第 15 卷 第 1 期　　空 间 科 学 学 报　　Vol. 15, No. 1
1995 年 1 月　　CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE　　Jan., 1995

计及电离层倾斜的 *P-D* 变换及其短波通信 MUF 的预报方法

司 家 才
(中国电波传播研究所,新乡　453003)

摘　　要

本文提出了计及电离层倾斜的高频返回散射电离图的最小时延换算为大圆距离的计算方法,并讨论利用返回散射电离图进行最高可用频率预报. 在 $D>1000$km 条件下, *P-D* 变换的最大误差在 3.5%以内,实时预报结果与 CCIR 提供的频率预报的月平均值相差 ± 1.5MHz.

关键词　HF 返回散射,电离层倾斜, *P-D* 变换, MUF 预报

一、引　　言

高频天波返回散射最通常的实验记录是群时延-频率关系的电离图,也称 *P-f* 图,群时延对应的群路径(斜径)并非大圆距离. 在实际应用中,如何快速正确地由群时延换算为地面距离(即 *P-D* 变换)是高频天波超视距雷达、短波远距离通信、超视距海态遥感、远距离电离层结构的探测等需要解决的关键性问题之一. 焦培南等[1]已在同心球面分层电离层模型下获得了 *P-D* 变换的计算方法. 本文在文献[1]的基础上讨论了计及电离层倾斜的 *P-D* 变换方法. 考虑到短波通信最高可用频率的传播射线对应于返回散射电离图中最小时延射线,最小时延对应的大圆距离上的最高可用频率就是最小时延对应的频率. 本文进一步探讨建立返回散射实时选频和管理系统.

二、理论公式推导

图 1 是计及电离层倾斜的返回散射传播的等效几何射线图. 射线经过水平不均匀电离层的轨迹等效于倾斜电离层的镜向反射路径,采用等效倾斜角 α 来描述,它反映了电离层的电子浓度水平梯度. α 为正表示水平电子浓度有负梯度. α 为负表示水平电子浓度有正梯度. 由图 1 可知,射线的斜距和大圆距离由射线反射虚高 h 和反射顶角 ϕ 以及电离层等效倾斜角 α 唯一地确定.

本文于 1994 年 1 月 24 日收到.

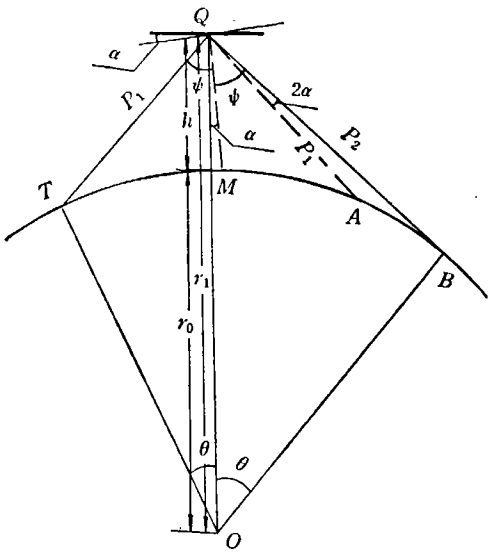

图.1 等效几何射线图

Fig. 1 The geometric figure of the equivalent ray

$$\sin\theta_1 = \frac{P_1}{r_0}\sin(\psi-\alpha), \tag{1}$$

$$\sin\theta_2 = \frac{P_2}{r_0}\sin(\psi+\alpha), \tag{2}$$

$$D = r_0(\theta_1+\theta_2), \tag{3}$$

$$P_1 = r_1\cos(\psi-\alpha) - \sqrt{r_0^2 - r_1^2\sin^2(\psi-\alpha)}, \tag{4}$$

$$P_2 = r_1\cos(\psi+\alpha) - \sqrt{r_0^2 - r_1^2\sin^2(\psi+\alpha)}. \tag{5}$$

其中 $r_1 = r_0 + h$, r_0 为地球半径.

$$P = P_1 + P_2 = r_1\cos(\psi-\alpha) + r_1\cos(\psi+\alpha) - \sqrt{r_0^2 - r_1^2\sin^2(\psi-\alpha)} - \sqrt{r_0^2 - r_1^2\sin^2(\psi+\alpha)}. \tag{6}$$

令 $x = \cos\alpha$, $y = \cos\psi$, $a = 2r_1x$, $b = 2r_0^2 - r_1^2$, $c = r_1^2(2x^2-1)$, $d = r_0^4 - r_1^2r_0^2$, $e = r_1^2r_0^2(2x^2-1)$, $z = b + c(2y^2-1) + 2\sqrt{g}$, $g = d + e(2y^2-1) + r_1^4(x^2-y^2)^2$, 则有

$$P = ay - \sqrt{z}; \tag{7}$$

$$\cos\psi = k\frac{f_v}{f}(1-\alpha). \tag{8}$$

f 是工作频率, f_v 是等效垂直频率, 修正因子 k 是与地面距离和电离层结构参数有关的系数, 在 0—4000km 范围内, 随地面距离变化为 1.00—1.20 之间. 在文献[1]的球对称条件下, k 与最小时延和反射虚高的关系为

$$k = 1 + \tau(P_0 - 1h), \quad \tau = 5\times10^{-5}/\mathrm{km}. \tag{9}$$

而在倾斜电离层条件下，由图 1 可知：

$$\overline{AB} = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 - 2P_1P_2(1 + \cos 2\alpha)} = P_0 \sin\alpha, \tag{10a}$$

$$P_0 = 2P_1 + \overline{AB},\ 2P_1 = P_0 - \overline{AB} = P_0(1 - \sin\alpha). \tag{10b}$$

$$\Delta = r_0\left(1 - \cos\left(\frac{\theta_1 + \alpha}{2}\right)\Big/\cos\left(\frac{\theta_1 - \alpha}{2}\right)\right). \tag{11}$$

AB 和 Δ 分别为修正倾斜引起的最小时延和反射虚高偏离球对称条件下差额量，因而计及倾斜的修正因子 k 为：

$$k = 1 + \tau(P_0(1 - \sin\alpha) - 2(h - \Delta)). \tag{12}$$

修正后的 k 因子将使运算迭代次数减少，而且在理论上更合理．考察返回散射电离图的最小时延线的斜率，其取值范围一般在 50—150km/MHz，考虑一个微分元为 0.1MHz，最小时延增量约为 5—15km，粗略地认为最小时延对应的地面距离增量为 5—15km，反射中点的地面距离增量为 2.5—7.5km，在如此小的位置变化中，电离层参数基本上是没有变化的，返回散射电离图中最小时延对应的反射高度、等效垂直频率以及描述电离层倾斜的倾斜角等对工作频率的微分均近似地为零[1]．因此 (8) 式中只有群时延是频率的函数，(8)式对工作频率的一、二阶导数为

$$\frac{dP}{df} = a\frac{dy}{df} - \frac{1}{2\sqrt{z}}\frac{dz}{df},\quad \frac{dz}{df} = 4cy\frac{dy}{df} + \frac{1}{\sqrt{g}}\frac{dg}{df},\quad \frac{dg}{df} = 4ey\frac{dy}{df} - 4y(x^2 - y^2)r_1^4\frac{dy}{df},\quad \frac{dy}{df} = \frac{d(\cos\psi)}{df} = f_v\left(\frac{dk}{df}\Big/f - \frac{k}{f^2}\right)(1 - \alpha),\quad \frac{dk}{df} = \tau(1 - \sin\alpha)\frac{dP}{df},$$

$$\frac{d^2z}{df^2} = 4c\left(\frac{dy}{df}\right)^2 + 4cy\frac{d^2y}{df^2} - \frac{1}{2g^{\frac{3}{2}}}\left(\frac{dg}{df}\right)^2 + \frac{1}{\sqrt{g}}\frac{d^2g}{df^2},\quad \frac{d^2g}{df^2} = 4e\left(\frac{dy}{df}\right)^2 + 4ey\frac{d^2y}{df^2} - 4(x^2 - y^2)r_1^4\left(\frac{dy}{df}\right)^2 + 8y^2r_1^4\left(\frac{dy}{df}\right)^2 - 4(x^2 - y^2)yr_1^4\frac{d^2y}{df^2},\quad \frac{d^2y}{df^2} = f_v\left(\frac{d^2k}{df^2}\Big/\right.$$

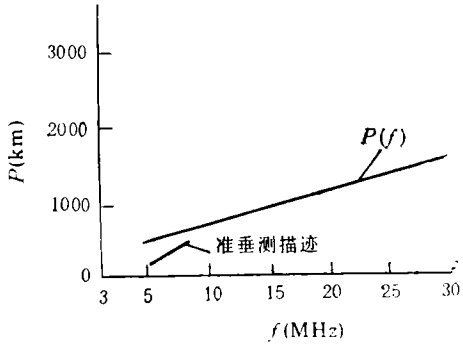

图 2　1987 年 10 月 19 日 16:00 返回散射电离图的最小时延线

Fig. 2　The minimum time-delay line on backscatter ionogram at 16:00 on Oct. 19 1987

$$f-2\frac{dk}{df}\Big/f^2+\frac{2k}{f^3}\Big)(1-\alpha),\qquad \frac{d^2k}{df^2}=\tau(1-\sin\alpha)\frac{d^2P}{df^2},\qquad \frac{d^2P}{df^2}=a\frac{d^2y}{df^2}+\frac{1}{4z^{\frac{3}{2}}}\left(\frac{dz}{df}\right)^2$$

$$-\frac{1}{2\sqrt{z}}\frac{d^2z}{df^2}.$$

其中 P、dP/df、d^2P/df^2 是返回散射电离图中最小时延值及其一、二阶导数，可以通过返回散射电离图 P-f 曲线读出和直接换算，作为输入参数．再由返回散射电离图中左下角的等效垂直测量电离图读出反射虚高和临频，如图 2．并结合最小时延线反映的水平电子浓度梯度的正负特性选择迭代的等效垂直频率、倾斜角和反射虚高的初值．再利用(1—3)式可获得最小时延对应的大圆距离 D，实现所谓的 P-D 变换．

三、与射线追踪结果比较

在给定模型下，射线追踪方法可以获得任意精度的计算结果[4]．为了验证本方法的结果的可靠性，把本文方法的计算结果与微分方程的计算结果进行比较．

利用文献 [5] 中返回散射电离图的反演方法，反演图 2 对应的实验返回散射电离图获得 1987 年 10 月 19 日 16:00 时刻的探测路径上的电离层参数，计算图 2 的最小时延线对应的地面距离．为了比较起见，我们取图 2 的最小时延线 $P(f)$ 作为 P-D 方法的计算样品，由图 2 的最小时延线读出和换算出相应的各组最小时延值及其一、二阶导数，并参考其等效垂测电离图提供的虚高和临频信息．确定输入参数和迭代初值，计算各频率点的最小时延对应的大圆距离．最后将两种方法得到的大圆距离进行比较．计算结果表明在地面距离大于 1000km 的区域，绝对误差不大于 38km，相对误差小于 3.5%．见表 1．

表 1 两种方法计算结果比较

项 目	射线方法解		本文方法解			两种方法比较	
频 率 (MHz)	最小时延 (km)	大圆距离 (km)	dP/df (km/MHz)	d^2P/df^2 $(km/MHz)^2$	大圆距离 (km)	绝对误差 (km)	相对误差 (km)
18	1129	970.7	54	0	929	41	0.042
19	1183	1025	54	0	993	32	0.031
20	1236	1090.5	53	1	1052	38	0.035
21	1290	1145	54	0	1113	32	0.0297
22	1344	1201	54	0	1169	32	0.0266
23	1398	1255	54	0	1226	29	0.0231
24	1452	1312	54	0	1283	29	0.0221
25	1504	1368	52	0	1339	29	0.0212
26	1556	1423	52	0	1395	28	0.0197
27	1608	1480	52	0	1447	33	0.0223
28	1660	1536	52	0	1501	35	0.0228
29	1712	1578	52	0	1554	24	0.0152
30	1764	1632	52	0	1605	27	0.0165

四、返回散射电离图作频率预报

在 *P-D* 变换的基础上，进一步绘制最小时延对应的地面距离随最高可用频率变化关系，如图 3. 实现了返回散射电离图作最高可用频率预报过程，再利用返回散射系统中频谱监测仪，获得 3—30MHz 的频率占用情况，如图 4. 选择一个接近最佳工作频率的干净的频率窗口，建立一条最佳的高频通信电路.

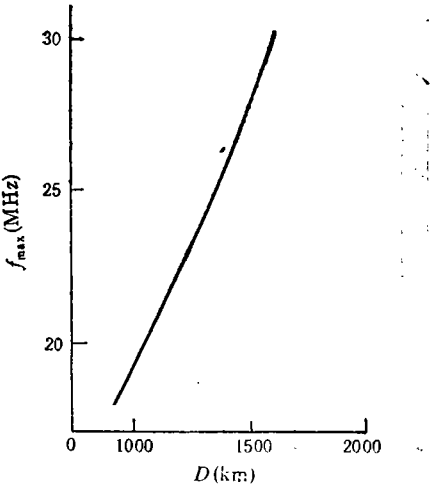

图 3　最高可用频率随大圆距离分布

Fig. 3　The MUF distribntiou with the ground distance

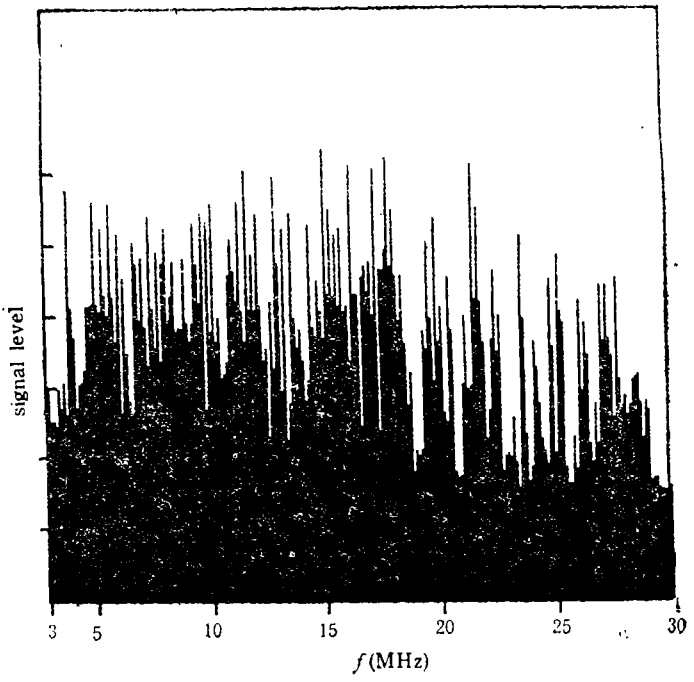

图 4　高频段频率占用情况

Fig. 4　The frequency spectrum in HF band

下面举例介绍如何利用返回散射技术进行频率预报的方法，由图 3 读出 1500km 最高可用频率约为 28MHz，理论上的最佳工作频率约为 25.5MHz. 在频率分布图上 25.5MHz 附近几个准干净的频率窗口，即：25MHz，24.0MHz，23MHz 和 23.7MHz 等. 由以上初选的四个频率作为工作频率，将可以使通信电路处于最佳工作状态. 以上是 1500km 通信电路的设计步骤. 上述过程加入到返回散射系统，可建成返回散射的实时频率预报系统，整个系统可用单部微机实现控制和数据处理. 每张返回散射电离图将提供一个方位，1 千公里至数千公里范围内各点到返回散射站的大圆距离对应的最高可用频率的实时预报. 如果天线可 360 度旋转，预报范围可达数千万平方公里.

由于正梯度和赤道异常北峰[7]的共同影响，无线电波照射的区域比较近(如图 2)，图中只能给出 1000 至 1600km 范围内的最佳工作频率的预报，最高可用频率的预报结果与 CCIR 提供的 MUFFY 程序计算的月平均最高可用频率是接近的，图中还表明距离

超过 1600km 情况下，短波段（5—30MHz）范围内，只能利用二跳传播模式的返回散射电离图进行 P-D 变换和最高可用频率的预报．上面处理的是正梯度情况，在电子浓度水平方向均匀，负梯度和波动变化的电离层环境下一跳传播模式的返回散射电离图的 P-D 变换和最高可用频率预报仍然可以采用本文的处理方法．但在负梯度情况，选取倾斜角 α 的初值为正，等效垂直频率的初值相对于探测站顶部临频减少．使初值接近真值，避免迭代的发散并降低迭代循环次数．返回散射电离图不仅能提供一跳和二跳传播模式的最高可用频率预报，而且能提供特殊传播模式的最高可用频率预报．其中跨赤道传播模式就是最重要的一种模式．将在另一篇论文中讨论．

五、结　论

本文的 P-D 变换结果与射线追踪的结果是一致的，在大圆距离大于 1000km 的区域最大误差为 38km，而本文方法比射线追踪计算速度快 100 倍以上，表现出工程上的可用性．本文预报的最高可用频率与 CCIR 提供的 MUFFY 程序软件计算的最高可用频率的月平均值是基本吻合的．

参　考　文　献

[1] 焦培南和朱其光，武汉大学学报，第 4 期，第 63 页，1985.
[2] 司家才和焦培南，空间科学学报，第 11 卷，第 209 页，1991.
[3] 司家才和焦培南，地球物理学报，第 36 卷，第 149 页，1993.

P-D TRANSFER WITH TILTED IONOSPHERE AND PREDICTION OF MUF

Si Jia-cai
(*China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang* 453003)

Abstract

This paper presents a method to transfer the minimum time-delay on backscatter ionogram into the earth's distance with ionospheric tilt considered; and discusses MUF prediction by use of backscatter ionogram. Under $D > 1000$km, the maximum error of the P-D transfer is $\leqslant 3.5\%$; the difference between CCIR and the result of this paper are ± 1.5MHz.

Key words HF backscatter, Ionospheric tilt, P-D transfer, MUF prediction