

非相干散射探测历史与海南三站式非相干散射雷达

丁 锋 乐新安

(中国科学院地质与地球物理研究所 100029)

非相干散射雷达是最为重要的空间环境地基探测仪器。它不仅能高精度地探测几乎整个电离层高度上的等离子体密度、成分、温度、漂移速度,还能间接探测背景中性大气的温度、风场等电离层和高层大气中的重要参量。此外,非相干散射雷达还能够对空间碎片、月球等目标进行有效探测。

非相干散射雷达最主要的探测目标是电离层。电离层是高层大气中受太阳辐射而部分电离的一部分,在地面以上60~1000 km高度范围。由于其中带电粒子对电波传播的影响,电离层的变化对无线电通讯、全球卫星导航、空间探测器轨道等人类活动有重要影响。

一定频率的电磁波在入射到电离层中的部分电离大气后,产生汤姆孙散射。该散射信号中包含等离子体温度、密度、集体漂移速度等信息。非相干散射雷达通过向电离层发射大功率无线电波并接收和处理回波,来对电离层的各种参量进行测量。由于电离层散射信号非常微弱,探测难度比较高,对雷达的技术性能指标和数据处理有较高要求。因此,非相干散射雷达探测代表了一个国家在地球空间地基科学探测研究水平和综合技术的能力。世界上目前只有少数几个国家和地区,如美国、欧洲和中国,拥有非相干散射雷达。

海南三站式非相干散射雷达是“十三五”国家重大科技基础设施“子午工程二期”的骨干设备,于2023年建成并通过工艺测试。海南三站式非相干散射雷达是世界上首套相控阵体制多站式非相干散射雷达系统,也是我国第一部相控阵体制的非相干散射雷达,能够实现对电离层漂移速度等参量的矢量探测。

本文尝试对非相干散射探测历史和海南三站式非相干散射雷达做一个介绍,内容包括非相干散射原理,全球非相干散射雷达回顾,以及海南三站式非相干散射雷达等三部分。

一、非相干散射原理

非相干散射探测原理的发现可追溯到20世纪50年代。在此前的研究中,科学家们已经初步观测到了地球上空电离层的存在,并通过测高仪的观测反演出不同高度的电离层电子密度。但是,这种基于磁离子理论和测高仪观测的电子密度反演需要预设一个电离层电子密度随高度变化的数学模型。由于电离层的变化性,此种预设给反演精度带来比较大的偏差。因此,电离层电子密度、等离子体漂移速度、电子和离子温度等此前一直缺乏直接的、精确的测量。

1958年,美国物理学家戈登(William E. Gordon)通过理论分析提出,可以使用大功率雷达向电离层发射探测波束并接收电离层的散射回波,从回波信息中直接反演出电离层电子密度等关键参量(Gordon, 1958)。考察电离层中的一个等离子体团,当一束单一频率的无线电波入射到该等离子体团时,电子和离子都会产生受迫振荡,进而散射出电磁波。由于离子的质量远大于电子,离子产生的散射波强度远小于电子,因此我们探测到的主要是电子的散射回波(电子的汤姆孙散射)。由于自由电子在做随机热运动,每一个电子散射的回波会出现一个对应于该电子瞬时热运动速度的频率移动。对于一个等离子体团,其中所有电子产生的散射总回波被雷达接收到后,在雷达接收信号的频谱分布中表现出一

定的频谱展宽,该频谱宽度与电子温度相关。由此,可以从观测到的频谱宽度求得电离层电子温度。戈登进一步认为,等离子体团中电子和电子之间互不相干,所产生的散射回波功率是由各自相互独立的电子所产生的汤姆孙散射功率之和。这样,回波功率就正比于电子密度。因此,他将其命名为“非相干散射”。由此,由观测到的散射电波的功率谱密度可以推算得到电离层电子密度。基于此种理论,戈登推导出了电离层电子密度和电子温度等关键参量与电离层散射回波功率谱的定量关系式。尽管电子的散射回波非常微弱,但戈登认为,使用大功率雷达有可能会探测到电子的散射回波功率,进而通过定量关系计算得到电离层的电子密度和温度等关键参量。

在戈登提出非相干散射的概念仅仅六周后,1958年10月,美国的另一位物理学家鲍尔斯(Kenneth L. Bowles)使用美国的一部大功率雷达,实验观测到了电离层的散射回波(Bowles, 1958)。但是,鲍尔斯发现,观测到的电离层散射回波的谱宽只有戈登预测谱宽的几百分之一。这意味着,在雷达接收到的回波信号中,由等离子体散射引起的信号的多普勒频移远小于根据自由电子随机热速度推算出来的值。这说明,接收到的信号不完全是自由电子的非相干散射造成,而似乎更像是包含了离子的散射。

随着等离子体物理学的发展,从20世纪60年代开始的几十年里,经过大量学者的理论研究和实验验证,非相干散射理论逐渐完善了起来。科学家们认为,电离层的电子不完全是自由运动的。电子浸在离子云之中,相互之间存在库仑力。在库仑力起显著作用的范围内(如,一个正离子周边的德拜半径范围内),电子受正离子的束缚较强。一个正离子的德拜半径内,会存在多个电子;当正离子运动的时候,德拜半径内的电子也跟随着正离子运动。这样,在电子的散射回波中,既包含了电子本身的热运动信息,又由于电子跟随离子运动而包含了离子的运动信息。电子跟随离子的运动由于是集体运动,产生的散射波强度大于电子随机热运动产生的散

射波,从而在散射波频谱中占据主导地位。可见,散射波中电子跟电子之间并不完全独立,散射信号是部分相干的。学者们用不同的理论模型进行研究,获得几乎完全一致的结果。因此,“非相干散射探测”实质上仍是相干散射探测。但“非相干散射”这个名词却早已为学界所习惯,所以一直被沿用了下来。

由上面的介绍我们知道,在电离层等离子体中,电子或离子的集体运动能够产生较大的散射波功率。考虑一种情形,当一团等离子体中发生许多粒子共同参与的大范围运动时,我们用一束电磁波去照射这团等离子体,所产生的散射波功率相对较强,也就有更可能被非相干散射雷达探测到。在等离子体中,典型的常态化存在的大范围集体运动主要是一些波动,如朗缪尔波和离子声波等。非相干散射雷达主要是针对这两种等离子体波动过程中电子的汤姆孙散射进行探测。当一束电磁波入射到一团等离子体,我们所观测到的散射波功率谱中包含了这些不同波动过程产生的频谱分布。不同波动过程,由于其物理机制不同,电子的运动规律不一样,所产生的频谱分布具有各自不同的特征。也就是说,等离子体中不同的波动过程散射出来的回波对应于各自不同的功率谱密度函数。通过等离子体动理论,可以得出不同波动对应的功率谱密度函数与电离层中电子密度、电子和离子温度、漂移速度等参量的定量关系,即非相干散射理论谱。典型的理论谱如图1所示。图中分别显示了由等离子体中的离子声波引起的离子谱线(红色),以及朗缪尔波引起的等离子线(蓝色)。这样,理论谱就把电离层中待测的各种参量与非相干散射雷达可探测的量联系起来。由于功率谱密度函数可以通过非相干散射雷达探测到的回波信号来分析得到,我们通过对观测到的功率谱密度函数和理论谱的分析和数据处理,就可以得到电离层中电子密度等各种参量的值,实现电离层的非相干散射探测。

二、全球非相干散射雷达回顾

自20世纪50年代末人造地球卫星上天以来,

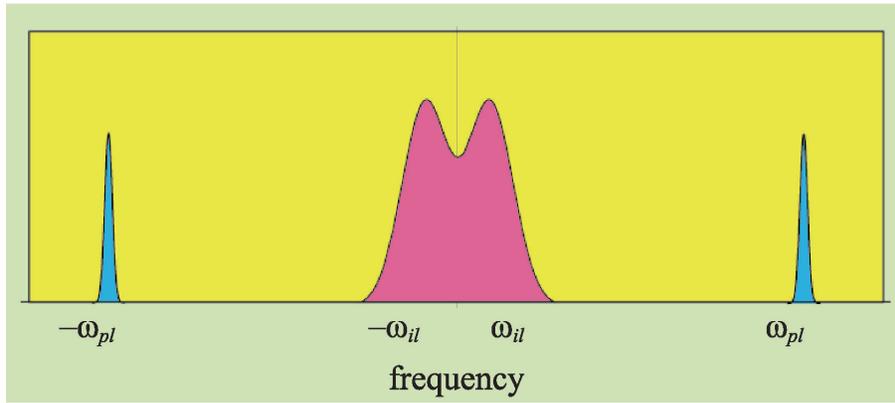


图1 非相干散射理论谱示意图。低频端红色部分双峰谱为离子声波引起的离子谱线,高频端蓝色部分为朗缪尔波引起的等离子谱线。 ω_{il} 为离子声波振荡频率, ω_{pl} 为等离子体频率

人类进入空间时代。大部分航天器运行在电离层高度,对地球外层空间环境的探测需求日益增多。1958年,随着非相干散射理论的提出,美国率先开始在阿雷西博(Arecibo)建造非相干散射雷达,以实现电离层的剖面探测。从1960年到1971年,美国相继建成 Jicamarca, Arecibo, Millstone Hill 和 Sondrestrom 等大型的相干散射雷达,形成从高纬度地区到低纬赤道区的一条非相干散射雷达链。其中,位于地磁赤道的 Jicamarca 雷达使用偶极子天线阵收发信号,雷达工作频率为 49.9 MHz,其特有的长波特性使得有效探测信号可达 5000 千米高度,这个高度已到达磁层;位于低纬度地区的阿雷西博雷达是美国最先开始建造的一部非相干散射雷达。由于阿雷西博雷达基于最初尚未完善的非相干散射理论建造,当时的理论一定程度上低估了电离层散射回波功率,因而该雷达拥有世界上最大的单口径球面天线,天线的有效直径为 305 m,工作频率是 430 MHz,峰值功率可达 2.5 MW。其天线增益达到 62 dB,也是迄今世界上非相干散射雷达中最大的。该雷达兼具射电天文和电离层探测功能,其高增益使得其能探测到电离层的精细结构,在 2022 年停用之前积累了大量观测数据。位于美国本土中纬度地区的 Millstone Hill 雷达有两套天线系统,该雷达至今已有 40 多年的连续观测记录。位于格陵兰岛的 Sondrestrom 雷达是美国运行时间最长的高纬电离层非相干散射雷达。

在欧洲,英国、法国等国在 20 世纪六七十年代建造过一些短时间运行的非相干散射雷达。20 世纪 70 年代末,欧洲各国科学界在挪威共同建造了欧洲非相干散射雷达群(European Incoherent Scatter Scientific Association, 简称 EISCAT),运行着三部非相干散射雷达。EISCAT 在相当长时间内是世界上唯一的传统体制多站式雷达,具备电离层等离子体矢量速度探测能力,即将被目前在建的相控阵体制三站式雷达 EISCAT-3D 代替。

在子午工程一期的支持下,我国于 2012 年初在云南曲靖建成了首台非相干散射雷达,工作频率 500 MHz,发射脉冲功率 2 MW,采用口径 29 m 碟形天线,测量的高度范围 90~1000 km。

以上雷达均为传统体制非相干散射雷达,需要大量的大功率高压部件,系统庞大复杂,运行与维护费用高昂。并且,由于建造时间较早,受雷达技术制约,在雷达工作模式、探测分辨率、探测能力等方面存在局限。

进入 21 世纪以来,随着技术的进步和空间科学需求的日新月异,以大功率集中功放为标志的第一代非相干散射雷达技术发生了革命性的变化,以美国发展的分布式相控阵为标志的第二代非相干散射雷达探测技术取得突破,其技术和方法不断完善和发展。2000 年,美国提出了“先进模块化的可移动雷达 Advanced modular incoherent scatter radar (AMISR)”计划,并于 2005~2006 先后在美国阿拉斯加的 Poker

Flat 和加拿大的 Resolute Bay 建造起两部现代相控阵体制的非相干散射雷达 PFISR 和 RISR。这两部雷达在设计上引入了很多新理念:首次在非相干散射雷达中采用有源相控阵技术,能够完成全空域扫描探测;模块化程度高,便于维护;率先采用全固态发射技术。

三、海南三站式非相干散射雷达

海南三站式非相干散射雷达是在原三亚非相干散射雷达的基础上发展起来的。从 2015~2020 年,在国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)的资助下,中国科学院地质与地球物理研究所与合作单位中国电科十四所、南昌大学一起,历经六年时间,研制成功一台由 4096 个天线单元组成的三亚非相干散射雷达(Yue et al, 2022)。它是国内首套相控阵体制的非相干散射雷达。

在前期三亚非相干散射雷达基础上,从 2019 年到 2023 年,中国科学院地质与地球物理研究所完成了海南三站式非相干散射雷达的建设,目前已通过工艺测试。海南三站式非相干散射雷达隶属于子午工程二期海南低纬监测分系统。它的主要建设内容包括:在前期三亚非相干散射雷达的基础上,将三亚站雷达收发阵面扩展一倍,达到 8320 个天线单元,峰值发射功率超过 4 兆瓦;此外,在海南岛的儋州和文昌分别新建两个雷达接收阵面,每个接收阵面由 4096 个接收天线。三个站形成一发三收的格局,可实现对电离层漂移速度等的矢量观测。图 2 为海南三站式非相干散射雷达“一发三收”工作模式示意图。图 3 为海南三站式非相干散射雷达建成后的航拍照片。

与美国和欧洲在 20 世纪六七十年代建设的传统体制非相干散射雷达相比,海南三站式非相干散射雷达采用了多项现代体制雷达的先进技术,包括模块化有源相控阵、全固态发射、数字接收和波束

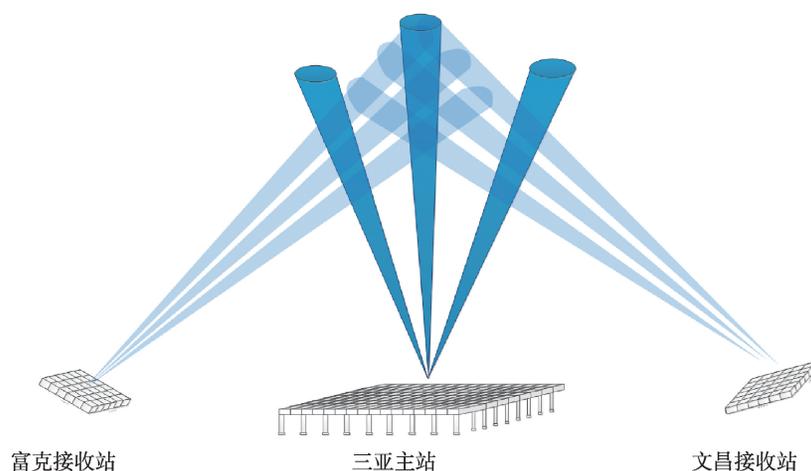


图 2 海南三站式非相干散射雷达“一发三收”工作模式示意图



图 3 海南三站式非相干散射雷达实物图。从左到右为儋州站雷达接收阵面, 三亚主站雷达收发阵面, 以及文昌站雷达接收阵面

合成等,在雷达总体上综合应用系统软件化和功能模块标准化设计,使得该雷达具有持续观测、全空域覆盖、空间快速扫描等新的优势。其中与传统雷达最重要的不同,就是海南三站式非相干散射雷达的相控阵体制。

雷达的工作原理是,发射一个窄波束的电磁波到空中,电磁波入射到目标产生反射或者散射后,雷达接收到信号回波;雷达通过对回波进行分析,来确定目标的性质、速度、方位和距离等特性参量。为了让雷达能够探测较大的空间范围,需要不断改变波束的指向,就像探照灯一样,去照射更大范围的空间目标。传统的非相干散射雷达一般有一个庞大的天线系统,采用机械扫描的方式,通过伺服系统改变天线系统的转动角度,来改变波束的指向,以达到扫描的目的。由于天线系统庞大笨重,机械扫描速度缓慢,这严重制约了雷达的探测范围和探测数据的时间空间分辨率。

与传统体制雷达不同,海南三站式非相干散射雷达是一部有源相控阵雷达,由成千上万个小型的天线单元组成。这些天线单元有规则地排列在一个平面上,构成阵列天线。利用电磁波相干原理,通过计算机控制各天线单元电流的相位,能够将天线阵列上各单元发出的电磁波合成为沿某一方向照射的窄波束,并通过改变相位来改变波束的指向进行扫描。由于相控阵雷达采用相位扫描的方式,其扫描速度比传统的机械扫描快得多。在一定的探测时间范围内,可看作是同时发出多个波束对空间中不同区域进行探测。在相同的孔径与操作波长下,相控阵非相干散射雷达的扫描范围、探测数据时间空间分辨率等都远优于传统雷达。

在一个典型的非相干散射离子谱线探测周期里,海南三站式非相干散射雷达在三亚收发站向一定方向发脉冲编码信号。发射信号穿透整个电离层,并沿途引起电离层等离子体散射。部分散射波向雷达方向返回,并被雷达接收到。在接收的信号回波中,既包含发射信号的消息,也包含空间不同高度等离子体的散射信息。雷达的信号处理机对

接收信号进行解码,经过一系列的信号处理过程,得到不同高度的散射信号功率谱密度函数。随后,我们采用多参量拟合方法,即将雷达探测到的离子线功率谱与理论计算得到的功率谱进行拟合,经过反复迭代,得到不同高度的电子密度、电子温度、离子温度和离子在视线方向的漂移速度等众多电离层参量。

三亚站发射的信号,在电离层同一散射体积内被散射之后,被三亚、儋州和文昌三个站接收到。根据双基地雷达原理,从每个站的接收数据中,可以反演得到对应于发射波束和接收波束角平分线方向的等离子体视线漂移速度。通过三个站测量得到的不同方向的视线漂移速度,即可得到电离层同一散射体积内离子的矢量漂移速度,进而根据离子动量方程反演得到电离层电场矢量和高层大气风场矢量等高阶参量。图4展示了海南三站式非相干散射雷达在一天之内探测得到的电离层电子密度、电子温度、离子温度和离子漂移速度随时间和高度的变化。从图中可以看到电离层电子密度等参量的高度剖面结构及其随地方时变化呈现出的规律变化。

四、小结

电离层非相干散射雷达探测是地基电离层探测最为强大和有效的手段,为电离层科学研究发挥了十分重要的作用。由于非相干散射探测技术要求高,系统十分复杂,花费巨大,此前主要是美国和欧盟多国分别在美洲建立了4站构成的雷达观测链和北欧高纬雷达群,开展了持续有效的电离层探测研究。进入21世纪以来,随着技术的进步和空间科学需求的日新月异,以大功率集中功放为标志的第一代非相干散射雷达技术发生了革命性的变化,以美国发展的先进模块非相干散射雷达探测技术成功和系统的运行,分布式相控阵为标志的第二代非相干散射雷达探测技术取得突破,其技术和方法不断完善和发展。正是在这种形势下,中国科学院地质与地球物理研究所在国家重大科研仪器研制项

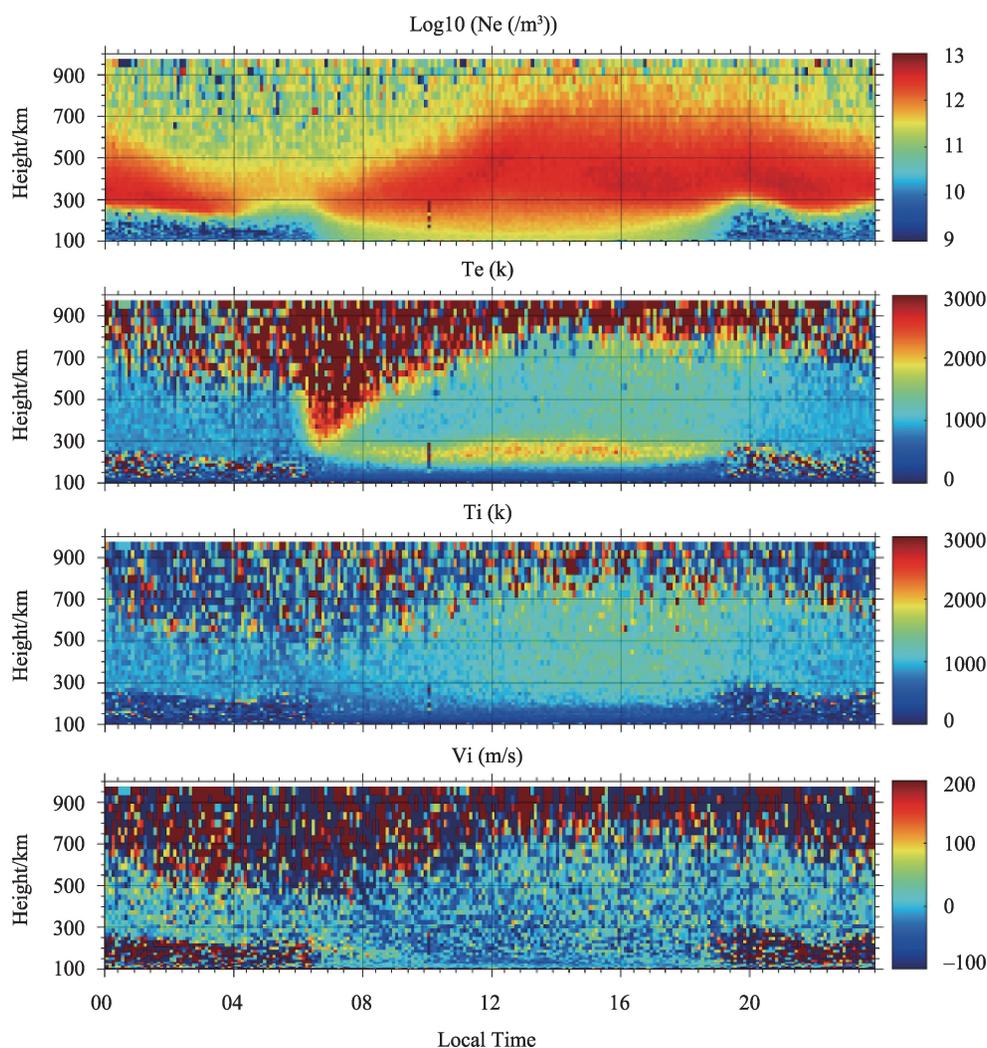


图4 三亚非相干散射雷达探测得到的2023年4月7日电离层电子密度、电子温度、离子温度和离子漂移速度随时间和高度的变化。探测模式为天顶方向交替码探测

目(部门推荐)支持下,从2015年到2020年,经过六年时间建立起中国第一部现代相控阵体制的三亚非相干散射雷达;在子午工程二期支持下,以三亚非相干散射雷达为基础,经过扩展和新建接收站,于2023年建成海南三站式非相干散射雷达,实现对我国低纬地区全天空扫描探测和空间环境矢量观测,为我国低纬电离层科学研究和电离层空间环境应用提供最有力的探测手段。

参考文献

- [1] Bowles K.L., Observation of Vertical-Incidence Scatter from the Ionosphere at 41 Mc/sec, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 1, Iss. 12- 15, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.1.454>, 1958
- [2] Gordon, W. E., Incoherent Scattering of RadioWaves by Free Electrons with Applications to Space Exploration by Radar, *P. IRE*, 46, 1824-1829, <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1958.286852>, 1958.
- [3] Yue X.A. et al, Development of the Sanya Incoherent Scatter Radar and Preliminary Results, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 127(8), e2022JA030451, 2022