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

电离图分片换算法中谷的处理

张仁芳
(中国电波传播研究所)

摘 要

本文介绍用电离图的寻常波描迹换算电离层剖面. 应用 Gulyaeva 的经验公式确定 F 层的底高，E、F 层之间的谷电离区的模式等效为一平板层，以 Budden 的分片解法为基础对 F 层进行频高换算. 用此方法对 Herbert 提供的几条参考剖面进行了比较，电子浓度所在高度的误差一般不超过 ±10 公里(中纬地区).

引 言

电离层 E 到 F 层之间可能存在的谷电离区以及频高图起测频率 f_{min} 以下的底部电离区，是频高换算中较为困难的问题，因为它们都没有对应的实测描迹. 电波单一分量回波描迹不能唯一地确定剖面，即存在谷区模糊问题. 虽然近年来用"o"波和"x"波的联合分析方法来考虑以上问题，使换算精度得到一些改进，但由于谷区附近的"x"回波经常测不出来，所以这些方法在许多情况下无法应用. 而且联合分析的方法也比较复杂.

Budden 的分片换算方法[1] 是比较简单的方法，它只需要电离图回波描迹的单一分量，但只适用于剖面为单调分布的情况. 如果将有谷的剖面按单调上开剖面来处理，则会使 F 层换算的真高降低，特别是在 F 层起始高度处尤为明显(如图 1 中的 D). Gulyaeva 根据一些全球可能的电离层剖面分布确定了 F 层最低虚高相对应的真高公式. 应用此公式，在中纬地区其误差的最小方差不大于 10 公里[2]. 我们引用她的经验公式，研究与之匹配的频高换算方法，使频高换算的精度得以提高. 由于低电离区浓度很小，对上层换算影响不大，故未作深入的研究.

一、基 本 公 式

由射线理论，电波在电离层传播所到达的虚高 h' 为

$$h' = z_0 + \int_{z_0}^{z} \mu' dz.$$

其中 μ' 为群折射指数，z 为高度. 要利用频高曲线 $h'(f_N)$ 来换算剖面，则将变量改为对等离子体频率 f_N 积分. 将剖面分段，使每段成为单调分布，则有

$$h'(f) = z_0 + \int_0^{f_{0E}} \mu' \frac{dz}{df_N}\, df_N + \int_{f_{0E}}^{f_{NV}} \mu' \frac{dz}{df_N}\, df_N$$

本文于 1986 年 5 月 2 日收到.

$$+\int_{f_{NV}}^{f_{F1}}\mu'\frac{dz}{df_N}df_N+\int_{f_{F1}}^{f}\mu'\frac{dz}{df_N}df_N. \tag{1}$$

式中 f_{0E} 为 E 层临频，f_{NV} 为谷的顶频，f_{F1} 为 F 层靠近谷区等离子体频率．第二、三项积分是沿谷区剖面进行的，它的时延贡献体现在 $f_{0E}\leqslant f\leqslant f_{0F}$ 的频段上(f为电波频率)，所以只能利用 F 层的虚高信息求解．故将第三项积分上限取到 f_{F1} 点．如果将(1)式中的第二、三项积分合并成一个积分，则被积函数所包含的 $z(f_N)$ 为非单调函数，而它的逆函数 $f_N(z)$ 是在高度 z 范围内的等离子体频率的真实分布，它是单值的．所以将第二、三项积分合并后，仍改用对 z 积分：

$$h'=z_0+\int_0^{f_{0E}}\mu'\frac{dz}{df_N}df_N+\int_{z_{mE}}^{z_{F1}}\mu'dz+\int_{f_{F1}}^{f}\mu'\frac{dz}{df_N}df_N. \tag{2}$$

当谷区采用等效平板层模式时，μ' 仅与等效平板层的等离子体频率 $\bar{f}_{NV}$ 及 f 有关，于是第二项积分可以变为

$$h'_V=\int_{z_{mE}}^{z_{F1}}\mu'(f,f_N)dz=\mu'_V(f,\bar{f}_{NV})(z_{F1}-z_{mE}). \tag{3}$$

由(3)式可以看出，$\bar{f}_{NV}$ 与 h'_V、z_{mE}、z_{F1} 及 f 有关．利用不同工作频率 $f_i(f_{0E}<f_i<f_{0F})$ 的电波所对应的 F 层反射高度 z_{Fi} 和 h'_{Fi} 求得的 $\bar{f}_{NVi}$ 值是不同的．仅在谷区剖面的真实分布是平板层时，$\bar{f}_{NV}$ 才与 f 无关，并且 $\bar{f}_{NV}$ 就是此平板层的等离子体频率．

假设电离层按等离子体频率等间隔地分为许多小层(设 $\Delta f_N=0.2$MHz)，并设每小层中的 $\frac{dz}{df_N}$ 为常数，当 $f=f_N$ 时，则电波在 $n=\frac{f_N}{\Delta f_N}$ 层反射，($n=1,2,\cdots E,F_1,F_2,\cdots L,\cdots K$)．其中 E 为 E 层的最后一个间隔点，F_1 为 F 层的第一个间隔点，L 为 F 层 h' 采样点中最低虚高对应的点，$K=f_{0F}/\Delta f_N$ 取整数．(2)式变成

$$h'(f_n)=z_0+\sum_{m=1}^{E\text{层}}M_{nm}\Delta z_m+\bar{M}_{n,F_1}\Delta z_{F_1}+\sum_{m=F_2}^{n-1}M_{nm}\Delta z_m+M_{nm}\Delta z_n. \tag{4}$$

其中 $\Delta z_m=z_m-z_{m-1}$，

$$M_{nm}=\frac{1}{\Delta f_N}\int_{f_{m-1}}^{f_m}\mu'(f_n,f_N)\Delta z,\ m=1,2,\cdots n$$

$$\bar{M}_{n,F_1}=\mu'_V(f_n,\bar{f}_{NV}),$$

$$\Delta z_{F_1}=z_{F_1}-z_E.$$

于是

$$\Delta z_n=\frac{1}{M_{nn}}\left\{h'_n-z_0-\left(\sum_{m=1}^{E}M_{nm}\Delta z_m+\bar{M}_{n,F_1}\Delta z_{F_1}+\sum_{m=F_2}^{n-1}M_{nm}\Delta z_m\right)\right\}, \tag{5}$$

$$z_n=z_0+\sum_{m=1}^{n}\Delta z_n. \tag{6}$$

(5)式即为频高换算的递推公式．当 $\bar{f}_{NV}$ 求出后，计算出台站系数 M_{nm}，由 $h'(f_N)$ 曲线即可计算出 $z(f_N)$ 剖面．

二、台站系数

设在 $(m-1)\Delta f_N \leqslant f_N \leqslant m\Delta f_N$ 内，$f_N(z)$ 是单调上升的，则在给定磁旋频率 f_H 和地磁倾角 I 后，由下式用数值积分即可计算台站系数 M_{nm} 的值。

$$M_{nm}=\frac{1}{\Delta f_N}\int_{(m-1)\Delta f_N}^{m\Delta f_N}\mu'(n\Delta f_N,\ m\Delta f_N)df_N.\quad m\leqslant n \tag{7}$$

$M_{i,i}$ 为工作频率 $f=i\Delta f_N$ 的电波通过等离子体频率 $f_N=j\Delta f_N$ 这一层时的 μ' 的平均值。因此，M_{nm} 为三角矩阵 M 的元。M_{i,F_1} 为 $f_i(i=F_1, F_2,\cdots L,\cdots K)$ 的电波通过谷区时的 μ' 的平均值。μ' 由 Appleton-Hatree 公式求得。

$$M=\begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0\cdots & 0 & \cdots & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0\cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_{F1,1} & M_{F1,2} & & M_{F1,F_1} & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2}\cdots & \cdots & M_{n,F_1} & \cdots & M_{nn} \end{pmatrix}.$$

如果 M_{i,F_1} 按(7)式计算，则对应的 μ' 沿图 1 中的剖面 B 计算。如果 M_{i,F_1} 按 μ'_V 计算，即按(3)式计算，则对应于剖面 C。而(3)式表示了真实的谷时延。C 与 A 在一定程度上是等效的。所以，除谷区以外的 M_{nm} 用(7)式计算外，谷区的 M_{i,F_1} 用(3)式计算：

$$M_{i,F_1}=\mu'_V(f_i,\bar{f}_{NV})=\bar{M}_{i,F_1}.$$

将 M 矩阵的 M_{i,F_1} 用 $\bar{M}_{i,F_1}$ 去置换，其他元素不变。置换后的矩阵称为 W 矩阵。则(5)式在考虑谷的效应时，将变为

$$\Delta z_n=\frac{1}{W_{nn}}\left(\hbar'_n-z_0-\sum_{m=1}^{n-1}W_{nm}\Delta z_m\right). \tag{8}$$

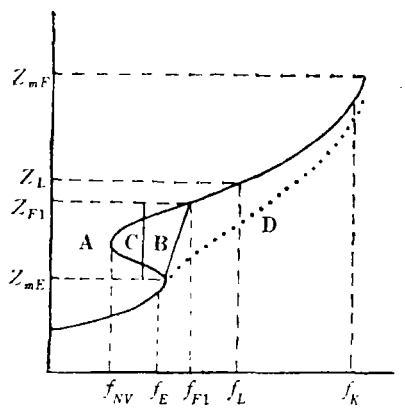


图 1 剖面图

Fig. 1 Profile graph

三、计算谷区等效 $\bar{M}_{i,F_1}$

要求出谷区台站系数 $\bar{M}_{i,F_1}$ 的值，必须先求出谷区的电子浓度分布。对于假设谷区为平板层时，则要求出 $\bar{f}_{NV}$。取步骤如下：

1. 引用 Gulyaeva 公式[2]

$$z_G=\hbar'_{\min,F}-(0.172+0.11f_{0E})(\hbar'_{\min,F}-z_{mE}).$$

其中 $\hbar'_{\min,F}$ 为 F 层最低虚高，z_G 为它对应的真高。此公式适用于 O 波描迹。设 $\hbar'_L$ 为 F 层 h' 的等间隔采样点中的最低值，对应的真高为 z_L。它不一定正好与 $h'_{\min,F}$ 重合，但由于 $h'_{\min,F}$ 附近描迹变化平缓，在采样较密的情况下，设 z_L 与 z_G 有类似的关系(误差一般小于 1km)

$$z_L = h'_L - (0.172 + 0.11f_{0E})(h'_L - z_{mE}), \tag{9}$$

由(4)式推得

$$\bar{M}_{L,F} = \frac{h'_L - z_0 - \sum_{m=1}^{E} M_{Lm}\Delta z_m - \sum_{m=F_2}^{L} M_{Lm}\Delta z_m}{z_{F_1} - z_E}. \tag{10}$$

要求出 $\bar{M}_{L,F_1}$，则须知比 z_L 低的F层起始段高度.

2. F层起始段高度的确定

由于无实测剖面资料，无法对 z_{F_1} 与 z_L 的关系进行统计，故暂且利用 Herbert 的四条参考剖面[3]，对 $\alpha=\frac{z_L - z_i}{f_L - f_i}$ $(i = F_1, F_2, \cdots, (L-1))$ 进行统计处理，得出 α 的经验值:

$$\alpha = \frac{1.5(L - i + 1)}{\Delta f_N} \text{ (km/MHz)}.$$

于是

$$z_i = z_L - 1.5(L - i + 1)(L - i). \tag{11}$$

这种处理是比较粗略的，但由于 z_{F_1} 一般离 z_L 不太远，所以 z_{F_1} 确定得是否准确对 z_L 以后的换算影响不大.

3. 谷区等效等离子体频率 $\bar{f}_{NV}$ 的确定

用(3)式求 $\bar{f}_{NV}$，则与 f 有关. 由于谷区剖面主要影响F层起始段高度，而某些火箭测量结果表明"凹谷"一般不深，而且上升很陡(接近于平板层)，所以利用F层低端某点 (f_i, z_{Fi}, h'_{Fi}) 信息求出 $\bar{f}_{NVi}$，以代替整个F层的谷区 $\bar{f}_{NV}$ 来进行F层换算. 求出 z_i 后，由(10)式可得 $\bar{M}_{L,F_1}$，由(3)式得

$$\mu'_V(f_L, \bar{f}_{NV}) = \bar{M}_{L,F_1}.$$

如果忽略地磁场的影响，则有

$$\mu'_V = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\bar{f}_{NV}}{f_L}\right)^2}}, \qquad \bar{f}_{NV} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{\bar{M}_{L,F_1}}\right)^2} \cdot f_L. \tag{12}$$

如果考虑地磁场的影响，即使忽略碰撞，μ' 与 f_N 的关系也甚为复杂. 从试算结果表明，在此忽略地磁场，影响不是很大.

在(10)式中含有 $M_{L,L}\Delta z_L$ 的项. 由于 $M_{L,L}$ 为对角元，是反射区的值，其值较大，而且，随 L 的增大而增大. 因此，L 离 F_1 愈远，Δz_L 的误差对 $\bar{M}_{L,F_1}$ 的影响愈大. z_{F_1} 最靠近谷区. 如果用 z_{F_1} 求 $\bar{M}_{L,F_1}$，即求 $\bar{M}_{F_1,F_1}$，对应的反射频率为 $f_n = f_{N,F_1}$，反射点在 z_{F1}，给结果也带来较大的误差. 所以选用 $f_n = f_{N,F_2}$，反射点在 z_{F_2} 比较合适. 于是(10)式改写成

$$\begin{cases} \bar{M}_{F_2,F_1} = \dfrac{h'_{F_2} - z_0 - \sum_{m=1}^{E} M_{F_2,m}\Delta z_m - M_{F_2,F_1}\Delta z_{F_2}}{z_{F_1} - z_E}, \\ \bar{f}_{NV} = \sqrt{1 - \left(\dfrac{1}{\bar{M}_{F_2,F_1}}\right)^2} \cdot f_{F_2}. \end{cases} \tag{13}$$

如果 L 点落在 F_1 点，也只好用 $f_n = f_{N,F_1}$ 来求，将(13)式中的 $\bar{M}_{F_2,F_1}$ 换成 $\bar{M}_{F_1,F_1}$ 即可：

$$\bar{M}_{F_1,F_1} = \frac{h'_{F_1} - z_0 - \sum_{m=1}^{E} M_{F_1,m}\Delta z_m}{z_{F_1} - z_E}. \tag{14}$$

4. 求 $\bar{M}_{i,F_1}$

已知 $\bar{f}_{NV}$ 后，对于 $f_i = i\Delta f (f_{0E} < f_i \leqslant f_{0F})$ 的 $\bar{M}_{i,F_1}$ 可以用考虑磁场或忽略磁场的方法来求.

$$\begin{cases} \bar{M}_{i,F_1} = \mu'_{iV} = \mu'(f_i, \bar{f}_{NV}); \text{（考虑磁场）} \\ \bar{M}_{i,F_1} = \mu'_{i,V} = \dfrac{1}{\sqrt{1-(\bar{f}_{NV}/f_i)^2}}. \text{（忽略磁场）} \end{cases} \tag{15}$$

(12)式计算的 $\bar{f}_{NV}$ 比考虑磁场时计算的 $\bar{f}_{NVH}$ 要小. 当 $\bar{f}_{NV}$ 确定后，忽略地磁影响计算的 μ'_{iV} 比考虑磁场计算的 μ'_{iVH} 要大. 为了减少误差，这两种参数在相同的条件下计算较为合适.

四、频 高 换 算

综上所述，频高换算的方法分为如下步骤：

1. 从频高图上，以 $\Delta f_N = 0.2$MHz 的频率间隔取样读取 o 波虚高 h'_i，$f_{\min}$ 以下未测到的虚高用文献[4]所述方法求得的补上，得到一条 $f_N = 0.0, 0.2, \cdots, f_{0F}/0.2$ (取整)的 h' 取样值.

2. 计算群折射指数的台站系数 M_{nm}.

3. E 层的换算方法用一般的分片解法，E 层的最大电子浓度所在的高度 z_{mE} 用抛物外推.

4. 确定 F 层起始段高度 $z_{F_1}, z_{F_2}, \cdots z_{L-1}$.

5. 确定 $\bar{f}_{NV}$，并计算 $\bar{M}_{i,F_1}$.

如果 $i = F_3, F_4, \cdots L, \cdots K$($K$ 为 F 层最后一点，但不包含 f_{0F} 点)，则从 z_{F_3} 开始换算. 如果取 $i = L+1, L+2, \cdots K$，则从 z_{L+1} 开始换算.

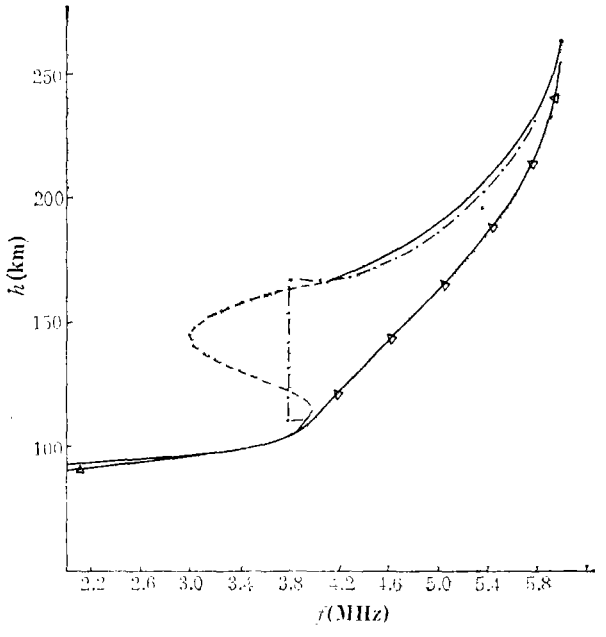
6. 用 $\bar{M}_{i,F_1}$ 置换 M 矩阵中的第 F_1 列的 M_{i,F_1} 元素值，得到 W 矩阵. 由(8)式即可进行 F 层的换算. 由于各条频高曲线的 f_{0E} 不同，所以 f_{F_1} 点不同. 在采用计算机计算时，M_{nm} 是存放在内存里，因此换算完某条曲线后，还需将 M_{i,F_1} 换回原 M 矩阵中，待下一条换算备用.

7. E 层及 F 层的最大高度均采用抛物外推公式得到.

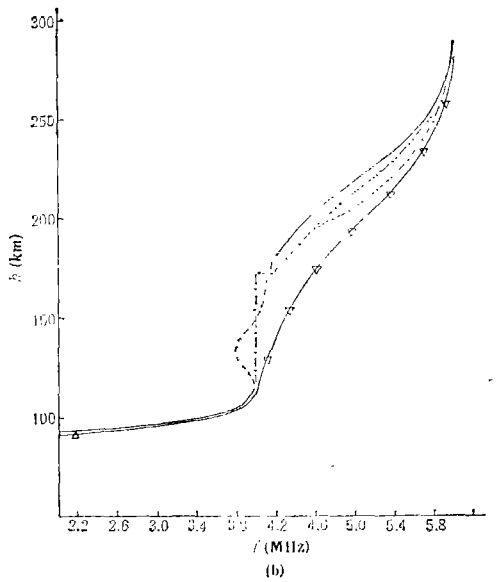
以上 1，2，3，7 均可参考[4]进行计算.

五、试 算 及 误 差

为了对方法进行检验，用 Herbert 四条参考剖面[3]的虚高及 f_H，I 值作已知数据进行了试算，并将结果进行了比较. 试算时分别用了考虑地磁场和不考虑磁场的方法(参看



(a) Herbert的第 4 剖面 (Herbert's fourth profile)



(b) Herbert 的第 7 剖面 (Herbert's seventh profile)

——参考剖面 (Reference Profile)　—•—•—剖面 4 (Profile 4)

△—△剖面 5 (Profile 5)　—••—••—剖面 6 (Profile 6)

图 2　电离层真高换算剖面的比较

Fig. 2 Comparison of the Profile of the true-height reduction for the ionosphere

表 1—4 及图 2)。通过对结果的分析，得到如下结论：

1。$\bar{f}_{NV}$ 的误差随 $\overline{M}_{n,F_1}$ 的误差增大而增大，$\overline{M}_{n,F_1'}$ 的误差随 Δz_n 的误差增大而减

表 1 F 层换算条件

剖面序号	条件		
	F层起始段高度的确定	$\bar{M}_{n,F_1}$ 是否考虑磁场	$\bar{f}_{NV}$ 是否考虑磁场
1	z_{F_1}, z_{F_2} 用参考剖面的起始高度	$H\neq 0$	$H\neq 0$
2		$H\neq 0$	$H=0$
3		$H=0$	$H=0$
4	用 z_L 确定	$H=0$	$H=0$
5	Budden 分片解法(单调剖面)	$H\neq 0$	
6	同 4; 从 z_{F_3} 开始换算	$H=0$	$H=0$

表 4 电离层 F 层的频高换算的比较

(Herbert 第七条剖面)

f_N / h' / z	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	$\bar{f}_{NV}$
	500.9	382.9	358.7	351.1	347.9	358.3	380.6	416.2	481.7		
参考剖面	180.8	194.4	203.7	211.5	218.3	225.0	232.8	242.3	255.0		
剖面 1	180.8	194.4	203.6	211.5	218.3	225.5	233.9	244.2	258.5	293.9	
误 差	0.0	0.0	−0.1	0.0	0.0	0.5	1.1	1.9	3.5		4.0
剖面 2	180.8	194.4	205.2	213.8	221.0	228.5	236.9	247.3	261.6	297.1	
误 差	0.0	0.0	1.5	2.3	2.7	3.5	4.1	5.0	6.6		3.61
剖面 3	180.8	194.4	203.6	211.3	218.0	225.1	233.4	243.6	257.8	293.2	
误 差	0.0	0.0	−0.1	−0.2	−0.3	0.1	0.6	1.3	2.8	6	3.61
剖面 4	172.9	184.9	193.9	199.9	202.9*	211.4	220.7	231.9	246.8	284.1	
误 差	−7.9	−9.5	−9.8	−11.6	−15.4	−13.6	−12.1	−10.4	−8.2		3.94
剖面 5	141.3	160.3	174.1	185.3	194.9	204.2	214.4	226.2	241.8	280.4	
误 差	−39.5	−34.1	−29.6	−26.2	−23.4	−20.8	−18.4	−16.1	−13.2		
剖面 6	172.9	184.9	195.9	204.9	212.6	220.5	229.4	240.1	254.7	291.0	
误 差	−7.9	−9.5	−7.8	−6.6	−5.7	−4.7	−3.4	−2.2	−0.3		3.94

* 表示 z_L 值

小. 由于 Δz_n 的计算公式为递推公式, 且(5)式中的求和项含 M_{nm} 和 Δz_m 的乘积及 $\bar{M}_{n,F_1}$ 和 Δz_{F_1} 的积,所以使误差减小. 当F层起始段真高有一定误差时,随 f 的增大误差将减小.

2. 忽略地磁影响求出 $\bar{f}_{NV}$ 和 $\bar{M}_{n,F_1}$, 对F层换算精度损失很小(参看表中的剖面 1,3 比较),为简便起见,计算时可以忽略地磁场.

3. 由于递推公式使换算误差减小,所以谷效应 $\bar{M}_{i,F_1}$ 的误差淹没在 z_L 的误差之中; z_G 的误差的最小方差不大于 10km[2]. 本方法的误差主要是 z_G 的误差. 剖面的积分电子含量误差在 2% 以下.

4. 当F层最低虚高 h'_L 离 f_{0E} 较远时, (11)式误差较大. 表中剖面 4 的F层换算是从 $L+1$ 点开始, F_1 到 L 点的真高用(11)式的值,因此导致在 z_L 处剖面不光滑. 如改用从 z_{F_3} 开始换算,则可避免不光滑点(结果见表中剖面 6).

表 2　电离层 E 层换算的比较

f_N / h' / z	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
z	65.0	80.0	85.0	92.4	92.4	92.4	92.4	93.01	93.97	95.08	96.36	97.85	99.59	101.59	103.97	106.82	110.36	114.91	121.41	132.79	
参考剖面							91.0	91.3	91.7	92.1	92.7	93.3	94.0	94.8	95.7	96.8	98.0	99.5	101.3	103.8	115.0
换算剖面	65.0	73.7	78.3	82.8	85.2	86.7	87.8	88.6	89.4	90.2	91.0	91.8	92.7	93.6	94.7	95.9	97.3	98.9	100.9	103.7	110.9
剖面误差							−3.2	−2.7	−2.3	−1.9	−1.7	−1.5	−1.3	−1.2	−1.0	−0.9	−0.7	−0.6	−0.4	−0.1	−4.1

表 3　电离层 F 层的频高换算的比较（Herbert 第四条剖面）

f_N / h' / z	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	$\bar{f}_{NV}$
z	254.8	257.8	268.7	283.7	302.6	326.6	358.3	404.3	485.5		
参考剖面	165.9	170.9	176.6	182.8	189.8	197.8	207.1	218.5	233.7		
剖面 2	165.9	170.7	176.2	182.5	189.7	198.0	207.9	220.1	237.1	279.5	3.8
误　差	0.0	−0.2	−0.4	−0.3	−0.1	0.2	0.8	1.6	3.4		
剖面 4	166.7*	169.3	173.7	179.2	186.0	194.1	203.9	216.1	233.1	275.6	3.8
误　差	0.8	−1.6	−2.9	−3.6	−3.8	−3.7	−3.2	−2.4	−0.6		
剖面 5	123.9	134.5	144.4	154.1	164.0	174.5	186.2	210.0	218.5	263.4	
误　差	−42.0	−36.5	−32.2	−28.7	−25.8	−23.2	- 20.9	−18.4	−15.3		

六、结 束 语

双层的频高换算主要是解决谷的问题，谷宽对F层换算起关键作用．引用[2]的经验公式基本上解决了谷宽的问题． 如果谷深不考虑，以无谷处理，用M矩阵进行换算，则会带来换算出的F层真高出现非单调现象． 这是因为 z_G 是考虑谷而统计确定的，因此引用 z_G 须考虑谷深．

对于某条频高曲线，当谷宽确定后，谷区剖面分布仍不是唯一的． 为了方便，本方法假定了最简单的分布——平板层．谷区等效平板层的 $\bar{f}_{NV}$ 给出了谷深的定性概念，也给出了谷区电子含量的定量值．如果谷区采用抛物分布，也可以根据 z_G 点求出谷区的抛物参数，但要求解超越方程，计算比较复杂．

在进行此工作时，黄雪钦、刘瑞源同志对本文提出了宝贵意见，在此表示衷心地感谢．

参 考 文 献

[1] Budden, K. G., Radio Waves in the Ionosphere, Cambridge University Press, p. 215, 1961.
[2] Gulyaeva, T. L., *Radio Science*, Vol. **16**, p. 135, 1981.
[3] Herbert, Th., *Radio Science*, Vol. **2**, p. 1269, 1967.
[4] 吴钧英，空间物理论文集，科学出版社，第201页，1980.

Treatment of Ionospheric Valley for the Laminar Reduction Method of Ionogram

Zhang Ren-fang
(*China Research Institute of Radiowave Propagation*)

Abstract

This paper presents a method for the reduction of the ionospheric profile by using ordinary traces. The height of the F layer bottom is determined by Gulyaeva's empirical equation. The ionospheric valley between E and F layers is an equivalent slab layer. The true-height reduction of the F layer is based on Budden's method. The results of the reduction are compared with the profiles provided by Herbert. The error of true height is generally less than ±10 km for the middle latitudes.