

SMALL ANTENNAS



小型天綫

SMALL ANTENNAS

兵器工業出版社

小型天线

SMALL ANTENNAS

[日] K Fujimoto, K Hirasawa 著
[英] A Henderson, J James

陈志宁 译
杜汉卿 校

兵器工业出版社

(京)新登字 049

内 容 简 介

本书是根据日、英天线专家合写的《小型天线》的英文本翻译的。全书共分四章,第一章绪论,简介小型天线的基本特性和详细分类;第二章线天线理论和设计;第三章物质加载天线;第四章小型天线靠近(或接触)导体时的分析。本书讲解方法新颖,密切结合实际,可供从事通信、广播、机载、弹载无线电设备天线和总体设计的科技人员和从事该专业的大专院校教师、研究生及本科高年级学生借鉴与参考。

小型天线

Small Antennas

[日] K Fujimoto, K Hirasawa 著
[英] A Henderson, J James

陈志宁 译

杜汉卿 校

*

兵器工业出版社 出版发行
(北京市海淀区车道沟 10 号)

通信工程学院印刷厂印装

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.88 字数 236.3 千字

1992 年 9 月第 1 版 1992 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1~1000 定价: 9.20 元

ISBN 7-80038-562-0/TN·25

译 者 的 话

谨以此书献给恩师杜汉卿教授

随着无线电技术在各个领域内应用的不断普及，对其所用天线的性能，体积及价格等指标的要求亦越来越高。用户们希望天线是一个外形美观、体积小、价格低廉、又完全可以满足技术指标的器件。但由于天线自身所具有的特性，很难实现这一理想。为此人们进行了不懈的努力。《小型天线》就是日本和英国天线专家们对以往这种努力的总结和发展。该书以精练的篇幅总结了前人的研究成果，并注重于理论联系实际，详尽分析和研究了几种基本形式的天线以及许多种常用形式的天线。书中引用了大量的分析和测试数据，尤以曲线和图表为多，图文并茂；并对追求小型天线的高性能高效率的愿望给予充分的注意。它对于我国方兴未艾的移动通信（包括海陆空）以及所有使用天线的应用领域都有相当的参考价值。

在本书的翻译、排版与出版过程中得到了华东工学院刘次由、李官发教授和刘满凡老师，兵器工业出版社暨尤兰琴编审、解放军无线电管理委员会万海鸥女士，通信工程学院教保处周青女士及李一梅、陶家玲、王庆、张俊蓓、田小良、吴琦、王金贵等同志的大力帮助，他（她）们为此付出了辛勤的劳动，特表谢意。最后要深深地感谢我的太太刘琳女士。没有她的真诚鼓励和艰辛汗水就不可能有这本书的顺利完成。

鉴于本人学术水平有限，本书中一定存在许多缺点甚至错误，恳请各位贤达不吝赐教。

译 者 陈志宁

1992年8月于南京

· [译者简介] 陈志宁，1963年出生于江苏南京。分别于1985年和1988年毕业于通信工程学院无线通信工程系和电磁场与微波技术专业，并分获工学学士和硕士学位。后留院任讲师，从事教学与科研工作。曾发表学术论文20余篇。1990年起在该院攻读通信与电子系统专业博士学位。分别从师于沈铁汉教授、谢希仁教授、章文勋教授、杜汉卿教授和王元坤教授等。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 基本性能概述	4
1.1.1 早期工作	4
1.1.2 近期工作	6
1.2 天线形式图集	8
参考文献	28
第二章 线天线	36
2.1 分析方法	39
2.1.1 矩阵法	40
2.1.2 加载的一般原理	44
2.1.3 优化加载	45
2.2 正交模螺旋天线(NMHA)	55
2.2.1 螺旋天线的分析	56
2.2.2 设计所考虑的问题	59
2.2.3 电抗加载的螺旋天线	66
2.3 小型矩形环天线	70
2.3.1 设计参数	72
2.3.2 嵌入式天线系统	85
2.3.3 身体影响及增益	95
2.3.4 双极化感应场的性能	101
2.3.5 设计数据	101
2.4 倒L形天线	109

2.4.1	倒 L 形天线的分析	112
2.4.2	倒 L 形天线和倒 F 形天线结构的改进	120
2.4.3	置于矩形导体机壳顶部的倒 L 形天线	126
2.4.4	在实际场分布中倒 F 形天线的性能	140
2.5	偶极天线	144
2.5.1	电抗性元件加载的偶极天线	145
2.5.2	有源器件加载的偶极天线	155
附录		173
参考文献		178
第三章	物质加载天线(连续加载天线).....	183
3.1	覆层线天线的概念和早期研究	184
3.2	早期分析覆层天线的方法	192
3.3	覆层单极天线的谐振腔分析法	195
3.3.1	覆层波导波长与 F 因子的计算	197
3.3.2	终端面反射系数的估算	198
3.3.3	输入阻抗的计算	205
3.3.4	天线参数	210
3.3.5	设计考虑	215
3.4	小型共形天线	223
3.5	覆层技术的其它应用	234
3.5.1	圆锥对数螺旋天线	234
3.5.2	抑制雷达反射	236
3.5.3	电磁探针和探测器	238
3.6	主要评估	244
参考文献		246
第四章	导体上或导体附近的小型天线.....	250
4.1	线栅法综述	253

4.1.1	计算方法	253
4.1.2	线栅模型与天线特性	253
4.2	矩形导电体上的各种导线天线	265
4.2.1	电流分布	265
4.2.2	输入阻抗	268
4.2.3	辐射方向图	270
4.3	结论	274
参考文献.....		276

第一章 绪 论

目前,天线在日常生活中已十分常见了。自天线问世以来,人们一直关心着减小天线物理尺寸的问题。最早的降低天线高度的例子是自本世纪初开始使用的低频广播天线(Belrose 等,1959 年)。由于使用的是长波发射机,故足够尺寸的天线架设费用太高但又是必需的,为了解决这个问题,所采用的方法之一是借助支撑塔构成 L 形或其它形式的顶加载天线。

在第二次世界大战期间,人们设计了一些高度低、体积小的小天线,以满足高频范围内各种应用的需要。从此,对使用小型天线以满足各种用途的需求不断增长。通常,由于没有足够的空间安装过去常用的天线,因此,对天线提出了小型化的要求。这是一种常见的要求,因为天线经常安装在“平台”或其它载体上,而这些“平台”或载体本身就是小尺寸的,而且在某些情形下还可能是电小的。因此,在讨论小型天线这一课题时,不考虑所涉及到的小型平台的影响是不可能的。引起对小型天线的需求增长的其它因素是相当多的,其中包括:飞机上天线的低空气动力阻力、车辆上天线的隐蔽性与低轮廓、警用巡逻车上天线的抗毁性、平台上天线的低雷达和/或低光学显示特征,还有诸如在舰船和飞机上有限空间内天线的架设和最终对辐射器小型化或低轮廓、耐用性的要求,有时也要求天线具有在高温下工作的能力,比如像在宇宙飞船上要求的那样。在所有各种不同的和特殊的小型辐射器中,普遍使用的磁棒天线是值得专门加以介绍的(Van Schteken, 1952),它是民用无线电中长波接收机中最常见的电小天线。

近来,由于半导体集成电路的发展,引起了宇航界在电子设备小型化方面的进步,经常将天线突出到一个系统元件中尺寸最大和重量最重的地位上,甚至在甚高频(VHF)和超高频(UHF)频率上亦如

此。在商店里,调频/甚高频(FM/VHF)波段无线电接收机及便携式电视机上的天线与其相应设备的尺寸相比是极不方便的。

由于减小天线尺寸经常使得天线带宽和效率性能指标下降,因此,这向系统设计者们提出了一些研究课题。在弱信号地区这些损失将使接收效果变差,因此,这些损失不得被列入设备的系统性能之中。例如,如果明显地降低便携式无线电装置上 $1/4$ 波长的甚高频鞭状天线的高度,那么,不仅天线的带宽变窄,而且还需在天线上安装某种匹配电路。这将导致损耗明显地增加,接收机的总体效率显著地降低以及设备成本的提高。现在已有了更为有效的匹配技术——在天线自身结构中使用有源和无源集总元件,这使得不使用外部匹配电路而实现自谐振成为可能,有关这点,将在后面讨论。无论如何,仍无法避免整个效率的降低,当然,若不使用匹配技术将会引起更加严重的系统损耗。

在实际情况下,通常很难预先在天线尺寸与天线性能之间进行权衡,尤其是在使用匹配电路和要依赖实验进行计算的情形下更是如此。因此,为了保证所引起的性能损失最小,许多营销部门的负责人提高了对小型天线设计精度的要求。

随着某些手持式无线电装置的应用成功,最近,人们又在从事将天线放在接收机内部工作这一吸引人的课题研究,本书也将对此进行深入的讨论。

迄今,已经间或发表了一些有关小型天线的报告,但是就作者所知,还没有出版通用的课本或设计手册。1976年在美国举行的ECOM—ARO专题研讨会,表明了国防应用方面对计算小型天线性能感到新的兴趣。这一研讨会(Goubau, 1976)的论文汇编,综合报道了有关小型天线设计的工艺水平,并指出当时该领域内所做的研究是必要的。

本专著涉及到近年来在小型天线设计方面所取得的进展,并且,从本书可以看到,许多应用都与便携式无线电装置有关。根据本书专业性较强的特点,要求读者是熟悉电磁场理论在天线应用中的有关

进展的。第一章概述了与小型天线设计有关的原理,其中1.1节概述了有关的基本问题,1.2节是小型天线形式的图集。从实际上很少的几种基本形式出发可以变换出无限多的形式。尽管没有编制设计者“名录”,但一组组常用的天线却具有更广泛的参考价值。应将注意力放在这些常用形式的天线上,并请记住,所采用的分类规则是严格的。在图集中已列出了若干组典型的天线。

这里值得注意的是,在天线结构中的术语“小型”和“电小”的定义与使用。

* 电小天线是一个能够用一个半径为 $\lambda/2\pi$ 的球将其包围起来的天线,其中 λ 是自由空间的波长。极短偶极子就是这种天线的一种。

* 物理结构受限天线不一定是电小的,而是在某一面上尺寸减小了许多的天线。共形天线就属于这种天线。

* 功能性小型天线不必满足上面二个定义,而是在不增加天线尺寸的情况下,实现更多的功能。具有宽角度波束控制和信号处理的自适应天线都属此类。

* 结构性小型天线不属于上述中的任何一种,它的尺寸相对于视觉而言是小的。如毫米波喇叭天线就是一例。

因为天线载体和馈线对天线的性能有着很大的影响,并可能参与辐射,所以在实际情况下,无法用解析式来描述上述定义。例如,一个 $1/4$ 波长的单极天线安置在一个小球壳上,假定球的半径为 $1/16$ 波长,这时天线的性能与同样的天线安置在大的地平面上时的性能有明显的不同。有关这些问题将在第二章和第四章中讨论。

从1.2节的各种小型天线的图集中可以证实,细导线单极天线和环天线的各种派生天线是最常见的。因此,可以预见,现在人们最注意的是改进小型细导线天线的设计与计算,而且,这也将是第二章的主题。在第二章中叙述了在螺旋天线、倒L形天线和使用了有源及无源加载技术的小型偶极天线方面的进展情况。另一不太常用的减小天线尺寸的方法是进行物质加载,第三章中广泛地讨论了这一方

法,其中还包括许多其它由该方法派生出来的方法。随着具有控制电性能的新型材料的出现,这种加载技术的使用已明显增加。

最后,在第四章中介绍了有关电小地平面这一重要的实际情形,该情形在现今通信设备及其它小型载体的应用中是经常遇到的。

1.1 基本性能概述

1.1.1 早期工作

只要浏览一下 1.2 节中的天线图集就可以发现:不同物理结构的小型天线所具有的性质是不相同的。毫不奇怪,当这些不同的天线与许多各不相同的系统相组合时,发现与预测这些天线的一般特性并无规律可循,因此,在一个特定的系统设备中必须根据它自身的特点来评估每副天线。目前,在工作中已有了一些好的倾向,人们预估各种损耗因素的性质并用实验去检验在设计参数的权衡中所带来的好处。例如,电小天线与相应大尺寸的天线相比,频带窄和效率低这一事实人们是可以接受的。无论什么样的天线形式,人们都可望在效率、频带和尺寸之间进行某种折衷。为此,过去人们一直在努力制定出一些准则。

定量评估小型天线最早的工作是韦勒(Wheeler)在 1947 年所做的工作。他使用了一个被称之为辐射功率因子 p 的特性系数,它的定义为:

$$p = \frac{\text{天线电阻}}{\text{天线电抗}}$$

韦勒的工作本质上是将集总电路方法等效到电磁场辐射器上,最显著的特点是它极其简单明了,因为它只含有激励器和电路元件。因此当天线用一简单的调谐电路来匹配时, p 表示天线的带宽与频率的乘积。当天线尺寸减小时,与天线及匹配电路的欧姆损耗相比,天线的辐射电阻下降了,这将导致整个系统效率的降低。韦勒指出,在窄带内可以有效地实现小型天线的匹配,但是如果系统带宽要求

比较宽时,由于匹配电路中的损耗,总的效率将会下降。这点可用一个手持无线电上所用的小型调频框形天线的例子说明。该天线,典型的体积为 20cm^3 ,在单个频道上调谐时,电路的损耗可以是 4dB ,但是,当在整个 $88\sim 108\text{MHz}$ 频带内使用时,由于采用了匹配电路,至少有 $12\sim 15\text{dB}$ 的损耗。这表明一个定义清楚的系统要求是十分重要的。

韦勒是第一个认识到物质加载对天线性能有影响的人,可以认为,他用于小型加载电容器与电感器的电路方法就包括这一特点。他推论,如果一个介质加载平板天线的介电常数增加,那么“ p ”将会下降。另一方面,如果一个铁氧体加到一个线圈内,那么由于天线 Q 因子的降低,“ p ”将随导磁率的增加而提高。这表明,在电感器中加入磁性加载物质是会有一些好处的,但是,显然这一结果通常并没有应用到小型天线的结构中(Galejs, 1962),这里只强调了比较特殊情形下的需要。

朱(Chu, 1948)提出了一个比较普遍的分析方法,它使等效电路元件可以从围绕着任意形状辐射体的场中推导出来。他给出了最小 Q 因子,对于一个全向辐射天线,可以利用 Q 因子与天线体积之间的关系来实现,并且这一结果可以用于小型天线结构。用一个球面正弦波的展开来表示一个包围着天线的球的外场,这使得理论上可以达到的最小 Q 因子的计算成为可能。他发现,激励起一个简单偶极子场的天线,有一个所有可能形式天线中最小的 Q 值,它可表示为:

$$Q = \frac{1 + 3k^2a^2}{k^3a^3(1 + k^2a^2)} \quad (1.1.1)$$

其中: $k=2\pi/\lambda$ 和 ‘ a ’ 是能够包围住天线的球的半径。当天线的尺寸小于 $\lambda/2\pi$ 时,场表示式中的汉克尔(Hankel)函数基本上就是一个虚数,这表明大量的能量储存在天线的近区场内,并导致了 Q 值的大幅度增加。理论上,当天线尺寸降至零时, Q 值应趋于无穷大;但实际上,朱预计近区的强场,将导致很大的欧姆损耗及低的 Q 因子。

尽管朱的分析给出了 Q 值在最差情形下一个有用的解,但是,

该解并不能计算天线的损耗,也不能与输入端口处的条件相联系。

1.1.2 近期工作

1960年,哈林顿(Harrington)将朱对假想有耗金属球的分析做了进一步的发展,使分析涉及到了欧姆损耗对天线 Q 因子的影响。汉森(Hansen, 1981)用更新的观点表述了哈林顿分析的结果,在图 1.1.1 中,它清楚地指出了一副具体的天线在效率 η 与 Q 值之间折衷的情况。实际上,其它形式的小型天线并不能达到上述 Q 因子的值。高堡(Goubau, 1976)所给出的图(图 1.1.1)中有三种情况,它包括二个短偶极天线和一个顶加载单极天线。

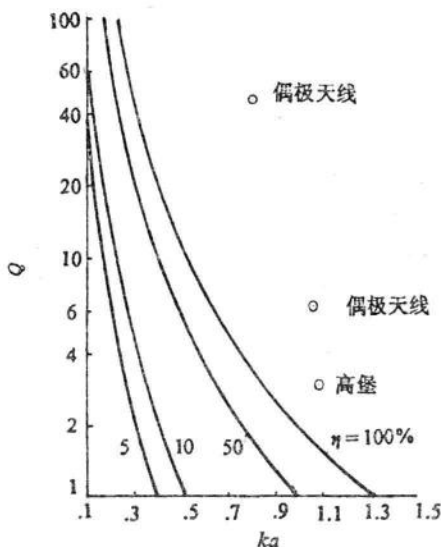


图 1.1.1 对于一个理想的有耗金属球效率 η 和 Q 值的理论折衷

哈林顿在他的工作中所给出的有关小型天线的内容当然是不够完整的,因为它没有考虑匹配损耗。正如韦勒(1947)所指出的那样,这些损耗会严重地影响整个系统的性能,史密斯(Smith, 1977)在进

一步的工作中,制定出了使用有耗元件的匹配电路设计的基本原则。整个系统效率 η_s 是天线效率 η_a 与天线匹配电路效率 η_m 的乘积:

$$\eta_s = \eta_a \cdot \eta_m$$

天线的电阻可以分为性质不同的二个部分,即辐射电阻 r_r 和损耗电阻 r_{loss} ,这二种电阻的比值关系如下所示:

$$\eta_a = \frac{r_r}{r_r + r_{\text{loss}}} \quad (1.1.2)$$

对于小型天线, r_r/r_{loss} 通常是一个小量,故天线的效率很低。 η_m 是一个相对比较复杂的量,它取决于天线的输入阻抗和匹配电路元件中的损耗。对于小型天线,可以合理地假设:

$$\eta_m \doteq \frac{\eta_a}{1 + Q_a/Q_m}$$

其中, Q_a 是天线的 Q 值, Q_m 是匹配元件的 Q 值,并假设它们的数值是同一数量级。在实际中,可用测量方法求得 η_a 和 Q_a 。有二种简化技术可以用来获得有用的结果。首先,纽曼(Newman)等人(1975)提出的 Q 值法是以朱早期所做的推论为基础的,从而,一个无耗小型偶极天线的 Q 值是方程(1.1.1)所给出的最小值 $Q_{\min}$ 。在此假设测试天线测量得到的 Q 值与 $Q_{\min}$ 之比是天线效率。很显然,这仅仅是一种近似的方法,但它在初步设计阶段是很实用的。

其次,“韦勒罐箱”法(1959)提出了一种通过测量带有和不带封闭金属罐时的天线输入电阻来计算效率的方法。正如朱(1948)所指出的那样,小型天线的近区场主要集中在一个半径为 $\lambda/2\pi$ 的球形区域内,使用该尺寸的金属罐是在不扰动近区场的前提下,以消除任何辐射作用为目的的。利用这一方法,可以在天线总的电阻 $r_r + r_{\text{loss}}$ 中单独地测出天线的损耗电阻 r_{loss} ,从而,利用(1.1.2)式就可以求得效率。

* 从上所述可以证实,迄今还没有建立起一种包括天线几何参数、馈电电路损耗及物理参数的通用分析方法(Wheeler, 1983)。瓦斯科库斯克和科恩(Wasykuisky, Kahn)1970年提出了一个普遍式,但还

不清楚它在特殊形式天线中应用时是否具有一般性。进一步的发展很可能是具体的而不是一般性的方法,在第三章中对覆层加载导线单极天线的具体分析就是既包括馈源物理特性又包括辐射单元物理特性的少数几个例子中的一个。

1.2 天线形式图集

如前所述,电小辐射源的基本理论很容易地证明了与小型天线有关的实际困难和天线的性能问题。这些理论很少或根本没有告诉我们如何去设计一个缩减了尺寸的天线以满足物理尺寸受限的给定系统的要求。因此,毫不惊奇,在过去几年中,为了满足各种用途的需要,许多外形迥异的电小天线纷纷问世。这里给出了这些基本天线形式的图集。为了深入的详细的研究,在给出了每种天线主要性能说明的同时,也一并给出它的来源,并辅之简图说明天线的形状。

尽管精确地划分天线的种类是不可能的,但是对天线外形及性能分类的主要倾向却是十分明显的,同时,在此还给出二张表,目的是,对于一个给定的应用背景,对选择小型天线形式给予一些指导。

表 1.2.1 小型天线最可能使用的频率
(表中数目是图集中心的天线编号)

频率	极低频 ELF 3—30kHz	甚低频—低频 VLF—LF 30kHz—3MHz	高频 HF 3—30MHz	甚高频 VHF 30—300MHz	超高频 UHF >300MHz
天线 编号	14, 24, 25	1, 2, 4, 5, 10, 12, 13, 31	1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 18, 22, 23, 28, 30, 32, 33, 34, 35	1, 3, 6, 7, 8, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 26, 28, 29, 30, 33, 34, 35	1, 11, 18, 19, 20, 22, 26, 27, 28, 29, 30, 34, 36

表 1.2.2 小型天线的一些基本用途

(表中数目是图集集中的天线编号)

天线形式	载 体	使用小型天线的原因	天线编号
小型单极 和环天线	便携式无线 装置及 手持机	用于移动装置时要求天线 隐蔽及使用方便。	1, 18, 19, 20, 21, 22, 26, 31, 32, 33, 34, 35
低轮廓 天 线	飞 机	低轮廓和对天线的损害最 小。	2, 3, 11, 12, 21
	车 辆	在运动中使损害及环境影 响最小。隐蔽性。	2, 3, 7, 8, 9, 11, 12, 22, 27
	舰 船	对于所要用天线数而言,载 体的尺寸是有限的。	13, 23
低 频 天 线	潜 艇	由于媒质损耗,必须使用极 低频(ELF)。	2, 4, 5, 6, 10, 13, 23
	基地台	由于造价及使用的便利必 须使用小型天线塔。	2, 4, 5, 6, 10, 13, 23