

短波无线电 频率预测的编制

苏联 T. C. 克尔勃拉伊 著

黎 荣 龙 译

人 民 邮 电 出 版 社

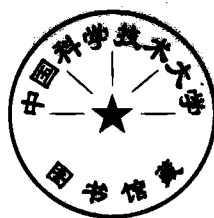
T39.1
464

短波无綫电頻率預測的編制

(邮电通信技术讲座)

(苏联)T. C. 克尔勃拉伊著

黎荣龙 譯



人民邮电出版社

序 言

頻率从 1.5 到 30 兆赫（或者，对应于波长 200—10 米）的短波段主要用于由几百到一、二万公里的远距离通信。

可是，为了建立可靠的短波通信，从这个波段内随意选取一个頻率是不行的。对于每一个具体无綫电路，可以应用的不是整个短波波段，而仅仅是它的一部分即所謂該电路的工作頻段。为了最有效地选择短波通信的工作頻段，就需要作无綫电預測——在某个時間間隔以前編制的工作頻段的預測。

預測編制的必要性是由于工作頻段随時間有很大的变化而产生的。在同一条电路上进行通信，白天就應該应用比夜晚更高一些的頻率。冬季的白天可用頻率将比夏季的白天高一些。此外，可用頻段逐年也有相当大的变化。大家知道，通常以太阳黑子相对数[吳尔夫(Вольф)数]表示的太阳的活动性，也是逐年变化并且有大約 11 年的变化周期。在地壳和地球大气中所发生的一系列地球物理現象都有同样的周期性，并且这些現象都与太阳的輻射能量有关。

在高空大气层、电离层中所发生的变化就是所有上面列举的这些工作頻段变化的原因。因此，为了預測某年、某月應該采用什么样的頻率，就自然必須很好地知道那时电离层的状况将会是怎样的以及它可能反射什么样的頻率。

长期无綫电預測的任务是：确定編制預測的那一月电离层的平均状况及計算給定电路的工作頻段。

因此，研究电离层的性质和它在短波传播中的作用是无綫电預測的基础。

工. 无綫电頻率預測的物理基础

1. 电离层及其变化

概述

从 60—80 公里到 400—500 公里及以上的地球大气上部叫电离层。整个这个区域包含有大量的带电粒子——电子和离子。在某些高度上，带电粒子的密度达到极大，就相应地命名为几个电离层。电离层有折射和反射短波的本領就是由于有带电粒子存在的緣故。对电波的吸收也与电离层中有带电粒子存在有关。

电离层的观测

現代最通用的研究电离层的方法就是用电离层探测仪进行脉冲垂直探测。用这种方法可以得到对于实际无綫电通信和科学研究所必需的一些有关电离层状况的情报（关于电离密度和这些层的高度的情报）。

垂直探测法如下。电离层探测仪的设备包括：天綫，它的最大輻射方向垂直向上（接收与发射信号可用一副天綫）；脉冲調制的、波段从 0.5—1.0 兆赫到 15—20 兆赫、連續可变的发射机；与发射机放在同一个架上或者放在发射机附近的接收机。在接收机的輸出端接上示波器，它可以确定发射脉冲和由电离层反射脉冲之間的时间間隔。根据此无綫电波从发射机到电离层再到接收机所用的时间即可以确定該頻率的脉冲的反射高度。若认为脉冲的传播速度等于光速，根据脉冲的地波和从电离层反射回来的天波的时差就可以計算出反射該頻率电波的

层高。用这种方法得到的高度叫做虚高，并以 h' 表示。

但是，由于无线电波的能量在电离层中的传播速度小于光速，而且不同频率的电波以不同的速度传播，因此，虚高与真高有些差别。电离层探测仪测量一次就是从最低的频率开始連續扫过全部波段一次。用以高度单位刻度的示波器，对于每个频率计算出反射点的虚高。在照片上（对用自动探测仪而言）或在特制纸上（对用人工探测仪而言）就得到频率和虚高之间的关系曲线，即所谓“频高特性曲线”。

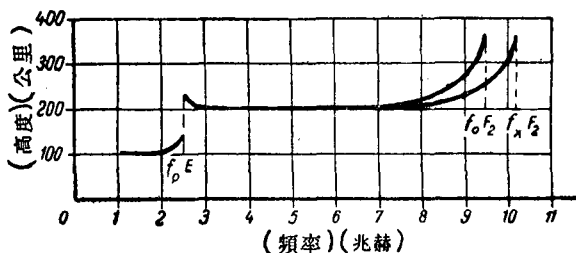


图 1 频高特性

图 1 是一个频高特性曲线的示例。在图中看到 E 层反射（频率 1—2.5 兆赫）和 F_2 层反射（频率 2.5—10.2 兆赫）。某层所反射的最高频率称为该层的临界频率。

超过临界频率的电波将穿透该层，并在具有较大电离密度的更高层反射。或者，如果该层是最上层，那么电波就跑到宇宙太空中去了。

为了使垂直入射到电离层的、频率为 f 的电波反射回来，那就必须使它在反射点的折射率^①等于零。用这个条件可以建立

注① 电离层的折射率(n)与电离密度(N)和电波的频率有关, $n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\pi m f^2}$,

式中 e 和 m 分别是电子的电荷和质量。

反射区的电离密度 N (电离密度以 1 立方厘米的电子数表示)

与电波频率之间的关系: $N = \frac{\pi m f^2}{e^2}$ 。临界频率是由该层电离

最大区域反射的, 因此, 可以确定它的最大电离值。

分析高频特性可以看出, 在 F_2 层的高频部分出现有两个反射信号。这个所谓“磁离子分裂效应”是由地磁场所引起的, 在它的作用下, 电离层变成为双折射媒质。在电离层中传播的电波分裂成以不同的速度传播、并在不同高度上反射的两个电波; 第一个波, 由较高处反射, 叫做寻常波(f^o); 第二个波叫非常波(f^x)。在中纬地区非常波的临界频率大约比寻常波的临界频率高 0.7 兆赫。寻常波和非常波的临界频率之差与磁场的大小有关, 并且从赤道的 0.4 兆赫变化到高纬的 0.8 兆赫。对于实际无线电通信, 最关心的是在一切计算中都要涉及到的、寻常波的临界频率。

下面我们就主要对它进行讨论。

目前在世界各地有 150 个以上的电离层站在经常地工作, 其中有 22 个在苏联。它们对电离层的观测为研究电离层及其所遵循的规律提供了一些必需的資料。

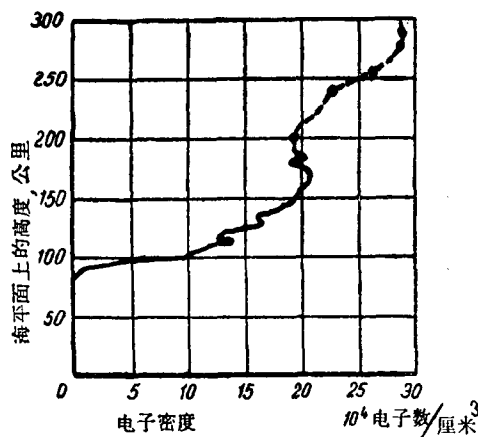


图 2 电离密度随高度的变化。高度直到 200 公里都按火箭测量计算(实线), 高于 200 公里的是根据电离层站的资料推算的(虚线)

用垂直探测得到的有关电离层结构的概念大体上已被火箭进行的测量所证实。

图2示电离层电离密度的高度分布，它是由1954年5月7日10点发射的維金格(Викинг)火箭测量得到的。由这个测量只可以考察高度达200公里的电离密度分布。对于高度超过200公里的电离密度分布系由火箭上升点处的电离层站的测量得到的。

沿水平线标出的是电离密度，沿垂直线标出的是高度。火箭测量证实了几个电离层并没有明显分界线，它们之间没有非电离的空气间隙。整个电离层充满了带电粒子并具有几个最大值，它们就叫做几个层。

电离层的正规层

各层的一般特性。电离层中正规地存在着下述各层： D 层，它的电离密度为 10^3 — 10^4 电子数/厘米³，处于60—80公里的高度上； E 层，它的电离密度达 2×10^5 电子数/厘米³，高度为100—110公里； F_2 层，电离密度为 10^5 — 10^6 电子数/厘米³，下边缘的高度为220—400公里。在夏季白天又由 F_2 层的下部分出一个层，叫做 F_1 层，它的密度为 3×10^5 — 4×10^5 电子数/厘米³，下边缘的高度为180—200公里。

上面列举的每一个层都对短波传播发生影响。

F_2 层。在短波无线电通信中，特别是在远距离短波无线电通信中，电离密度最大的 F_2 层起着最大的作用。在白天，这个层可以反射频率为10—30兆赫的电波，而在太阳活动性高的年份，它可以反射部分超短波波段（达到50兆赫）的电波。在夜间，频率3—10兆赫的电波可由 F_2 层反射。

F_2 层的临界频率在一昼夜内变化很大，白天的 f^oF_2 之值要比夜晚大两倍以上。最大值在白天而最小值在日出之前，其

具体变化如图 3 所示。图中示出太阳活动性低的 1954 年（实线）和太阳活动性高的 1956 年（虚线）的冬季（图 3 a）和夏季（图 3 b），红色巴赫拉电离层站测得的正规层临界频率月中值和虚高月中值的昼夜变化。 f^oF_2 的昼夜变化形状随季节而略有变化：冬天接近正午有明显的最大值，而在傍晚显著下降，并在日出以后有一个较陡的上升。夏季白天的最大值比较平坦，除了白天的最大值以外，在傍晚还有一个附加的最大值。冬季的昼夜变化要比夏季大得多。

上述 f^oF_2 的昼夜变化形状代表中纬地区的特性。在赤道

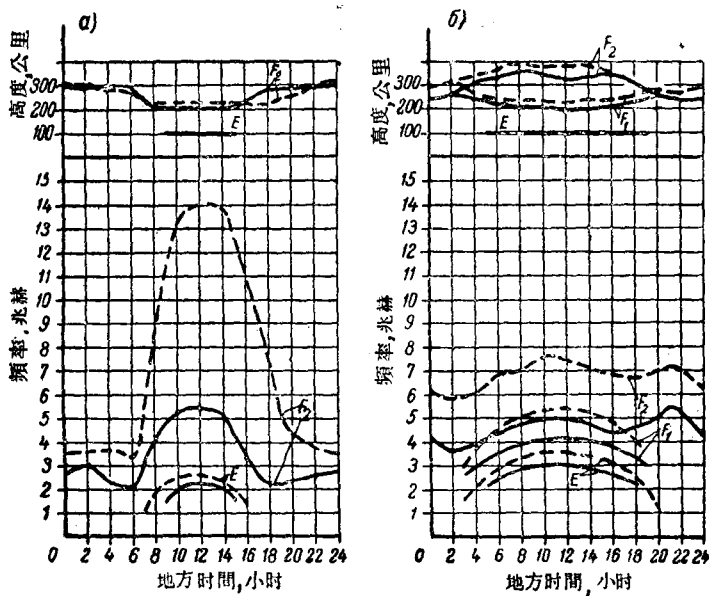


图 3 E 层、 F_1 层和 F_2 层的临界频率月中值和虚高月中值的昼夜变化。红色巴赫拉电离层站。实线是 1954 年；虚线是 1956 年；a) 十二月，b) 六月

区域, $f^\circ F_2$ 的昼夜变化与中緯地区稍有差异。赤道区域冬季和夏季的昼夜变化曲线的形状相差不大, 而临界频率之值大于中緯地区的值。在北极区观测到的 $f^\circ F_2$ 比中緯地区的更低。南半球 F_2 层的临界频率与同一季节北半球 F_2 层临界频率相似, 即北半球一月 $f^\circ F_2$ 之值类似于南半球六月 $f^\circ F_2$ 之值。

F_2 层临界频率的分布不仅与电离层站所处的地理緯度有关, 而且与地磁场有关。

众所周知, 地球是一个磁体。地球磁场的分布大致与均匀磁化球所产生的磁场相同。地磁轴与地球旋转轴不重合, 而它与成约 11° 的夹角。地磁极位于格陵兰 (北緯 78.6° , 西經 70.1° ——北磁极①) 和南极带 (南緯 78.6° , 西經 250.1° ——南磁极②)。以地磁轴为轴、以地磁极为极点的球坐标叫地磁坐标。用这种坐标来表示与地磁场有关的一系列物理现象, 如地磁场的变化、电离层磁暴等是很方便的。

在等间隔投影的世界地图上 (图 4) 繪出了地磁极、磁赤道、与磁經綫 $A=90^\circ$ 和 $A=270^\circ$ 对应的磁子午綫以及极光出現频率最大的区域, 这个区域大致与磁緯度圈平行。 $f^\circ F_2$ (白天值) 的地理分布与磁緯有关。当由中緯移到赤道时, $f^\circ F_2$ 的白天值增加并在距磁赤道两边约 20° 的距离上达到最大, 而在磁赤道上其值最小 (图 5 a)。 $f^\circ F_2$ 的夜间值与地磁场没有明显的依赖关系, 并且可以很好地表示出它与地理緯度的关系来 (图 5 b)。

$f^\circ F_2$ 的地理分布可以用图的形式来表示。在这些图中给出了 F_2 层的临界频率与地理緯度和地方时间的关系。通常无线电预测也是用这种形式来表示无线电通信的最高可用频率。此

注① 原文为南磁化极; 注② 原文为北磁化极。

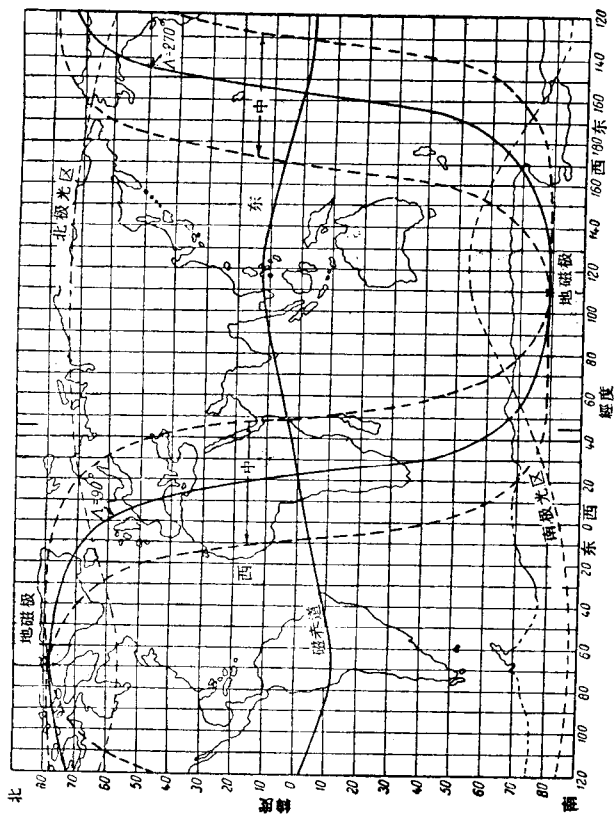


图 4 说明地磁极、磁赤道、极光区位置的地图。并用(东),(西)和(中)表示在实际电离层预报中地球所划分成的三个区域。

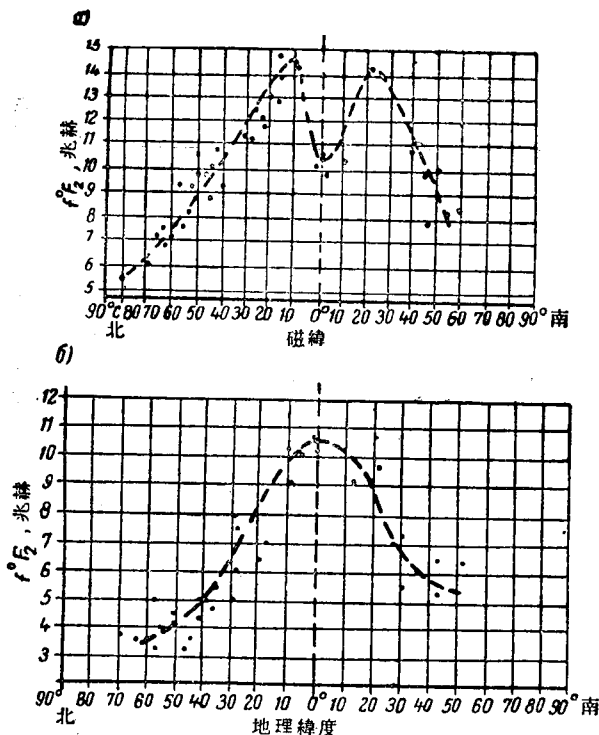


图 5 1946 年 3 月 $f^\circ F_2$ 的地理分布:

a) 正午值, b) 午夜值

时我們假定同一地理緯度下 $f^\circ F_2$ 的昼夜变化是相同的, 它只与地方時間有关。

实际上, 这个假定并不完全正确, 因为它还与地磁緯度有关, 而地磁緯度又不常与地理緯度一致。在赤道区域, 这一点就表現得非常明显, 因而在利用上述图形时就会引起大的誤差。

为了消除这些误差，通常 $f^\circ F_2$ 不是对于全世界都以同一个图来表示，而是对于各个区域以若干个图来表示。将地球分成若干区的分法是使在同一个区域内、因地理纬度和地磁纬度之间的差别而带来的误差最小。在苏联地磁、电离层和电波传播科学研究所的预测中，把地球分成两个区域（图4）——东区和西区。在东区、磁纬小于地理纬度；而在西区，磁纬大于地理纬度。 $\Delta=90^\circ$ 和 $\Delta=270^\circ$ 的两条磁子午线是两个区域的分界线。在其他一些国家所编制的预测中，在这两个主要区域之间又划分出两个中间区域（它们的边界在图4中用虚线表示）。这两个中间区的 $f^\circ F_2$ 之值可以根据主要区域的值，用内插法求得。

F_1 层。与整个昼夜都存在的 F_2 层不同，中纬地区的 F_1 层只在夏季白天才出现（图3）。这个层的临界频率低于 $f^\circ F_2$ 的临界频率。由图3看出， F_1 层在早晨由 F_2 层分裂出来并位于 F_2 层的下面。 F_1 层随着夜色的降临而升高并与 F_2 层重合。 F_1 层的临界频率值与太阳在地平线上的高度有关。临界频率 $f^\circ F_1$ 在一昼夜内的变化（昼夜变化）可以近似地认为与太阳天顶角 z 的余弦的四次方根成正比（ $f^\circ F_1 = \kappa \sqrt[4]{\cos z}$ ）。通常，中纬地区 F_1 层在冬天不出现。在低纬地区，太阳在地平线上的高度全年都足够高，所以整年都观测得到 F_1 层。在高纬地区的夏季，当是极日时， F_1 层整个昼夜都存在；而在冬天极夜时， F_1 层整昼夜都不存在。 $f^\circ F_1$ 的地理分布也基本上是由太阳在地平线上的高度来决定，因而与地理纬度有关。因此， F_1 层的地理分布，用一个图可以足够精确地表示出来。

E 层。 E 层和 F_1 层一样，在夏季的白天，当它的临界频率（与太阳在地平线上的高度有关）达到最大值时，对于无线电通信起着非常大的作用。到傍晚， E 层的临界频率下降，然

而与 F_1 层不同，它本身在夜晚并不完全消失。电离层站在夜间没有测量到 E 层，这是由于夜晚 $f^\circ E$ 低到只 0.6—0.8 兆赫，而设备的下限不能测量到这样低的频率的缘故。

E 层的高度变化不大，大约等于 100—120 公里。

电离层特性的逐日变化。在一个月內，电离层特性（临界频率和虚高）是变化的。在作长期预测时，不是确定一个月中每个个别天的电离层特性，而是一个月內的平均值。为了方便起见，由一个月內（对于某个确定的小时）全部观测值计算出中

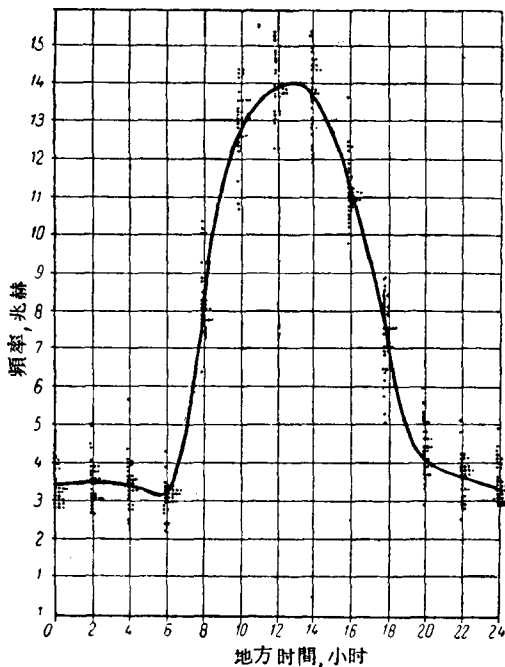


图 6 F_2 层临界频率的逐日变化。1956 年 12 月，紅色巴拉电离层站。点表示 $f^\circ F_2$ 每天的值，綫对应于中值

值。所謂中值系指这样的值：在一系列观测中，超过它的值为总数的 50%，而低于它的值也为总数的 50%。图 3 中所列出的正規电离层临界频率和虚高的数值，就是由一个月中計算出的中值。

我們认为，电离层特性的中值很好地描述了宁静条件

下即无骚扰时月中电离层的状况。每个个别天的值将分布在中值的两边。图 6 示(紅色巴蘇拉)电离层站的 $f^\circ F_2$ (1956 年 12 月) 中值和它在該月內每天的值。由图看出, 个别天的 $f^\circ F_2$ 与中值可能有很大偏离, 而大部分 $f^\circ F_2$ 值则处在与中值偏离为 15—20% 的范围内。E 层和 F_1 层临界频率的离散很小, 通常不超过 5%。

11 年周期的变化。从预测方法的观点来看, E、 F_1 和 F_2 层的临界频率与太阳活动性的关系是一个非常重要的规律。在太阳活动性最大的年份, 正规层的临界频率达到最大值, 而在最小年份达到最小值。这可由图 3 看出, 图中繪出了太阳活动性最小的年份 (1954 年) 和太阳活动性较高的年份 (1956 年) 各电离层的临界频率和虚高。 $f^\circ F_2$ 的变化最大, 例如在 1956 年 12 月白天与 1954 年 12 月相比, 临界频率就增加到 2.7 倍 ($\frac{f^\circ F_2 1956}{f^\circ F_2 1954} = 2.7$); 在 6 月白天 $\frac{f^\circ F_2 1956}{f^\circ F_2 1954} = 1.5$ 。E 和 F_1 层的临界频率的变化比 F_2 层临界频率的变化要小; 例如在夏季白天, 其比值如下:

$$\frac{f^\circ E_{1956}}{f^\circ E_{1954}} = 1.2;$$

$$\frac{f^\circ F_1 1956}{f^\circ F_1 1954} = 1.3.$$

图 7 表示 F_2 层临界频率正午值的逐年变化, 图 8 表示太阳黑子相对数 R 的变化。由这些图形可以看出, 临界频率的变化与具有大约 11 年周期的太阳黑子数的变化是同相的。此外, 还看到太阳和电离层周期变化的幅度之间也是一致的。临界频率近似随太阳活动性的增加而线性增加。临界频率和太阳活动性的这种关系在图上用直线表示 (图 14) 并用于预测的

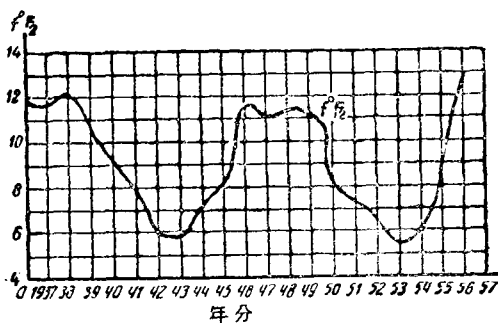


图 7 具有 11 年周期的 F_2 层 (托姆斯克电离层站) 临界频率的变化

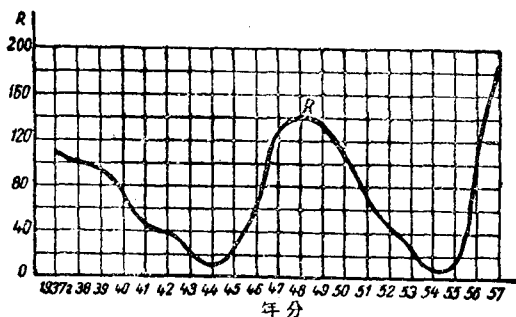


图 8 具有 11 年周期的太阳黑子相对数的变化

編制。在第二节还将更詳細地研究这个关系。由图 3 看出，在一个周期內，层高也有某些变化，可是这个变化小于临界频率所对应的变化。随着太阳活动性的增加，电离层虛高略有增加。

吸收层 D 层。上面叙述了正規层 F_2 、 F_1 和 E 层的主要特点，这些特点是由分析电离层站的观测而得到的。除此之外，在电离层中还常常存在着 D 层，它位于 E 层之下、高度为

60—80 公里处。現代电离层站所用的設備不可能得到由 D 层直接反射的无线电波，因为这一层的电离密度很小并且它在短波传播中正好不是起着反射层的作用，而恰恰是起着吸收层的作用。当波通过 D 层时，由于在波場作用下振荡的电子与空气中性分子的碰撞，而消耗一部分短波的能量。因为 D 层处于地面上比較低的高度，这里空气的密度还很大（空气密度随高度很快减小），电子与空气分子的碰撞頻率就很高，因而吸收很大。现在还未对 D 层的电离密度作有系統的測量，可是在許多站中对垂直入射电波的吸收进行了測量，由这些測量可以得出关于 D 层的某些知識及其規律。

由測量确定，吸收的昼夜和季节变化及其随緯度的变化与 E 层的同类規律相似，即 D 层的吸收也与地平綫上太阳的高度有关。該层的吸收，白天比夜晚大，夏季比冬季大，低緯地区吸收較大，此外吸收还与頻率有关（随頻率增高吸收下降）。吸收大致与頻率的平方成反比。

电离层站吸收的研究以及对无线电通信綫路上传播条件的分析表明，除了上述規則吸收之外，在高緯地区还存在着极光吸收区。这个区域的产生是由于太阳活动区所射出的带电粒子流在地磁場的作用之下，趋向以地磁极为中心的环形区域。这个环形区域的寬度和半径随飞行粒子的速度和质量而变化，它們平均占有緯度 10° 左右的寬度。在图 4 中繪出了与最大可见极光和最大吸收相对应的綫。在苏联境內，这个区域落在北緯 70° — 80° 的緯度区域。由太阳飞来的粒子进入地球大气层时引起高层大气发光（极光）并使 D 层和 E 层产生附加电离。 D 层中决定所謂极光吸收的附加电离沒有象正規 D 层那样有明显的規律性。极光吸收逐日有很大变化。在个别时候，吸收可能完全不存在，而在另一些时候，会使整个短波通信破坏。在

极光吸收区的电离层站作电离层垂直探测时，常常遇到这样的情况：由于无线电脉冲的全部能量被 D 层吸收而不能达到更高的电离层，因而不能得到由电离层的任何反射。在某些情况下，增强的吸收并不扩展到电离层探测仪的全部波段，而在高频特性上可以看到最高频率的反射。极光吸收与规则 D 层的吸收一样，对于低频最强，而较少损害短波段的高频部分。

不规则层

除了规律性足够稳定的正规电离层以外，电离层中还存在着不规则层。偶发 E 层 (E_s) 就属于不规则层。在这里应该叙述该层的主要特性，因为它在无线电通信中，特别是对于通过高频的无线电电路起着重要的作用。偶发层 E_s 在大约 100 公里的高度上即在与正规 E 层的高度一致的高度上形成，但是，它的电离密度较大，因而它能反射较高的频率。电波由 E_s 层的反射并不是始终具有同样的特性。在许多情况下，在 E_s 层反射波的同时，还有由更高层到达的反射波，即好象 E_s 层是透亮的而有一部分能量透过它达到更上层。在这种情况下， E_s 层叫透明层。我们假定，“透明”的特性是层的云状性质的结果。在另一些情况下，出现屏蔽 E_s 层，它使所有能量完全反射而不能得到高层的反射。还遇到一些中间状况， E_s 层在较低的频率是屏蔽层，而对于较高的频率就变为透明层了。

正如“偶发”这个名称本身所表明的一样，这个层不是经常出现的。为了表征 E_s 的特性，应用下列量值：反射的极限频率和出现的概率。 E_s 层的极限频率就是由该层反射的最大频率。我们引入这个名称以使它与表征正规层状况的临界频率相区别，因为这两个量本身的物理意义本来是不同的。正规层的临界频率与层的电子密度最大值的平方根成正比，它既与电离层探测仪的功率无关，又与它的其他技术数据无关。 E_s 层的