

一种宽带高效加载天线的研究

郭玉春，史小卫

(西安电子科技大学，西安 710071)

摘要：本文以 Wu-King 无反射电阻加载天线为基础，通过对任意电流分布的一般连续阻抗加载分布的分析，推导出一种高效的阻抗加载分布，给出了这种高效加载分布的特性。并以此设计了 6 米鞭天线，数值仿真结果说明采用这种阻抗加载分布的天线具有高效和宽带特性。

关键词：加载天线，阻抗加载，电流分布

1 引言

随着电子技术的飞跃发展，在现代通信技术中，小型宽带天线成为天线研究中的一个重要课题。单个简单的线天线，其特性参数往往不能够满足我们的要求。当改变天线电流分布时，天线的特性参数一定在变，而加载可以改变天线的电流分布使电流分布呈行波状态，从而展宽天线的带宽。本文给出一种高效的加载方法，分析了这种加载分布的特性。仿真结果显示天线不仅具有超宽的带宽，而且有较高的效率。

2 理论基础

2.1 任意电流分布的一般连续阻抗加载分布

设有一根细圆柱偶极子天线，天线半径为 a ，总长度为 $2L$ 且假设 $L \gg a$ ， $ka \ll 1$ ，馈源电压为 $V_0(\omega)$ ，天线轴和 z 轴，天线中心和坐标点重合，如图 1 所示。

设天线上单位长度的加载阻抗为 $Z(z)$ ，对于 δ

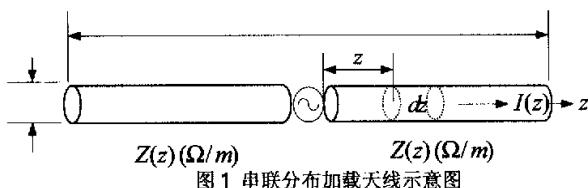


图 1 串联分布加载天线示意图

源激励的加载圆柱天线，天线上电流 $I(z)$ 所满足的谢昆诺夫积分方程如式(1)所示。

$$\int_{-L}^L \left\{ I(z') + \frac{1}{k_0^2} \frac{d^2 I(z')}{dz'^2} \right\} g(z', z) dz' - \frac{1}{k_0^2} \frac{dI(z')}{dz'} g(z', z) \Big|_{z=-L}^{z=L} = \frac{E_b}{j\omega\mu} = \frac{-Z(z)I(z)}{j\omega\mu} + \frac{V_0\delta(z)}{j\omega\mu} \quad (1)$$

式中， $g(z', z) = e^{-jk_0 R} / 4\pi R$ 为格林函数； $k_0 = \omega/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 为传输常数； $R = \sqrt{(z-z')^2 + a^2}$ 为源点到场点的距离； E_b 为将激励源在天线内表面产生的场，由激励电场 $E_{iz1}(z) = V_0\delta(z)$ 和加载阻抗上的电场 $E_{iz2}(z) = -Z(z)I(z)$ 组成。

当 $z \neq 0$ 时， $E_{iz}(z) = 0$ ，将 $I(z) = \bar{I}(z)I(0)$ 代入式即可以解出 $Z(z)$ ，见式(2)。

$$Z(z) = \frac{j\omega\mu}{I(z)} \left\{ \frac{1}{k_0^2} \frac{d\bar{I}(z')}{dz'^2} g(z', z) dz' \Big|_{z'=-L}^{z'=L} - \int_{-L}^L \left\{ \bar{I}(z') + \frac{1}{k_0^2} \frac{dI(z')}{dz'} \right\} g(z', z) dz' \right\} \quad (2)$$

式(2)便是在 $z \neq 0$ 时用归一化电流表示的实现任意电流分布的一般连续阻抗加载公式。从式(2)可以看出阻抗的加载量只取决于天线上的电流形式，而与天线输入端的电流无关，且每一种特定的电流分布都有相对应的加载阻抗分布来实现。对 $z = 0$ ，加载阻抗只影响输入电流 $I(0)$ 的大小，可取 $Z(0) = \lim_{z \rightarrow 0} Z(z)$ 。

2.2 高效无反射的阻抗加载分布

T.T.Wu 和 R.W.P.King 曾经提出一种无反射的电阻加载天线，其假设的电流分布形式为 $I(z) = C(L - |z|) e^{-jk_0|z|}$ 。这种分布虽然可以产生很宽的带宽，但电流的振幅是呈线性降低的，其平均电流不高，因而效率也不高。为了提高效率，对这种电流分布进行扩展，使电流振幅以 ν 次幂衰减，如式(3)。

$$I(z) = C'(L - |z|)^{\nu} e^{-jk_0|z|} \quad (3)$$

式(3)代表的是一个在天线馈电点 $z = 0$ 处有最大值 $I(0) = CL^{\nu}$ 的单向行波，其幅值随离开馈电点的距离 $|z|$ 的增加而以幂指数 ν 的速度下减，在 $z = \pm L$ 处，即天线的端点上 $I(\pm L) = 0$ ，即电流在端点处已经衰减为零，不存在反射波了。利用天线的结构对称性和 δ 源激励的条件，可以推出常数 C' ，整理后可得天线上的电流分布如式(4)所示。

$$I(z) = \frac{2\pi V_0}{\eta \psi (1 - j\nu / k_0 L)} (1 - \frac{|z|}{L})^{\nu} e^{-jk_0|z|}$$

式中， V_0 是激励电压， ψ 是一个比例因子，影响参量 ψ 的主要因素是天线的长细比 Ω ($\Omega = 2 \ln(2L/a)$)，不是电长度本身。 ψ 参量的计算参见文献[1]。

对式(4)归一化并代入式(2)，经化简可以得出满足形如式(4)电流分布的单位长度的加载阻抗公式(5)。从式(5)可看出，不管天线 L 多长，总有一个合适的加载阻抗分布 $Z(z)$ 使天线的电流不存在反射波。天线越短，要求单位长度的加载阻抗就越大。利用这种分布阻抗加载，可以使天线在相当宽的频带范围内保持电流处于行波状态。

$$Z(z) = 60\psi\nu(L - |z|)^{\nu-2} \left\{ 1 - j \frac{\nu-1}{2k_0(L - |z|)} \right\} \quad (5)$$

天线的输入阻抗即激励电压与输入端的电流的比值，如式(6)。天线方向图函数和效率表达式由式(7)和式(8)给出，式(8)中 $\nu \neq 1/2, 1/3$ ，这两点需要作特殊处理。当幂指数 $\nu = 1$ 时，式(3)、式(5)~(8)即为 Wu-King 加载分布的特性。可见这种高效的无反射阻抗加载分布是 Wu-King 加载分布的推广。

$$Z_{in} = \frac{V_0}{I(0)} = 60\psi \left(1 - \frac{jv}{k_0 L} \right) \quad (6)$$

$$f(k_0 L, \theta) = \frac{1}{\sin^{2v+1} \theta} \left\{ \begin{aligned} & \left(\sin^2 \frac{\theta}{2} \right)^{v+1} e^{\theta_i} (\Gamma(v+1, 0) - \Gamma(v+1, \theta_i)) \\ & + \left(\cos^2 \frac{\theta}{2} \right)^{v+1} e^{\theta_2} (\Gamma(v+1, 0) - \Gamma(v+1, \theta_2)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $\theta_1 = -j2k_0L \cos^2 \frac{\theta}{2}$, $\theta_2 = -j2k_0L \sin^2 \frac{\theta}{2}$, Γ 为不完全伽马函数。

$$\eta = \frac{\left(\frac{4}{k_0^2}\right)^v \int_0^\pi |f(k_0 L, \theta)|^2 \sin \theta d\theta}{\left(\frac{4}{k_0^2}\right)^v \int_0^\pi |f(k_0 L, \theta)|^2 \sin \theta d\theta + 2v \left(\psi_{\frac{v}{3v-1}} - \psi_{\frac{1-v}{2k_0}} \frac{L^{3v-1}}{2v-1} \right)} \quad (8)$$

2.3 特性分析

Figure 2 consists of two plots. Plot (a) shows the current amplitude $|I(x)|$ (in A/m) versus the normalized position x/L for three values of the power-law index v : 0.1 (solid line), 0.5 (dashed line), and 1.0 (dotted line). The current decreases as x/L increases, with higher v values showing a steeper decline. Plot (b) shows the normalized load resistance $R(x)/R_0$ versus x/L for three cases: $Re(v)=0.1, Im(v)=0.1$ (solid line); $Re(v)=0.5, Im(v)=0.5$ (dashed line); and $Re(v)=1.0, Im(v)=1.0$ (dotted line). The resistance exhibits sharp peaks at $x/L = 0$ and $x/L = L$, with the peak magnitude increasing as v increases.

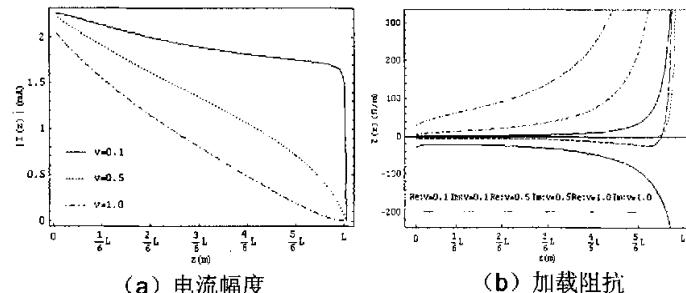


图 2 不同幂指数的电流幅度和加载阳抗

情况下, 天线电阻加载量明显降低, 幂指数越小电阻值越小, 这是天线效率提高的主要原因; 另外, $\nu=1$ 的情况下为阻容加载, 而 $\nu<1$ 时加载阻抗的虚部在 $0\sim0.9L$ 为容性加载, $0.9L\sim1.0L$ 为感性加载。当天线工作在电小尺寸的情况下, 感性加载可以提高天线的有效长度, 从而提高天线的辐射效率。

天线的输入阻抗式(6)显示, 天线的输入阻抗实部和参量 ψ 成比例, 但虚部与 Wu-King 分布相差了一个系数, 而这个系数正好是幂指数 v 。当幂指数小于 1 时, 幂指数越小, 与 Wu-King 分布的无反射加载天线相比较, 天线的阻抗带宽就越平坦。

虽然这种电流分布有比较高的平均电流，提高了天线效率，但在提高效率的同时也使馈点电流增大，输入阻抗降低，引起天线输入端口的反射。在选取的幂指数的时候要

综合考虑天线的输入阻抗和加载效率。

3 仿真实例

分布加载天线具有良好的宽频带特性，但天线制作困难，通常采用准连续结构来代替连续加载结构。在电性能相同的条件下，通过对分布加载的准连续结构进行集总化，即可以实现分布加载。本文以6米单极子鞭天线作为设计对象。

天线的仿真需要确定四个量：天线的长细比 L/a 、设计频率 f_0 、幂指数 ν 、分段数 M 四个变量。四个变量的不同选取对天线的效率和驻波比影响很大。天线仿真参数分别取值为： $L/a=6m/30mm$, $f_0=12.5MHz$, $M=12$, $\nu=0.4$ ，数值分析采用经典的矩量法计算。

图3是天线的仿真特性曲线。其中，驻波比曲线是在天线端接 9:4 的阻抗变换器后得到的，如果

在加 LC 宽带匹配网络，天线的输入阻抗带宽将更宽。图3组曲线显示采用本文的加载阻抗分布不仅可以获得宽带特性，效率也得到极大的提高。尤其是在天线工作频段的低端，效率提高显著，可以在电小天线领域获得广泛的应用。

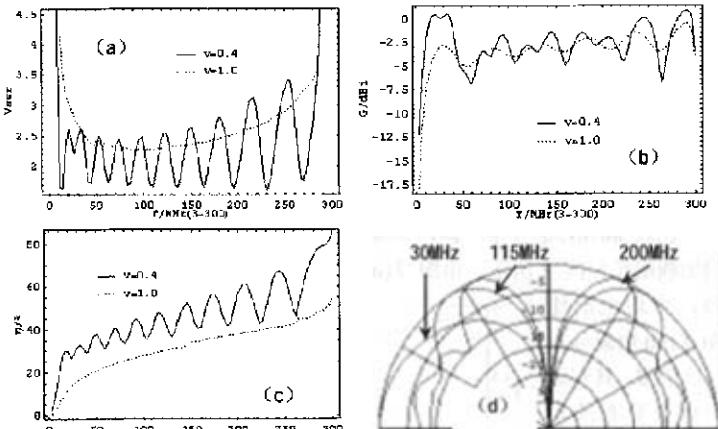


图3 天线的特性 (a) 驻波比 (b) 增益 (c) 效率 (d) 方向图

4 结论

本文在任意电流分布的一般连续阻抗加载分布的基础上，结合无反射电阻加载天线，介绍了一种高效的加载阻抗分布，仿真实例表明了采用这种加载分布可以在展宽天线带宽的同时极大的提高天线效率，为现代通信系统提供了一种实用的宽带高效天线。

参考文献

- [1] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安: 西安电子科技大学, 1995.
- [2] 谢处方, 王石安, 文希理. 加载与媒质中天线[M]. 四川: 电子科技大学出版社, 1990.
- [3] 刘其中, 宫德明. 天线的计算机辅助设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1988.
- [4] Richard. Formato. Wideband Antennas[J]. Electronics World, 1997: 202-205.
- [5] Wu.T.T, King.R.W.P. The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965.5: 369-373.

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>