

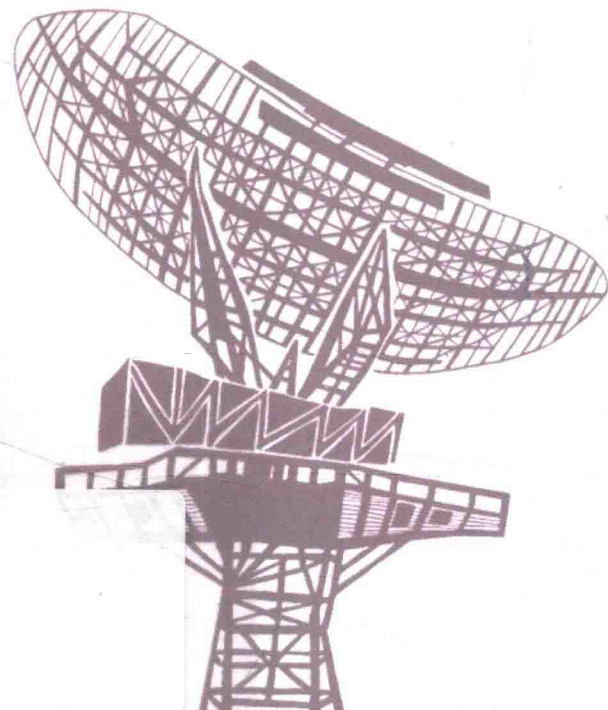
电磁环境效应科普读物

天线 Antenna

——射频电能的收集器与中转站

——Radio Frequency Energy Collector and Transfer Station

电子信息系統複雜電磁環境效應國家重點實驗室 編著



國防工業出版社
National Defense Industry Press



电磁环境效应科普读物

天线 Antenna

——射频电能的收集器与中转站

——Radio Frequency Energy Collector and Transfer Station

电子信息系統复杂电磁环境效应国家重点实验室 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从电磁环境效应产生的角度出发,对天线的历史、发展和基础理论进行了较全面和深入地梳理,对典型天线及其基本用途进行介绍。从电磁波的发现与应用、天线的产生及发展、天线基础理论、天线测量,以及典型天线的介绍及应用等几个方面,系统地介绍了天线相关的基础问题。

本书是电磁环境效应科普读物系列之一,主要是关于天线基础知识的介绍和总结,适合高等院校电子信息工程专业、从事电磁环境效应相关领域研究工作的人员以及初、高级中学电子信息技术爱好者阅读使用,也可作为电子信息工程、通信、雷达等相关专业的辅导和教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

天线:射频电能的收集器与中转站/电子信息系统
复杂电磁环境效应国家重点实验室编著. —北京:国防
工业出版社,2017. 12

ISBN 978-7-118-11478-2

I. ①天… II. ①电… III. ①天线 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 320626 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 7 字数 134 千字

2017 年 12 月第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《天线——射频电能的收集器与中转站》

编写组

组 长 汪连栋

副组长 曾勇虎 申绪润

成 员 韩 慧 洪丽娜 董 俊 郝晓军

冯润明 许 雄 王亚华 于 涛

王满喜 戚宗锋 王华兵 杨晓帆

前 言

本书是根据电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室开放交流计划,结合实验室研究方向与专业实践经验,在总结梳理相关领域资料基础上编写的电磁环境效应科普读物。

“天线”是无线信号收、发的关键环节,高频设备产生的射频信号需要通过某种装置辐射到空间中,同时空间存在的电磁信号也同样需要通过某种装置进入高频接收设备当中,“天线”就是这种装置,通过它架起了空间射频能量与高频收、发设备间的桥梁。

“天线”是如何工作的呢?我们知道天线多是由金属导体组成,因此它上面可以存在辐射电流或者感应电流。当“天线”作为射频信号的辐射器时,基于天线端口的馈电,整个天线表面会分布辐射电流,由于高频电流的存在,射频信号的能量就可以顺利进入空间;当“天线”作为空间电磁信号的传感器时,空间射频信号作用于“天线”,使其表面产生感应电流,感应电流激励天线馈电端口,进而产生高频电压/电流信号,最终完成空间射频能量向高频设备的传输。

“天线”的相关内容博大精深,单就描述工作性能的指标就多达十余项,本书主要作为科普类读物,在整理大量有关“天线”类著作的基础上,简化了相关理论推导过程,通过大量浅显易懂的实例说明“天线”的原理及其应用相关问题。通过本书的撰写,希望能够带领读者进入“天线”的奇妙世界,开启电磁环境效应研究的美妙旅程。

本书包括5个章节:第1章天线的历史与发展;第2章天线基础;第3章天线的测量;第4章典型天线介绍;第5章天线的典型应用。在本书的撰写过程中,作者得到了其研究团队同仁的大力协助;在后期的审稿过程中,电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室的各位同事通过广泛的调研与深入的研

讨,对编写工作提出了许多建设性的意见;另外,本书的编写还得到了 613319 项目组和国防工业出版社的大力支持,在此表示真诚的谢意。同时,本书参考了国内外大量的相关文献和研究成果,对这些作者和研究人员,在此一并表示感谢。

天线领域的相关研究还在向前发展,许多研究工作需要不断地创新与完善。尽管我们在撰写过程中做了很大努力,但囿于认识和水平,书中难免有不当和疏漏之处,敬请读者和各位同仁批评指正。

编者

2017年8月

目 录

第 1 章 天线的历史及发展/1

1.1 电磁波的发现与应用/2

1.2 天线的发展/4

参考文献/16

第 2 章 天线基础/17

2.1 基本原理/18

2.2 发射天线的性能参数/19

2.2.1 方向函数/19

2.2.2 方向图/20

2.2.3 方向图参数/21

2.2.4 方向系数/23

2.2.5 天线效率/24

2.2.6 增益系数/25

2.2.7 天线的极化/26

2.2.8 输入阻抗与辐射阻抗/27

2.2.9 频带宽度/28

2.3 互易定理与接收天线参数/29

2.3.1 互易定理/29

2.3.2 有效接收面积/30

2.3.3 等效噪声温度/31

2.4 特殊性能指标/32

2.4.1 线天线专有性能指标/32

2.4.2 口径天线专有性能指标/34

2.4.3 反射器天线专有性能指标/34

2.4.4 阵列天线专有性能指标/35

2.4.5 谐振天线专有性能指标/36

2.5 天线分类/36

2.5.1 按分析方法分类/36

2.5.2 按使用波段分类/36

2.5.3 按方向性分类/37

2.5.4 按频带宽带分类/37

2.5.5 按形状分类/37

2.5.6 按工艺分类/39

参考文献/39

第3章 天线的测量/40

3.1 电路参数的测量/41

3.1.1 电路参数的术语/41

3.1.2 网络的散射参数/42

3.1.3 散射参数的测量/43

3.2 辐射特性测试场地/46

3.2.1 天线场的区域划分/46

3.2.2 反射测试场/46

3.2.3 自由空间测试场/48

3.3 天线方向图的测量/55

- 3.3.1 概述/55
- 3.3.2 测量方法/56
- 3.4 天线增益测量/58
 - 3.4.1 概述/58
 - 3.4.2 增益的测量方法/58
- 3.5 天线极化测量/62
 - 3.5.1 概述/62
 - 3.5.2 极化的测量方法 /64
- 参考文献/65
- 第4章 典型天线介绍/66

 - 4.1 线天线/67
 - 4.1.1 对称振子天线/67
 - 4.1.2 直立振子天线与水平振子天线/68
 - 4.1.3 引向天线与电视天线/68
 - 4.1.4 移动通信基站天线/69
 - 4.1.5 螺旋天线/71
 - 4.1.6 行波天线/72
 - 4.1.7 宽频带线天线/75
 - 4.1.8 缝隙天线/78
 - 4.1.9 微带天线/81
 - 4.2 面天线/83
 - 4.2.1 旋转抛物面天线/83
 - 4.2.2 卡塞格伦天线/84
 - 4.3 阵列天线/85
 - 4.4 智能天线/85
 - 参考文献/86

第5章 天线的典型用途/87

- 5.1 卫星通信天线/88
 - 5.1.1 卫星通信/88
 - 5.1.2 卫星天线/95
 - 5.1.3 基站天线/95
- 5.2 移动电话天线/95
 - 5.2.1 手机天线/96
 - 5.2.2 基站天线/96
- 5.3 广播电视天线/97
- 5.4 飞行器天线/98
- 5.5 汽车天线/98
- 5.6 雷达天线/99
- 5.7 通信电台天线/99
- 参考文献/101

第1章

天线的历史及发展

1.1 电磁波的应用与发现

1.2 天线的发展

Antenna

天线是从空间辐射或接收电磁波(信息)的装置。天线是一种变换器,它把传输线上传播的导行波变换成在无界媒介(通常是自由空间)中传播的电磁波,或者进行相反的变换。天线广泛应用于无线电通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥感、射电天文等工程系统。凡是利用电磁波来传递信息的,都依靠天线来工作。

1.1 电磁波的发现与应用

【电磁波】

从科学的角度来说,电磁波是能量的一种,凡是高于绝对零度的物体,都会释放电磁波。且温度越高,释放出的电磁波波长就越短。表 1-1 为电磁波谱和波段划分。

表 1-1 电磁波谱和波段划分

光谱区	频率范围/Hz	空气中波长	作用类别
宇宙或 γ 射线	$>10^{20}$ (能量 MeV)	$<10^{-12}\text{m}$	原子核
X 射线	$10^{20} \sim 10^{16}$	$10^{-3}\text{nm} \sim 10\text{nm}$	内层电子跃迁
远紫外光	$10^{16} \sim 10^{15}$	$10\text{nm} \sim 200\text{nm}$	电子跃迁
紫外光	$10^{15} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$200\text{nm} \sim 400\text{nm}$	电子跃迁
可见光	$7.5 \times 10^{14} \sim 4.0 \times 10^{14}$	$400\text{nm} \sim 750\text{nm}$	价电子跃迁
近红外光	$4.0 \times 10^{14} \sim 1.2 \times 10^{14}$	$0.75\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$	振动跃迁
红外光	$1.2 \times 10^{14} \sim 10^{11}$	$2.5\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$	振动或转动跃迁
微波	$10^{11} \sim 10^8$	$1\text{mm} \sim 1000\text{mm}$	转动跃迁
无线电波	$10^8 \sim 10^5$	$1\text{m} \sim 1000\text{m}$	原子核旋转跃迁
声波	$20000 \sim 30$	$15\text{km} \sim 10^6\text{km}$	分子运动

无线电技术中使用的电磁波成为无线电波。表 1-2 为无线电波波段划分。

表 1-2 无线电波波段划分

频段名称	频率范围	波长	传播方式	用途
甚低频(VLF)	$3 \sim 30\text{kHz}$	万米波(甚长波)		
低频(LF)	$30 \sim 300\text{kHz}$	千米波(长波)	地波	超远程无线电通信和导航
中频(MF)	$300 \sim 3000\text{kHz}$	百米波(中波)	地波和天波	调幅无线电广播、电报、通信
高频(HF)	$3 \sim 30\text{MHz}$	十米波(短波)		
甚高频(VHF)	$30 \sim 300\text{MHz}$	米波(超短波)	近似直线传播	调频无线电广播、电视、导航
特高频(UHF)	$300 \sim 3000\text{MHz}$	分米波	直线传播	电视、雷达、导航
超高频(SHF)	$3 \sim 30\text{GHz}$	厘米波		
极高频(EHF)	$30 \sim 300\text{GHz}$	毫米波		
	$300 \sim 3000\text{GHz}$	亚毫米波		

1831年,法拉第首次发现电磁感应现象,即:当一块磁铁穿过一个闭合线路时,线路内就会有电流产生。1865年,英国的J. C. 麦克斯韦总结了前人的科学成果,提出了电磁波学说。1887年,德国科学家H. R. 赫兹用一个振荡偶子产生了电磁波,在历史上第一次直接验证了电磁波的存在。

【赫兹实验验证了电磁波的存在】



为了用实验来验证麦克斯韦高深莫测的电磁场理论,验证电磁波的存在,赫兹精心设计了一个电磁波发生器,对“电火花实验”进行了一系列深入的研究。赫兹用两块边长40.64cm的正方形锌板,每块锌板接上一个30.5cm长的铜棒,铜棒的一端焊上一个金属球,将铜棒与感应圈的电极相连。通电时,如果使两根铜棒上的金属球靠近,便会看到有火花从一个球跳到另一个球,这些火花表明电流在循环不息。在金属球之间产生的这种高频电火花,即电磁波。麦克斯韦的理论认为由此电磁波便会被送到空间去。赫兹为了捕捉这些电磁波,证明电磁波确实被送到了空间,他用一根两端带有铜球的铜丝弯成环状,当作检波器。他把这个检波器放到离电磁波发生器10m远的地方,当电磁波发生器通电后,检波器铜丝圈两端的铜球上产生了电火花。这些火花是怎样产生的呢?赫兹认为:这便是电磁波从发射器发出后,被检波器捉住了;电磁波不仅产生了,而且传播了10m远。

1888年,赫兹的发现激发了俄国科学家波波夫(亚历山大·斯塔帕诺维奇·波波夫, Александр Степанович Попов, 1859—1906)的研究兴趣。1889年,他多次重复了赫兹的实验,并提出“电磁波可以用来向远处发送信号”。在一次实验中,波波夫发现金属屑检波器的灵敏度异常地高。接收电磁波的距离比起平时有明显的增加。他没放过这个异常现象,仔细地观察了周围环境,也没发现什么变化。找了很多原因,但都一一排除了。他感到很奇怪,再试一次,灵敏度还是异常得高。忽然,他瞥见有一根导线搭在检波器上。很明显,这根导线增加了检波器的接收能力,增加了灵敏度。波波夫真是喜出望外,提高机器的灵敏度,增加传收距离的愿望竟在这无意中达到了。他使用的这根导线是世界上的第一根天线。波波夫对无线电通信的杰出贡献,就是他发现了天线的作用。1894年,波波夫改进了赫兹的实验装置,利用撒了金属粉末的检波器,通过架在高空的导线,记录了大气中的放电现象。这是世界上第一台无线电接收机。1895年5月7日,波波夫在俄国的物理学部年会上表演了他创造的这个“雷暴指示器”。1896年3月24日,波波夫又在彼得堡大学两幢相距250m的大楼之间表演了无线电通信,他和助手进行了一次正式的无线电传递莫尔斯电码的表演。1897年,波波夫奉命在俄国波罗的海舰队的一些舰艇上建立无线电通信设

备。1899年,波波夫将无线电投入军事应用,建立了40多km的无线电通信网。

1894年,意大利科学家G.马可尼在赫兹实验的基础上,在家中的楼上安装了发射电波的装置,楼下放置了检波器,并让检波器与电铃相接。他在楼上一接通电源,电磁波便穿过了检波器,让楼下的电铃迅速响了起来。第二年(1895年)夏天,马可尼又完成了一次非常成功的实验。到了秋天,实验又获得很大的进步。他把一只煤油桶展开,变成一块大铁板,作为发射的天线。把接收机的天线高挂在一棵大树上,用以增加接收信号的灵敏程度。他把发射机放在一座山岗的一侧,接收机安放在山岗另一侧的家中。当他的助手发送信号时,他有些紧张地守候着信号接收机。突然,电铃发出了清脆的响声。这响声对他来说比动人的交响乐更悦耳动听,让他几乎跳了起来。马可尼成功了!这次实验的距离达到2.7km,出现了历史性的突破。

1896年,马可尼抱着自己简陋的无线电发射机来到了工业革命的中心——英国,在伦敦开始了自己的创业生涯。1896年6月,他用电磁波进行了约14.4km距离的无线电通信试验;1898年,在英吉利海峡两岸进行无线电报跨海试验成功,通信距离为45公里;1899年又建立了106千米距离的通信联系。1901年12月,马可尼在加拿大用风筝牵引天线,成功地接收到了大西洋彼岸的无线电报,完成了横跨大西洋3600km的无线电远距离通信。

马可尼和波波夫关于无线电通信的发明,都是在1895年—1901年这短短的五六年时间内,各自独立完成的。因此可以说,无线电应用的大门是马可尼和波波夫同时打开的。天线也随着无线电的应用和发展而逐渐发展起来。

1.2 天线的发展

最早的发射天线是赫兹在1887年为了验证麦克斯韦根据理论推导所作关于存在电磁波的预言而设计的。它是两个约为30cm长、位于一直线上的金属杆,其远离的两端分别与两个约 40cm^2 的正方形金属板相连接,靠近的两端分别连接两个金属球并接到一个感应线圈的两端,利用金属球之间的火花放电来产生振荡。当时,赫兹用的接收天线是单圈金属方形环状天线,根据方环端点之间空隙出现火花来指示收到了信号。马可尼是第一个采用大型天线实现远洋通信的,所用的发射天线由30根下垂铜线组成,顶部用水平横线连在金属方形环状天线,根据方环端点之间空隙出现火花来指示收到了信号。这是人类真正付之实用的第一副天线。自从这副天线产生以后,天线的发展大致分为四个历史时期。

1. 20世纪30年代之前:线天线时期

【线天线】

线天线是由线径远比波长小,长度可与波长相比的一根或多根金属导线构

成的天线。主要用于长、中、短波及超短波波段,作为发射或接收天线。

在无线电获得应用的最初时期,真空管振荡器尚未发明,人们认为波长越长,传播中衰减越小。因此,为了实现远距离通信,所利用的波长都在1000m以上。在这一波段中,显然水平天线是不合适的,因为大地中的镜像电流和天线电流方向相反,天线辐射很小。此外,它所产生的水平极化波沿地面传播时衰减很大。因此,在这一时期应用的是各种不对称天线,如倒L形、T形、伞形天线等。由于高度受到结构上的限制,这些天线的尺寸比波长小很多,因而是属于电小天线的范畴。

◆ 倒L形天线

在单根水平导线的一端连接一根垂直引下线而构成的天线。因其形状像英文字母L倒过来,故称倒L形天线。俄文字母的Г字正好是英文字母L的倒写。故称Г型天线更方便。它是垂直接地天线的一种形式。为了提高天线的效率,它的水平部分可用几根导线排在同一水平面上组成,这部分产生的辐射可忽略,产生辐射的是垂直部分。倒L形天线一般用于长波通信。它的优点是结构简单、架设方便;缺点是占地面积大、耐久性差。

◆ T形天线

T形天线是最常见的一种垂直接地的天线。一般用于长波和中波通信。在水平导线的中央,接上一根垂直引下线,形状像英文字母T,故称T形天线。它是最常见的一种垂直接地的天线。它的水平部分辐射可忽略,产生辐射的是垂直部分。为了提高效率,水平部分也可用多根导线组成。T形天线的特点与倒L形天线相同。它一般用于长波和中波通信。

◆ 伞形天线

在单根垂直导线的顶部,向各个方向引下几根倾斜的导体,这样构成的天线形状像张开的雨伞,故称伞形天线。它也是垂直接地天线的一种形式。其特点和用途与倒L形、T形天线相同。

20世纪20年代,业余无线电爱好者发现短波能传播到很远的距离。A. E. 肯内利和Q. 亥维赛发现了电离层的存在和它对短波的反射作用,从而开辟了短波波段和中波波段领域。这时,天线尺寸可以与波长相比拟,促进了天线的顺利发展。这一时期,除了抗衰落的塔式广播天线外,还设计出各种水平天线和各种天线阵,采用的典型天线有偶极天线(见对称天线)、环形天线、长导线天线、同相水平天线、八木天线(见八木——宇田天线)、菱形天线和鱼骨形天线等。这些天线比初期的长波天线有较高的增益、较强的方向性和较宽的频带,后来一直得到使用并经过不断改进。

【天线阵】

由许多相同的单个天线(如对称天线)按一定规律排列组成的天线系统,也

称天线阵。天线在通信、广播、电视、雷达和导航等无线电系统中被广泛应用,起到了传播无线电波的作用,是有效地辐射和接收无线电波必不可少的装置。

◆ 偶极子天线

偶极子天线用来发射和接收固定频率的信号。虽然在平时的测量中都使用宽带天线,但在场地衰减和天线系数的测量中都需要使用偶极子天线。图 1-1 为偶极子天线。



图 1-1 偶极子天线

一天,戴柏(Diogenes Dipole)走过一个游乐场,发现狮子正在玩跷跷板,他发现这些狮子都能很快地保持平衡,于是突发奇想:如果天线也能保持平衡,效果会怎样呢?回到家后,戴柏马上拿了一条导线接上机器外壳,另一条导线则接到发射机输出,把两根导线对称摆开,这就成为一组新的天线。这种平衡天线非常好用!这就是大名鼎鼎的“双偶极”(Dipole)天线,为了纪念戴柏,以他的名字来命名。

由于家里空间不够大,无法架设双偶极天线,所以无线电爱好者崔伯(Von Trap)沿着天线,每隔几英尺就绕几个圈,把过长的部分缠绕起来,并且在缠绕的电感上并联电容,这就是“崔伯双偶极天线”(Trap Dipole),也称陷波式偶极天线。

承袭者温顿(Raoul Windom)发现跷跷板放上不同重量的物体,通过调整距离也可以达到平衡,天线应该也可以像这样,以人工方式调整,达到平衡(匹配)。于是温顿天线(偏馈天线)被发明了。第二次世界大战期间,温顿天线广泛应用在战机上,直到喷气机时代才光荣退休。

◆ 环形天线

环形天线(图 1-2)是将一根金属导线绕成一定形状,如圆形、方形、三角形等,以导体两端作为输出端的结构。绕制多圈(如螺旋状或重叠绕制)的称为多圈环天线。根据环形天线的周长 L 相对与波长 λ 的大小,环形天线可分为电大环($L \geq \lambda$)、中等环($\lambda/4 \leq L \leq \lambda$)和电小环($L < \lambda/4$)三类。电小环天线是实际中应用最多的,如收音机中的天线、便携式电台接收天线、无线电导航定位天线、场

设计的探头天线等。电大环天线主要用作定向阵列天线的单元。

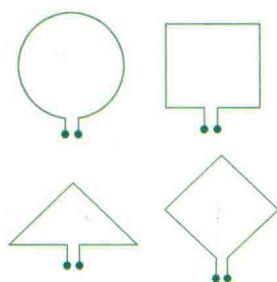


图 1-2 环形天线

◆ 同相水平天线

同相水平天线(图 1-3)是由同相馈电的水平对称振子组成的边射式平面天线阵,为了保证单向的辐射和接收,在阵面的一侧设置反射面。这种天线可用于短波干线通信或广播和米波警戒雷达等。



图 1-3 同相水平天线

◆ 八木天线

八木天线(图 1-4)是由一个有源振子(一般用折合振子)、一个无源反射器和若干个无源引向器平行排列而成的端射式天线。在 20 世纪 20 年代,由日本东北大学的八木秀次和宇田太郎两人发明了这种天线,被称为“八木—宇田天线”,简称“八木天线”。八木天线的确好用,它有很好的方向性,较偶极天线有高的增益。用它来测向、远距离通信效果特别好。如果再配上仰角和方位旋转控制装置,更可以随心所欲与包括空间飞行器在内的各个方向上的电台联络,这种感受从直立天线上是得不到的。

◆ 菱形天线

菱形天线是一种宽频带天线。它是由一个水平的菱形悬挂在四根支柱上构成的,菱形的一只锐角接在馈线上,另一只锐角接一个与菱形天线特性阻抗相等的终端电阻(图 1-5)。