

高等学校教材

# 天线原理与设计

谢处方 邱文杰 编

西北电讯工程学院出版社

## 内 容 简 介

本书着重介绍天线的基本理论及其在工程设计中的有关问题。书中除了对当前常用的各种天线作了较详细的讨论外,对今后可能发展的新天线也作了重点介绍。全书共分两部分:第一部分讨论了天线的方向图、天线的阻抗、接收天线理论、双极与单极天线、天线阵、行波天线和开槽天线;第二部分讨论了口径天线的理论基础、平面口径的绕射、波导辐射器和喇叭天线、单反射面天线、双反射面天线、单脉冲天线以及微带天线。

本书取材重点突出、叙述由浅入深,且有较多的计算举例。除可作电磁场与微波技术专业的教材外,亦可作为通信、雷达、导航、无线电技术等专业的师生以及科研和生产人员学习参考。

高等学校教材

### 天线原理与设计

谢处方 邱文杰 编

责任编辑 王绍菊

---

西北电讯工程学院出版社出版

西北电讯工程学院印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 610 千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷 印数 1—7,000

---

统一书号: 15322·22

定价: 5.10元

# 目 录

前 言	
绪 论	1
0.1 天线在无线电工程中的作用	1
0.2 天线的分类	1
0.3 天线的主要特性参量	2
0.4 天线的发展概况	3
<b>第一章 天线的方向图</b>	<b>6</b>
1.1 元天线的方向图	6
1.2 天线上的电流分布	7
1.3 单线行波天线	8
1.4 单线驻波天线	9
1.5 对称天线	10
1.6 天线方向图的特性参量	12
1.7 天线阵	17
1.8 地面对天线方向图的影响	23
<b>第二章 天线的阻抗</b>	<b>27</b>
2.1 辐射功率与辐射电阻	27
2.2 等值传输线法	30
2.3 感应电势法	36
2.4 无源天线	41
2.5 复式天线阵的辐射阻抗	42
2.6 天线的输入阻抗	44
2.7 地面对天线阻抗的影响	45
2.8 圆柱天线理论	48
<b>第三章 接收天线理论</b>	<b>54</b>
3.1 发射天线与接收天线的互易性	54
3.2 接收天线的等效电路、最大输出功率与实效面积	55
3.3 阻抗失配与极化失配	57
3.4 接收天线的噪声温度	58
3.5 环天线	60

<b>第四章 双极与单极天线</b> .....	62
4.1 半波天线.....	62
4.2 对称天线的频带宽度.....	66
4.3 折合振子.....	67
4.4 双锥天线.....	70
4.5 不对称激励天线.....	73
4.6 单极天线.....	76
4.7 线天线的馈电装置.....	84
<b>第五章 天线阵</b> .....	92
5.1 旋转场天线.....	92
5.2 均匀直线式天线阵.....	93
5.3 均匀平面大线阵.....	102
5.4 同相水平大线.....	103
5.5 天线综合.....	109
<b>第六章 行波天线</b> .....	119
6.1 偶极子加载天线.....	119
6.2 菱形天线.....	121
6.3 韩森-吴特亚特条件.....	128
6.4 八木天线与返射天线.....	130
6.5 螺旋天线.....	136
6.6 横向螺旋天线.....	141
6.7 对数周期天线.....	144
<b>第七章 开槽天线</b> .....	155
7.1 电与磁的对偶性.....	155
7.2 巴俾涅原理.....	157
7.3 平板开槽天线.....	159
7.4 波导开槽天线.....	162
7.5 谐振式开槽天线阵.....	165
7.6 非谐振式开槽天线阵.....	167
<b>第八章 口径天线的理论基础</b> .....	169
8.1 口径天线理论的基本问题.....	169
8.2 辅助源法.....	171
8.3 等效原理.....	176
8.4 欠位法.....	178

8.5 基尔霍夫公式及与矢量公式的比较	181
8.6 口径天线理论外部问题的近似解	184
8.7 惠更斯元的辐射	188
8.8 几何光学法	189
8.9 几何绕射法	192
<b>第九章 平面口径的绕射</b>	<b>194</b>
9.1 引言	194
9.2 平面口径的增益和口径效率	195
9.3 矩形同相口径的绕射场	196
9.4 圆形同相口径的绕射场	202
9.5 口径场相位分布对方向图的影响	211
<b>第十章 波导辐射器和喇叭天线</b>	<b>218</b>
10.1 波导开口面的辐射	218
10.2 喇叭天线的形式及分析方法	224
10.3 H 面扇形喇叭	225
10.4 E 面扇形喇叭	234
10.5 角锥喇叭	239
10.6 圆锥喇叭	242
10.7 喇叭口径场相位偏差的校正	244
10.8 喇叭天线的相位中心	249
<b>第十一章 单反射面天线</b>	<b>252</b>
11.1 一般概念	252
11.2 旋转抛物面天线的几何关系	253
11.3 旋转抛物面表面上的电流分布	255
11.4 旋转抛物面口径上的场分布	258
11.5 旋转抛物面天线的辐射场	261
11.6 空间衰减因子	265
11.7 旋转抛物面天线的增益	267
11.8 旋转抛物面天线的馈源	271
11.9 抛物面与馈源的相互影响和克服方法	275
11.10 抛物面天线的结构和公差	281
11.11 扇形波束反射面天线	287
11.12 余割平方方向图天线	293
11.13 其它形式的单反射面天线	298
<b>第十二章 双反射面天线</b>	<b>303</b>

12.1	引言	303
12.2	卡塞格伦天线的几何关系和分析方法	304
12.3	空间衰减因子和口径遮挡影响	307
12.4	卡塞格伦天线的效率	309
12.5	高效率馈源	311
12.6	变形卡塞格伦天线	320
<b>第十三章</b>	<b>单脉冲天线</b>	<b>324</b>
13.1	引言	324
13.2	单脉冲天线的工作原理	324
13.3	四喇叭卡塞格伦单脉冲天线电参数的计算	326
13.4	单脉冲天线的馈源	342
13.5	影响单脉冲天线精度的主要因素	346
<b>第十四章</b>	<b>微带天线</b>	<b>351</b>
14.1	引言	351
14.2	微带天线的辐射原理	351
14.3	微带天线的分析方法	352
14.4	矩形微带天线	356
14.5	矩形微带天线的设计步骤	362
14.6	圆形微带天线	365
14.7	微带天线的典型特性	367
附录一	半波振子的互阻抗表	369
附录二	正弦积分表和余弦积分表	387
附录三	分贝表	389
	主要参考书目	391

# 绪 论

## 0.1 天线在无线电工程中的作用

一切无线电通信、广播、雷达、导航等工程系统都是利用无线电波来进行工作的。而无线电波的发射与接收，则依靠天线来完成——天线是无线电波的出口与入口。发射机末级回路的高频电流经过馈线送到发射天线，发射天线的作用是将来高频电流转换成电磁波，向规定的方向发射出去。反之，接收天线的作用是将来自一定方向的无线电波还原为高频电流，经过馈线送入接收机的输入回路。从这里我们可以看出，发射天线和接收天线之间的关系很象发电机和电动机之间的关系：前者是在高频电流和电磁波之间进行变换，而后者是在机械能和电能之间进行变换。这种关系暗示着一种相互的可逆性，即从理论上说，发射天线可以当作接收天线使用，接收天线也可当作发射天线使用。同样一副天线，无论是用作发射或接收，天线的基本特性参量保持不变。

设计良好的天线可以使上述能量的变换达到最佳效果。对于发射天线来说，我们可以用最小的电能在规定的方向产生足够的电磁波强度，同时尽量减小它对其它方向产生不必要的干扰；对接收天线来说，我们可以从外来的电磁波获得尽可能大的功率，同时不会受到其它电台的干扰。例如，对于点与点之间的通信，如果我们装置了定向发射天线，使电磁波能量集中向一个方向辐射，则对发射机的输出功率就可要求小些。反之，如果我们不装置定向发射天线，或是设计的天线错误，则电磁波的辐射效率很低，虽然采用了很大功率的发射机，在接收点仍得不到足够的场强。所以天线设计是否合理，对整个工程系统的质量有很大的影响，天线设计不好，甚至可以破坏整个系统的工作。

## 0.2 天线的分类

为了适应各种不同用途的要求，设计了各种型式的天线。对于这些天线的分类，也有各种不同的方法。可以按工作性质分为接收天线与发射天线两大类。也可以按用途分为通信天线、广播天线、雷达天线等等。但是这两种分类方法不是太笼统，就是不明确。例如，有种天线既可用作发射，也可用作接收。有时同一副天线还可借转换开关兼作收发两用。按用途分类也有问题，有些天线既可用于通信，又可用于雷达。所以按以上两种方法来分类，很难得到满意的结果。

第三种方法是按波长来划分，即将各种型式的天线按使用的波长归纳为长波天线、中波天线、短波天线、……。这种分类方法大致符合天线由长波发展到超短波和微波的历史过程，但仍然不是一种最完善的分类方法。有许多天线既可用于这个波段，又可用于另一波段。例如，水平半波天线既可用于短波，又可用于超短波；抛物面天线既可用于超短波，又可用于微波等等。实际上从纯理论的观点来说，任何一种型式的天线都可以用到所有的波段上。只是由于电气性能或结构装置上的限制，在某些波段未被采用。因此按波长来划分天线仍然不够理想。

目前绝大多数教材都采用按天线原理来分类的方法，即把天线分为线天线与口径天线两大类。线天线顾名思义是由导线组成的，导线的长度比横截面大得多，一般用在长、中、短波。口径天线则由整块金属板或导线栅格组成天线面，它的面积比波长的平方大得多，一般是用在微波。超短波天线往往是介于这二者之间的过渡型式。这种分类方法的优点是理论分析清晰。如果先介绍线天线，再介绍口径天线，则不但符合天线由长波发展到微波的历史过程，而且在叙述时也能由浅入深，循序渐进。因此本书也采用这种分类方法。

### 0.3 天线的主要特性参量

天线的理论主要有辐射理论、阻抗理论与接收理论。辐射理论研究天线的电流分布、辐射的强度、辐射的效率等等。阻抗理论研究天线的输入阻抗，使馈电系统取得匹配。接收理论研究天线接收外来电磁波的能力，天线上感应的电压等等。根据这些理论就可以确定某一副天线用作发射或接收的特性。工程上我们采用一些特性参量来表征这些特性，它们是方向图、主瓣宽度、副瓣电平、方向性系数、增益、极化、输入阻抗、频带宽度、有效面积等等。有关这些特性参量的详细说明，我们将在以后各章中一一加以叙述。这里只打算对其中几个主要的特性参量作一简单介绍，以使读者对天线的主要特性有一初步的印象。

#### 1. 方向图、主瓣宽度与副瓣电平

天线辐射的功率有些方向大，有些方向小。表示这种辐射功率大小在空间的分布图，称为方向图。不同型式的天线，它们的方向图也不相同。如果把天线在各方向辐射的强度用从原点出发的矢量长短来表示，则连接全部矢量端点所形成的包面，就是天线的方向图。它显示天线在不同方向辐射的相对大小。这种方向图是一个三维的立体图形，因而被称为立体方向图。任何通过原点的平面，与立体方向图相交的轮廓线称为天线在该平面的平面方向图。工程上一般采用两个相互正交的主平面上的方向图来表示天线的方向性，这两个主面称为E面和H面。E面是通过天线最大辐射方向并平行于电场矢量的平面；H面是通过天线最大辐射方向并垂直于E面的平面。图0-1表示在这种平面上的方向图。向径的方向代表辐射的方向，向径的长短代表辐射的强度。我们看到，方向图中有许多波瓣，其中包含最大辐射方向的波瓣称为主瓣，其它依次称为第一副瓣、第二副瓣等等。

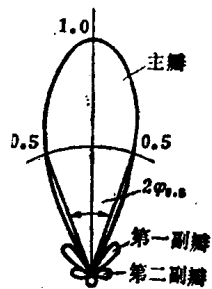


图0-1 天线的方向图

天线辐射是否集中，可以用主瓣宽度这一特性参量来表示。主瓣中辐射强度（即功率密度）为最大值一半的两个向径之间的夹角（图0-1中的 $2\phi_{0.5}$ ）称为主瓣宽度。主瓣宽度愈小，方向图愈尖锐，表示天线辐射愈集中。

副瓣的最大值相对于主瓣最大值的比称为副瓣电平，一般用分贝来表示。

#### 2. 方向性系数与增益

我们也可以方向性系数来表示天线集中辐射的程度。所谓方向性系数，是指在相同的



总辐射功率下，某天线产生于最大辐射方向的辐射强度与一理想的无方向性天线\*（即理想的点源）产生于同一点的辐射强度的比值。天线辐射愈集中，方向性系数愈大。

天线的另一重要特性参量是增益，它和天线的方向性有密切的关系，并可说明天线的效率。增益的定义是：在同一输入功率下，某天线在最大辐射方向的辐射强度与一理想的无方向性天线产生于同一点的辐射强度的比值，称为该天线的增益。由于天线的总辐射功率等于天线的输入功率乘上效率，所以天线的增益等于天线的方向性系数乘上天线的效率。

### 3. 极化

根据天线辐射的电磁波是线极化或圆极化，相应的天线称为线极化天线或圆极化天线。

在有地面存在的情况下，线极化又可分为垂直极化与水平极化。在最大辐射方向，电磁波的电场垂直地面时称为垂直极化，与地面平行时称为水平极化。相应的天线称为垂直极化天线或水平极化天线。

圆极化天线有左旋圆极化与右旋圆极化之分，它由辐射的电磁波是左旋或右旋来定。发射天线是左（右）旋圆极化天线，接收天线也应采用左（右）旋圆极化天线。接收天线和发射天线的极化不匹配将影响接收的效果。

### 4. 输入阻抗

天线的输入阻抗是天线在馈电点的电压与电流的比值。它的值与天线的型式，使用的波长以及周围物体的情况等因素有关。求出天线的输入阻抗之后，就可据此设计馈线，以达到相互匹配。工程上对天线系统提出的设计规定是在馈线上允许的驻波比。匹配愈好，驻波比愈小。

### 5. 频带宽度

天线的频带宽度根据规定参量的允许变动范围来确定。这些参量可以是方向图、主瓣宽度、副瓣电平、方向性系数、增益、极化和输入阻抗等。例如，当频率变动时天线的增益不得减低 1dB，由此可以确定天线的频带宽度。但若规定的参量是天线的输入阻抗，或馈线上的驻波比不得大于 1.5，则由此确定的天线频带宽度不一定和规定天线增益变化的允许范围所确定的频带宽度一样。换句话说，天线的频带宽度视规定的参量而不同。如同时对几个参量都有要求，则应以其中最严格的要求作为确定天线频带宽度的依据。

## 0.4 天线的发展概况

天线的发展过程是和无线电技术的发展过程紧密地联系在一起的。各种型式的天线都是为了适应当时提出来的实用要求而设计的。

第一副天线是德国物理学家赫兹在 1887 年为了验证英国数学家麦克斯韦提出的存在电磁波的理论而设计的。发射天线是相距较近的两个球，采用火花放电激励电磁波，接收天线

\*所谓无方向性天线是指天线均匀地向四面八方辐射，它的立体方向图为一球形。

用环天线。到1901年意大利物理学家马可尼第一个采用大型天线实现远洋通信，发射天线采用50根下垂铜线组成，顶部用水平横线连在一起，横线挂在两个支持塔上。这可认为是真正付之实用的第一副天线——垂直接地天线。

早期无线电的主要应用是长波越洋通信，因此天线的发展也是集中在长波波段。这种天线的特点是使用的功率大、结构庞大，而效率则很低。

自从1925年以后，无线电广播开始盛行起来，这便导致中波天线的发展。最早采用的中波天线型式和长波天线的型式相似，是T形、Γ形和伞形天线。后来为了克服天线衰落现象引起的失真，设计出自立式和拉线式的铁塔天线。这种垂直接地天线能将天线辐射的能量集中到沿地面的方向，从而减小高仰角的辐射。

早期天线的发展受到振荡源的限制。大约到1920年三极管可以产生1MHz连续波之后，谐振式的半波天线才有可能实现，在1925年前后，人们发现了利用电离层可以进行短波远距离通信，从而使天线需要的功率大为减小。这里对天线提出了新的要求：辐射的电磁能量不需要集中在地面附近，而是集中指向天空一定的方向。于是设计了各种型式的水平天线和天线阵，包括目前还在使用的同相水平天线。由于电离层的昼夜变动，通信两点之间的工作频率需要早晚更换。为了使一副天线能同时在两个波长上使用，设计了倍波天线和工作频率更为灵活的行波菱形天线。

大概到1940年前后，有关长、中、短波线形天线的理论大体上成熟了，主要的天线型式一直到现在还在采用。

超短波八木天线在1927年前后就提出来了，到现在仍占有非常重要的地位。

虽然早在1888年赫兹就首先提出了抛物柱面天线的概念，但由于没有相应的振荡源，微波天线一直沉默了30年。喇叭天线是三十年代随着波导技术的发展而产生的，而抛物反射面天线则一直到1937年才真正付诸实用。第二次世界大战期间，由于雷达技术的发展，超短波与微波天线得到飞速地发展。抛物面天线、透镜天线、介质棒天线、开槽天线等都在这个时期有不同程度的进展。其中以抛物面天线的发展尤为突出，包括馈源设计、波束扫描和产生预定方向图等问题的分析与研究。

第二次世界大战结束之后，无线电技术的发展更为迅速。微波中继通信、散射通信和电视广播日益受到重视，从而对天线提出了许多新的要求。到了五十年代，非频变天线的理论导致对数周期、等角螺旋等宽频带天线陆续出现。自从五十年代末期人造卫星上天，洲际导弹相继出现之后，人们进入了宇宙空间时代，对天线的研究又提出了许多新的课题，这里要求解决天线的高增益、高分辨率、圆极化、宽频带、快速扫描和精确跟踪等问题。整个六十年代到七十年代初期，天线的发展达到了空前盛鼎时期。一方面是大型地面站天线的新建与改进，包括卡塞格伦天线开始出现，新的馈源和主、副反射面的修正，波束波导等技术的应用；另一方面沉寂了将近30年的相控阵，由于移相器的发展，电子计算机的问世以及远程警戒，多目标同时搜索跟踪等迫切的要求，而重新得到了重视和发展；此外，在天线理论方面，矩量法、几何绕射法、平面波谱展开法等也是在这个时期陆续出现并不断得到发展的。

到了七十年代，无线电技术向波长愈来愈短的毫米波、亚毫米波以至光波方向发展。对天线提出了小型、轻便、平嵌等一系列要求。因此有源天线、微带天线、开槽天线、表面波天线、共形阵等引起了广泛的注意。同时反射面天线的频率复用、正交极化、近场测量、多波束引起的偏焦偏置等问题以及阵列天线的信号加工、合成孔径和自适应天线继续受到重视

和发展。另外由于遥感技术的进展，天线的散射特性、瞬时特性和天线在导体或等离子体中的辐射特性也都引起了广泛的关注。

我国的四化建设对无线电技术提出了越来越高的要求，因此在天线领域内需要解决的理论和实际问题也不断出现，这就迫使我们这些有志于从事天线工作的技术人员不断努力，去解决一个又一个的新问题，为祖国的社会主义建设作出我们应有的贡献。

# 第一章 天线的方向图

## 1.1 元天线的方向图

天线的方向图是天线的一个重要特性。它是表示天线在空间各个方向辐射电磁波功率大小的图型，因此，也称天线的辐射图。对不同用途的天线要求有不同的方向图。例如，对广播发射天线，要求它在水平面上有强度均匀的方向图；对定向通信天线，要求它在指定的通信方向有集中辐射的方向图等等。

振荡电流是产生辐射的源，辐射的强弱与电流的大小有关。因此，天线上电流分布的情况对天线辐射的方向图有决定性的作用。现在让我们用最简单的元天线为例，来求它的方向图与电流的关系。所谓元天线是指长度极短的一小段天线，这段天线上的电流可以假定为均匀的。根据一般电磁场理论的教科书\*，元天线产生于远区的电场强度与磁场强度为(图1-1)

$$dE_{\theta} = j \frac{Idz}{2\lambda r} \eta \sin\theta e^{-i\beta r} \quad (\text{V/m}) \quad (1.1)$$

$$dH_{\varphi} = j \frac{Idz}{2\lambda r} \sin\theta e^{-i\beta r} \quad (\text{A/m}) \quad (1.2)$$

- 其中  $I$ ——天线电流，单位为安培；  
 $dz$ ——元天线的长度，单位为米；  
 $\lambda$ ——工作波长，单位为米；  
 $r$ ——从天线中心到观察点的距离，单位为米；  
 $\eta$ ——媒质的本质阻抗，对于自由空间
- $$\eta = \eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377(\Omega) \quad (1.3)$$
- $\theta$ ——天线轴与观察点向径之间的夹角；  
 $\beta$ ——电磁波在媒质中传播的相位常数。

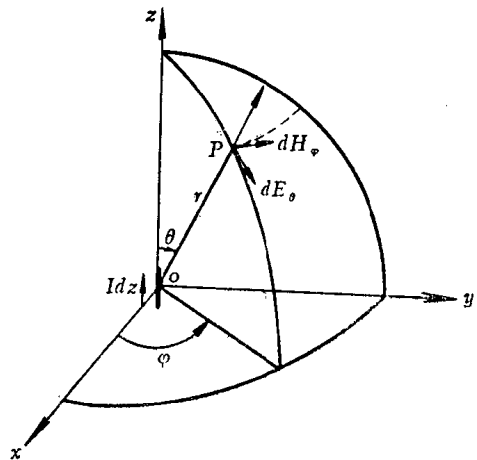


图 1-1 求解元天线辐射的坐标

由(1.1),(1.2)式看出，元天线在远区的辐射具有如下的性质：

- (1) 电场和磁场都与  $e^{-i\beta r}/r$  成正比。等相位面( $r = \text{常数}$ )是一个球面，球心位于元天线的中心。
- (2) 在空间任一点的电场和磁场同相，而且都比元天线的电流超前  $(\pi/2 - \beta r)$  相角。
- (3) 电场矢量沿  $\theta$  方向，磁场矢量沿  $\varphi$  方向，而且两矢量均与球面相切，亦即电场和磁场两矢量在空间互相垂直，同时又垂直于波的传播方向。
- (4) 电场矢量和磁场矢量的比值等于媒质的本质阻抗，即

$$dE_{\theta}/dH_{\varphi} = \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (1.4)$$

\* 谢处方、饶克谨编：《电磁场与电磁波》（第一版，1979）(8.24)，(8.25)式。

当电流保持不变时,电场和磁场的大小与波长 $\lambda$ 成反比,即波长越短,辐射越强。

如果我们在(1.1)式中维持 $I, \lambda, r$ 不变,按不同的 $\theta$ 角求出相应的 $dE_\theta$ ,绘在直角坐标或极坐标图上,所得到的电场强度随方向角 $\theta$ 变化的图形就是天线的方向图。例如,图1-2(a)是用极坐标表示的元天线的方向图。极坐标中向径的长短表示在相应方向角上电场强度的绝对值。这张图虽然是在 $y-z$ 平面上画出来的,但由于元天线的轴对称性,在所有通过天线轴

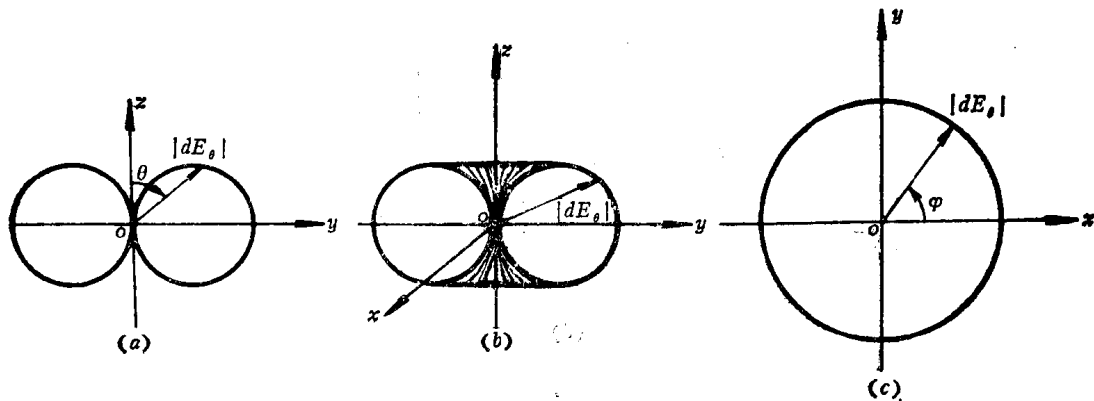


图 1-2 元天线的方向图

的任何平面上都有同样的形状,即三维空间的方向图是将(a)图绕 $z$ 轴旋转所得的图形,如图(b)所示。在垂直于天线轴的平面上,方向图为一圆,如图(c)所示。此时(1.1)式中的 $\theta = 90^\circ$ , $dE_\theta$ 与 $\varphi$ 无关。由(1.1)式可看出,在垂直于天线轴的方向( $\theta = 90^\circ$ )辐射最强,沿天线轴方向( $\theta = 0^\circ$ )辐射为零,这一点也可从图1-2看出。所以,即使是元天线,它向空间各方向辐射电磁波的强度也是不完全相同的。

## 1.2 天线上的电流分布

计算实际天线的辐射场时是将天线分成无数个元天线,每段元天线上的电流是相应实际天线中该段的电流值,然后用积分求和的方法将各个元天线的辐射场迭加起来。在迭加的时候,需考虑空间方位和时间相位上的关系。可见,在求天线的辐射场时,应先知道天线上的电流分布情况。

严格求解天线上的电流分布是一个复杂的理论问题。即使是对于一个简单的对称天线,计算它的电流分布也是相当困难的。工程上则采用近似方法。对于结构简单的细长天线\*的电流分布,是假定与无损耗均匀传输线上的电流分布相同。例如,对于在中点馈电的对称天线可以看成是将末端开路的均匀传输线张开形成的,天线上的电流分布是对称于中点的驻波(见图1-3)。同样,也把菱形天线看成是匹配好的传输线在中部扩展形成的,而且天线上的电流分布仍为行波。上述假定虽与实际情况略有出入,但是实验证明,对于计算方向图影响不大,工程上是允许的。

下面我们先就几种不同电流分布的情况来求天线的辐射场量。

\*细长天线是指天线直径远小于波长,如小于 $0.01\lambda$ 。

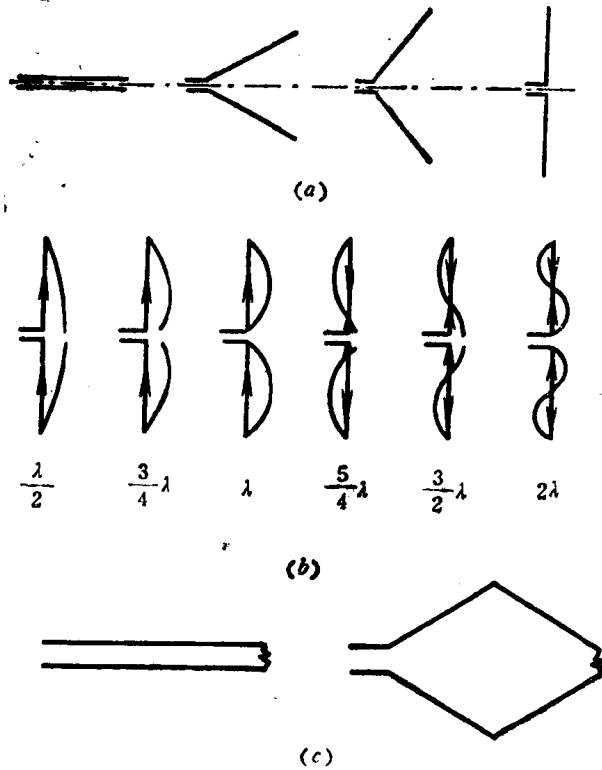


图 1-3 天线上的电流分布

### 1.3 单线行波天线

当天线上只有电流行波时，若以  $I_0$  代表输入端电流，则天线上的电流分布可表示为  $I_0 e^{-i\beta'z}$ 。此处  $\beta'$  为电流沿导线传播的相位常数。根据上节所述的原理，将天线分为许多个元天线，其中一个元天线在距离为  $r$  处所产生的电场为(见图 1-4)

$$dE_\theta = j \frac{I\eta}{2\lambda r} \sin\theta e^{-i\beta' r} dz$$

以  $I = I_0 e^{-i\beta'z}$  和  $\eta = \eta_0 = 120\pi$  代入可得

$$dE_\theta = j \frac{60\pi}{\lambda r} I_0 e^{-i\beta'z} \sin\theta e^{-i\beta' r} dz \quad (1.5)$$

如果我们用  $r_0$  表示从天线输入端引到观察点  $P$  的距离，则当  $P$  点很远时，可近似认为  $r$  与  $r_0$  平行，此时

$$r = r_0 - z \cos\theta \quad (1.6)$$

式中  $r$  和  $r_0$  均很大， $z \cos\theta$  相对很小，因此在(1.5)式中分母  $r$  若用  $r_0$  来代换影响不大，但对表示相位的  $e^{-i\beta' r}$  来说，微小的距离差都会对  $dE_\theta$  产生很大的影响。因此，不能用  $r_0$  代换  $r$ ，而应用较为准确的 (1.6) 式。于是 (1.5) 式可改写成

$$dE_\theta = j \frac{60\pi}{\lambda r_0} I_0 e^{-i\beta'z} \sin\theta e^{-i\beta'(r_0 - z \cos\theta)} dz \quad (1.7)$$

由于认为从天线分成的各元天线引向观察点的射线近似平行，因此，由各元天线在观察点产

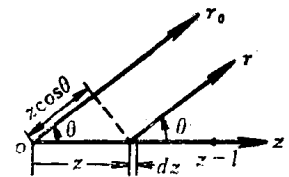


图 1-4 计算行波天线的辐射场

生的电场也大致在一个方向上。所以，在求天线的总辐射场时不用矢量求和，而直接沿天线长度积分求得

$$E_{\theta} = j \frac{60\pi}{\lambda r_0} I_0 \sin\theta e^{-i\beta r_0} \int_0^l e^{-i\beta' z} e^{i\beta z \cos\theta} dz$$

将此式积分后取绝对值得电场的振幅为

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_0}{r_0} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{\beta l}{2}(\xi - \cos\theta)\right]}{\xi - \cos\theta} \quad (1.8)$$

其中

$$\xi = \frac{\beta'}{\beta} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{c}{v} \quad (1.9)$$

$\xi$ 代表电波在空间传播的速度与电流沿导线传播的速度的比值。当两速度相等时， $\xi = 1$ ，(1.8)式变为

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_0}{r_0} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{\beta l}{2}(1 - \cos\theta)\right]}{1 - \cos\theta} \quad (1.10)$$

图 1-5 表示根据(1.10)式求得的不同长度行波天线的方向图。方向图与导线轴对称，但与垂直于导线的轴不对称。 $l/\lambda$  愈大，此不对称的程度愈大。方向图中最大的波瓣称为主瓣，其余的称为副瓣。当  $l/\lambda$  增大时，主瓣的倾角逐渐减小。主瓣的指向是在电流相位滞后的方向。图 1-5(a) 和 (b) 是假定天线为理想导体没有损耗的情况。图 (c) 是有损耗的情况，方向图形状基本上与无损耗的情况相似，但两波瓣之间不再为零，而且绝对值也变小了。

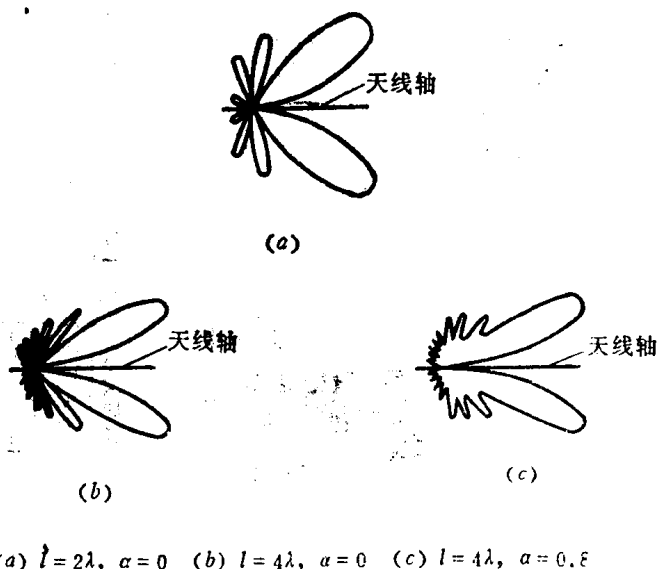


图 1-5 行波天线的方向图

## 1.4 单线驻波天线

现在让我们来讨论天线上存在电流驻波的情况。例如，我们取图 1-3(a) 对称天线的的一个臂来讨论。天线一端馈电，另一端开路，线上电流分布可表示为(见图 1-6)

$$I = I_m \sin\beta(l - z) \quad (1.11)$$

式中  $I_m$ ——电流的波腹值。

仿照上节的方法，将(1.11)式代入(1.1)式，通过积分取绝对值，可得远区电场强度的公式。当  $l$  为半波长的奇数倍时，电场强度为

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_m}{r_0} \frac{\cos\left(\frac{\beta l}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \quad (1.12)$$

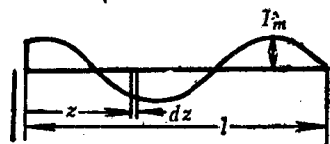


图 1-6 单线驻波天线

当  $l$  为半波长的偶数倍时, 电场强度为

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_m}{r_0} \frac{\sin\left(\frac{\beta l}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \quad (1.13)$$

式中  $\theta$  仍表示从天线轴起算的角度。

对于半波天线,  $l = \lambda/2$ , 代入(1.12)式可得

$$|E_{\theta}| = \frac{60I_m}{r_0} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \quad (1.14)$$

图 1-7 表示按(1.12), (1.13)式计算得到的不同长度的单线驻波天线的方向图。值得注意的是天线方向图是绕天线轴旋转的空间图形。由图可见, 天线全长是半波长的多少倍, 天线方向图的波瓣也正好有相同的个数。天线愈长, 波瓣愈多, 主瓣与天线的夹角愈小。

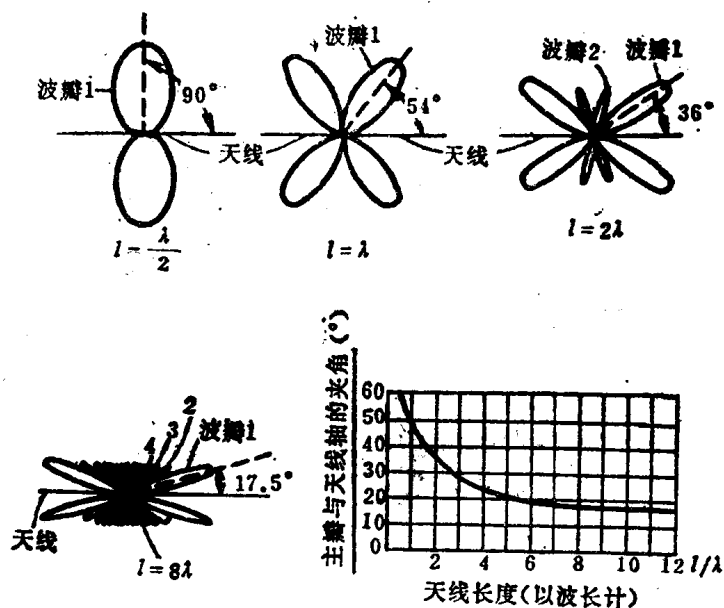


图 1-7 单线驻波天线的方向图

方向图不仅与天线轴对称, 而且也与垂直于天线的轴对称。这一点是容易理解的, 因为在一根终端有反射的导线上, 电流的驻波是由两部分强度相同的行波向相反方向传播形成的。每一行波各有自己的辐射方向图, 不与垂直于天线的轴对称, 但两个行波的方向图的和便与垂直于天线的轴对称了。

## 1.5 对称天线

对称天线可以看成是由一段末端开路的双线传输线形成的, 它的电流分布如图 1-3(b) 所示。这种天线是最通用的天线型式之一, 一般又称为偶极子天线。显然, 对称天线的辐射场可由两根单线驻波天线的辐射场相加得到。在进行相加时应注意下面三点:

- (1) 对称天线的两臂是排在一一直线上的, 假设馈电端的间隙为零;
- (2) 两根导线对于  $z$  轴坐标来说相差  $180^\circ$ , 所以在相加时一根导线用  $\theta$ , 另一根导线须



用 $180^\circ + \theta$ 。

(3) 一根导线的电流是从始端流向末端，而另一根导线的电流则从末端流向始端，所以在相加时一根导线的电流取正号，另一根导线的电流应取负号。

根据上面三点，仿照以前的方法，我们便可求出对称天线产生于远区的辐射场为

$$E_\theta = j \frac{60\pi}{\lambda r_0} I_m \sin\theta e^{-j\beta r_0} \int_0^l \sin\beta(l-z) e^{j\beta z \cos\theta} dz - j \frac{60\pi}{\lambda r_0} I_m \sin(180^\circ + \theta) e^{-j\beta r_0} \int_0^l \sin\beta(l-z) e^{j\beta z \cos(180^\circ + \theta)} dz$$

积分后取绝对值得到

$$|E_\theta| = \frac{60I_m}{r_0} \frac{\cos(\beta l \cos\theta) - \cos\beta l}{\sin\theta} \quad (1.15)$$

式中  $l$ ——对称天线的一臂长度。

当 $l = \lambda/4$ 时(半波对称天线)，

$$|E_\theta| = \frac{60I_m}{r_0} \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \quad (1.16)$$

与(1.14)式的结果是一致的。

根据(1.15)式算出的几种长度的对称天线的方向图示于图 1-8 中。

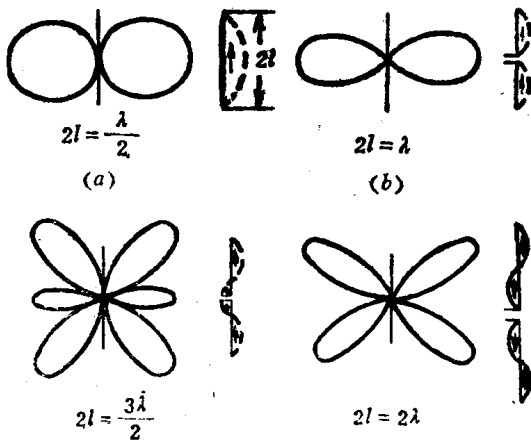


图 1-8 对称天线的方向图

以上讨论的方向图都是在极坐标上作出的。此外，我们也可以在直角坐标上作出方向图，如图 1-9 所示。横坐标为  $\cos\theta$ ，纵坐标正比于场强的大小。用极坐标表示方向图的优点

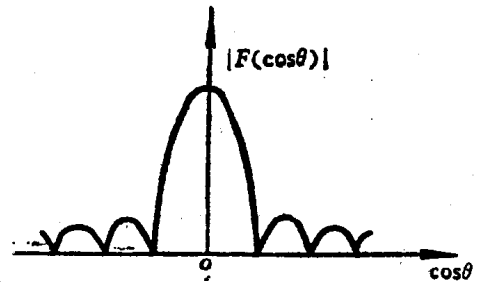


图 1-9 直角坐标表示的方向图

是直观、形象，但不够清晰，用直角坐标来表示方向图则可获得较高的精度。

从(1.10)，(1.12)，(1.13)和(1.15)式看到，天线在远区的辐射电场都可写成如下的形式：

$$|E| = \frac{60I}{r} f(\theta, \varphi) \quad (1.17)$$

我们将与 $(\theta, \varphi)$ 有关的因子用 $f(\theta, \varphi)$ 来代表，称为天线的方向图函数。如把 $f(\theta, \varphi)$ 归一化，即它的最大值规定为1，则(1.17)式可写成

$$|E| = \frac{kI}{r} F(\theta, \varphi)$$

式中  $k$ ——为一常数。