0254-6124/2012/32(4)-524–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Feng Jing, Li Xue, Qi Dongyu. Methods for extracting backscatter ionogram leading edges. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 524-531

返回散射电离图的前沿提取方法*

冯 静 李 雪 齐东玉

(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘 要 提出了返回散射电离图前沿提取的方法. 其中, 一层电离图前沿和两层电离图下面一层前沿是在消除干扰和噪声后的电离图上采用边缘识别方法进行提取的, 两层电离图上面一层前沿则是在仅经过干扰抑制的电离图上采用基于高斯型加权系数的能量梯度算法进行提取的. 本文提出的前沿提取方法准确率较高, 并且易于实现, 已在工程中得到应用.

关键词 返回散射, 电离图, 前沿提取

中图法分类号 V 524, TN 01

Methods for Extracting Backscatter Ionogram Leading Edges

FENG Jing LI Xue QI Dongyu

(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao* 266107)

Abstract Algorithms for automatic backscatter ionogram scaling are established. The algorithms are used in the backscatter sounding system developed by China Research Institute of Radiowave Propagation (CRIRP) and show good results. The autoscaling system has been developed in two overall stages. The first stage is the automatic cleaning of a raw ionogram, which filters the raw ionogram to remove the interferences and noises. The second stage is to extract features from the clean ionogram, such as the propagation modes, the leading edges, *etc.*, and this paper describes part of this work. Methods for extracting backscatter ionogram leading edges are presented. For a single layer or the lower one of two layers, the leading edge is extracted by edge identification algorithm on the ionogram with interferences and noises removed. For the upper one of two layers, the leading edge is extracted by power and gradient algorithm based on Gaussian-fashion weights on the ionogram just after interference suppression. The methods given in this paper have high accuracy and are easy to implement. They are applied successfully in several projects.

Key words Backscatter, Ionogram, Leading edge

* 国家自然科学基金项目资助 (61032011)

2011-07-26 收到原稿, 2012-03-05 收到修改稿

E-mail: hellen1917@163.com

0　引言

无线电波斜投射到电离层, 被反射到远方地面, 地面的起伏不平及电特性不均匀性使电波向四面八方散射, 而有一部分电波将沿着原来或其他可能的路径再次经电离层反射回到发射点, 被那里的接收机接收, 这就是返回散射传播原理. 目前返回散射探测已经成功应用于以下方面 [1−6]: (1) 确定短波传播跳距以及不同地球物理因素影响下跳距随时间的变化, 返回散射探测是目前研究此问题的唯一方法; (2) 监视和预报短波电路上的工作条件, 例如电波覆盖区、最高可用频率等; (3) 为天波超视距雷达频率管理系统提供重要的选频依据; (4) 利用返回散射回波前沿可以推算电离层结构.

Jiao[7] 和 Yang 等 [8] 还利用返回散射探测技术研究日环食的电离层效应. 返回散射探测的上述应用完全依赖于返回散射电离图信息的准确、实时提取, 尤其是天波超视距雷达需要频率管理系统实时提供不同的工作频率, 要求返回散射电离图的信息提取快速、准确. 传统的人工判读方式难以满足实时性要求, 因此返回散射电离图的自动判读具有重要意义.

关于返回散射电离图自动判读的研究目前较少, 文献 [9] 提出了一种简单的返回散射电离图干扰和噪声去除方法, 但是在去除干扰和噪声的过程中信号损失较大; 文献 [10] 给出了基于迭代去噪的返回散射同频干扰修复方法, 与传统方法相比具有更佳统计性能, 但运算速度还有待提高; 文献 [11] 提出利用平均频谱密度结合判断门限的方法来抑制射频干扰, 但是实现起来硬件设备较为复杂. 上述研究均未提及返回散射电离图的前沿识别问题. 由于判读技术的工程适用性较差, 因此, 很长一段时间内返回散射电离图的信息提取主要以人工判读为主, 其在信息提取的实时性、准确性和完备性方面存在较多缺陷. 我们利用中国电波传播研究所研制的返回散射探测系统, 建立了一套完整的返回散射电离图自动判读算法. 算法分为两部分, 第一部分为原始电离图噪声和干扰的自动去除技术, 第二部分为电离图信息的自动提取技术. 文献 [12] 已经对算法的第一部分进行了介绍, 本文主要涉及算法第二部分内容, 介绍返回散射电离图的前沿识别技术.

1　返回散射电离图单层前沿提取

使用文献 [12] 描述的返回散射电离图去除噪声和干扰算法对原始探测电离图 (下文简称原始图) 进行处理, 可以得到一幅干净的电离图 (非回波信号数据点全部置为零), 对于只有单个传播层回波的返回散射电离图来说, 其下边界即是回波前沿. 理论上说, 在一幅干净的电离图上, 每个频点从低距离门开始向高距离门进行搜索, 找到的第一个非零数据点就是该频点的前沿点, 如果该频点上没有非零数据点, 则将其前沿点置为零. 但是, 对于一些留存有未去除干净噪声或干扰的电离图, 该方法往往不能凑效.

如图 1 所示, 这幅返回散射图经过干扰和噪声去除之后真实前沿线下还留存部分噪声, 按照上述方法寻找的前沿描迹示于图 1 中. 从图 1 可以看出, 很多前沿点属于伪前沿点, 与真实前沿相比具有较大误差, 还需要对其进行修正. 考虑到返回散射前沿线一般是一条距离随频率单调不减的曲线, 即使在出现电离层扰动的情况下, 前沿线呈现波动状, 也不会出现杂乱无章的骤升和骤降, 因此设计修正算法如下.

对于所有的非零前沿点, 按照频点从左向右顺序处理, 如果右一非零前沿点比左一非零前沿点低出很多或高出很多, 则进行如下判断.

(1) 若低出某个门限值, 则寻找右一非零前沿点所在频点上一小块噪声之后的第一个非零点作为新前沿点, 如果重新找的这个前沿点仍比左一非零前沿点低很多, 则继续寻找下一块噪声之后的第一个非零点, 直到不再满足条件.

(2) 若高出某个门限值, 则可能是在前面去除干扰和噪声的过程中右一非零前沿点的真实前沿回波信号被误消, 该频点已不存在真实的前沿点, 将此前沿点置为零.

经过修正伪前沿之后提取的前沿描迹示于图 2, 由图可见伪前沿均得到了修正, 但同时也出现了一些零值前沿. 为了得到一条连续、平滑的前沿描迹, 使用最小二乘法对修正后的前沿进行拟合, 拟合函数采用多项式, 多项式的次数取值范围从 1 到 7, 依据拟合误差最小原则自适应选择多项式次数. 拟合后的前沿描迹示于原始图 (图 3) 中. 可以看出, 按照本节介绍的算法给出的前沿描迹较好地贴近于真实前沿.

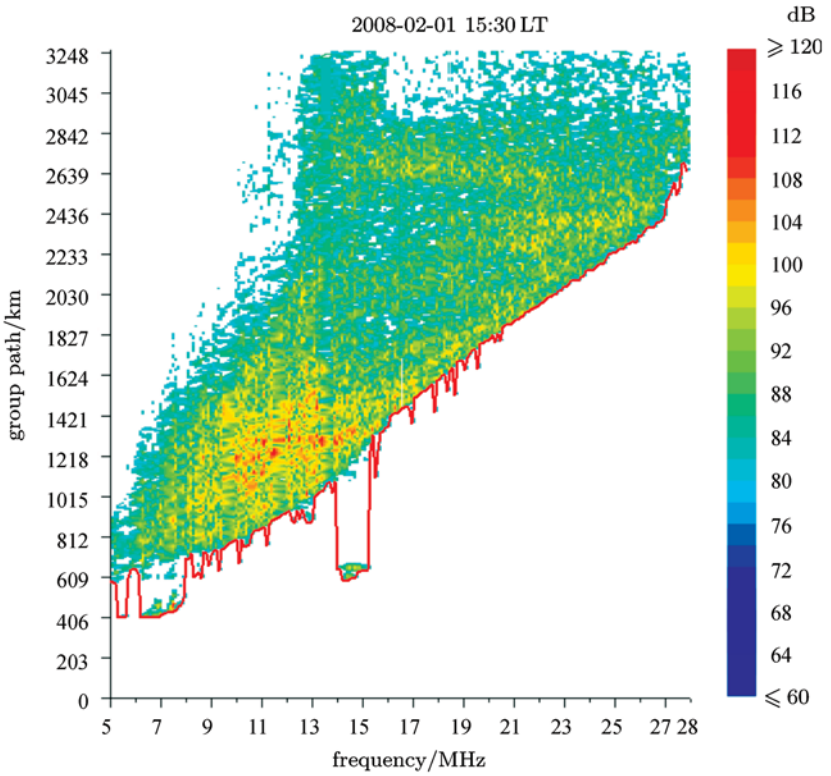


图 1 直接寻找第一个非零点提取的前沿

Fig. 1 Leading edge extracted by directly finding the first non-zero point

2 返回散射电离图两层前沿提取

图 4 为一幅具有两层回波的返回散射电离图 (已经去除噪声和干扰). 其中, 下面一层的前沿可以利用第 1 节介绍的方法进行提取. 上面一层前沿的提取算法是本文介绍的重点, 因为它的一部分前沿位于两层的混合模式区域, 前沿位置不容易辨认, 提取较为困难.

针对前沿位置区域的不同, 将其分为混合模式区前沿和单模式区前沿, 分别利用不同的算法进行提取. 分界点取在图 4 中的 B 点, B 点是下面一层的上边界与上面一层前沿的交叉点. B 点所在频点之前的前沿属于混合模式区前沿, 之后的前沿属于单模式区前沿.

单模式区前沿的提取同样采用第 1 节介绍的方法, 在经过噪声和干扰去除后的电离图上, 仅在 B 点所在频点之后和所在距离门之上的区域 (虚线框内) 提取单模式区前沿. 其结果用黑线示于图 4 (拟合前的结果).

由于返回散射的聚焦效应, 一般来说, 前沿位置信号能量较强, 水平方向和垂直方向上均存在较大的梯度, 因此可以利用前沿的能量和梯度特征提取混合模式区前沿. 为了避免去除噪声和干扰之后信号区会存在某些空洞, 造成周围数据点的能量梯度较大, 这里在仅经过干扰抑制 (使用文献 [12] 中的去除射频干扰算法和补偿射频干扰信道的信号算法) 的电离图上进行前沿的提取, 只处理 B 点所在频点之前的数据点.

假设每个数据点 (x, y) 的能量用 $P(x, y)$ 表示, 其中, x 表示频率, y 表示距离. 记其水平梯度

$$G_{\mathrm{h}}(x, y) = P(x, y) - P(x + 1, y),$$

垂直梯度

$$G_{\mathrm{v}}(x, y) = P(x, y) - P(x, y - 1),$$

其在图中的位置关系如下:

$$\begin{array}{ccc} (x, y) & \rightarrow & (x + 1, y) \\ \downarrow & & \\ (x, y - 1). & & \end{array}$$

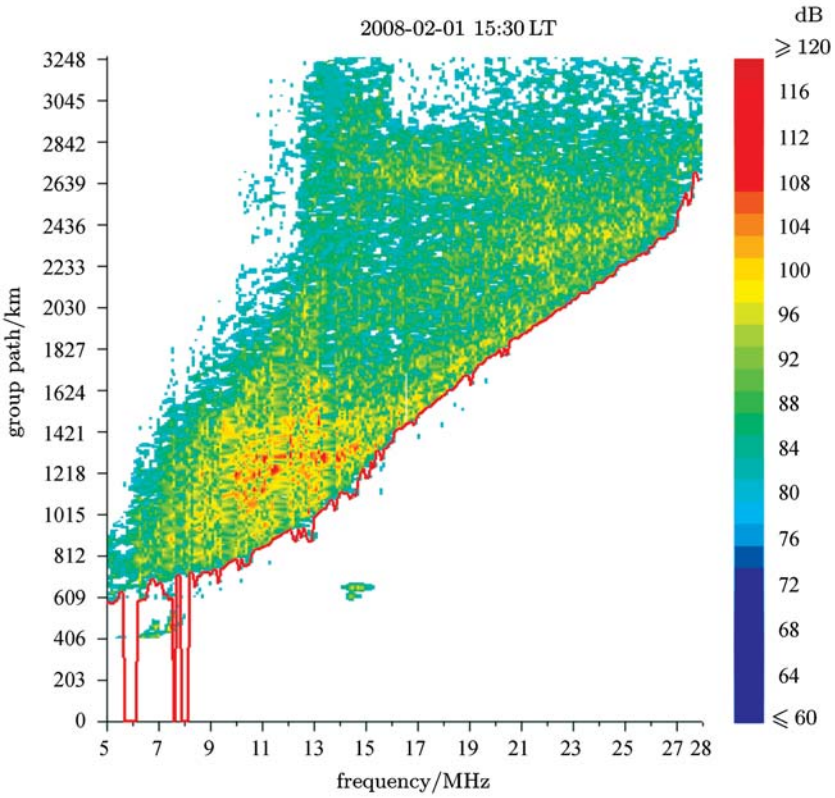


图 2　修正伪前沿后的前沿

Fig. 2　Leading edge after correcting pseudo points

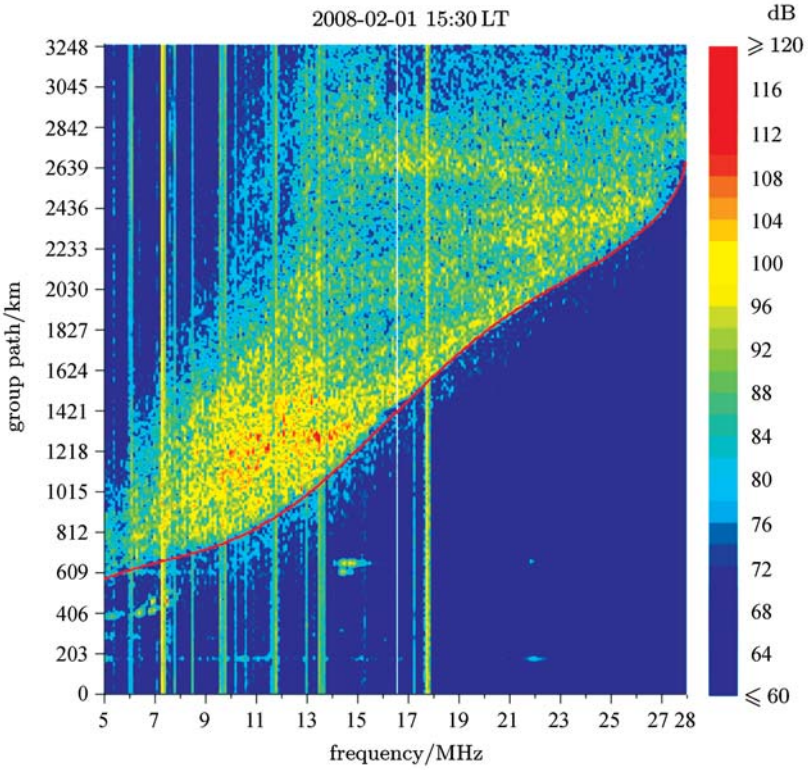


图 3　拟合后的前沿

Fig. 3　Fitted leading edge

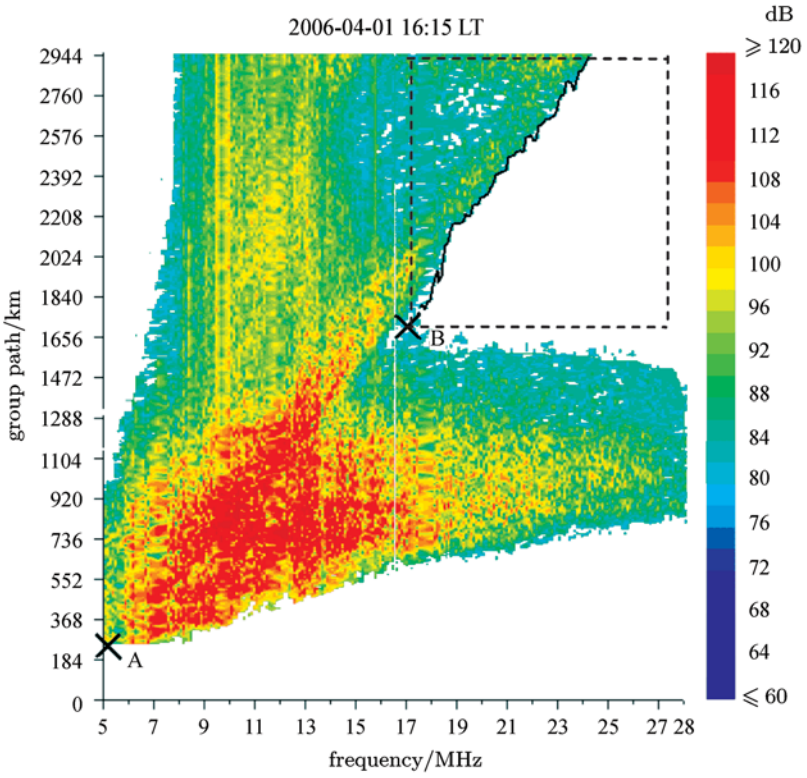


图 4 干净电离图中提取的上面一层的单模式区前沿

Fig. 4 Leading edge for the single-mode region in the upper layer of the clean ionogram

每个数据点的梯度 $G(x,y)$ 用其水平梯度和垂直梯度的几何平均数表示, 前沿位置的水平梯度和垂直梯度均应该大于 0, 因此只考虑水平梯度和垂直梯度均大于 0 的数据点, 所以定义

$$G(x,y)=\begin{cases}\sqrt{G_{\rm h}(x,y)G_{\rm v}(x,y)}, & G_{\rm h}(x,y)>0,\\ & G_{\rm v}(x,y)>0;\\ 0, & \text{其他.}\end{cases}$$

用每个数据点能量和梯度归一化后的平均值作为其代表前沿点的分数, 记为 $D(x,y)$. 注意图 4 中标记的 A, B 两点 (分别记为 (x_A,y_A), (x_B,y_B)), A 点是下面一层前沿的第一个前沿点, B 点同上文所述. 显而易见, 越靠近由 A, B 两点连成的直线 $\overline{AB}$, 数据点是前沿点的可能性越大. 因此, 将每个数据点的权重定义为高斯型, 当数据点逐渐远离直线 $\overline{AB}$, 即直线

$$y=(x-x_A)(y_B-y_A)/(x_B-x_A)+y_A$$

时, 其权重以高斯形式逐渐下降. 定义数据点 (x,y) 的权重 $W(x,y)$ 为下列表达式:

$$W(x,y)=\exp\left(\left\{-\left[y-((x-x_A)(y_B-y_A)/(x_B-x_A)+y_A)\right]\right\}^2\times\frac{1}{2}\sigma^{-2}\right).$$

其中, σ 为权重系数的标准差, 也是算法中的控制参数. 经过大量数据验证, 发现 σ 取值为 20 效果较好. 很容易得知, 在直线

$$y=(x-x_A)(y_B-y_A)/(x_B-x_A)+y_A$$

上的数据点, 其权重 $W(x,y)=1$, 而远离该直线的数据点其权重将趋于 0.

每个数据点的分数 $D(x,y)$ 的最终表达形式为

$$D(x,y)=W(x,y)\times[P_{\rm norm}(x,y)+G_{\rm norm}(x,y)]/2.$$

其中, 下标 norm 表示归一化. 每个频点上选取分数最高的数据点作为混合模式区的前沿点. 提取结果如图 5 所示.

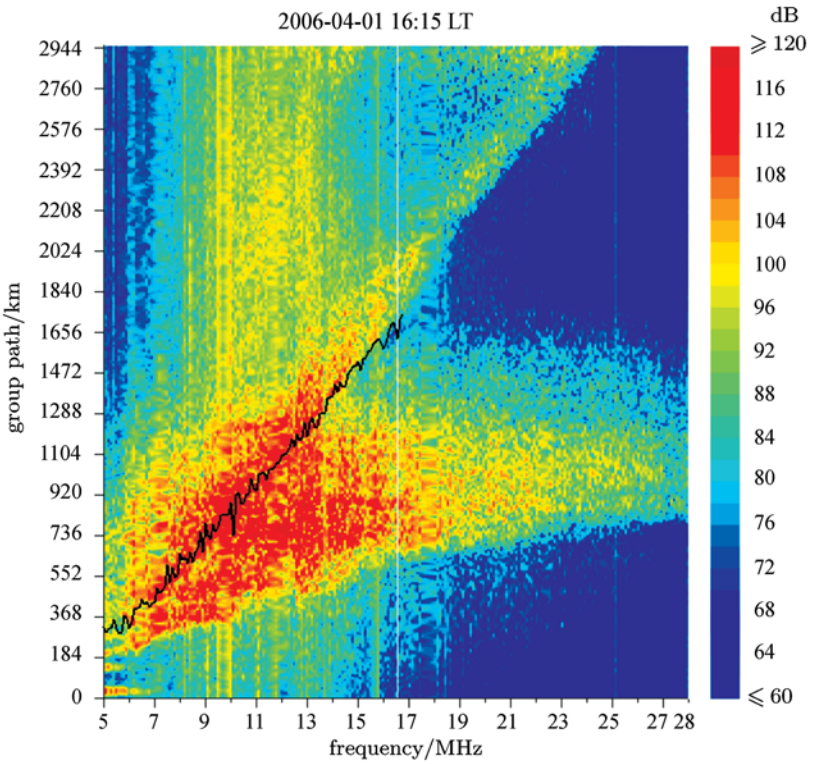


图 5　在仅经过干扰抑制的电离图中提取的上面一层的混合模式区前沿

Fig. 5　Leading edge for the mixed-mode region in the upper layer from the ionogram just after interference suppression

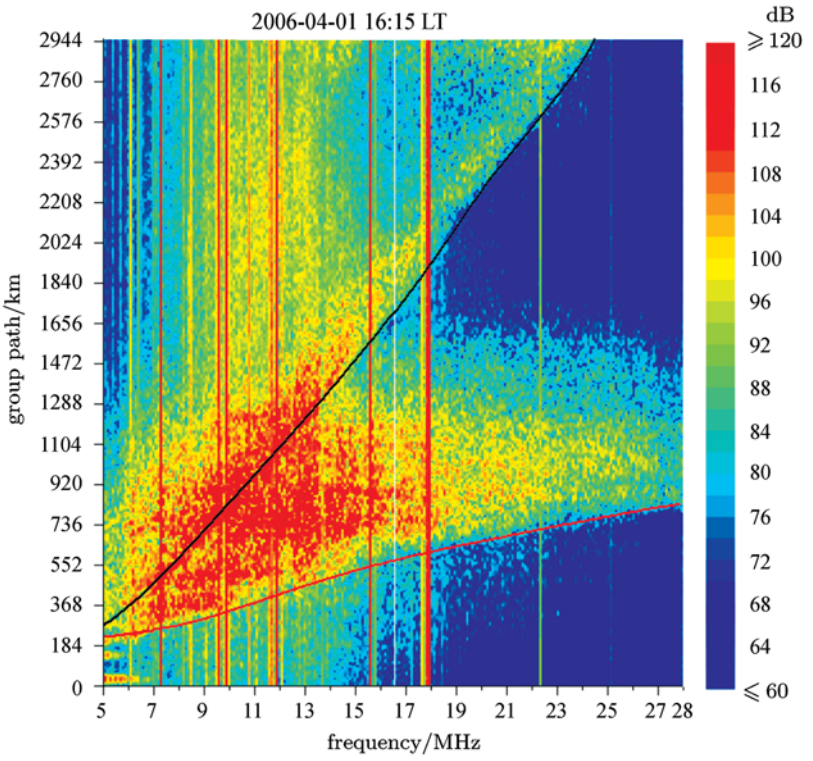


图 6　两层电离图拟合后的前沿

Fig. 6　Fitted leading edges in the two-layer ionogram

为了得到一条连续、光滑的前沿线, 这里使用最小二乘法对提取的单模式区前沿和混合模式区前沿一起进行拟合, 拟合函数仍然采用多项式, 多项式的次数取值范围从 1 到 7, 依据拟合误差最小原则自适应选择多项式次数. 将两层电离图下面一层和上面一层拟合后的前沿一起显示于原始图 (图 6) 中. 容易看出, 上面一层的前沿描迹无论是混合模式区前沿还是单模式区前沿, 均很好地反映了真实前沿的位置, 同时也验证了上述前沿提取算法的有效性.

3 结论

本文介绍了返回散射电离图的前沿识别技术, 涉及一层前沿和两层前沿的提取算法. 其中一层前沿和两层中下面一层前沿均在消除干扰和噪声的电离图上 (使用文献 [12] 的方法) 采用边缘识别方法进行提取; 两层中上面一层前沿的提取则根据前沿位置的不同而采取不同的算法, 处于单模式区的前沿仍然采用边缘识别方法进行提取, 处于混合模式区的前沿提取则是在仅经过干扰抑制的电离图上, 利用前沿的聚焦效应, 将每个数据点的分数定义为能量和梯度的平均值, 并施以高斯型权重, 各个频点选取分数最高的数据点作为前沿点. 各层按照上述方法提取出前沿之后, 为得到一条连续光滑的曲线, 再利用多项式最小二乘法进行拟合, 多项式次数依据拟合误差最小原则自适应选择.

前沿识别算法是返回散射电离图自动判读技术的重要内容. 确定各个传播层的前沿后, 便可以确定模式观测区及最高可观测频率等. 图 7 给出了第 3 节中的两层返回散射电离图确定的模式观测区.

本文提出的返回散射前沿提取算法准确率高, 并且计算速度快, 适合于对实时性要求较高的系统. 该算法已在工程中得到应用.

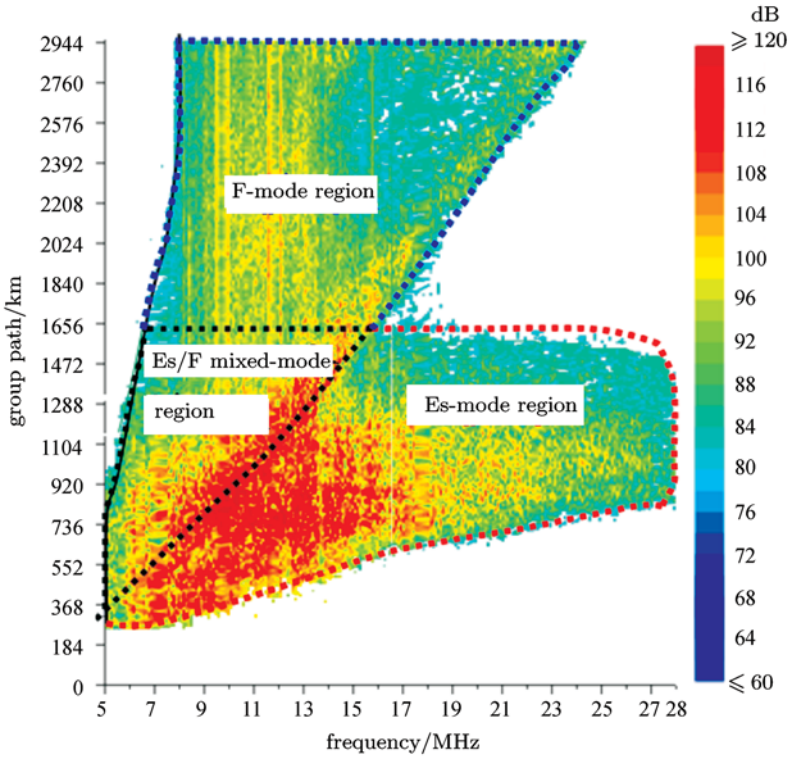


图 7 根据提取的前沿确定模式观测区

Fig. 7 Determine mode observation regions with extracted leading edges

参考文献

[1] Croft T A. Sky-wave backscatter:A means for observing our environment at great distances [J]. *Rev. Geophys.*, 1972, **10**(1):73-155

[2] Coleman C J. On the simulation of backscatter ionograms [J]. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 1997, **59**(3):2089-2099

[3] Earl G F, Ward B D. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar [J]. *Radio Sci.*, 1987, **22**(2):275-291

[4] Huang Deyao. A method for calculating the short circuit communication frequency in a sounding zone using backscatter techniques [J]. *Commun. Technol. Develop.*, 1993, **1**(4):119-122. In Chinese (黄德耀. 利用返回散射技术推算探测区内短波电路通信频率的方法 [J]. 通信技术与发展, 1993, **1**(4):119-122)

[5] EARL G F. An algorithm for the removal of radio frequency interference in ionospheric backscatter sounding [J]. *Radio Sci.*, 1991, **26**(3):661-670

[6] Liu Wen, Jiao Peinan, Wang Junjiang. An inverse algorithm of oblique ionogram and its stability [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2003, **18**(6):597-601. In Chinese (柳文, 焦培南, 王俊江. 斜测电离图反演及其不稳定性研究 [J]. 电波科学学报, 2003, **18**(6):597-601)

[7] Jiao Peinan. The ionospheric undulations during the annular eclipse of September 23, 1987 [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1990, **33**(4):391-398. In Chinese (焦培南. 1987 年 9 月 23 日日环食的电离层波动现象 [J]. 地球物理学报, 1990, **33**(4):391-398)

[8] Yang zijie, Shi Zhenhua, Guan Rongsheng. Using frequency sweep backward scattering study of the ionospheric effects of the annular solar eclipse [J]. *Radio Sci.*, 1990, **5**(1):10-17. In Chinese (杨子杰, 石振华, 管荣生. 利用扫频后向散射法研究日环食的电离层效应 [J]. 电波科学学报, 1990, **5**(1):10-17)

[9] Cheng Xiaomei, Guo Baohua. A method for removing the interference and noise on backscatter ionogram [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1994, **14**(2):160-162. In Chinese (程晓梅, 郭保华. 返回散射电离图干扰噪声的消除方法 [J]. 空间科学学报, 1994, **14**(2):160-162)

[10] Xu Bin, Wu Jiaji, Wu Zhensen, *et al.* A recovery method based iterated de-noising for radio interference on backscatter ionogram [J]. *Chin. J. Radio Sci.*, 2007, **22**(3):395-399. In Chinese (徐彬, 吴家骥, 吴振森, 等. 基于迭代去噪的返回散射同频干扰修复方法 [J]. 电波科学学报, 2007, **22**(3):395-399)

[11] Chen Qifen. Elimination of ionospheric backscattering sounding radio frequency interference algorithm [J]. Radio propagation and antenna, 1993 (5):34-39. In Chinese (陈其芬. 消除电离层返回散射探测射频干扰的一种算法 [J]. 电波与天线, 1993 (5):34-39)

[12] Qi Dongyu, Feng Jing, Li Xu. Algorithms for automatic c leaning of backscatter ionograms [J]. *Prog. Geophys.*, 2011, **26**(6):1925-1930. In Chinese (齐东玉, 冯静, 李雪. 返回散射电离图噪声和干扰的自动消除方法 [J]. 地球物理学进展, 2011, **26**(6):1925-1930)