# 基于空间监视雷达散射回波的电离层电子密度 探测方法

丁宗华<sup>1,2</sup>,代连东<sup>1,2</sup>,许正文<sup>1,2</sup>,吴健<sup>1,2</sup>,杨嵩<sup>1,2</sup>

(1.中国电波传播研究所,山东 青岛 266107;2.电波环境特性及模化技术重点实验室,山东 青岛 266107)

摘要:目的 提高空间监视雷达的电离层电波环境适应性。方法 VHF-L 波段大功率雷达信号经过电离层传播时会发生非相干散射,散射回波中包含电离层信息。结合雷达方程和电离层目标特征,基于电离层非相干散射原理,理论分析空间监视雷达用于电离层电子密度非相干散射探测的条件(包括雷达参数设置和波束扫描方式),给出电离层回波功率、自相关函数和电子密度表达式,利用 Matlab 编程对某大功率空间监视 雷达原始数据处理得到电离层散射回波及电子密度。结果 给出了空间监视雷达用于电离层电子密度非相干 散射探测的基本条件,实测数据发现电离层回波和电子密度符合电离层变化特征。结论 利用 VHF-L 波段 大功率雷达空间散射回波探测电离层电子密度是可行的,为空间监视雷达电离层环境感知与传播自适应修 正提供了一种可能的新途径。

关键词: 雷达; 散射回波; 电离层; 电子密度; 非相干散射 DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2017.07.005 中图分类号: TJ06; TN011 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2017)07-0024-05

## Ionospheric Electron Density Measurement Based on Scattered Echo from the Space Surveillance Radar

DING Zong-hua<sup>1,2</sup>, DAI Lian-dong<sup>1,2</sup>, XU Zheng-wen<sup>1,2</sup>, WU Jian<sup>1,2</sup>, YANG Song<sup>1,2</sup> (1.China Research Institute of Radio-wave Propagation, Qingdao 266107, China
 2.National Key Laboratory of Electro-Magnetic Environment, Qingdao 266107, China)

**ABSTRACT: Objective** To improve the environmental adaptation of ionospheric radio from space surveillance radar. **Methods** When the VHF-L radio propagated through the ionosphere, the radar signal was incoherently scattered by the ionospheric free electron and the ionosphere information was included in the scattered echo. Combined with the radar equation and ionospheric target property, the radar parameter setting and beam scanning mode were investigated by the incoherent scatter mechanism of ionosphere. The ionospheric echo power, auto-correlation function and electron expression were introduced. And the raw sampling data from one space radar with high power was processed by using the Matlab routine and the ionospheric echo and electron density were obtained. **Results** Conditions for the ionospheric incoherent scatter from the space surveillance radar was described. ionospheric echo and The electron density varied in accordance with the ionospheric characteristic. **Conclusion** It is feasible to derive the ionospheric electron density from the scattered echo of space surveillance radar with high power in VHF-L band, which might be a new method for ionospheric environment measurement and propagation correction.

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-04-22

基金项目:装备预研基金项目

作者简介:丁宗华(1978—),男,湖北人,博士,主要研究方向为电离层空间环境探测。

#### KEY WORDS: radar; scatter echo; ionosphere; electron density; incoherent scatter

利用大功率雷达探测空间目标时,若雷达信号穿过 电离层(地面以上 90~1000 km 的区域)传播,电离层 中的电子、离子等将对入射电磁波产生非相干散射。通 过对这种空间非相干散射回波的提取和分析,可以反演 雷达信号传播路径上的电离层电子密度等参数,从而可 能实现一种电离层探测新手段,并且用于大功率空间监 视雷达的电离层电波传播自适应修正。Gordon等<sup>[1]</sup>从理 论上提出了利用大功率雷达探测电离层非相干散射散 射回波和物理参数的设想,随后 Bowles 等<sup>[2]</sup>利用美国 Long Branch 雷达(工作频率为 41 MHz,峰值功率为 6 MW)进行了首次电离层非相干散射探测试验,验证了 大功率雷达探测电离层的原理可行性,随后电离层非相 干散射技术得到迅速发展<sup>[3—5]</sup>,目前国际上已建设了 10 多部非相干散射雷达<sup>[6]</sup>。

作为目前最强大的电离层地基探测手段,大功率 非相干散射雷达在空间目标监测方面也具有重要应 用价值[7-8],同样,反过来其他大功率空间监视雷达 也可能用于电离层非干散射探测。20世纪80年代初 中国电波传播研究所<sup>[5]</sup>利用原 7010 相控阵空间目标 监视雷达,通过研制专门的信号采集与处理终端,成 功检测出电离层非相干散射回波<sup>[9-10]</sup>,并计算了电离 层电子密度、电子温度、离子温度等参数。由于受当 时雷达技术、信号处理和数据反演方法的限制,在信 号处理方法实时性、探测分辨率、反演参数精度等方 面存在许多不足,也未说明利用大功率雷达开展电离 层非相干散射探测的条件与要求,无法满足大功率空 间监视雷达电离层探测与自适应修正的需求。文中重 点分析了利用大功率雷达开展电离层非相干散射探 测的条件并介绍了有关的电离层参数反演方法,最后 给出了某大功率雷达实测数据初步分析结果。

## 大功率雷达的电离层非相干散射探 测条件

### 1.1 电离层非相干散射方程

电离层非相干散射是指电离层等离子体随机热 起伏对入射电磁波产生的散射,由于散射截面与等离 子体电荷质量比紧密相关,因此实际上主要是电离层 中自由电子产生的非相干散射。由于电离层电子散射 截面非常小,散射信号很弱,因此一般需要大功率雷 达才能够探测到。电离层非相干散射信号主要来自电 离层自由电子散射,它弥散分布在雷达波束内,属于 分布式软目标。设电离层探测目标的散射体积为:

$$V = \frac{\pi}{4} \theta_{0.5} \varphi_{0.5} R^2 dR$$
 (1)

式中: $\theta_{0.5}$ 和 $\varphi_{0.5}$ 为天线的方位和俯仰波瓣宽度; *R*为雷达到电离层目标的距离;d*R*为距离分辨单元,与码冲宽度有关。单个自由电子的散射截面为 $\sigma_0 \approx 10^{-28}$ ,此散射体积内的电子密度为 $N_e$ ,则总的散射截面为 $\sigma = VN_e\sigma_0$ ,代入单基地雷达方程,可得到非相干散射信号功率表达式为<sup>[3]</sup>:

$$P_{\rm r} = \frac{0.76 P_{\rm t} A L c \tau N_{\rm e} \sigma_0}{16 \pi^2 R^2}$$
(2)

式中: *P*<sub>t</sub>为发射功率; *A* 为天线有效面积; *L* 为 系统损耗; *τ* 为脉冲宽度。与常见的硬目标雷达方程 不同,电离层非相干散射回波信号功率与距离的平方 成反比。

#### 1.2 非相干散射信号的可检测性和测量误差

假设在 300 km 高度处散射,电离层电子密度为  $10^{12}$ /m<sup>3</sup>(对应最强的散射回波),脉冲宽度为 32 µs, 散射点处雷达波束横向面积为 1 km<sup>2</sup>,则单个距离门 内总电子数目为 5×10<sup>21</sup>,总散射截面为 5×10<sup>-7</sup>,雷达 天线有效口径面积为 500 m<sup>2</sup>,雷达发射功率为 1 MW。代入式(2)可得,达到天线处的空间散射回波功率 为 2.5×10<sup>-16</sup> W。

另一方面,设接收机带宽为 500 kHz, 雷达系统噪声温度为 200 K,则天线接收的噪声功率为 1.38×10<sup>-15</sup> W。由此可见,在不采取相干积累条件下,最强的电离层散射回波还远低于噪声。因此,非相干散射探测一般应采用大功率发射、大口径天线接收、低系统噪声温度、非相干积累、复杂编码和信号处理等技术才能检测到电离层散射回波。

电离层非相干散射测量误差主要与回波信噪比、 脉冲积累系数等有关,表达式为<sup>[3]</sup>:

 $\frac{\Delta P_{\rm r}}{P_{\rm r}} = \pm \sqrt{\frac{1}{n}} \sqrt{1 + \frac{2}{P_{\rm r}/P_{\rm n}} + \frac{1}{(P_{\rm r}/P_{\rm n})^2} + \frac{1}{m(P_{\rm r}/P_{\rm n})^2}}$ (3)

式中: n 为积累次数; P<sub>n</sub>为背景电磁噪声功率; m 为噪声测量点数。

一般来说,电离层 F2 层电子密度大,散射信号强,信噪比较高。图1给出了非相干散射功率测量误差随积累次数和信噪比的变化,横坐标表示脉冲积累次数,纵坐标表示相对测量误差,不同曲线对应不同 信噪比。从图1可见,非相干散射回波测量误差对信 噪比的依赖性很强。当信噪比低于0.1时,功率测量 误差很大。当信噪比为0.01时,即使积累1万次(探测时间约100s),功率测量误差可达100%。另外当 探测积累次数在2000次以上时,非相干散射功率测 量误差基本不随积累次数增加而发生改善。因此当电 离层电子密度很弱,散射信号信噪比很低时,测量误 差会很大,单纯增加积累次数不一定能改善测量误 差,还需结合其他手段,如采用灵活的波形设计等。



图 1 非相干散射测量误差与信噪比、脉冲积累数的关系

#### 1.3 对雷达参数和波束扫描方式的要求

#### 1.3.1 工作频率

一般要求雷达波长远大于等离子体德拜长度,而 电离层等离子体德拜长度为厘米量级甚至更小,所以 频率通常应小于 S 波段。但频率不能太低,频率越低, 则背景电磁噪声偏大,同时天线和雷达发射机等硬件 设备更复杂。低于 VHF 波段时背景噪声过大,而且 电离层散射谱谱宽很窄,导致散射信号信噪比很低, 因此非相干散射探测的频率一般为 VHF~L 波段。

#### 1.3.2 发射功率

由于电离层散射信号非常微弱,为了得到满意的 信噪比,通常要求发射峰值功率在兆瓦量级。 133 天维及扫描支式

1.3.3 天线及扫描方式

非相干散射信号非常微弱,为了提高对微弱信号的 检测能力,一般采用大口径抛物面天线和天线阵,此时 天线有效面积至少数百平米,天线增益约 40 dB 或更 大。由于电离层不是空间均匀分布的,经常会出现各种 尺度的不规则结构。为了提高对小尺度结构探测的横向 分辨率,要求具有较窄的波束宽度。为了减小旁瓣信号 的干扰,要求天线的旁瓣电平比主瓣低得多。此外为了 快速调整波束指向,以实现电离层三维空间扫描探测, 要求天线具有一定的波束指向控制能力。

对于大功率空间监视雷达,当采用波束凝视探测 模式时,由于波束指向固定的电离层空间区域,此时 与电离层非相干散射探测相似,只需对固定指向的电 离层区域进行连续数千次以上(10 s 以上)积累,即 可得到电离层非相干散射回波。

当采用跟踪扫描模式时,由于雷达波束指向快速 变化,不同指向的电离层回波不一定相关,因此对雷 达波束扫描速度和脉冲积累次数具有一定限制。如果 雷达波束扫描速度为1(°)/s,则不同扫描时间对应的 不同高度处的扫描弧长见表1。由于电离层具有一定 的水平空间均匀性(一般认为水平方向 50 km 范围内 电离层状态均匀,散射回波具有相关性),则扫描 10 s时 300 km 处的弧长已超过 50 km,无法满足水 平均匀性条件。另一方面由于电离层至少在 1 min 之 内满足时间均匀性(在 1 min 之内,电离层状态基本不 变)。因此若在 1 min 内,雷达波束始位于同一相关区 域,则可将此时间和相关区域内的散射回波进行相干 积累,以便获取电离层非相干散射回波。

表 1 不同扫描时间、不同高度处的扫描弧长

高度/km	扫描时间/s			
	5	10	20	30
100	8.72	17.44	34.88	52.32
300	26.18	52.36	104.72	157.08
500	43.63	87.26	174.53	261.8

#### 1.3.4 系统噪声温度

非相干散射探测除了采用高发射功率和高增益 天线外,还应最大限度地降低系统噪声温度,通常要 求小于 300 K。

#### 1.3.5 脉冲宽度与波形

为了得到较强的散射回波,一般要求脉冲宽度尽可能宽,至少为数百微秒。此时自相关函数时延范围可达数百微秒,对应的非相干散射功率谱分辨率为千赫兹量级,满足电离层非相干散射要求。脉冲宽度不能过宽,否则在同样占空比条件下,脉冲重复周期太长,脉冲重复频率太低,速度模糊严重。为了获得高时宽带宽积,一般采用相位编码脉冲,可同时获得较宽的脉宽宽度和较高的距离分辨率。

常见的硬目标不同,电离层为分布式软目标。为 了适应不同探测高度上对距离分辨率和功率谱分辨 率的要求,同时为了尽可能压缩旁瓣,提高信噪比, 需采用复杂的编码。常用的脉冲波形为交替码、巴克 码、互补码等。其中交替码是非相干散射雷达专用相 位调制码。

## 2 信号处理与电离层反演方法

设雷达空间散射回波信号采样数据为 z,发射脉 冲为 m,则积累后的电离层回波功率为:

$$P_{i} = \sum_{j=1}^{N} c_{j} (|m_{j} \otimes z_{ij}|^{2} - P_{nj})$$
(4)

式中:  $\otimes$ 表示卷积运算;  $P_n$ 为噪声功率; i表示 距离门(一般从 100 ~700 km)的序号; N为相干积 累次数; j表示积累次数的序号;  $c_j$ 为某次积累时的 系数。

雷达采样数据的自相关函数表达式<sup>[3]</sup>:  
<
$$Z(t)Z^*(t') \ge K\sigma_e(t'-t,\overline{R})\int W_{t't}^r(s)ds$$
 (5)

式中:  $\bar{R}$ 为距离模糊函数高度覆盖区域的中点; *K*为雷达硬件有关的参数;  $\sigma_e(t'-t,\bar{R})$ 为电离层等离 子体自相关函数;  $W'_{t't}(s)$ 为模糊函数。可见散射回波 信号的自相关函数是等离子体自相关函数在空间和 时间的加权, 权函数就是模糊函数。通过计算散射回 波的自相关函数, 再用模糊函数进行修正, 消除编码 和接收机滤波器的影响, 就可以得到电离层自相关函 数。由电离层自相关函数进行傅里叶变换可得到电离 层散射功率谱, 由电离层散射功率谱谱形可进一步反 演得到电离层电子与离子温度等众多等离子体参数。

由非相干散射雷达方程得到电离层电子密度表 达式为<sup>[3,9,11]</sup>:

$$N_{\rm e} \approx k \frac{R^2 P_{\rm r}}{2} (1 + \alpha^2 + T_{\rm r}) (1 + \alpha^2)$$
(6)

式中: *k* 与雷达系统参数,如发射峰值功率、脉 冲宽度、天线增益和系统损耗等有关,一般需利用其 他手段(如电离层垂直探测仪探测的最大电子密度) 来标校; *a* 为电离层等离子体德拜长度与雷达波长之 比; *T*<sub>r</sub>为电离层电子温度与离子温度之比。由于德拜 长度为厘米量级甚至更小,而对 VHF-L 波段频率来 说,雷达波长大于 15 cm,因此*a*<sup>2</sup>一般很小(约 0.001),可以忽略。电离层的电子与离子温度比随 着高度变化,一般约 1~3,需利用散射功率谱反演 的电子温度和离子温度计算获得。若假定电子离子温 度比为常数(通常在夜间满足)则式(4)可进一步 简化。

## 3 实测数据分析

2015年1月使用某 P 波段大功率空间环境监测 雷达<sup>[5]</sup>进行电离层非相干散射探测实验。雷达参数: 抛物面天线口径为 29 m、峰值功率为 2 MW、平均功 率为 100 kW、工作频率为 500 MHz、天线增益为 41 dB、系统损耗为 3.5 dB, 采用凝视探测模式, 发射脉 冲为 13 位巴克码,脉冲重复周期为 12 ms、脉宽为 390 µs、码元宽度为 30 µs。图 2 给出了该雷达空间散 射回波的原始采样,可见空间散射回波电平随机变 化,无显著的电离层高度分层变化特征。利用 1024 次(约12.3s)和10240次(约123s)脉冲重复周期 的数据分别进行相干积累,在普通台式计算机上利用 Matlab 语言编程处理得到了电离层散射回波功率剖 面和电子密度剖面,耗时为数十分钟,如图3和图4 所示。可以看出, 电离层电子密度剖面具有先增加后 降低的趋势,在约250 km 具有最大电子密度,此外 在 150~200 km 具有疑似分层结构,这些都符合电离 层基本变化规律。相对于图 3,图 4 的回波信噪比更 高,电子密度变化曲线更光滑,精度相对更高。这里 利用 Matlab 编程处理的时效性很低,为了满足实时 的电离层探测与修正的需求,可从以下几个方面提高 数据处理速度和实时反演:采用 C 语言等底层语言编 程,因为 Matlab 编程执行效率低,占用内存高,耗 时长;采用高性能的计算设备;进一步优化数据处理 算法和程序代码。





图 4 电离层散射回波功率和电子密度剖面(积累 10240次)

## 4 结语

详细分析了利用大功率雷达开展电离层电子密 度非相干散射探测的基本方法,并就雷达参数和天线 扫描方式设置进行了讨论,最后给出了某大功率雷达 实际采集数据及其电离层回波功率剖面和电子密度 剖面,初步验证了以上方法的原理可行性。这对利用 大功率空间监视雷达开展电离层探测进而用于雷达 目标定位的电波折射修正,从而提高目标定位精度提 供了一种新思路,同时可能为电离层空间环境探测提 供一种新手段,具有重要的科学意义和应用价值。

#### 参考文献:

- GORDON W E. Incoherent Scatter of Radio Waves by Free Electrons with Applications to Space Exploration by Radar[J]. Proc IRE, 1958, 46(11): 1824–1829.
- [2] BOWLES K L. Observation of Vertical Incidence Scatter from the Ionosphere at 41Mc/sec[J]. Phys Rev Lett, 1958(1): 454—455.
- [3] EVANS J V. Theory and Practice of Ionosphere study by

Thomson Scatter Radar[J]. Proc IEEE, 1969, 57(4): 496-530.

- [4] EVANS J V. Millstone Hill Thomson Scatter Results for 1965[J]. Planetary Space Sci,1970, 18(8):1225—1253.
- [5] 丁宗华, 吴健, 许正文, 等. 电离层非相干散射雷达探 测技术应用展望[J]. 电波科学学报, 2016, 31(1): 193— 198.
- [6] 丁宗华,代连东,董明玉,等.非相干散射雷达进展:从 传统体制到 EISCAT\_3D[J].地球物理学进展,2014, 29(5):2376—2381.
- [7] MANDEVILLE J C, RIBONI F, BLELLY P L. Interpretation of EISCAT RADAR data for Orbital Debris Study[J]. Advances in Space Research,1995, 16(11): 29– 33.
- [8] 丁宗华, 许正文, 赵振维. 非相干散射雷达的空间碎片 参数提取[J]. 现代雷达, 2014, 36(2): 1-5.
- [9] 郑传青,景玉山,倪济安,等.利用非相干散射雷达探 测电离层[J].电子学报,1984,12(6):11—15.
- [10] 郑传青,朱太平,景玉山.利用 R10 雷达探测电离层电 子浓度、电子和离子温度分布[J].电波科学学报,1986, 1(1):11—19.
- [11] 丁宗华, 鱼浪, 代连东, 等. 曲靖非相干散射雷达功率 剖面的初步观测与分析[J]. 地球物理学报, 2014, 57(11): 3564—3569.