第7卷 第2期 空间科学学报 Vol. 7, No. 2
1987 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1987

高频返回散射探测中传播模式的识别

黄 德 耀
（中国电波传播研究所）

摘 要

本文对高频返回散射探测中各种传播模式的出现及其特征进行了讨论，提出了识别传播模式的方法，并对这些方法在实际探测中的应用作了介绍.

一、引 言

经电离层反射的高频返回散射探测技术发展到今天，已经有了多种用途. 它可用来探测远处的电离层结构，用来确定电路的最高可用频率，用来管理和监视短波通讯和短波广播，用来遥感海态，还可用来发现并跟踪视距外的低空运动目标.

大家知道，电离层是一个多层结构，有的层还是厚层. 再加上我们应用的收、发天线的垂直波瓣一般都比较宽. 这样，在经电离层反射的高频返回散射探测中就可能出现多模式传播现象. 所以，在高频返回散射探测技术的上述种种应用中有一个必须解决的关键问题，即传播模式的识别问题.

二、多模传播的出现及其特征

1. 高、低射线传播模式

电波经厚层（E、F_1、F_2）反射时，可以形成两种传播模式——低角射线模式和高角射线模式. 通常能提供传播通道的是低角射线. 它比较稳定，不易受到散焦作用. 高角射线在电离层中经过的路径长，易受散焦作用. 所以，一般来说由高角射线传播的信号明显地比低角射线传播的信号要弱，特别是当工作频率偏离发射端到目标区的重合频率越来越远的时候更是如此.

有人测量了经高、低射线传播的相对信号强度，发现当工作频率低于重合频率 1、2、3 MHz 时，低射线信号强度比高射线信号强度分别高 3、6、10 分贝. 在返回散射的情况下，两者将相差更大.

由此可见，当工作频率接近发射端到目标区的重合频率时，易出现高、低射线两种传播模式. 换句话说，在定频工作情况下，当目标接近波束的跳距区时，易出现高、低射线两

本文于 1986 年 8 月 28 日收到.

种传播模式.

2. 多层多模

在白天的条件下,电离层常常由能维持传播的多层组成,而易形成多模. 但是,在较长的电路上,E 层传播所要求的仰角比较低,此时一般天线的增益很低,防碍了 E 层传播模式的形成. 因此,在较长电路的情况下,E 层不会直接引起多模问题,但它会在较宽的频率范围内遮蔽较高的层,使得我们不得不工作在接近 F 层 MUF 的频率上. 这样一来,又可能会出现高角射线传播形成多模.

3. 突发 E 模式

在夏季,Es 层的遮蔽频率 f_bEs 和顶频 f_0Es 有时可高达 10MHz 以上. 在这种情况下,Es 层能在很宽的频率范围内遮蔽较高的层,使得不能出现 F 层传播模式. 这时,可以利用 Es 传播模式来避免多模问题. 但是,由于受到低仰角天线增益低的限制,一跳 Es 模式不可能到达 2000km 以上的距离. 两跳 Es 传播模式可以传输到 2000km 以上的距离,但由于要求 Es 层必须在两个独立的反射点同时存在,这种可能性也减少了.

即使 Es 层遮蔽频率 f_bEs 比较低,在 F 层能维持传播的频率上 Es 层呈部分透明状态. 这时,能出现 F 层传播模式,但由于 Es 层的存在,使得经 F 层传播的能量大为降低,这对于作远距离探测是很不利的.

4. 多跳多模

多跳模式包括单一层的多跳模式和多层的混合模式两种. 由于多跳模式的仰角要比单跳模式的仰角大许多,所以通常有一个频率间隔,在这段频率上,可维持单跳传播,而多跳模式将穿透该层. 一般来说,这个间隔约为 7—8MHz 左右. 这使我们能够选择合适的工作频率来避免多跳模式和混合模式.

对于返回散射来说,来、去的传播模式可能相同,也可能不同. 例如,若在发射端和目标区之间存在 E 层和 F 层两种传播模式,经返回散射模式组合后,就可能出现三种传播模式: E-E; F-F; F-E (或 E-F).

由于多模传播的存在,当用高频返回散射技术探测视距外的低空目标时,就可能出现多个目标的回波各自以不同的传播模式、相近的传播时延到达接收端,在显示器上只显示出一个目标. 这就产生了所谓的"模式模糊".

由于多模传播的存在,还可能出现一个目标的回波经过不同的传播模式,在返回散射仪的显示器上显现出多个目标. 这就是所谓的"多径效应",就有一个目标归并问题.

三、识别传播模式的方法

对于高频返回散射来说,有多种识别传播模式的方法: 在后向散射电离图中,利用各描迹形态的差别一般可以将 1E, 1Es, 2E, 2Es, 1F 模式区别开来*; 利用中点电离图换算电离层剖面并对雷达的覆盖区进行射线描迹也能进行各种模式的识别; 利用在覆盖区内的已知目标或地物界面、应答机等的回波也能判明多径和传播模式;利用返回散射地物

* 黄德耀,中国电波传播研究所内部报告.

回波和应答机回波的频谱能够判明电路上存在几种传播模式；利用中点电离图与传输曲线相结合的方法也可判明传播模式．下面仅就两种比较适用的方法进行讨论．

1. 利用地物谱和应答回波谱来识别传播模式．

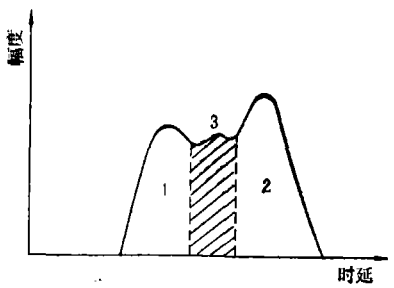
由于电离层中电子的运动及电子产生/复合率的变化，使得电离层处于运动状态之中．这种运动的垂直分量将引起信号的相路径长度的不断变化，即产生频率的多普勒漂移．在电离层不同的区域，这种运动的垂直分量速度是不相同的，所以由不同的等效高度反射的传播模式将产生不同的多普勒分量[1]．

根据这个原理，如果对于某个频率，电路上只存在单一传播模式的话，返回散射地物谱和应答信号谱都将只有一个峰．如果对于某个频率，电路上存在两种传播模式的话，那么返回散射地物谱将可能有两个或三个峰，而应答信号谱将有两个峰．用这种方法就可判断电路上是否存在多模传播．

当发射端到观测区存在两种传播模式时，还可能出现三种不同的情况：

(1) 模式覆盖区和模式观测区同时出现模式模糊，即应答机所在地(模式覆盖区)同时由两种传播模式照亮，而经这两种模式传播的时延在探测器显示屏上(模式观测区)也发生模糊时，应答信号的谱应成双峰，和应答信号有相同时延的地物谱将会有二或三个峰．

(2) 仅模式观测区出现模式模糊，即应答机所在地只由单一模式照亮，而探测器时延显示屏上在出现应答信号的地方，经两种模式传输的地物回波叠加在一起，如图 1 所示．这时应答信号的谱将只有一个峰，而和应答信号有相同时延的地物谱将会出现两个峰．



1.短时延模式区 (The short delay mode's region)
2.长时延模式区 (The long delay mode's region)
3.模式模糊区 (The mode's ambiguous region)

图 1　探制器A型显示

Fig. 1　The Sounder A-type display

我们可以使探测器的工作频率不断升高，此时长时延模式的前沿将向右移动，应答信号时延将变化缓慢．如果与应答信号同时延的地物谱一直是单峰，而应答信号突然消失，则照射应答机的是长时延模式．如果当工作频率不断升高时，地物谱从多峰变成了单峰，应答信号不消失，则照射应答机的是短时延模式．

(3) 仅模式覆盖区出现模式模糊，即应答机所在地由两种模式照亮，而探测器时延显示屏上出现两个应答信号．在这种情况下，识别传播模式就很容易了．

2. 利用中点电离图与传输曲线相结合的方法来识别传播模式.

如图 2 所示，按史密斯传输曲线使用方法将传输曲线重叠在中点电离图上. 某一条大圆路径为 D 的传输曲线与中点电离图上各层的描迹有几个交点，说明大圆路径为 D 的电路上就可能存在几种传播模式. 各交点的虚高就是各传播模式的反射点的虚高.

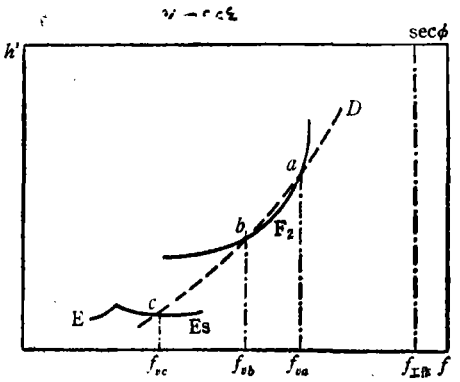


图 2

Fig. 2

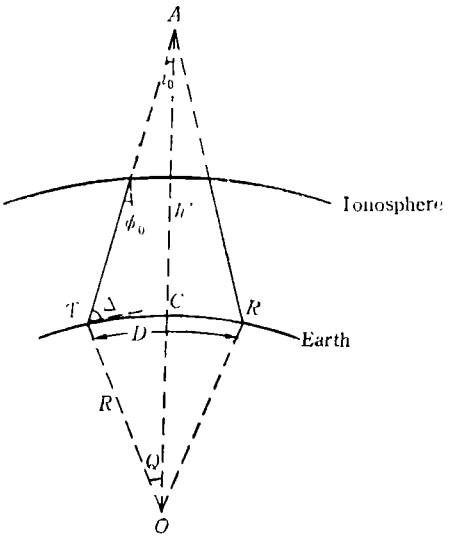


图 3

Fig. 3

例如：在图 2 上，交点 a 可能形成 F_2 高射线传播模式；交点 b 可能形成 F_2 低角射线传播模式；交点 c 可能形成 Es 传播模式.

根据等效定律[3]，考虑到地球弯曲，从图 3 的几何关系可以得到，

$$\operatorname{tg}\Delta = \frac{\cos\left(\frac{D}{2R}\right) - \left(\frac{D}{R+h'}\right)}{\sin\left(\frac{D}{2R}\right)}. \tag{1}$$

其中，Δ 为射线的仰角，D 为目标的大圆距离，R 为地球半径，h' 为电离层反射虚高.

从图 2 的几何关系，还可以得到斜路径长度 P：

$$P = \frac{2(R+h')\sin\left(\frac{D}{2R}\right)}{\cos\Delta}. \tag{2}$$

根据各交点的虚高 h'，利用(1)，(2)式就可以得到大圆路径为 D 的目标经各种传播模式传输的回波信号的斜路径 P. 用它们和探测器实际探测到的大圆路径为 D 的目标的回波时延作比较，就可以判断该目标回波的传播模式.

四、识别方法在实际探测中的应用

1. 在研究模式覆盖区中的应用

将高频返回散射仪和分布各地的应答机组成网，采用上节所述的方法 1 就能开展对模式覆盖区的研究.

1982 年夏季，利用返回散射仪和应答机作了应答实验. 为了使应答信号谱和地物谱分开，应答机在转发时加进了一个频率偏移 Δf. 实验的信号处理系统方框图示于图 4 中. 实验结果如图 5—7 所示. 图 5 示出了单一传播模式的地物谱（上）和应答回波谱（下）. 图 6 示出了模式覆盖区和模式观测区同时出现模式模糊时的地物谱(上)和应答回波谱(下). 图 7 示出了仅模式观测区出现模式模糊时的地物谱(上)和应答回波谱(下).

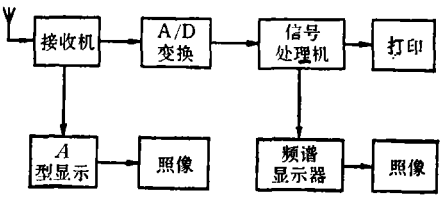
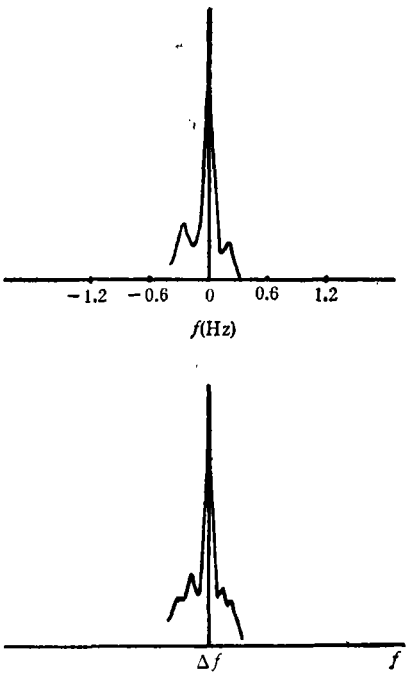


图　4

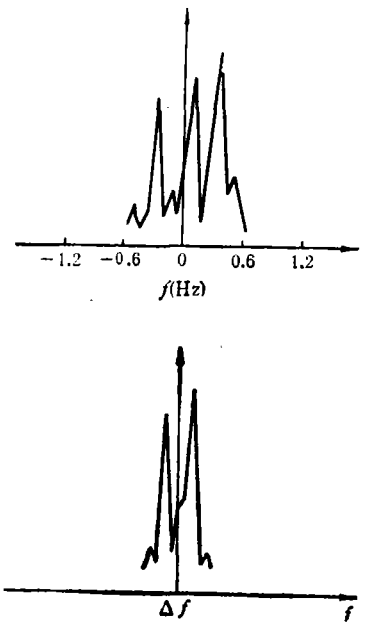
Fig. 4



$f_0 = 14.5$MHz 1982. 7. 18. 9:00

图　5

Fig. 5



$f_0 = 14.5$MHz 1982. 7. 12. 15:40

图　6

Fig. 6

2. 在探测视距外低空目标实验中对目标回波轨迹的校验

为了验证高频返回散射仪发现，跟踪视距外运动目标的能力，常要对视距外已知轨迹

的目标进行探测实验．在实验中，返回散射仪的数据处理系统将给出一系列回波点迹．这些回波点迹是不是我们应探测的目标回波点迹呢？这就需要经过模式的识别和 $P \rightarrow D$ 换算来进行校验．

首先，要根据回波点迹的多普勒频率来判断是否可能是目标回波．已知轨迹的目标的多普勒频率为

$$f_d = -\frac{2v}{c} f_0 \cos\beta, \tag{3}$$

在这里，v 为目标的速度，c 为光速，f_0 为工作频率，β 为到达目标的射线与目标运动方向之间的夹角．在这里，不考虑电离层倾斜．当目标沿波束的大圆路径运动时，那么，目标离开发射点运动则 β 等于到达目标的射线的出射仰角 Δ，目标向发射点运动则 $\beta = 180° - \Delta$．如果目标的运动方向和大圆路径成角 γ（小于 90°）的话，那么，当目标离开发射点运动时，

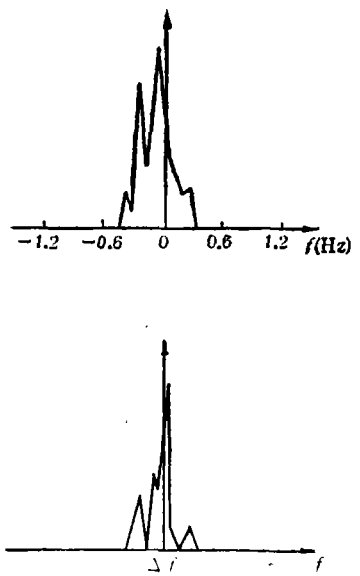
$$\cos\beta = \cos\Delta \cdot \cos\gamma.$$

当目标向发射点运动时，

$$\cos\beta = -\cos\Delta \cdot \cos\gamma.$$

第二步是应用上节的方法 2 预报出经各种可能存在的传播模式传输的已知目标的回波点迹．然后将探测仪所实测的回波点迹与预报的回波点迹进行比较，判断出实测回波点迹的传播模式．

第三步根据实测回波点迹的传播模式进行 $P \rightarrow D$ 换算．请参看图 3，利用等效定律及正割定律可以得到：



$f_0 = 13.5$MHz 1982. 7. 18. 17:20

图 7

Fig. 7

$$\sin i_0 = \sqrt{1-\left(\frac{kf_v}{f_{ob}}\right)^2}. \tag{4}$$

其中，f_{ob} 为斜入射工作频率；f_v 为与斜入射有相同反射虚高的等效垂直频率，可以从图 2 上获得；k 为考虑到地球弯曲而引进的修正因子，可从文献[2]中获得．再利用正弦定律就可得到：

$$P = \frac{2R\sin\left(\frac{D}{2R}\right)}{\sqrt{1-\left(\frac{kf_v}{f_{ob}}\right)^2}}. \tag{5}$$

上式中 k，f_v 都与大圆距离 D 有关．所以不能写出 D 的显函数．我们采用迭代法来进行 $P \rightarrow D$ 换算．

用这种方法将返回散射仪所获得的回波点迹的时延 P 换算成大圆距离 D，与被探测目标的实际轨迹进行比较，就能对返回散射仪获得的回波点迹进行校验．

五、结 束 语

在一定条件下，本文所讨论的识别方法应用于实际探测中是行之有效的．在探测视距外未知目标时，此方法就有其局限性．那时，就要将第三节中所列举的方法进行综合应用．另外，还有一个比较及时可靠的方法是用高分辨率的扫频返回散射仪实时获得“模式覆盖边界图”，再根据目标回波的点迹随频率变化的情况来识别传播模式[3]．

参 考 文 献

[1] Bagwell, D. J., Second Intenational Conference on Anteunas and Propagation, p. 37, 1981.
[2] Daries, K., Ionospheric Radio Propagation, p. 170, 1965.
[3] Dewit, R. N., AD-A013648.

Distinguish of the propagation Modes in the HF Backscattering Soundings

Huang De-yao
(China Research Institute of Radio-wave Propagation)

Abstract

In this paper, the occurrence and their features of the various propagation modes in the HF backscattering are discussed. Some methods of distinguishing the propagation modes and the application of these methods in practical soundings are also presented.