

基于Z型六角铁氧体的天线设计

by 包利强
华中科技大学

摘要

信息技术的快速发展对传统的天线技术提出了挑战，特别是移动硬件和大数据的广泛使用迫切要求缩小传统天线的尺寸。但同时，针对传统天线的结构化调整也已经走到了尽头，人们逐渐把视线转移到了天线基底材料的研究。由天线理论可得天线的尺寸反比于天线的工作频率，因此在甚高频段（30-300MHz），天线的尺寸一般较大（约为40cm），从而严重影响天线在小型化移动设备和无线领域中的使用。

1 绪论

1.1 研究背景与意义

随着科学的发展，人类社会已经进入信息时代，信息的快速和广泛传递迫切要求无线通信技术的发展和无线应用的普及。同时，在最近的几十年里，移动系统和设备在个人数据通信和多媒体数字广播服务中的崛起，使得通信技术以及相应的材料和设备在甚高频领域（VHF, 30-300MHz）吸引了很多的关注。电子设备的功能的功能越来越强大，信号带宽也在不断提高。这些都要依靠天线技术的应用和发展。

天线的研究可以追溯到19世纪后半叶。1864年12月，麦克斯韦总结以往的电磁学方面的实践和理论，提出了电磁场的完整方程组，并预言了电磁波的存在性以及电磁波与光波的同一性。1888年德国物理学家赫兹用试验，验证了麦克斯韦关于电磁波存在的设想。1901年，意大利无线电工程师马可尼在英国和纽芬兰之间，实现横跨大西洋的无线电通讯，使无线电达到实用阶段。随着时间的推移，人们对无线电在民用上乃至军事上的应用的认识更加深刻，从而在这些领域的研究突飞猛进，天线理论研究和技术应用有了新的跨越，各种新颖、高效的天线如雨后天春笋般的开发出来，被应用于各个方面。

辐射和接收无线电波是天线设备的基本功能。然而天线的体积通常受限于天线的工作频率，天线的长度一般为相应于工作频率无线电波波长的四分之一左右，甚高频段天线的长度达到了几十厘米。过大的天线尺寸已经成为天线在移动设

备和小型化系统中应用的障碍。近年来高清数字电视迅速发展，在数字电视扁平化和移动化的发展模式下，传统的地面数字多媒体广播(T-DMB)天线由于其较大的体积和较高的剖面等原因，已经不能满足需求，T-DMB天线的小型化成为一个非常重要的问题。目前商业使用的T-DMB天线主要为单极棒状螺旋天线。然而，为了满足在移动端和更薄数字电视上的使用，这个天线的体积和增益还需要进一步进行优化。

目前天线技术相关的研究一般是集中于在高频领域减小天线的尺寸。而实现天线小型化一般有三个途径：第一种是通过使用容性或者感性负载以及蛇形线来获得慢波谐振以实现天线结构的紧凑，从而实现小型化。其主要缺点是增加了损耗和减小了带宽。第二种是采用高介电材料来制作天线的基板从而实现天线的小型化。尽管使用高介电材料基板能够实现天线的小型化，但是同样该方法具有两个明显的缺点：其一，电磁场高度残留集中在高介电常数区域（电磁场禁闭效应）降低了天线的效率，同时使其产生了窄带特性；其二，高介电材料具有非常低的特征阻抗，难以实现天线的阻抗匹配。第三是使用磁导率和介电常数数值较高且相近的磁电材料。我们知道天线的尺寸是由其波长决定的，而波长则是由天线的工作频率和制作天线的材料决定。他们之间的关系为

$$\lambda = c/f\sqrt{\varepsilon^r\mu^r} \approx c/f\sqrt{\varepsilon'\mu'} \quad (1)$$

其中， λ 是传输波长， c 是真空中光速， f 是工作频率， ε^r 是相对介电常数， μ^r 是相对磁导率， ε' 是相对介电常数的实部， μ' 是相对磁导率的实部。由此可见，通过提高复介电常数实部和复磁导率的实部可以减少天线尺寸，其实 $f = \sqrt{\varepsilon'\mu'}$ 也是微波天线小型化因子的定义。在天线理论中，任何复杂的天线都可以看成是电基本振子组成的，假定天线处于复介电常数为 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 、复磁导率为 $\mu = \mu' - j\mu''$ 、电导率为 σ 的线性均匀有耗导电媒质中，工作频率为 ω ，由坡印廷定理得到天线谐振工作时的能流密度为

$$\begin{aligned} -\oint_S \vec{S} \cdot d\vec{s} &= \int_V p_c dV + 2j\omega \int_V (w_m - w_e) dV \\ &= \int_V (\sigma E^2 + \omega\varepsilon'' E^2 + \omega\mu'' H^2) dV + j\omega \int_V (\mu' H^2 - \varepsilon' E^2) dV \end{aligned} \quad (2)$$

其中， s 为包围天线的任意形状的有向闭合曲面， V 是该闭合曲线围成的体积， $w_e = \frac{1}{2}\varepsilon' E^2$ 和 $w_m = \frac{1}{2}\mu' H^2$ 分别是单位体积内的电场和磁场平均储能密度， p_c 是媒质材料因电磁损耗而产生的焦耳功率密度（即热功率密度和耗散功率密度）， \vec{S} 是电磁波产生的坡印廷矢量（即能流密度矢量， $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ ）。由1可见，在天线工作时

，与“源”解耦的辐射能一部分以焦耳热的形式耗散在损耗电阻上，另一部分能量则存储在近场区中，对外表现为电抗。所以只有当公式中第二部分即表现为电抗的能量降到最低，天线的工作效率才能得到提高。因此也就要求天线基底材料的复介电常数实部和复磁导率实部越接近越好。

铁氧体材料多数具有较高的磁导率和相对较低的介电常数，同时也具有较高的电阻率，理论上可以作为一种理想的天线小型化材料。在整个铁氧体家族中，尖晶石型铁氧体和六角铁氧体分别在不同的频段作为天线的基底材料。由于受到Sneek定律的限制，尖晶石铁氧体的截止频率一般在几百兆赫兹左右，这种材料被广泛地适用于甚高频领域的天线设计之中。而六角晶系铁氧体与尖晶石铁氧体相比则具有较高的磁晶各向异性，理论共振频率高达GHz以上，特别是平面六角铁氧体，在起始磁导率、截止频率和稳定性等方面都由于尖晶石铁氧体，因而成为研究人员研究的热点材料。

1.2 国内外研究概况

1.2.1 小型化天线基底材料的研究

华中科技大学的聂彦等人[1]制备了一类锶取代的平面六角铁氧体材料，锶的取代调节了材料的高频特性。通过SEM和XRD的分析，证明材料的主相是Z相，并具有优良的磁电特性和损耗特性。在1050℃下烧结的样品产生的损耗角正切仅为介电损耗角正切仅为0.05，小型化因子在2GHz下达到了11.2。

成都电子科技大学的TingQiang Wu等人通过传统的陶瓷技术制备了一种铝替代的Z型六角铁氧体材料 $(\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5})_3\text{Co}_2\text{Fe}_{20.4}\text{Al}_{1.6}\text{O}_{38}$ ，发现Al的掺杂提高了陶瓷的烧结和铁氧体的密度，增加了介电常数。与其他材料相比，该材料在致密程度、显微结构、磁特性和损耗等方面都有着非常好的特性，可以用来进行微带天线小型化的研究。

电子科技大学的C. H. Mu等人制备了 MgTiO_3 掺杂的 $\text{Ba}_3\text{Co}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ 样品，发现 Ti^{4+} 离子对 Fe^{3+} 离子的取代促进了铁氧体晶粒的生长，并提高了磁导率和介电常数，有效降低了损耗。同时，磁导率的截止频率随着掺杂的增多从0.33GHz上升到1.8GHz，是一种良好的天线小型化软磁材料。

美国亚拉巴马大学电子与计算机工程系和MINT中心的研究人员，通过将研磨40h的 Co_2Z 六角铁氧体和一种在950℃下烧结1h硼硅酸盐玻璃混合，得到了一种低损耗的复合材料。当玻璃材料的含量增加到4 wt. %时，磁导率和介电常数实部分别为1.96和7.28。在2.4GHz的频率下，磁损耗和介电损耗分别降至0.02和0.01以下。这种材料对于GHz频率的微波天线小型化是有研究价值的。

电子科技大学的ZhengZongliang等人通过固相反应发合成了一种NiZn铁氧体和 Co_2Z 六角铁氧体的复合材料。研究发现,当NiZn铁氧体的含量增加到65wt.%时,材料表现出了相同的磁导率和介电常数实部,同时小型化因子达到15,并具有足够低的磁损耗和介电损耗。这种材料做成的微波天线对自由空间将具有良好的阻抗匹配。

1.2.2 天线小型化设计研究

亚拉巴马大学电子计算机工程[1]系和MINT研究中心制成了一种0.029波长小型化的Co六角铁氧体地面数字多媒体广播天线(T-DMB)。该天线通过在 Co_2Z 六角铁氧体矩形方块上缠绕12匝铜带制成,被加载在一个和同轴馈线连接的地面基片上面。通过实验测定,该天线的中心频率约为196.2MHz左右,在195MHz频率下3D平均增益为6.55dB,辐射频率为22.13%。这种天线的尺寸比普通介电天线要小约60%。 Co_2Z 六角铁氧体在天线小型化方面表现出了优良的特性。

E. M. W天线公司研究和发展中心的Jeong Keun Ji等人制备了一种低损耗的Ni-Mn-Co铁氧体材料,这种材料具有相近的介电常数实部和磁导率实部,并在200MHz的时候具有很低的损耗角正切。小型化因子达到8左右。研究人员还在这种材料的基础上设计了一款螺旋地面数字多媒体广播天线,具有优良的参数和性能。

1.3 论文主要研究内容

本文的研究目的主要是利用已有的天线设计的理论研究在甚高频段下地面数字多媒体广播天线(T-DMB)的小型化问题。其中包含两个方面:一是通过传统的固相烧结陶瓷制备工艺探讨掺杂的平面Z型六角铁氧体的参数优化问题;二是使用有限元分析软件HFSS进行T-DMB天线的设计和仿真工作,优化天线的各向性能参数,从而得到一种可以满足发展需要的小型化微波天线。

本文的主要内容安排如下:

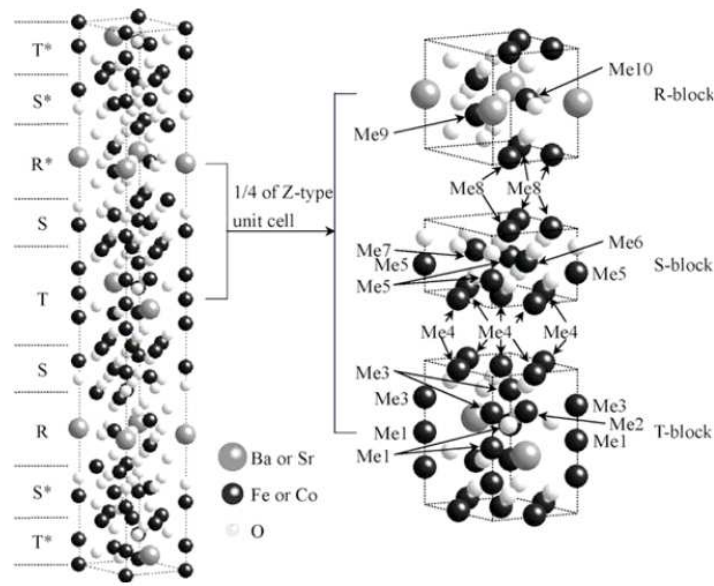
第一章,。。。

2 基础理论研究

2.1 Co_2Z 铁氧体的晶体结构(磁铅石型)

Co_2Z 属于磁铅石型六角晶系铁氧体,其化学组成为 $3\text{BaO} \cdot 2\text{MeO} \cdot 12\text{Fe}_2\text{O}_3$ 。对Z型铁氧体,当Me为Co离子时,可简化写成 Co_2Z 。理论上可认为Z型铁氧体是由同属于六角晶系的M型($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)与Y型($2\text{BaO} \cdot 2\text{CoO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)铁氧体按照一定的排列顺序组成的,即 $\text{Z}=\text{M}+\text{Y}$ 。

Co_2Z 铁氧体的晶体结构属于六角晶系,是 $\text{P6}_3/\text{mmc}$ 点阵群,氧原子与钡源自沿晶体的C轴方向紧密堆积22个原子层,共140个原子,其中包括6个钡离子,4个钴离子,48个铁离子,82个氧离子,晶体结构如下图所示。

Co₂Z 的晶体结构图

22个原子层中有12个氧层，6个钡层。每个氧层有4个氧离子，钡层是1个Ba²⁺取代氧层中1个O²⁻而成。在这些层间共有三类间隙位置：四面体间隙位、六面体间隙位和八面体间隙位，分别用A、E和B表示。Fe³⁺和Co²⁺填充在这些间隙位置中，按晶位种类具体可分为10种位置。

它是由三个基本块R块、S块和T块及R、S、T绕六角结构C轴旋转180而成的镜像R*块、S*块、T*块组成，这些基本结构沿C轴方向堆砌而成的，排列顺序为RSTSR*S*T*S*。R块的分子组成为(BaFe₆O₁₁)²⁻，它是由一个钡层与上下两个氧离子层所组成，其中包含1个E位间隙和5个B位间隙；S块是由二个规则的尖晶石结构(MeFe₂O₄)构成，分子组成为(Fe₆O₈)²⁺，其中包含2个A位间隙(四个氧离子组成的四面体间隙)和4个B位间隙；T块是由两个相邻的钡层和上下两个氧离子层所组成，分子结构为Ba₂Fe₈O₁₄，其中共有2个A位间隙和6个B。

2.2 Co₂Z铁氧体的基本特性

2.2.1 起始磁导率

铁氧体材料在弱场磁化的过程中，在磁中性的状态下，具有一个磁导率的极限值，即为铁氧体材料的起始磁导率 μ_i ：

$$\mu_i = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} \quad (3)$$

其中， μ_0 为真空磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)， H 为磁场强度 (A/m)， B 为磁感应强度 (T)。

由公式3可知，要提高铁氧体材料的起始磁导率，需要增加材料的饱和磁化强度，减少磁晶各向异性。但是较大的磁晶各向异性是保证铁氧体截止频率较大的先决条件。在本研究中，我们所讨论的天线使用频段是在甚高频段，因此不需要特别高的截止频率，所以我们应该通过一定的配方和工艺技术增加磁晶各向异性。

2.2.2 饱和磁化强度

磁性材料在外加磁场 H 的作用下,磁化强度 M 将随 H 的增大而增大,当 H 增到一定程度是,继续增大 H ,磁化强度 M 保持不变,我们称这时的磁化强度为饱和磁化强度,记为 M_s 。

从微观上来看,物质的磁性主要来源于原子磁矩,原子磁矩又由电子的自旋磁矩和轨道磁矩组成。铁氧体是一类亚铁磁性材料,其晶格中的金属离子通过超交换作用产生反平行排列的离子磁矩,铁氧体磁矩正是来源于这些没有被抵消的离子磁矩的反向排列。六角晶系铁氧体的晶体结构均由S、R、T块以不同的排列方式构成,其中的磁性离子之间发生超交换作用,由磁性离子间的距离及其夹角就可以决定哪些是居于主导地位的超交换作用,这样根据铁氧体中金属离子的分布和各种磁性离子的磁矩数,从而可算出各种铁氧体分子结构的饱和磁矩值。

2.2.3 磁晶各向异性

磁晶各向异性和晶体结构的对称性有很大关系,一般结构对称性高的晶体(如立方晶系),其磁晶各向异性小;结构对称性差的晶体(如六角晶系),磁晶各向异性大。六角晶系铁氧体的磁晶各向异性一般比立方晶系大1~2个数量级。

在晶体中,由于磁晶各向异性的存在,无外场时,磁畴内的磁矩倾向于沿易轴方向取向。这个来源于磁晶各向异性的场称之为磁晶各向异性等效场,或各向异性场,记作 H_K 。常常用各向异性场来表示晶体的磁晶各向异性。对六角晶系铁氧体,各向异性场分别用 H_K^0 和 H_K^ψ 表示。 H_K^0 表示 M_s 向主轴方向偏转时的各向异性场, H_K^ψ 表示 M_s 向从优平面偏转时的各向异性场。

2.2.4 电阻率

电阻率 ρ 是表征铁氧体导电特性的重要参数,绝大多数的铁氧体属于导电能力介于绝缘体和导体的半导体。由半导体理论可以得知,电阻率 ρ 随温度的升高按指数下降

$$\rho = \rho_\infty \exp(E_p/kT)$$

其中, E_p 为激活能,即电子发生跃迁所需要的能量; T 为绝对温度; k 为玻尔兹曼常数; ρ_∞ 为 $T \rightarrow \infty$ 时的电阻率。

铁氧体材料一般都具有很高的电阻率, ρ 可以达到 $10^{10}\Omega \cdot m$,损耗因子 $\tan\delta_e \ll 10^{-2} \sim 10^{-3}$,所以铁氧体在电子工业中占有很重要的位置。从晶体结构方面来说,铁氧体材料是多晶体,它的电阻率一般包括体电阻率和边界电阻率两个部分。

2.3 天线的工作原理

绝大多数常规天线都可以从原理上分解为很多个简单的“电基本振子”,所以如果要求解任意一个复杂天线的远场辐射特性,可以先求解组成天线的电基本振子的辐射特性,然后进行矢量叠加即可。

假设电基本振子放置在真空中,且不考虑热损耗,电流方向沿 z 轴,幅度随时间呈预先变化,即:

$$I = I_m \cos \omega t$$

考虑到电流源的长度 Δl 远远小于工作波长 λ ,可以得到矢量磁位的表达式为:

$$\vec{A} = \vec{z} \frac{\mu_0 I_m}{4\pi r} e^{-jkr} \Delta l$$

根据球坐标和极坐标的变换关系，可得：

$$\begin{aligned}\dot{A}_r &= -A \cos \theta = -\frac{\mu_0 \dot{I}_m}{4\pi r} e^{-jkr} \Delta l \cos \theta \\ \dot{A}_\theta &= -A \sin \theta = -\frac{\mu_0 \dot{I}_m}{4\pi r} e^{-jkr} \Delta l \sin \theta \\ \dot{A}_\varphi &= 0\end{aligned}$$

由电动力学原理可知，磁场强度与是矢量位的关系为：

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A}$$

则

$$\begin{aligned}\dot{H}_r &= \dot{H}_\theta = 0 \\ \dot{H}_\varphi &= \frac{r \sin \theta}{\mu_0 r^2 \sin \theta} \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} \\ A_r & r A_\theta \end{array} \right| \\ &= \frac{1}{\mu_0 r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{\mu_0 \dot{I}_m}{4\pi r} \cdot r e^{-jkr} \Delta l \sin \theta \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\mu_0 \dot{I}_m}{4\pi r} e^{-jkr} \Delta l \cos \theta \right) \right] \\ &= \frac{jk \dot{I}_m \Delta l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin \theta + \frac{\dot{I}_m \Delta l}{4\pi r^2} e^{-jkr} \sin \theta \\ &= \frac{\dot{I}_m \Delta l}{4\pi} e^{-jkr} \sin \theta \left(\frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right)\end{aligned}\quad (4)$$

根据麦克斯韦方程式可以进一步求得电场分量

$$\begin{aligned}\dot{E}_r &= \frac{\dot{I}_m \Delta l}{2\pi \omega \varepsilon_0} \left(\frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \cos \theta \\ \dot{E}_\theta &= \frac{\dot{I}_m \Delta l}{4\pi \omega \varepsilon_0} \left(\frac{jk^2}{r} + \frac{k}{r^2} - \frac{j}{r^3} \right) e^{-jkr} \sin \theta \\ \dot{E}_\varphi &= 0\end{aligned}\quad (5)$$

由推倒出来的空间场方程(4)(5)可得，当 $kr \ll 1$ 和 $kr \gg 1$ 时，电基本振子的场空间可以明显地分成近区场和远区场两个特征差异明显的场区。

在近区场中，即 $kr \ll 1$ 时， r 的倒数高次幂项的幅度占绝对优势，场分布可以简写成：

$$\begin{aligned}\dot{E}_r &= -j \frac{\dot{I}_m \Delta l}{2\pi \omega \varepsilon_0 r^3} \cos \theta \\ \dot{E}_\theta &= -j \frac{\dot{I}_m \Delta l}{4\pi \omega \varepsilon_0 r^3} \sin \theta \\ \dot{H}_\varphi &= \frac{\dot{I}_m \Delta l}{4\pi r^2} \sin \theta\end{aligned}\quad (6)$$

由(6)可知，近区场的电场分量与磁场分量垂直，相位差为 90° 。根据坡印廷定理可知近区场传播方向 r 上不存在能量的传输，因为电场能流密度矢量 $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ 为纯虚数，能量以电抗的形式存在于振子附近。所以近场区又称为“感应场”或“储能场”。

在远场区，即 $kr \gg 1$ 时，电磁场分量中，传播方向矢径 r 的倒数高次幂相衰减很快，远远快于 r 的导数项，故电磁场分布为：

$$\begin{aligned}\dot{E}_\theta &= j \frac{\dot{I}_m \Delta l k^2}{4\pi\omega\epsilon_0 r} e^{-jkr} \sin\theta = j \frac{\dot{I}_m \Delta l k}{2\omega\epsilon_0 \lambda r} e^{-jkr} \sin\theta \\ &= j \frac{\dot{I}_m \Delta l k}{2\omega\epsilon_0 \lambda r} e^{-jkr} F(\theta) \\ \dot{H}_\varphi &= \frac{jk \dot{I}_m \Delta l}{4\pi r} e^{-jkr} \sin\theta = j \frac{\dot{I}_m \Delta l}{2\lambda r} e^{-jkr} \sin\theta\end{aligned}\quad (7)$$

由(7)式可知，在远区场中， \vec{E} 和 \vec{H} 相位相同、相互正交，且垂直于传播方向 r 。由坡印廷定理易知在远区场中的电磁波能量能够辐射到较远的空间中去。故远区场又称为“辐射场”。

2.4 天线的设计参数

2.4.1 输入阻抗

天线的输入阻抗就是天线馈电端输入电压 U_{in} 与输入电流 I_{in} 的比值，完整的天线输入阻抗由辐射电阻 R_r 、损耗电阻 R_{loss} 和输入电抗 X_{in} 三部分组成：

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} = R_r + R_{loss} + jX_{in}$$

其中，辐射电阻表征的是天线辐射电磁波的能力，它在输入电阻中所占的比例越大，天线辐射电磁波的能力越强；损耗电阻主要表征非理想电解质、导磁体和导体引入的各种欧姆损耗；输入电抗则表征没有辐射出去的、以电抗形式存储在近区场中的电磁能量，如果电抗值为正，则储能呈感性，近区场的磁场储能占优势；反之则呈容性，近区场的电场储能占优势；当近区场的电场去能和磁场储能趋于平衡时，电抗趋于0，天线呈“谐振”状态。天线处于谐振状态时，天线的输入电阻只表现为辐射电阻和损耗电阻，这时天线的功率最大。但电抗趋于0并不意味着近区场没有储能，而是电场能和磁场能处于相对一种动态的平衡状态。

2.4.2 反射系数与驻波比

在现在的射频系统中，同轴电缆一般被用作传输介质，因为同轴电缆的特性阻抗一般为 50Ω 或 75Ω ，所以天线的阻抗也相应地应该是 50Ω 或 75Ω ，即系统特性阻抗的共轭值，否则就会出现因阻抗失配而产生反射的情况。为了衡量天线的反射特性以及与前端系统的匹配特性，就需要引入反射系数或驻波比的概念。

根据微波理论，假定天线的输入阻抗为 Z_L ，系统的特性阻抗为 Z_0 ，则两者通过特性阻抗为 Z_0 的传输线相连后，从输入端口往天线方向看进去的反射系数为：

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

为了方便工程中的使用，一般使用对数形式描述反射系数 Γ ，即用分贝（dB）表示。有时又将反射系数称为“回波损耗”（RL）。采用回波损耗描述的天线匹配特性取正值。

$$\begin{aligned}\Gamma(\text{dB}) &= 10\lg|\Gamma|^2 = 20\lg|\Gamma|(\text{dB}) = 20\lg\left|\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}\right|(\text{dB}) \\ \text{RL}(\text{dB}) &= -10\lg|\Gamma|^2 = -20\lg|\Gamma|(\text{dB}) = -20\lg\left|\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}\right|(\text{dB})\end{aligned}$$

同时，我们还可以采用“驻波比”来描述阻抗匹配特性，驻波比定义为：

$$\text{SWR} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

由上式可知：回波损耗为正数，取值在0到无穷大分贝之间，值越大，表示阻抗匹配特性越好。当 $\text{RL} = 0\text{dB}$ 时，系统处于“全反射”状态，而当 $\text{RL} = \infty\text{dB}$ 时，系统处于“完全匹配”状态。然而在实际的实验过程中，高于40dB以上的回波损耗没有太大的实际价值；对于驻波比来说，取值在1到无穷大之间，当 $\text{SWR}=1$ 时，系统处于完全匹配状态，而当 $\text{SWR} = \infty$ 时，系统完全失配。

通常情况下，如果天线的驻波比过大，就意味着系统的阻抗匹配性能不佳，从而引起反射和干扰，导致传输质量和系统性能降低。所以在微波频段的应用中，一般要求天线的驻波比维持在一个较低的水平。

2.4.3 方向图与波数宽度

天线的方向图就是天线辐射电场或功率的幅度在空间坐标中的函数分布。在工程中，多采用“功率方向图”描述天线的辐射特性。在一般的应用过程中，为了表示方便，常将天线的方向图投影到某个平面上，并对峰值进行归一化，来研究辐射的方向特性。二维平面的方向图又称“波瓣图”，其中，电场分量所在的主工作平面称为“E面”，垂直于电场分量的主工作面称为“H面”。

在方向图上，用于描述天线特性的一个重要参数就是波束宽度，即指天线的方向图中低于峰值水平一定数值处所成夹角的宽度，一般使用的有3dB波束宽度和10dB波束宽度。其中3dB波束宽度中的波束一般称为“主波束”，其余波束称为“副波束”。

2.4.4 天线的方向性系数

天线的方向性系数是指在相同的辐射功率下，某个天线产生于某点的能量密度与参考天线在同一位置上产生的能量密度的比值，称为该天线在该方向上的方向系数，记为 D 。天线的方向性系数是为了比较不同天线辐射能力而引入的概念。其中的参考天线一般指无方向性理想点源，其辐射方向图为理想的球状。

由上述定义，假定天线的辐射功率为 P_r ，理想点源天线的辐射功率为 P_{r0} ，天线在最大辐射方向的发射能量为 ξ_r ，理想点源天线的发射能量为 ξ_0 ，在矢径 r 相同时，表面积 A_r 和 A_0 对应的能量密度分别为 S_r 和 S_0 ，从而得出方向性系数 D 的表达式为：

$$D = \frac{S_r}{S_0} \Big|_{P_r=P_0} = \frac{\xi_r/A_r}{\xi_0/A_0} \Big|_{P_r=P_0}$$

通过进一步的推导可得：

$$D \approx \frac{4\pi}{\theta_{-3\text{dB}} \varphi_{-3\text{dB}}} \approx \frac{4\pi \left(\frac{180}{\pi}\right)^2}{\theta_{-3\text{dB}}^\circ \varphi_{-3\text{dB}}^\circ} \approx \frac{41253}{\theta_{-3\text{dB}}^\circ \varphi_{-3\text{dB}}^\circ}$$

2.4.5 天线的效率

天线的效率是衡量天线将导行电磁波转化成辐射电磁波的有效程度，定义 P_r 为辐射功率， P_l 为损耗功率，则天线的效率可以表示为：

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_l}$$

由功率与阻抗的关系又可以进一步得到：

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_{\text{loss}}}$$

从而可以知道，如果要提高天线的效率，必须尽可能提高辐射电阻 R_r 所占的比例，降低损耗电阻 R_{loss} 所占的比例。

2.4.6 天线的增益系数

由前面的论述可知，天线的方向性系数表征天线的辐射能量集中程度，效率表征天线能量转换的能力，如果将两者结合成一个参数，则称为天线的增益系数，记为 G 。

天线的增益系数可以定义为：在输入功率相同的条件下，天线在最大辐射方向上某一点产生的能量密度与理想点源天线在同一位置上产生的能量密度之比，即：

$$G = \frac{S_r}{S_0} \Big|_{\text{same input power}}$$

值得注意的是，增益是相对于理想点源定义的，如果使用对数的形式表示，即为：

$$G(\text{dBi}) = 10\lg G(\text{dBi})$$

其中，