; 方法 ④ 相对于方法 ③ 有所改善, 但不如方法 ① 和 ②, 这是由于 IRI 在形成过程中缺乏中国地区的实测数据, 它所描述的背景电离层在中国地区不如 CRI; 方法 ① 和 ② 的重构误差都较小, 因为它们都是取 CRI 为背景电离层, 可能是由于方法 ① 中采用的 $Z(x, y)$ 更接近于满足二阶平稳条件, 其结果为最佳. 于是我们在中国地区电离层 f_oF_2 重构中选用以 CRI 为背景电离层的改进的克里格法即方法 ①.

表 1 中国电离层垂测网台站的地理坐标

Table 1 Geographic coordinates of the ionospheric vertical sounding stations in China

站名 (中文)	站名 (英文)	纬度 (°N)	经度 (°E)
海口	HAK	20.0	110.3
广州	GAZ	23.1	113.3
重庆	CHQ	29.4	106.5
拉萨	LHS	29.6	91.1
兰州	LAZ	36.0	103.9
北京	BEJ	39.9	116.4
乌鲁木齐	URM	43.8	87.7
长春	CHC	43.9	125.4
满洲里	MAZ	49.6	117.4

表 2 不同方法的电离层 f_oF_2 重构误差(2000 年 12 月)
Table 2 Reconstruction errors of f_oF_2 for different methods

Method	HAK	GAZ	CHQ	LHS	LAZ	BEJ	URM	CHC	MAZ	σ
重构误差 Reconstruction errors (unit 0.1 MHz)										
①RDF	22.8	18.8	11.3	12.0	6.0	7.9	8.7	9.9	8.5	12.9
②DF	21.9	19.3	11.8	11.4	6.6	8.0	9.8	10.2	8.7	12.9
③ f_oF_2	20.8	19.1	11.8	14.4	8.3	8.6	14.0	18.8	14.5	15.1
④R12	23.2	18.4	10.7	14.8	7.1	8.5	10.4	15.3	14.2	14.4
重构相对误差 Reconstruction relative errors (unit %)										
①RDF	30.3	24.9	16.1	18.6	9.6	12.5	15.8	14.3	12.3	18.2
②DF	28.9	25.6	16.9	19.0	11.2	13.0	18.0	15.6	13.7	18.8
③ f_oF_2	28.0	24.9	17.8	30.1	14.2	16.2	26.4	28.9	26.6	24.3
④R12	31.3	23.7	14.2	31.3	11.9	14.9	17.2	21.8	27.3	22.6

利用 1996 年 12 月 1 日 1400BST 各电离层台站 f_oF_2 实测值,图 1 给出了直接用 f_oF_2 进行克里格重构得到的等值线图,图 2 是以 CRI 为背景的改进克里格法得到的 f_oF_2 等值线图,图中的数值是以 MHz 为单位,小菱形表示电离层台站的位置,附近的数值为 f_oF_2 观测值,等值线图的绘制范围为 $15^\circ\text{N} \sim 55^\circ\text{N}$ 和 $70^\circ\text{E} \sim 135^\circ\text{E}$,包括了我国及其周边地区.从图中看出两者重构的 f_oF_2 在中国南部区域有较大的差别,例如在图 1 中看不到通常所熟知的 f_oF_2 驼峰区的存在.其主要原因是我国南部地区白天处于电离

层赤道异常北驼峰区,而我国电离层垂测台站多数偏在驼峰区的北侧,仅靠有个别数据直接用 f_oF_2 进行电离层区域重构很难反映出整个驼峰区附近的变化特性.中国参考电离层在中国及其周边地区包括北驼峰区的更大范围内给出了电离层的平均特性,引入 CRI 为背景场后,重构的结果基本上保持了电离层变化的主要特性.实际上,建立在长期观测基础上的区域性统计模型,例如中国参考电离层,具有较好的代表性,已经考虑空间上的梯度变化,它的引入可以增加区域重构的准确性和稳定性.

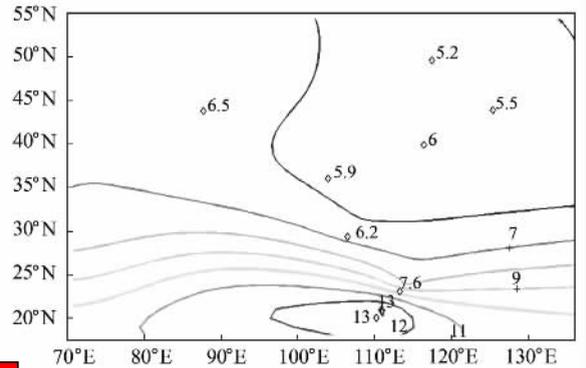
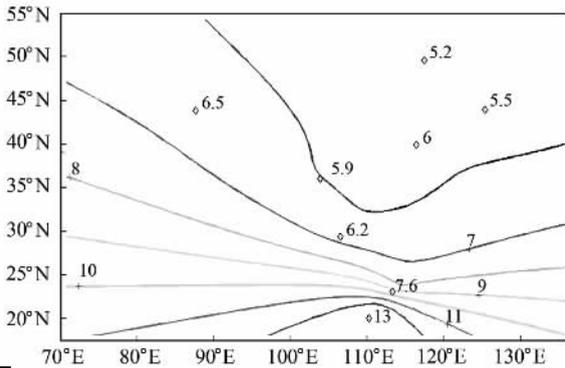


图 1 直接用 f_oF_2 进行克里格重构得到的电离层 f_oF_2 等值线图(1996 年 12 月 1 日 1400BST)

Fig. 1 Contour lines of f_oF_2 given from the f_oF_2 straight used Kriging method (at 1400BST on 1st Dec., 1996)

图 2 以 CRI 为背景的改进的克里格法得到的电离层 f_oF_2 分布图(1996 年 12 月 1 日 1400BST)

Fig. 2 Contour lines of f_oF_2 given from the CRI based Kriging method (at 1400BST on 1st Dec., 1996)

3 中国地区电离层重构的精度评估

选用以 CRI 为背景电离层的改进的克里格法(方法①)进行电离层重构.利用中国电离层垂测站网太阳活动低年(1996 年)和高年(2000 年)的观测数据,对 4 个季节(3 月,6 月,9 月,12 月)各个时段

进行电离层重构的计算机模拟,按式(7)和(8)计算出重构误差.表 3.1 和表 3.2 分别给出了 1996 年和 2000 年全年的综合估算结果,其中 1996 年的精度估算用了 8 个电离层垂测站的数据(缺拉萨站).从表中的数据可以得出:重构误差 σ 的取值范围通常是在 $0.5 \sim 2.0$ MHz 之间,各季节中,在春季为最大;在太阳活动高年略大于活动低年;重构效果方面边缘

表 3.1 以 CRI 为背景的改进克里格法的电离层 f_oF_2 重构误差(1996 年)
Table 3.1 Reconstruction errors of f_oF_2 for the CRI based Kriging method(in 1996)

Time	HAK	GAZ	CHQ	LAZ	BEJ	URM	CHC	MAZ	σ
重构误差 Reconstruction errors (unit 0.1 MHz)									
1996.03	18.9	15.5	9.7	5.9	6.5	6.0	6.0	4.8	10.4
1996.06	12.9	11.5	8.4	5.4	3.9	5.4	4.5	4.6	7.8
1996.09	18.4	16.0	10.6	5.8	5.6	6.0	7.5	7.2	10.7
1996.12	15.1	13.0	9.5	6.0	5.1	6.0	6.2	5.4	9.0
重构相对误差 Reconstruction relative errors (unit %)									
1996.03	32.5	27.9	16.5	12.1	16.0	13.9	13.4	11.5	19.4
1996.06	21.1	19.1	15.4	10.2	7.9	11.2	9.1	9.3	13.7
1996.09	31.8	28.1	18.2	11.6	11.5	13.1	16.4	15.2	19.6
1996.12	22.9	23.3	20.3	13.1	12.4	15.1	15.4	14.3	17.6

表 3.2 以 CRI 为背景的改进克里格法的电离层 f_oF_2 重构误差(2000 年)
Table 3.2 Reconstruction errors of f_oF_2 for the CRI based Kriging method(in 2000)

Time	HAK	GAZ	CHQ	LHS	LAZ	BEJ	URM	CHC	MAZ	σ
重构误差 Reconstruction errors (unit 0.1 MHz)										
2000.03	32.8	28.0	16.5	27.5	10.1	8.6	15.2	10.2	18.3	19.6
2000.06	12.8	12.0	8.2	10.8	6.8	6.9	9.3	8.7	9.4	9.6
2000.09	19.9	17.8	11.6	12.3	6.5	6.6	10.7	7.1	7.1	12.0
2000.12	22.8	18.8	11.3	12.0	6.0	7.9	8.7	9.9	8.5	12.9
重构相对误差 Reconstruction relative errors (unit %)										
2000.03	24.6	21.8	15.9	28.3	12.8	10.2	15.3	12.3	10.3	17.9
2000.06	12.4	11.7	8.4	11.7	7.5	8.1	10.9	11.2	12.8	10.7
2000.09	17.7	16.8	12.4	14.6	7.5	8.0	14.6	9.5	9.7	12.8
2000.12	30.3	24.9	16.1	18.6	9.6	12.5	15.8	14.3	12.3	18.2

站与内部站不同,低纬站与较高纬度站不同,从中可以看出边缘站与低纬站的观测数据在中国地区电离层重构中十分重要.

4 重构方法在中国地区电离层短期预报中的应用

4.1 短期预报的方法步骤

上述区域重构方法与电离层单站预报方法相结合可实现中国地区电离层 f_oF_2 短期预报,当采用单站预报的自相关分析法^[16]时其步骤如下:

(1)对中国电离层垂测站网中的各个观测站,采用自相关系数分段预报方法求得各个站 f_oF_2 提前 1 至 24 小时的预报值.

(2)依据各站的 f_oF_2 预报值,采用 CRI 为背景的改进克里格法进行区域电离层重构求得中国地区任意地点电离层 f_oF_2 预报值.

作为短期预报的一个实例,图 3 给出了中国地区电离层 f_oF_2 提前 1 小时预报的等值线图,预报的时刻是 1996 年 12 月 1 日 1400BST,它是依据 12 月 1

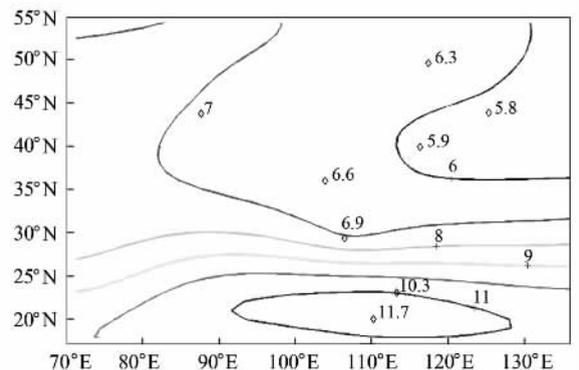


图 3 电离层 f_oF_2 提前 1 小时预报值分布图 (1996 年 12 月 1 日 1400BST)

Fig. 3 Contour lines of f_oF_2 for one hour ahead predictions (at 1400BST on 1st Dec., 1996)

日 1300BST 及这一时刻之前各垂测站 4 天之内的观测数据进行预报的结果,图中的小菱形表示电离层台站的位置,附近的数值为 f_oF_2 提前 1 小时预报值.作为比较,图 2 给出了这一时刻由实测 f_oF_2 所得的等值线图.二者等值线形状的相似说明了本文提出的预报方法是可以实施并达到了一定的精度.

4.2 短期预报方法精度评估

利用中国电离层垂测站网的观测数据,区域短期预报的精度评估同样采用交叉验证法,用公式(7)和(8)计算预报误差.作为例子,以2000年12月份每天每个时间提前1小时的预报进行计算机模拟,统计结果示于表4.从表中的数据可以看出预报误

差对不同的台站有较大的差别,对中纬台站区域预报的误差在0.8~1.3 MHz左右,对低纬台站(广州和海口)区域预报的误差(假设该站的数据缺损时)高达1.8~2.4 MHz左右,再次说明了低纬台站观测数据的重要性.

表4 各电离层站提前1小时预报的区域预报误差(2000年12月,单位0.1 MHz)

Table 4 Prediction errors of f_oF_2 at different stations for one hour ahead regional prediction(in Dec. , 2000 , unit 0.1 MHz)

LT	HAK	GAZ	CHQ	LHS	LAZ	BEJ	URM	CHC	MAZ	σ
0	29.1	18.4	8.6	9.5	3.3	2.9	7.4	3.9	4.1	12.7
1	29.9	18.5	7.3	8.2	3.4	2.3	5.4	4.6	3.6	12.6
2	23.3	20.5	6.7	6.6	3.0	3.1	4.7	3.9	3.5	11.2
3	24.6	20.0	9.2	6.0	3.1	2.8	5.4	4.0	3.7	11.6
4	19.0	16.9	7.1	7.2	3.7	3.5	6.7	4.2	4.9	9.8
5	15.7	15.0	7.3	6.2	3.3	3.7	6.4	4.7	5.1	8.7
6	16.1	19.1	4.3	8.7	2.7	3.7	7.8	11.7	8.5	10.6
7	29.6	23.4	7.3	10.2	4.3	11.7	6.0	14.6	5.1	14.9
8	22.1	15.6	12.5	9.1	5.7	12.0	6.3	15.9	5.8	12.8
9	16.1	17.0	12.1	5.4	6.6	10.6	5.2	10.1	13.5	11.5
10	21.2	16.0	12.0	8.3	9.0	9.7	6.7	25.0	15.3	14.9
11	18.8	14.2	9.9	15.0	8.6	11.6	9.9	16.3	12.1	13.3
12	14.9	12.5	10.2	11.0	7.0	8.7	9.9	15.2	11.5	11.5
13	14.6	16.9	12.8	10.9	6.6	6.7	7.7	10.7	9.8	11.3
14	12.7	15.7	14.1	11.7	5.8	8.5	9.1	9.2	10.3	11.2
15	13.3	13.5	12.9	13.0	7.4	8.9	8.7	11.6	8.0	11.1
16	13.8	11.0	10.2	17.0	6.2	9.3	9.2	12.6	7.4	11.2
17	11.0	10.2	12.8	18.1	6.3	7.1	10.3	9.1	5.4	10.7
18	12.6	9.7	15.7	16.8	6.6	11.7	10.1	9.9	9.4	11.8
19	18.1	10.8	16.9	14.5	9.1	8.0	9.2	8.1	6.4	11.9
20	20.7	12.3	14.5	22.8	7.3	5.6	10.5	5.8	5.3	13.2
21	31.1	20.1	18.7	13.2	7.0	5.6	12.7	5.2	5.6	15.6
22	47.3	31.0	19.2	11.3	5.2	4.6	9.9	4.3	4.0	20.8
23	41.5	23.1	13.8	10.7	4.5	3.0	7.6	3.7	4.0	17.2
月均	23.4	17.4	12.1	12.1	6.0	7.6	8.3	10.7	7.9	12.8

4.3 讨论

(1) 本文所提出的方法是根据电离层特性参数在时域和空域上的相关性,实现中国地区电离层的区域重构和短期预报,它利用电离层的实测数据来现报和预报电离层,不依赖于其他的地球物理参量(太阳活动性、地磁活动性等),实践证明它具有可操作性,易于实施.

(2) 所采用的插值方法(单站预报的自相关分析法和区域预报以CRI为背景的改进克里格法)是一种在时域和空域上为无偏、最优的线性插值方法,在一定条件下在统计意义上具有最佳的精度.

(3) 提高预报精度的途径:①缩短预报的时间

间隔可以大幅度提高预报精度(例如从提前1个小时的预报变为提前半个小时的预报),但这要求增加电离层垂测站网的观测频次和提高数据收集处理的速度.②加密观测台站,对特定的区域可考虑增加观测台站的密度使之与电离层的相关半径相匹配.

(4) 实际的电离层是具有复杂的时空变化特性,它并不完全是时间上平稳、空间上均匀的随机过程,特别是在发生电离层暴时,尽管本方法有一定的自适应性,但对暴时变化难以做到及时预报.

(5) 本文提出的预报方法可以推广应用于其他电离层特征参数如3000 km最高可用频率因子 $M(3000)F_2$ 和电离层总电子含量TEC的短期预报.

5 结 论

(1) 本文给出了一种适用于中国地区的电离层重构方法, 它是以 CRI 为背景的改进克里格法. 该方法是基于中国电离层垂测站网的观测数据, 把电离层 f_oF_2 观测值/预报值与中国参考电离层模型值之差值的相对值(RDF)作为区域化变量, 引入电离层距离, 采用克里格法实现电离层区域重构. 与直接利用 f_oF_2 进行克里格重构相比, 以中国参考电离层为背景场, 保持了电离层的区域特征, 提高了重构的准确性和稳定性.

(2) 本文提出的区域重构方法与单站电离层预报方法(例如自相关分析法)相结合可实现中国地区电离层 f_oF_2 短期预报. 方法简明实用, 具有可操作性.

(3) 利用我国电离层垂测站网的观测数据进行了区域重构和短期预报的计算机模拟. 对太阳活动高年和低年、不同季节和不同时间的重构误差和预报误差进行了估算, 给出了该方法应用于中国地区的精度评估, 提出了进一步提高预报精度的途径, 指出低纬台站的观测十分重要.

参考文献(References)

[1] Krige D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 1951, **52**: 119 ~ 139

[2] Matheron G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, 1963, **58**: 1249 ~ 1266

[3] 苏 姝, 林爱文, 刘庆华. 普通克里格法在空间内插中的运用. *江南大学学报(自然科学版)*, 2004, **3**(1): 18 ~ 21
Su S, Lin A W, Liu Q H. Ordinary Kriging algorithm applied for interpolation. *Journal of Southern Yangtze University (Natural Science Edition)* (in Chinese), 2004, **3**(1): 18 ~ 21

[4] 朱芮芮, 李 兰, 王 浩等. 降水量的空间变异性性和空间插值方法的比较研究. *中国农村水利水电*, 2004, **7**: 25 ~ 28
Zhu R R, Li L, Wang H, et al. Comparative study on the spatial variability of rainfall and its spatial interpolation methods. *China Rural Water and Hydropower* (in Chinese), 2004, **7**: 25 ~ 28

[5] Stanislawski I, Juchnikowski G, Cander Lj R. Kriging method for instantaneous mapping at low and equatorial latitudes. *Adv. Space Res.*, 1996, **18**(6): 172 ~ 176

[6] Stanislawski I, Gulyaeva T, Hanbaba R, et al. COST 251 recommended instantaneous mapping model of ionospheric characteristics - PLES. *Phys. Chem. Earth*, 2000, **25**(4): 291 ~ 294

[7] 刘瑞源, 权坤海, 戴开良等. 国际参考电离层用于中国地区时的修正计算方法. *地球物理学报*, 1994, **37**(4): 422 ~ 432
Liu R Y, Quan K H, Dai K L, et al. A corrected method of the international reference ionosphere to be used in Chinese region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1994, **37**(4): 422 ~ 432

[8] 孙宪儒. 亚太地区 F_2 电离层预测方法. *通信学报*, 1987, **8**(6): 37 ~ 46
Sun X R. A method of predicting the ionospheric F_2 layer in the Asia Oceania Region. *Journal of China Institute of Communications* (in Chinese), 1987, **8**(6): 37 ~ 46

[9] Liu L, Wan W, Ning B. Statistical modeling of ionospheric f_oF_2 over Wuhan. *Radio Science*, 2004, **39**, RS2013, doi: 10.1029/2003RS003005

[10] 曾 文, 张训斌, 胡 雄等. 利用人工神经网络建立我国南海地区电离层模式. *地球物理学报*, 1999, **42**(5): 581 ~ 589
Zeng W, Zhang X X, Hu X, et al. An ionospheric model in the South China Sea region made by artificial neural network. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(5): 581 ~ 589

[11] Liu R, Xu Z, Wu J, et al. Preliminary studies on ionospheric forecasting in China and its surrounding area. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, **67**: 1129 ~ 1136

[12] 王世凯, 焦培南, 柳 文. 改进的克里格技术实时重构区域电离层 f_oF_2 的分布. *电波科学学报*, 2006, **21**(2): 166 ~ 171
Wang S K, Jiao P N, Liu W. Improved Kriging technique of ionospheric parameter f_oF_2 instantaneous mapping. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2006, **21**(2): 166 ~ 171

[13] 李志刚, 程宗颐, 冯初刚等. 电离层预报模型研究. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 327 ~ 337
Li Z G, Cheng Z Y, Feng C G, et al. A study of prediction models for ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 327 ~ 337

[14] 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

[15] Bilitza. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 2001, **36**(2): 261 ~ 276

[16] Liu R, Liu S, Xu Z, et al. Application of autocorrelation method on ionospheric short-term forecasting in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(3): 352 ~ 357

(本文编辑 何 燕)