

TN8-17C1

77669

超 高 頻 天 綫

尼.季 薄 瓦 講

人 民 教 育 出 版 社

高等学校教学用书



超 高 頻 天 綫

CHAOGAOPIN TIANXIAN

H · T · 薄 式 讲

南京大学物理系无线电教研组译

人 民 教 育 出 版 社

本書系根据苏联专家基輔工学院副教授 H. T. 薄瓦(Бова)于1958—1959年度在南京大学物理系为无线电教研组教师及各校进修教师講授“超高频天线”这一課程时的講稿翻譯及整理而成。

本書概述了超高频的傳輸、超高频天线一般参数及理論基础；然后分述了喇叭天线、透鏡天线、抛物面天线、振子天线、振子陣天线、“波导”型天线、裂縫天线、介質天线、表面波天线及螺旋天线等理論，以及表征它們特性的参数及各种天线設計步驟等。本書最后还說到超高频天线的測量技术及現代天线的发展趋向。

本書叙述簡明，内容丰富，且是“超高频天线”方面的第一本中文書籍，适于用作高等学校超高频天线課程的教材或参考書，也可供科学研究人員及工程技术人員閱讀。

本書出版后受到了有关方面的重視，提出了不少寶貴意見。这次我們趁重印的机会，参照这些意見以及根据教学中的实际需要，作了某些刪改。請讀者們繼續提出寶貴意見，以便我們进一步改进。

超 高 频 天 线

H. T. 薄瓦 講

南京大学物理系无线电教研组

人民教育出版社出版 高等学校数学用书编辑组
北京宣武門内承恩寺7号

(北京市书刊出版业营业許可証出字第2号)

民族印刷厂印裝

新华書店科技发行所发行

各地新华書店經售

統一書号 15010·814 开本 850×1168 1/32 印张 14 1/2 插頁 1

字數 352,000 印數 3,001—9,000 定价(7) 1.60

1959年8月第1版 1960年7月北京第2次印刷

(另精1,500)

作者序

这本书的主要内容，是作者在 1958—1959 学年，为南京大学物理系所讲授的课程“超高频天线”的讲稿。

书中叙述了波导和超高频天线的理论基础与工作原理，也介绍了在雷达、无线电中继通讯、无线电导航和其他设备中，所采用的各种天线的工程计算方法。

内容的选择是考虑到读者已在电磁场和传输线理论方面，具备了一定的基础。

在编写教材时所参考的文献，以及钻研专门问题时所需的参考书刊都列在书后。

本书可作为高等学校的教材或教学参考书。同时对于无线电工业、科学研究机关中的工程技术人员，以及雷达、中继通讯站的维护人员等，也有参考价值。

深深感谢刘光业、江懋昌、张善杰、陈代珠、殷杰羿、高瑞章、朱健、韩世瑩、郑敏熹、贾存喜等进修教师，以及南京大学无线电教研组全体同志，感谢他们在整理和校对讲稿时给予了很大的帮助。

熊希荣和徐麟书两同志担任了讲课和准备讲稿的翻译工作；这里向他们致以深深地感谢。

衷心感谢南京大学无线电教研组主任鲍家善教授，他校阅了讲稿译文，和在准备这书时给予的各方面的帮助。

教研组实验员陈佩雄同志，描绘了全部的插图，在此亦致以谢意。

我衷心地希望读者对本书的缺点提出意见和批评。

科学技术副博士 H. T. 薄瓦

1959 年 3 月 16 日于南京大学

譯者序

本书是根据薄瓦专家于 1958 年 9 月至 1959 年 5 月为本校物理系无綫电組教师及各校进修教师开出的“超高频天綫”一課的讲义整理而成的。

薄瓦专家具有丰富的知識和熟练的教学經驗，非常生动地、深入浅出地讲解书中內容。因此对培养中国的超高频天綫人才起了很大的作用。

专家对我国的教育事业很热心，一开始就要求能将他的讲稿大綱，整理成完整的教科书，作为中国学生学习超高频天綫的課本。并于 1959 年初将进修教师及教研組教員組成小組分工整理。內容主要是按讲授大綱，此外还根据讲课內容及有关参考书作了一些补充。

由于我們的水平有限，在取材分量和文字等方面都有不足之处。所有缺点都应由我們負責，并希望讀者提出指正。

本书內容是适于教学之用，故只能讲到主要原理；讀者如欲了解現代的天綫技术及发展趋向，可参考附录所列的参考书刊。

南京大学物理系无綫电教研組

1959 年 4 月

目 录

作者序	vii
譯者序	viii
第一章 緒論	1
§1.1. 超高频天綫的发展簡史	1
§1.2. 超短波的分类	3
§1.3. 超高频天綫的主要参数	4
§1.4. 超高频天綫的分类	12
第二章 波导的理論基础	14
§2.1. 前言	14
§2.2. 波動方程式	16
§2.3. 临界頻率(截止頻率), 相速, 群速	20
§2.4. 矩形截面波导	23
§2.5. 圓形截面波导	34
§2.6. 波导的等效参数	41
§2.7. 波导中的衰减	46
第三章 超高频天綫的理論基础	50
§3.1. 前言	50
§3.2. 惠更斯-夫累涅尔原理, 克希荷夫公式	51
§3.3. 平面口径上的繞射	54
§3.4. 矩形口径上的同相場	56
§3.5. 圓形口径上的同相場	62
§3.6. 平面口径上場的相位偏移对輻射的影响	66
第四章 喇叭天綫	70
§4.1. 前言	70
§4.2. 波导口径的輻射	70
§4.3. 喇叭內电磁場的分布情况	73
§4.4. 喇叭口径上的場	83
§4.5. 喇叭天綫方向图的分析	86
§4.6. 喇叭天綫方向系数的計算	88
§4.7. 喇叭天綫的設計方法	92
§4.8. 特种喇叭天綫	94

第五章 透鏡天綫	97
§5.1. 前言	97
§5.2. 介質透鏡天綫的工作原理	100
§5.3. 介質透鏡剖面的計算	102
§5.4. 分区介質透鏡	104
§5.5. 人造介質透鏡(金屬介質透鏡)	106
§5.6. 介質透鏡的技术公差	111
§5.7. 介質透鏡表面的反射	113
§5.8. 介質透鏡口徑上場振幅的分布	115
§5.9. 介質透鏡天綫方向图和方向系数的計算	117
§5.10. 小結	120
§5.11. 例題	121
§5.12. 金屬加速透鏡的工作原理	123
§5.13. 分区加速透鏡	127
§5.14. 加速透鏡的技术公差	129
§5.15. 透鏡通帶的確定和折射率的选择	130
§5.16. 加速透鏡口徑上場振幅的分布	132
§5.17. 加速透鏡天綫的方向图和方向系数	133
§5.18. 例題	134
§5.19. 多孔金屬板透鏡	136
§5.20. 金屬-綫紋延迟透鏡	137
§5.21. 波束扫描透鏡天綫	138
§5.22. 余割平方波束透鏡天綫	142
第六章 拋物面天綫	147
§6.1. 前言	147
§6.2. 旋轉拋物面天綫	149
§6.3. 旋轉拋物面表面上的电流分布	152
§6.4. 旋轉拋物面天綫的方向图	158
§6.5. 旋轉拋物面天綫的方向系数	165
§6.6. 旋轉拋物面天綫的輻射器	168
§6.7. 由拋物面上反射的場对輻射器的影响	172
§6.8. 拋物面天綫的技术公差	176
§6.9. 旋轉拋物面天綫方向图的偏轉	178
§6.10. 特殊形状的拋物面天綫	181
§6.11. 形成余割平方波束的方法	191
§6.12. 拋物面天綫的設計步驟和实例	199
第七章 振子天綫	204

§7.1. 前言	204
§7.2. 对称振子	204
§7.3. 带有反射器的对称振子	216
§7.4. 振子陣天綫	225
§7.5. “波导”型天綫——八木天綫	235
第八章 裂縫天綫	251
§8.1. 前言	251
§8.2. 二重性原理及单裂縫天綫	252
§8.3. 多裂縫天綫	269
第九章 介質天綫	281
§9.1. 前言	281
§9.2. 介質天綫的輻射場	283
§9.3. 介質天綫的方向图和方向系数	288
§9.4. 复式介質天綫	290
§9.5. 小結	294
§9.6. 例題	294
第十章 表面波天綫	300
§10.1. 前言	300
§10.2. 表面波波导	300
§10.3. 平面表面波	303
§10.4. 平面表面波天綫	310
§10.5. 圓柱形表面波天綫	314
§10.6. 表面波天綫的設計	317
第十一章 螺旋天綫	318
§11.1. 前言	318
§11.2. 螺旋天綫的輻射場	320
§11.3. 圓极化	322
§11.4. 螺旋天綫方向图的計算	323
§11.5. 螺旋天綫的設計	328
§11.6. 特种螺旋天綫	330
第十二章 天綫測量技术	334
§12.1. 天綫裝置的方向图的測量	334
§12.2. 天綫增益系数的測量	340
§12.3. 相位的測量	342
§12.4. 天綫——饋綫系統的調諧	342

第十三章 結束語	345
§13.1. 超远程警戒雷達天綫	345
§13.2. 毫米波的天綫設備	348
§13.3. 印刷綫路	351
附录一 第三章 $E_M = \frac{j}{2\lambda} \int_s E_s [1 + \cos(\vec{n}, \vec{r})] \frac{e^{-j\vec{r}}}{r} dS$ 的証明	353
附录二 貝塞尔函数及汉格尔函数	354
附录三 获得拋物面的最大表面利用系数的条件	361
附录四 数表	363
附录五 第七章公式(7.31)的推导	380
附录六 半波振子互阻抗表	381
参考书刊	400

第一章 緒 論

超高频技术的发展,及其在国民经济、国防和应用物理上的广泛应用,说明了目前它的各个部分,特别是超高频天线具有很重大的意义。

超高频天线业已广泛地应用于现代雷达站、无线电中继通讯站以及电视等装置。其工作波段为米波、分米波、厘米波及毫米波各个波段。

虽然有时超高频天线亦采用了低频范围所用的偶极子,但超高频波段中标准的天线应是绕射式天线,如抛物面或透镜天线等。

在超高频技术中,可用同一根天线来作发射和接收天线。根据互易定理,天线的基本特点与工作方式无关,故本书中只将天线当作发射天线来研究。

目前超高频天线在无线电技术中占有重要的位置,它具有自己的理论基础。大部分理论的创始,应归功于苏联学者。苏联科学的特点在于深刻的理论分析和实际应用的紧密结合。苏联学者对超高频天线的主要研究成果就是一个例子[如 A. A. 畢斯多里哥尔斯 (Пистольковский) 的著作等]。

下面分别介绍超高频天线的发展简史、超高频天线的主要参数以及超高频天线的分类,然后转入基础理论的分析。

§ 1.1. 超高频天线的发展简史

无线电技术发展的特点是:发明高频振荡器的同时,亦出现了天线辐射装置。

在 1888 年 H. 赫兹 (Hertz) 以实验证实了 J. C. 马克士威 (Maxwell) 所提出的电磁学理论,并用火花放电法作了电磁波辐射的研究。

在其實驗中，輻射裝置採用了等值分布電流的振子。

偉大的俄羅斯學者，無線電創始人 А. С. 波波夫 (Попов) 發明了接地的天線，並用於雷雨指示器和接收及發射裝置中。

在發展的初期，無線電技術主要是用於長波無線電通訊。這時，廣泛地應用了 А. С. 波波夫所提出的非對稱接地天線理論，進一步發展了各種天線。

從 1924 年到 1927 年，由於採用了短波無線電通訊，在天線技術中，又出現了一系列的新型定向短波天線。

蘇聯在 В. И. 列寧的關懷下，М. А. 蓬奇-布魯耶維奇 (Бонз-Бруевич) 及 В. В. 塔塔林諾夫 (Татаринов) 等尼日城無線電實驗室 (Нижегородская радиолaborатория) 的工作人員於 1925 年設計了較複雜的定向同相天線，繼之，在其他各國亦出現了類似的天線。

要想掌握超高频無線電的主要波段，必須研究超短波的傳播，輻射和接收的特點。

蘇聯學者 В. А. 吳維琴斯基 (Введенский) 早在 1922 年已開始研究超短波的傳播；而另一位蘇聯學者 В. А. 福克 (Фок) 於 1949 年創始了超短波的傳播理論。

超短波的傳播和天線裝置的設計有着密切的關係。

在透鏡天線，拋物面天線，喇叭天線和介質天線等方面蘇聯學者所進行的理論研究具有很大的意義。

蘇聯學者對裂縫天線的理論作了很大的貢獻。早在 1932 年，М. С. 涅曼 (Нейман) 業已提出縫形輻射器。繼之，А. А. 畢斯多里哥爾斯在 1944 年到 1947 年進一步發展了這種天線的理論，並証實了“二重性原理”。而 Я. Н. 費里德 (Фельд) 繼續闡明了裂縫天線的輻射理論。

同時，還應強調其他國家亦有很多從事超短波天線的科學工作者，如 S. A. 謝昆諾夫 (Schelkunoff)，J. D. 克勞斯 (Kraus) 和 J. A. 斯特蘭敦 (Stratton)、朱蘭成等。

§1.2. 超短波的分类

波长在10米以下的电磁波称为超短波，其波段可以分为以下范围。

波 段 名 称	波 长(米)	频 率 (兆周)
米 波	10~1	30~300
分 米 波	1~0.1	300~3000
厘 米 波	0.1~0.01	3000~30,000
毫 米 波	0.01~0.001	30,000~300,000
超 毫 米 波	短于0.001	300,000以上

在电波传播课程中，可以知道，超短波可以自由地穿过高空大气游离层，而无显著的反射或吸收。同时，地面波衰减得很快，因而超短波的传播只有依赖于发射和接收两端的直接传播的空间波。但是，这些波段的空中传播特性是不同的。在空气中含有水蒸汽及氧气，它们对厘米波和毫米波有相当的吸收作用，对分米波和米波则吸收较少。故米波适用于远程传布。雨滴对厘米波以下的电波影响很大。图 1.1 表示水蒸汽及氧气对无线电波吸收的实验结果。

究竟为什么要把超短波划分为若干个分波段呢？仅仅从各个分波段所具有其独特的传播特征以及从超高频各个波段的巨大的实用意义来说明这点，当然是不够的。更重要的是，从无线电电子学的观点来

看,超短波的各个波段的产生,传输和辐射的方法亦彼此有着显著的不同。在米波和分米波段内,通常利用负栅三极管来产生振荡。但是当我们用它来产生更高的频率的振荡时,就会发现电子的渡越时间效应限制了三极管的正常工作。因此,在厘米波波段内,通常用渡越时间振荡器来产生振荡和放大,其中包括速调管,磁控管和行波管。在传输方面,由于超高频波段的波长和电路的线性尺度相比拟,集总常数的电路概念已不再适用了。我们采用了波导或同轴线(分布常数电路)来代替一般的馈电线,并且采用了空腔谐振器来代替普通的振荡回路。在天线方面,各个波段所采用的天线亦各具有其独特的特点,例如电视、导航、远程雷达等都采用分米波或米波,其天线一般为线性天线。在精确雷达和微波中继通讯中,大都采用厘米波或厘米波以下的波段,其天线一般为绕射式天线。

直到现在为止,超高频各个波段的性质和应用,还研究得很不够。可以预期,随着研究的深入,它们在国民经济,科学,国防等方面会起更大的作用。

§1.3. 超高频天线的主要参数

天线用来向空间辐射电磁能量(发射天线),或从空间接收这种能量(接收天线)。

我们来研究一下决定发射天线质量优劣的主要参数:

(一)辐射功率 $P_{\text{輻}}$ ——天线向空间辐射的电磁能的功率。

由振荡器输入到天线的功率 $P_{\text{输入}}$ 包括辐射功率 $P_{\text{幅}}$ 和在天线中损耗的功率 $P_{\text{损}}$ 。

$$P_{\text{输入}} = P_{\text{幅}} + P_{\text{损}}. \quad (1.1)$$

(二)天线的效率 (K, Π, Δ) η ——辐射功率与输入到天线的总功率的比值。

$$\eta = \frac{P_{\text{幅}}}{P_{\text{输入}}} = \frac{P_{\text{幅}}}{P_{\text{幅}} + P_{\text{损}}}. \quad (1.2)$$

(三)天线的方向特性——天线向一定方向辐射电磁能的能力。

天线的方向特性是按方向图和一系列其他参数来判断的,例如:方向图主瓣的宽度,方向系数和天线的增益系数。

a) 表示场强与方向的关系的图称为方向图:

假如以 $E_{\text{最大}}$ 表示最大辐射方向的场强,则在由角度 θ 和 φ 所确定的 M 点方向上的场强 $E_{\theta, \varphi}$ 在极坐标系中可写为:

$$|E_{\theta, \varphi}| = |E_{\text{最大}}| F(\theta, \varphi),$$

$$F(\theta, \varphi) = \frac{|E_{\theta, \varphi}|}{|E_{\text{最大}}|}.$$

$F(\theta, \varphi)$ 是相对的空间方向图。

实际上,一般采用的不是空间方向图,而是两个主要平面上的方向图。它们是空间方向图与两个相互垂直的平面的交线。

在超高频天线技术中,这两个平面的名称是由和它平行的场的矢

量来决定的。例如：假設 xoz 平面平行于磁矢量，那它就叫做 H 平面，而在这平面上的相应的方向图写成 $F_H(\theta)$ 。同时 yoz 平面将平行于电矢量，于是就叫做 E 平面，而在这平面上的方向图則写成 $F_E(\theta)$ 。

因此，我們可以找出在 E 平面內或 H 平面內和 z 軸的夹角 θ 。

我們可以把方向图画在极坐标系或直角坐标系的图紙上（图1.1a和1.16）。

当采用直角坐标系时，沿横軸可以找出在相应平面上說明方向特性的角度，而沿纵軸可以找出場强值（有时以相对值表示）。由于用极坐标系表示的方向图直接显示出場强在空間的变化，它的优点是高度

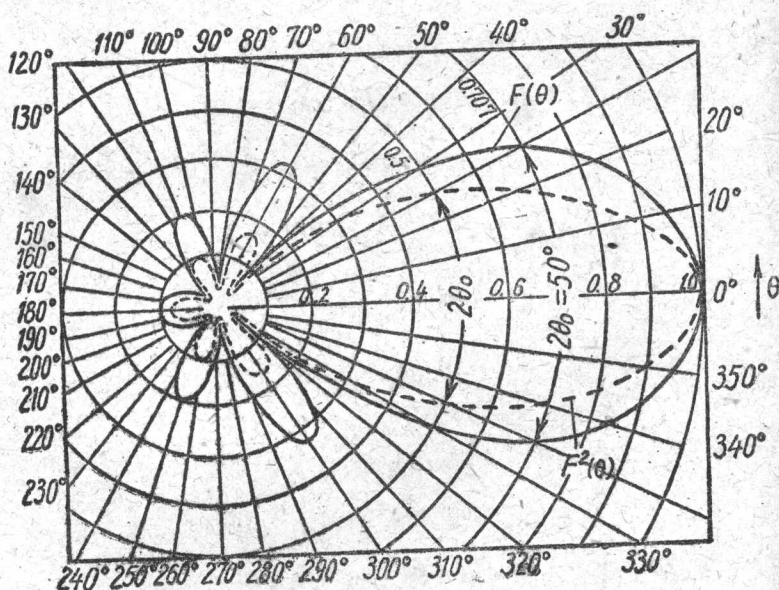


图 1.1a. 用极坐标系表示的天綫方向图。

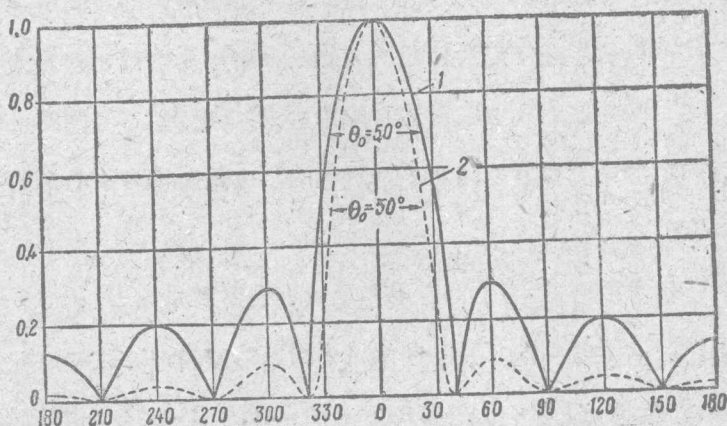
天线的旋转角度 θ (度)

图 1.16. 用直角坐标系表示的天线方向图。

的直观性。用直角坐标系表示的方向图，其两轴的标度可有任意的比例数(例如用对数标度来表示场强)。因此一般在电磁场强度很小的方向范围内，方向图也具有较高的准确性。

实际上，有时我们还采用辐射功率通量密度与方向关系的方向图 $P(\theta, \varphi)$ 。

容易看出，用场强和用辐射功率表示的方向图之间，存在着下列简单的关系：

$$P(\theta, \varphi) = F^2(\theta, \varphi). \quad (1.3)$$

图 1.1a 和图 1.16 所示的是同一根天线的两种相应方向图的比

較；實綫表示按場强画的方向图，虛綫表示按功率画的方向图。

无綫电通訊和雷达所使用的天綫具有各种不同形状的方向图。例如：对于中继通訊和炮瞄雷达是采用所謂“鉛筆形”方向图的天綫。这种方向图对最大輻射方向几乎是对称的，也就是具有鉛筆形的空間方向图(图1.2a, b)。

在搜索雷达中，为了更容易和更快地搜索到目标，对某一平面上的方向图要求不严，因而可以降低这平面上的方向性。这种在一个平面較寬，而在另一个平面上較窄的方向图称之为“扇形”方向图。

图1.2 c表示雷达站用来搜索目标和测定目标方位角 φ 的扇形方向图。

必須尽可能使方向图中的旁瓣为无限小。有了旁瓣，就会使一部分輻射能量白白向不必要的方向散失掉。雷达天綫的旁瓣，除了引起能量損失外，还可能对测定目标的方向上引起錯誤。

根据許多雷达站的工作特点，天綫必須具有特殊形状的方向图。例如：搜索地面目标的飞机雷达(图 1.2 d)最好要具有这样的方向图：这个方向图在水平面上較窄，并保証在雷达的作用半径內对目标的照射强度一样。

当无綫电波由雷达向照射表面传播时，場强就减少，并与距离成反比。为了滿足上列最后的一个条件，天綫方向图的輻射場强应与飞机到大地表面某点的距离 R 成正比。

由图1.2 e 可知