第7卷 第4期 空间科学学报 Vol. 7, No. 4
1987 年 10 月 GHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1987

高频雷达照射区的研究

黄 德 耀
（中国电波传播研究所）

摘 要

该文讨论了估算高频雷达照射区的方法及其影响高频雷达照射区分布的各种因素. 最后，给出了能形成最佳照射区的工作频率的选择方法.

一、引 言

高频雷达是利用返回散射技术来探测视距外目标的一种探测系统. 在实际探测中，由于多模式传播的存在将在确定目标距离和目标数目两个方面带来有害的影响. 为了减少这种有害影响，就必须使雷达波束能照射到我们感兴趣的区域并分辨出各种传播模式的照射区域，从而争取做到感兴趣的区域由单一传播模式照亮. 这就要对影响高频雷达照射区的因素进行研究，并且根据这些因素提出获得最佳照射区的方法. 这些研究对于高频雷达系统的管理及探测目标时传播模式的识别都是有帮助的.

二、高频雷达照射区的估算

1. 照射区的获得

高频雷达波束经电离层反射形成的照射区的能量是逐渐变化的，一般不存在明显的边界. 但是，为了估算照射区的范围，我们假设照射区由四条边界构成. 选择由发射天线垂直方向图上的上、下半功率仰角（$\Delta_{\text{上}}$, $\Delta_{\text{下}}$）射线来确定照射区的径向近，远边界，选择水平方向图上的左、右半功率方位角射线来确定照射区的横向边界.

对于水平方向图上半功率宽度为 15°～30° 的天线来说，在 1000km 距离上，照射区的宽度约为 260～530km. 照射区的横向边界一般受电离层变化的影响较小. 所以，它不是人们特别关心的问题.

照射区径向远边界由发射天线垂直方向图的下半功率射线确定，但在比下半功率仰角小的仰角上仍会有能量辐射，只是在此仰角下（一般小于 8°），天线增益较低，辐射的能量较小，而且地面返回散射系数在仰角小于 10° 以后迅速下降，返回的能量将更小. 高频雷达接收机能否接收到这部分仰角来的能量还和当时的电离层状况及接收机的灵敏度有

本文于 1987 年 2 月 20 日收到.

关,所以,在径向远边界附近能量不会有突变,是所谓的"软边界".

对于返回散射传播来说,严格地应该是跳距决定径向的近边界. 作为近似,取最小时延线来代替跳距射线,它所对应的仰角对于平面地球,平面抛物型电离层有

$$\sin\alpha_{p\min}=\frac{f_0}{f}\sqrt{\frac{h_0}{h_0+y_m}}. \tag{1}$$

其中,f 为工作频率; f_0 为层的临界频率; h_0 为层的底高; y_m 为层的半厚. 如果 $\alpha_{p\min}$ 小于天线的上半功率仰角,则以 $\alpha_{p\min}$ 射线来决定径向的近边界; 如果 $\alpha_{p\min}$ 大于天线的上半功率仰角,则以天线的上半功率仰角来决定径向的近边界.

2. 最大反射频率 MFR

用射线描迹技术,以一定仰角由有一定高度和一定临频的层反射的最大传输频率可以被确定. 如果把这种传输频率称为最大反射频率 MFR 的话,那么 MFR 和临频的比是斜入射因子的通常形式,并且和一定仰角和层高相对应.

我们发现在假设射线在最大电子浓度高度附近作几何反射的情况下,可以近似地得出如下关系:

$$\mathrm{MFR}=f_0\sin i, \tag{2}$$

$\sin i$ 的值可以用经验公式给出[1];对于 F 层模式

$$\sin i_F=1+\frac{0.73+480/(h-16)}{1+\Delta^2/(15+0.02h)^2}, \tag{3}$$

对于 $E(Es)$ 模式

$$\sin i_E=0.84+\frac{5.01}{1+(2.2+\Delta)^2/282}. \tag{4}$$

其中 h 为 F 层最大电子浓度高度, Δ 为射线仰角. 将一定仰角辐射的电波频率 f 和反射层的 MFR 进行比较,就能确定该射线在此反射层是反射还是穿透.

以一定仰角 Δ 和一定工作频率 f 辐射的射线经 F 模式传播的等效垂直频率应为

$$f_{F等}=\frac{f}{\sec i_F}. \tag{5}$$

对于 $E(Es)$ 传播模式应为

$$f_{E等}=\frac{f}{\sec i_E}. \tag{6}$$

3. E 层遮蔽角

经一跳 F 模式传播的射线可假设它的上行部分在 F 层一跳的 1/4 地面距离处穿过 E 层,它的下行部分在 F 层一跳的 3/4 地面处穿过 E 层. 对于一定仰角和一定频率的射线,将适于 E 层的等效垂直频率和穿过 E 层处的 E 层临频值进行比较,就可以确定是否会产生 E 层反射,从而截断 F 层模式的情况.

当 $f_{E等}=f/\sec i_E=f_0E$ 时,射线处于穿透 E 层或受 E 层反射的临界状态.这时射线的仰角记为 Δ_{0E}, 则有:

$$\sec i_{0E}=0.84+\frac{5.01}{1+(2.2+\Delta_{0E})^2/282}=\frac{f}{f_{0E}}.$$

从上式中解出 Δ_{0E}

$$\Delta_{0E} = \left\{282 \cdot \left[5.01 \Big/ \left(\frac{f}{f_0E} - 0.84\right) - 1\right]\right\}^{1/2} - 2.2, \tag{7}$$

Δ_{0E} 称为E层对F层的遮蔽角。仰角大于 Δ_{0E} 的射线将穿过E层，仰角小于 Δ_{0E} 的射线将被E层反射形成E层传播模式，从而截断F层传播模式。

4. 考虑Es层

Es层的高度和E层差不多，可以沿用E层模式的经验公式。Es层在夏季白天出现率较高，射线经它反射可产生新的传播模式，它对F层也有遮蔽作用，特别是在太阳黑子低年更为明显。

在垂测资料中，Es层有时有两个频率：顶频 f_0Es 和遮蔽频率 f_bEs。当垂直探测频率处于这两个频率之间时，Es层处于部分透明状态。对于斜传播来说，应该用 f_bEs 来确定Es层对F层的遮蔽角 Δ_{0Es}，用 f_0Es 来确定Es层传播模式的最大仰角 Δ_{0Esmax}。

5. F层的穿透角

当 $f_{F\text{斜}} = \dfrac{f}{\sec i_F} = f_0F$ 时，射线处于穿透F层或被F层反射的临界状态。记此时的射线仰角为 Δ_{0F}，则有：

$$\sec i_F = 1 + \frac{0.73 + 480/(h - 16)}{1 + \Delta_{0F}^2/(15 + 0.02h)^2} = \frac{f}{f_0F}.$$

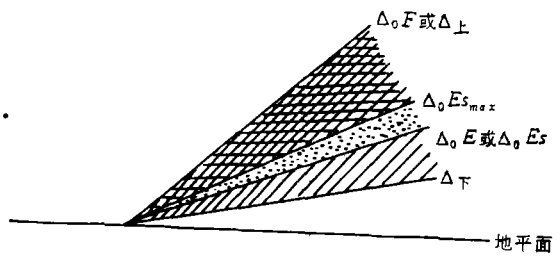
从上式解出 Δ_{0F}，

$$\Delta_{0F} = \left[\frac{0.73 + 480/(h - 16)}{f/f_0F - 1} - 1\right]^{1/2} \cdot (15 + 0.02h). \tag{8}$$

Δ_{0F} 称为F层的穿透角。

6. 发射波束的划分

在高频雷达发射天线垂直方向图上，从下半功率仰角到 E(Es) 层遮蔽仰角为 E(Es) 层传播模式的波束区；从Es层遮蔽角到Es模式的最大仰角为Es层部分透明波束区。在这部分波束内，能量分散了，一部分能量经Es层反射形成Es层传播模式，一部分能量穿透Es层到达F层，经F层反射形成F层传播模式。这种由部分能量形成的传播模式对于



E(Es) 模式波束区 (The E(Es) mode's beam region)
Es, F 模式波束区 (The Es,F mode's beam region)
F 模式波束区 (The F mode's beam region)

图 1　　Fig. 1

高频雷达探测目标是不利的. 从E层遮蔽角或Es层最大仰角到F层穿透角(或上半功率仰角)为F层传播模式的波束区.

对于一定的电离层状态和工作频率，可以利用(7)式和(8)式计算出 Δ_{0E}，Δ_{0Es}，Δ_{0Emax}和 Δ_{0F}；将反射波束划分成几个波束区，如图1所示.

7. 地面距离的确定

对于通常出现的厚电离层，以一定仰角和一定层高传输的射线到达的地面距离和 $r=\frac{f}{f_0 \sec i}$ 的值有关. 其中 f 是传输频率，f_0 是层的临频，i 是射线在层处的入射角. 当 $r>1$ 时，射线将穿透该层. 当 $r=1$ 时，射线将在层内走一个很长的距离. 当 $r<1$ 时，射线将返回地面. 随着 r 的值从1降到0.95，地面距离将会迅速减小. 当 $r=0.8$ 时，得到的地面距离和射线在层的最大电子浓度高度附近作几何反射时得到的地面距离接近. 如果选择这个距离来表示一定仰角和一定层高下得到的地面距离的话，那么当 r 从0.95向下变时，实际地面距离将在这个选择值附近变化，其变化范围小于±15%. 在大多数情况下，这将带来小于250km的误差. 对于估算照射区来说，这样的误差是可以接受的. 所以，在估算各厚层模式的地面距离时，认为电波在该层的最大电子浓度高度附近作几何反射. 这样，就可以用一些经验公式来估算地面距离.

对于F层传播模式

$$D=\frac{285(h-114)}{\Delta+0.042(h-16.7)}-2.41(h-151). \tag{9}$$

其中，h 为F层最大电子浓度高度(km)；Δ 为发射仰角(度)，D 为地面距离(km). 对于 E(Es)层传播模式

$$D=\frac{19750}{7.2+\Delta}-180. \tag{10}$$

在一定的电离层状态和工作频率下，可以按上面的分析将已知的发射天线波束划分成各种传播模式的波束区，从而获得各种传播模式照射区的范围，这样，高频雷达照射区的分布就可以知道了.

三、影响高频雷达照射区的因素

高频雷达照射区是无线电波束经电离层反射而形成的，所以影响高频雷达照射区的因素除了天线的方向性和工作频率以外，主要来自于电离层的变化. 电离层的变化包括日变化，季节变化和11年太阳黑子周期变化. 为了研究这些因素对高频雷达照射区的影响，应用上节讨论的方法估算了以新乡为发射点向北发射时，各种条件下雷达照射区的分布，见图2—6.

由于照射区的横向边界主要决定于天线的水平束宽，其它因素对它影响不大. 所以，只给出了照射区径向边界的变化.

由于高频雷达是从返回散射信号中提取目标信息，要获得F层一跳以外的目标信息比较困难，所以考虑的照射区仅限于一跳以内. Es层两跳也可以形成照射区，但需要在

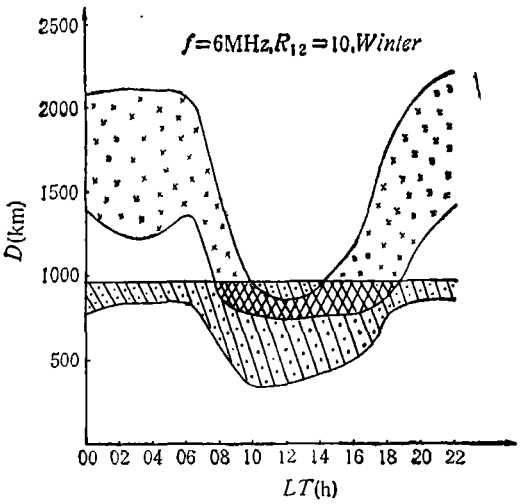


图 2

Fig. 2

1Es, 1Es, 1F₂ 重迭 1F₂, (The 1Es, 1F₂ overlapping)

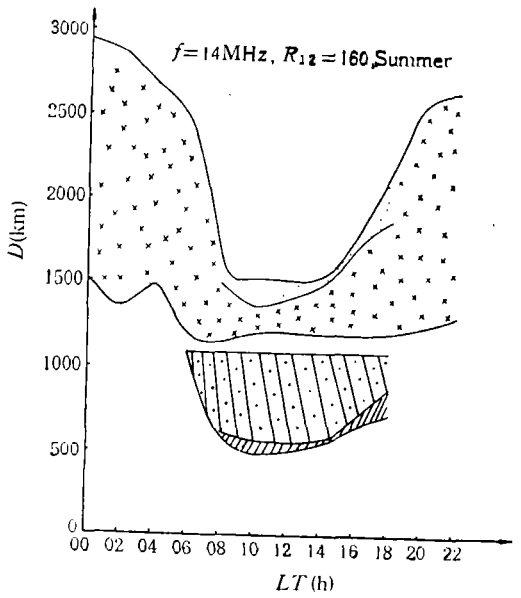


图 3

Fig. 3

1Es 部分能量 (The 1Es partial energy), 1Es, 1F₂, 1F₂ 部分能量 (The 1F₂ partial energy)

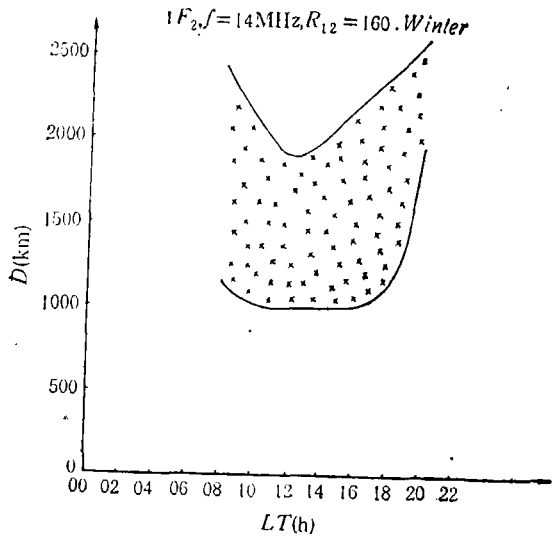


图 4

Fig. 4

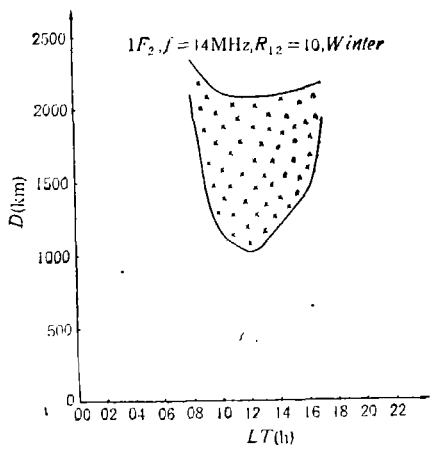


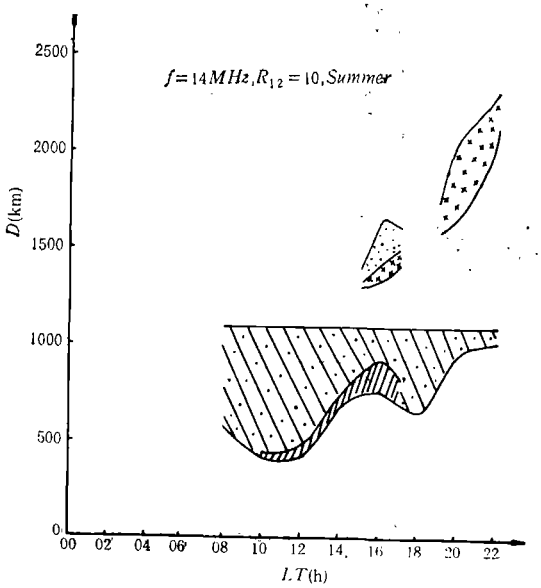
图 5

Fig. 5

两个独立的地区同时存在能传输能量的 Es 层，这种概率一般较小。为了照射区示意图清楚明了，没有画出 Es 两跳的情况。

在计算中,采用的发射天线的电气参数如下：垂直面上，3dB 辐射角范围

f(MHz)	下	中	上
26	5.7°	11°	16.2°
6	10°	22°	32°



1Es 部分能量 (The 1Es partial energy) 1Es, 1F₂ 1F₂ 部分能量 (The 1F₂ partial energy)

图 6

Fig. 6

水平面上，3dB 辐射角宽度

f(MHz)	26	6
3dB 宽度	15°	30°

1. 照射区的日变化

北京地区上空 f_0F_2 和 f_0Es 的日变化规律示于图 7、8 中. 从图中可以看出: f_0F_2 和 f_0Es 都是白天比夜晚高,日出前后开始上升,日落前后开始下降,中午前后达到最大值.

由于受 f_0F_2 和 f_0Es 日变化的影响,夜晚，1Es 照射区较小，$1F_2$ 照射区较远，$1F_2$ 照射区和 1Es 照射区(如果能形成的话)之间有一个空白.

日出后，1Es 照射区的近边界迅速前移,且照射区的范围迅速增大，$1F_2$ 照射区也迅速前移. 所以，白天一般来说，1Es 照射区和 1Es 照射区之间不存在空白,有时还形成两种照射区重叠的情况. 日落前后，1Es 照射区迅速缩小,甚至消失. $1F_2$ 照射区向远处移动.

2. 季节对照射区的影响

从图7、8中可看到: 冬季 f_0F_2 日变化大,夏季 f_0F_2 日变化小; 冬季白天 f_0F_2 值高于夏

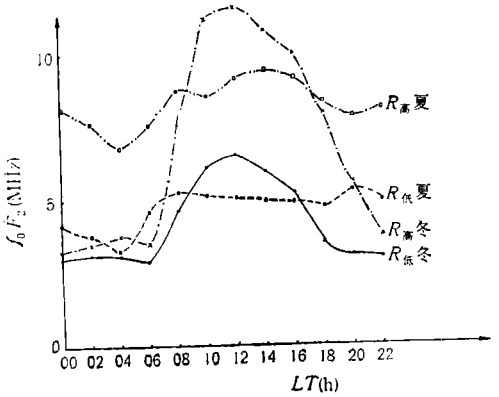


图 7

Fig. 7

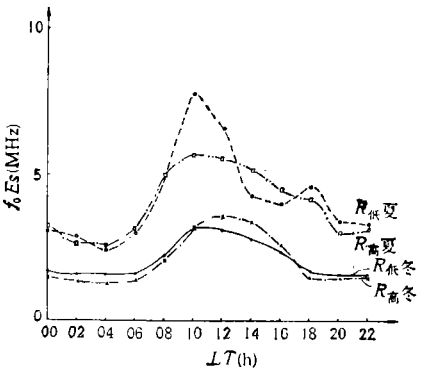


图 8

Fig. 8

季白天 f_0F_2 的值；冬季晚上 f_0F_2 值低于夏季晚上 f_0F_2 的值．另外，夏季的 f_0Es 普遍高于冬季的 f_0Es，一般相差 2MHz 左右．所以，冬季的 $1F_2$ 照射区日变化大，1Es 照射区不易形成，易形成单一的 $1F_2$ 照射区．冬季晚上，f_0F_2 很低，只有在较低的频率下才能形成 $1F_2$ 照射区，1Es 照射区更难以形成．

夏季的 $1F_2$ 照射区日变化较小．夏季白天，经常形成只有 1Es 照射区而无 $1F_2$ 照射区的情况，使得高频雷达照射区被限制在 500—1200km 的范围内．

3. 太阳活动性对照射区的影响

从图 7、8 可见，太阳黑子高年的 f_0F_2 普遍比太阳黑子低年的 f_0F_2 要高；夏季普遍高出 3—4MHz 左右，冬季白天高出 4—5MHz，冬季晚上高出 1—2MHz．太阳活动性对 f_0Es 的影响较小．

在冬季，太阳黑子高年易形成 $1F_2$ 照射区且 $1F_2$ 照射区的面积大，持续时间长．太阳黑子低年形成的 $1F_2$ 照射区的面积较小，持续的时间也较短．

在夏季，太阳黑子低年的 f_0F_2 较低，而 f_0Es 较高，两者相差不大，有时甚至出现 $f_0Es > f_0F_2$ 的情况．在这种情况下，Es 层的作用显得特别突出，在相当长的时间内都不能形成 $1F_2$ 照射区，只能形成 1Es 照射区．即使在晚上能形成 $1F_2$ 照射区，那也只是很小的区域．所以，在太阳黑子低年的夏季，要想使雷达的波束达到较远的区域是比较困难的．相对来说，太阳黑子高年 Es 层的遮蔽作用小一些．

4. 工作频率对照射区的影响

从 (7) 式中可以看到，$E(Es)$ 层对上层的遮蔽角 Δ_{0E} 与 $f/f_0E(\mathrm{Es})$ 有关，它们的关系示于图 9 中．很明显，$f/f_0\mathrm{Es}$ 小易形成 1Es 照射区；随 $f/f_0\mathrm{Es}$ 增大易形成 $1F_2$ 照射区，1Es 照射区缩小甚至消失．

根据 (8) 式，F_2 层的穿透角在 F_2 层最大电子浓度高度一定的情况下与 f/f_0F_2 有关，它们的关系示于图 10 中．

为了使电波穿透 Es 层，形成 $1F_2$ 照射区，希望 f 大一些，而 f 大了，F_2 层的穿透角变小，使 $1F_2$ 照射区的范围受到一定限制．在多数情况下，可以选择出合适的 f，使得能得到合适的照射区．但是，在太阳黑子低年的夏季，由于 f_0Es 很高，f_0F_2 较低，为了使波束

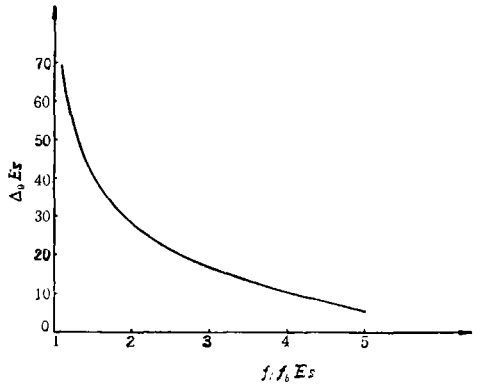


图 9

Fig. 9

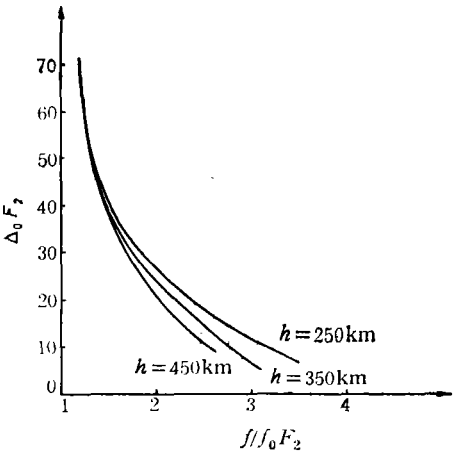


图 10

Fig. 10

穿透Es层形成$1F_2$照射区，需要选较高的频率，而这时 f/f_0F_2 较大，F_2 层的穿透角迅速下降，造成 $\Delta_{0Es} > \Delta_{0F}$ 的情况，形成不了 $1F_2$ 照射区．这时，只有靠 Es 层来形成雷达的照射区了．

四、高频雷达照射区的获得

我们把最佳照射区定义为波束能尽量多地覆盖我们感兴趣的区域，并且照射区比较连续(即没有空白区域)．

从上节的讨论可以看到，影响高频雷达照射区分布的因素很多．在这诸多因素中，只有工作频率是我们能控制的．根据这种情况我们来讨论获得最佳照射区的方法和步骤．

假设感兴趣的区域为 $D_{\min} - D_{\max}$；f_bEs，f_0F_2，h_{F_2} 已知．根据不同情况，我们设计了两种计算流程．

第一计算流程：

$$D \xrightarrow{(9)\text{式}} \Delta_{1F_2\min} = \Delta_{0Es} \xrightarrow{(7)\text{式}} f/f_b\text{Es} \xrightarrow{f_b\text{Es 已知}} f \xrightarrow{f_0F_2\text{ 已知}} f/f_0F_2 \xrightarrow{(8)\text{式}} \Delta_{0F}$$

第二计算流程：

$$D_{\min} \xrightarrow{(10)\text{式}} \Delta_{0Es} \xrightarrow{(7)\text{式}} f/f_b\text{Es} \xrightarrow{f_b\text{Es 已知}} f.$$

具体的计算方法如下：

首先取 $D = D_{\max}$ 输入第一计算流程．若得出 Δ_{0F} 大于 Δ_{0Es}，且 $\Delta_{0F} > 20°$，则所选频率合适．因为当 Δ_{0F} 大于 20° 时，$1F_2$ 照射区的近边界将小于 1300km，可以和 1Es 照射区的远边界连接上．若得出的 Δ_{0F} 大于 Δ_{0Es}，但小于 20° 时，则取 $D = D_{\max} - \Delta D$ (ΔD 取200,400,600…km)输入第一计算流程，直到 $\Delta_{0F} > 20°$ 为止．

若取 $D = D_{\max}$ 输入第一计算流程得出的 Δ_{0F} 小于 Δ_{0Es}，则取 $D = D_{\min}$ 输入第一计算流程，如果得到的 Δ_{0F} 仍小于 Δ_{0Es}，说明该时刻不可能形成 $1F_2$ 照射区，只能依靠 Es

层来形成照射区了．在这种情况下，我们就按第二流程来选择工作频率．

如果取 $D = D_{min}$ 输入第一流程得出的 Δ_{0F} 大于 Δ_{0Es}，那么我们就取 $D = D_{max} - \Delta D$ 输入第一计算流程，直到同时满足 Δ_{0F} 大于 Δ_{0Es}；Δ_{0F} 大于 20° 为止．

参　考　文　献

[1] Fricker, R. and I. E. Davey, IEE International Conference on Antennas and Propagation, Conference Publication Number 169, p. 60, 1978.

A Study on the HF Radar Illumimated Area

Huang De-yao

(*China Research Institute of Radio-Wave Propagation*)

Abstract

In this paper, a method of estimating the HF radar illumimated area and the various factors affecting the area are discussed. An approach of selecting the operating frequency for the optimal illumimated area is also presented.