

有 源 天 线

郭泽永 编著

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书叙述了有源天线的类型、结构、电特性，重点分析了噪声和非线性失真。对我国自行研制的短波有源环形天线作了比较全面的介绍。对各种组阵和有源发信天线也作了若干探讨。可供从事天线工作以及无线通信工作有关同志作参考。

有 源 天 线

郭泽永 编著

责任编辑：李小曼

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1985年4月第一版
印张：5 8/32 页数：84 1985年4月天津第一次印刷
字数：119 千字 插页：1 印数：1-10,000 册
统一书号：15045·总2953—无6305
定价：0.90 元

前 言

在电子学领域中，有源天线是六十年代才发展起来的一门新技术。它把电磁场理论与电子电路理论有机地结合起来，从而使天线能够在一定范围内实现小型化。国外经过十几年的实践，已在短波、超短波和微波波段得到了实际应用。

有源天线的特点是体积小、重量轻、架设方便和能实现小型化，还能保持和大型无源天线相当的电气特性。它不仅能用于点对点的固定通信，而且对移动通信、军事通信具有机动灵活的特性。

我国在七十年代初开始了有源天线的研制工作，目前已取得一定成果。为了使广大科技工作者对有源天线有所了解，促进有源天线的发展，本书除了较系统地介绍有源天线的基本概念和工作原理以及各种类型有源天线的结构与性能外，还就有源天线中的两个主要问题，噪声与非线性失真，作了专门阐述。并以典型的短波有源环形天线，天线阵和圆形天线阵作为例子，比较详细地分析了有源天线。最后还对有源发射天线作了简要介绍。为使具有一般天线知识和电路知识的读者对有源天线有一基本了解，本书着重于物理概念的叙述，避免数学上繁琐的推导。

云大年同志对此书进行了审校，作者在此表示感谢。限于作者水平，书中存在的缺点和错误，请读者批评指正。

作者83.11.

目 录

第一章 有源天线的基本概念	1
第一节 普通天线——无源天线.....	1
第二节 从无源天线到有源天线.....	3
第三节 有源天线的结构和类型.....	6
第四节 有源天线的发展.....	9
第二章 集成结构的有源天线	11
第一节 “天线——放大器”型有源天线.....	11
第二节 “天线——混频器”型有源天线.....	14
第三节 “带通滤波”型有源天线.....	16
第四节 有源电视接收天线.....	18
第五节 微波有源天线.....	21
第三章 分立结构的有源天线	24
第一节 半波对称振子有源天线.....	24
第二节 “电压探针”型有源天线.....	26
第三节 “极化分集”型有源天线.....	30
第四节 有源环形天线和有源环形天线阵.....	33
第四章 有源天线的优点	39
第一节 可实现天线的小型化.....	39
第二节 具有良好的电特性.....	43
第三节 可以实现一定程度的电子控制.....	46
第五章 有源天线的噪声	53
第一节 表征噪声的几个参数.....	54
第二节 系统噪声.....	58

第三节	外部噪声 (空间噪声)	62
第四节	无源网络的噪声	65
第五节	晶体管噪声	67
第六节	有源天线与无源天线的系统噪声比较	72
第七节	噪声匹配与功率匹配	78
第八节	有源网络噪声的测量	79
第九节	有源天线系统噪声的测量	81
第六章	有源天线的非线性失真	84
第一节	非线性失真的分析	84
第二节	降低有源网络的非线性失真的方法	88
第三节	非线性失真的测量	95
第七章	有源环形天线及其直线阵	97
第一节	有源环形天线的结构	99
第二节	无源环形天线的电特性	102
第三节	有源网络	107
第四节	有源环形天线单元的电特性	109
第五节	有源环形天线的各种直线阵组阵	113
第八章	有源环形天线的圆形阵组阵	138
第一节	一般的圆形阵组阵	138
第二节	正交环形天线圆阵	141
第九章	有源发射天线	155
第一节	有源天线作发射用的探讨	155
第二节	有源发射天线与无源发射天线的比较	156
第三节	有源发射天线的功率匹配	157
第四节	有源发射天线的效率	159
第五节	有源发射天线的谐波	160
第六节	有源发射天线实例	160

第一章 有源天线的基本概念

第一节 普通天线——无源天线

在电子工程领域中，无线通信或广播系统都和天线联系在一起。因为这些系统是由发射机——发射天线——电波传播——接收天线——接收机组成。从最原始的矿石收音机到现代化的微波通信机都需要有天线装置。

在日常生活和工作中，我们也常常要和天线打交道，听广播用的电子管收音机，要拖一根金属导线；晶体管收音机虽然在外面不用拖“尾巴”，但却在盒内藏着一根磁棒；无论是黑白电视机或彩色电视机也都需要接上一定形状的金属结构导体才能正常收看节目。还有，我们有时可见到，大、中型会议的讲演者，其身上带着的微型话筒也有一段导线拖在外面，尽管这些导线或导体有不同的形状和结构，我们统称它们为天线。

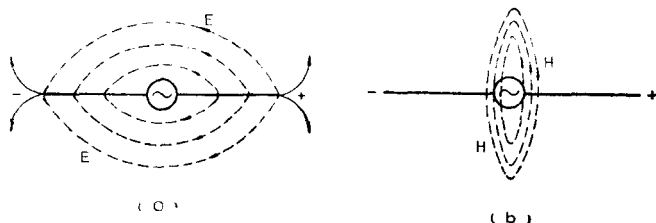
即使是现代化的卫星通信，不论在地面站或是在卫星星体上，也都毫无例外地装有天线装置。总之，无线通信离开了天线，就无法实现信息传递。

我们进一步追问，究竟什么是天线？它是如何把无线电波发射出去或接收下来的呢？它们又为什么有各式各样的结构，而且有的天线很大，有的却又很小？

这一系列的问题关系到天线的基本理论与无线电波传播规律，而由于本书着重介绍的是有源天线，因此不可能解决上述全部问题，但是为便于读者建立起有源天线的概念，以便深入

研究它，我们拟用很短的篇幅，从天线的最基本原理——辐射讲起，建立“天线仅仅是一个能量变换器”的概念，以便进一步研究有源天线。

根据电磁场理论，当高频电流在有限长度的导体上流过时，在此导体周围就有电场和磁场产生。如图 1-1 所示，其中 (a) 是电场力线，(b) 是磁场力线。该图是一个示意图。为了醒目，把电场力线和磁场力线分开画了，其实两者是同时存在的一个整体，且在空间是互相垂直的。我们知道，一个交变的电场可以产生一个交变的磁场，这个交变的磁场又能产生另一个交变的电场，这样互为因果，能量在电场和磁场中相互转换便



(a) 电场力线

(b) 磁场力线

图 1-1 电场和磁场示意图

形成了“电磁场”向空间辐射，这就是发射天线把载有一定信息的无线电波辐射出去的原理。

同样，根据电磁场理论，一根有限长的导体放在一定的辐射场内，在电磁场的作用下，导体上便感应出电势，从而产生高频电流。若将此导线与接收机连接，则此电流就被送到接收机的输入回路，这样，这根导线就起到接收天线的作用（接收空间的载有一定信息的无线电波）。

由此可见，天线实质上是一种换能装置，发射天线能将载有一定信息的高频电流能量变为电磁波能量，而接收天线则是

将电磁波能量变为高频电流的能量。

由天线理论证明，收、发天线是互易的，即任何发射天线都可以作接收用；接收天线也可以作发射用；而且无论用作发射或接收，天线的基本参量均保持不变。但在实际通信中，收发共用一副天线时，必需是收、发电波采用不同的极化方式。例如发射电波用垂直极化，则接收必需用水平极化波；若发射用右旋圆极化波，则接收必需用左旋圆极化波，或者反之。

第二节 从无源天线到有源天线

通常所说的天线，无论是由单根导线构成的简单天线，或是由单元天线组成的天线阵，尽管它们的形状、结构各不相同，但有一个共同特点，就是“无源”。也就是说这些天线本身仅仅是一些金属导体，并没有外接能源，因之称为“无源天线”。

无源天线相对于“有源天线”来说有一个弱点，就是它的体积庞大。这是因为要使无源天线能有效地工作，其单元尺寸必须与其工作的无线电波的波长相比拟。天线架设的高度也必须和工作波长相比拟。例如在短波段，假定天线的工作频率为5兆赫，这就是说该天线工作波长为60米，如该天线选用半波对称天线的话，那么天线的长度就要达到30米，天线的架设高度也要在15米以上。架设高度还与通信距离有关，距离越远，电波射线仰角就需越小，天线就必须架设得越高。显然，这样又大又高的天线会给架设和维护带来很多的麻烦。

又例如在短波通信中，架设一副工作频率为7.5兆赫的菱形天线，如图1-2所示。由导线构成的菱形，每一臂长为四倍波长，约160米，并需四座高度为一倍波长即约40米的铁塔，因此，

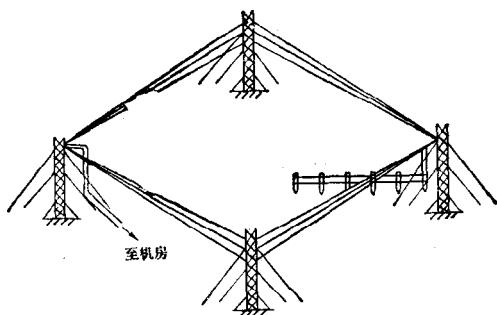


图 1-2 菱形天线

其占地面积更大，是可想而知的。不仅如此，为防止塔身倾斜与摇动，每座铁塔又要加上许多根几十米长的拉线，还要配上相应的地锚、紧固件、绝缘等，这些材料的总重量达到四、五吨。因此，架设一副这样的天线，从设计、施工、安装调试到交付使用，所需时间长，而且造价高，占地大。

五十年代以来，由于电子学的迅速发展，大部份电子设备中的电子管被晶体管代替，集成电路问世后，许多元、器件也逐渐小型化，使收、发信机以及有关通信设备的体积都大大缩小了，其中更为明显的是接收机。大规模集成技术出现以后，接收机的体积缩小到原来的十几分之一。这样，相对于整个无线电通信设备来说，天线尺寸过分庞大的问题就显得十分突出了。这对于现代化军事通信来说，严重地影响着通信的机动和隐蔽等特性。因此五十年代后期，天线小型化的课题就提到日程上来了。

前面已经谈到，天线的尺寸、架设高度等都是与工作波长相比拟的。这是由天线基本理论所决定，而不能随意缩小。譬如天线的重要参量之一的辐射电阻，它表征天线实际辐射能力

的大小。在一定范围内增加天线的辐射电阻，可以提高天线的辐射能力，然而辐射电阻和天线的几何尺寸有关。图1-3 给出了对称振子臂长与波长比(l/λ)对辐射电阻(R_r)的变化关系，由

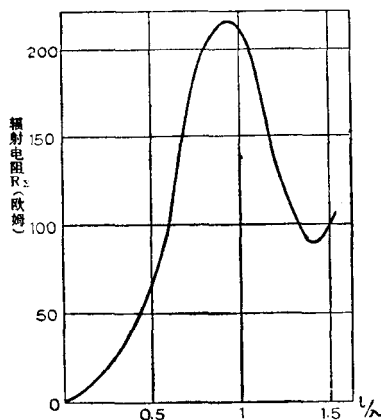


图 1-3 对称振子的辐射电阻

图可以看出：要取得比较理想的辐射效果， l/λ 应取在0.5~1 的范围内所对应的电阻值，这对前面所举的波长为60米的例子来说，振子长度就要在30~60米范围内选择，因而可以想像到该天线有多大了。

为了提高天线的方向特性，往往还要增加天线单元的数目（增加水平排列的单元数，可提高水平面内方向特性；增加垂直排列的单元数，可提高垂直面内方向特性）。有时为了得到单方向辐射特性，还需要加一副相同结构的天线作为反射器。如果要想实现远距离通信，又将导致天线高度的增加，这就使得天线的体积更加庞大了，所有这些都说明了要提高天线的性能，必然要增大其几何尺寸。但是要获得小型化天线，简单地把天线尺寸缩小，势必会导致性能大大降低。

在实现天线小型化的研究中，人们进行了大量的工作，其中行之有效的方法之一，就是采用有源天线，本书将简要地介绍有源天线的发展过程、基本原理、结构性能和它们的实际应用。

第三节 有源天线的结构和类型

简单地说，有源天线就是在无源天线中另外“加上”一个有源网络。但是，这一网络加在何处，加了以后天线性能将发生怎样的变化以及是否所有的无源天线都可任意变成有源天线等一系列问题，我们将在以后有关章节中得到解答。

我们已经说过，无源天线就是一个能量变换装置，它没有放大作用，而且天线的性能将随着其几何尺寸的减小而降低，那么有没有什么办法使得在天线尺寸缩小的同时，其特性又不致变坏呢？人们寄希望于电子器件，即把尺寸缩小了的天线与电子器件组合在一起，藉助于电子器件的放大作用来补偿由于尺寸缩小而造成的性能下降。这样的设想在接收天线上是比较容易实现的，这是因为接收天线工作于微弱功率状态，不像发射天线那样携带有强大的高频功率。因此最先研制出的是接收有源天线，有源天线的方框图如图1-4所示。

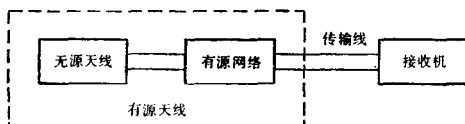


图 1-4 有源天线方框图

由图可知，有源天线实质上是无源天线和有源网络的组合。那么大家会提出这样的问题，有源天线与天线加接收机有

什么两样？因为接收机也可看作是有源网络的。

我们说有源天线的有源网络，并不简单地是一个放大器，对于有源天线中的有源网络，既不象一般放大器那样，要求它有很高的放大倍数；也不像接收机那样需要对高频信号进行频率变换和解调，而只希望它能对由于天线尺寸缩小而引起的性能降低进行补偿。更重要的是，有源网络与无源天线构成一个整体，并且其放置的位置，是在传输线前面，这和把有源网络放在传输线后面所反映出来的噪声效果截然不同。所以，有源天线完全不同于天线加接收机或天线加放大器。

有源天线刚问世时，有叫做晶体管天线的，也有叫电子集成天线的，后来才逐渐统称之为有源天线。

有源天线的名称，实际来源于四端网络的概念。我们知道，无源四端网络的输出能量完全来源于输入能量，但有源四端网络的输出能量就不仅仅来源于输入能量，而且可以部份地或全部地来源于网络内的能源。我们可以把有源天线等效成一个有源四端网络，即把图1-4用图1-5代替。它的输入端就对应于自由空间，输出端就是接天线的传输线。

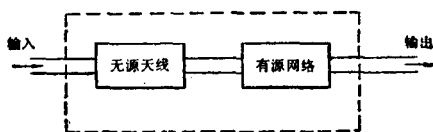


图 1-5 有源天线的等效四端网络

有源天线是无源天线和有源网络的组合。其中无源天线可以是垂直鞭状天线、水平对称振子、V型天线、螺旋天线或环形天线等。构成有源网络的有源器件，由于所使用的频率不同，从短波段到微波段可以有各种类型的晶体三极管、混频二极管、变容二极管、隧道二极管以及各种规模的集成电路等。把无源

天线和这些为数众多的器件作不同的组合,并经过精心的匹配,就构成目前已有的数百种不同性能和不同用途的有源天线。有源天线品种虽多,但归纳起来可分为两大类型:

一、分立结构有源天线

所谓分立结构有源天线,就是天线和有源网络(放大器)是分开的,即如果将天线与有源网络分开,仍能起各自的作用,如图1-6所示。当无源天线通过无源网络与有源网络匹配连接

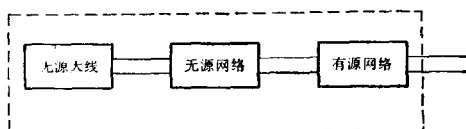


图 1-6 天线和有源网络分立的有源天线

时,组成一副有源天线,而如果把它们拆开,无源天线仍能单独起天线作用,而有源网络如果是一个放大器,拆开后它仍是一个有完整功能的放大器,可单独使用。

二、集成结构有源天线

这种类型的有源天线是把无源天线与网络集成化,即二者是一整体。在设计这种天线时,把无源天线等效参数作为有源网络输入端的元件来考虑,即所谓集成设计或一体化设计。例如把无源天线的等效阻抗,视作有源网络输入回路的组成部分(此时如果再把天线和网络拆开,则有源网络会因为失去天线而不能工作了)。图1-7是一个集成设计的有源天线等效电路,图中的 R 、 L 、 C 分别表示无源天线的等效电阻、等效电感和等效电容。

单独一副有源天线,常称作有源天线单元。由一定数量的

有源天线单元，按不同要求，可以组成各种类型的有源天线阵。有源天线通过组阵，能把各单元的功率增益进一步合成，从而改善有源天线的增益和方向特性。

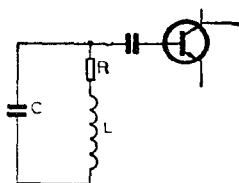


图 1-7 集成设计的有源天线等效电路

第四节 有源天线的发展

早在三十年代末期，德国梅克（H.Meinke）教授就曾做过有源天线的研究，他把天线直接和电子管的栅极连接起来做了不少试验，但由于当时的有源器件只限于电子管，而电子管的特性以及电源供给等都存在着不少难以解决的问题，以致使试验工作中断了。五十年代由于半导体器件的飞速发展，1958年出现了隧道二极管，1960年由于外延平面技术的成功，出现了场效应管，而晶体管的噪声系数也由几十分贝下降到只有1~2分贝，晶体管的工作频率，则由几千赫提高到几十兆赫，上百兆赫或更高些。这样就给有源天线的研制提供了充分的条件，因此，到了六十年代初期，被中断了二十年的有源天线的研究工作又重新开展起来了。1963年以后，公开发表的关于有源天线的文章逐渐多起来了，美国柯伯兰（J.R.Copeland）、罗伯逊（W.J.Robertson）和把研究工作中断近二十年之久的西德梅克（H.Meinke）教授等都有论文或成功的实验报导，于是有源天线逐渐引起了人们的注意。虽然有人也曾怀疑这种天线究竟有多大实用价值，但更多的人则认为这是实现天线小型化的一项新技术。以后几年里，参加研究的国家和单位逐渐增多了。1969年，在西德终于出现了第一副作为商品出售的有源电视接

收天线。1971年西德又作为商品出售了有源车载天线,加拿大也有作商品出售的有源环形天线阵。至此,有源天线的理论不再有人怀疑了。以后又研究了不同结构和各种性能的有源天线,有分立结构的也有集成结构的,有用于短波段的也有用于超短波段的和微波段的。有可单独使用的有源天线单元,也有由有源天线单元组成各种有源天线阵,如端射式有源天线阵,边射式有源天线阵、圆形阵有源天线阵等。从应用上来看,已从军用、民用通信发展到气象、航空、航天等各个领域。有装在宇航员头盔里的微型有源天线,也有装在导弹头上作为接收指令信号的微型有源天线。目前有源天线已成为天线研究中的一个分支,有着十分广阔的发展前途。

第二章 集成结构的有源天线

通过前面的介绍，我们对有源天线有了大概的认识，为使大家对它有进一步了解，下面将根据有源天线的结构特点，按集成结构和分立结构的分类方法，选择几种典型的天线逐一加以介绍。这一章先介绍集成结构的有源天线。

第一节 “天线——放大器” 型有源天线

“天线——放大器”型有源天线，是无源天线与放大器（有源网络）组合在一起的集成结构型有源天线，它的外形如图2-1所示。这是一副工作频率为146兆赫，带宽为20~30兆赫的甚高频有源天线。无源天线是半波对称振子，有源网络是以晶

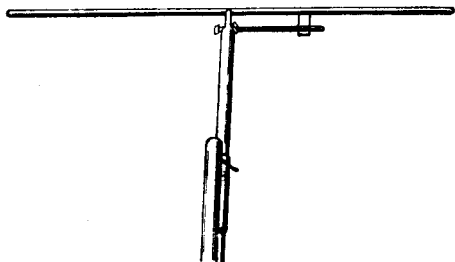


图 2-1 “天线——放大器”型有源天线外形

体管作为放大管的低噪声放大器。图2-2为“天线——放大器”

型有源天线电路示意图。由图可见,振子和匹配线是作为晶体管输入回路的一部分来考虑的,晶体管的集电极回路则作为有源天线的输出端。

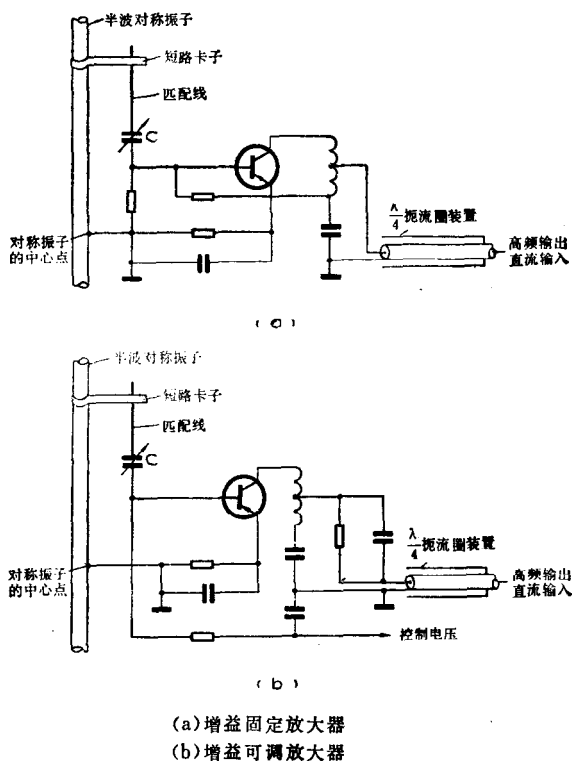


图 2-2 “天线——放大器”型有源天线电路示意图

图2-2(a)用的是固定偏置,当偏置调整得适当,可获得最大增益或最低噪声特性。图(b)采用“AGC”电路,可以控制有源天线的增益。在组阵时,通过各天线单元增益的不同变化,可得到特定的方向图形。调节电容C和匹配线短路卡子,