

返回散射电离图仰角信息提取方法研究

华彩成,王世凯,张成峰,冯 静

(中国电波传播研究所,山东青岛,266107)

摘 要: 利用短波二维天线阵列,在国内首次获得了高频返回散射扫频-仰角电离图,本文结合遗传算法和 Otsu 法对群距离-频率-能量三维电离图进行信号区域提取,通过连通域标记方法进行离散点噪声消除,获取“干净”信号,然后利用 Canny 算子获得频率对应回波信号分布的最近和最远群距离,在群距离-频率-仰角三维电离图上,提取相应频率的仰角-群距离分布数据,分别利用线性曲线拟合、对仰角求对数拟合和对群距离求对数拟合的方式对数据点进行处理,通过青岛观测站的测高仪数据对拟合后的曲线分别进行了误差分析,结果显示,对群距离求对数拟合得到的曲线与目标曲线的符合较好,证明了提取方法的有效性。

关键词: 短波;二维阵列;电离图;仰角;拟合方法

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)11-2438-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.11.028

Research on Extraction Method of Elevation from Backscatter Ionogram

HUA Cai-cheng, WANG Shi-kai, ZHANG Cheng-feng, FENG Jing

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

Abstract: Utilizing short-wave two-dimensional antenna arrays, the HF backscatter sweep frequency-elevation ionogram is obtained for the first time in China. In this paper combining genetic algorithm and Otsu for the signal extraction of the group-frequency-energy three-dimensional ionogram. Using the connected domain marking to eliminate discrete point noise, obtain the clean signal, and use the Canny detection method to obtain the nearest and farthest distance of each frequency in the echo signal. On the group-frequency-elevation three dimensional ionogram, the elevation-group data of each frequency is acquired, Fitting the points by the polynomial fitting, logarithmic fitting of the elevation and logarithmic fitting of the group, Finally performing error analysis of the fitted curve through the vertical detection data of the Qingdao observation station. The result show that the logarithm of the group obtained curve is in good agreement with the target curve. The validity of the extraction method is proved.

Key words: short-wave; two-dimensional arrays; ionogram; elevation; fitting method

1 引言

返回散射探测技术作为一种电离层诊断手段,是获得大区域电离层实时状态、短波信道传播条件整体评估的有效技术,对短波应用系统性能发挥提升、大区域电离层状态获取具有极其重要的意义(G F Earl, 1987^[1]; T A Croft, 1972^[2]; C J Coleman, 1997^[3]).

法国在二十世纪 60 年代开始返回散射探测系统的研制工作,自行研制的天波超视距雷达系统(NOS-TRADAMUS)采用 Y 形收发天线阵列,具备全方位电离层探测及天波回波到达角测量能力,获得了仰角-频率-群距离三维返回散射电离图.并结合模拟退火

方法、贝叶斯估计方法以及利用已知同频干扰信息开展了电离层反演技术研究(E Benito, 2008^[4-6]; JP Molinie, 2006^[7], 2008^[8]; T Landeau, 1997^[9]),但在仰角信息提取方面仅提及能量阈值,并没有给出具体算法.

澳大利亚的 Jindalee 超视距雷达接收天线阵为“L”型阵列,也可以获得一定仰角分辨率的返回散射扫频电离图.其学者由理论推导出了返回散射的特性方程,并利用射线追踪结合电离层电子浓度模型,仿真了射线仰角信息、电离层梯度信息对返回散射电离图的影响,基于获得的仰角电离图和 QP 准抛物模型对电离层

电子浓度剖面进行了反演试验 (Russell C, 1997^[10]; R J Norman, 1997^[11]). 关于仰角的提取的方法及过程, 文中并未进行叙述.

在国内, 中国电波传播研究所和武汉大学开展了大量返回散射探测技术研究. 武汉大学在 2007 年研制了斜向返回式探测系统, 开展了电离图处理及电离层参数反演技术研究 (宋君, 2011^[12]; 苏凡凡, 2011^[13]). 中国电波传播研究所从上世纪 60 年代起开始返回散射探测技术研究工作, 70 年代研制出基于线性调频脉冲的返回散射探测系统, 在系统开发、电离图信息提取、电子浓度反演、海杂波分析及海态反演等方面均开展了大量的研究 (焦培南, 1986^[14]; 孙广俊, 2005^[15]). 但以上研究工作中, 均未涉及对二维返回散射探测仰角信息提取技术的研究.

近年来中国电波传播研究所建立了“L”型接收天线阵列的电离层返回散射探测试验平台, 具备仰角扫描探测的功能. 本文基于该试验平台获取的返回散射仰角数据, 对仰角-群距离曲线提取方法进行研究.

2 仰角参数提取流程

返回散射回波仰角参数提取主要流程包括四个部分: (1) 同频干扰处理; (2) 仰角扫描返回散射回波信号

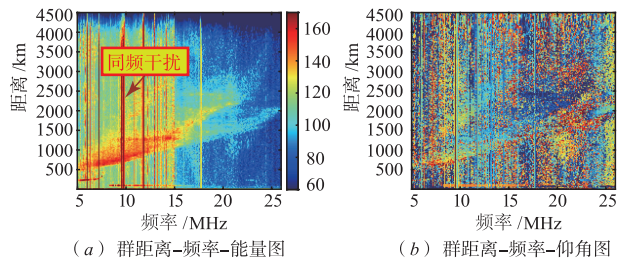


图2 返回散射探测原始电离图

4 仰角扫描的返回散射回波信号提取

采用 Otsu 法对信号和噪声背景进行分割, 获取回波的边界信息. 返回散射电离图的形成与电离层球形聚焦、电波传播过程的时间聚焦特性相关, 其能量值和背景存在不同的灰度特性, Otsu 法对此类图像处理具有较好的效果. 本文引入遗传算法, 用于快速寻找适应度函数的最优解.

适应度函数为:

$$\sigma^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \quad (1)$$

其中, ω_0 和 ω_1 分别代表由阈值 T 分成的目标和背景的灰度级出现的概率, μ 为整幅图的均值, μ_0 和 μ_1 分别为目标和背景的均值. σ^2 取最大值时对应的阈值 T 为最佳阈值.

遗传算法的初始设置条件如下: 初始种群大小 100,

提取; (3) 回波信号边界及仰角-群距离点迹提取; (4) 仰角-群距离曲线拟合与验证. 算法的具体流程见图 1.

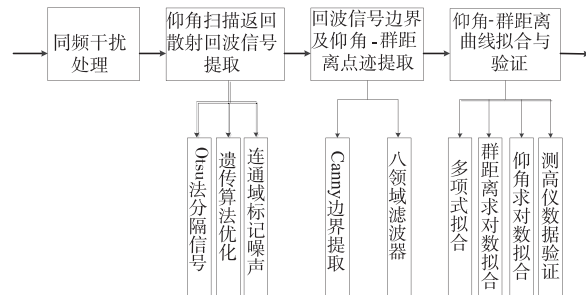


图1 返回散射回波仰角提取算法流程图

3 同频干扰处理

在电离图中有许多平行于距离轴, 呈垂线型、幅度较大的同频干扰能量出现, 如图 2(a) 所示, 其为返回散射探测试验平台在 2017 年 10 月 30 日 15 点 15 分获得的群距离-频率-能量三维电离图, 图 2(b) 为对应的群距离-频率-仰角三维电离图. 此类同频干扰信号影响着回波信号的提取, 需要将其去除. 采用文献 (冯静, 2012^[16]) 中的方法, 对电离图中的同频干扰信道信号进行剔除和补偿处理, 结果分别见如图 3(a) 和图 3(b).

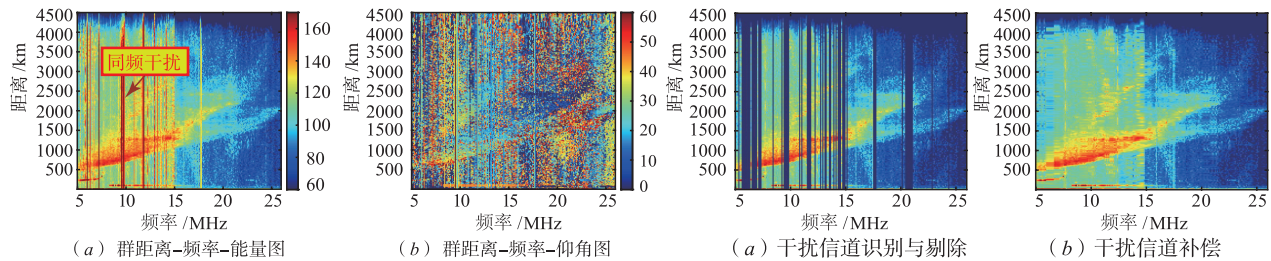


图3 返回散射电离图同频干扰的识别及补偿

交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.3, 遗传代数 500, 其回波信号提取后的图像如图 4(a) 所示. 在提取的回波信号中, 存在一些离散的能量点分布, 采用连通域标记方法, 标记出各能量分布区域, 将孤立不连续区域的能量剔除.

5 仰角扫描的返回散射回波信号边界及点迹提取

利用 Canny 算子对回波信号提取后的电离图进行边界检测, 其检测的边界结果如图 4(b) 所示, 图中 A、B 两点是探测频率 9.0 MHz 对应的起始距离和终止距离. 利用获得的回波信号边界分布信息, 在群距离-频率-仰角图上获得相应的仰角-群距离分布.

设计一种空域滤波器 (F Arıkan, 2000^[17]), 滤波器对每一个非零点进行检测, 满足检测点周围 8 个单元内非零点数不小于 4, 则认为此点为回波信号. 经过滤

波处理后的仰角图如图 5(a), 本文提取图 5(a) 中频率 $f=9.0\text{MHz}$ 对应的仰角值, 根据图 4(b) 中的 A、B 两点的距离值大小, 将区间内的所有仰角信息从图 5(a) 中

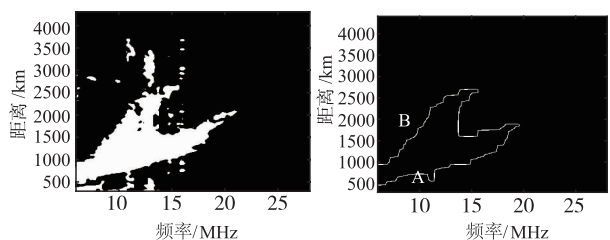


图4 返回散射回波信号提取

6 仰角-群距离曲线拟合与验证

根据仰角-群距离的变化特性, 本文采用多项式拟合、对仰角求对数拟合, 对群距离求对数拟合三种方式对提取后的仰角点进行处理, 其分别对应曲线 1、曲线 2 和曲线 3, 对于单一层传播, 群路径与仰角分布曲线应具有单调性, 因此拟合阶数选择为 2 阶. 生成的曲线分别为:

曲线 1:

$$\beta(p) = 2.53 \times 10^{-5} p^2 - 7.79 \times 10^{-2} p + 81.46 \quad (2)$$

曲线 2:

$$\beta(p) = e^{4.84 \times 10^{-7} p^2 - 1.86 \times 10^{-3} p + 4.74} \quad (3)$$

曲线 3:

$$\beta(p) = 7.39 \times 10^{-4} (\ln p)^2 - 7.28 \times 10^{-2} \cdot \ln p + 8.40 \quad (4)$$

其中, β 表示仰角值, p 表示群距离值, 曲线分布结果如图 6.

青岛站电离层测高仪位于返回散射试验探测区域的中心位置, 利用探测试验相近时刻的频高图数据对结果进行验证. 利用频高图自动判读软件读取出电离层 F 层描述信息, 由 Martyn 等效虚高定理, 获取不同地面距离对应的仰角-群距离曲线. 本文选择地面距离区间为 $[300\ 1500]\text{km}$, 以 30km 为步进, 频率为 9MHz . 图 7 为三条拟合曲线与青岛站实测数据外推的仰角-群距离

提取出来, 仰角数据的提取结果如图 5(b) 所示. 获得每一个群距离单元对应的仰角点数据, 点迹分布见图 6.

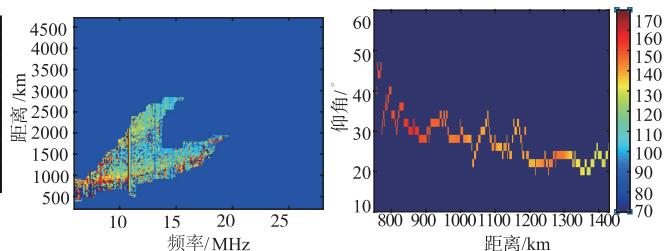


图5 仰角扫描返回散射数据及提取示意图

曲线(作为目标曲线)的分布示意图.

采用以下统计参数来评估三种拟合的曲线与目标曲线的差异, 误差平均值记为 η , 误差方差值记为 σ^2 , 其他参数的计算公式定义如下:

$$\text{仰角绝对差: } \Delta\beta = \beta(p) - \beta_0 \quad (5)$$

$$\text{欧氏距离: } d_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\overline{\Delta\beta_i})^2} \quad (6)$$

$$\text{最大误差: } \Delta_{\max}: |\Delta\beta| \leq \Delta_{\max} \quad (7)$$

$$\text{最小误差: } \Delta_{\min}: |\Delta\beta| \geq \Delta_{\min} \quad (8)$$

其中, $\beta(p)$ 表示三条曲线的仰角值($^\circ$), β_0 表示目标曲线的仰角值, $\overline{\Delta\beta_i}$ 表示仰角差值的平均值.

定义整条拟合曲线的误差率 δ 为:

$$\delta = \frac{n_i}{n} \quad (9)$$

因设备系统性能的影响, 定义仰角差值的绝对值 $|\Delta\beta| < 2^\circ$ 为仰角估计的精确值. n_i 表示符合标准的样本数, n 表示样本总数. 误差参数见表 1. 由表 1 可看出, 针对试验数据, 曲线 3 是与目标曲线误差最小的.

考虑到电离层具有非均匀特性、天线阵列口径、接收系统的性能等因素影响着仰角测量数据分布, 本文认为三种拟合方式都具有研究意义, 因为不同的拟合方式, 对点数据的分布响应不同.

表 1 三条拟合曲线的误差参数统计

曲线	n	n_i	Δ_{\max}	Δ_{\min}	η	σ^2	d_x	δ
曲线 1	41	30	8.25	0.03	2.21	7.98	14.17	26.8%
曲线 2	41	39	3.38	0.01	1.24	1.86	7.11	4.87%
曲线 3	41	41	1.97	0.00	0.74	0.26	3.76	0

7 结果对比分析

在文献[5]中, Benito 介绍了利用返回散射仰角扫描探测的数据进行对应区域电离层反演的的方法, 电离图采集时间为 2007 年 6 月 11 日 20:00UT, 电离层的传

播模式为单 F 层, 工作频率为 10MHz .

为了方便结果对比, 利用本文所提的方法, 对文献[5]中的仰角扫描返回散射电离图进行了仰角参数提取, 与文献[5]的结果进行了对比, 其结果如图 8 所示.

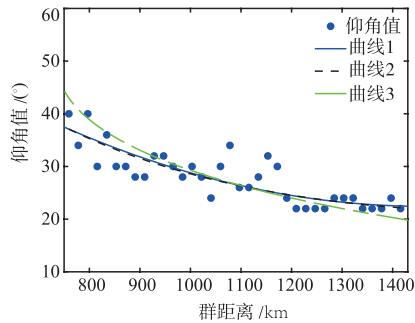


图6 仰角点提取及曲线拟合结果

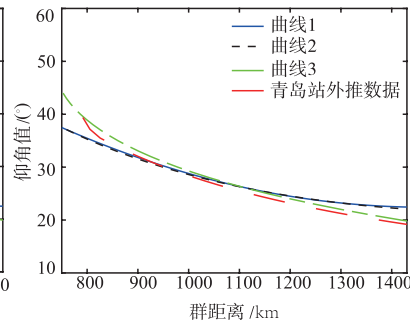


图7 外推仰角-群距离曲线与拟合结果示意图

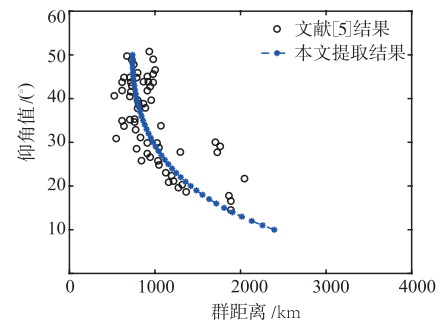


图8 文献仰角值与本文算法提取曲线示意图

从提取结果和文献结果对比可以看出,本文提出的算法提取的结果和文献[5]的结果分布趋势相符,两组数据间的差值的均方差 $STD = 3.045$.

8 讨论及总结

本文基于仰角扫描的两种返回散射电离图,对群距离-频率-能量三维电离图进行了干扰剔除,能量补偿,信号提取及边界检测,利用边界信息获得对应频率的最近和最远探测群距离,然后对群距离-频率-仰角三维电离图对应频率上的仰角信息进行提取,对提取到的点迹进行了拟合,文章对比了三种拟合方式的差异性,讨论了三种拟合方式的误差,并通过青岛站测高仪的频高图数据对拟合结果进行了验证和定性分析.后续的工作中会对提取方法以及根据仰角信息对电离层电子浓度反演技术进行深入研究.

参考文献

- [1] Earl G F, Ward B D. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar[J]. Radio Science, 1987, 22(2): 275 - 291.
- [2] Croft T A. Sky-wave backscatter: A means for observing our environment at great distances[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1972, 10(1): 73 - 155.
- [3] Coleman C J. On the simulation of backscatter ionograms[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1997, 59(16): 2089 - 2099.
- [4] Benito E. Inversion of backscatter ionograms optimization by using simulated annealing and genetic algorithms[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Boston, MA; 2008. III-1127 - III-1130.
- [5] Benito E. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2008, 70(15): 1935 - 1948.
- [6] Benito E. Inversion of OTHR radar backscatter ionograms obtained by scanning in elevation[A]. Proc of the IEEE Radar Conference[C]. Rome, Italy, 2008. 1 - 5.
- [7] Bazin V, Molinie J P, Munoz J. A general presentation a-

bout the OTH-radar NOSTRADAMUS[A]. IEEE Conference on Radar[C]. Syracuse, NY, 2006, 17(8): 634 - 642.

- [8] Molinie J P, Benito E. Backscatter ionogram inversion validation with the help of a HF radio transmitter[A]. International Conference on Radar IEEE[C]. Adelaide, Australia, 2008, Page(s): 302 - 306.
- [9] Landeau T, Gauthier F. Further improvements to the inversion of elevation-scan backscatter sounding data[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 1997, 59(1): 125 - 138.
- [10] Russell C J, Dyson P L, Houminer Z, et al. The effect of large-scale ionospheric gradients on backscatter ionograms[J]. Radio Science, 1997, 32(5): 1881 - 1897.
- [11] R J Norman. Mapping the ionosphere using a HF Radar backscatter inversion technique[J]. Radio Sci, 1997, 32(2): 387 - 396.
- [12] 宋君. 返回式电离层探测技术应用研究[D]. 武汉: 武汉大学电子信息学院, 2011.
- [13] Song J. Research on applications of backscatter ionospheric sounding techniques[D]. Wuhan, Hubei, China; School of Electronic Information Wuhan University, 2011. (in Chinese)
- [14] Su F, Zhao Z, Deng F, et al. Estimation of ground range on the sweep frequency backscatter leading edge[J]. Advances in Space Research, 2011, 47(7): 1187 - 1193.
- [15] 焦培南. 利用高频返回散射技术探测远地核爆炸电离层效应[J]. 地球物理学报, 1986, 29(5): 425 - 431.
- [16] Jiao P N. The study of the ionospheric effects of a nuclear exposure observed at larger distance utilizing the HF backscatter technique[J]. Chinese J Geophys, 1986, 29(5): 425 - 431. (in Chinese)
- [17] 孙广俊, 齐东玉, 李铁成. 利用返回散射系统监测海洋回波[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1334 - 1337.
- [18] Sun G J, Qi D Y, Li T C. Sea echo detection with the system of ionospheric backscatter sounding[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1334 - 1337. (in Chinese)
- [19] 冯静, 李雪, 齐东玉. 返回散射电离图的前沿提取方法[J]. 空间科学学报, 2012, 32(4): 524 - 531.

Feng Jing, Li Xue, Qi Dongyu. Methods for extracting backscatter ionogram leading edges [J]. Chinese Journal Space Science, 2012, 32(4): 524 - 531. (in Chinese)

[17] Arikan F, Salous S, Arikan O. Algorithm for high quality ionograms [J]. Electronics Letters, 2000, 36(11): 985 - 987.

作者简介



华彩成 男, 1987 年生, 山东人, 现为中国电波传播研究所工程师, 硕士, 毕业于西安电子科技大学, 主要研究方向为电离层电波传播、电离层图像处理及模式识别。

E-mail: hua.caicheng@163.com



王世凯(通信作者) 男, 1979 年生, 河北人, 现为中国电波传播研究所研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为电离层电波传播及工程应用等。