

自相关分析法在中国电离层短期预报中的应用

刘瑞源 刘顺林 徐中华 吴健 王先义 张北辰 胡红桥

(中国极地研究中心, 上海 200136; 武汉大学电子信息工程学院, 武汉 430072; 中国电波传播研究所, 新乡 453003. E-mail: ryliu@pric.ac.cn)

摘要 把自相关分析法应用中国电离层短期预报, 提出了一种简便可行的自相关系数分段预报方法: 对于提前 1~4 h 的预报采用临频相对变化 RDF 的自相关系数和“迭代法”, 对于提前 4 h 以上的预报采用 f_0F_2 的自相关系数和“一次法”. 利用重庆和广州电离层观测站的数据给出了该方法预报精度的定量估计. 该方法对提前 1~4 h 的预报有明显的改善, 对提前 4 h 以上的预报其预报误差趋向饱和, 但仍优于流动月中值法. 该方法还可应用于其他电离层参量的短期预报.

关键词 电离层 电离层预报 自相关

电离层的运动变化受到上部来自太阳风、磁层的影响和下部来自中层大气的作用, 除了通常存在的昼夜变化、季节变化、11 年太阳活动周变化外, 还存在显著的逐日变化和暴时变化. 例如在中国中纬地区电离层 F2 层临界频率 f_0F_2 的逐日变化通常达 15%~20% 左右, 在发生电离层暴时, f_0F_2 的变化会超过 30%, 严重时甚至会引引起无线电信号中断. 为提高通讯、定位、雷达、导航等无线电系统的工作性能, 保障航天飞行的安全, 需要对电离层天气进行准确定量的预报, 并从长期预报向短期预报和实时预报发展.

电离层短期预报是指时间尺度为小时和天的电离层天气变化的预报, 目前在国际上开展电离层短期预报的主要有欧洲、澳大利亚、美国等地区和国家. 所采用的方法主要有自相关分析法^[1,2], 多元线性回归法^[3,4], 人工神经网络法^[5], 暴时电离层经验修正模型^[6,7], 区域电离层预报的插值法^[8], 等效太阳黑子数法^[9,10], 电离层同化模型^[11,12]等. 文献^[13]综述了国际上电离层预报的研究进展和发展趋势. 在中国, 电离层建模和预报一直是电离层研究的一个重点, 曾先后发展了亚大地区 F2 层电离层预测方法^[14]、中国参考电离层^[15]、中低纬 F 层动力学特征的数值模拟^[16]、电离层扰动地区特征^[17]等, 大多是属于描述电离层平均特性和适用于长期预报; 在短期预报方面亦作了某些尝试, 但尚未形成适用于中国的实用方法.

本文把信号处理中的自相关分析法应用于我国电离层 f_0F_2 短期预报, 提出了一种简便可行的分段预报方法. 利用重庆和广州电离层观测站的数据给出了该方法预报精度的定量估计, 并讨论了方法的实施和推广应用.

1 电离层短期预报的自相关系数分段预报方法

1.1 自相关分析法原理

把电离层特征参数 Z 的小时值排列成一个时间

系列函数, 采用线性滤波器方法, 某一时刻 t 的值, 可表示为 n 个测量值的加权平均值,

$$Z(t) = \sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j Z(t_j), \quad (1)$$

把 $Z(t)$ 看作是一平稳随机过程, 在最优和无偏的条件下, 加权系数 λ_j 满足下列线性方程组^[11]:

$$\sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j \rho(t_i - t_j) + \mu = \rho(t - t_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^{n-1} \lambda_j = 1,$$

其中 μ 为拉格朗日乘数因子, $\rho(\tau)$ 为函数 $Z(t)$ 的自相关系数:

$$\rho(\tau) = \frac{MZ(t)Z(t+\tau) - (MZ)^2}{MZ^2 - (MZ)^2}. \quad (3)$$

若已知 $Z(t)$ 的自相关系数 ρ , 则解上述 $n+1$ 个线性代数方程组, 可得 λ_j 及 μ , 代入(1)式可得到 t 时刻的预测值.

1.2 分段预报方法的形成和预报精度的估算

把自相关分析法应用于电离层短期预报时, 相关系数的计算需要有一个时间上的截断. 我们利用最靠近的 30 d 观测数据计算自相关系数(离散值), 并根据电离层 f_0F_2 的变化特点, 相关系数采用如下形式拟合:

$$\rho(\tau) = (1 - A_{24} - A_{12}) \exp\left(-\frac{|\tau|}{\tau_0}\right) + A_{24} \cos\left(\frac{2\pi}{24}\tau\right) + A_{12} \cos\left(\frac{2\pi}{12}\tau\right), \quad (4)$$

其中第一项为纯随机项, 第二项为 24 h 周期项(日变化项), 第三项为 12 h 周期项(半日变化项), $\rho(\tau)$ 的解析表达式中待定系数为 A_{24} , A_{12} 和 τ_0 , 可以用最小均

方拟合已算出的相关系数 ρ_i 来确定上述3个系数.

在进行外推(预报)时(1)式通常取12项,选取 ρ (τ)在最靠近的4d中具有高相关系数的12个值和相应的观测值 $Z(t_j)$ 作为已知值,求解方程组(2).在解出 λ_j 和 μ 以后代入(1)式即可求得 t 时刻的预测值.

作为例子,图1给出了2000年3月重庆站 f_0F_2 的自相关系数,其中“+”为由观测数据得出的计算值.“*”为拟合值.从图中可看出,拟合值与观测计算值十分接近,(4)式中的三个系数分别为 $A_{12}=0.0771$, $A_{24}=0.7800$, $\tau_0=2.288$,说明了电离层短期变化中24h周期项(日变化项) A_{24} 占重要地位,纯随机项的幅度较小,其相关时间 τ_0 为2个多小时.图2给出了2000年3月21日的预测值,它是根据3月20日24时以前的观测值计算得到的提前1~24h的预测值.预测值给出了一条相对平滑的日变化曲线,与图中的实测值相比较,从总体上很好地反映了电离层的变化特征.

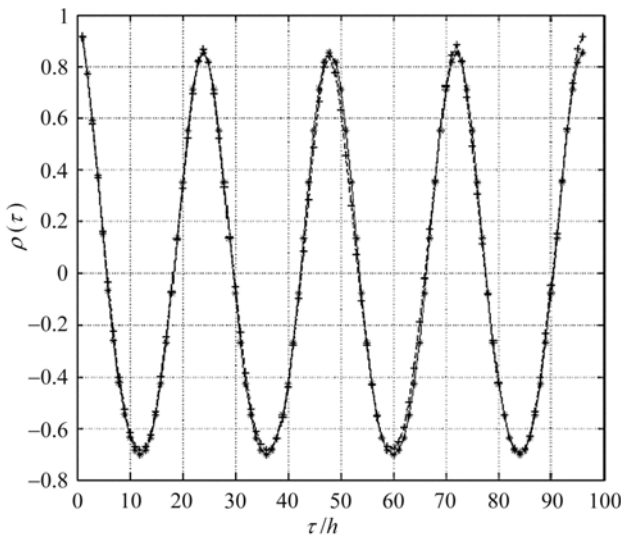


图1 重庆站2000年3月 f_0F_2 自相关系数
*为拟合值,+为测量值

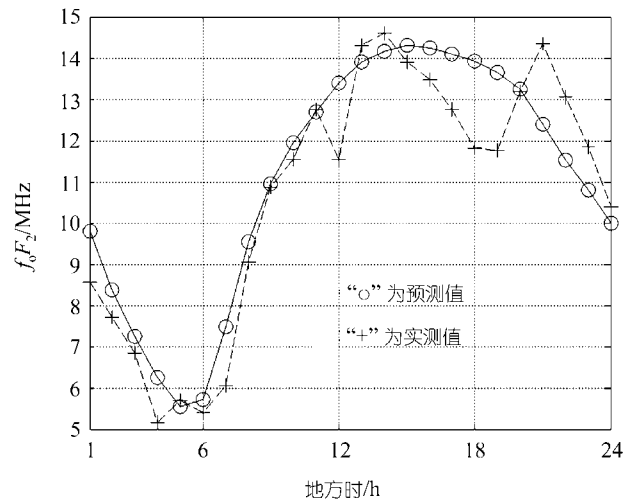


图2 重庆站2000年3月21日 f_0F_2 的预测值和实测值的比较

实际的电离层不是一个理想的平稳随机过程,于是在确定实用的预报方法时,电离层特征参数 $Z(t)$ 分别选用了三个参数,即 $Z=f_0F_2$, $Z=DF=f_0F_2-\overline{f_0F_2}$, $Z=RDF=\frac{f_0F_2-\overline{f_0F_2}}{\overline{f_0F_2}}$,其中 $\overline{f_0F_2}$

为相应时刻的流动平均值,即在前面30天中该时刻的平均值.对于提前 m 个小时的预报可按上述方法一次完成,亦可看成是重复 m 次每次提前一个小时的预报,前者简称为“一次法”,后者简称为“迭代法”.因此试算中的参数和方法共有6种组合.采用预报误差来表征方法的优劣,预报误差定义为预测值相对于观测值的均方根误差:

$$\text{RMS } E(m) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_1^N [f_0F_2(\text{pre.}) - f_0F_2(\text{Meas.})]^2}, \quad (5)$$

其中 m 为提前预报的小时数, $f_0F_2(\text{meas.})$ 为某时刻的实测值, $f_0F_2(\text{pre.})$ 为提前 m 个小时预报的同一时刻的预测值.

用上述6种不同组合的预报方法,对重庆2000年7月份(31d,每天24个小时)进行了短期预报试验.按(5)式计算了预报误差,并用该月 f_0F_2 总体平均值进行归一化得到相对误差,其结果列于表1.从表1可知,对于提前1至几个小时之内的短期预报采用RDF和迭代法为最佳,对于较长一点时间的预报则采用 f_0F_2 和一次法为合适.这种分段预报方法比起文[1,2]中所用的划一的 f_0F_2 自相关系数法在某些情况下可把误差降低二个百分点以上.

表1 六种不同组合预报方法的预报误差(重庆2000年7月,相对百分误差%)

序号	Z	方法	提前预报时间/h																	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	
1	f_0F_2	一次	8.3	11.1	13.0	14.4	14.5	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6

2	f_0F_2	迭代	8.3	11.0	12.4	13.2	13.9	14.4	14.7	14.9	15.0	15.1	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	
3	DF	一次	8.1	10.3	11.6	12.2	13.2	13.8	14.2	14.6	14.7	14.9	15.2	15.5	15.7	15.7	15.7	16.0	15.7
4	DF	迭代	8.1	10.4	11.6	12.2	13.1	13.7	14.4	14.8	15.0	15.1	15.6	16.0	16.3	16.3	16.7	16.9	17.1
5	RDF	一次	8.0	10.2	11.3	12.0	12.8	13.2	13.8	14.4	14.5	14.6	14.9	15.3	15.6	15.6	15.5	15.5	15.5
6	RDF	迭代	8.0	10.2	11.3	11.8	12.6	13.1	13.7	14.2	14.4	14.6	15.2	15.6	16.1	16.1	16.6	16.6	16.6

为考察分段预报方法对我国电离层短期预报的适用情况, 选取了我国中、低纬地区的重庆站(23.1°N, 113.3°E)和广州站(29.4°N, 106.5°E)太阳活动高年和低年共 4 年的观测数据, 对上述方法的预报误差进行了系统的估算, 分别算出了相应于 12 个月份、24 个时段的提前 1~24 h 预报的预报误差. 作为例子, 表 2 给出了重庆站 2000 年 7 月各个正点时的预报误差, 表 3 给出了重庆站 1996 年各个月份(所有时刻)的预报误差. 电离层短期预报的误差与电离层本身的变化一样, 与地方时、季节、太阳活动性等有关. 与实测数据进行详细地比较后发现, 一般来说, 在一天当中

中日出的预报误差(绝对值)最小, 在日落前后的预报误差(绝对值)最大; 在一年中 12 月份的预报误差最小, 4 月份和 10 月份的为极大; 太阳活动高年期间的预报误差要比低年期间的大, 且出现最大误差的时段从日落之前移向日落之后.

作为一个总体的评估, 表 4, 5 分别列出了重庆和广州在太阳活动高年和低年全年的统计计算结果. 这些代表性的统计数据可用于电子工程系统运行质量、精度、可靠性等的评估. 表 4, 5 中均同时给出了二种组合方法的预报误差, 从表中可以看出, 重庆和广州 4 个年度的结果非常的一致: 对于提前 1~4 h 的

表 2 重庆站电离层 f_0F_2 自相关系数分段预报的预报误差(2000 年 7 月, 单位 0.1MHz)

LT	提前预报时间/h																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24
00	7.5	9.3	8.4	8.2	11.9	13.3	13.3	13.4	13.4	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.4	13.4
01	7.1	7.1	8.8	8.7	12.2	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
02	6.8	8.5	9.7	10.2	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.3	12.4	12.4	12.4
03	7.1	7.8	9.1	9.7	11.2	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3
04	6.9	9.3	10.4	9.9	11.6	10.1	10.1	10.1	10.1	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
05	8.3	8.7	11.3	12.7	14.7	13.1	13.1	13.1	13.1	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.3
06	8.6	8.2	9.6	11.4	11.2	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	10.2
07	7.4	11.1	10.0	11.2	11.6	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.4
08	5.8	8.2	9.9	9.2	9.7	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
09	7.8	10.2	10.8	10.7	13.3	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
10	10.0	10.7	11.7	10.1	12.4	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4
11	6.5	10.5	9.7	10.8	11.9	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.2	12.7
12	8.5	10.9	13.7	12.8	14.5	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	15.2
13	6.5	11.3	14.0	16.5	15.6	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
14	6.2	9.4	12.4	14.3	16.4	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9	16.9
15	6.3	9.0	11.2	13.4	17.4	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
16	6.1	9.0	10.4	11.3	18.0	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	18.2
17	9.5	11.0	11.9	11.7	18.0	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
18	8.3	12.1	12.6	13.5	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.1	19.1	19.0	19.0	19.0
19	7.8	10.9	13.0	13.1	17.6	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
20	8.1	8.8	9.6	11.0	14.9	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5
21	9.0	11.7	11.4	11.2	15.3	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8
22	7.4	9.8	11.8	12.3	16.4	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2
23	6.7	9.4	8.9	10.2	15.7	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
日均	7.5	9.7	10.8	11.5	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4

表 3 重庆站电离层 f_0F_2 自相关系数分段预报的预报误差(1996 年各月平均值, 单位 0.1MHz)

月份	提前预报时间/h																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24
1	6.9	7.5	7.6	7.6	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
2	7.4	8.5	8.6	8.7	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
3	8.4	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3

4	9.1	11.4	12.3	12.6	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.3
5	8.2	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.9
6	8.0	10.2	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7
7	8.0	9.5	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
8	8.6	10.5	11.1	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.4
9	7.7	9.9	10.6	10.6	10.6	10.6	10.5	10.5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
10	9.0	10.8	11.3	11.6	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
11	7.0	7.9	8.1	8.2	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8
12	5.5	5.9	5.9	6.0	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4

表4 重庆站电离层 f_0F_2 自相关系数分段预报的预报误差(年平均, 单位 0.1MHz)

年份	方法	预报提前时间/h																逐日变化 流动中值			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	σ_d	σ_r	
2000	f_0F_2	一次	8.8	12.3	13.0	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	12.9	14.5
2000	RDF	迭代	8.6	11.1	12.3	13.2	13.9	14.4	14.9	15.2	15.5	15.6	15.9	15.9	15.7	15.2	14.8	14.3	14.3	12.9	14.5
1996	f_0F_2	一次	8.0	10.2	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	9.8	10.8
1996	RDF	迭代	7.9	9.6	10.2	10.4	10.5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.7	10.6	10.4	10.4	9.8	10.8

表5 广州站电离层 f_0F_2 自相关系数分段预报的预报误差(年平均, 单位 0.1MHz)

年份	方法	预报提前时间/h																逐日变化 流动中值			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	22	24	σ_d	σ_r	
1999	f_0F_2	一次	12.2	15.5	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.1	16.4	17.2
1999	RDF	迭代	11.8	14.4	15.5	16.1	16.8	17.2	17.5	17.8	17.9	18.0	18.1	18.0	17.7	17.4	17.2	17.0	17.0	16.4	17.2
1996	f_0F_2	一次	10.9	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.0	14.1
1996	RDF	迭代	10.7	12.7	13.3	13.7	14.0	14.2	14.3	14.4	14.4	14.5	14.7	14.8	14.6	14.5	14.3	14.0	14.0	13.1	14.1

f_0F_2 预报可采用 RDF 的自相关系数和“迭代法”, 对于提前 4 h 以上的预报可采用 f_0F_2 的自相关系数和“一次法”。

2 讨论

自相关分析法的优点是简便实用. 它用近期的电离层观测数据本身来进行预报, 不需要其他的日地物理观测数据, 并且具有相当的精度, 在我国有现实的可行性. 我国有十个电离层垂测站, 每天 2 次向北京电离层预报中心提供正点值的实测数据. 据此可以做到提前 1~24 h 的我国电离层短期预报. 采用自相关函数法, 可以用台站自身的观测资料预报该站附近未来电离层的短期行为, 由于电离层具有一定的地域特征, 所采用的预报方法至少可以部分的反映这种特征. 由于它可用于未来数小时电离层预报, 有可能用于预报电离层大尺度声重力波的特性. 自相关分析法没有考虑电离层之外的其他驱动因素和非线性效应, 不能及时和全部地考虑暴时变化. 为了进一步提高精度, 需要考虑多个驱动因子, 采用多元线性回归、人工神经网络等方法, 但同时亦增加了实施的复杂性.

在表 4, 5 中同时还给出了电离层逐日变化的年度平均值 σ_d 和流动月中值法的预报误差 σ_r , 其中 σ_d 为每日的电离层 f_0F_2 围绕其月中值变化的均方根值,

σ_r 为用最靠近的一个月的流动中值来代替该时刻的数值所得的预报误差. 表中的黑体数字为分段预报法的预报误差. 表中数据表明, 自相关函数分段预报法对提前 1~4 h 的预报有明显的改善, 例如对于重庆 2000 年提前 1 h 的预报误差为 0.86 MHz, 而流动中值法的预报误差为 1.45 MHz, 它们之间均方值之比为 0.35; 对提前 4 h 以上的预报其预报误差趋向饱和, 但仍优于流动月中值法.

本文提出的自相关系数分段预报法除了用于电离层 f_0F_2 的短期预报外, 还可应用于电离层 F2 层 3000 km 传输因子 $M(3000)F_2$ 的短期预报和电离层总电子含量 TEC 的短期预报, 把 f_0F_2 和 $M(3000)F_2$ 作为中国参考电离层 CRI^[15] 或国际参考电离层模型 (IRI^[18]) 的输入量就可用于电离层电子密度剖面的短期预报.

3 结论

() 本文把信号处理中的自相关分析法应用于中国电离层 f_0F_2 短期预报, 提出了一种简单可行的分段预报方法. 对于提前 1~4 h 的 f_0F_2 预报可采用临频相对变化 RDF 的自相关系数和“迭代法”, 对于提前 4 h 以上的预报可采用 f_0F_2 的自相关系数和“一次法”。

() 利用重庆和广州电离层观测站太阳活动高年和低年的观测数据, 对上述方法的预报精度给出

了定量估计. 这些有代表性的统计数据可用于电子工程系统进行质量评估. 自相关系数分段预报法对提前 1~4 h 的预报有明显的改善, 对提前 4 h 以上的预报其预报误差趋向饱和, 但仍优于流动月中值法.

()自相关系数分段预报法可推广应用用于其他电离层参量的短期预报, 如电离层 F2 层 3000 km 传输因子 $M(3000)F_2$, 电离层总电子含量 TEC 和电离层电子密度剖面 $N(h)$ 的短期预报.

致谢 本项工作得到国家高科技发展计划项目(863-703-105)、国家电磁环境重点实验室项目(51486010104QT8901)和国家自然科学基金项目(批准号: 49990455)资助.

参 考 文 献

- 1 Muhtarov G, Kutiev I. Autocorrelation method for temporal interpolation and short-term prediction of ionospheric data. *Radio Science*, 1999, 34(2): 459~464
- 2 Hanbaba R. COST 251 Final Report, Improved quality of Service in Ionospheric Telecommunication Systems Planning and Operation. Warsaw: Space Research Centre, 1999, 127~142
- 3 Mikhailov A V, de la Morena B A, Miro G. A method for f_oF_2 monitoring over Spain using the El Arenosillo digisonde current observations, 3rd COST 251 Workshop proceedings, El Arenosillo, Spain, 1998, COST251TD (99)003, 185~194
- 4 Marin D, Miro G, Mikhailov A V. A method for f_oF_2 short-term prediction, 4th COST 251 Workshop proceedings, Madeira, Portugal, 1999, COST251TD (99)008, 214~222
- 5 Cander Lj R, Milosavljevic M, Stankovic S, et al., Ionospheric forecasting technique by artificial neural network. *Electron Lett*, 1998, 34(6): 1573~1574
- 6 Araujo-Pradere E A, Fuller-Rowell T J, Codrescu M C. Storm: An empirical storm-time ionospheric correction model. I. Model Description. *Radio Science*, 2002, 37(5): 3-1~3.12, doi: 10.1029/2001RS002467
- 7 Araujo-Pradere E A, Fuller-Rowell T J and Codrescu M C. Storm: An empirical storm-time ionospheric correction model, II, Validation. *Radio Science*, 2002, 37(5) : 4-1 ~ 4.14, doi: 10.1029/2002RS002620
- 8 Rushm C M, Edwards Jr W R. An automated mapping technique for representing the hourly behavior of the ionosphere. *Radio Science*, 1976, 11: 931~937
- 9 Liu Ruiyuan, P A Smith, J W King. A New Solar index which leads to improved foF2 predictions using the CCIR Atlas. *Telecommunication Journal*, 1983, 50(VIII): 408~414
- 10 Secan J A, Wilkinson P J. Statistical studies of an effective sunspot number. *Radio Science*, 1997, 32: 1717~1724
- 11 Sojka J J, Thompson D C, Schunk R W, et al. Assimilation Ionospheric Model: Development and testing with Combined Ionospheric Campaign Caribbean measurements. *Radio Science*, 2001, 36(2): 247~259
- 12 Schunk R W, Scherliess L, Sojka J J. Recent approaches to modeling ionospheric weather. *Adv Space Res*, 2003, 31(4): 819~828
- 13 刘瑞源, 吴健, 张北辰. 电离层天气预报研究进展. *电波科学学报*, 2004, 19(增刊): 35~40
- 14 孙宪儒. 亚大地区 F2 电离层预测方法. *通讯学报*, 1987, 1.8(6), 37~46
- 15 刘瑞源, 权坤海等. 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
- 16 涂剑南, 刘立波, 保宗梯. 一个低纬电离层模式. *空间科学学报*, 1997, 17(3): 212~219
- 17 Wan W, Yuan H, Ning B, et al. Regional properties traveling ionospheric disturbances observed in central China. *Adv. Space Res*, 1999, 25: 219~222
- 18 Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 2001, 36(2): 261~276

(2005-05-30 收稿, 2005-08-05 收修改稿)