

超宽带天线设计

郭玉春 史小卫

西电电子科技大学, 西安 710071, email: ycguo@mail.xidian.edu.cn

摘要: 基于 Wu-King 加载原理, 扩展其线性电流分布为双指数电流分布, 修正了 Wu-King 分布加载电阻规律中计算不准确的地方, 实现了一种高效无反射加载分布; 理论研究了它的宽带电特性; 首次提出了伸长系数的概念, 并给出了天线的最佳参数设计曲线。理论计算表明此加载分布可使天线在带宽和效率方面获得比 Wu-King 加载分布更有效的提高, 大大降低了天线的振铃效应, 提高了天线的脉冲辐射特性, 可更有效的发射和接收 UWB 信号。

关键词: 超宽带天线 电阻加载 无反射电阻加载分布 加载效率

1 引言

超宽带无线通信技术(UWB)通常是指信号带宽大于 1.5GHz 或带宽比(信号带宽与中心频率之比)大于 25%的无线电技术。超宽带天线是超宽带无线通信系统中的关键部件, 天线的性能将直接影响整个系统的性能。天线要求能无失真的将短脉冲辐射或者接收。根据波形传递不畸变条件, 超宽带天线应满足两个条件^[1]: 一是天线的输入阻抗具有超宽带特性; 二是天线的相位中心具有超宽频带不变特性。常用的 UWB 天线^[2,3]有 TEM 喇叭、蝶型天线、双锥天线和电阻加载天线等。由于短脉冲具有极宽的频谱结构, 要使天线满足上述条件, 采用 Wu-King 的电阻加载技术是一种很好的方法, 通过电阻加载使天线的电流部分或全部呈行波分布, 从而使天线的电特性具有宽带特性^[4-6]。Wu-King 电阻加载天线可产生相当宽的频带, 但效率只有大约 20%左右^[2,3]。本文基于 Wu-King 理论^[5], 提出一种高效无反射加载分布, 理论上详细分析了采用此加载分布的天线电特性; 并首次引入了伸长系数的概念, 修正了 Wu-King 加载电阻规律中参量 ψ 不准确的计算。理论计算结果显示天线不仅具有比 Wu-King 超宽的带宽, 而且有较高的效率, 天线的振铃效应更小, 可更有效的发射和接收 UWB 信号; 同时文中还给出天线的最佳参数设计曲线。

2 理论

2.1 加载阻抗分布

T. T. Wu 和 R. W. P. King 提出的无反射分布电阻加载虽可产生很宽的带宽, 但电流的振幅是呈线性降低的, 其平均电流不高, 效率很低^[5]。为提高效率, 降低加载天线的振铃现象, 对此线性电流分布进行扩展, 使电流振幅以双指数函数衰减, 如式(1)。

$$I(z) = C\rho^{-1} (e^{\rho L} - e^{\rho|z|}) e^{-jk_0|z|} = C' (e^{\rho L} - e^{\rho|z|}) e^{-jk_0|z|} \quad (1)$$

式中, ρ 为大于零的实数; C 和 C' 为常数, 由馈电条件决定; $C' = C\rho^{-1}$ 。

泰勒展开式(1)为式(2), 可看出 Wu-King 电流分布是这种双指数电流分布的零阶近似。

$$I(z) = C \left\{ (L - |z|) + \left(L^2 - |z|^2 \right) \frac{\rho}{2} + \left(L^3 - |z|^3 \right) \frac{\rho^2}{6} + O(\rho^3) \right\} e^{-jk_0|z|} \quad (2)$$

将电流分布式(1)代入文献[5]中式(9), 整理得满足式(1)的加载阻抗分布式(3)。

$$Z(z) = \frac{60\psi(z)\rho}{e^{\rho(L-|z|)} - 1} \left(1 + j \frac{\rho}{2k_0} \right)^{\rho L < 1} \approx \frac{60\psi(z)}{L - |z|} \quad (3)$$

式中, $\psi(z)$ 是与天线几何参数和位置有关的比例因子。当 ρL 为小量时, 式(3)近似为 Wu-King 加载分布。

2.2 参量 ψ 和参数 C

无反射分布加载天线关键就是参量 ψ 的计算。在诸多文献^[5-11]中 ψ 都近似地被认为随 z 的变化差异很小，假设为一个参数 $\psi(z)=\psi(0)$ 。这种假设简化了分析，但数值计算显示，参量 ψ 并不象文献[5]中所说差异很小。表 1 为归一化于馈电点的 ψ 参量值随 z 变化的关系。计算参数： $k_0 L = \pi/2$ ， $k_0 a = 0.021$ ，电流分布为 Wu-King 电流分布。

表 1 归一化参量 $\psi(z)$ 随 z 值的变化

z/m	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.249
$\psi(z)/\psi(0)$ 的实部	1	1.12	1.22	1.35	1.70	42.55
$\psi(z)/\psi(0)$ 的虚部	0	0.13	0.20	0.27	0.35	6.29
$\psi(z)/\psi(0)$ 的模值	1	1.13	1.23	1.37	1.73	42.54

表 1 显示在 $0 < z < \frac{L}{2}$ ， ψ 变化平缓，而靠近天线端点处参量 ψ 的数值远大于馈电点的值。如果假设 ψ 与 z 无关，电流将偏离行波分布，限制了天线带宽的展宽。考虑 ψ 随 z 变化，则文献[5]中式 (16) 标量位函数 ϕ 将是两项之和而不是一项，如式(4)。

$$\phi = \frac{j}{4\pi\omega\epsilon_0} \left(\psi(z) \frac{dI(z)}{dz} + I(z) \frac{d\psi(z)}{dz} \right) \quad (4)$$

对于细线天线， $k_0 a \ll 1, a \ll L$ ，令 $\psi(0) = \psi_0$ ，由对称性及激励电压 V_0 由式(5)可求的参数 C 和 ψ_0 分别由式(5)和式(6)给出。

$$C = j2\pi V_0 \omega \epsilon_0 / (\psi_0 (1 + jk_0 L)) \quad (5)$$

$$\psi_0 = 2sh^{-1} \frac{L}{a} + \frac{2}{\rho p L} \left[\{C(2k'a, 2k'L) + jS(2k'a, 2k'L)\} - e^{\rho L} \{C(2k_0 a, 2k_0 L) + jS(2k_0 a, 2k_0 L)\} \right] \quad (6)$$

式中， $L' = (e^{\rho L} - 1)/\rho$ 为天线臂的等效长度； $k' = k_0 + j\rho/2$ ， $C(x, y)$ ， $S(x, y)$ 分别为广义正弦和余弦积分。当 ρL 为小量时，式(6)退化为文献[5]的式(29)。

定义 $p = L'/L = (e^{\rho L} - 1)/(\rho L)$ 为伸长系数，在 $\rho > 0$ 的情况下， $p > 1$ 。伸长系数可以反映无反射加载天线平均电流的高低。对于 Wu-King 分布， $p \approx 1$ 。

2.3 输入阻抗和加载效率

将式(5)代入式(1)得电流分布 $I(z)$ ，进而可求得输入阻抗和加载效率，见式(7)~式(9)。

$$I(z) = \frac{2\pi V_0}{\eta_0 \psi_0 (1 - j/(k_0 pL))} \frac{e^{\rho L} - e^{\rho|z|}}{e^{\rho L} - 1} e^{-jk_0|z|} \quad (7)$$

式中， η_0 为自由空间波阻抗， V_0 为激励电压。

$$Z_{in} = V_0 / I(0) = 60\psi_0 (1 - j/(k_0 pL)) \quad (8)$$

$$\eta = 1 / \left(1 + \psi_1 \int_0^\infty |F(k''L, \theta)|^2 \sin \theta d\theta \right) \quad (9)$$

式中， $\psi_1 = \int_0^L \frac{e^{\rho L} - e^{\rho z}}{(e^{\rho L} - 1)^2} \rho e^{\rho z} \left(\psi_R(z) - \frac{\rho}{2k_0} \psi_I(z) \right) dz$ ； $\psi_R(z)$ 和 $\psi_I(z)$ 分别为 $\psi(z)$ 的实部和虚部。

2.4 远区辐射场

考虑一个沿 Z 轴放置的线天线，其远区辐射场为：

$$E_\theta = j\omega\mu_0 \sin \theta \int_{-L}^L I(z') \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} dz' \approx \frac{jC\eta_0(pL)e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \frac{k_0}{p\rho L} f(k''L, \theta) \quad (10)$$

式中, $f(k''L, \theta)$ 是天线的方向图函数, 由式(11)确定, $k'' = \rho - jk_0 = j(k_0 - 2k')$ 。利用快速反傅里叶变换可以算出时域场波形。

$$f(k''L, \theta) = e^{k''L} (k_0 \sin \theta)^{-1} \left\{ \cos(k_0 L \cos \theta) + j \cos \theta \sin(k_0 L \cos \theta) - e^{j k_0 L} \right\} \\ + (k''^2 + k_0^2 \cos^2 \theta)^{-1} \sin \theta \left\{ k'' - e^{k''L} [k'' \cos(k_0 L \cos \theta) + k_0 \cos \theta \sin(k_0 L \cos \theta)] \right\} \quad (11)$$

当 ρL 为小量且假设 $\psi(z) = \psi(0)$ 时, 式(3)~式(11)就是文献[5]中相应的表达式。可见, Wu-King 分布是这种双指数分布的特殊情况。

3 分析

计算比较具有 Wu-King 电流分布和式(1)形式的双指数电流分布天线的电特性。计算参数: $L=0.025\text{m}$, $k_0 L = \pi/2$, $k_0 a = 0.021$ 。当 ρ 为小量时, 电流近似为 Wu-King 分布。图 1 显示, 随着指数 ρ 的增加, 天线平均电流显著增加, 辐射强度提高; 同时也使馈电点电流增加, 降低了输入阻抗。可见通过合理的设计此分布可解决高输入阻抗的问题。

不同 ρ 值的分布加载阻抗见图 2, 随着指数 ρ 的增加, 电阻加载量降低, 这是双指数电流分布可以提高效率的主要原因之一; 同时加载电抗由 Wu-King 分布的阻容变为阻容和阻感的混合加载, 很显然, 在天线电小的情况下, 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。表 1 和图 2 中加载阻抗的实部与模值比值近似为 1, 在实际应用中用模值代替电阻加载对效率基本上没有什么影响, 实际电阻加载值可采用式(12)计算, 其很容易在工程中实现^[12], 并应用于其它电阻型加载天线, 比如: Vee 天线, 碟形天线。

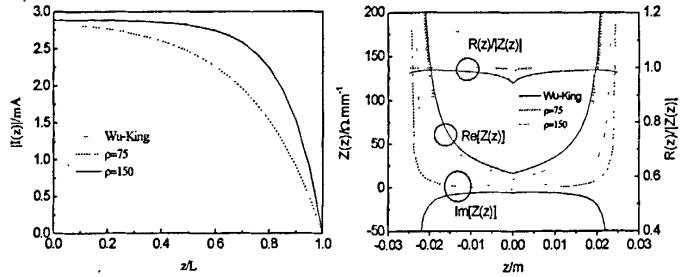


图 1 不同的 ρ 对应的电流分布

图 2 加载分布阻抗规律

和图 2 中加载阻抗的实部与模值比值近似为 1, 在实际应用中用模值代替电阻加载对效率基本上没有什么影响, 实际电阻加载值可采用式(12)计算, 其很容易在工程中实现^[12], 并应用于其它电阻型加载天线, 比如: Vee 天线, 碟形天线。

$$R(z) / |Z(z)| = \frac{60 |\psi(z)| \rho}{e^{\rho(L-|z|)} - 1} \sqrt{1 + \left(\frac{\rho}{2k_0}\right)^2} \quad (12)$$

图 3 给出了与图 1 电流分布相对应的端口加 4: 1 阻抗变压器后的电压反射系数曲线。随着指数 ρ 的增加, 反射系数明显降低, 随频率变化越来越平缓。可见双指数分布比 Wu-King 分布对展宽天线的阻抗带宽更有效。天线阻抗带宽达 10: 1, 远大于 Wu-King 分布所能达到带宽。阻抗带宽覆盖了 UWB 的所在频段 3.1~10.6GHz。

天线的加载效率和频域增益见图 4, 随着频率的增加, 天线加载效率明显比 Wu-King 分布高, 在 UWB 频段内天线增益更为平坦, 结合图 3, 天线更有利于脉冲信号的辐射。假设天线激励为微分高斯脉冲 ($t_0 = 5\text{ns}$, $\tau_p = 0.228\text{ns}$), 如式(13)。图 5 给出了天线边射方向的远区辐射电场波形。当 $\rho = 150$ 时, 辐射场峰值近似为 Wu-King 天线辐射的两倍, 同时天线振铃效应也得到有效的降低。

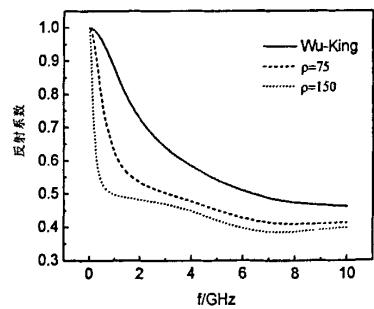


图 3 输入端反射系数

$$V_{in}(t) = \frac{(t-t_0)}{\tau_p} \exp \left\{ \frac{1}{2} - \frac{(t-t_0)^2}{2\tau_p^2} \right\} \quad (13)$$

电阻加载可以有效降低天线的振铃效应，但牺牲了天线的效率，如何选取合适的指数 ρ 来平衡带宽和效率，尽可能的提高天线带宽和效率进而提高天线的脉冲辐射性能是我们的目标。天线的加载效率与天线长度及指数 ρ 的关系如图6。从图可以看出，在天线长度一定时，加载效率并不是指数 ρ 的单调增函数，有一个最佳指数 ρ_0 值使天线的加载效率最高；选取合适的参数 ρ ，可以使天线的阻抗在工作频带内最平坦。在 $\rho = \rho_0$ 的情况下加载效率要远比Wu-King分布的加载效率高。图6可作为设计高效无反射电阻加载UWB天线的设计曲线。

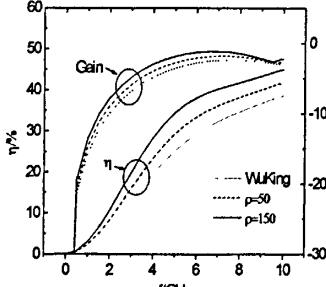


图4 加载效率和天线增益

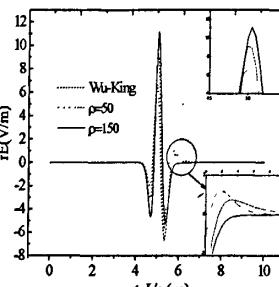


图5 远区辐射电场

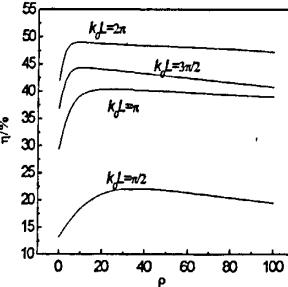


图6 加载效率与参数ρ的关系

4 结论

电阻加载是提高天线瞬态特性的有效方法，尤其对小型UWB天线。电阻无反射加载UWB天线可以很好的发射和接收超短脉冲，其极大的带宽是以牺牲天线效率为代价。如何在增加带宽的基础上提高天线的效率进而提高天线的瞬态辐射特性，一直是研究的关键。本文在Wu-King理论基础上，给出了双指指数电流分布的加载天线的理论研究，提出了伸长系数的概念，给出了天线最佳设计曲线。理论表明此分布可使天线在带宽和效率方面获得比Wu-King分布更有效的提高，天线的振铃效应大大降低，在UWB天线领域有重要的实用价值。

参考文献

- 董晓龙, 汪文秉, 瞬态电磁学的新进展, 电子科技导报, 1997, 6 (12) :20-24
- Ian Oppermann, Matti Hamalainen, UWB Theory and Applications, John Wiley & Sons, 2004
- 饶育萍, 牛忠霞, 王映民, 超宽带短脉冲天线性能改善方法研, 无线电通信技术, 2004, (1):22-26
- Popovic, B.D., Reactively and resistively loaded wideband whip antennas: possibilities and limitations, Sixth International Conference on Antennas and Propagation (ICAP 89), 1989, 4: 399-402
- Wu, T., R. King., The cylindrical antenna with nonreflecting resistive loading, IEEE Trans. Antennas Propag., 1965, 13 (3):369-373
- Iizuka, K., The traveling-wave v-antenna and related antennas, IEEE Trans. Antennas Propag., 1967, 15(2):236-243
- Liang-Chi, S., An experimental study of the antenna with nonreflecting resistive loading, IEEE Trans. Antennas Propag., 1967, 15(5): 606-611
- Yu-Ping, L., D. Sengupta., Transient radiation from a linear antenna with nonreflecting resistive loading, IEEE Trans. Antennas Propag., 1974, 22(2): 212-220
- Formato, R., Design wideband antennas, Electronics World, 1997, 103(1738): 825-829
- Mosquera, J.M.P., M.V. Isasa., UWB resistively loaded sensor design, 2003 IGARSS: Learning From Earth's Shapes and Colours, 2003, 7: 4232-4234
- Kim, K., W.R. Scott, Jr., Design of a Resistively Loaded Vee Dipole for Ultrawide-Band Ground-Penetrating Radar Applications, IEEE Trans. Antennas Propag., 2005, 53(8): 2525-2532
- K. Kim, W. R. Scott, Design and realization of a discretely loaded resistive vee dipole for ground-penetrating radars, Radio Science, 2004, 39(4): 1-9

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>