

电离层高频信道互易性研究：中纬度电离层斜向探测实验

周 晨* 赵正予 杨国斌 邓 峰

(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘 要：该文首次利用武汉电离层斜向探测系统(WIOISS)对武汉-万宁和万宁-武汉两条电离层高频信道的互易性进行了分析。WIOISS 是基于 GPS 时间频率同步手段开发的新型电离层斜向探测系统，通过比较由系统扫频工作模式和定频工作模式得到的两条路径下的斜向传播群时延和电离层高频信道散射函数，可以得出武汉-万宁和万宁-武汉的电离层高频链路有较好的互易性。

关键词：电离层斜向探测；高频信道；互易性

中图分类号：TN011.2

文献标识码：A

文章编号：1009-5896(2011)01-0142-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00032

Research on the Reciprocity of Ionospheric HF Channel: An Mid-latitude Ionospheric Oblique Sounding Experiment

Zhou Chen Zhao Zheng-yu Yang Guo-bin Deng Feng

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The reciprocity of Wuhan-Wanning and Wanning-Wuhan ionospheric HF channel is firstly analyzed by using Wuhan Ionospheric Oblique Incidence Sounding System (WIOISS). The WIOISS is a new type ionospheric oblique sounding radar based on the GPS time and frequency synchronization. The group delay and HF channel scattering function between the two ways is compared through the swept-frequency mode and fixed-frequency mode. Accordingly, based on the experiment results the Wuhan-Wanning link and Wanning-Wuhan link have a good reciprocity.

Key words: Ionospheric oblique incidence sounding; HF channel; Reciprocity

1 引言

互易性定理是电磁场的基本规律^[1-5]，反映了电磁场中激励和响应的互易关系。电离层由于地球磁场的存在而成为各向异性介质，不满足互易性定理成立的基本条件，因此互易性定理一般不适用于利用高频(3-30 MHz)电波传播进行工作的短波通信系统和天波超视距雷达，但是对短波通信系统和天波超视距雷达而言，电离层信道的互易性在一定的条件下仍然能够成立，并在高频信道建模和天波超视距雷达坐标配准等方面具有十分重要的作用，因此电离层信道的互易性是一个重要但是容易被忽视的问题。

电离层斜向探测是一种传统但是有效的电离层探测方法^[6-8]，收发分置的系统能够利用 HF 电波在电离层中的斜向传播和反射获取电离层电子浓度的分布和变化信息，除此之外还能够对电离层 HF 信道的质量进行评估。

武汉大学在其自行研制的电离层斜向返回探测系统(WIOBSS)的基础上^[9]，利用基于全球卫星定位

系统(GPS)的时间频率同步手段，设计并开发了一套电离层斜向探测雷达(Wuhan Ionospheric Oblique Incidence Sounding System, WIOISS)^[10]。WIOISS 系统能够实时获取 HF 在电离层中传播的群时延、相位以及多普勒等信息，并最终给出电离层电子浓度的剖面以及电离层信道的散射函数。利用 WIOISS 系统于 2009 年 3 月 27,28,29 三天进行了互发互收的电离层 HF 信道的互易性实验，整个电波传播链路位于中低纬度地区，链路的两端分别置于基本位于同一子午面内的武汉(30°32'N, 114°21'E)和万宁(18°8'N, 110°31'E)。

根据磁离子理论和电离层斜向探测的原理可以知道，通过电离层电波传播的群时延可以反演得到电离层电子浓度的分布^[2]；电离层信道的散射函数是相关函数的傅里叶变换对，反映了电离层信道的 2 维动态特性，因此电波传播的群时延和散射函数综合反映了电离层对电波传播的影响，因此电波群时延和散射函数对通信系统和雷达具有实际的工程意义。本文首次利用 WIOISS 得到的群时延和散射函数从实验验证的角度证实了高频电波电离层信道的互易性特点。具体的内容安排如下：第 2 节简单介绍了 WIOISS 系统获取电离层信道散射函数的方

法; 第 3 节详细介绍了这次实验所使用的实验设备 WIOISS 以及实验安排。第 4 节介绍了利用 WIOISS 系统进行的电离层信道互易性实验以及实验的结果; 最后是总结。

2 WIOISS 系统获取散射函数的方法

电离层斜测雷达的原理与电离层垂测雷达类似, 但是与垂测雷达不同的是电离层斜测雷达是收发异置的系统。对于小功率电离层斜向探测, 电离层信道可看作为线性时变系统。该系统的特性可用它的双时响应函数 $h(\tau, t)$ 来描述, t 其中表示系统随时间的变化, τ 表示群传播时间。对该函数的时间变量做傅里叶变换可以得到此线性时变系统的时延-多普勒函数, 其表示电波在一定的多普勒频率-时延范围内被散射回波的强度。对于 WIOISS 系统, 时延-多普勒函数和散射函数所表达的信息是相同的, 因此也有作者把时延-多普勒函数称为散射函数。

假设 WIOISS 系统发射信号为

$$e(t) = u(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (1)$$

经过电离层斜向传播和反射之后, 到达异地的 WIOISS 系统的接收信号为

$$r_d(t) = \int_R h(\tau, t)u(t - \tau)d\tau \quad (2)$$

其中 τ 表示相对时延, R 表示探测范围。在 WIOISS 系统的接收端, 通过 GPS 的频率相位同步手段, 将产生与发射端一致的信号(脉冲序列) $e_d(t)$, 将此信号和接收信号进行互相关, 可得

$$\begin{aligned} C_{r_d, u}(t_c, t_p) &= \frac{1}{T_0} \int_{t_c - T_0}^{t_c} r_d u(t - t_p) dt \\ &= \frac{1}{T_0} \int_{t_c - T_0}^{t_c} \int_R h(t, \tau) u(t - \tau) u(t - t_p) d\tau dt \end{aligned} \quad (3)$$

其中 T_0 表示相关时间。由于电离层稳定时间远大于相关时间, 因此在此段时间内电离层可认为是一个线性时不变系统。因此,

$$h(t, t_p) \approx h(t_c, t_p) \quad (4)$$

因此, 式(3)此时为

$$\begin{aligned} C_{r_d, u}(t_c, t_p) &\approx \int_R h(t_c, \tau) \left[\frac{1}{T_0} \int_{t_c - T_0}^{t_c} u(t - \tau) u(t - t_p) dt \right] d\tau \\ &= \int_R h(t_c, \tau) C_{u, u}(t_p - \tau) d\tau \\ &= h(t_c, t_p) * C_{u, u}(t_p) \end{aligned} \quad (5)$$

由于调制信号 $u(t)$ 的自相关函数具有 Dirac 函数的形状, 因此 $h(t_c, t_p) = C_{r_d, u}(t_c, t_p)$ 。

对于 WIOISS 测量散射函数(时延-多普勒函数), 需要在单频点上完成多次测量, 再沿时间轴对记录的信道脉冲响应数据作快速傅里叶运算。

3 实验安排

武汉大学自行研制的武汉电离层斜向探测雷达(WIOISS)是建立在单站式电离层斜向返回探测系统(WIOBSS)基础上, 具有独立自主知识产权的新型电离层探测雷达, 它具有以下几个特点: (1)与传统电离层斜向探测系统相比, 其发射功率很小, 可降低至数百瓦的量级; (2)可实时获取电离层参数, 包括电离层斜向探测电离图(ionogram)和多普勒电离图(Dopplionogram); (3)利用 GPS 进行时间频率同步, 具有较高的精度。因此, 电离层斜向探测系统可以应用于电离层实时高频信道特性研究和高频无线电频率管理系统分析中, 并可作为天波超视距雷达(OTHR)系统电波环境自适应诊断与管理系统的的重要组成部分发挥重要作用。武汉电离层斜向探测系统(WIOISS)的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 WIOISS 参数

工作频率	3-30 MHz
天线	水平极化对数周期天线
距离分辨率	6.25 km
频率分辨率	0.0367 Hz
GPS 时钟稳定性	10^{-9} s
发射机峰值功率	≤ 200 W
发射机脉冲宽度	$41.66 \mu\text{s} \times N$ (N 为整数)
发射机占空比	20% 典型值
发射机编码体制	M 序列/伪随机序列
接收机带宽	48 kHz
接收机 SFDR	≥ 70 dB
接收机中频	1.4 MHz
接收机 A/D 转换	16 bit, 20 MHz
接收机脉冲压缩	二进制编码
接收机接收机灵敏度	-114 dBm

武汉电离层斜向探测雷达的常规工作模式主要有扫频模式和定频模式两种, 在扫频模式下, 可以得到电波传播时延随电波频率的变化, 从而反演得到电离层电子浓度的剖面; 在定频模式下, 通过对接收信号的相关处理, 可以得到电离层高频信道的散射函数, 从而获取有较高分辨率的电离层多普勒信息。因此利用电离层斜向探测系统可以实现两站之间的互发互收, 为研究电离层信道互易性提供了新的手段。

武汉大学电离层实验室于 2009 年 3 月 27, 28, 29 三天于海南万宁($18^\circ 58' N$, $110^\circ 31' E$)和湖北武汉($30^\circ 32' N$, $114^\circ 21' E$)之间利用两套完全一样的

电离层斜向探测雷达进行了电离层互易性实验,几乎同时从万宁和武汉发射信号,然后在武汉和万宁分别接收信号,依此进行万宁-武汉链路电离层信道特性的互易性验证实验。表2中列举了实验的具体参数。

表2 电离层互易性实验参数

内容	参数	
地磁参数	万宁: 磁倾角: 25.00°	磁偏角: -1.40°
	武汉: 磁倾角: 45.98°	磁偏角: -3.73°
定频探测频率 (27 th , 28 th and 29 th)	27 th	12.2 -19.4 MHz
	28 th	10.4 -23.6 MHz
	29 th	11.6 -21.8 MHz
扫频范围	28 th	6.2-18.2 MHz
	29 th	9-19 MHz
输出功率	万宁	100 W
	武汉	100 W

4 实验结果

实验分为扫频实验和定频实验两个部分,通过扫频实验可以比较不同传播模式对应的最强回波的时延差,判断两条电离层斜向传播群路径的大小;通过定频实验,得到定频模式下的电离层散射函数,通过比较散射函数所反映的多普勒频移、相干时间和相干带宽等参数,从而可以分析电离层对两条路径的影响。扫频和定频实验具体参数如表2所示。

(1)扫频探测结果 图1~图2为电离层斜向探测扫频示意图,图1(a)和图2(a)为在海南万宁接收信号得到的扫频示意图,图1(b)和图2(b)为在武汉接收信号得到的扫频示意图。每幅图中的横轴为频率,纵轴为群路径。

(2)定频探测结果 图3~图4为电离层斜向定频探测散射函数示意图,图3(a)和图4(a)为在海南

万宁接收信号得到的扫频示意图,图3(b)和图4(b)为在武汉接收信号得到的扫频示意图。图3~图4中横轴对应多普勒频率,纵轴对应群路径。

图5~图6为与图3~图4相对应的多普勒频移示意图,图5~图6比较了对应图3~图4中相应距离门上多普勒频移的大小,反映了电离层对两条传播路径的影响。

通过电离层斜向探测扫频和定频实验,可以对电离层高频传播信道互易性进行具体分析。分析结果如下:

(1)从扫频图1~图2中,通过比较武汉-万宁和万宁-武汉两条传播路径下同一频率所对应的传播时延,可以看出在同一传播模式下,两条路径对应的传播时延差值大致在0.1~0.01 ms量级。此外,磁离子分裂对高角射线的影响大于低角射线,低角射线的群时延互易性比高角射线的互易性要好,这一结果与文献[11]中的数值模拟结果一致。

(2)图3~图4与图5~图6为定频探测数据得到的散射函数示意图以及对应的多普勒频移示意图,可以看出在探测频率为12.2 MHz和13.2 MHz时,万宁-武汉传播路径与武汉-万宁传播路径的多普勒频移大小相等。因此可以认为电离层对两条传播路径上多普勒的影响基本一致。需要注意的是万宁-武汉探测与武汉-万宁探测的时间间隔为2 min,可基本认为电离层在此段时间内是平稳的。

5 结束语

本文首次利用两部完全一样的电离层斜向探测雷达于武汉和万宁之间进行了电离层高频信道的互易性实验。实验分为扫频实验和定频实验两个部分,分别对雷达电波传播的群时延和电离层对雷达信号的散射函数进行了分析。分析的结果表明武汉-万宁高频链路与万宁-武汉高频链路的电波传播群时延以及反映电离层运动的多普勒具有较好的互易性。需要指出的是本次互易性实验的收发地点基本位于同一磁子午面内,具体的理论分析已在相关文章

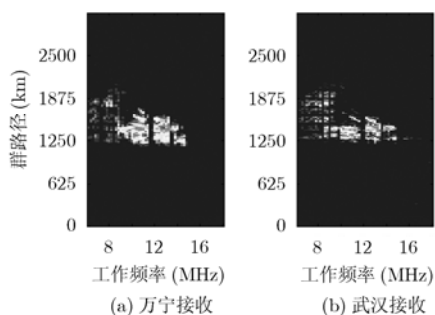


图1 扫频斜向探测图(扫频范围: 6.2~18.3 MHz)

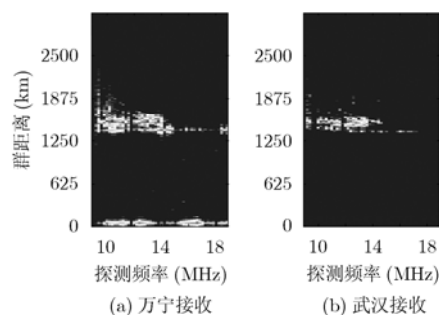


图2 扫频斜向探测图(扫频范围: 9~19MHz)

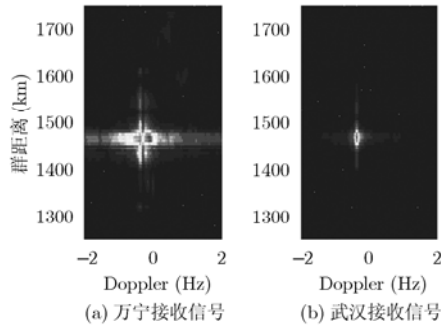


图 3 定频探测散射函数(探测频率: 12.2 MHz)

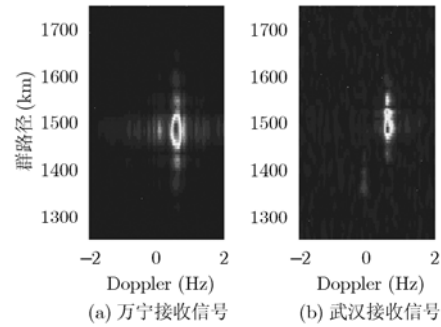


图 4 定频探测散射函数(探测频率: 13.2 MHz)

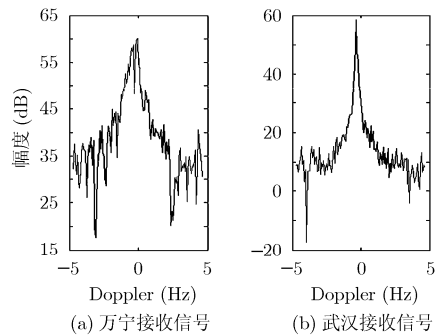


图 5 定频探测多普勒频移(距离门: 119 (1487.5 km))

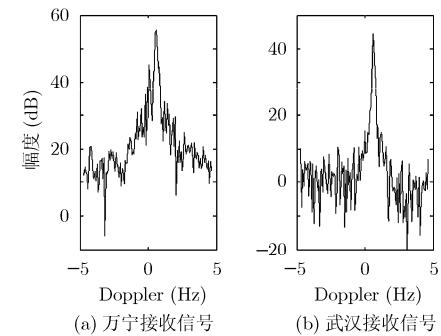


图 6 定频探测多普勒频移(距离门: 122 (1525 km))

中^[1]给出。此外在下一步的工作中, 我们还将进行垂直于同一磁子午面的电离层高频信道的互易性实验。

参 考 文 献

- [1] Balser M, Smith W B, and Warren E. On the reciprocity of HF ionospheric transmission. *Journal of Geophysics Research*, 1958, 63(4): 859-861.
 - [2] Budden K G. *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere*. New York, Cambridge University Press, 1985, Chapter 1.
 - [3] Ginsburg V L. *The Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas*, Translated by J. B. Sykes and R. J. Tayler., New York, Pergamon Press, 1970, Chapter 1.
 - [4] Jull G W. Short-term and averaged characteristics of nonreciprocal HF ionospheric paths. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1967, 15(2): 268-277.
 - [5] Jull G W and Petterson W E. Origin of non-reciprocity on high-frequency ionospheric paths. *Nature*, 1964, 201: 483-484.
 - [6] Basler R P and Scott T D. Ionospheric structure from oblique-backscatter soundings. *Radio Science*, 1973, 8(5): 425-429.
 - [7] Vilella C, Miralles D, Altadill D, Acosta F, Solé J G, Torta J. M, and Pijoan J L. Vertical and oblique ionospheric soundings over a very long multihop HF radio link from polar to midlatitudes: Results and relationships. *Radio Science*, 2009, 44(2): 23-34.
 - [8] Pietrella M, *et al.* Oblique-incidence ionospheric soundings over central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models. *Advances in Space Research*, 2009, 43(11): 1611-1620.
 - [9] Chen G, Zhao Z, and Zhang Y. Ionospheric Doppler and echo phase measured by the Wuhan Ionospheric Oblique Backscattering Sounding System. *Radio Science*, 2007, 42(7): 1-13.
 - [10] 石书祝, 赵正予, 李世鹏, 姜春华. 新型电离层斜向探测雷达设计, 华中科技大学学报, 2009, 37(7): 14-17.
Shi Shu-Zhu, Zhao Zheng-yu, Li Shi-peng, and Jiang Chun-hua. Design of a new kind of ionospheric oblique sounding radar. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition)*, 2009, 37(7): 14-17.
 - [11] Chen Zhou, Zhao Zheng-yu, Deng Feng, Ni Bin-bin, Chen Gang. Quasi-reciprocity of mid-latitude ionospheric HF channel: evidence from the ionospheric oblique incidence sounding experiments, *Radio Science*, accepted.
- 周 晨: 男, 1983 年生, 博士后, 研究方向为电离层电波传播。
赵正予: 男, 1952 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电离层人工变态、电离层电波传播。
杨国斌: 男, 1983 年生, 讲师, 研究方向为电离层探测。
邓 峰: 男, 1982 年生, 博士, 研究方向为电离层物理。