

高等学校教学用书

# 天线及电波传播

原编者：北京邮电学院天线教研组

审校者：邮电学院天线及电波传播教材选编组



人民邮电出版社

高等学校教学用书

# 天 綫 及 电 波 传 播

原編者：北京邮电学院天綫教研組

审校者：邮电学院天綫及电波传播教材选編組

人民邮电出版社

## 天 綫 及 电 波 傳 播

原編者：北京郵電學院天綫教研組

審校者：郵電學院天綫及電波傳播教材選編組

出版者：人 民 郵 電 出 版 社

北京東四 6 條 13 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第 0 四八零)

印刷者：郵 電 部 北 京 郵 票 廠

發行者：新 華 書 店

開本 850×1168 1/32

1961年 8 月北京第一版

印張 9 16/32 頁數 304

1961年 8 月北京第一次印刷

印刷字數 253,000 字

印數 1—5,650 冊

統一書號：15045·總1260—無323

定 价：(10) 1.35 元

DT34/28

## 內容提要

本書由三部分組成。第一部分是天綫的基本理論，包括天綫的方向性、阻抗和接收天綫的理論等三章。第二部分是電波傳播，包括表面波、天波、空間波、散射波和各波段電波傳播的特點等五章。第三部分是各波段的天綫，包括長中波天綫，短波天綫，超短波天綫和微波天綫等四章。在每一章之後有若干習題。

第一部分里講解了綫式天綫的基本原理，收發天綫的共同特性和不同要求，以及各種質量指標和參量的計算，為學習電波發射和傳播打下基礎。第二部分里，分別講解各種電波傳播方式的規律和特點，最後把電波波段劃分與各波段電波傳播的特點做了總結性的說明。第三部分里，在長、中波天綫中，着重講解頂負載型的天綫和抗衰落天綫；短波天綫中着重介紹同相水平天綫、籠式天綫、菱形天綫和魚骨形天綫；超短波天綫中，介紹了平衡器的原理和一些新式平衡器、折合振子、旋轉場天綫原理和電視天綫，最後對數周期天綫作了簡單介紹；微波天綫中，首先介紹了面式天綫的分析方法和惠更斯原理，並講解了喇叭天綫、拋物面天綫、喇叭——拋物面天綫和潛望鏡天綫的工作原理和設計方法。

本書是高等學校無線電專業的教學用書，也可以供有關工程技術人員參考。

## 序 言

本书内容分为三部分：第一編是天綫的基本理論；第二編是电波传播；第三編是各波段的的天綫。在学过电磁場和传输綫的理論之后，先学天綫的基本理論再学电波传播比較容易接受。在学过电波传播以及各波段电波传播的特点之后再学各波段的的天綫，可以把天綫和电波传播紧密地結合起来。

为了培养同学的实际工作能力，除了加强实验、科研与制作等章节外，在課本中增加了天綫的设计、調整和测试等内容，并选用了約40个习题。在散射波传播一章中，簡要地介绍了散射的理論和传播特性。此外还簡要地介绍了个别新式天綫和平衡器的基本特性。

与这门課直接衔接的先修課是“无綫电基础”和“电磁場理論及微波技术”。

本书原稿是北京邮电学院天綫教研組于1960年教学改革中师生結合編写的讲义，并經教研組結合教学实践于1961年加以修訂。本书是在北京邮电学院負責主持下，經邮电学院天綫及电波传播教材选編組以上述原稿为基础进行审校，作为通信类专业的教学用书。

参加原稿編写的北京邮电学院教研組教师是：楊淵、席允闈、云大年、董維仁等同志。

参加审校的教材选編組成員是北京邮电学院教师楊淵、重庆邮电学院教师孙仁琦和武汉邮电学院教师崔政伟等同志。参加本书繪图、繕稿等工作的还有北京邮电学院工程画教研組教师和同学。参加本书校对工作的还有北京邮电学院的一部分同学。

由于經驗不足、审編時間短促等原因，本书内容难免有不够妥善甚至錯誤之处。希望讀者，特别是使用本书的教师和同学积极提出批評和改进意見，以便今后修訂提高。

1961年5月

## 緒 論

在进行无线电通信或广播时，必須把信号用发射天綫以电磁波的形式輻射出去，电磁波經過一定方式的传播之后，在接收端用接收天綫再将信号接收下来，其工作情况可以用下面的方框图(图 1)来表示。

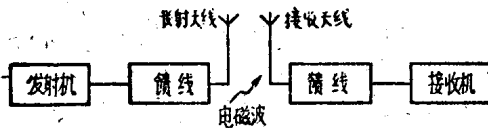


图 1

发射天綫是一种将高频已調电流的能量变为电磁波的能量，并将电磁波輻射到預定方向的装置。接收天綫则是一个将无线电波的能量变为高频电流能量，同时还能分辨出由預定方向传来的电磁波的装置。

最簡單的天綫是对称振子。这种天綫，可以理解为是张开了的終端开路的二綫传输綫，如图 2 所示，这种天綫的定向輻射能力有限，为了达到預期的輻射要求(如强定向輻射)，必須組成特殊的天綫結構形式。

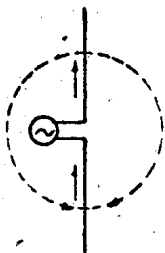
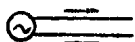


图 2

由于无线电技术的广泛应用，因而使天綫技术得到飞跃的发展，出现了各种形式的天綫。

按照天綫外形的不同，天綫可分成綫式天綫与面式天綫。通常綫式天綫应用于波长較长的长、中、短波和超短波波段，如对称振子和菱形天綫等，如图 3(a)、(b)所示；面式天綫则应用于微波中，如抛物面天綫和喇叭天綫

等，如图 3(c)、(d)所示。綫式天綫又可按照天綫上电流分佈情

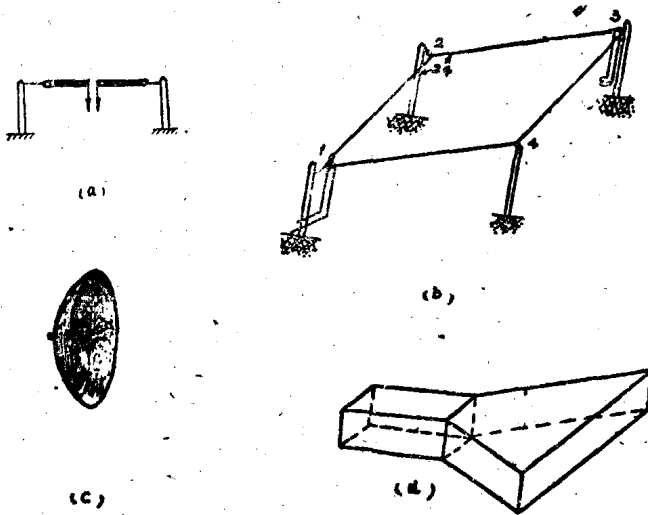


图 3

况，分为駐波天綫和行波天綫。所謂駐波天綫是天綫电流分佈是駐波状态的，而行波天綫則是天綫电流分佈是行波状态的。此外，尚其他的分类方法，如根据方向性的强弱分为强方向性天綫和弱方向性天綫等等。

天綫离开发射机或接收机往往有相当远的距离（尤其是在大型电台天綫很多时），在天綫与发射机或接收机之間需要用饋綫联结。不論是发射天綫的饋綫或接收天綫的饋綫都要求它与天綫匹配好，传输效率高。但是对发射天綫的饋綫和接收天綫的饋綫，分別又有不同的要求。对于发射天綫的饋綫来說，要求能量在饋綫上传送时不产生輻射，以免影响天綫的方向性，在发射功率大时，还要考虑饋綫上的过压問題。对于接收天綫的饋綫，則希望不从饋綫上接收信号，否則将会增加杂音接收和破坏天綫的方向性。

无线电波是通过发射天綫与接收天綫之間的媒质进行传播的。无线电波通过媒质时要引起衰减，这种衰减的大小与媒质的性质和电波的頻率都有密切的关系。学习电波传播就是要掌握有关这方面

的規律，以便選擇最佳的工作頻率和最合适的电波传播途径。电波从发射天綫发出之后，可能沿着不同的路径到达接收点。电波传播可以有以下几种传播方式：

(1) 表面波传播方式，就是电波沿着地球表面到达接收点的传播方式，如图 4(a) 所示。电波在地球表面上传播，以繞射方式可以到达視綫范围之外。地面对表面波有吸收作用，吸收的强弱与电波的頻率、地面的性质等因素有关。

(2) 天波传播方式，就是自发射天綫发出的电磁波，在高空被电离层反射回来而到达接收点的传播方式，如图 4(b) 所示。电离

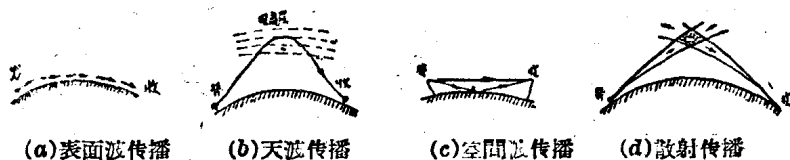


图 4 电波传播方式

层对电磁波除了具有反射作用之外，还有吸收能量与引起信号畸变等作用。其作用强弱与电磁波頻率及电离层变化規律有关。

(3) 空間波传播方式，就是电波一方面从发射天綫直接传播到接收天綫，另一方面經過地面反射之后到达接收点的传播方式，如图 4(c) 所示。这种传播方式一般限于視綫范围之内，故通常应用这一传播方式时天綫都架得很高。

(4) 散射传播，就是利用大气对流层和电离层中的不均匀性来散射电波，以达到視綫范围以外的地方，如图 4(d) 所示。

在掌握了天綫的理論和各种方式的电波传播規律之后，我們就可以根据实际要求，選擇工作頻率，确定电波的主要传播方式，計算其在媒質中的損耗，設計最好形式的天綫，估算需要的发射功率等，作好这一系列工作，是一切无綫电通信和广播系統能够圓滿地进行工作的保証，这就說明了我們学习天綫和电波传播时必须理論联系实际的重要性。



# 目 录

## 序 言 緒 論

## 第一編 天綫的基本理論

### 第 一 章 天綫的方向性

- § 1.1 引言..... ( 1 )
- § 1.2 对称振子的輻射場 ..... ( 2 )
- § 1.3 对称振子的方向性 ..... ( 5 )
- § 1.4 輻射功率与輻射电阻 ..... ( 8 )
- § 1.5 天綫的特性参数 ..... ( 11 )
- § 1.6 二元振子系的方向性 ..... ( 15 )
- § 1.7 地面对天綫方向性图的影响 ..... ( 23 )
- § 1.8 振子系的方向性 ..... ( 30 )

### 第 二 章 天綫的阻抗

- § 2.1 引言..... ( 39 )
- § 2.2 用等效传输綫法求对称振子的輸入阻抗..... ( 40 )
- § 2.3 用感应电势法求振子的阻抗 ..... ( 44 )
- § 2.4 用等效传输綫法求振子系的輸入阻抗 ..... ( 50 )
- § 2.5 地面对天綫阻抗的影响..... ( 50 )
- § 2.6 阻抗計算举例 ..... ( 52 )

### 第 三 章 接收天綫理論

- § 3.1 引言..... ( 55 )
- § 3.2 接收天綫的方向性和阻抗 ..... ( 56 )
- § 3.3 接收天綫的等效电路 ..... ( 60 )
- § 3.4 接收天綫的特性参数 ..... ( 64 )
- § 3.5 对接收天綫的特殊要求..... ( 65 )

## 第二編 电波傳播

<b>第四章 表面波傳播</b> .....	( 67 )
§ 4.1 表面波的傳播特性 .....	( 67 )
§ 4.2 垂直接地天綫的輻射場 .....	( 71 )
§ 4.3 表面波在两种性质的地平面上的傳播 .....	( 77 )
§ 4.4 天綫場地的性质对电波傳播的影响 .....	( 80 )
<b>第五章 天波傳播</b> .....	( 82 )
§ 5.1 电离层的形成、结构与变化 .....	( 82 )
§ 5.2 平面波在均匀电离气体中的傳播 .....	( 87 )
§ 5.3 电波在电离层中的傳播 .....	( 93 )
§ 5.4 电离层的等效高度和实际高度 .....	( 99 )
§ 5.5 通信綫路上的最高可用频率和最佳工作频率 .....	( 102 )
§ 5.6 接收点場强計算 .....	( 117 )
<b>第六章 空間波傳播</b> .....	( 123 )
§ 6.1 引言 .....	( 123 )
§ 6.2 理想情况下空間波場强的計算 .....	( 124 )
§ 6.3 地球曲率对空間波傳播的影响 .....	( 129 )
§ 6.4 地质、地形对空間波傳播的影响 .....	( 133 )
§ 6.5 气象条件对空間波傳播的影响 .....	( 135 )
<b>第七章 散射波的傳播</b> .....	( 138 )
§ 7.1 引言 .....	( 138 )
§ 7.2 对流层散射傳播的物理过程 .....	( 140 )
§ 7.3 对流层散射信号的一般特性 .....	( 146 )
§ 7.4 电离层散射 .....	( 156 )
§ 7.5 散射通信和微波中繼通信系統的比较 .....	( 158 )
<b>第八章 各波段的电波傳播</b> .....	( 160 )
§ 8.1 引言 .....	( 160 )
§ 8.2 长波傳播的特点 .....	( 160 )
§ 8.3 中波傳播的特点 .....	( 161 )
§ 8.4 短波傳播的特点 .....	( 165 )

§ 8.5. 超短波传播的特点 ..... ( 169 )

§ 8.6 干扰 ..... ( 170 )

### 第三編 各波段的綫

第九章 长、中波天綫 ..... ( 174 )

§ 9.1 引言 ..... ( 174 )

§ 9.2 頂負載天綫 ..... ( 175 )

§ 9.3 中波天綫的特性和参数 ..... ( 177 )

§ 9.4 抗衰落天綫 ..... ( 180 )

§ 9.5 中波天綫的饋电、地网和測試調整 ..... ( 182 )

第十章 短波天綫 ..... ( 186 )

§ 10.1 引言 ..... ( 186 )

§ 10.2 水平偶极天綫 ..... ( 186 )

§ 10.3 同相水平天綫 ..... ( 189 )

§ 10.4 菱形天綫 ..... ( 194 )

§ 10.5 魚骨形天綫 ..... ( 203 )

§ 10.6 短波天綫的饋电与調整測試 ..... ( 209 )

第十一章 超短波天綫 ..... ( 214 )

§ 11.1 引言 ..... ( 214 )

§ 11.2 平衡器 ..... ( 215 )

§ 11.3 折合振子 ..... ( 219 )

§ 11.4 超短波天綫陣 ..... ( 222 )

§ 11.5 电视天綫 ..... ( 223 )

§ 11.6 其他形式的超短波天綫 ..... ( 230 )

第十二章 微波天綫 ..... ( 238 )

§ 12.1 引言 ..... ( 238 )

§ 12.2 惠更斯原理 ..... ( 239 )

§ 12.3 喇叭天綫 ..... ( 244 )

§ 12.4 拋物面天綫 ..... ( 257 )

§ 12.5 喇叭——拋物面天綫 ..... ( 267 )

§ 12.6 潛望鏡天綫 ..... ( 271 )

## 附 录

- 附录一：对称振子的输入阻抗曲线图：..... ( 279 )
- 附录二：二平行半波振子的互阻抗曲线图..... ( 281 )
- 附录三：二平行对称振子的互阻抗曲线图..... ( 289 )

# 第一編 天綫的基本理論

## 第一章 天綫的方向性

### §1.1 引 言

在無線電通信中，例如北京和莫斯科通信，总是希望发射天綫能將它的大部能量向一定的方向（如由北京向莫斯科）輻射而不希望向其它方向輻射。因为这样就可以节省功率，从而提高設備的利用率。这就是說，在無線電通信中，总希望发射天綫在向空間輻射电磁波时，具有一定的方向性。

对接收天綫而言，就希望它只能很灵敏地接收从某一方向传来的电磁波，而很少接收从其他方向传来的电磁波。因为这样就减少了从其它方向来的干扰信号进入接收机，从而降低了杂音电平，提高了通信質量。所以在通信中也希望接收天綫在接收空間各方向传来的电磁波时具有一定的方向性。

在实际应用中，我們虽需要方向性强的天綫，但有时也需要弱方向性的天綫。如广播中为完成对某一地区的服务就需要弱方向性的发射天綫。

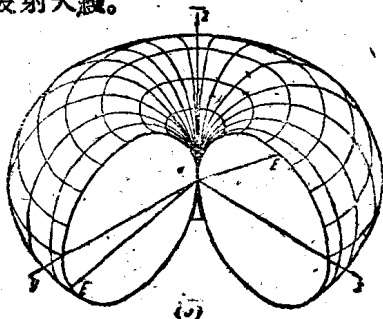


图 1.1 赫芝偶极子的方向性图

絕對的无方向性的天綫（即各方向輻射电磁波的能力完全一样的）实际上是不存在的，就連赫芝偶极子也是具有方向性的，它向空間輻射电磁能的情况如图 1.1 所示。可見它在沿  $z$  軸方向沒有輻射，而在  $xy$  面內却有最大輻射。但

是在研究問題时，为了便于比較，无方向性天綫这个概念还是要时常用到的，不过應該指出，它完全是假想的，

天綫的方向性因天綫类型的不同而不同，它的图形是各式各样的，对其研究的方法一般是通过場强的計算来进行。本章就是通过計算場强来研究对称振子和由它組成的振子系的方向性，从而掌握对天綫方向性这一問題的一般分析方法。

## § 1.2 对称振子的輻射場

天綫的方向特性可以由天綫所輻射的电場来求得。所謂对称振子就是在中点断开并接以饋电的导綫。它通常可以作为独立的天綫或用来組成各式各样的复杂天綫。为了求得各式各样天綫的方向性，就須首先求出对称振子的輻射場。

对称振子的輻射場，决定于其上的电流分佈，这可根据馬克斯威尔(Maxwell)方程和边界条件来严格求解。但是这个方法很复杂，因此工程中常采用近似的方法来計算。

这个近似方法是：把对称振子看成是由一对开路传输綫两臂向外张开而得来的，但其上的电流分佈却假設仍和张开前一样，然后将振子分成許多小段，每一小段上的电流在某一瞬間可认为是各处相同，也就是可以把每一小段当作一个基本振子，于是空間任一点的場强就是由这許多基本振子所产生的場强的迭加。下面便进行具体計算。

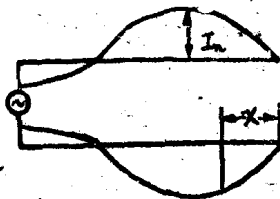
如图(1.2)所示，設开路传输綫上电流按正弦律分佈：

$$I_x = I_n \sin \alpha x \quad (1.1)$$

其中  $I_n$  为波腹处的电流，亦称波腹电流，

$x$  为綫上某点至終端的距离，

$$\alpha = \text{相移常数} = \frac{2\pi}{\lambda}$$



把传输綫张开后便成为图(1.3)所 图 1.2 开路传输綫上电流分佈

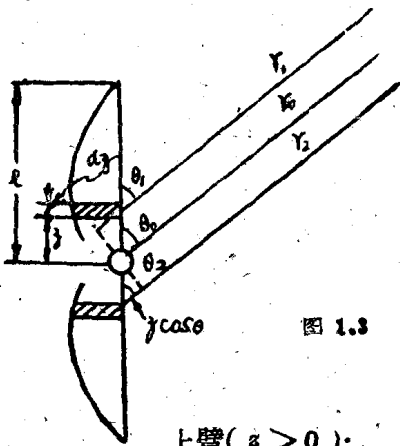


图 1.3

示的形状，即为一对称振子。設振子每一臂的长度为  $l$ ，取一坐标轴和振子重合，原点为 midpoint (即为饋电点)，振子的正方向为从振子的下臂至上臂的方向，则由 (1.1) 式可得振子上的电流分佈，如图 (1.3) 所示：

$$\left. \begin{aligned} \text{上臂}(z > 0): \quad I_z &= I_n \sin \alpha(l-z) \\ \text{下臂}(z < 0): \quad I_z &= I_n \sin \alpha(l+z) \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

設將振子分成許多小单元，每一小单元为  $dz$ 。由电磁場理論知道，由这一单元电流  $I_z dz$  产生的輻射場为：

$$dE_\theta = j \frac{60 \pi I_z dz}{r \lambda} \sin \theta e^{-j \alpha r} \quad (1.3)$$

其中  $r$  为由观察点至单元电流  $I_z dz$  的距离， $\theta$  为射线与振子轴的夹角。

將(1.2)式代入，得振子上座标为  $z$  处的单元电流  $I_z dz$  的輻射場为：

$$\left. \begin{aligned} dE_{\theta \text{上}} &= j \frac{60 \pi I_n \sin \alpha(l-z)}{r_1 \lambda} \sin \theta e^{-j \alpha r_1} \\ dE_{\theta \text{下}} &= j \frac{60 \pi I_n \sin \alpha(l+z)}{r_2 \lambda} \sin \theta e^{-j \alpha r_2} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

总場强可看成为这許多单元电流所产生的輻射場迭加的结果，

$$\begin{aligned} \text{即: } E_\theta &= \int_0^l \frac{j 60 \pi I_n \sin \alpha(l-z)}{\lambda r_1} \sin \theta e^{-j \alpha r_1} dz \\ &+ \int_{-l}^0 \frac{j 60 \pi I_n \sin \alpha(l+z)}{\lambda r_2} \sin \theta e^{-j \alpha r_2} dz \end{aligned} \quad (1.5)$$

当考虑远区場， $r_0$ 值很大，亦即  $r_0 \gg \frac{\lambda}{2\pi}$  时，在上式的振幅因子中可假定其分母的  $r_1 = r_2 = r_0$ ，但在相位因子中，不能以  $r_0$  代替  $r_1$  与  $r_2$ ，因为  $r_1$  与  $r_2$  和  $r_0$  相差虽不大（相对于  $r_0$  而言），但它引起的相位差  $\alpha(r_1 - r_0)$  与  $\alpha(r_2 - r_0)$  却可能很大。

由图(1.3)得（我們认为  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0 = \theta$ ）：

$$r_1 = r_0 - z \cos \theta \quad (z > 0)$$

$$r_2 = r_0 - z \cos \theta \quad (z < 0)$$

所以(1.5)式可写成：

$$E_\theta = \frac{j60I_0 l}{r_0 \lambda} e^{-j\alpha r_0} \sin \theta \left[ \int_0^l \sin \alpha(l-z) e^{j\alpha z \cos \theta} dz + \int_{-l}^0 \sin \alpha(l+z) e^{j\alpha z \cos \theta} dz \right]$$

积分后得：

$$E_\theta = j \frac{60I_0 l}{r_0} \left[ \frac{\cos(\alpha l \cos \theta) - \cos \alpha l}{\sin \theta} \right] e^{-j\alpha r_0} \quad (1.6)$$

从(1.6)式可見对称振子的輻射場是有方向性的。

無論是实验或严格的分析都証明，上面的計算方法只要振子够細时是足够准确的。

用(1.6)式虽可以表示振子的方向性，但还不明显，故一般常用方向性图来表示。用方向性图可以直接看出各个方向上場强的相对大小。

如图(1.4)所示，将天綫置于原点，則在  $r$  为常数的球面上，各处場强将只与方向有关，而与  $r$  无关；我們再向各方向作出射綫，取其长度与場强成比例，即得一立体图形，也就是立体方向性图。如前一节中图(1.1)所示的，即为基本振子的立体方向性图。但經常使用的却是平面上的方向性图，它有两种，一种是赤道面内的方向性图，所謂赤道面即是与振子軸垂直的平面；另一种是子午面内的



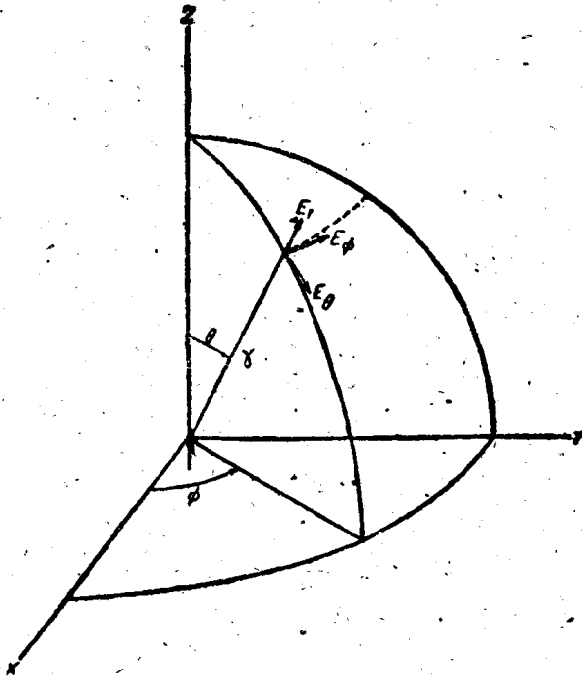


图 1.4

方向性图，所谓子午面即是通过振子轴的平面。关于对称振子的在这两个平面上的方向性图，下一节将要讨论。

### § 1.3 对称振子的方向性

由上节的讨论得知：对称振子在各方向场强的分布是不均匀的，也就是说天线具有方向性，其方向性前已指出可由方向性图方便地表示出来。

#### I. 方向性函数与方向性图

将(1.6)式略去相位因子可写成如下形式：

$$E = \frac{60 I_0 F(\theta, \varphi)}{r} \quad (1.7)$$