

电离层侧向散射探测试验研究

蔚娜, 柳文, 李强, 张长亮

(中国电波传播研究所, 山东青岛 266107)

摘要: 随着高频通信、探测技术的发展,开展电离层侧向散射的研究具有重要意义.搭建了电离层侧向散射探测试验平台,基于该试验平台,进行了侧向散射探测试验,获得了群距离-频率-幅度的三维侧向散射电离图和地、海侧向散射来波谱图.试验结果表明,基于该试验平台,能够获取电离层侧向散射探测结果,为后续电离层侧向散射信道特性、地海杂波特性的深入研究奠定了基础.

关键词: 返回散射; 侧向散射; 电离层探测; 电离图; 多普勒谱图

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1710-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.002

The Experimental Research of Ionospheric Sidescatter Sounding

WEI Na, LIU Wen, LI Qiang, ZHANG Chang-liang

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

Abstract: With the development of HF communication and sounding techniques, study on ionospheric sidescatter is of great importance. Ionospheric sidescatter experimental platform is built, and based on this experimental platform, ionospheric sidescatter sounding experiment is made. In the experiment, the (group) distance-frequency-amplitude three-dimensional sidescatter ionogram and sidescatter doppler spectra of sea and land are obtained. With this experimental platform, the ionospheric sidescatter sounding results can be obtained, which can establish a basis for further study on the characteristics of the ionospheric sidescatter channel and the land/sea clutter.

Key words: backscatter; sidescatter; ionospheric sounding; ionogram; Doppler spectrum

1 引言

短波远距离通信主要靠电离层反射来实现,而作为传输媒质的电离层具有时变色散特性,电离层的这一特性致使短波通信的有效性、可靠性变差.为了适应电离层的特点,提高短波通信的有效性和可靠性,有必要实时进行电离层探测,进而依据实时探测结果,选择合适的通信频率.

目前,常用的电离层探测手段主要有:垂直探测、斜向探测和返回散射探测.垂直探测只能探测垂测站上空的电离层状态,斜向探测只能实现点对点固定电路的探测,而返回散射探测可以实现点对面的探测,具有探测距离远、覆盖范围广的特点,并且,对于某些无法利用垂直探测和斜向探测的区域,返回散射探测有着不可替代的作用.

天波返回散射波传播的过程是:无线电波斜向投射

到电离层,被反射到远方地(海)面,地(海)面的起伏不平及电特性不均匀使电波向四面八方散射,而有一部分电波将沿着原来的(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(如图1所示的接收站A)接收^[1,2].然而,当天波经地(海)面散射时,电波亦可能偏离来时的大圆路径,发生非后向散射的“侧向”传播,经电离层反射到达远离发射点的地方被接收到(如图1所示的接收站B和接收站C),这样的传播过程称为侧向散射传播^[1,2].

那么,在偏离发射站的多个相距一定间距的位置上布置接收站,就可以同时多点接收返回散射信号、侧向散射信号,在短时间内完成对大区域电离层的探测,同时获得电离层的不同角度的返回散射探测结果、侧向散射探测结果,从而可以更精确地获取电离层状态信息.

目前,对电离层返回散射传播特性,国内外相关研究机构已经进行了大量的研究,并取得了一定的研究成

果^[3-10].而国内关于电离层侧向散射传播特性的研究几乎为一片空白,国际上也很少开展这方面的研究工作.随着高频技术应用的发展,开展电离层侧向散射传播特性研究具有重大意义.为此,我们搭建了侧向散射探测试验平台,基于该试验平台,比较系统地开展了扫频和定频侧向散射探测试验,在国内首次获得了侧向散射信号的多普勒谱图、侧向散射扫频电离图.

本文将详细介绍电离层侧向散射试验平台搭建的布局、系统的组成、工作方式等,并给出了侧向散射试验的结果.试验结果表明,基于该试验平台,能够获取电离层侧向散射探测结果,为后续电离层侧向散射信道特性、地海杂波特性的深入研究奠定了基础.

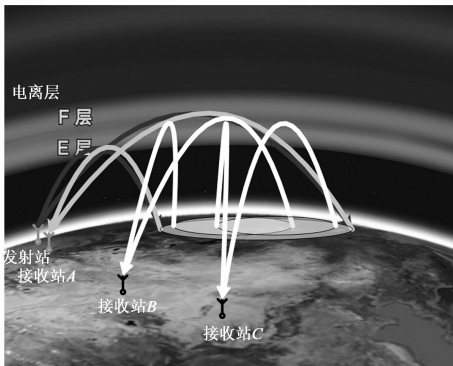


图1 返回散射和侧向散射电波传播过程示意图

2 侧向散射探测试验平台

2.1 系统布局

通常的返回散射探测收发站处于同一位置,或者为了避开发射设备对接收设备的干扰,采用收发分置,但收发两地相距一般在 50km ~ 100km 左右.为了得到侧向散射探测信号,收发站间隔较远的距离是有必要的,在我们搭建的试验平台中,接收站与发射站相距约 1187km.

发射站在接收站北偏东约 50°方向上,发射站天线主波束 3dB 宽度约为 60°.为了探测不同角度的侧向散射信号,接收站采用 8 通道接收,分别连接 8 副定向天线,可同时接收来自不同方向的侧向散射信号,接收站每副天线主波束 3dB 宽度约为 20°,1# ~ 8# 接收天线主波束指向(以发射天线主波束指向为基准,顺时针旋

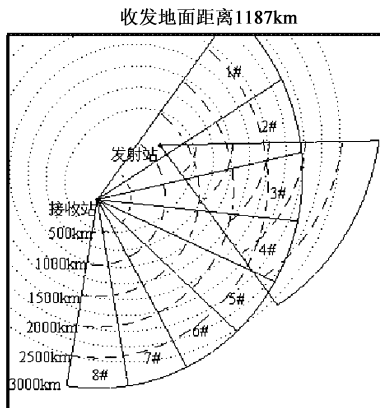


图2 侧向散射探测试验平台布局

转为正)依次为 -70° 、 -50° 、 -30° 、 -10° 、 10° 、 30° 、 50° 、 70° .

整个侧向散射试验平台布局示意图如图 2 所示.

从图 2 可见,在 8 个接收波束中,只有 2#、3# 和 4# 接收天线的主波束与发射波束存在交叉覆盖的区域,而其它区域,我们主要是利用收发天线的旁瓣来实现侧向散射探测.

图 2 还给出了收发两站地面距离和相等的散射点的位置,即图中椭圆线所示,最里面的椭圆线代表的地面距离和为 2000km,由内向外步进 500km.

2.2 设备组成

发射站设备主要包括发射天线、发射机、探测信号产生器、时统系统等,接收站设备主要包括接收天线、模拟和数字接收机、时统系统、数据录取系统等,发射站和接收站设备组成基本框图如图 3 所示.其中收发站之间采用 GPS 同步.

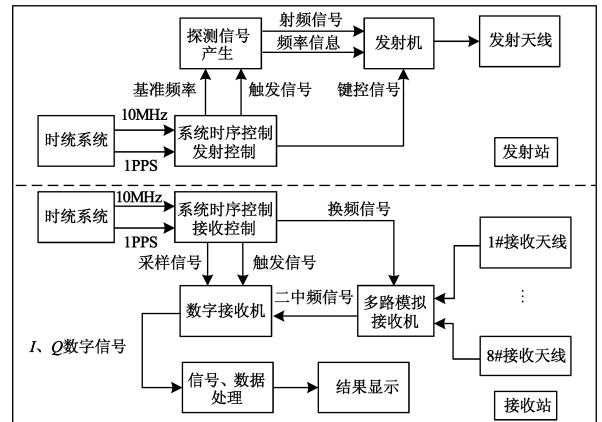


图3 发射站和接收站设备组成框图

2.3 信号波形和工作参数

众所周知,采用脉冲压缩技术,探测系统发射宽度相对较宽而峰值功率较低的脉冲,仍可以获得高距离分辨率的探测结果.线性调频脉冲(LFM)是最早提出的采用脉冲压缩技术的一种信号波形,已成功应用于电离层返回散射探测系统^[11].

由于距离分辨率和探测信号的带宽成反比,因此,为了提高距离分辨率,要求信号具有较大的带宽,然而由于电离层的影响,再加上短波段的干扰比较严重^[12,13],这就限制了信号的带宽,经过试验验证,我们选用的探测信号带宽为 10kHz.另一方面,考虑到强信号旁瓣对弱信号的影响,我们选用的脉冲宽度为 4ms.脉冲重复周期为 50ms.

整个试验系统可以有定频探测和扫频探测两种工作方式.

3 探测结果分析

3.1 扫频探测

扫频探测时,频率范围为 5MHz ~ 25MHz,频率步进为 100kHz(可调),每个频点的驻留时间为 0.2s.图 4 是利用该试验平台扫频探测得到的三维扫频电离图,其中横坐标为工作频率,纵坐标为群距离,即从发射站发出到接收站收到电波传播的群时延与光速的乘积,图中灰度表示接收信号的强度.

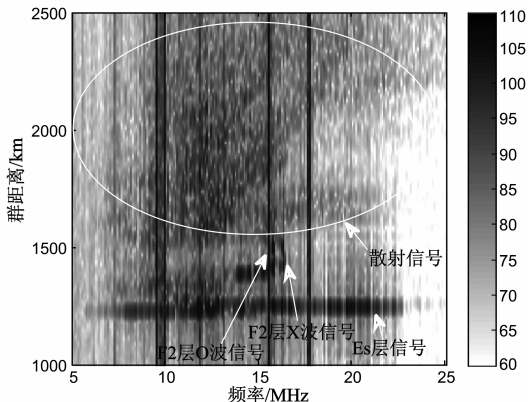


图4 三维扫频电离图

由图中可以看出,电离图上同时包含了发射站到接收站的斜测信号和广延地(海)面的散射信号.对于斜测信号,纵坐标-群距离指的是从发射站经电离层反射到接收站电波传播的距离;对于散射信号,纵坐标-群距离指的是从发射站到散射点电波传播的群距离与从散射点到接收站电波传播的群距离的和.

图中,在群距离 1220km 左右,是 Es 层斜测传播模式信号,F2 层 O 波(寻常波)和 X 波(非常波)的混合描述也清晰可见.对于图中的散射信号,可以明显的看到两个分层,分别是经 Es 层和 F2 层反射的地(海)面散射信号.

图 5 同时给出了 1# 天线 ~ 8# 天线接收信号的三维扫频电离图.由于 1# 和 2# 天线指向和发射站相对于接收站方向比较接近,所以 1# 和 2# 天线接收到的斜测信号比较强,并且此时远高于散射信号,所以即便是通过加窗处理来抑制距离旁瓣,抑制后的旁瓣功率相对于噪底和散射信号还是很强,所以图中这两副天线收到的斜测信号的旁瓣对散射信号的观测影响很大.

由图中可以看出,尽管短波段低频端吸收损耗要强于高频端,试验平台收发天线的增益也是高频端较大,但低频端散射信号的能量要比高频端强,原因可能有两点:①低频端电波传播群距离比较小,自由空间损耗比较小;②低频端是两种传播模式(Es 和 F 传播模式)信号能量的叠加.

3.2 定频探测

定频探测时,采用相干积累,积累时间为 12.8s,多普勒分辨率为 0.078Hz.为了尽量减小斜测信号旁瓣的

影响,我们在作定频探测时将采用较高频率作为工作频率.

图 6 同时给出了利用该试验平台定频探测得到的 1# 天线 ~ 8# 天线接收信号的群距离-多普勒谱图,横坐标是多普勒频率,纵坐标是群距离(同扫频电离图中纵坐标),工作频率为 20.528MHz,时间为 9:23.

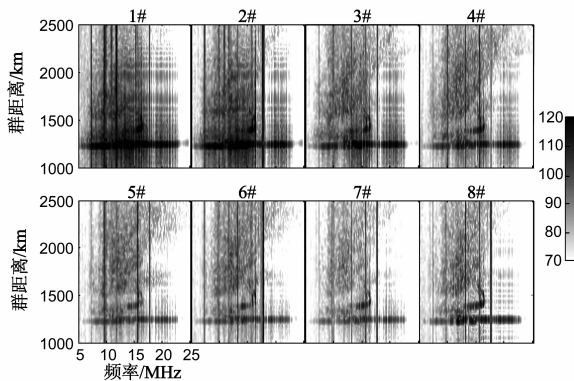


图5 不同天线接收信号的扫频电离图

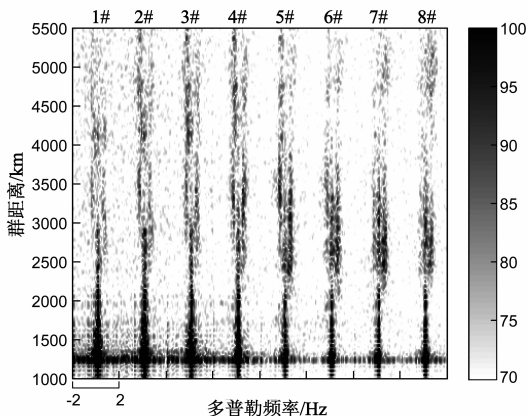


图6 不同天线接收信号的群距离-多普勒谱图

图 7 给出了图 6 中几个典型距离门上的剖面图,选取的距离门分别是 1222km(斜测信号群距离)、3000km、3500km 和 4000km.

结合图 6 和图 7 可以看出,在大约 1222km 处,是 Es 层传播模式信号.此时斜测信号功率非常强,远高于散射信号.

图 6 中,对于 1# 天线的结果,除了收到斜测信号外,在 2600km ~ 3000km 范围内还可看到明显的地杂波信号,随着群距离的继续增大,地杂波信号变弱,并且海杂波信号隐约可见.由图 6 中 2# ~ 5# 天线的结果,可以看到清晰的海杂波信号,海杂波信号最主要的特征是 Bragg 谱线,它是海浪和电磁波谐振产生的散射, Bragg 谱线的多普勒频率和工作频率的平方根有关,对于当前工作频率, Bragg 谱线的多普勒频率理论值为 $\pm 0.4621\text{Hz}$,实测值和理论值基本一致.对于 2#、3#、4# 天线的结果,陆地、陆海交界、海洋的分界线大致能够分辨,海杂波一直延伸到 5000km 以远,并且,在较远

区域负 Bragg 谱线强于正 Bragg 谱线.另外,从 2 # 天线到 5 # 天线,海杂波出现的群距离也越来越近,这和实际的地理环境也是符合的.对于 6 #、7 #、8 # 天线的结果,来波信号主要集中在 3500km 以内,能够看出,此时同时存在地杂波和海杂波,信号相对较强,但此时展宽较大,所以地、海杂波的分界线不再那么明显,并且,负 Bragg 谱线明显比正 Bragg 谱线要弱一些.

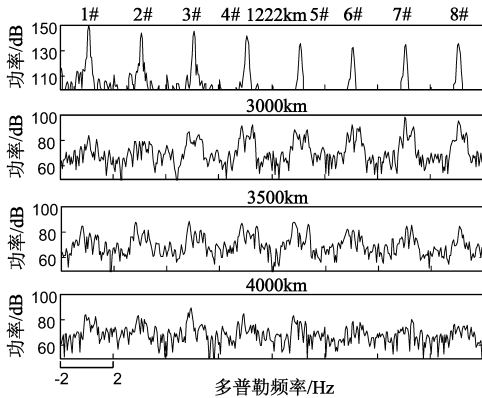


图7 不同天线接收信号的多普勒谱图

图7进一步说明了上述的分析结果,群距离 3000km 处 2 # 天线未能看到明显的海杂波信号,3 # ~ 5 # 天线收到的海杂波信号显而易见,并且正负 Bragg 能量相当,4 # 天线收到的海杂波信号最强,6 # ~ 8 # 天线同时收到地海杂波信号;当群距离增大到 3500km 时,2 # 天线也能看到海杂波信号,并且 2 # ~ 5 # 天线的负 Bragg 谱线稍强于正 Bragg 谱线,6 # ~ 8 # 天线收到的杂波信号变弱;当群距离为 4000km 时,只能分辨出 2 # ~ 4 # 天线的负 Bragg 谱线.

从上面的分析,可以看出,在收发站距离比较远且收发波束指向具有一定夹角的情况下,不同接收天线收到了清晰的符合地理环境特征的地、海杂波信号,证明了试验平台成功获得了广延地面或海面的侧向散射信号.

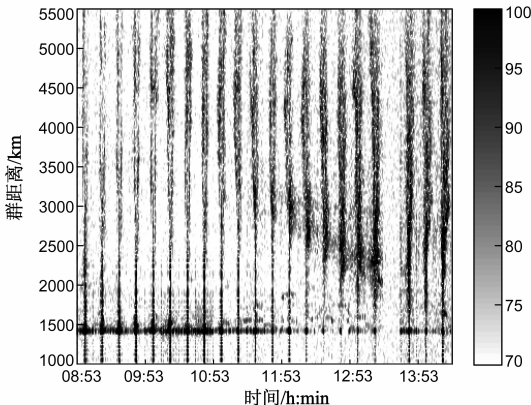


图8 4#天线接收信号的多普勒谱图随时间的变化

图8和图9分别给出了4#天线和6#天线接收信

号的多普勒谱图随时间的变化(注:13:23未发出信号),时间范围为 8:53 ~ 14:08,每幅多普勒谱图的时间间隔为 15min.纵观两幅图的全局,不难看出,它们有一个共同特点,在 10:00 左右,收到的侧向散射信号至少有两种传播模式,并且随着时间的推移,起初群距离较远的传播模式传播群距离变得越来越近,能量越来越强,多普勒谱有所展宽,起初群距离较近的传播模式逐渐消失.而对于斜测信号,随着时间的推移,能量却越来越弱了,这主要是因为,中午电子浓度比上午要强,吸收损耗变大,从而信号能量变弱.而对于侧向散射信号的这些特性,还需要继续开展试验进行传播机理研究.

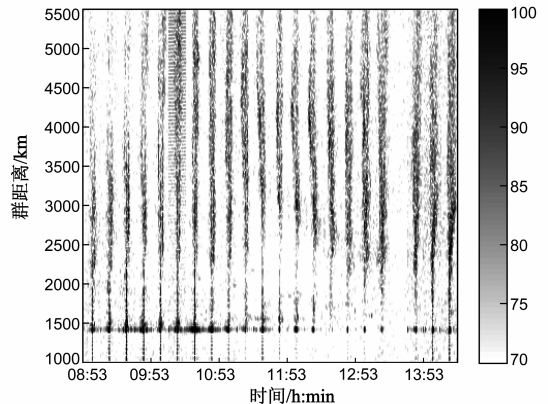


图9 6#天线接收信号的多普勒谱图随时间的变化

4 结论

试验结果证明,利用搭建的电离层侧向散射探测试验平台,在国内首次获得了三维侧向散射扫频电离图和地、海的侧向散射来波谱图.但试验是初步的,由于探测系统的距离分辨力较低,发射和接收波束又较宽,在此情况下要想深入研究侧向散射传播特性还是比较困难的,因为,侧向散射传播时,发射站到散射点和散射点到接收站,电波传播的路径不再相同,与返回散射传播相比更加复杂,因此,要想深入分析侧向散射传播机理,进行侧向散射模式识别、PD 变换等关键技术的研究还需开展大量相关试验.尽管如此,该次试验仍为后续的研究工作奠定了基础.

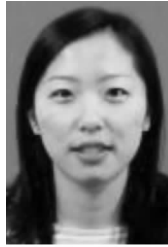
参考文献

- [1] 焦培南,张忠治.雷达环境与电波传播特性[M].北京:电子工业出版社,2007.293-294.
- [2] 周文瑜,焦培南,等.超视距雷达技术[M].北京:电子工业出版社,2008.362-363.
- [3] 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.

JIAO Pei-nan. The study of the ionospheric effects of a nuclear explosion observed at large distance utilizing the HF backscat-

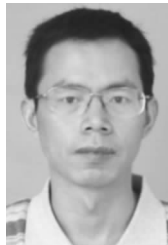
- ter technique[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1986, 29(5): 425 - 431. (in Chinese)
- [4] 黄德耀. 高频返回散射探测中传播模式的识别[J]. 空间科学学报, 1987, 7(2): 139 - 145.
HUANG De-yao. Distinguish of the propagation modes in the HF backscattering soundings[J]. Chinese Journal of Space Science, 1987, 7(2): 139 - 145. (in Chinese)
- [5] 张秀菊, 焦培南, 等. 利用高频返回散射技术探测电离层大尺度扰动[J]. 空间科学学报, 1988, 8(2): 138 - 144.
ZHANG Xiu-ju, JIAO Pei-nan, et al. LSTID measured by the technique of the HF backscattering sounder[J]. Chinese Journal of Space Science, 1988, 8(2): 138 - 144. (in Chinese)
- [6] HOUMINER Z, RUSSELL C J, et al. Study of sporadic-E clouds by backscatter radar[J]. Annales Geophysicae, 1996, 14(10): 1060 - 1065.
- [7] RUSSELL C J, DYSON P L, et al. The effect of large-scale ionospheric gradients on backscatter ionograms[J]. Radio Science, 1997, 32(5): 1881 - 1897.
- [8] 管荣生, 谢树果, 等. 我国电离层返回斜向探测研究 40 年[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 479 - 484.
GUAN Rong-sheng, XIE Shu-guo, et al. 40 years study on ionospheric oblique sounding of backscattering in China[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(4): 479 - 484. (in Chinese)
- [9] 焦培南, 凡俊梅, 等. 高频天波返回散射回波谱实验研究[J]. 电波科学学报, 2004, 19(6): 643 - 648.
JIAO Pei-nan, FAN Jun-mei, et al. The experimental research of the Doppler spectrum by HF skywave backscattering[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6): 643 - 648. (in Chinese)
- [10] PONOMARCHUK S N, KURKIN V I, et al. The diagnostics of ionosphere and earth ground surface by backscatter sounding data [A]. PIERS Proceedings [C]. Cambridge, MA: The Electromagnetics Academy, 2009. 1307 - 1310.
- [11] 孙广俊, 齐东玉, 等. 利用返回散射系统监测海洋回波[J]. 电子学报, 2005, 33(7): 1334 - 1337.
SUN Guang-jun, QI Dong-yu, et al. Sea echo detection with the system of ionospheric backscatter sounding[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(7): 1334 - 1337. (in Chinese)
- [12] 邢孟道, 保铮, 等. 天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 823 - 826.
XING Meng-dao, BAO Zheng, et al. Transient interference excision in OTHR[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 823 - 826. (in Chinese)
- [13] 蔚娜, 李铁成, 等. 高频返回散射系统中一种非长干扰的抑制方法[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 620 - 625.
WEI Na, LI Tie-cheng, et al. An approach of suppressing non-long interference in HF backscatter system[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 620 - 625. (in Chinese)

作者简介



蔚娜 女, 1981 年 11 月出生于山东省泰安市, 博士. 现为中国电波传播研究所高级工程师. 目前主要研究方向为雷达信号处理和电波传播.

E-mail: lenghanbingxue@sina.com



柳文 男, 1973 年 7 月出生于湖南省汨罗市, 博士. 现为中国电波传播研究所研究室主任, 高级工程师. 目前主要研究方向为电离层物理及电波传播.

E-mail: l_wen9209@sina.com

李强 男, 1979 年 10 月出生于山东省潍坊市, 博士. 现为中国电波传播研究所高级工程师. 目前主要研究方向为雷达信号处理和电波传播.

E-mail: qianglei0532@163.com

张长亮 男, 1984 年 1 月出生于辽宁省本溪市, 硕士. 现为中国电波传播研究所工程师. 目前主要研究方向为设备控制软件设计和底层驱动程序开发.

E-mail: zhcl1984@126.com