

基于数据预处理的电离层剖面反演方法

鲁转侠, 柳文, 蔚娜, 娄鹏

(中国电波传播研究所, 山东青岛 266107)

摘要: 对于交叠多项式反演方法中较多或大量数据缺失、以及未结合电离层传播特性的数据插值处理导致的剖面计算误差大幅增大,甚至错误的问题,在对交叠多项式电离层剖面反演方法理论分析研究的基础上,本文提出基于数据预处理的电离层剖面反演改进方法.该方法首先基于理论方法构建电离层剖面模型,结合实测虚高数据,完成缺失数据补偿预处理;然后通过搜索、迭代的方式,基于交叠多项式模型实现E层、“谷层”和F层剖面的整个反演.使用该方法对实测数据进行了电离层剖面反演,结果显示该方法获得的剖面更符合实际物理意义;使用反演结果合成的虚高数据与实测虚高数据也较好地吻合,进一步验证了反演算法的有效性.

关键词: 垂测电离图; 电离层; 谷层; 临界频率

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018) 03-0575-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.009

Inversion Method of Ionospheric Profile Based on Data Preprocessing

LU Zhuan-xia, LIU Wen, WEI Na, LOU Peng

(China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao, Shandong 266107, China)

Abstract: An ionospheric profile with increasing error or even fault will be caused by the missing of large number of data, or taking no propagation feature into account in the data interpolation, in the overlapping polynomial inversion. In the paper, an improved method for the profile inverting is presented with emphasis on data preprocessing. In this method, an ionospheric model is constructed from theory, and the missing data are compensated with the measured virtual heights. Then, the whole profile inversion is realized with the overlapping polynomial model through searching and iterating algorithm. The method is tested with real data and a more reasonable results with physical meaning is obtained. The effectivity of the proposed method is further verified with the synthesized virtual heights from inverting results comparing with that of the measured.

Key words: vertical sounding ionogram; ionosphere; valley; critical frequency

1 引言

电离层垂直探测(简称垂测)技术是电离层研究历史中最早采用的探测方法,尽管目前有众多的探测技术,但电离层垂测技术依然是最主要的电离层探测方法.通过电离层垂直探测能够获得反映电离层虚高与频率关系的垂测电离图.但垂测获得的虚高并不是电磁波在电离层中的真实反射高度,需要利用垂测电离图频率—虚高描述反演获得电离层反射高度与等离子体频率或电子浓度的对应关系(焦培南等,2007)^[1].垂测电离图的反演对研究电离层结构和电离层传播问题

具有重要意义.

目前,基于直接算法(Titheridge, 1959^[2], 1961^[3], 1967^[4], 1969^[5], 1975^[6]; 郑体容, 1983^[7])或模式法(熊年禄等, 1999^[8]; Lobb et al., 1977^[9]; 叶公节等, 1983^[10]; Reinisch et al., 1983^[11]; 郑传青, 1992^[12]; Bilitza, 2001^[13]; Norman, 2003^[14]; 孙宪儒, 1987^[15]; 权坤海等, 1994^[16])思想发展了较多应用普遍的垂测电离图反演方法,其中,基于直接算法思想, Titheridge 公开了一种交叠多项式反演电离层剖面的方法(Titheridge, 1967)^[4], 基于探测频率上的实测虚高使用交叠多项式直接计算真实反射高度.该方法的不足之处是,直接基于实际探测数据,因而数据

质量对其精度影响较大,少量的虚高数据缺失会直接导致计算剖面出现振荡,大量的数据缺失将带来剖面的大幅变形及移位,而由于探测设备及电离层衰落,实际探测虚高数据的缺失是不可避免的;再有,一些对探测虚高数据的直接插值方法,未结合电离层传播特性,对非各层临界频率附近的少量数据缺失可以起到较好的插值,但对较多或大量数据缺失及各层临界频率附近的数据缺失可能得到完全错误的插值结果,更加增大了剖面的计算误差.另外,对于电离层剖面中的“谷层”该方法中也没有具体涉及,但从物理意义上来讲这是不符合实际情况的.针对上述存在问题,本文提出了基于数据预处理的电离层剖面反演算法.

2 电离层剖面反演算法

本文提出的基于数据预处理的电离层剖面反演算法,基于交叠多项式模型的思想,融合构建模型数据预处理和谷层剖面寻优的方法实现整个剖面的最终反演.具体实现思路为:首先构建电离层模型;然后结合实测虚高数据,在剖面连续光滑的约束条件下,通过搜索、迭代的方法获得构建电离层模型的系数,从而实现缺失实测数据的有效外推补偿预处理;基于预处理后的 E 层虚高数据,通过电离层交叠多项式模型,求解每个频率对应的多项式系数,直接计算确定 E 层的电离层剖面;通过谷宽和谷深寻优的方式增加标准分段式谷层;最后基于谷层和预处理后的 F 层虚高数据,采用电离层交叠多项式模型,求解每个频率对应的多项式系数,直接计算确定最终的电离层剖面.

2.1 电离层剖面模型

2.1.1 E 层和谷层模型

构建 E 层和谷层剖面为抛物模型 (Davies, 1990)^[17],具体形式见式(1):

$$\begin{cases} f_{NE}^2 = f_{CE}^2 \left[1 - \left(\frac{h - h_{mE}}{y_{mE}} \right)^2 \right], & h_{bE} \leq h \leq h_{mE}, h_{mE} \leq h \leq h_1 \\ f_{NV}^2 = f_{CV}^2 \left[1 - \left(\frac{h - h_{mV}}{y_{mV}} \right)^2 \right], & h_1 \leq h \leq h_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, f_{NE} 表示 E 层等离子体频率, f_{CE} 表示 E 层临界频率, h_{mE} 表示 E 层峰高, y_{mE} 表示 E 层半厚, $h_{bE} = h_{mE} - y_{mE}$ 表示 E 层底高; f_{NV} 表示谷层等离子体频率, f_{CV} 表示谷层最小等离子体频率, h_{mV} 表示谷层等离子体频率为 f_{CV} 时对应的电离层高度, y_{mV} 表示谷层半厚, $h_2 = h_{mE} + W$, W 定义为谷层宽度. E 层和谷层的连接点位于 E 层峰高 h_{mE} , 谷层与 F1 层的连接点位于高度 h_2 处, 并且在高度 h_2 处的等离子体频率等于 E 层临界频率 f_{CE} , 谷层包括两个部分: 与 E 层的连接部分和与 F1 层的连接部分, 这两部分的连接点位于高度 h_1 处.

2.1.2 F 层模型

构建 F 层为多项式模型 (Reinisch et al., 1983)^[11]. 针对存在 F1 层较复杂的情况, 则构建 F1 和 F2 层剖面均为多项式模型, 具体形式为:

$$h = A_{l+1} + g^{1/2} \sum_{i=0}^l A_i T_i(g) \quad (2)$$

F1 层与 F2 层连接点位于 F1 层峰高 h_{mF1} 处.

针对 F1 层有:

$$\begin{cases} T_i(g) = 2(2g-1)T_{i-1}(g) - T_{i-2}(g) \\ T_0(g) = 1, T_1(g) = 2g-1 \end{cases} \quad (3)$$

$$g = \frac{\ln(f_{NF1}/(f_{CF1} + \Delta f_C)) \ln(f_{CF1}/(f_{CF1} + \Delta f_C))}{\ln(f_{CE}/(f_{CF1} + \Delta f_C)) \ln(f_{CE}/(f_{CF1} + \Delta f_C))} \leq g \leq 1 \quad (4)$$

其中, f_{NF1} 表示 F1 层等离子体频率, f_{CF1} 表示 F1 层临界频率, Δf_C 为垂测电离图判读软件自动给出的 f_{CF1} 相对于 F1 层充分发育时的偏差, A_i ($i=0, 1, 2, \dots, l+1$) 为多项式系数, 并且有:

$$A_{l+1} = h_2 - \sum_{i=0}^l A_i \quad (5)$$

针对 F2 层有:

$$g = \frac{\ln(f_{NF2}/f_{CF2})}{\ln(f_{CF1}/f_{CF2})}, 0 \leq g \leq 1 \quad (6)$$

f_{NF2} 表示 F2 层等离子体频率, f_{CF2} 表示 F2 层临界频率, 并且有:

$$A_{N+1} = h_{mF1} - \sum_{i=0}^N A_i \quad (7)$$

$$h_{mF2} = C_{N+1} \quad (8)$$

h_{mF2} 表示 F2 层峰高.

2.2 平均群折射指数计算方法

符号 μ'_y 用于表示在电波频率 f_i 和等离子体频率 f_j 处的群折射指数 μ' . 群折射指数 μ' (Huang et al., 1982)^[18] 具有以下形式:

$$\mu' = G_o / \mu_o \quad (9)$$

$$\mu_o = \sqrt{1 - X_o} \quad (10)$$

$$X_o = f_N^2 / f^2 \quad (11)$$

$$G_o = \frac{\mu_o}{n_o} \left\{ 1 + \frac{X_o \tan^2 \theta}{M^2} \left[\frac{1 + X_o}{(1 + \gamma \mu_o^4)^{1/2}} - \frac{2}{1 + (1 + \gamma \mu_o^4)^{1/2}} \right] \right\} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{4 \tan^2 \theta}{Y_o^2 \cos^2 \theta} \quad (13)$$

$$Y_o = f_H / f \quad (14)$$

$$M = 1 + \mu_o^2 \frac{2 \tan^2 \theta}{1 + (1 + \gamma \mu_o^4)^{1/2}} \quad (15)$$

$$\left(\frac{\mu_o}{n_o} \right)^2 = \frac{M}{1 + 2 \tan^2 \theta / [1 + (1 + \gamma \mu_o^4)^{1/2}]} \quad (16)$$

式中, f_H 为垂测站上空 300km 处磁旋频率, θ 为垂测站上

空 300km 处磁倾角, f 为电波频率, f_H 为等离子体频率.

在电波频率 f_i 处, f_j 和 f_{j-1} 之间等离子体频率对应的群折射指数 μ' 的均值用 $\overline{\mu'_{i,j}}$ 表示. 对于 $j=2,3,4,\dots,(i-1)$, $\overline{\mu'_{i,j}}$ 中 $i=4,5,6,\dots,n$. 通过以下公式 (Titheridge, 1967) [4] 能够获得准确度较高的 $\overline{\mu'_{i,j}}$ 值:

$$\overline{\mu'_{i,j}} = \frac{1}{2}(\mu'_{i,j} + \mu'_{i,j-1}), j < i-3 \quad (17)$$

并且

$$\overline{\mu'_{i,j}} = \frac{1}{6}(\mu'_{i,j} + 4\mu'_{i,j-1/2} + \mu'_{i,j-1}) \quad (18)$$

其中, $j=i-3, i-2, i-1$, $\mu'_{i,j-1/2}$ 是在电波频率 f_i 和等离子体频率 $(f_{j-1} + f_j)/2$ 处的群折射指数值.

2.3 交叠多项式模型系数计算方法

频率 f_{i-2} 和 f_{i+1} 之间的实高曲线表示为 (Titheridge, 1967):

$$h = \alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{f_N}{f_i}\right) + \alpha_2 \left(\frac{f_N}{f_i}\right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{f_N}{f_i}\right)^3 + \alpha_4 \left(\frac{f_N}{f_i}\right)^4 \quad (19)$$

式(19)必须能给出等离子体频率 $f_N = f_{i-2}, f_{i-1}$ 上的正确实高, 因此有:

$$h_{i-2} = \alpha_0 + \alpha_1 \alpha_{i-2} + \alpha_2 \alpha_{i-2}^2 + \alpha_3 \alpha_{i-2}^3 + \alpha_4 \alpha_{i-2}^4 \quad (20)$$

$$h_{i-1} = \alpha_0 + \alpha_1 \alpha_{i-1} + \alpha_2 \alpha_{i-1}^2 + \alpha_3 \alpha_{i-1}^3 + \alpha_4 \alpha_{i-1}^4 \quad (21)$$

其中, $\alpha_{i-2} = f_{i-2}/f_i$, $\alpha_{i-1} = f_{i-1}/f_i$. 对式(19)求导数有:

$$h''_{i-1,i-2} = 0 + \alpha_1 b_{11} + \alpha_2 b_{12} + \alpha_3 b_{13} + \alpha_4 b_{14} \quad (22)$$

类似有

$$h''_{i,i-2} = 0 + \alpha_1 b_{21} + \alpha_2 b_{22} + \alpha_3 b_{23} + \alpha_4 b_{24} \quad (23)$$

$$h''_{i+1,i-2} = 0 + \alpha_1 b_{31} + \alpha_2 b_{32} + \alpha_3 b_{33} + \alpha_4 b_{34} \quad (24)$$

式(20)~(24)确定了 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 和 α_4 五个值.

根据式(19), 频率 f_i 的实高 h_i 为:

$$h_i = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad (25)$$

如果满足式(20)~(25)的 α 值能够求出, 那么方程组必须是线性相关的, 由此得出常数 $p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}$ 和 p_{i5} 存在以下关系:

$$p_{i1}h_{i-2} + p_{i2}h_{i-1} + p_{i3}h''_{i-1,i-2} + \dots + p_{i4}h''_{i,i-2} + p_{i5}h''_{i+1,i-2} = h_i \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} p_{i1} + p_{i2} &= 1 \\ \alpha_{i-2}p_{i1} + \alpha_{i-1}p_{i2} + b_{11}p_{i3} + b_{21}p_{i4} + b_{31}p_{i5} &= 1 \\ \alpha_{i-2}^2p_{i1} + \alpha_{i-1}^2p_{i2} + b_{12}p_{i3} + b_{22}p_{i4} + b_{32}p_{i5} &= 1 \\ \alpha_{i-2}^3p_{i1} + \alpha_{i-1}^3p_{i2} + b_{13}p_{i3} + b_{23}p_{i4} + b_{33}p_{i5} &= 1 \\ \alpha_{i-2}^4p_{i1} + \alpha_{i-1}^4p_{i2} + b_{14}p_{i3} + b_{24}p_{i4} + b_{34}p_{i5} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

通过求解联立方程组式(27)确定频率 f_i 的五个多项式系数 p_{im} ($m=1,2,3,4,5$). 由式(28)计算 b_{jk} :

$$b_{jk} = k(f^2/f_i^2)t_m \sum_{r=1}^5 (\mu't)_r w_r g_r^{k-2} \quad (28)$$

其中, $j=1,2,3$ 时, f 分别等于 f_{i-1}, f_i 和 f_{i+1} , μ' 分别等于

$$\overline{\mu'_{i-1,i-2}}, \overline{\mu'_{i,i-2}}, \overline{\mu'_{i+1,i-2}}, t = \sqrt{1 - f_N^2/f^2}, t_m = \sqrt{1 - (f_{i-2}/f)^2}, x_r \text{ 和权值 } w_r \text{ 为:}$$

$$x_1 = 0.04691008, x_2 = 0.23076534, x_3 = 0.5, \quad (29)$$

$$x_4 = 0.76923466, x_5 = 0.95308992$$

$$w_1 = 0.11846344, w_2 = 0.23931434, w_3 = 0.28444444,$$

$$w_4 = 0.23931434, w_5 = 0.11846344$$

(30)

对应每个 j 值, 首先可以计算得到对应的 f 和 t_m 值. 对于给定的磁场强度和方向, $\mu't$ 的值仅取决于 f 和 t , 从五个 $t_r = x_r t_m$ 值相应可计算出五个 $\mu't$ 的值, 以及五个 $g_r = f_N/f_i = (f/f_i)(1 - t_r^2)^{1/2}$ 值. 然后对于 $k=1,2,3,4$ 的四个 b_{jk} 值由式(28)计算得到.

系数 α 和 b 计算出以后, 便可解联立方程组式(27)得到系数 $p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4}, p_{i5}$. 当 $i=3,4,5,\dots,n-1$, 完全重复以上计算过程能够给出每个频率 f_i 的五个多项式系数. 这里由于联立方程组式(27)在一定程度上是一个病态方程组, 在解方程组以前, 采用方程式之间相差后的联立方程组能够大幅提高其计算准确度 [4].

2.4 谷层剖面模型

谷宽 W_v 和谷深 F_v 是谷层剖面模型构建的重要参数. 基于预处理后 E 层数据使用交叠多项式模型反演的 E 层剖面, 估计谷层参数谷宽 W_v 和谷深 F_v , 具体表达式为 (Titheridge, 1985) [19]:

$$W_v = H_{\max}/2 - 40, F_v = 0.008W_v^2/(20 + W_v) \quad (31)$$

其中, H_{\max} 为 E 层临界频率对应的实高. 依据估计的谷层参数, 构建“三段型”谷层, 具体为:

$$\begin{cases} f_{\text{NV}} = q_1 h + p_1, H_{\max} \leq h \leq H_{\max} + 0.15W_v \\ f_{\text{NV}} = f_{\text{CE}} - F_v, H_{\max} + 0.15W_v \leq h \leq H_{\max} + 0.8W_v \\ f_{\text{NV}} = q_2 h + p_2, H_{\max} + 0.8W_v \leq h \leq H_{\max} + W_v \end{cases} \quad (32)$$

其中, f_{CE} 为 E 层临界频率, 系数 q_1 和 p_1 由 $[f_{\text{CE}}, H_{\max}]$ 和 $[f_{\text{CE}} - F_v, H_{\max} + 0.15W_v]$ 两点确定, 系数 q_1 和 p_2 由 $[f_{\text{CE}} - F_v, H_{\max} + 0.8W_v]$ 和 $[f_{\text{CE}}, H_{\max} + W_v]$ 两点确定. “三段型”谷层的第一段也可考虑用反抛物模型.

3 反演电离层剖面

3.1 缺失数据外推补偿预处理

(1) 构建电离层剖面数学模型

见式(1)和(2).

(2) 获取构建电离层模型参数

步骤 1 获取 E 层剖面参数: 假设垂测电离图判读得到的 E 层实测描述有 K 个点, 其对应的工作频率和虚高分别为 f_k 和 $h'(f_k)$, E 层临界频率和最小虚高分别记为 f_{CE} 和 h'_{minE} , 则对模型参数 $f_{\text{CE}}, h_{\text{bE}}, y_{\text{mE}}$ 分别在 $[f_{\text{CE}} - 0.2, f_{\text{CE}} + 0.2], [h'_{\text{minE}} - \delta_1, h'_{\text{minE}} + \delta_1], [0, \delta_3]$ (其中 $\delta_1,$

δ_2 和 δ_3 是搜索范围控制量)以一定步进取值得到不同组参数,每一组参数根据模型 E 层虚高的计算方法得到 K 个点的 $h''(f_k)$,然后计算实测虚高和模型计算虚高的误差平方和,使误差平方和达到最小的那组参数确定为 E 层剖面参数;

步骤 2 获取谷层剖面参数:选取 F1 层(当 F1 层不存在时,选取 F 层)实测描述点作为谷层相应实测虚高,用于选取谷层相应计算虚高以及确定谷层构建模型参数,假设共有 K 个点,其对应的工作频率和虚高分别为 f_k 和 $h'(f_k)$,基于最小二乘法计算 F1 层(或 F 层)剖面系数,并检查计算的系数是否满足 F1(或 F 层)层剖面单调递增的特性,最终搜索、迭代实现谷层剖面参数的获取;

步骤 3 获取 F 层剖面参数:得到谷参数后,若存在 F1 层,选取 F1 层和 F2 层实测描述数据,在保证剖面连续光滑的约束条件下,计算 F1 层和 F2 层剖面多项式系数 A_i ;若不存在 F1 层,步骤 2 便可获取 F 层剖面多项式系数 A_i ;

步骤 4 最终确定谷层、F 层参数:若存在 F1 层,将 Δf_c 在 $[0, f_{CF2} - f_{CF1}]$ 内遍历,选取使所有数据点计算虚高与实测虚高误差和最小的 Δf_c 对应的谷层、F1 层、F2 层参数作为最终的谷层、F1 层、F2 层参数;若不存在 F1 层,步骤 2 便可最终确定谷层、F 层参数。

(3) 缺失数据外推补偿预处理

基于上述构建的电离层模型,以及结合实测数据获取的各层构建模型的参数,通过模型计算实现缺失实测数据的外推补偿,形成趋势上连续的预处理数据,为后继实高的计算提供高质量的数据支撑。

3.2 E 层剖面反演

基于实测数据预处理的结果,假设 E 层共有 K 个数据点,其对应的工作频率和虚高分别为 f_i 和 h'_i ,基于五个系数的交叠多项式模型(式(26)),计算频率 f_i ($i = 3, 4, 5, \dots, K$) 对应的实高 h_i ,具体为:

(1) 计算多项式系数和平均群折射指数:基于实测数据外推补偿预处理的结果(工作频率和虚高分别为 f_i 和 h'_i ($i = 1, 2, 3, \dots, K$)),使用式(27)计算每个频率 f_i ($i = 3, 4, 5, \dots, K-1$) 相应的五个多项式系数;使用式(9)~(16)计算电波频率 f_i 和等离子体频率 f_j 处的群折射指数为 $\mu'_{i,j}$;使用式(17)和(18)计算电波频率 f_i 处 f_j 和 f_{j-1} 之间等离子体频率对应的群折射指数的均值 $\mu'_{i,2}, \mu'_{i,3}, \dots, \mu'_{i,i-1}$ 的值;

(2) 计算前三个频率的实高:设定频率 f_1, f_2 所对应的实高 h_1, h_2 均等于虚高 h'_1 ,用式(33)计算 $h''_{2,1}, h''_{3,1}, h''_{4,1}$ 的值,然后通过式(34)表示的五个系数的交叠多项式计算获得频率 f_3 的实高 h_3 ;

$$h''_{2,1} = h'_2 - h_1, h''_{3,1} = h'_3 - h_1, h''_{4,1} = h'_4 - h_1 \quad (33)$$

$$h_3 = p_{31}h_1 + p_{32}h_2 + p_{33}h''_{2,1} + p_{34}h''_{3,1} + p_{35}h''_{4,1} \quad (34)$$

(3) 计算 E 层其它频率的实高:使用式(26)表示的五个系数的交叠多项式顺次确定实高 h_i ($i = 4, 5, 6, \dots, n-1$),式中 $h''_{i-1,i-2}, h''_{i,i-2}, h''_{i+1,i-2}$ 计算表达式为:

$$h''_{i-1,i-2} = h''_{i-1,i-3} - \mu'_{i-1,i-2}(h_{i-2} - h_{i-3}) \quad (35)$$

$$h''_{i,i-2} = h''_{i,i-3} - \mu'_{i,i-2}(h_{i-2} - h_{i-3}) \quad (36)$$

$$h''_{i+1,i-2} = h'_{i+1} - h_1 - \sum_{j=2}^{i-2} \mu'_{i+1,j}(h_j - h_{j-1}) \quad (37)$$

3.3 谷层和 F 层剖面反演

基于实测数据预处理的结果,假设 F 层(当存在 F1 层时,这里 F 层指 F1 层和 F2 层)共有 K 个数据点,其对应的工作频率和虚高分别为 f_i 和 h'_i ,依据上述谷层参数估算方法估计谷宽 W_v 和谷深 F_v ,并构建相应谷层剖面,采用五个系数的交叠多项式模型计算频率 f_i ($i = 3, 4, 5, \dots, K$) 对应的实高 h_i ,具体为:

(1) 设置谷层参数:按照式(31)预置谷宽 W_v 和谷深 F_v 值,并使用式(32)构建谷层剖面;

(2) 计算多项式系数和平均群折射指数:方法同上述 E 层,其中用到的 f_{i-2} 值设置为 E 层临界频率 f_{CE} ;

(3) 计算前三个频率的实高:设定频率 f_1, f_2 所对应的实高 h_1, h_2 分别等于构建谷层剖面模型在频率 f_1, f_2 外推的值 h_{e1}, h_{e2} ,用式(38)计算 $h''_{2,1}, h''_{3,1}, h''_{4,1}$ 的值,然后通过式(34)表示的五个系数的交叠多项式计算获得频率 f_3 的实高 h_3 ;

$$h''_{2,1} = h'_2 - h'_{2,1}, h''_{3,1} = h'_3 - h'_{3,1}, h''_{4,1} = h'_4 - h'_{4,1} \quad (38)$$

$$\begin{cases} h'_{2,1} = \int_0^{h_i} \mu'(f_2, f_N) dh \\ h'_{3,1} = \int_0^{h_i} \mu'(f_3, f_N) dh \\ h'_{4,1} = \int_0^{h_i} \mu'(f_4, f_N) dh \end{cases} \quad (39)$$

(4) 计算 F 层其它频率的实高:使用式(26)表示的 5 个系数的交叠多项式顺次确定实高 h_i ($i = 4, 5, 6, \dots, K-1$),式中 $h''_{i-1,i-2}, h''_{i,i-2}$ 使用式(35)和(36)计算获得,由(40)计算 $h''_{i+1,i-2}$ 的值:

$$h''_{i+1,i-2} = h'_{i+1} - h'_{i+1,1} - \sum_{j=2}^{i-2} \mu'_{i+1,j}(h_j - h_{j-1}) \quad (40)$$

(5) 最大频率 f_K 对应实高 h_K 的计算:使用式(27)计算 f_K 对应的五个多项式系数,结合实测临界频率 f_{CF2} ,使用式(41)计算 $h'_{K+1,K-2}$ 的值,然后使用式(26)表示的五个系数的交叠多项式计算最大频率 f_K 对应实高 h_K 的值(Titheridge, 1967);

$$h'_{K+1,K-2} = \frac{1}{2} h'_K \left(1 + \frac{\Delta f}{f_{CF2} - f_K} \right) \quad (41)$$

式中, Δf 表示频率间隔 $f_{K+1} - f_K$ (等于 $f_K - f_{K-1}$)。

(6) 电离层峰高 h_c 的计算: 结合实测临界频率 f_{CF2} 计算电离层峰高 h_c , 具体表达式为 (Titheridge, 1967):

$$h_c = h_K + (h_K - h_{K-2}) / \left\{ \left(\frac{f_{CF2}^2 - f_{K-2}^2}{f_{CF2}^2 - f_K^2} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (42)$$

(7) 计算与实测虚高数据的误差: 依据上述步骤反演的剖面, 使用式 (43) 计算相应的虚高数据, 然后按照式 (44) 计算实测虚高 h_i^m 和模型计算虚高 h_i^n 之间的误差;

$$h_i^n = \int_0^{h_i} \mu'(f_i, f_N) dh \quad (43)$$

$$\varepsilon = \left[\sum_{i=1}^K (h_i^n - h_i^m)^2 \right]^{1/2} \quad (44)$$

(8) 确定最终剖面: 设置谷宽 W_v 和谷深 F_v 在 $[0.5W_v, 1.5W_v]$ 、 $[1.6F_v, 4.0F_v]$ 范围内以一定步进取值得到不同组合参数, 每一组参数重复以上步骤 (1) ~ 步骤 (7) 得到实测虚高和计算虚高的误差, 使误差达到最小的那组谷层参数和剖面确定为最终的谷层参数和剖面。

4 实测数据处理分析

为了验证基于数据预处理电离层剖面反演算法的实际反演效果, 在以上理论仿真研究的基础上, 选取中国电波传播研究所多个电离层垂测台站、不同时段的大量实测电离图数据, 使用该反演算法进行了电离层剖面的反演处理. E 层合成描述虚高的平均误差为 3.2 km, F 层合成描述虚高的平均误差为 8.5 km.

图 1 和图 2 给出了一组具体的反演实例. 图 1 为选取的我国中纬度台站的垂测电离图数据, 这是一个典型的三层 (E 层、F1 层和 F2 层) 电离层回波描述, 明显可见在 E 层低频段和 E 层临界频率附近存在大量数据缺失. 图 2 给出了基于数据预处理电离层剖面反演算法对图 1 的反演结果, 明显可见基于构建电离层模型对缺失实测数据实现了有效的外推补偿 (绿色圈点); 使用基于数据预处理电离层剖面反演算法获得了包含谷层, 而且 E 层和 F 层单调变化的电离层剖面 (蓝色短划线), 这使得剖面从电离层物理意义上更加符合实际情况, 显著优于采用实测数据的交叠多项式模型反演结果 (黑色点线), 以及采用实测数据插值结果的交叠多项式模型反演结果 (红色细实线). 图 2 中红色粗实线为使用基于数据预处理电离层剖面反演算法反演的剖面合成的虚高描述数据, 明显可见与实际描述数据吻合得较好, 有效地提高了交叠多项式模型电离层剖面反演方法的精确度.

为了进一步验证基于构建电离层模型数据预处理方法的有效性, 这里另选取了我国中纬度台站垂直探测回波描述较完整的一组电离图数据 (见图 3 所示, 其在 E 层低频段和 E 层临界频率附近仍存在部分数据缺失, 这两处由于受干扰和探测设备影响, 很难获得完整

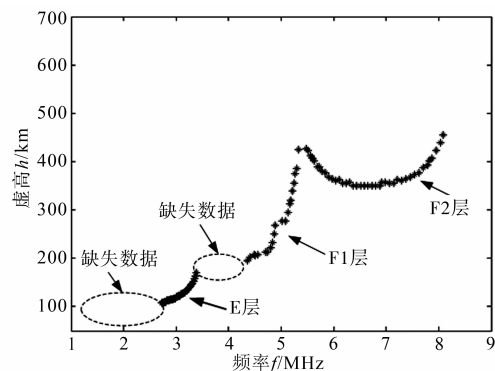


图1 垂测电离图

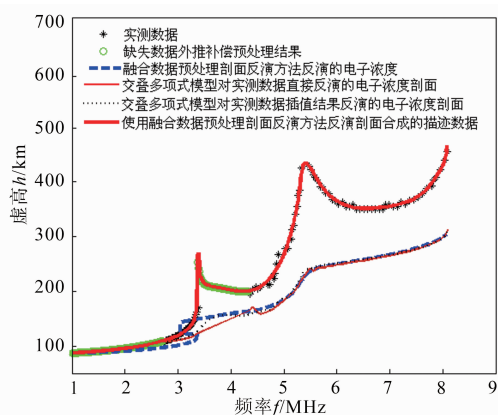


图2 电离层剖面反演结果对比

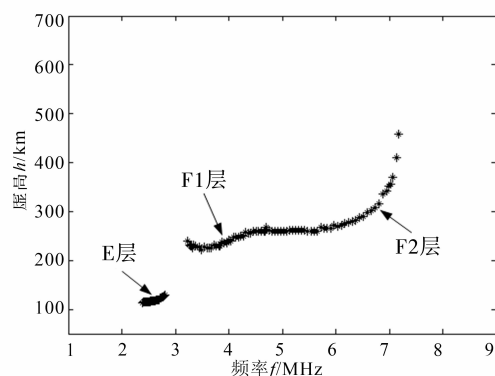


图3 回波描述较完整的垂测电离图

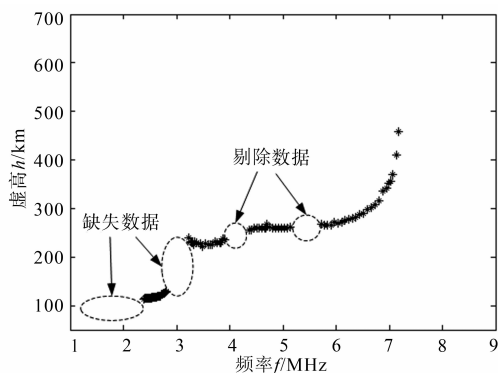


图4 剔除部分数据后的垂测电离图

的回波数据);剔除部分 F1 层和 F2 层的实测数据(见图 4 所示);使用基于电离层模型的数据预处理方法对缺失部分和剔除部分进行数据外推补偿,结果见图 5 所示,明显可见实现了 E 层低频段和 E 层临界频率附近缺失数据、F1 层和 F2 层剔除数据的插补(绿色圈点).

图 5 中的左上放大图为 F1 层剔除部分预处理结果与实测数据对比图,插值处理结果(红色十字点)的均方根误差为 7.496km,基于构建电离层模型外推补偿结果(绿色圈点)的均方根误差为 2.376km;图 5 中右下放大图为 F2 层剔除部分预处理结果与实测数据对比图,插值处理结果(红色十字点)的均方根误差为 9.837km,基于构建电离层模型外推补偿结果(绿色圈点)的均方根误差为 2.006km.因此,通过分析可见基于电离层模型的数据外推补偿方法的精度明显优于直接插值平滑处理的结果.

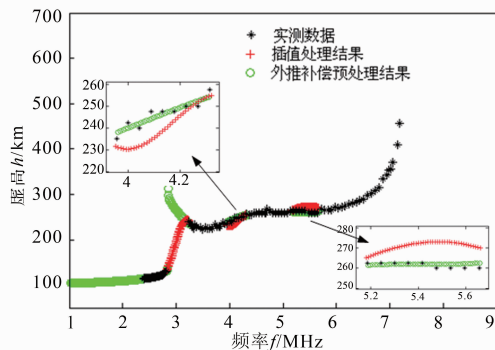


图5 预处理数据补偿后的垂测电离图

基于图 5 中所示外推补偿后较完整的回波数据,使用基于数据预处理的电离层剖面反演算法获得了包含谷层的单调平滑的电离层剖面,见图 6 中蓝色短划线所示.从图 6 中放大的小图明显可见人为剔除的 F1 层回波数据,如果不处理直接采用交叠多项式模型进行电离层剖面反演,则不仅没有合理地考虑实际存在的谷层,还会导致剖面不光滑、起伏大、非单调递增变化(红色细实线).基于三次样条算法插值平滑结果反演的剖面(黑色点线),同样也没有考虑谷层,并且由于插值误差较大,也导致剖面存在一定程度的起伏.

图 6 中使用基于数据预处理电离层剖面反演算法反演剖面合成的虚高描述数据(红色粗实线),与实际描述数据较好地吻合,证明了基于数据预处理电离层剖面反演算法的有效性和正确性.

5 结论

本文从理论建模和实测数据处理两方面,对基于直接算法思想的交叠多项式电离层剖面反演方法进行了反演效果分析.该方法以实测数据为基础,电离层剖面反演结果的合理性和精度受限于实际垂测电离图

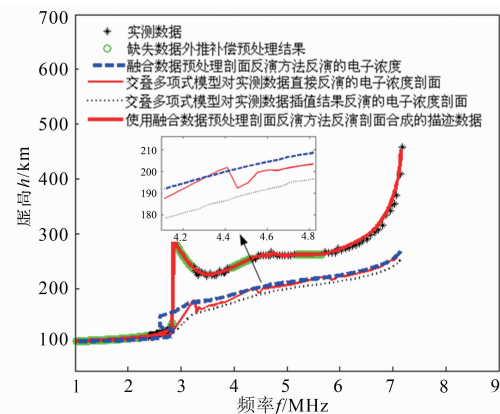


图6 电离层剖面反演结果对比

的质量,如果实测较多或大量数据缺失、或者未结合电离层传播特性对缺失数据插值处理,将导致反演剖面误差大幅增大,甚至错误;另外,对于实际存在的“谷层”反演也没有考虑.

针对上述交叠多项式电离层剖面反演方法存在的问题,本文提出了基于数据预处理的电离层剖面反演改进方法.该改进反演方法基于电离层传播特性,构建电离层剖面模型,结合实测虚高数据,首先实现了缺失数据的补偿预处理;然后理论构建“谷层”模型,以实测虚高和计算虚高误差最小为准则,通过搜索、迭代的方式合理地考虑并反演了实际存在的“谷层”.

使用本文提出的基于数据预处理的电离层剖面反演方法,对我国多个电离层垂测站的大量实测电离图数据进行了反演处理,获得了包含谷层、平滑、E/F 层单调的完整电离层剖面,为了验证反演精确度,基于反演结果通过虚高计算方法合成了虚高数据,其与实测虚高数据在趋势上也较好地吻合.因此,本文基于数据预处理的电离层剖面反演方法有效提高了交叠多项式模型电离层剖面反演的精确度.

参考文献

- [1] 焦培南,张忠治. 雷达环境与电波传播特性[M]. 北京: 电子工业出版社,2007.
- [2] J E Titheridge. The calculation of real and virtual heights of reflection in the ionosphere[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,1959,17(1):96-109.
- [3] J E Titheridge. A new method for the analysis of ionospheric $h'(f)$ records[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics,1961,21(1):1-12.
- [4] J E Titheridge. The overlapping polynomial analysis of ionograms[J]. Radio Science,1967,2(10):1169-1175.
- [5] J E Titheridge. Single-polynomial analysis of ionograms [J]. Radio Science,1969,4(1):41-51.
- [6] J E Titheridge. The relative accuracy of ionogram analysis techniques[J]. Radio Science,1975,10(6):589-599.

- [7] 郑体容. 关于电离层频高图的一种换算方法[J]. 地球物理学报, 1983, 26(2): 115 - 122.
Zheng Ti-rong. On a reduction method for $N(h)$ profiles from ionospheric $h'(f)$ curves[J]. Acta Geophysica Sinica, 1983, 26(2): 115 - 122. (in Chinese)
- [8] 熊年禄, 唐存琛, 等. 电离层物理概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999.
- [9] R J Lobb, J E Titheridge. The valley problem in bottomside ionograms analysis[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1977, 39(1): 35 - 42.
- [10] 叶公节, 刘兆汉. 电离层波理论[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [11] Bodo W. Reinisch, Huang Xueqin. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 3. Processing of bottomside ionograms [J]. Radio Science, 1983, 18(3): 477 - 492.
- [12] 郑传青. 垂直探测频高图的反演[J]. 电波科学学报, 1992, 7(4): 64 - 74.
Zheng Chuan-qing. The Inversion of the vertical sounding ionogram[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1992, 7(4): 64 - 74. (in Chinese)
- [13] D Bilitza. International reference ionosphere 2000[J]. Radio Science, 2001, 36(2): 261 - 275.
- [14] R J Norman. An inversion technique for obtaining quasi-parabolic layer parameters from VI Ionograms [A]. Proceedings of the International Conference Radar, 2003 [C]. Adelaide, SA, Australia: IEEE, 2003. 363 - 367.
- [15] 孙宪儒. 亚大地区 F2 电离层预测方法[J]. 通信学报, 1987, 8(6): 37 - 45.
- [16] GJB1925-94, 中国参考电离层[S]. 1994.
- [17] K Davies. Ionospheric Radio [M]. England: Short Run Press Ltd, Exeter, 1990.
- [18] Huang Xueqin, Bodo W Reinisch. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms 2. True height inversion of topside ionograms with the profile-fitting method[J]. Radio Science, 1982, 17(4): 837 - 844.
- [19] J E Titheridge. Ionogram analysis with the generalized program polan[R]. Washington: World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, 1985.

作者简介



鲁转侠 女, 1978 年出生, 陕西人, 高级工程师, 主要研究方向为电离层回波信号处理、模式识别及传播特性分析。
E-mail: zhuanxialu@163.com

柳文 男, 1973 年出生, 研究员, 主要研究方向为电离层物理及电波传播。

蔚娜 女, 1981 年出生, 山东人, 高级工程师, 主要研究方向为雷达信号处理和电波传播。

娄鹏 男, 1982 年出生, 河南人, 高级工程师, 主要研究方向为电离层传播特性。