第5卷 第3期 空间科学学报 Vol. 5, No. 3
1985年7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 1985

高频返回散射回波频谱测量

焦培南 张秀菊
(中国电波传播研究所)

摘 要

本文采用脉冲多普勒雷达技术，测量了电离层高频返回散射回波的时延-功率-多普勒频率的三维频谱图．对典型的频谱图作了分析，并由谱图推算了电离层等效反射面的垂直运动速度，它与垂直探测资料推算的结果相符．

过去人们对高频返回散射传播的研究，多集中于回波幅度与时延方面关系的研究，文献[1, 2]已有很好的述评．近年国外开始了对高频返回散射回波频谱的测量研究，发现回波频谱能为人们提供传播信道本身和波束照射区域很多重要信息．有人根据洋面回波多普勒频谱信息，测定洋面状态：风速、风向、浪高、海流等[3]；也有人认为这种多普勒频谱的精细分析，有助于对传播模式进行分辨[4]；陆地上回波的多普勒频谱的分辨和识别，有可能发现和分辨照射区域内或地面上空较大的高速飞行目标、电离层不均匀结构、流星等[5]．回波多普勒频谱的三维(时延-功率-多普勒频率)谱图，又称为返回散射传播信道的"散射函数"．它是高频信道多径畸变和衰落率估算的基本数据．因此，研究高频返回散射信号的频谱将在遥感环境、探测目标和改善通信等方面有重要意义．

本文叙述了高频返回散射回波频谱的实验设备、数据处理方法以及初步测量结果．所采用的脉冲多普勒雷达的两路正交相检信息的处理方法、与国外所采用的偏置零中频的方法稍有不同[3,4]．分析了1978年新乡向南探测的返回散射传播资料，得到了回波多普勒频移的三维谱图．并将静日、扰动、日出、日落等典型结果与本探测电路中点附近的垂测站的资料进行了对应分析，所估算的电离层垂直运动情况二者相符合，说明了单站用本方法在研究远距离大区域电离层运动的潜在能力．

一、实验设备

实验设备是一个改进了的返回散射仪，设备方框图如图1所示．设备主要指标，工作频率6—20MHz，脉冲发射功率为15kW，脉冲宽度100μs，重复频率为24或30Hz．收发天线为 PΓ $\frac{70}{6}$ 1.25 菱形天线，增益 17db，指向朝南．系统的频率综合器的稳定度为 $1\times10^{-9}/d$．接收机灵敏度在信噪比为3:1时为1μV．接收系统第三中频输出为100kHz，

本文于1983年11月21日收到，修改稿于1985年1月27日收到．

输出处接有两路正交相位检波器. 由一个宽度可变的时延波门将回波输入相检器，并使其与 100kHz 本振频率比相. 本振信号其中有一路移相 90°，以构成正交的两路相检输出. 数据处理可联机或脱机处理. 脱机处理时，磁带机记下的数据是通过计算机控制的 A/D 变换器，以时延波门为同步脉冲，实现对 I、Q 两路相检信号作任意时延的采样. 计算机是用 FFT 算法完成离散付里叶变换运算，最后得到回波的三维多普勒频谱图.

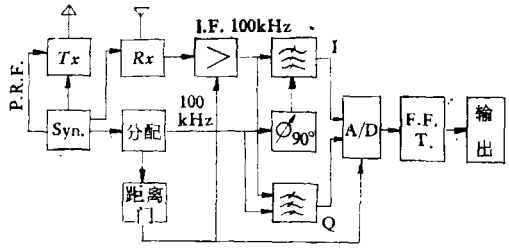

图 1 实验设备简图

Fig. 1 The diagram of the experimental equipment

二、数据处理原理

1. 正交相检信号描述

设发射信号为

$$Y(t) = A_0\cos(2\pi f_0 t + \phi_0), \tag{1}$$

其中 A_0 为振幅，f_0 为载频，ϕ_0 为初始相位，t 为时间. 发射信号经电离层反射和地面散射之后返回到接收机，此时接收回波包含着电离层运动和地面运动所产生的多普勒频率 f_d. 于是，接收信号可写为

$$S(t) = A_1\cos[2\pi(f_0 + f_d)t + \phi_0], \tag{2}$$

在中频放大器输出的信号则为

$$x(t) = A\cos[2\pi(f_d + f')t + \phi_0], \tag{3}$$

其中 f' 为中频放大器频率. 经校正后的相检器输出的正交分量分别为

$$I' = A\cos[2\pi(f_d - f')t], \tag{4}$$

$$Q' = A\sin[2\pi(f_d - f')t]. \tag{5}$$

展开(4)、(5)式则有

$$I' = I\cos(2\pi f' t) + Q\sin(2\pi f' t), \tag{6}$$

$$Q' = -I\sin(2\pi f' t) + Q\cos(2\pi f' t). \tag{7}$$

其中

$$I = A\cos(2\pi f_d t),\quad Q = A\sin(2\pi f_d t). \tag{8}$$

2. 数字式信号处理

在电离层返回散射的问题中，在雷达状态下工作，信号是脉冲串. 由于地面是广延分布的，它形成了广延分布目标回波. 这里考察位于某一宽度 τ_0 的某一时延 T_0 波门内 N 个脉冲回波的付里叶变换.

对脉冲工作下的相检信号 $x_{(n)}$，在等时间间隔 t_n 的 N 个采样其任一频率分量 $K\left(=\frac{f_k}{B}\right)$ 的离散付里叶变换为

$$X_{(k)} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{(n)}\exp\left\{-j\cdot n\cdot k\cdot\frac{2\pi}{n}\right\}, \tag{9}$$

$$n = 0, 1, 2, \cdots, N-1;\ k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots, \pm(N-1)/2.$$

其中 n 为脉冲序号，k 为数字滤波器序号，f_k 为频率分量，B 为数字滤波器带宽，N 为采样脉冲总数．令 $\Delta\theta = 2\pi/N$，这时

$$\exp\left\{-jnk\frac{2\pi}{N}\right\} = \exp\{-jnk\Delta\theta\}, \tag{10}$$

$n\Delta\theta$ 是以 2π 为模的．正交相检器输出 I_n，Q_n（见(8)式）可组成复数，则(9)式 $x_{(n)}$ 是复数，即 $x_{(n)} = I_n + jQ_n$．于是，(9)式变为

$$\begin{aligned} X_{(k)} &= \sum_{n=0}^{N-1}\{(I_n + jQ_n)[\cos(n\cdot k\cdot\Delta\theta) - j\sin(n\cdot k\cdot\Delta\theta)]\} \\ &= X_{R(k)} + jX_{I(k)}, \end{aligned} \tag{11}$$

$$n = 0, 1, 2, \cdots, (N-1);\ k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots, \pm(N-1)/2;$$

其中脚标 R、I 表示实部和虚部．数字付里叶变换实现形成所有可能的多普勒频率通道，从而得到了回波频谱．

3. 多普勒功率谱估计及统计参数选择

对(11)式，其离散形式的原始多普勒功率谱估计为

$$\tilde{G}_{(k)} = \frac{T_r}{N}|X_{(k)}|^2. \tag{12}$$

为改善估计精度，采用了 Hanning 谱窗函数改善由于数据被截断所引起的泄漏．

为了保持统计稳定性以及减少统计误差，这里采用了分离时间段平均方法．时间段数目 q 应被电离层返回信道的平稳性所限，特别是在日出，日落时间．

这里希望多普勒功率谱估计的均方误差为 $\varepsilon_r^2 = 0.04$，有效分辨带宽 $B = 0.1$Hz，在采样频率为 12Hz（脉冲重复频率之半）时，统计参数是这样选择的[7]：截断频率 $f_c = \frac{1}{2T_r} = 6$Hz，分段数目 $q = \frac{1}{\varepsilon_r^2} = 25$，分段采样长度 $T_d' = \frac{1}{B} = 10$s，总采样时间 $T_d = q/B = 250$ s，总采样数据 $N = T_d/T_r = 3000$．但日出日落时间传播模式多，转换也快，f_d 变化较大，一般可取 $q = 4$—6．

三、实验结果与分析

对 1978 年的返回散射传播实验资料进行了计算，得到了时延-功率-多普勒频率的三维谱图．图 2—5 就是一些典型的返回散射回波三维谱图．

电离层返回散射信道由很多互不相干的散射体所构成，各自又有不同的空间位置和运动速度，所以接收场信号是由很多不同时延和不同多普勒频移的元信号组成．而时延-功率-多普勒频率的三维谱图就是用以描述发射一个等间隔单位幅度窄脉冲串（其三维谱图接近于一个钉板状结构）经过电离层返回散射信道传播之后，其接收功率在时间域和频率域所发生的散布．

1. 电离层等效反射高度运动的估算

（1）从返回散射数据估算：由平地面平电离层模型出发，假定多普勒频移 f_d 是平面

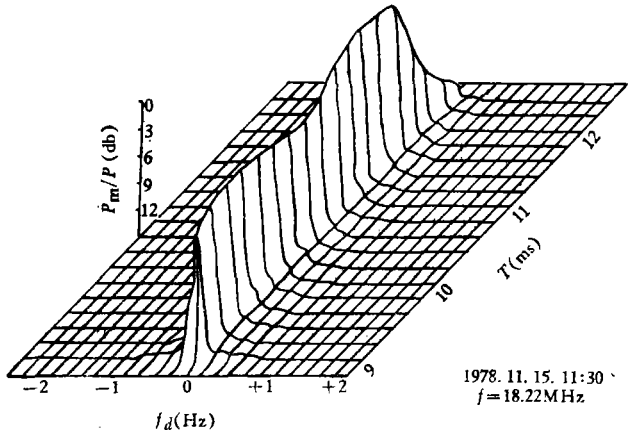

图 2 宁静电离层返回散射回波谱

Fig. 2 The backscatter echo spectrum during the quiet. ionosphere

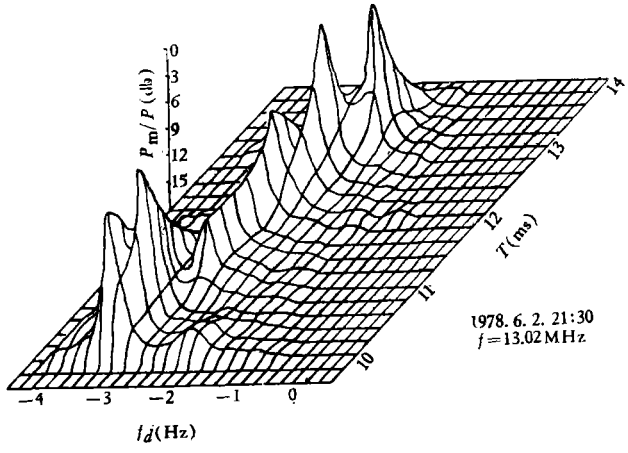

图 3 扰动电离层返回散射回波谱

Fig. 3 The backscatter echo spectrum during the disturbance

电离层的等效反射高度 h 的垂直运动引起的. 对斜投射情况有[8]

$$\Delta f = f_d = -\frac{2f}{c} V_\perp \cos\theta_0, \tag{13}$$

式中 $V_\perp = \frac{dh}{dt}$, c 为光速, f 为工作频率. 由马丁等效理论,有

$$\cos\theta_0 = 2h \Big/ \left(P + f\frac{dP}{df}\right) \tag{14}$$

其中 θ_0 为入射角, P 为相路径, $G = P + f\frac{dP}{df}$ 为群路径, $\frac{dh}{dt}$ 为等效反射高度的变化率. (13)式可写为

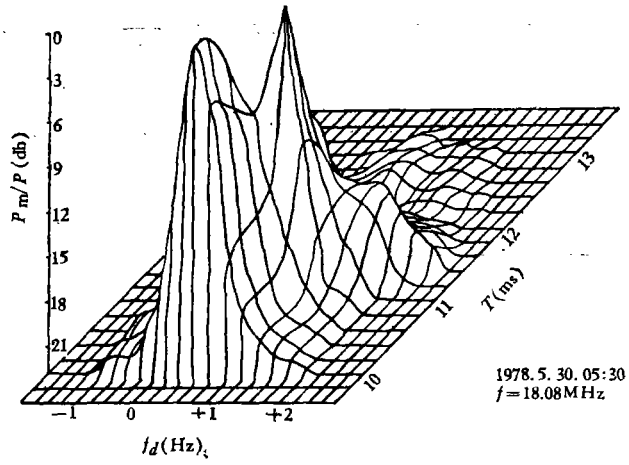

图 4　日出电离层返回散射回波谱

Fig. 4　The backscatter echo spectrum in sunrise

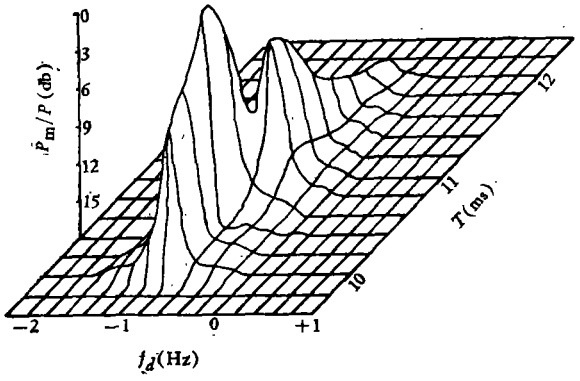

图 5　日落电离层返回散射回波谱

Fig. 5　The backscatter echo spectrum in sunset

$$\Delta f = -\frac{4f}{c}\frac{dh}{dt}\frac{h}{P + f\dfrac{dP}{df}}. \tag{15}$$

对返回散射情况，电波传播路径比斜投射情况增加一倍，所以，电波往返传播引起的多普勒频移为

$$\Delta f = -\frac{8f}{c}\cdot\frac{dh}{dt}\frac{h}{P + f\dfrac{dP}{df}}. \tag{16}$$

这时，电离层等效垂直运动速度 $V_\perp$ 为

$$V_\perp = \frac{dh}{dt} = -\frac{\Delta f \cdot c\left(P + f\dfrac{dP}{df}\right)}{8 \cdot f \cdot h}. \tag{17}$$

对于薄的电离层，$\left(f\cdot\frac{dP}{df}\right)$ 通常是很小的，对 Es 层 $f\cdot\frac{dP}{df}\doteq 0$. 对本文模式，作为近似，取 $G\doteq P$.

在(17)式中，Δf、f 可以在返回散射回波谱图中度量得到. 等效反射高度 h 可以从扫频探测的最小时延线，由下式[6]

$$(R_0+h)^2-R_0^2=\frac{G^2}{4}\frac{\frac{1}{f}\left(\frac{dG}{df}+\frac{G}{f}\right)(1-2\tau h)+\tau\frac{G^2}{f^2}}{\frac{1}{f}\left(\frac{dG}{df}-\frac{G}{f}\right)(1-2\tau h)+\tau\left[2\frac{dG}{df}\frac{G}{f}-\left(\frac{G}{f}\right)^2\right]},\qquad(18)$$

在给定 h 初值后用迭代法求得. 其中 $R_0=6370\text{km}$ 为地球半径，$\tau=4.7\times10^{-5}/\text{km}$ 为修正常数，$\frac{dG}{df}$ 为扫频最小时延线在频率 f 处的斜率

(2) 从垂直探测频高图估算：在返回散射电路反射区附近的垂测频高图，根据正割定理和 $G=P+f\frac{dP}{df}$，用传输曲线原理可方便地求出 h. 但在返回散射传播用的是以时延 G(不是地面距离 D) 为参变量的对数传输曲线. 这样的传输曲线迭盖在相隔 Δt 若干分钟时间的两张频高图上，则可度量出对应于工作频率 f 时，时延为 G 的射线的等效反射高度 h_1 和 h_2. 这样，该时间间隔 Δt 内的等效反射高度的平均垂直运动速度 $V'_\perp$ 为

$$V'_\perp=(h_2-h_1)/\Delta t.\qquad(20)$$

这样，(17)和(20)式结果可以相互比较和印证. 本文垂测资料是来源于接近本返回散射电路反射区的武昌垂测站.

2. 典型谱图分析

(1) 图 2 是宁静电离层谱图. 它是 1978 年 11 月 25 日 11:30，用 18.22MHz 频率测到的. 这个谱图呈一片尖楔子状，整个频谱的尖峰位置几乎所有时延都在 0 Hz 附近，频移不超过 0.2Hz. 这说明大尺度变化的折射效应所引起的多普勒频移很小. 多普勒谱宽为 0.1Hz，这意味着此时电离层中不均匀体运动平均速度是很小的. 电离层没有明显的垂直运动，电离层返回散射信道呈现相当稳定，返回散射信号相干积累时间可达 10 秒以上. 在相应时间，武昌垂测站相隔 15 分钟的两张垂测频高图没有变化，传播路径呈单一的 F 层模式.

在夏季，由 Es 层传输的返回散射信号有更窄的尖楔子状谱图. 这是因为 Es 层一般层高相当稳定，电子密度结构比较薄且较浓，近似于镜面反射情况的缘故.

(2) 图 3 是剧烈运动的电离层返回散射回波谱图. 它是 1978 年 6 月 2 日 21:30 以 13.1MHz 频率测到的. 这个谱图显示了很大的多普勒频移，数值在 −2.0——3.2Hz 范围. 多普勒散布在 0.3—0.5Hz 范围. 整个谱图随时延变大，多普勒频移有减小趋势. 谱图形状及结构显得十分复杂. 这样的谱图意味着电离层的等效反射面有一个很快的向上(多普勒频移为负)运动，且电离层的不均匀体随机运动相当剧烈，这些运动在不同反射区域是不同的. 远处的多普勒频移虽较小，但运动速度未必小. 由(17)式推出的反射区等效反射高度垂直运动速度为 31.9—35.5m/s 的范围(见表 1).

武昌站同日 21:15 和 21:45 的两张垂测频高图表明了电离层确有剧烈的向上运动.

表 1　两种探测数据推算的 $V_\perp$

时延 (ms)	斜距 (km)	13.1MHz 返回散射探测数据			垂直探测数据			
		h (km)	Δf (Hz)	$V_\perp$ (m/s)	h_1 (km)	h_2 (km)	Δh (km)	$V'_\perp$ (m/s)
10	1500	420	3.1	31.9	390	460	70	38.8
11	1650	400	2.9	34.5	360	420	60	33.3
12	1800	390	2.6	34.6	345	405	60	33.3
13	1950	380	2.4	35.5	335	395	60	33.3

在 30 分钟内，电离层等效反射高度的变化 Δh 为 60—70km，由(20)式估算的等效反射高度垂直运动的速度在 33.3—38.5m/s 范围，与前者相符.

图 3 中多普勒频谱的双峰现象是由多模式传播造成的，而前沿附近频谱双峰多是由高低角射线多径传播造成的.

(3) 图 4 是日出时返回散射回波谱图.它是在 1978 年 5 月 30 日 05:30，用 18.08MHz 频率测到的. 由图可见，多普勒频移为 +0.6—+0.9Hz，多普勒散布为 0.6—0.8Hz. 因为多普勒频移为正的，这意味着此时在太阳照射下电离层中的电子浓度增加，反射区的等效反射高度向下运动，由 (17) 式从多普勒频移可推出反射面等效反射高度的垂直运动速度为 6.9—12.7m/s. 由于电路是南北向的，因此日出时间对全电路来说大致相同，不同时延各部回波的多普勒频移差别主要是电路南端纬度较低，电离层相对变化要大些. 多普勒频率散布较大，意味着这时电离层的层状结构较宁静时更不稳定. 这时信道稳定性差，相应回波相干积累时间减小.

根据武昌站同日 05:30 和 05:45 两张垂测频高图分析，电离层等效反射高度由 270km 下降至 260km，垂直下降的平均速度约为 11.1m/s. 两种探测结果相符.

(4) 图 5 是日落时返回散射回波谱图. 它是 1978 年 6 月 1 日 19:50，用 13.1MHz 频率测到的. 图中可见，多普勒频移为 −0.8—— 0.6Hz，多普勒频率散布为 0.2—0.5Hz. 负的多普勒频移意味着等效反射高度在垂直向上运动. 从(17)式由多普勒频移推出等效反射高度的垂直运动速度为 12.3—10.2m/s. 各时延的运动大致相同. 多普勒频率散布与日出情况大体相同.

根据武昌站同日 19:45 和 20:00 两张频高图分析，电离层等效反射高度由 275km 上升到 285km，推出其平均上升速度为 11.1m/s. 可见两种探测结果相符.

四、结　论

这些典型样品是有代表性的，并且具有这些时段电离层返回散射信道的基本特征.返回散射传播数据与垂测数据的联合分析结果大致相符，说明了返回散射传播频谱技术在

单站探测远距离上空电离层运动的潜在能力.

数字频谱分析技术近年已制成硬件，配合设备能力更强的返回散射设备及可在方位电控扫描天线阵，能对大面积电离层的运动状态进行实时探测和处理.

本研究中，卢云春、朱雄生、陈瑞先等同志研制了实验设备，李钧和熊皓先生曾给予有益帮助，垂测资料是中国科学院武汉物理研究所武昌站观测的，在此一并致谢.

参 考 文 献

[1] Черонв, Ю. А., Возвратно-Наклонне зондирование ионосферы, Издательство «связь», 1971.
[2] Croft, T. A., *Rev. Geophysics and Space Physics*, Vol. **10**, p. 73, 1972.
[3] Georges, T. M., *IEEE Trans.*, AP-**28**, p. 751, 1980.
[4] Bagwell, D. J., Second International Conference on Antennas and Propagation, p. 37, 1981.
[5] Headrick, J. M. and M. I. Skolnik, *PIEEE*, Vol. **62**, p. 664, 1974.
[6] 焦培南等，中国电子学会第三届年会论文集，第266页，1982.
[7] 贝达特，J.S. 和 A.G. 皮尔索，随机函数分析方法，国防工业出版社，1976.
[8] Davies, K., Ionospheric Radiowaves, Blaisdell Publishing Company, London, p. 226, 1969.

Measurements of the HF Backscatter Echo Spectra

Jiao Pei-nan Zhang Xiu-ju
(China Research Institute of Radio-wave Propagation)

Abstract

In this paper, the HF backscatter echo spectra measured by the technique of the pulse Doppler radar. The Doppler spectra are displayed in 3-dimensonal (time delay-power-Doppler frequency) spectrograms, i.e. the scatter function of the HF backscatter propagation channal. The typical spectrograms are studied and the vertical motion velocity of the equivalent reflection height of the ionosphere are infered from the Doppler spectra. The values of the velocity are in accord with that infered from the vertical sounding data.