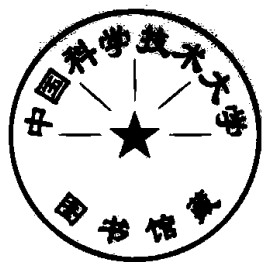


飞行系统的地面天线

[西德] R. 格赖夫 著

凌 尤 有 译

刘 懋 恒 校



国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要论述飞行系统的各种类型地面站天线设备。全书分为七章：第一、二章简要说明不同类型地面站及有关天线的作用；第三章介绍电波传播、噪声和干扰场强；第四章论述天线的一些基本特性；第五章结合导航和雷达原理介绍实际上应用的各种类型天线设备；第六、七章简单讨论了天线的测试、维护及其它有关问题。

本书可供从事导航、雷达、通讯、航空仪表及射电天文学等部门工作的工程技术人员和有关大专院校师生作参考。

Bodenantennen für

Flugsysteme

Von

Rudolf Greif

R. Oldenbourg Verlag

München Wien 1974

飞行系统的地面天线

〔西德〕 R 格赖夫 著

凌光有 译

刘懋恒 校

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/32 印张 8¹¹/₁₆ 188 千字

1981年1月第一版 1981年1月第一次印刷 印数：0,001—1,200册

统一书号 15034·2086 定价 0,91元

目 录

原序

第一章	空中交通管制、导航和雷达	1
第二章	关于天线与电波的一般讨论	5
第三章	电波传播	7
3.1	长中波的传播.....	10
3.2	短波的传播.....	11
3.3	米波和分米波的传播.....	18
3.4	电离层和对流层的散射传播.....	23
3.5	干扰场强和噪声.....	26
第四章	天线的基本特性	36
4.1	偶极子和垂直天线的辐射特性、辐射 阻抗和输入阻抗.....	37
4.2	长导线天线.....	51
4.3	环形天线与隙缝天线.....	55
4.4	天线阵的辐射特性.....	67
4.4.1	边射天线阵.....	68
4.4.2	端射天线阵及周期结构纵向辐射器.....	76
4.4.2.1	八木天线.....	78
4.4.2.2	螺旋天线.....	80
4.4.2.3	表面波天线.....	84
4.4.2.4	对数周期天线.....	86
4.4.3	圆形天线阵.....	95
4.5	喇叭天线、喇叭抛物面天线、抛物面天线和	

透镜天线	100
4.6 方向图、方向系数与天线增益	111
4.7 天线的输入阻抗	118
4.8 天线的耦合阻抗	123
4.9 有源天线	124
第五章 导航、测向、雷达、通信、遥控及遥测天线	129
5.1 远程导航	130
5.1.1 长波旋转无线电信标(康索尔)	131
5.1.2 低频波段(台卡、台克垂亚、罗兰 C)和中波 波段(罗兰 A)双曲线导航	132
5.1.2.1 台卡导航系统	134
5.1.2.2 罗兰 A 和罗兰 C 导航系统	137
5.1.2.3 奥米加导航系统	139
5.1.3 甚高频导航系统	140
5.2 近程导航	144
5.2.1 甚高频全向无线电信标(伏尔)	144
5.2.2 多普勒伏尔	147
5.2.3 超高频波段全向无线电信标(塔康)	148
5.2.4 航向信标——仪表着陆系统(ILS)用的天线	151
5.2.4.1 仪表着陆系统的航向信标天线	152
5.2.4.2 仪表着陆系统下滑信标天线	154
5.3 测向天线和测向系统	160
5.3.1 振幅测向器和相位测向器	160
5.3.2 圆形天线阵测向器和模拟系统	164
5.3.3 多普勒测向器	168
5.4 雷达天线和雷达系统	171
5.4.1 雷达天线的面反射器	175
5.4.1.1 切割抛物面天线	176
5.4.1.2 抛物柱面天线	177

5.4.1.3	特殊要求的多弯曲反射器	179
5.4.2	方向扫描和相位控制的雷达天线	180
5.4.3	跟踪雷达	184
5.4.4	二次雷达	187
5.4.5	发展趋势	189
5.5	与飞行体、卫星和宇宙飞船有联系的地面站 天线.....	190
5.5.1	气象卫星地面站	191
5.5.2	卫星导航系统中的地面站	194
5.5.3	轨道跟踪天线	199
5.5.3.1	圆锥扫描跟踪天线	200
5.5.3.2	多通道(单脉冲)跟踪天线	203
5.5.4	通信卫星和遥测用的地面站天线	205
5.5.5	卫星和宇宙飞船轨道测量用的干涉仪	211
5.6	相控阵天线.....	214
5.6.1	移相器	216
5.6.2	通过改变工作频率改变相位	217
5.6.3	通过中频移相来改变相位	218
5.6.4	矩阵连接的多波束定向性天线	219
5.6.5	数字相位控制	222
5.6.6	天线单元的延时性馈电	223
5.6.7	相控阵天线的天线单元	226
第六章	天线测试方法	228
6.1	天线阻抗的测量.....	228
6.2	方向图的测量.....	238
6.3	天线增益的测量.....	242
6.4	天线方向图的综合和天线口径上幅 度、相位分布的测试	244

6.5	场强的测量	246
6.6	干扰场强和天线噪声温度的测量	250
第七章	天线架设及其它	254
7.1	天线支架	254
7.2	天线材料与腐蚀现象	260
7.3	大抛物面天线的机械问题及其传动机构	263
7.4	天线罩	265
	参考文献	266

第一章 空中交通管制、导航和雷达

空中交通管制和导航设备的任务是：根据地理经纬度，或相对于一个或几个参考点的距离和角度(距离-方位导航)测量飞行目标某瞬间的位置，测量飞行目标与航向、准线或导向平面的偏差，测量飞行目标的高度、速度、加速度以及飞行轨道的方向。

利用从飞行器或地面站测得的数据，就可计算出继续飞行所需修正轨道的理论数据。空中交通管制和导航设备除了对飞行目标直接定位、导航和控制以外，还有其它的一些用途：如观察附近的空中交通，连续记录大气变化情况，引导飞机起飞和着陆等。随着空中交通日益拥挤，飞机飞行速度日益加快，测量方法也越来越需要精确。为了适应日益频繁的空中交通，必须有准确且能够控制的飞程序，虽然很早就把空域划分成航路、空中走廊和等候区，但目前感到困难的是对同一区域中飞行器进行识别的问题。这个问题是通过从地面站测量飞机辐射频率方向、三角测量定位、测向波束聚束的雷达定位，或者是二次雷达等方法来解决。

飞行器带有自导航设备时，可以应用以下的方法进行自导航；

通过安装在飞行路线信标点上的无线电航标或无线电指向台；

测量几个相隔一定距离的发射台辐射电磁波信号的相位差(即双曲线导航)；

通过适当天线从固定参考点发射的组合方向图的引导波束(伏尔、塔康);

通过对已知位置的发射台测向。

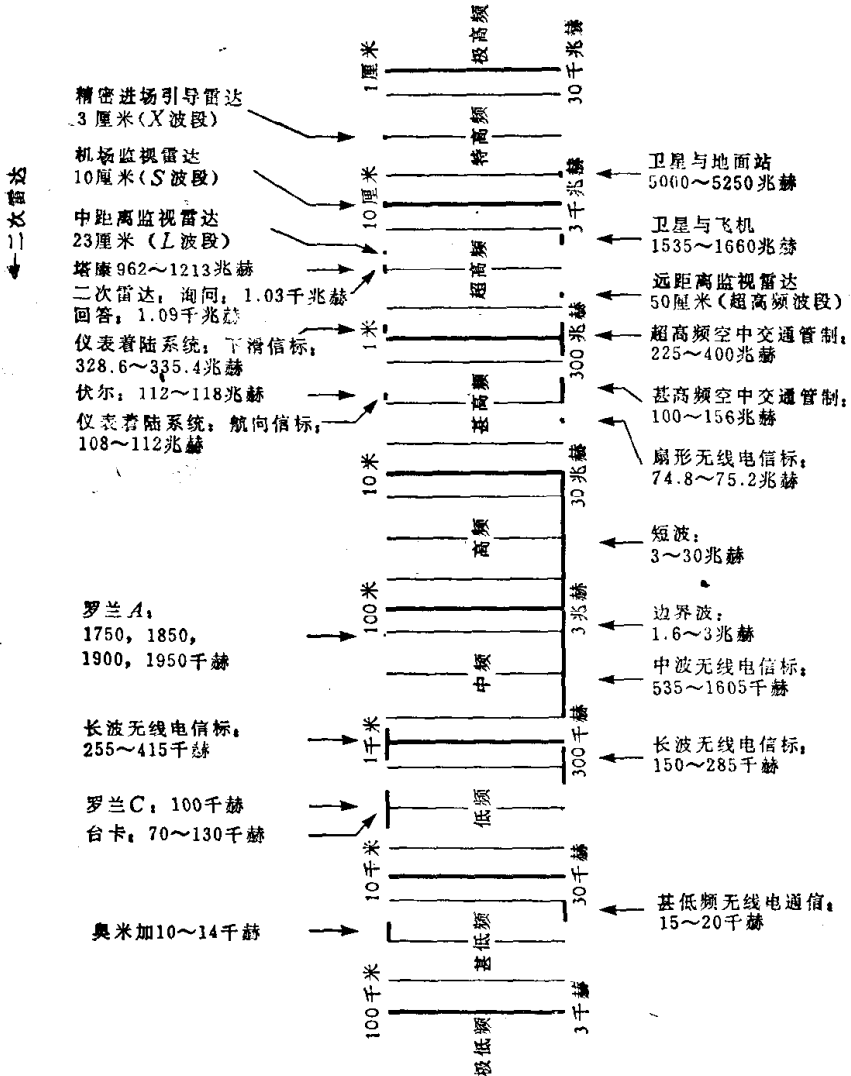
用载波航向调制、键控开关或者是其它识别方法,可以自动地计算出方位或距离。雷达是不需要地面设备配合的一种机载导航设备,它是通过测量电波传播时间来确定飞行器的高度,而通过测量多普勒频移来确定飞行速度。

有把惯性导航系统和无线电导航系统组合起来应用的。也有用机载计算机把全部有用信息进行运算来自动导航的设备。可以使用专门的着陆辅助设备,使飞机不偏离航线并沿着无线电的引导波束在跑道上降落。这种控制着陆过程的高度偏差和方位偏差的系统叫做仪表着陆系统。把仪表着陆系统同雷达高度表和航线计算机结合起来,就构成自动着陆系统(也称为盲目着陆系统)。还有一种着陆系统是用地面雷达测量飞行目标瞬时位置的方位和高度,并把测得和算出的数据传送给飞行器的航向修正装置。

在机场附近应用地面的无线电导航也很重要。它是把雷达测得的和无线电测向器所获得的信息,用无线电话通知给驾驶员。在甚高频波段和超高频波段中,有些频带是用于通信的,这些频带有许多传输通路。飞行员和机场之间,由空中交通控制指挥台的调度员进行联系。为适应更大经济区域的空中交通,特别是为了适应未来超音速民航,建立了国际控制中心(欧洲控制中心),这个控制中心能把远距离探测雷达的数据进行综合计算。由于米波的作用距离有限,所以在越洋飞行中需要附加短波通讯。在海洋上空和未“开发”大陆上空飞行时不使用近距离导航,飞机上驾驶员是用长波和中波导航方法来了解飞机的所在位置(如用罗兰、台克垂亚或奥米加

导航)。

表 1 不同设备上使用的波段



此外,还有应用人造地球卫星的导航系统。众所周知,人造地球卫星的地位正日益重要。这种导航方法是通过测量卫

星信号的多普勒频移，测量脉冲波在卫星和飞机之间经过的时间，即可准确知道飞机的位置。

由于高空远程火箭和洲际火箭的出现，提出了新的导航任务。对此采用的定位方法和航线修正法是由地面发射无线电信号，逐段控制火箭弹道轨迹。有一种波束制导法是令火箭沿地面站天线的制导波束自动飞往目的地。还有一些导航方法是通过机载仪器自动寻的的，这些机载仪器在飞行目标受到地面雷达天线辐射波束照射后，立即感受到地面天线的雷达脉冲。最后要讲的是对洲际火箭的及早发现、宇宙飞船的引导、地球卫星的轨道校正和外层空间飞行器的控制等。为此，所需的地面设备和机载设备必须考虑其最大传输距离上的衰耗和所需的最小接收功率。为了确定卫星和宇宙飞行器的轨道，必须用角分辨率高的干涉仪；传递指令和记录测量数据要使用程序控制或自动跟踪的遥控和遥测地面天线。研制新型飞机时应用模拟遥测技术。

第二章 关于天线与电波的一般讨论

空中交通管制、导航及雷达设备上,应用了很多种结构的
天线。系统的准确度主要决定于所用天线的特性及地面站与
飞行器之间电波传播的情况。因为天线是电子设备的一个最
后组成部分,又是传输路程终端的波型变换器,因此起着重要
的作用。系统的效率和信噪比如何,能否无失真地传递信息,
与天线都是有关系的。天线必须与导航和定位方法相适应。

现今天线的结构形式虽然有很多类型,但应用的无非就
是几种基本原理,这些原理可用一系列数学式表示。由于边
界条件和耦合影响,即使对于比较简单的辐射元和天线阵,解
其数学式就已经相当麻烦。测量天线特性时在近场处不可避
免有影响场分布的因素,多了一个“误差”。远场测试等于是
积分。想说明口径上电流与电压分布以及近场情况是不大容
易的事。

天线技术的最新发展有:宽带对数辐射器、大型面反射
器天线、有最大作用距离的雷达天线、低噪声卫星地面站天
线、大基板多普勒测向天线、可控制的短波天线、有源的单个
辐射器、可控制的有源天线阵、数据处理天线、干涉仪系统的
天线等等。这些天线各有其不同的特性,有的还要特别考虑
机械上的参数。

研制天线系统时应采用自动测试技术,以便使天线工程
人员能够完成复杂的测量。例如绘制天线空间辐射方向图,
对多个平面剖面测量的同时可以获得天线在宽频率范围的

特性。

天线设计是直接与其他科学领域有关系的，例如计算天线结构时要应用静力学和动力学；研究天线受气流的影响时要涉及气体动力学；在考虑冰冻条件时要用到气象学；在考虑天线受环境影响时要涉及金属腐蚀化学；研究超压保护、电晕现象和避雷问题时要用到塑料与绝缘材料工艺学和高压技术；设计机械自动跟踪的定向天线时还要用到自动调节技术。

相干电磁波的辐射特性是构成空中交通管制和导航的前提。除了惯性导航系统、光学定位和导航系统以外，主要应用电磁波相关性的无线电导航系统。随着航空事业的飞速发展，无线电导航系统将不断增加和改进。

干涉现象和多普勒频移理论是电磁波定位方法的基础。定位的精度、分辨能力及作用距离都与电波传播过程有密切关系。忽视周围环境和传播路程的影响，就会产生相应的误差。因此，要进行系统设计就得先要研究电波传播。此外，还需知道一系列参数：如与极化有关的反射特性、传播衰减、土壤导电系数的影响，以及绕射现象等等。

第三章 电波传播

首先我们研究离一个发射天线距离 D 处的远场。这个远场实际上可以看成是均匀平面电磁波，其中电场强度矢量 \mathbf{E} 和磁场强度矢量 \mathbf{H} 的相位相同，而在空间彼此垂直。通常把电波电场强度矢量 \mathbf{E} 的方向称为电波极化方向。空间电场矢量方向不同并且相位不同的两个线极化波，就形成圆极化波或椭圆极化波。如果在传播中没有衰减（即相当于在自由空间中传播），则电波的电磁场振幅值就与 $1/D$ 成比例。

根据电波由发射天线到接收天线的传播途径，通常把电波分为地波和天波两大类。地波是由地面上若干个场分量组成的。直接架设在地面上的垂直极化天线只产生一种沿着地球表面传播的地面波形式。在发射天线和接收天线离开地面较高的情况下，则产生地波的另一种形式，这时在接收点的电场强度，是由直接来自发射天线的直达波和由地面反射的反射波相干涉的结果。其中反射波由地面反射时受地面特性的影响。对于离开发射天线后从电离层反射到接收地点而不受地面影响的在空间传播的电波称为天波。

电波的传播方式与电波的频率关系很大。地面波在高频 ($f > 30$ 兆赫) 时衰减很大，通常不能用于通信。反之，在低频时地面波却有着重要的应用。在理想导电的地面上，地波为垂直极化波，电波的电场强度矢量垂直于地面。在理想导电地面上不存在纯水平极化的地面波，这是因为不能存在和理想导电地面平行的电场强度矢量。在不理想导电的地面上，

地波主要是垂直极化波，而在传播过程中产生传播方向上的水平分量。根据电波的波长，地波在陆地上可以传播几百公里，而在海洋上可以传播几千公里。

天波在低频 ($f < 30$ 兆赫) 时由电离层反射回地面，还可通过地面反射后再由电离层反射到地面，并能够多次重复下去 (“跳跃距离”)。天波与发射天线的极化无关，通过在电离层中的法拉弟旋转效应，由电离层反射后产生与原来极化方向不同的场强分量。两个分量叠加后可形成圆极化波。

当电波频率在 30 兆赫以上时，天波将穿出电离层；而地波的地面波形式由于传播中受到严重的衰减而趋消失。这时只有由直射波和地面反射波相干涉产生的地波分量。对于这种情况通常叫做视线传播 (或准视线传播)。在这个频率范围，只要天线辐射能量中的一部分作用于地面或者被地面反射，就应考虑地面的影响。地面反射波干扰结果使场强与高度有很大的关系，即可能导致地面站和飞行器之间的联系中断。其中最低限度的干扰数是随天线离地面的距离和频率而增加。计算场强时要将直接的辐射场强和反射的场强按相位相加。这和考虑对流层折射和地面绕射时应用的辐射光学定理非常相似。

电波不仅有反射、折射和绕射，而且在遇到障碍物时还要产生散射。这种散射效应在电离气体或含水汽的气体等不均匀介质中就能产生。虽然散射能量非常小，但散射通信就是在这个基础上发展起来的。这种通信方式应用的原理是：充分利用电波在电离层和对流层中的散射，而在接收站通过对散射能量的最小总值进行估算来实现。除了短波通信和卫星通信以外，这也是远距离通信的一种重要方法。由于可以对散射能量进行接收 (在 $f > 30$ 兆赫时)，就为监视远距离信息

源提供了唯一的可能性。

卫星通信一般采用自由空间传播方式工作。应选择电离层和对流层中传播衰减尽可能小的频段。这种通信方式由于有效场强很小，所以干扰场强是值得特别重视的问题。原则上讲，在全部频率范围上除了有用信号场强以外，还要考虑附加干扰场强。在这里干扰场强是天线工程师很重视的一个问题，可以通过适当设计天线设备来改善信噪比。同时还应很好地选择天线架设地点。

在定量计算传播衰减和场强数值时，必须考虑地面的球形特性和大气层的折射作用。在考虑大气层中电波折射作用时，通常取地球半径增大三分之一来计算。自然，这时对流层和电离层的高度也都相应看作增大了。实际上，对流层和电离层只不过是包围着地球的薄薄的几个外层，离地面的高度仅为地球直径的百分之几。

所有场强值的计算都是根据自由空间场强开始计算的。自由空间场强就是给定的辐射功率在自由空间上产生的场强。通常把参考辐射器(如半波偶极子或球形辐射器)辐射的功率称为有效辐射功率(ERP)。自由空间场强是与频率无关的，也就是说，用一个给定的有效辐射功率(单位为千瓦)，在距离 D (单位为公里)的地方，不论用哪一个频率所产生的场强都相等。这个场强可用毫伏/米或比1微伏/米大的分贝数表示。

在自由空间中(没有吸收和散射)传播衰减是与频率无关的。通过辐射能量流密度

$$S = E^2 / Z_0 \text{ (瓦/米}^2\text{)}$$

其中 E 的单位为伏/米，而 $Z_0 = 120 \pi \Omega \approx 376 \Omega$ 。

换算出接收天线所接收到的功率，可以求出与频率有关的传

播衰减。在接收地点实际预期的场强，是通过计算传播路径上的损耗来确定的。即从自由空间场强中减去传播路径上的损耗。

3.1 长中波的传播

长波传播理论研究地波和天波的衰减过程。频率低于 10 千赫($\lambda = 30$ 公里)的电波，其波长和地面至电离层的距离(D 层是 60~90 公里)为同一数量级。对于这样的频率，电波是在一壁为地球表面而另一壁为电离层下沿的球面波导中传播，从可能传播的波型中算出相速和衰减。产生地波衰减的原因为自由空间的能量扩散、绕射和地面吸收衰减；而天波衰减则为反射、地面和电离层上的吸收衰减。地波衰减包含一个与自由空间扩散衰减有关的传播因子，其与频率和距离有关。可以指出，频率很低时地波的场强振幅减小主要是由地球曲面决定的。只是在甚低频波段(VLF)的较高频率(>30 千赫)上，地面衰减才会带来附加的损耗。

人们对 30 兆赫以下电波传播时的 D 层影响详细地进行了研究。主要的参数是：自由电子浓度、电子密度与高度的关系、以及自由电子与离子和不带电荷粒子的碰撞次数。这些参数与纬度、时辰、季节和太阳黑子周期有关。人们把纬度约 70° 以下的 D 层称为无干扰 D 层，把两极地区的 D 层称为受干扰 D 层。在两极地区地磁场对传播有明显的影响。

研究 D 层结构能够具体地了解衰减特性和反射特性。衰减和反射的总特性，是通过接收时对电波电场强度振幅和相位的测量确定出来的，它与频率有关。这些对于了解低频和甚低频导航方法的精度是重要的。低频和甚低频波段也用