

苏联 Г. П. 格魯金斯卡娅 著

沈 肇 熙 译

修 訂 本

超短波的传播

N014

009798

无线电
技术知识
翻译丛书

人民邮电出版社

Г. П. ГРУДИНСКАЯ
РАСПРОСТРАНЕНИЕ
УЛЬТРАКОРОТКИХ
РАДИОВОЛН
ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО, 1960

内 容 提 要

本书介绍无线电波、天线、地球表面及大气的电特性及各波段无线电波，特别是超短波传播的基本知识。

本书是为无线电爱好者写的，但对一般无线电通信工作人员也有参考价值。

超短波的传播(修订本)

著者：苏联 Г. П. 格鲁金斯卡娅

译者：沈 肇 熙

出版者：人民邮电出版社

北京东四 6 条 13 号

(北京市书刊出版业营业许可出字第〇四八号)

印刷者：北京市印刷一厂

发行者：新华书店

开本 787×1092 1/32 1958 年 12 月北京第一版

印张 3 4/32 页数 50 1963 年 10 月北京第二版

印刷字数 70,000 字 1963 年 11 月北京第二版第一次印刷

印数 6,401—11,350 册

统一书号：15045·总949—无250

定价：(9) 0.34 元

序 言

自本书初版問世以来，这三年期間，超短波传播問題得到了进一步的发展。在远距离对流层超短波传播的領域中开展了一系列的工作。建成了利用从流星余跡、月球和人造卫星反射无綫电波的新的通信系統。在其他波段的无綫电波传播方面也繼續做了許多有成效的研究。

无綫电波传播方面的这些以及其他成就，引起了广大无綫电爱好者很大的兴趣。因此在經過修訂和补充的本书第二版中，以相当大的篇幅介紹了許多无綫电波传播的新的資料，更詳細地讲述了电离层的試驗研究方法，包括有厘米波段和毫米波段电波传播方面的材料，并增加一章讲各个波段电波传播的問題。

許多理論和实践的探討对超短波研究做出了貢獻。苏联科学家符維金斯基(Б. А. Введенский)和浮克(В. А. Фок)在这項工作中有很大的成績。現在，人們在这一領域进行着巨大的工作，不停地在寻求新的超短波通信方式。不久以前，开拓了利用无綫电波在不均匀对流层和电离层中进行散射的远距离通信。利用流星余跡反射无綫电波的超短波通信电路在試驗中。建立“人造电离层”的試驗也在进行，并实行了用从月球反射电波的方法的无綫电通信。利用无綫电波，苏联科学家在人类历史上首先能以把月球看不見的一面的图象传送到地球上来。所有这些都証实了无綫电波传播，尤其是超短波传播問題的重要性。

无綫电爱好者大量的实验对解决一系列无綫电波传播的問題有很大帮助。无綫电爱好者曾經是短波通信的先鋒。他們又

以自己的工作，促使人們扩大了对超短波傳播的認識。他們在远距离接收电视方面的試驗为新的科学綜合提供了宝贵的材料。

我們希望本书扩大无线电爱好者在电波傳播方面的眼界，并将在建立新波段和实验远距离及超远距离电视接收方面，帮助他們进一步地积极工作。

“大众无线电丛书”編輯部

目 录

序 言

第一章 无线电波和天线的一般概念	1
无线电波	1
天线	5
第二章 地球表面和地球大气的电气特性	7
地球表面	7
对流层	9
电离层	11
第三章 各波段无线电波的传播	20
无线电波波段	20
超长波和长波	21
中波	24
短波	27
超短波	34
第四章 小于和接近于直视距离的超短波传播	36
距离远小于直视距离长度	36
距离接近于直视限度	40
地球表面不平坦的影响	43
距离超过直视限度	51
第五章 超短波的远距离对流层传播	55
折射及“大气波导”的发生	55
对流层不均匀层的反射	61
无线电波在对流层不均匀体的散射	61
第六章 超短波的电离层传播	67
正常 F_2 层的反射	67
不定期 E_s 层的反射	70
电离层不均匀体的散射	74

流星余迹、极光和人造地球卫星的反射	79
第七章 地球大气范围外的超短波	84
无线电天文学	84
月球对无线电波的反射	86
用人造地球卫星转播无线电波	88
第八章 超短波接收的干扰	89
结束语	91
附录	93
参考文献	94

第一章 無線電波和天綫的一般概念

無線電波

無線電波是一些電磁振盪，它們的頻率數可以由 30 千赫到 300000 兆赫。波長 λ 等於場強度中兩個最大值（或最小值）之間的距離（圖 1）。電磁振盪的頻率和波長的关系是

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (1)$$

式中 λ —波長；

f —振盪頻率；

v —波的傳播速度。

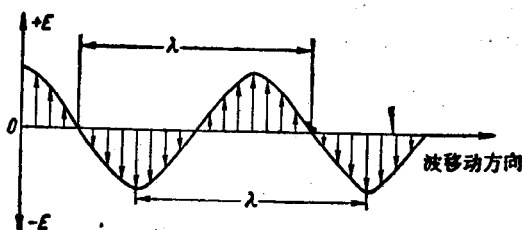


圖 1 給波長概念下定义

無線電波在真空中傳播的速度等於光的速度 $c=300000$ 千米/秒。當在任何其他媒質中傳播時，波的速度變為

$$v = \frac{c}{n} \quad (2)$$

式中 n —媒质的折射系数。

在均匀媒质中，也就是在遍及整体性质不变的媒质中，波以一定的速度作直线运动。当从一种媒质进入另一媒质时，在两媒质的分界面处发生波的折射和反射。波部分地进入第二媒质，并且改变它的运动方向；而它本身部分地从分界面处反射（图2）。此时波的入射角等于反射角，而入射角与折射角的关系为：

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为第一及第二媒质的折射系数。

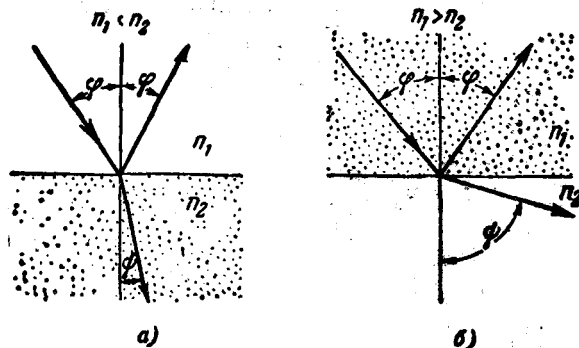


图2 无线电波的折射

a—当波从密度较小的媒质进入密度较大的媒质时

b—当波从密度较大的媒质进入密度较小的媒质时

如果波所投向的表面是理想的导体，波将全部由分界面反射，而不进入第二媒质。这种反射叫做镜反射。

当媒质的性质（它的折射系数）在各处不同的情形下，也就是遇到不均匀媒质时，波发生折射并循曲线轨迹运动。媒质的不均匀性愈大，折射系数的变化愈急剧，则轨迹的曲率愈大（图3）。

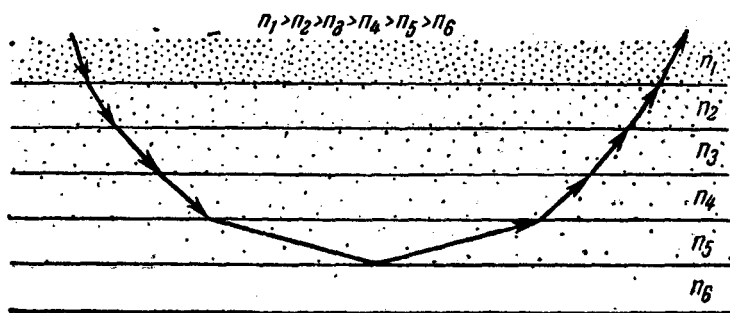


图 3 在折射系数变化的媒质中无线电波的折射

波在不均匀媒质中軌跡弯曲的現象叫做“折射”。在波从折射系数較小的媒质进入折射系数較大的媒质的情形下（例如从水到空气），如果入射角足够大的話，可能出現内部的全反射，也就是波的全部能量将从分界处反回而不透入第二媒质。

在不均匀媒质中，当媒质的折射系数沿波运行的方向减小时，也可能发生内部全反射現象。这时波进入媒质不大于某一距离（图 3 中的距离 h ）。

到达接收地点的往往不是一个波，而是两个或若干个頻率相同的波。例如，設置发射天线于图 4， a 中的 A 点，在离开它某距离处有一反射面 B ，于是到达 B 点的波可能經由两个途径：沿直线 AB 及沿 ABB 路径。在 B 点上出現两波相加的現象，也就是发生干涉，而且合成場可能大于或小于个别波的場。如果途径 ABB 和 AB 的差距为整数波长，則場同相相加，合成場就大于个别波的場（图 4， b ）。—如果这个差距为整数半波长，則場相减（即反相相加），而合成場小于相加的場（图 4， c ）。

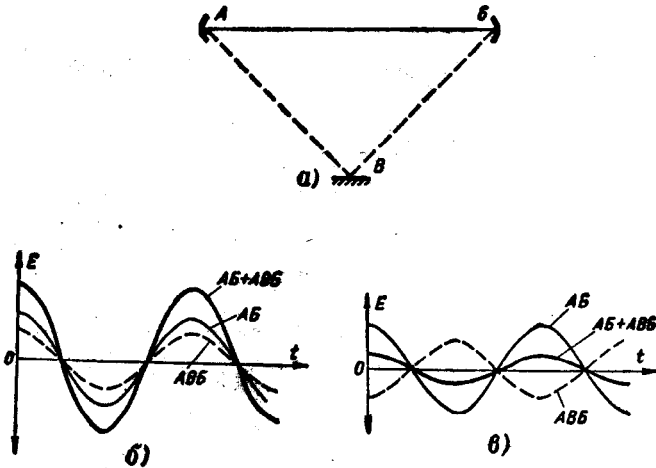


图 4 a), b), c)
經由不同路徑到來的兩個波的干涉

設想反射面的位置改變，使途徑 $AB\bar{B}$ 和 AB 的差距時而為整數波長，時而為整數半波長，則合成場將由最大到最小值而變化，也就是場強將時而增大，時而減小。這種場強的波動稱為“衰落”。

如果波在傳播途中遇着通不過的障礙物，波就力圖繞過它（圖 5）。在途中遇有障礙物時波的繞行現象叫做“繞射”。在障礙物的尺寸與波長可以比擬的情形，繞射表現得最強。如與波長相比，障礙物十分小，那末繞射就顯得微弱，而不致影響障礙物后面的場強（圖 5, a）。當障礙物有相當大的尺寸時，波實際上不會繞過它，于是在障礙物之后形成了陰影區（圖 5, b）。

磁場與電場強度之間有一定的關係，二者都可以表示無線電波的強度。通常測量的是電場強度，因為這樣做實際上更方

便些。电场强度以每米伏数（伏/米）、每米毫伏数（毫伏/米）或每米微伏数（微伏/米）计，而 $1 \text{ 微伏/米} = 10^{-3} \text{ 毫伏/米} = 10^{-6} \text{ 伏/米}$ 。

电场强度也常以相应的对数单位——分贝（ dB ）来测重： $\text{分贝} = 20 \lg \frac{E}{E_0}$ 。

通常取 E_0 为 1 微米/伏或 1 毫米/伏。因此，例如 1000 微米/伏的场强就等于 60 分贝（也就是比 1 微伏/米高 60 分贝）。

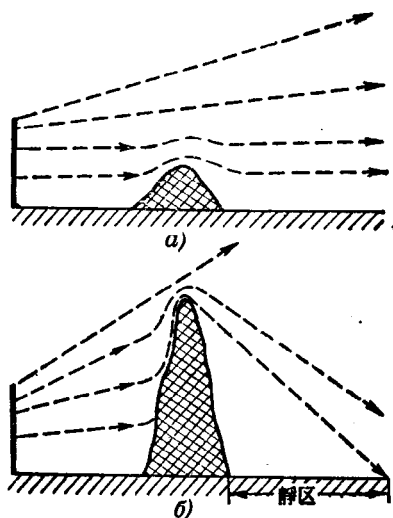


图 5 a) 无线电波的绕射
a—障碍物的尺寸比波长小
b—障碍物的尺寸比波长长

天 线

向各个方向同样辐射的天线叫做“不定向天线”。在图 6, a 中示有围绕不定向天线的空间的发射功率分布图，也就是描绘出了它的方向性图。这样的天线，这个图是一个圆。在大多数情形下，希望把天线的辐射功率集中于一定的方向，也就是缩小它的方向性图，使方向性图具有图 6, b 所示的形状。在其范围内包含着辐射功率主要部分的角度 θ ，表示方向性图的宽度。天线在所需方向辐射集中的程度决定于天线的方向系数，用字母 D 来表示。有方向性的、辐射功率为 P 的天线，与无方向性的、辐射功率为 PD 的天线，在接收点建立同样的场强。

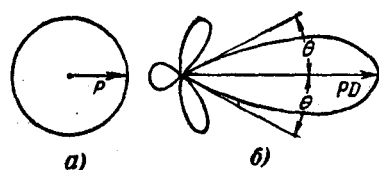


图 6 天线方向性图

a—不定向天线

b—定向天线

如果天线的尺寸大于或者稍微小于一个波长，那末这种天线就可以有方向性。对波长以千米计的波建立有方向性的天线几乎是不可能的。在厘米波段都能够把辐射能量集中于小于

1°的角度以内。这种天线的直线尺寸可达到几米。

并不是所有由发信机馈入天线的功率都能辐射出去。天线辐射的功率与馈入天线的功率之比叫做天线的“效率”(К.П.Д.)。天线的效率和天线的方向系数的乘积叫做天线的“增益系数”。超短波天线的增益系数可以达到较大的数值。对米波段的“波导”型天线，增益系数在5—20范围之间，而对于米波段的抛物面天线，增益系数达 10^4 — 10^5 。

在自由空间传播的无线电波，不考虑地球表面和地球大气的影响时，由天线建立的场强的有效值可用下式计算，

$$E_{\text{毫伏/米}} = 173 \frac{\sqrt{P_{\text{千瓦}} \cdot D}}{r_{\text{千米}}}$$

式中 P ——辐射功率

D ——天线的方向系数

r ——由发射天线到接收点的距离

由上式可见，场强与由发射天线到接收点的距离成反比，而与辐射功率值的平方根成正比。

第二章 地球表面和地球大气的电气特性

地球表面

在直接临近地球表面的大气中传播的无线电波叫做“地面波”(图7)。地球表面和大气的下层的特性对它的传播有很大的影响。借由大气上面的电离层反射来传播的无线电波叫做“空间波”。它们的传播条件主要决定于大气电离层的结构。

直接贴近地球表面并延伸到10—14千米高度的大气下层叫做“对流层”，而上面的、处于由60到400—600千米高度的电离层，叫做“电离层”。

因为无线电波是一种电磁振荡，所以在有电波传播的条件下，由本身的导电率和介电常数所决定的媒质的电气特性将受到影响。物质的导电性能决定于物质中所具有的自由电子的数目。在物质每立方厘米内的自由(可移动)电子愈多，它的电气性能愈接近于导体的性能。物质的介电性能决定于在电场作用下物质分子迴转的能力。物质的导电率愈大，电磁波在物质中传播时损失的能量愈大。不当把这种情况与增大导体的导电率时其中损耗

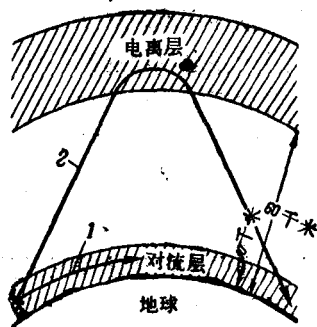


图7 对流层和电离层的位置和地面波(1)及空间波(2)的传播途径

...

降低的现象相混。

物质具有导体和介质的性能，表明物质中同时存在着与电压同相位的电导电流和与电压相位相差 90° 的位移电流。如电导电流甚大于位移电流，那末就可以认为物质是导体；反之，物质就是介质。位移电流值决定于振荡频率，因此电导电流值和位移电流值之间的关系也随振荡频率而变化。这样，同一物质，在不同频率下有时可以呈现导电性，有时可以呈现介电性。地球表面（陆地和海洋）及大气的电气性能自然也不例外。

由于地球表面组成成分的不均匀性，决定它的电气性能是相当复杂的。干土和湿地的电气性能不同。淡水和海水的性能也不同。对长波来说，海水和湿地具有导体的性能；而对超短波来说，除了海面以外的任何种地面，都可以认为是近乎理想的介质。这就简化了超短波传播中许多问题的研究，但发生了另外的复杂性：地面上即使有很小的不平坦，都对超短波的传播有严重的影响。

当无线电波投射到不平坦的地球表面时，会发生散射，而且反射波场强比由平滑表面反射的要弱。当起伏的高度 h 大于由波长 λ 及波在表面的投射角 φ (图 8) 所决定的某值时，即当

$$h > \frac{\lambda}{8 \cos \varphi} \quad (5)$$

时，无线电波在从地球反射的同时就有散射。

斜平投射波由于很大的不平坦而散射，垂直投射波则可因不大的不平坦而散射。“表面不平坦”的概念对不同的波长是不同的，对短波来说，树木、房屋、山岗是不平坦的；对于波长 3—10 厘米的波来说，甚至杂草复盖和水丘已经是不平坦的了。

对 流 层

在对流层内空气的組成成分和地球表面的一样，即主要由氮和氧（以体积計，分別占 78% 和 21%）所組成。对流层范围内空气的状态是以气压、温度和湿度来表征的。空气的密度随着离地球表面的高度的增加而降低。通常空气的温度和湿度也随之降低。这表明在对流层以內，空气是靠地球表面散射的热量来变热的。因此对流层的参数随季度、昼夜和气象条件而有所改变。

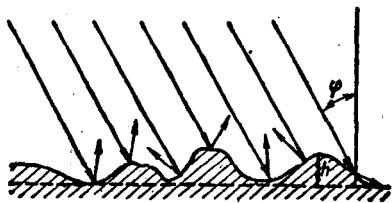


图 8 无线电波在不平坦地面上的散射

空气的折射系数一般可认为等于 1。但是只是在第一次近似值时正确。实际上对流层的折射系数与空气的气压、温度和湿度有关，并和 1 相差不大。在正常的气压、湿度和温度下，折射系数约为 1.00034。折射系数与气压 P 、温度 T 及水蒸气压力 P_n 之间的关系决定于下式（式中常数由經驗方法求得），

$$(n-1) \cdot 10^6 = \frac{78.5}{T} \left(p + \frac{4800 P_n}{T} \right) \quad (6)$$

式中 n ——空气的折射系数，无量綱；

T ——绝对温度 °K ($T = 273 + t^{\circ}\text{C}$)；

p 和 p_n ——气压，以毫巴計。

折射系数随着离地面高度的增加而降低，并趋近于 1。因此大气下层是不均匀介质，并且它的参数随昼夜、季度和天气而变化。在約 10 千米高度以內，大气折射系数存在着变化的不均匀性。在这一高度上， $(n-1) = 109 \cdot 10^{-6}$ ，并且在地球各

处都是此数不变。

从上述数字可见，大气折射系数的绝对值变化是很小的。但影响无线电波传播的不是折射系数的绝对值，而是它随高度变化的规律。大量的观察指出，在中纬度地区大气的一般状态的特征是折射系数随高度的变化均匀。高度每改变一米折射系数减小 4×10^{-8} 的大气叫做“标准大气”。

测量表明，对流层的折射系数随高度改变的规律常常和线性规律相差很远。有这种情形，折射系数最初随高度的增加而降低，然后从某一水平开始增长，以后又重新降低。有时在地面附近，折射系数随着高度增长，然后开始下降。图9所示是折射系数随高度变化的曲线。

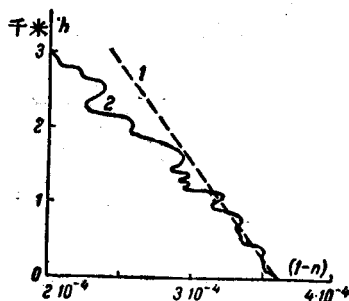


图9 空气折射系数随高度的变化

1—标准大气的理想曲线

2—实测曲线

如上所述，大气在垂直方向的不均匀性使波的轨迹弯曲，也就是有折射。随着折射系数的改变，波的传播轨迹也改变，因而各种气象条件的变化都会影响超短波的传播。因此对于研究超短波传播的条件来说，有足够完全的气象资料十分重要。

对流层在水平方向也不均匀，其中有地区性的不均匀。例如在某些地区，空气中有比较高的温度或湿度。因此在对流层的个别处所，折射系数可能与平均值有显著的差别。这样，在对流层中就发生了容积的不均匀性。它出现的原因是大气中空气的湍流运动，也就是涡流运动。地球表面各个地段受热不同。因此在对流层中出现向上流或向下流的空气流，并且在不

同地段空气密度也呈现差异。对流层的容积不均匀性对超短波传播有很大影响，引起无线电波的散射。

空气的电导率很小，因此在对流层内传播长于 30 厘米的无线电波实际上不会受到吸收。更短的波在水滴中会被吸收。高频率无线电波的场在水滴中感应出位移电流，由于水的导电率而产生损失，也就是吸收无线电波能量。除此以外，无线电波还可以被水滴散射。由于这两个原因，厘米波段的无线电波在穿过雨区和雾区时就遭受吸收。雨愈大吸收愈大。在图 10 中，用虚线表示在各种不同的雨的强度下，无线电波的吸收和波长的关系。

厘米波和毫米波可以作用在空气所含气体分子上而遭受谐振吸收。1.25 厘米的波被水蒸汽强烈吸收，0.5 厘米的波则被空气中的氧气所吸收（图 10 中的实线曲线）。

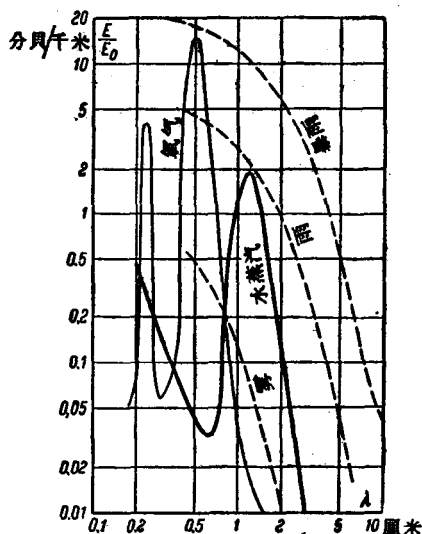


图 10 对流层中超短波的吸收

电 离 层

只是在最近十年，当开始实现地球物理学的火箭发射时，对电离层才开始可以进行直接研究。在这以前，人们研究电离层都是用间接的方法。