

# 中频雷达接收圆极化波新方法

敖珺<sup>1</sup>, 王黎明<sup>1,2</sup>, 陈金松<sup>2</sup>, 李娜<sup>2</sup>

1. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004

2. 中国电波传播研究所; 电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 青岛 266107

**摘要** 中频雷达利用圆极化波探测中高层大气的风场和电子密度, 通过一组正交偶极子组成的空分天线阵完成圆极化波的发射和接收。由于风场和电子密度反演对回波的极化特征有不同需求, 要求接收端既能为电子密度的反演保留也能为风场的反演消除回波的极化特征。目前中频雷达消除极化特征通常采用硬件来完成, 接收端将正交偶极子所接收到的一路信号利用移相器进行 $\pm\pi/2$ 的相位调整后叠加到另一路信号上最终将圆极化回波还原为单路信号。但在中频频段实现相位调整是以增加器件和系统的复杂度为代价, 而且器件的可靠性会受到环境的影响。本文提出一种无需硬件调相, 直接利用 $I/Q$ 分量合成消除极化特征后回波的 $I/Q$ 复序列的方法, 实现时仅需让接收端对信号序列逐点进行加减法运算及幅度判决。理论分析和数值仿真均表明新方法能够有效消除极化、正确获取 $I/Q$ 复序列, 而且方法简单, 信号合成器也易于实现, 具有一定的工程实践价值。

**关键词** 中频雷达; 圆极化波接收;  $I/Q$ 分解

**中图分类号** P352.7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.05.017

## A new approach to receive circular polarization echoes on medium frequency radar

AO Jun<sup>1</sup>, WANG Liming<sup>1,2</sup>, CHEN Jinsong<sup>2</sup>, LI Na<sup>2</sup>

1. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China

**Abstract** The medium frequency radar uses the circular polarization echoes to retrieve the wind fields and the electron density in the middle and upper atmosphere. To transmit and receive circular polarization echoes, a spaced antenna system, composed of a series of cross-dipoles, is used. Different demands are imposed for the circular characteristics in the echoes to retrieving the wind fields and the electron density, consequently, the receiver should be able to keep and remove the circular characteristics in the echoes. In most medium frequency radars, a hardware solution is adopted to remove the circular characteristics by making a phase adjustment to one of the two sets of signals associated with a cross dipole unit and then overlapping it with the other. Adjusting the phase at a medium frequency requires extra devices and a complicated system, what is more, the reliability of the device might be influenced by the environment. In this paper, the 4  $I/Q$  components of a cross dipole unit are employed to compose the  $I/Q$  components of the signals associated with the circular polarization echoes. This method is very simple, and it only involves some basic calculations and judgments at each point. Theoretical analyses and numeral simulations show that this method is effective in removing the polarization characteristics.

**Keywords** medium frequency radar; receiving polarization echoes;  $I/Q$  decomposition

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61167006); 广西青年科学基金项目(2012GXNSFBA053173)

作者简介: 敖珺, 教授, 研究方向为通信信号处理, 电子信箱: junjunao1@263.net; 王黎明(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为信号处理, 电子信箱: lemywong@outlook.com; 陈金松(通信作者), 高级工程师, 研究方向为中高层大气探测, 电子信箱: jschen@spaceweather.ac.cn

引用格式: 敖珺, 王黎明, 陈金松, 等. 中频雷达接收圆极化波新方法[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 104-108.

中频雷达 (medium frequency radar, MF 雷达) 能够对 60~100 km 范围内的风场和电子密度进行 24 h 不间断观测, 其中对风场的探测通常使用全相关分析法<sup>[1]</sup> (full correlation analysis, FCA), 对电子密度的探测通常采用微分吸收分析法<sup>[2]</sup> (differential absorption experiment, DAE)。

在被地磁场浸透的电离层中, 垂直入射的电磁波按准纵传播条件会分解成两种圆偏振特征波, 分别为寻常波 (ordinary wave, O 波) 和非常波 (extraordinary wave, X 波)<sup>[3-4]</sup>; 据此, MF 雷达利用天线发送圆极化波来得到圆极化回波, 从而对中层大气进行探测。在 DAE 方法中, 利用电离层 D 区所反射回的 X 波和 O 波的振幅比值进行反演<sup>[5,6]</sup> 得到电子密度。而 FCA 方法虽然同样利用 D 区回波, 但通过计算地面空分放置的接收点所得回波间的自相关和互相关函数反演<sup>[1]</sup> 得到大气风场。虽然电子密度及风场都需要通过发射圆极化波来探测, 但在接收时两者对回波的极化特性却有着不同的需求, 为此 MF 雷达在采用分布式天线 (spaced antenna, SA) 系统的基础上, 要求接收端对回波的处理既能为电子密度的反演保留 X 波和 O 波的极化特性又能为风场反演消除极化特征<sup>[7]</sup>。

SA 系统通常由 4 副相互独立馈电的正交偶极子天线按等边三角形布局组成收发共用的天线阵, 其中每个正交偶极子单元为传统的半波偶极子。接收时, 每单元中两个半波偶极子分别接收圆极化波的两个正交分量, 当后端需要分析极化特征时, 接收端保留这两路分量送至后端进行处理, 而当后端不需要极化特征时, 接收端将其中一路移相后叠加到另一路上消除极化特征后再送给后端。接收端对信号的相移通常通过硬件移相实现, 这类专用移相器成本较高, 在一定程度上增加了系统的复杂性, 而且器件对环境因素的影响比较敏感, 遇到机房温度过高时其可靠性可能会受到影响。为此, 本文提出一种不需要利用移相器件消除回波极化特征的方法, 并理论分析和数值仿真验证该方法的可行性。

## 1 圆极化波的发送和接收

为了形成圆极化波, 发射端将低频信号经过射频调制得到

$$s(t) = A \cos(\omega_c t + \phi) \quad (1)$$

式中,  $A$  为振幅,  $\omega_c$  为射频频率,  $\phi$  为初始相位, 于是获得一路分量为

$$s_1(t) = s(t) = A \cos(\omega_c t + \phi) \quad (2)$$

另一路分量在调制时, 利用直接数字式频率合成器 DDS (direct digital synthesizer) 波形发生器对射频信号在相位上超前或者延迟  $\pi/2$ , 得到与  $s_1(t)$  在相位上相差  $\pi/2$  的分量

$$s_2(t) = A \cos[(\omega_c t + \phi) \pm (\pi/2)] \quad (3)$$

发射机同时将这两路分量通过两个半波偶极子天线发射, 最终在空间合成圆极化波, 相位附加了  $\pm\pi/2$  的分量分别合成为左旋圆极化波及右旋圆极化波<sup>[8]</sup>。圆极化波经反射后

仍为圆极化波, 但极化的方向发生倒转。假设衰减后的幅度为  $A'$ , 多普勒频移为  $\omega_0$ , 则反射后的圆极化波的两个分量对应为

$$\begin{aligned} s'_1(t) &= A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi] \\ s'_2(t) &= A' \cos\{[(\omega_c + \omega_0)t + \phi] \mp (\pi/2)\} \end{aligned} \quad (4)$$

对圆极化波消除极化特征的过程大致如下: 两个半波偶极子天线各自接收圆极化波的一路分量  $r_1(t) = s'_1(t)$ ,  $r_2(t) = s'_2(t)$ , 对  $r_2(t)$  的相位进行  $\pm\pi/2$  的调整, 变为  $r'_2(t) = A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi]$ , 最后将两路信号叠加即可得到  $2A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi]$ 。

目前, 国内外大多数中频雷达, 如中国电波传播研究所昆明观测站 MF 雷达 (25.6°N, 103.86°E)<sup>[9]</sup>, 均由澳大利亚 Atrad 公司研制生产, 该雷达系统对空间圆极化波合成需要的  $\pm\pi/2$  移相由硬件移相器完成。

## 2 消除极化特征的新方法

雷达通常将回波记录为  $I/Q$  序列, 为不引起混淆, 本文将一对半波偶极子所记录的  $I/Q$  序列分别记为  $I_1/Q_1$ 、 $I_2/Q_2$ , 将消除极化特征后所得信号对应的  $I/Q$  序列记为  $I$  和  $Q$ 。下面将研究如何利用  $I_1/Q_1$ 、 $I_2/Q_2$  恢复  $I$  和  $Q$ 。

假设正交检波器中的本振信号为  $\cos(\omega_c t)$ , 接收到的左旋圆极化波为

$$s(t) = A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi] + jA' \sin[(\omega_c + \omega_0)t + \phi + \frac{\pi}{2}] \quad (5)$$

则利用正交偶极子接收到的两路信号为

$$\begin{aligned} r_1(t) &= A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi] \\ r_2(t) &= A' \sin[(\omega_c + \omega_0)t + \phi + \frac{\pi}{2}] \end{aligned} \quad (6)$$

通过移相叠加后得到消除极化后的信号为

$$\begin{aligned} r(t) &= r_1(t) + r_2(t - \frac{\pi}{2}) \\ &= 2A' \cos[(\omega_c + \omega_0)t + \phi] \end{aligned} \quad (7)$$

经过正交检波器得到

$$\begin{aligned} I &= r(t) \cdot 2 \cos(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} 2A' \cos(\omega_0 t + \phi) \\ Q &= s(t) \cdot 2 \sin(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} -2A' \sin(\omega_0 t + \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, 符号  $\xrightarrow{\text{LPF}}$  表示信号通过低通匹配滤波器 (low-pass filter, LPF)。另一方面,  $r_1(t)$  和  $r_2(t)$  直接通过正交检波器后得到

$$\begin{aligned} I_1 &= r_1(t) \cdot 2 \cos(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} A' \cos(\omega_0 t + \phi) \\ Q_1 &= r_1(t) \cdot 2 \sin(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} -A' \sin(\omega_0 t + \phi) \\ I_2 &= r_2(t) \cdot 2 \cos(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} A' \sin(\omega_0 t + \phi) \\ Q_2 &= r_2(t) \cdot 2 \sin(\omega_c t) \xrightarrow{\text{LPF}} A' \cos(\omega_0 t + \phi) \end{aligned} \quad (9)$$

显然,  $I$  和  $Q$  可由  $I_1/Q_1$ 、 $I_2/Q_2$  线性表示为

$$\begin{aligned} I &= I_1 + Q_2 \\ Q &= Q_1 - I_2 \end{aligned} \quad (10)$$

在接收右旋圆极化波时, 经过类似的推导也可得到类似的线

性关系

$$\begin{aligned} I &= I_1 - Q_2 \\ Q &= Q_1 + I_2 \end{aligned} \quad (11)$$

式(10)和式(11)表明,利用两个半波偶极子的 $I/Q$ 分量 $I_1/Q_1, I_2/Q_2$ 在接收机上可以直接合成消除极化后信号的 $I$ 和 $Q$ ,但要求接收机首先判断所接收信号到底是左旋圆极化还是右旋圆极化,这显然增加了接收机的工作量。进一步分析式(5)~式(11)发现:

- 1) 合成 $I$ 路分量利用的是 $I_1$ 和 $Q_2$ 的线性组合。
- 2) 对左旋圆极化波合成其 $I$ 路分量时 $I_1 + Q_2 \neq 0$ 而 $I_1 - Q_2 = 0$ 且 $I_1 + Q_2 = I$ 。
- 3) 对右旋圆极化波合成其 $I$ 路分量时 $I_1 - Q_2 \neq 0$ 而 $I_1 + Q_2 = 0$ 且 $I_1 - Q_2 = I$ 。

这三条规律在合成 $Q$ 路分量时也存在。说明在获取 $I$ 分量时,令接收机同时计算 $I_1 + Q_2$ 和 $I_1 - Q_2$ ,则两者中必有一项为0而另一项非0,且其中非0的项又恰好为对应信号的 $I$ 分量;对 $I_2, Q_1$ 进行类似的处理亦可获取 $Q$ 分量。图1给出了这种合成方法的整个过程。

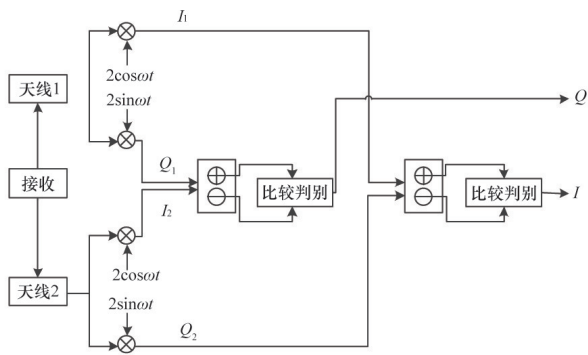


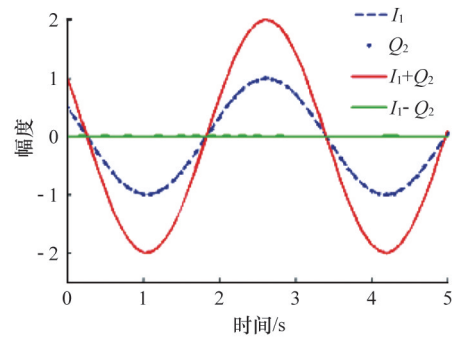
图1 由 $I_1/Q_1, I_2/Q_2$ 合成 $I/Q$ 的过程

Fig. 1 Process of composing  $I/Q$  with  $I_1/Q_1$  and  $I_2/Q_2$

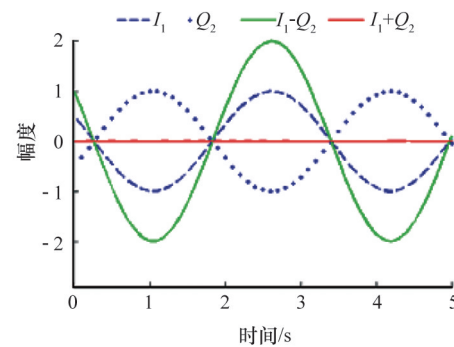
### 3 数值仿真及雷达数据应用

#### 3.1 数值仿真

假设式(5)中 $A=1, \omega_c=3000 \text{ rad/s}, \omega_0=2 \text{ rad/s}, \phi=\pi/3$ ,对该左旋圆极化波和相同参数下的右旋圆极化波进行数值仿真,结果如图2所示。由图2(a)可知 $I_1 + Q_2$ 非零,而 $I_1 - Q_2$ 恒为零, $I_1 + Q_2$ 完全收敛至式(6)所示的左旋圆极化波对应的 $I$ 分量。图2(b)中给出了合成右旋圆极化波对应的 $I$ 路分量的过程。比较图2(a)和(b)可知,虽然不同圆极化时分量 $I_1$ 和 $Q_2$ 并不相同,但是在合成 $I$ 时只要同时计算 $I_1 + Q_2$ 和 $I_1 - Q_2$ ,则两者中必有一项为0而另一项非0,非0项恰好为相应圆极化波消除极化后的 $I$ 分量。在合成 $Q$ 分量的仿真中也得到了类似的结论,由此验证本文方法的正确性。



(a) 左旋圆极化波 $I$ 通道的合成



(b) 右旋圆极化波 $I$ 通道的合成

图2 数值仿真结果

Fig. 2 Numerical simulation results

#### 3.2 雷达数据应用

利用某在研MF雷达验证上文所提出方法的适用性,该MF雷达的天线体制与昆明MF雷达相似,天线阵的具体布局如图3所示。其中,编号1~8为半波偶极子天线,两个半波偶极子天线组成正交偶极子单元 $RX_1 \sim RX_4$ ,3个单元组成一个等边三角形, $RX_1$ 位于该三角形的几何中心。这些偶极子单元均为收发共用,能够方便地形成左旋圆极化和右旋圆极化波。该雷达所记录数据为探测高度范围内所有高度窗口中8根天线的 $I/Q$ 序列,在实验中设置每个序列的采样间隔为 $0.3 \text{ s}$ ,总长度为384点,记录时间为115.2 s。进行两组对比实验:第1组设置发送方式为左旋圆极化,第2组设置发送方式为右旋圆极化,并选定 $RX_1$ 单元中编号为1和5的一对半波偶极子在80 km的高度窗口内所记录的数据进行分析,为简化描述,选用其中一段数据进行说明。

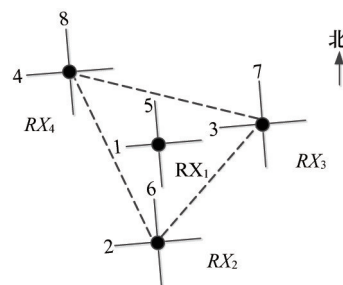


图3 MF雷达的天线布局

Fig. 3 Layout of antenna system of MF radar

在第1组实验中,首先检验每个采样点处的回波是否为圆极化,为此将天线1和5的//Q序列映射为极坐标表达式<sup>[10]</sup>

$$x_i(t) = I_i(t) + jQ_i(t) = A_i e^{j\theta_i(t)} \quad (12)$$

图4(a)中对比了天线1和5的归一化幅度  $A_1(t)$ 、 $A_5(t)$  及  $A_1(t)/A_5(t)$ ,图4(b)对比了瞬时相位  $\theta_1(t)$ 、 $\theta_5(t)$  及  $\theta_5(t) - \theta_1(t)$ ,其中相位差已经调整到 $[-180^\circ, 180^\circ]$ 的主值范围内。可以看出,  $A_1(t)$  和  $A_5(t)$  几乎一致,但幅度比值  $A_1(t)/A_5(t)$  在一些时刻出现异常波动,这主要是由于实验所用MF雷达仍在调试,依然存在着相位解析不稳定的问题,导致//Q序列的幅度出现

较大波动,在极端情况下甚至会因为  $\pm\pi/2$  的相位解析错误而导致幅值出现正负符号的逆转,除了这些解析不稳定的点外,回波数据经过上述算法所得结果中大部分时刻幅度比基本维持在1上下,而相位差在绝大多数时刻稳定在  $90^\circ$  上下,由此可认为所接收到的回波近似为左旋圆极化波<sup>[8]</sup>。

接着开始合成  $I$  和  $Q$ 。注意到雷达数据是离散的时间序列,因此逐点进行计算。图5(a)和(b)为合成  $I$  的过程,图5(c)和(d)为合成  $Q$  的过程。合成  $I$  时所需分量  $I_1$  和  $Q_5$  在图5(a)中给出,图5(b)对比了  $I_1 + Q_5$  和  $I_1 - Q_5$ 。

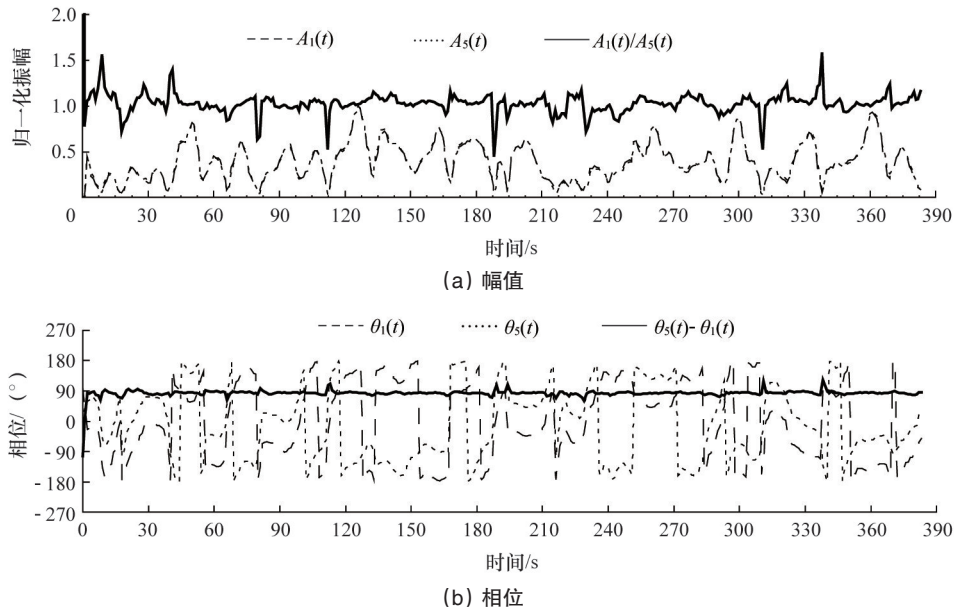


图4 MF雷达回波中一对正交偶极子的两根天线的幅度和相位

Fig. 4 Amplitude and phase of echoes associated with a cross-dipole

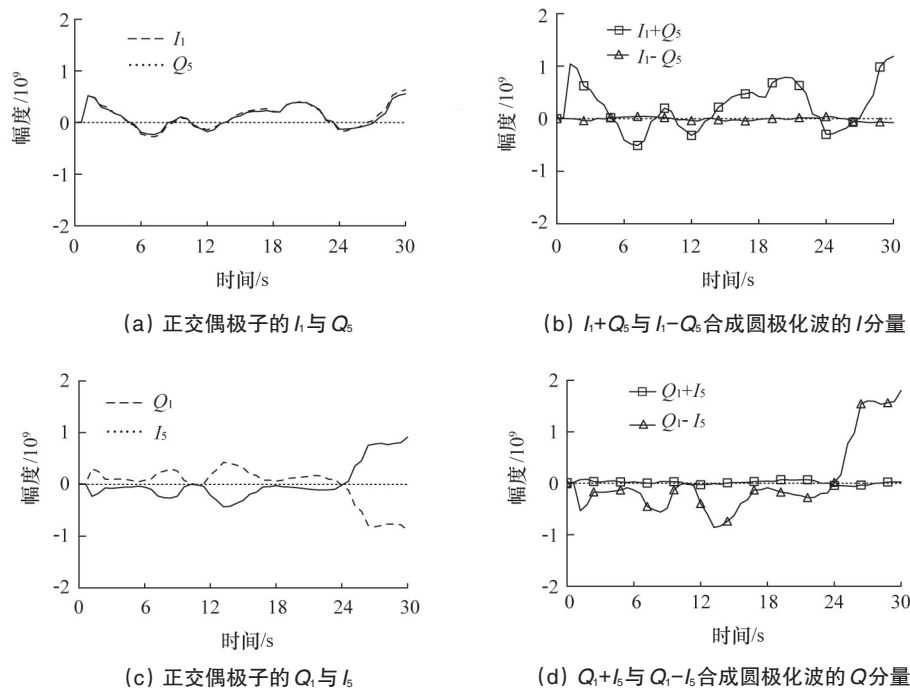


图5 MF雷达一副正交偶极子的//Q分量与所接收右旋圆极化波//Q的关系

Fig. 5 Relationship between //Q of a cross-dipole and //Q of a right-handed circular polarization wave

可以明显看出,由于分量  $I_1$  和  $Q_5$  几乎完全相同,所以在  $I_1 - Q_5$  在每一点上都几乎趋近于0而  $I_1 + Q_5$  则是非0,与上文所述一致,相应地,将非0的运算结果输出为圆极化波的  $I$  分量。图5(c)和(d)用类似的方法合成了圆极化波的  $Q$  分量。需要注意的是,由于分量相加相减的结果可能为负值,因此在进行比较判决时比较的是绝对值亦即在合成  $I(t)$  时逐点比较  $|I_1(t) + Q_2(t)|$  与  $|I_1(t) - Q_2(t)|$ , 在合成  $Q(t)$  时逐点比较  $|Q_1(t) + I_2(t)|$  与  $|Q_1(t) - I_2(t)|$ , 其中绝对值较大的即为该点的  $I(t)$  或  $Q(t)$ 。

#### 4 结论

利用一对半波偶极子的4个  $I/Q$  分量  $I_1/Q_1, I_2/Q_2$  逐点进行加法和减法运算并比较判断输出绝对值较小的运算结果合成所接收的圆极化波消除极化后的  $I$  和  $Q$ 。本研究并不需要额外的移相器件,信号合成算法相对简单,易于在接收机上实现,在不增加额外移相器件的条件下为MF雷达接收端的设计提供了一种新的思路。但在实验中发现,该方法对  $I/Q$  分解的硬件稳定性提出了新的要求,在  $I/Q$  分解过程中相位解析偏差会导致圆极化信号被还原成椭圆极化,这一偏差是否会对后续风场反演造成影响仍有待研究。

**致谢** 中国电波传播研究所昆明观测站提供MF雷达资料和数据。

#### 参考文献(References)

[1] Briggs B H. The analysis of spaced sensor records by correlation techniques[C]//Handbook for Middle Atmosphere Program. Illinois: University of Illinois, 1984: 166-186.  
[2] Gardner F F, Pawsey J L. Study of the ionospheric D-region using partial reflections[J]. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1953, 7(3): 321-344.

[3] 桂质廷. 地磁及电离层电波传播[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1986: 117-121.  
Gui Zhiting. Geomagnetism and wave propagation in ionosphere[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1986: 117-121.  
[4] Hunsucker R D, Hargreaves J K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 527-532.  
[5] 李娜, 陈金松, 赵蕾, 等. 基于MF雷达观测的D区日食效应的研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 942-949.  
Li Na, Chen Jinsong, Zhao Lei, et al. The study of ellipse effects in D region based on MF radar measurement[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 942-949.  
[6] 李娜, 陈金松, 赵振维, 等. 利用昆明MF雷达对C级耀斑的初步研究[C]. 第十届电波年会, 武汉, 2009-11-09.  
Li Na, Chen Jinsong, Zhao Zhenwei, et al. Preliminary study of C level solar flare using MF radar in Kunming[C]. The 10th Chinese National Symposium on Radio Propagation, Wuhan, China, November 9, 2009.  
[7] 杨涛, 周莹莉, 曾繁清, 等. 利用全相关分析方法确定大气风场[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 324-336.  
Yang Tao, Zhou Yingli, Zeng Fanqing, et al. Wind field measurement by the full correlation analysis method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 324-336.  
[8] 孔金瓯. 电磁波理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 15-21.  
Kong Jin'ao. Electromagnetic waves theory[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 15-21.  
[9] 赵蕾, 陈金松, 李娜, 等. 昆明MF雷达及初步探测结果[J]. 空间科学学报, 2011, 31(1): 27-33.  
Zhao Lei, Chen Jinsong, Li Na, et al. MF Radar in Kunming and its preliminary observation results[J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(1): 27-33.  
[10] Richards M A. 雷达信号处理基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 12-15.  
Richards M A. Fundamental of radar signal processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 12-15.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



## 2015年在15个城市举办“科技梦·中国梦——中国现代科学家主题展”

2014年,中国科协、教育部等8部门联合印发《“科技梦·中国梦——中国现代科学家主题展”全国巡展工作方案》,计划从2014年起用2年时间在全国范围内开展“科技梦·中国梦——中国现代科学家主题展”全国巡展。

根据整体安排,2015年将继续在13个省(市)区15个城市巡展,路线及时间为:

巡展线路1:石家庄(4.8—4.21),太原(4.29—5.12),呼和浩特(5.22—6.4),银川(6.16—6.29),固原(7.7—7.20),石河子(8.4—8.17),阿拉尔市(8.27—9.9);

巡展线路2:昆明(4.15—4.28),南宁(5.8—5.21),厦门(6.4—6.17),合肥(6.26—7.8),临沂(7.21—8.3),沈阳(8.14—8.27),长春(9.8—9.21),哈尔滨(9.29—10.12)。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/16259470.html>。