

电离层非相干散射谱和自相关函数估计算法

李林^{*①} 韩承姣^① 丁宗华^② 姬红兵^① 王亚杰^①

^①(西安电子科技大学电子工程学院 西安 710071)

^②(中国电波传播研究所 青岛 266107)

摘要: 非相干散射谱对电离层各物理参数的研究具有至关重要的作用。现有非相干散射谱模型推导和计算较为复杂,且无法给出相应的自相关函数模型。该文重新推导了电离层非相干谱的简化模型,并提出相应的自相关函数模型。在此基础上,针对非相干散射信号处理中零时延处距离模糊大、分辨率较低,导致自相关函数在不同时延处均衡性较差,影响电离层散射谱估计性能的问题,提出使用自相关函数模型估计零时延自相关值的数据拟合方法。考虑到计算复杂度,提出利用多项式函数逼近自相关函数模型的快速实现方法。最后,通过对实测回波数据处理结果的对比分析,证明了该方法的可行性,对提高电离层探测精度具有重要意义。

关键词: 非相干散射雷达; 非相干散射谱; 自相关函数; 数据拟合; 零时延

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)02-0278-07

DOI: 10.11999/JEIT180331

Estimation of Ionospheric Incoherent Scatter Spectrum and Autocorrelation Function

LI Lin^① HAN Chengjiao^① DING Zonghua^② JI Hongbing^① WANG Yajie^①

^①(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract: Incoherent scatter spectrum plays an important role in studying the physical parameters of the ionosphere. The conventional theoretical model of incoherent scatter spectrum for derivation and calculation is extremely complicated and the model of the autocorrelation function can not be obtained. In this paper, the simplified model of ionospheric incoherent scatter spectrum is re-derived and the corresponding autocorrelation function is proposed. In the procedure of traditional incoherent scattering radar signal processing, the autocorrelation function is imbalance at different delays. This is mainly because the range resolution of zero-lag is very low, which affects the estimated performance of ionospheric scatter spectrum. Focus on this problem, a method based on data fitting is proposed to estimate the autocorrelation at zero-lag. Considering the computational complexity, a fast implementation method by polynomial functions is proposed to approach the autocorrelation function. Finally, experimental results on real echo data demonstrate the correctness and efficiency of the proposed method, which is of great significance for ionospheric detection.

Key words: Incoherent scatter radar; Incoherent scatter spectrum; Autocorrelation function; Data fitting; Zero lag

1 引言

非相干散射雷达是目前地面观测电离层最强大的手段^[1,2],通过对非相干散射谱的反演,可获得

电离层电子密度、电子温度、离子温度、等离子体径向漂移速度等多个参数^[3,4]。国内,已有众多学者对非相干散射谱进行了研究。郑传青等人^[5]首先对非相干散射谱进行了模拟,通过修正的双麦克斯韦分布函数,简化了非相干散射谱的计算。徐彬等人^[6]在无碰撞等离子体非相干散射谱理论上,研究了碰撞等离子体非相干散射谱的一般公式。薛昆等人^[7]深入研究了离子分布函数13矩、16矩近似条件下的非相干散射谱。尽管上述研究理论较为成熟,但是非相干散射谱理论模型推导和计算较为复

收稿日期: 2018-04-11; 改回日期: 2018-08-31; 网络出版: 2018-09-13

*通信作者: 李林 lilin@xidian.edu.cn

基金项目: 电波环境特性及模化技术重点实验室开放基金(201500015)
Foundation Item: The Key Laboratory of Radio Wave Environmental Characteristics and Modeling Technology Open Fund (201500015)

杂, 无法给出相应的自相关函数解析表达式。

中国电波传播研究所于2012年在云南曲靖建成了我国首套非相干散射雷达, 目前已取得了初步的观测结果^[8-10]。然而在非相干散射信号处理^[11,12]中, 零时延处距离模糊大, 距离分辨率较低, 导致自相关函数在不同时延处均衡性较差, 影响电离层散射谱的估计性能。本文在已有电离层非相干散射谱模型基础上, 结合曲靖非相干散射雷达大量实测数据和信号处理结果, 重新推导了电离层非相干散射谱的理论模型, 并提出相应的自相关函数模型。进一步提出利用自相关函数模型估计零时延自相关值的数据拟合方法。考虑到计算复杂度, 提出利用多项式函数逼近自相关函数模型的快速实现方法。

2 非相干散射基础理论

2.1 非相干散射谱的形成

电离层中的电子、离子在做随机热运动与频繁的相互碰撞。碰撞等离子体的热起伏运动可看成一系列波动, 包括离子声波(离子谱)和静电波(等离子谱)。等离子谱能量较弱, 一般需要外界刺激才能被观测到, 本文不对等离子谱进行详细说明。得到的离子谱如图1所示, v_0 为雷达发射频率, v_1 为上移离子谱频率, v_2 为下移离子谱频率。离子声波的多普勒频移为

$$\Delta v = v_1 - v_0, \text{ 或 } \Delta v = v_0 - v_2 \quad (1)$$

在短时间内(一般几分钟), 电离层散射信号可近似为平稳随机过程, 根据维纳-辛钦定理, 则可推断出图1所示离子谱对应的自相关函数应为二分量周期性余弦信号。然而, 由于朗道阻尼的存在, 离子声波与静电波会发生阻尼共振而使波形展宽, 一般的非相干散射实验中观察到的离子谱是双峰的, 呈现“驼峰状”。

文献[13]和文献[14]推导了经典的双峰散射谱模型, 根据其理论, 在不考虑磁场、粒子与中性成分碰撞的条件下, 非相干散射谱为

$$\psi(\rho, \omega) = \frac{2\pi}{\rho} \left| 1 - \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 f_e \left(\frac{\omega}{\rho} \right) + \frac{2\pi\eta}{\rho} \left| \frac{G_e}{\varepsilon} \right|^2 f_i \left(\frac{\omega}{\rho} \right) \quad (2)$$

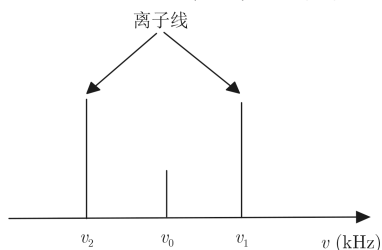


图1 离子谱图

其中, ρ 为波数, ω 为多普勒频率, η 为离子电荷数, ε 为介电常数, G_e 为电子极化率, G_i 为离子极化率, f_e 和 f_i 分别为电子和离子速度分布函数。观察式(2)可发现其非相干散射谱的表述较为复杂, 且无法得到其自相关函数解析表达式。

2.2 零时延模糊

在非相干散射信号处理过程中发现零时延处的距离模糊较大, 距离分辨率低, 导致自相关函数在不同时延处均衡性较差, 严重影响了电离层散射谱的估计性能。本小节将以4位Lehtinen型交替码为例, 详细说明零时延处的距离模糊^[12]。

一次完整的交替码探测需要 $n = 8$ 个周期, 每个探测周期包括 $m = 4$ 个码元, 则交替码矩阵 $B = \{b_{m,n}, m = 1, 2, 3, 4; n = 1, 2, \dots, 8\}$ 。第 n 个探测周期, 距离模糊函数为

$$A_{n,\Delta t}(r) = [h(t) \otimes e_n(t - S(r))] \cdot [\overline{h(t') \otimes e_n(t' - S(r))}] \quad (3)$$

其中, $h(t)$ 为后检测滤波器, $e_n(t)$ 为第 n 个探测周期的发射信号, $S(r)$ 为雷达接收回波信号的时间, $\Delta t = t - t'$ 。

假设码元宽度为 Δg , 4位Lehtinen型交替码的有效时延取值为 $\Delta t = 0, \Delta g, 2\Delta g, 3\Delta g$, 即时延0, 1, 2和3。则任一时刻经过多周期积累的距离模糊函数为

$$A_{\Delta t}(r) = \sum_{n=1}^8 (A_{n,\Delta t}(r) k_{n,\Delta t}) \quad (4)$$

$$k_{n,\Delta t} = b_{1,n} b_{(1+\Delta t/\Delta g),n} \quad (5)$$

其中, $k_{n,\Delta t}$ 为第 n 个探测周期, 时延 $\Delta t/\Delta g$ ($\Delta t/\Delta g = 0, 1, 2, 3$) 处的积累系数。

4位交替码经过积累后的距离模糊函数如图2所示。图2中4个子图分别表示时延0至3处的距离模糊函数。观察图2可以发现, 时延1至时延3的距离模糊函数可以通过积累集中到距离 r_i 处, 而时延0处的距离模糊函数显然无法通过积累集中到同一距离

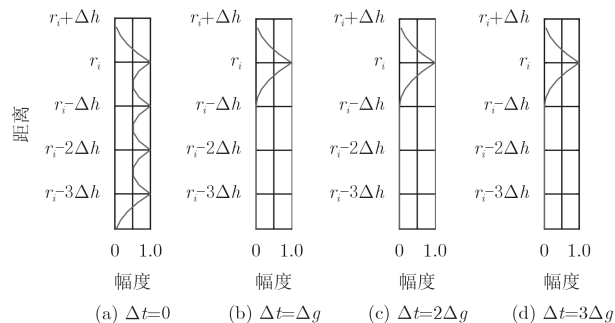


图2 4位交替码各时延处的距离模糊图

处。可见, 时延0处的距离模糊明显大于其他时延点处的距离模糊。

3 非相干散射谱与自相关函数推导

如2.1节所述, 现有非相干散射谱模型理论较为复杂, 而且无法推导出自相关函数模型。本节将在已有非相干散射谱模型基础上重新推导简化的非相干散射谱模型和自相关函数模型, 具体过程如下。

等离子密度波动产生的谐波分量为经典的简谐波。波在介质中传播时会不断地损耗能量, 波振动的幅度服从阻尼振动规律:

$$u(t) = A_0 e^{-\gamma t/2} e^{j\omega_0 t} \quad (6)$$

其中, γ 为阻尼系数, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$ 为波动角频率。 A_0 为最大波幅。上述阻尼振动不再是频率为 ν_0 的单一频率振动, 从而导致离子谱发生展宽。

对式(6)作傅里叶变换:

$$U(\nu) = \int_0^{+\infty} u(t) e^{-j2\pi\nu t} dt = \frac{A_0}{\gamma/2 - j(\nu_0 - \nu)2\pi} \quad (7)$$

因为损耗功率正比于波振动振幅的平方, 所以频率在 ν 至 $\nu + d\nu$ 区间的损耗功率为

$$O(\nu)d\nu \propto |U(\nu)|^2 d\nu \quad (8)$$

总损耗功率为

$$O = \int_{-\infty}^{+\infty} O(\nu)d\nu \quad (9)$$

取 $\gamma = 1/\tau_s$, τ_s 为损耗时长, $O(\nu) = A_1 |U(\nu)|^2$, 则展宽后的上移离子谱为

$$C(\nu_1) = \frac{O(\nu)}{O} = \frac{A_1 \Delta \nu_d / (2\pi)}{(v - \nu_1)^2 + (\Delta \nu_d / 2)^2} \quad (10)$$

其中, $\Delta \nu_d = 1/(2\pi\tau_s)$ 为谱线宽度。

取 $\varepsilon = \Delta \nu_d / 2$, 则完整离子谱为

$$C(\nu_1, \nu_2) = \frac{A_1 \varepsilon}{\pi((v - \nu_1)^2 + \varepsilon^2)} + \frac{A_1 \varepsilon}{\pi((v - \nu_2)^2 + \varepsilon^2)} \quad (11)$$

根据式(1), 式(11)可改写为

$$C_1(v - \nu_0, \Delta v) = \frac{A_1 \varepsilon}{\pi((v - \nu_0 + \Delta v)^2 + (\varepsilon)^2)} + \frac{A_1 \varepsilon}{\pi((v - \nu_0 - \Delta v)^2 + (\varepsilon)^2)} \quad (12)$$

式(12)的一般谱线图如图3所示, 即典型的“驼峰状”双峰谱。对式(12)作傅里叶逆变换, 可得

$$I(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} C_1(v - \nu_0, \Delta v) e^{j2\pi(v - \nu_0)t} dv = 2A_1 e^{-2\pi\varepsilon|t|} \cos(2\pi\Delta v t) \quad (13)$$

根据式(13), 非相干散射信号自相关函数为衰减的余弦波, 如图4所示。

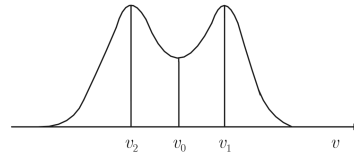


图3 非相干散射理论谱

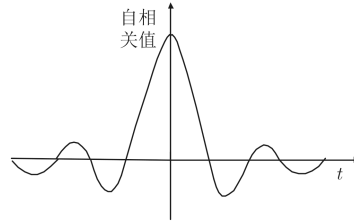


图4 非相干散射自相关函数图

4 基于数据拟合的零时延数据处理

如2.2节所述, 零时延距离模糊大, 距离分辨率低, 导致自相关函数在不同时延处均衡性较差, 影响电离层散射谱的估计性能。基于本文推导的非相干散射信号自相关函数模型式(13), 利用数据拟合, 即使用自相关函数模型估计零时延处的自相关值, 以此改进现有算法带来的模糊问题。

4.1 阻尼函数拟合

由第3节非相干散射谱与自相关函数的推导可知, 电离层散射信号的自相关函数可表示为衰减的余弦波。因此, 可利用构造的阻尼函数拟合出零时延处的自相关值。

首先, 由式(13)得自相关函数的理论表达式为

$$q(\tau) = 2A_1 e^{-\delta|\tau|} \cos(\omega_r \tau) \quad (14)$$

其中, δ 为阻尼系数, A_1 为振幅, $\omega_r = 2\pi/T$ 为阻尼振动角频率, T 为阻尼振动周期。 τ 为时延, 取值为 $\tau = \tau_0, \tau_1, \dots, \tau_{N-1}$, 其中 N 为编码长度。这里, 需要利用观测到的不同时延自相关值 $q(\tau_1), q(\tau_2), \dots, q(\tau_{N-1})$ 来预测 $q(\tau_0)$ 。

其次, 利用最小均方误差(MSE)准则来估计模型参数。考虑到实际电离层功率谱密度宽度和噪声影响, 选取前 $c(1 < c \leq N-1)$ 个时延值进行拟合。将 $\tau = \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_c$ 代入式(14), 得到

$$\mathbf{S} = [q(\tau_1), q(\tau_2), \dots, q(\tau_c)] \quad (15)$$

残余误差^[15]为

$$\sigma^2 = (\mathbf{S} - \mathbf{L})(\mathbf{S} - \mathbf{L})^T \quad (16)$$

其中, $\mathbf{L} = [L(\tau_1), L(\tau_2), \dots, L(\tau_c)]$ 为实际电离层计算结果(观测值)。

注意, c 的取值, 以及式(14)中模型参数 δ, A_1, ω_r 的取值范围根据实际情况来确定。设定较大的取值范围会降低算法计算效率, 但同时会提高其适应性。这里主要依据曲靖非相干散射雷达的实际编码和信号处理过程来确定。曲靖非相干散射雷达编码长度 $N=16$, 回波信号功率谱主要集中在频率区间 $\Delta f_{\text{req}} = [-8, 8]$ kHz, 归一化后的频率区间约为 $[-0.25, 0.25]$, 对应有效的时延宽度为 $c = 8$ 。由式(14), 参数 ω_r (阻尼振动角频率) 理论值为 $2\pi\Delta v$, 再由式(1), $\Delta v \leq 8$ kHz, 这里取 $\Delta v = 8$ kHz, 则可设定参数 ω_r 的取值范围为 $[0, 1.6]$ 。

由式(14), 参数 δ (衰减速度) 理论值为 $2\pi\varepsilon$, 再由式(11)得

$$\delta = \pi\Delta v_d \quad (17)$$

假定 $\Delta v_d \approx \Delta f_{\text{req}}$, 则可设定 δ 的取值范围为 $[0, 0.79]$ 。

振幅 A_1 由观测值 $[L(\tau_1), L(\tau_2), \dots, L(\tau_{N-1})]$ 确定。这里仅考虑 $L(\tau_1)$, 设定 A_1 的取值范围为 $[0.3, 2] L(\tau_1)$ 。

最后, 遍历不同的参数设置, 计算式(16)的残余误差。最小的残余误差对应需要的模型参数。根据所求得的阻尼函数模型, 计算值 $q(\tau_0)$, 即 $q(0)$, 该值即为非相干散射信号中零时延处的自相关值。

4.2 多项式拟合

阻尼函数模型是最符合理论的曲线模型, 但该模型存在的弊端是模型对参数的依赖性较大, 为获得合适的模型参数需要进行大量的查找计算操作, 针对这样的情况, 本文提出了更简洁的多项式函数拟合^[6]方法。

观察图4中非相干散射信号自相关函数图的理论值, 4.1节中的阻尼函数拟合算法主要是针对曲线正半轴的数据进行拟合。这里考虑采用多项式函数来逼近图4中阻尼函数(考虑自相关的主瓣、第1副瓣和第2副瓣)。逼近过程如下:

(1) 给定延 $x = x_0, x_1, \dots, x_{N-1}$, 各延观测值 $y = y_0, y_1, \dots, y_{N-1}$, 其中 N 为编码长度。则存在多项式:

$$p_n(x) = \sum_{l=0}^n a_l x^l \quad (18)$$

其中, n 为多项式阶数, 使得式(19)成立。

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=0}^{N-1} x_i & \cdots & \sum_{i=0}^{N-1} x_i^n \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i & \sum_{i=0}^{N-1} x_i^2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i^n & \cdots & \cdots & \sum_{i=0}^{N-1} x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{N-1} x_i^n y_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

该方程组有唯一解 $a_l (l = 0, 1, \dots, n)$ 。

(2) 同4.1节, 选取前 $c (1 < c \leq N-1, c = 8)$ 个时延值进行拟合。多项式拟合结果:

$$\mathbf{H} = [p_n(x_1), p_n(x_2), \dots, p_n(x_c)] \quad (20)$$

由式(15)阻尼拟合结果为: $\mathbf{S} = [q(\tau_1), q(\tau_2), \dots, q(\tau_c)]$, 两者拟合残余误差:

$$\eta^2 = (\mathbf{S} - \mathbf{H})(\mathbf{S} - \mathbf{H})^T \quad (21)$$

(3) 由理想的阻尼函数式(14)确定多项式的阶数。当多项式函数可以逼近时, 在残余误差尽可能小的前提下, 尽量选取阶数较低的多项式, 以降低计算量。根据所求得的多项式函数模型, 计算值 $p_n(x_0)$, 即 $p_n(0)$, 该值即为非相干散射信号中零时延处的自相关值。

注意到, 式(13)所示的自相关函数包络与损耗时长 τ_s 有关, 估计的零时延自相关值和函数包络有关, 在非理想条件下, τ_s 过小或过大都会影响零时延自相关值的估计准确度。为了尽可能准确的估计零时延自相关值, 将式(13)改写为式(14)并根据曲靖非相干散射雷达的实际处理情况确定各参数的范围, 避免了 τ_s 的影响, 提高了模型和算法的鲁棒性。

5 实例分析

本节对曲靖非相干散射雷达(QJISR)在2015年1月12日接收到的实测回波数据进行处理。雷达采用16位交替码编码, 码元宽度为30 μs , 脉冲宽度为480 μs , 时延间隔30 μs , 时延个数为16。通常电离层散射信号的信噪比小于-10 dB, 因此需要进行多个周期积累。在实际的信号处理中雷达脉冲重复

周期为12 ms, 累积时间设为2 min, 约对10000个重复周期进行积累。理论上, 自相关函数关于纵轴对称, 在试验中只对正半轴的自相关函数进行处理。

图5为传统非相干散射信号处理得到的自相关函数图, 探测高度为402 km。可以看出, 由于零时延处的距离模糊较大, 自相关函数在零时延处出现较大峰值, 导致自相关函数在不同时延处均衡性较差。进一步对250~750 km范围内的回波信号进行处理, 并由自相关函数得到功率谱密度, 得到的多高度功率谱图如图6所示。可见电离层密度较大区域主要分布在250~400 km之间, 但无法有效估计频谱宽度并反演出精确的电离层参数。

由4.1节提出的数据拟合方法, 将电离层散射信号的自相关函数表示为衰减的余弦波。图7所示为402 km处传统QJISR自相关函数估计结果的放大图, 和阻尼函数模型拟合的自相关函数的对比图。可以看出, 拟合后的零时延值远小于传统估计结果, 即信号总平均功率。因此自相关函数经过阻尼拟合修正后, 时延均衡性有较大改善。图8为零时延自相关函数经过阻尼拟合修正后, 探测高度250~750 km的多高度功率谱图。对比图6和图8, 时延均衡性的改善, 使估计的非相干散射谱更加准确。电离层密度较大区域主要分布在250~400 km之间, 且能有效估计频谱宽度, 约为 $[-8, 8]$ kHz, 与国外探测结果^[3]和理论计算结果相一致, 证明了本文提出散射谱模型和数据拟合算法的有效性。

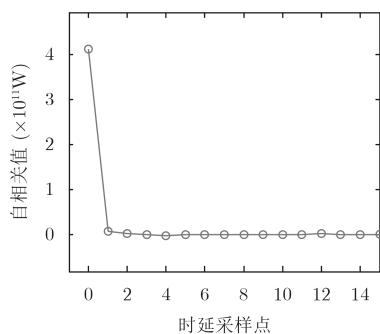


图5 QJISR自相关函数图

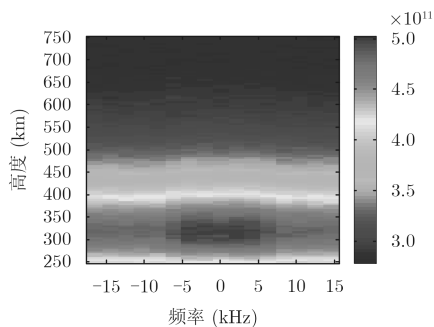


图6 QJISR多高度功率谱图

最后, 根据理想的阻尼函数式(14), 选用6阶多项式函数逼近阻尼函数。针对同样402 km处的回波数据, 图9所示为6阶多项式函数拟合与阻尼拟合的自相关函数对比图。可以看出, 6阶多项式函数较好地逼近了阻尼拟合函数。同样, 将零时延自相值用多项式拟合的结果进行替代, 对250~750 km的电离层回波进行估计, 得到多高度功率谱图如图10所示。对比图10与图8、图6可以看出, 通过多项式拟合, 较好地改善了自相关函数的均衡性, 与阻尼拟合同样, 对传统的处理结果有较大的改善作用。

本文选用了阻尼函数模型和多项式函数模型两种模型。在试验中发现, 阻尼函数模型符合理论基础, 但该模型对初始参数依赖大、计算复杂、计算时间相对较长。而在阻尼拟合的基础上, 多项式函

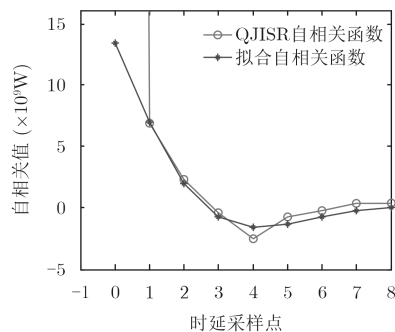


图7 阻尼函数拟合曲线图

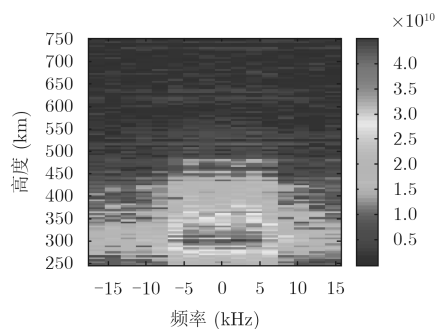


图8 阻尼拟合修正的多高度功率谱图

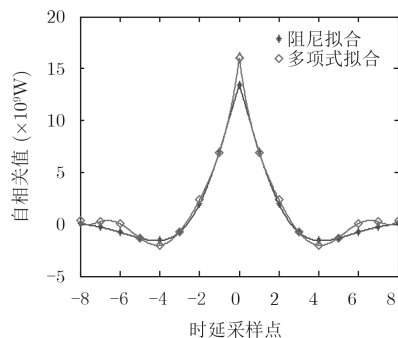


图9 多项式拟合与阻尼拟合的结果对比图

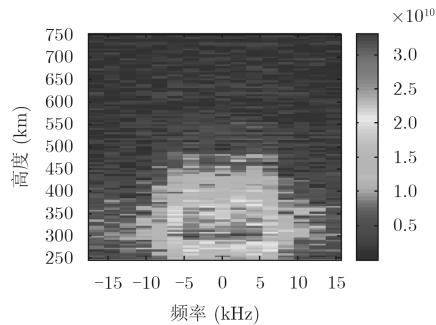


图 10 多项式拟合修正的多高度功率谱图

数模型原理较为简单, 且计算时间提高近600倍 (Win7条件下测试)。在曲靖非相干散射雷达信号处理过程中需要对大量实测数据进行处理, 由此可见, 多项式函数模型更符合实际情况。需要注意的是, 多项式模型的阶数由阻尼拟合函数的理论模型求得, 具有一定的先验性, 但在实际信号处理过程中仍然有较高的实用性。

6 结束语

本文首先推导了简化的非相干散射谱理论模型, 进而得到电离层自相关函数的阻尼函数模型。在此基础上, 针对时延零距离模糊较大、距离分辨率低, 导致自相关函数均衡性较差的问题, 提出使用数据拟合思想估计零时延自相关值的方法。考虑到计算量和实际工程应用, 用多项式拟合逼近阻尼拟合。对曲靖非相干散射雷达的实测数据实验分析结果, 证明了论文提出方法的有效性和可靠性。基于本文多高度功率谱图, 下一步可对电离层的电子密度、电子、离子温度等参数进行反演, 对电离层的变化进行实时监测。

参 考 文 献

- [1] GORDON W E. Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. *Proceedings of the Ire*, 2007, 46(11): 1824–1829. doi: 10.1109/JRPROC.1958.286852.
- [2] WEN C H, BRICZINSKI S J, LIVNEH D J, *et al.* Pulse-level interference and meteor processing of Arecibo ISR data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(9): 973–980. doi: 10.1016/j.jastp.2007.03.004.
- [3] EVANS J V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1969, 57(4): 496–530. doi: 10.1109/PROC.1969.7005.
- [4] 王凯丽, 姚明, 邓晓华. 非相干散射雷达电离层参数提取简化算法的仿真[J]. *南昌大学学报(工科版)*, 2017, 39(2): 200–204. doi: 10.13764/j.cnki.ncdg.2017.02.019.
- [5] WANG Kaili, YAO Ming, and DENG Xiaohua. Simulation on a simplified algorithm for ionospheric incoherent scatter radar parameter extraction[J]. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology)*, 2017, 39(2): 200–204. doi: 10.13764/j.cnki.ncdg.2017.02.019.
- [6] 郑传青, 吴健. 高纬电离层中非麦克斯韦分布等离子体的非相干散射谱的模拟[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(4): 433–438. doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.1994.04.003.
- [7] ZHENG Chuanqing and WU Jian. A computation of the incoherent radar spectra of non-maxwellian plasma in the high-latitude ionosphere[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(4): 433–438. doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.1994.04.003.
- [8] 徐彬, 吴振森, 吴健, 等. 碰撞等离子体的非相干散射谱[J]. *物理学报*, 2009, 58(7): 5104–5110. doi: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.07.115.
- [9] XU Bin, WU Zhensen, WU Jian, *et al.* Incoherent scatter spectrum of a collisional plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(7): 5104–5110. doi: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.07.115.
- [10] 薛昆, 许正文, 吴健, 等. 高纬极区离子速度分布函数多项式解及非相干散射谱计算[J]. *空间科学学报*, 2015, 35(4): 424–437. doi: 10.11728/cjss2015.04.424.
- [11] XUE Kun, XU Zhengwen, WU Jian, *et al.* Polynomial solutions of the ion velocity distributions and the calculation of incoherent scatter spectra in the high-latitude auroral ionosphere[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, 35(4): 424–437. doi: 10.11728/cjss2015.04.424.
- [12] 金旺, 杨玉峰, 李清亮, 等. 曲靖非相干散射雷达在空间碎片探测中的应用[J]. *电子学报*, 2016, 46(1): 252–256. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.035.
- [13] JIN Wang, YANG Yufeng, LI Qingliang, *et al.* Application of Qujing incoherent scattering radar in space debris detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 46(1): 252–256. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.035.
- [14] 鲁自清, 姚明, 邓晓华. 关于非相干散射雷达对电离层参数测量仿真[J]. *计算机仿真*, 2017, 34(1): 16–19. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2017.01.004.
- [15] LU Ziqing, YAO Ming, and DENG Xiaohua. Parameters detect simulation of incoherent scatter radar[J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(1): 16–19. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2017.01.004.
- [16] LI Lin, CHEN Yajie, JI Hongbing, *et al.* Research on signal modulation and processing for incoherent scatter radar[C]. *International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, Singapore, 2016: 1–4. doi: 10.1109/ICICS.2015.7459930.
- [17] LI Lin, LU Yifeng, DING Zonghua, *et al.* A modified parameter model-based spectrum estimation method for incoherent scatter radar[C]. *International Conference on*

- Image, Vision and Computing, Chengdu, China, 2017: 863–867.
- [12] NYGREN T. Introduction to Incoherent Scatter Measurements[M]. Sodankyla Finland: INVERS OY, 1996: 15–20.
- [13] 徐彬, 王占阁, 许正文, 等. 基于各向异性分布的非相干散射雷达谱仿真[J]. 空间科学学报, 2017, 37(6): 710–716. doi: 10.11728/cjss2017.06.710.
- XU Bin, WANG Zhange, XU Zhengwen, *et al.* Simulation of incoherent scatter radar spectra based on inhomogeneous distribution[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, 37(6): 710–716. doi: 10.11728/cjss2017.06.710.
- [14] SHEFFIELD J. Plasma Scattering of Electromagnetic Radiation[M]. New York: Academic Press, 1975: 113–122.
- [15] MADSEN K, NIELSEN H B, and TINGLEFF O. Methods for Non-Linear Least Squares Problems[M]. Lyngby: Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark, 2004: 17–47.
- [16] 王存有, 黄张裕, 汪闫林, 等. BP神经网络与多项式拟合在沉降检测中的应用[J]. 地理空间信息, 2017, 15(6): 107–108. doi: 10.3969/j.issn.1672-4623.2017.06.033.
- WANG Cunyou, HUANG Zhangyu, WANG Shuanlin, *et al.* The application of BP neural network and polynomial fitting in settlement monitoring[J]. *Geospatial Information*, 2017, 15(6): 107–108. doi: 10.3969/j.issn.1672-4623.2017.06.033.
- 李 林: 男, 1980年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、信号检测与估值.
- 韩承姣: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理.
- 丁宗华: 男, 1978年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为非相干散射雷达探测技术.
- 姬红兵: 男, 1963年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达信号处理、目标检测与跟踪.