

超宽带圆片单极天线的带宽特性分析

钟玲玲 栗换彩 章飚 李鹏

(航天科工集团三院八三五七所, 天津 300141)

摘要: 圆片单极天线具有良好的电特性, 分析结果表明其至少具有 10:1 以上的阻抗带宽, 本文用两个模型研究了该天线之所以能够在超宽频带范围内获得较好阻抗特性的原因。按照行波驻波模型, 天线在低频端运行于驻波模式, 在高频端运行于行波模式, 因为行波模式的存在使得天线的带宽很宽; 按照多环多谐振模型, 圆片单极天线可以被认为是多环叠加或者多环互补复合而来的, 多个相近谐振模式的重叠使得圆片单极天线拥有非常宽的带宽。本文的理论分析结果可以为相应的军事和民用需求提供参考与借鉴。

关键词: 圆片单极天线, 超宽带天线, 阻抗带宽

Bandwidth Performance Analysis of the Ultra-wideband Circular Disc Monopole Antenna

Zhong Lingling Li Huancai Zhang Biao Li Peng

(8357 Research Institute of the 3rd Institute Academy of CASIC, Tianjin 300141)

Abstract: The circular disc monopole antenna has excellent electrical characteristics. The analytic results show that it has 10:1 impedance bandwidth at least. In this paper, the reason why the antenna has good impedance characteristic within the ultra-wide bandwidth is researched using two models. According to the travelling wave and standing wave model, the antenna operates in a standing wave mode at lower frequencies and in a travelling wave mode at higher frequencies. The bandwidth of the antenna is broad because the existence of the travelling wave mode. According to the multiple-ring and multiple-resonant model, the circular disc monopole can be considered as the superposition or complemental composite of multiple rings. The overlap of numbers of related resonant modes makes the antenna has ultra-wide bandwidth. The theoretical research results can be promoted to wider band in order to provide consultation for military and civil requirements.

Keywords: Circular disc monopole antenna; Ultra-wideband antenna; Impedance bandwidth

1 引言

超宽带是一种新颖的无线通信技术, 它在现代无线系统中有着广泛的应用, 如超宽带通信系统、超宽带雷达系统和超宽带电子侦察系统等。现有的无源超宽带天线包括双圆锥行波天线、TEM 喇叭天线、平面等角螺旋天线和对数周期天线等, 这几类天线在尺寸、效率、色散等方面均存在着不同程度的局限性。片状单极天线是近年来超宽带天线的研究热点之一, 这种天线可获得极大的阻抗带宽和较高的辐射效率, 并具有相对简单的结构和较低的成

本, 因此这类平面无源结构是目前实现超宽带天线的常用方案。片状单极天线辐射单元的形状包括椭圆、多边形等, 这其中由 W.Stohr 提出的圆片单极天线具有很宽的阻抗带宽, 从而可以作为简单实用的超宽带通信天线^[1]。

2 超宽带圆片单极天线的基本结构

超宽带圆片单极天线的基本结构如图 1 所示, 天线由边长为 d 的正方形地板和垂直于地板的金属圆片组成, 采用同轴馈电的方式, 馈电点为圆片的

下端点与地板的中心，馈电高度为 h ，制作辐射圆片的材料可以选择厚度为 g 的金属，切割成半径为 r 的圆。

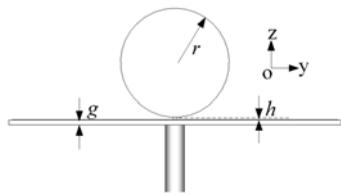


图 1 超宽带圆片单极天线

3 超宽带圆片单极天线的带宽特性分析

近年来，国内外众多专家学者对超宽带圆片单极天线进行了仿真与实验研究，证明这种天线具有非常宽的阻抗带宽，下面将用行波驻波模型和多环多谐振模型对超宽带圆片单极天线的带宽特性进行理论分析，从而说明这种天线能够在超宽频带范围内获得较好特性的原因。

3.1 行波驻波模型

实际的超宽带天线希望其尽可能的工作于行波状态，由于无反射波，天线输入端口匹配，而且是宽带匹配；从时域角度来说，若能使天线电流是行波电流，则辐射场波形与电流波形相差不大，拖尾幅度小，因此工作于行波状态的天线具有较宽的阻抗带宽。

从行波驻波模型的角度考虑，天线工作原理如图 2 所示。在低频端，因为波长大于天线的尺寸，电磁波以一种振荡模式运行，也就是驻波形式；随着频率的升高，天线开始运行于行波和驻波的混合模式；在高频端，天线的尺寸相对于波长是比较大的，电磁波需要沿着天线结构运行，因此行波成为天线运行的主要模式。对于圆片单极天线，如果圆片的下边缘和地板之间形成的缝隙尺寸适当，行波就能很好的运行，因而天线也就可以获得非常宽的 -10dB 阻抗带宽^[3]。

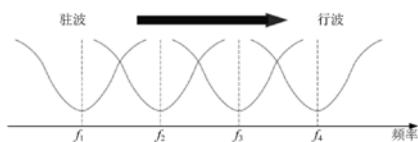


图 2 超宽带圆片单极天线的运行原理

图 3 至图 5 为半径 25mm 的圆片单极天线在频率分别为 1GHz、15GHz 以及 30GHz 的情况下，不同相位值时的表面电流分布。从图中可以看出，在低频端(1GHz)，表面电流呈现类似驻波分布的形式；随着频率的升高，表面电流呈现行波和驻波混合模式(15GHz)；在高频端(30GHz)，表面电流的主要呈现行波分布模式，从而抑制了多次反射，使辐射波形和带宽特性明显得到改善，这与上述理论分析的结果是一致的。

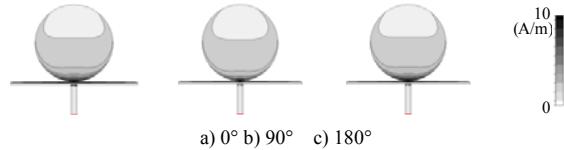


图 3 圆片单极天线的表面电流分布 ($f=1\text{GHz}$)

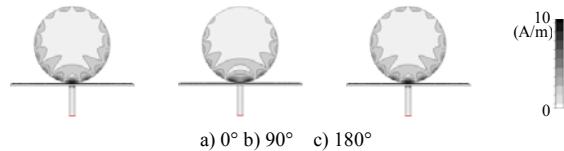


图 4 圆片单极天线的表面电流分布 ($f=15\text{GHz}$)

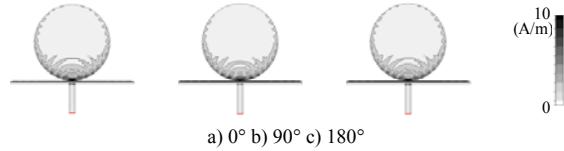


图 5 圆片单极天线的表面电流分布 ($f=30\text{GHz}$)

3.2 多环多谐振模型

虽然圆片单极天线的阻抗带宽较宽，但是在带宽范围内，反射损耗曲线经过了多次振荡，这说明圆片单极天线的超宽带特性是由多个相近谐振模式的叠加得到的。

3.2.1 单圆环的多频特性

图 6 所示为单圆环单极天线，它将圆片单极天线掏空，掏空区域为与原有圆片同心的较小圆片。其基本结构参数与圆片单极天线一致，圆环外半径为 r_1 ，内半径为 r_2 ，环宽 $r_{12}=r_1-r_2$ ，该天线馈电方式与圆片单极天线一致，仍然采用同轴馈电，为了标识的方便图中同轴线未予绘出；另外，此处的单环指环宽较小的圆环，一般 $r_{12}<1\text{mm}$ 。

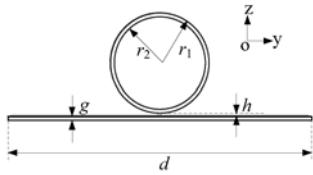


图 6 单圆环单极天线

设单圆环单极天线地板边长 $d=65\text{mm}$, 馈电高度 $h=0.5\text{mm}$, 地板和金属圆片的厚度 $g=1\text{mm}$, 圆环外半径 $r_1=11\text{mm}$, 内半径 $r_2=10.5\text{mm}$, 由图 7 可以明显的看到, 这种圆环天线具有多频特性。

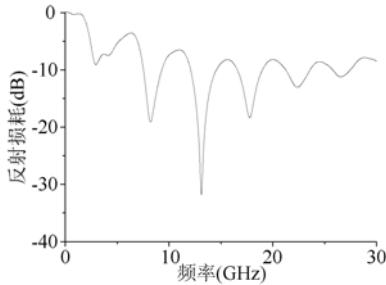


图 7 单圆环单极天线的反射损耗

事实上, 当地板在一定范围内变化时, 可以认为单圆环单极天线的反射损耗 $|S_{11}|$ 在不同频率上是一个与馈电高度 h 、地板和金属圆片的厚度 g 、圆环外半径 r_1 及环宽 r_{12} 均有关系的函数 F , 如下式所示:

$$|S_{11}| = F(h, g, r_1, r_{12}) \quad (1)$$

3.2.2 圆片单极天线多环频率叠加模型

既然单环能够获得多频特性, 那么从理论上来说, 多环结构叠加就应该能够得到更多的谐振频率。以三环叠加为例, 如图 8 所示, 保持 $d=65\text{mm}$, $h=0.5\text{mm}$, $g=1\text{mm}$, $r_{12}=0.5\text{mm}$ 不变, 将为外半径分别为 3.67mm 、 7.33mm 和 11mm 的三个单环的馈电点重合在一起, 就形成了一个三环结构。

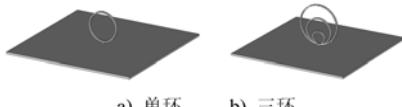


图 8 三环结构及其组成

图 9 表示上述不同尺寸的三个单环及三环叠加在一起形成单极天线的反射损耗。A、B、C、D、E、F、G 为三环结构的 7 个谐振频点, 实际上, A 点的谐振频率是由其附近的单环谐振点 A_1 而来, B 点由 B_1 而来, C 点由两端的 C_1 和 C_2 叠加而来……, 以此类推, 即可得到如下表达式:

$$\left. \begin{aligned} f_A &\approx f_{A_1} \\ f_B &\approx f_{B_1} \\ f_C &\approx (f_{C_1} + f_{C_2})/2 \\ f_D &\approx (f_{D_1} + f_{D_2})/2 \\ f_E &\approx f_{E_1} \\ f_F &\approx (f_{F_1} + f_{F_2})/2 \\ f_G &\approx (f_{G_1} + f_{G_2})/2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

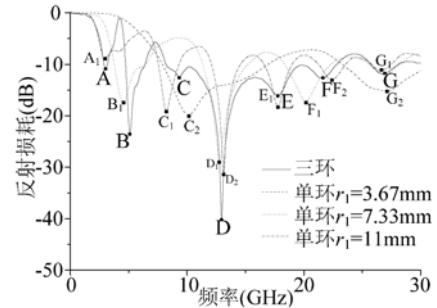


图 9 不同外半径的单环及三环结构单极天线的反射损耗

以上结果说明, 一个三环结构单极天线的谐振频点是由组成它的三个圆环叠加而来, 即由公式(1)可以拓展得到三环单极天线的反射损耗表达式:

$$\begin{aligned} |S_{11}|_{23} &= F_1(h, g, r_{l_1}, r_{l_2}) + F_2(h, g, r_{l_2}, r_{l_3}) \\ &\quad + F_3(h, g, r_{l_3}, r_{l_1}) \end{aligned} \quad (3)$$

上式中 r_{l_1} 、 r_{l_2} 、 r_{l_3} 分别表示不同单环结构所对应的外半径值, 后续公式中类推。

由此推广开来, 在三环结构的基础上, 继续增加环的数目至 n , 就会获得更多的谐振频率, 其反射损耗如下式所示:

$$\begin{aligned} |S_{11}|_{23...n} &= F_1(h, g, r_{l_1}, r_{l_2}) + F_2(h, g, r_{l_2}, r_{l_3}) \\ &\quad + \cdots + F_n(h, g, r_{l_n}, r_{l_1}) \end{aligned} \quad (4)$$

随着 n 的增加, 多环单极天线的结构与圆片天线越来越接近, n 的数目增加到极限, 多环单极天线结构将与圆片单极天线一致, 多谐振点特性将最终变换为超宽带特性。

3.2.3 圆片单极天线多环互补复合模型

首先, 采用两个名词 “原环” 及 “互补环” 以说明问题。如图 10 所示, “原环” 指上面提到的等边距环在馈电点处重合叠加所得到的多环结构; “互补环” 指一个半径与 “原环” 最大外半径相同的圆片单极天线掏空掉 “原环” 部分剩下的互补结构。

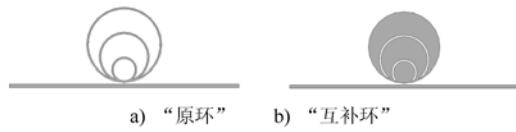


图 10 三环“原环”与“互补环”单极天线

仍然以三环为例,由公式(3),假定三环“原环”及“互补环”反射损耗分别如下:

$$|S_{11}|_{\text{三环原环}} = F_1(h, g, r_{l_1}, r_{l2}) + F_2(h, g, r_{l_2}, r_{l1}) + F_3(h, g, r_{l_3}, r_{l2}) \quad (5)$$

$$|S_{11}|_{\text{三环互补环}} = F'_1(h, g, r_{l_1}, r_{l2}) + F'_2(h, g, r_{l_2}, r_{l1}) + F'_3(h, g, r_{l_3}, r_{l2}) \quad (6)$$

三环“原环”及“互补环”叠加,成为一个完整的圆片单极天线,反射损耗表达式如下:

$$\begin{aligned} |S_{11}|_{\text{圆片}} = & F_1(h, g, r_{l_1}, r_{l2}) + F_2(h, g, r_{l_2}, r_{l1}) \\ & + F_3(h, g, r_{l_3}, r_{l2}) + F'_1(h, g, r_{l_1}, r_{l2}) \\ & + F'_2(h, g, r_{l_2}, r_{l1}) + F'_3(h, g, r_{l_3}, r_{l2}) \end{aligned} \quad (7)$$

上述表达式的数值结果应与相应的圆片单极天线大体一致,下面通过具体反射损耗的值来说明这一问题。如前所述,设定 $d=65\text{mm}$, $h=0.5\text{mm}$, $g=1\text{mm}$, $r_{l2}=0.5\text{mm}$ 不变,“原环”的三个外半径分别为 3.67mm 、 7.33mm 和 11mm 。从图 11 中可以看出,在 CD 段,“原环”结构反射损耗的凸起与“互补环”的凹陷互为补充,使得圆片单极天线在这一频段的反射损耗值相对较低;类似地,在 DE 段,“互补环”结构反射损耗的凸起与“原环”的凹陷也能够互为补充。需要说明的是,式(7)表述的只是近似关系,它用来定性的说明圆片单极天线的超宽带特性。

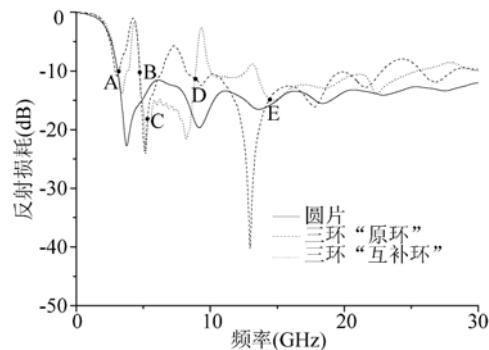


图 11 三环“原环”与“互补环”及圆片单极天线的反射损耗

4 结论

本文分别用行波驻波模型和多环多谐振模型对超宽带圆片单极天线的带宽特性进行了理论分析。从行波驻波模型的角度考虑,在低频末端,天线运行于驻波形式;随着频率的升高,天线开始运行于行波和驻波的混合模式;在高频末端,行波成为天线运行的主要模式,因此,如果圆片馈电间距选择适当,行波就能很好的运行,因而天线也就可以获得非常宽的带宽。从多环多谐振模型的角度考虑,单环具有明显的多频特性,而圆片单极天线可以被认为是由多环叠加或者多环互补复合而来的,因此多个相近谐振模式的重叠使得圆片单极天线拥有非常宽的带宽。本文所研究的内容可以为今后超宽带天线的设计提供有价值的参考。

参 考 文 献

- [1] C. D. Zhao. Analysis on the Properties of a Coupled Planar Dipole UWB Antenna. *Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2004, 3(1): 317~320
- [2] C. A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. New York: Harper and Row, 1982: 451~454
- [3] A. Ben, D. Mischa, O. Ernest, et al.. *Ultra-wideband Antennas and Propagation for Communications, Radar and Imaging*. John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 120~121

作者简介:

钟玲玲,女,博士,工程师,主要研究领域为微波天线。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>