

文章编号 1005-0388(2002)02-0197-07

中波天线输入阻抗计算机分析^{*}

褚国祯

(山东人民广播电台技术部, 山东 济南 250062)

摘 要 通过对 76m 天线、138m 天线输入阻抗数据分析, 对天线输入阻抗与平均特性阻抗、波长缩短系数以及天线等效直径的关系进行了探讨, 分析了对用传输线法计算天线输入电抗误差较大的原因, 并对输入电抗的计算提出了修正。

关键词 输入阻抗, 传输线法, 计算方法, 无线高度, 平均特性阻抗, 波长缩短系数

中图分类号 TN822.2

文献标识码 B

Analysis of input impedance of medium wave antenna with computer

CHU Guo-zhen

(Broadcast station republic of Shandong, Jinan Shandong 250062, China)

Abstract This paper studies a relationship between input impedance and average characteristic impedance (w), wavelength shorten factor (n) and equivalent diameter through analysis of input impedance data of 76m and 138m antenna and proposes a view on the reason for bigger error of input impedance using transmission line method and a correction method.

Key words input impedance, transmission line method, computing method, height of antenna, average characteristic impedance, wavelength shorten factor

1 引 言

输入阻抗是天线的一个重要参数, 在天线的研究、设计以及天线的使用中常常用到, 虽然天线阻抗理论较为成熟, 但是输入阻抗的理论计算非常复杂, 因此, 工程中采用近似公式或借助图形和表格计算。

铁塔天线是中波发射台的常用天线, 横截面为正三角形, 在计算天线的输入阻抗时其等效直径不好处理, 因此, 中波天线输入阻抗的理论分析和计算就更加困难。工程上采用的近似计算只在较低的频段与测量数据基本相符, 当天线高度大于四分之一波长时, 计算结果与测量值相差很大。有关资料认为中波天线的电流分布不符合正弦分布, 天线的输入阻抗只能采用矩量法计算, 但是矩量法较为复杂。作者采用传输线法用计算机分析计算了 76m 和 138mm 天线的输入阻抗, 并与这两种天线输入阻抗

测量数据或图表^[1]进行了对比, 结果表明: 如果天线的波长缩短系数和平均特性阻抗取值得当, 输入电抗的计算值与测量值能较好的符合, 但是输入电抗的计算值误差较大。对于 76m 天线, 输入电抗的计算值普遍大于测量值, 但是误差有一定的规律性, 对输入电抗的计算公式进行修正后, 计算值也能与测量数据较好的符合。138m 天线的电抗计算误差较大, 规律性不明显。

2 传输线法

传输线法计算天线输入阻抗是一种较早的方法^[2], 常用于计算双极天线的输入阻抗, 其原理是把天线看成等值传输线, 对天线与传输线的主要不同之点加以适当修正, 然后应用传输线的计算公式计算天线的输入阻抗。

天线和传输线的主要区别有如下两点:

(1)等值传输线的分布电感(L)和分布电容(C)以及特性阻抗(W)沿线均匀分布,但是天线的这三个参数是变化的。

(2)天线辐射功率,传输线基本上不辐射功率。

传输线法用于计算双极对称天线的输入阻抗作了以下两点处理:

(1)天线的辐射功率看成欧姆损耗,均匀分布在天线上,由此计算传输线的衰减常数。

(2)沿天线全长变化的特性阻抗以其平均值来代替。

2.1 对称天线的计算公式

计算对称天线的输入阻抗需要用到如下的公式:

(1) 平均特性阻抗 W

$$W = 120(\ln(\frac{2h}{\rho}) - 1$$

(2) 平均衰减常熟 α

$$\alpha = \frac{R_r}{Wh(1 - \frac{\sin(2\beta h)}{(2\beta h)})}$$

(3) 天线自辐射电阻 R_r

$$R_r = 30[2S_1(2\beta h)(1 + \cos(2\beta h)) - \cos(2\beta h)S_1(4\beta h) - 2\sin(2\beta h)S_i(2\beta h) + \sin(2\beta h)S_i(4\beta h)]$$

(4) 天线自辐射电抗 X_r

$$X_r = 30\{2S_i(2\beta h) + \sin(2\beta h)[2S_1(2\beta h) - S_1(4\beta h) - 2\ln(\frac{h}{\rho})] + \cos(2\beta h)[2S_i(2\beta h) - S_i(4\beta h)]\}$$

(5) 天线输入电阻 R_{in}

$$R_{in} = W \frac{\text{sh}(2\alpha h) - \frac{\alpha}{\beta'} \sin(2\beta' h)}{\text{ch}(2\alpha h) - \cos(2\beta' h)}$$

(6) 天线输入电抗 X_{in}

$$X_{in} = -jW \frac{\frac{\alpha}{\beta'} \text{sh}(2\alpha h) + \sin(2\beta' h)}{\text{ch}(2\alpha h) - \cos(2\beta' h)}$$

(7) 波长缩短系数: $n = \lambda/\lambda'$

在以上公式中, h 为天线的高度, ρ 为天线的直径, λ 表示电磁波在自由空间传播的波长, λ' 电磁波在金属中传播的波长, $\beta (= 2\pi/\lambda)$ 为电磁波在自由空间传播的相位常数, $\beta' (= 2\pi/\lambda')$ 为电磁波在金属中传播的相位常数, $S_i(x)$ 是正弦积分, $S_1(x)$ 是变形余弦积分, $C_i(x)$ 是余弦积分, 这几个积分的计算公式如下:

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin(x)}{x} dx \quad S_1(x) = \int_0^x \frac{1 - \cos(x)}{x} dx$$

$$C_i(x) = \int_x^\infty \frac{\cos(x)}{x} dx$$

$$C_i(x) = \ln(x) - S_1(x) + 0.5772$$

2.2 单极天线的计算公式

根据镜像原理,单极垂直接地的天线仍可以用对称天线的分析方法来分析,输入电阻和电抗仍可使用上面的公式计算,但是平均特性阻抗和辐射阻抗的计算公式应调整为:

平均特性阻抗:

$$W = 60(\ln(\frac{2h}{\rho}) - 1$$

辐射电阻:

$$R_r = 15[2S_1(2\beta h)(1 + \cos(2\beta h)) - \cos(2\beta h)S_1(4\beta h) - 2\sin(2\beta h)S_i(2\beta h) + \sin(2\beta h)S_i(4\beta h)]$$

3 计算机程序设计

3.1 程序的任务和功能:

研究中波天线输入阻抗,对程序的主要功能有以下要求:(1)能够进行计算结果和测量数据的比较和图形比较。(2)在程序界面上能够方便的改变有关参数。

3.2 相关的程序

计算天线的输入阻抗,需要给定天线高度、直径和波长缩短系数,计算的先后顺序为:(1)平均特性阻抗(W), (2)辐射电阻(R_r), (3)平均衰减常数(α), (4)根据输入电阻和输入电抗的公式计算出输入阻抗,在这四项计算中,平均特性阻抗和输入电阻、电抗的计算程序比较简单,辐射电阻的计算程序较为复杂。程序设计使用的编程环境为 Borland C++ Builder5,以下是计算中要使用的一些 C 语言函数。

(1) 正弦积分: `double S_i (double x)`

(2) 变形余弦积分: `double S_1 (double x)`

(3) 余弦积分: `double C_i (double x)`

(4) 辐射阻抗: `double R_r (double H , double da , bool flag)`

(5) 输入阻抗: `double Z_{in} (double H , double da , double n , bool flag)`

(6) 平均特性阻抗: `double Z_w (double H , double da)`

其中: H 代表天线高度, da 代表天线直径, n 代表波长缩短系数。

在以上的 6 个 C 语言函数中, (1)、(2)、(3) 是为计算辐射电阻 R_r 服务的, 因为在计算辐射电阻的公式中包含这三个函数, 在输入阻抗函数 Z_{in} 的参数

中,布尔变量 Flag 是标记变量,当 Flag=false 时,计算输入电阻,当 Flag=true 时,计算输入电抗。正弦积分 $S_i(x)$ 和变形余弦积分 $S_1(x)$ 是计算输入阻抗的基础,这在程序中多次调用,为了提高计算速度,对两个函数的计算采用龙贝格(Romberg)算法^[3]。

3.3 龙贝格算法

龙贝格算法是数值积分中常用的算法,与梯形法、辛普莘及柯斯特等算法相比,特点是精度高、收敛快。设 $f(x)$ 是被积函数, $[a,b]$ 是被积区间, h 表示积分步长, n 表示积分次数,用 T 、 S 、 C 、 R 分别代表梯形算法、辛普莘算法、柯斯特算法和龙贝格算法的数值积分结果,下面的公式显示了各种算法公式间的关系,图 1 给出了龙贝格算法的框图。

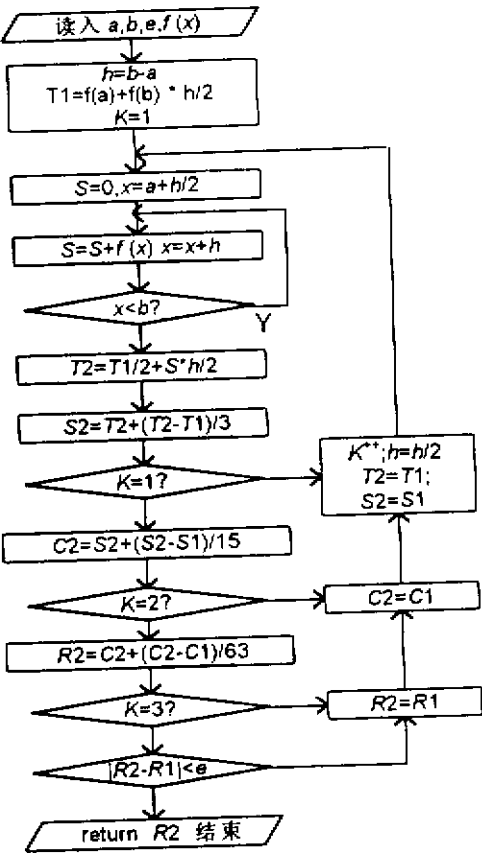


图 1 龙贝格算法框图

- (1) $T_1 = \frac{(b-a)}{2}(f(a) + f(b))$
- (2) $T_{2n} = \frac{1}{2}T_n + \frac{h}{2} \sum_{k=0}^{n-1} f(x_{k+\frac{1}{2}})$
- (3) $S_n = \frac{4}{3}T_{2n} - \frac{1}{3}T_n$
- (4) $C_n = \frac{16}{15}S_{2n} - \frac{1}{15}S_n$

(5) $R_n = \frac{64}{63}C_{2n} - \frac{1}{63}C_n$

其中: $h = \frac{(b-a)}{n}$

3.4 程序界面的设计

输入阻抗与天线的高度(H)、直径(W)、波长缩短系数(n)有关,并且随频率的变化而变化,因此在设计程序界面时,要考虑到这几参数在程序运行过程中可以随时改变,以便于观察测量数据与计算结果的差别。

4 计算结果及其讨论

4.1 计算结果

76m 铁塔天线的测量数据和计算结果的对比见表 1、表 2 和图 2。从中可以看出:

表 1 76m 天线输入电阻比较

频率	计算值	测量值	绝对误差	相对误差
500	7.398	8.5	1.101	12.957
550	9.271	10	0.728	7.28
600	11.482	12	0.517	4.309
650	14.098	14.2	0.101	0.717
700	17.204	17	-0.204	1.204
750	20.918	20.3	-0.618	3.047
800	25.395	24.5	-0.895	3.653
850	30.846	29.5	-1.346	4.563
900	37.566	36	-1.566	4.35
950	45.971	44.5	-1.471	3.306
1000	56.663	56	-0.663	1.184
1050	70.53	70	-0.53	0.757
1100	88.91	87	-1.91	2.196
1150	113.869	113	-0.869	0.769
1200	148.631	155	6.368	4.108
1250	198.231	210	11.768	5.604
1300	270.164	273	2.835	1.038
1350	373.693	370	-3.693	0.998
1400	512.64	500	-12.64	2.528
1450	662.068	640	-22.068	3.448
1500	746.246	730	-16.246	2.225
1550	703.215	705	1.784	0.253
1600	576.48	588	11.519	1.959

(1)输入电阻的计算值与测量值符合的较好,相对误差大部分都在 6% 以下,最大绝对误差为 22.068Ω(此时的相对误差为 3.4%),最大相对误差为 12.9%(此时的绝对误差为 1.1Ω)。

表 2 76m 天线输入电抗比较

频率	计算值	测量值	绝对误差	相对误差
500	-144.374	-264	-119.625	45.312
550	-112.861	-214	-101.138	47.261
600	-84.308	-172	-87.691	50.983
650	-57.804	-135	-77.195	57.182
700	-32.649	-101	-68.35	67.673
750	-8.277	-70	-61.722	88.175
800	15.803	-43	-58.803	136.751
850	40.044	-17.5	-57.544	328.826
900	64.889	0.9	-63.989	7109.98
950	90.795	35	-55.795	159.415
1000	118.249	65	-53.249	81.921
1050	147.772	95	-52.772	55.55
1100	179.897	129	-50.897	39.455
1150	215.06	162	-53.06	32.753
1200	253.309	201	-52.309	26.024
1250	293.506	237	-56.506	23.842
1300	331.355	272	-59.355	21.822
1350	354.941	281	-73.941	26.313
1400	337.459	262	-75.459	28.801
1450	238.15	170	-68.15	40.088
1500	46.521	-18	-64.521	358.451
1550	-158.354	-197	-38.645	19.617
1600	-284.807	-320	-35.192	10.997

(2)在 76m 天线的输入电抗的计算方面,输入电抗的计算值全部大于测量值,相对误差大部分都在 20%以上,随着频率加大,计算值的误差逐渐减小。

(3)138m 天线输入电阻误差较小,输入电抗误差较大。

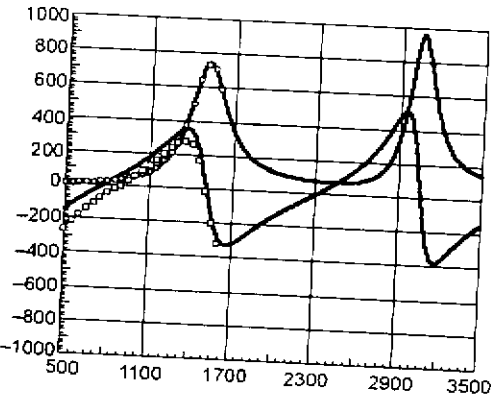


图 2 76m 天线输入阻抗比较

(4)随着频率的增加或天线相对高度的增加,输入阻抗计算值呈现出近似周期性的特点,见图 2 和图 3。

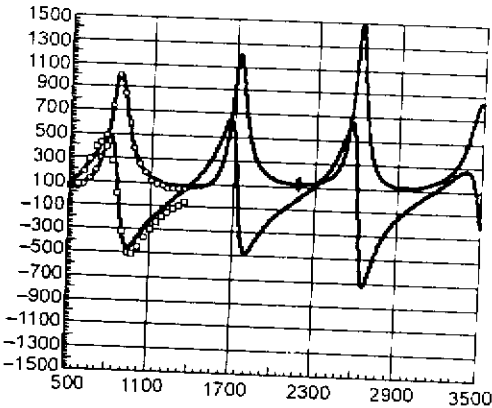


图 3 138m 天线输入阻抗比较

4.2 输入参数的影响

76m 铁塔天线边宽是 0.5m,横截面外接圆的直径为 0.577m,在计算中发现,要使输入电阻计算值的误差最小,天线等效直径和波长缩短系数分别必须以 2.1m 和 1.29 输入(见图 2)。对于边宽为 0.8m 的 138m 天线,其外接圆的直径为 0.924m,等效直径和波长缩短系数分别必须以 1.67m 和 1.24 输入误差才最小(见图 3)。

4.2.1 等效直径和平均特性阻抗

等效直径是通过平均特性阻抗间接影响输入阻抗的计算的。

从传输线法的计算公式中可以看出,辐射电阻和衰减系数的计算与天线直径无关,只有平均特性阻抗和辐射电抗的计算和天线直径有关,但在输入阻抗的计算过程中并不包含辐射电抗,因此平均特性阻抗计算的准确性直接影响输入阻抗的计算的准确性,计算中发现,不把等效直径作为输入参数,直接以平均特性阻抗作为输入参数仍然可以得到一样的结果,其中:76m 天线的平均特性阻抗为 238.505,138m 天线的平均特性阻抗为 288.044。

4.2.2 波长缩短系数

波长缩短系数(n)与天线的相对高度、天线高度与直径的比值(H/d)有关,在相对高度固定的情况下, n 随着 H/d 增大而减小(见图 4),对于 76m 天线, $H/d = 76/2.1 = 36.2$,根据图 4,波长缩短系数应该小于 1.16,138m 天线的波长缩短系数应该更小,计算表明 76m 和 138m 天线的波长缩短系数分别为 1.29 和 1.24。图 6 是在假设输入电阻误差最小的前提下,得到的 n 与 H/d 的关系。图 6 与图 4 有较大的区别,(1) n 最大值出现的位置不同。(2)在 $0.2 < H/d < 0.38$ 的范围内, n 的变化很小,只有

0.03 左右,较图 4 显示的变化小的多。

波长缩短系数影响电磁波在天线上传播的相位,从图 2、图 3 中可以看出在中波频段(531kHz~1602kHz)天线的输入电抗有三个零点,在第二个零

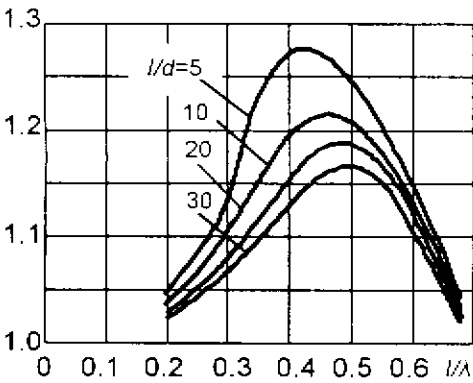


图 4 波长缩短系数与 H 和 d 的关系

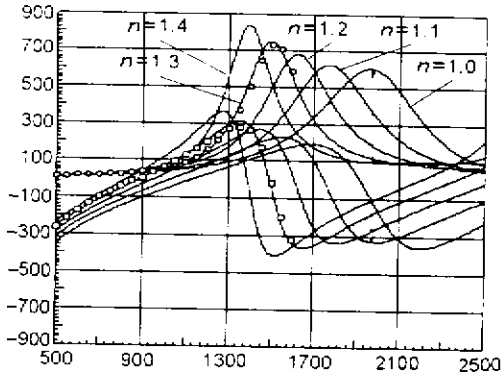


图 5 输入阻抗与波长缩短系数的关系

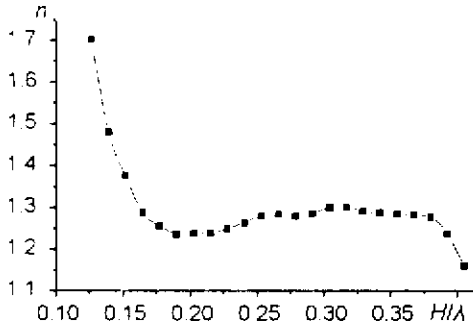


图 6 波长缩短系数与相对高度的关系

点输入电阻为最大值,这一点是天线的谐振点,波长缩短系数就等于 0.5 除以这一点的天线相对高度。由图 5 可知:波长缩短系数减小时,谐振点向频率偏高的方向移动,波长缩短系数增大时,谐振点向频率偏低的方向移动,频率较低时,输入电阻基本不随波

长缩短系数变化,电抗随波长缩短系数的增加而增加。

不同高度的天线波长缩短系数不同,76m 天线的波长缩短系数约为 1.29,138m 天线波长缩短系数约为 1.24,150m 天线的波长缩短系数约为 1.22 左右。

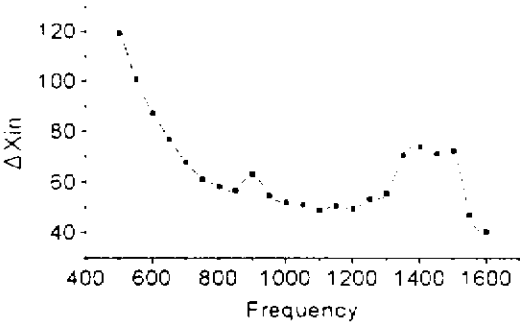


图 7 76m 天线误差曲线

4.3 电抗的修正

由表 2 和图 2 可知,76m 天线的输入电抗的计算值普遍大于测量值,其误差曲线见图 8,传输线法对于电抗的计算需要修正,即:

$$X_m = -jW \frac{\frac{\alpha}{\beta'} \text{sh}(2ah) + \sin(2\beta'h)}{\text{ch}(2ah) - \cos(2\beta'h)} + jC_r$$

C_r 代表修正项,76m 天线的修正项可以表示为: $C_r = -60000000/f$,相当于在天线输入端串联一个 26526pF 电容,这里 f 表示频率。76m 天线修正后的误差曲线见图 8,在图 8 中最上面的那条是修正曲线,最下面的曲线是修正以后的误差曲线,表 3 列出了 76m 和 138m 天线输入电抗修正后误差情况,图 9、图 10 分别是 76m 天线修正后输入阻抗曲线,由图形和表 2 可以看出,76m 天线输入电抗修正后计算值与测量值符合的较好,138m 天线修正不够理想,修正后的误差曲线见图 10。

中波发射台测量天线输入阻抗一般是用导纳电桥或阻抗电桥,本文引用的测试数据是我国上世纪 50 年代在周口测得的,该数据已绘制成图表共中波发射台使用,目前许多不具备技术条件的中波发射台在调配天线时仍然使用这批数据。76m 天线底部安装的绝缘底座高度约为 0.5m,直径 30cm,天线的对地电容不足 10pF,远远小于上面提到的 26526pF,因此电抗的修正并不是由于天线底部绝缘引起的。

表 3 电抗修正后计算值与测量值比较

76m 天线电抗的绝对误差		
频率	未作修正	修正后
500	119.516	0.516
550	101.035	7.146
600	87.599	11.567
650	77.121	14.417
700	68.3	16.699
750	61.706	17.626
800	58.83	15.544
850	57.627	12.372
900	64.14	1.97
959	56.031	6.6
1000	53.587	5.912
1050	53.235	3.43
1100	51.51	-2.58
1150	53.851	2.112
1200	53.306	3.723
1250	57.733	10.133
1300	60.811	15.041
1350	75.551	31.477
1400	76.99	34.49
1450	69.116	28.081
1500	64.364	24.697
1550	37.278	-0.108
1600	33.088	-4.099

138m 天线电抗的绝对误差		
相对高度(H/λ)	未作修正	修正后
0.26	55.678	-4.321
0.28	5.399	-59.215
0.30	-41.356	-110.587
0.32	-66.741	-140.587
0.34	-16.381	-94.843
0.36	93.157	10.08
0.38	169.677	81.984
0.40	71.004	-21.303
0.42	-42.305	-139.228
0.44	24.974	-76.564
0.46	92.705	-13.448
0.48	102.903	-7.866
0.50	106.895	-8.489
0.52	84.402	-35.597
0.54	81.111	-43.503
0.56	78.595	-50.635
0.58	91.85	-41.995
0.60	95.554	-42.907
0.62	116.222	-26.854
0.64	129.429	-18.262

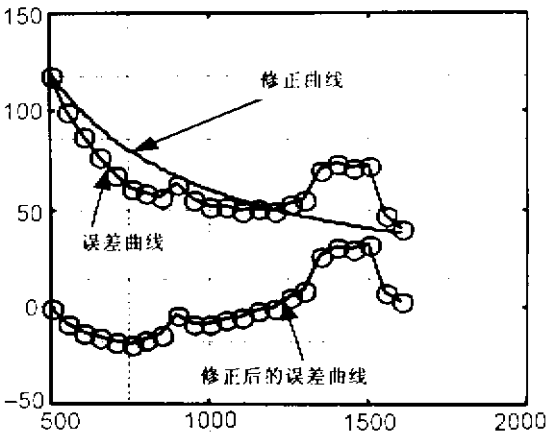


图 8 76m 天线电抗的修正

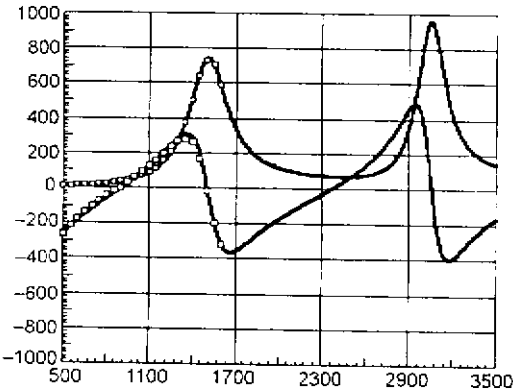


图 9 修正后的 76m 天线输入阻抗

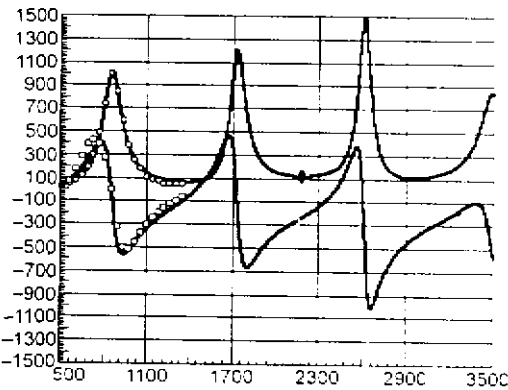


图 10 修正后的 138m 天线输入阻抗

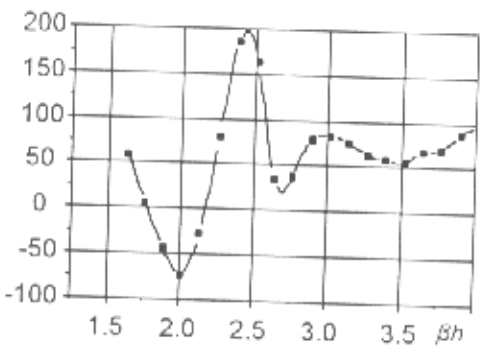


图 11 138m 天线电抗误差曲线

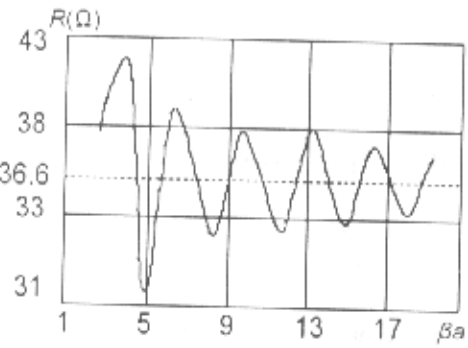


图 12 辐射电阻与地网半径的关系

5 结论

中波天线输入阻抗的计算是一个非常复杂的问

题,传输线法对天线的处理有其合理的一面,也有不够合理一面,合理的一面是把天线的辐射功率看成欧姆损耗,不够合理方面是对平均特性阻抗的处理。

本文表明:用传输线法可以较精确的计算出中波天线的输入阻抗,另外,测量天线一定频率点(10~20 个频率点)的输入阻抗,通过计算比较,还可以计算出波长缩短系数和平均特性阻抗,当然测量的点越多越好。

参考文献

[1] 李孝勤. 广播电视技术手册第七分册《天线》[M]. 北京:国防工业出版社,1993.
[2] 谢处方、邱文杰. 天线原理与设计[M]. 西安:西北电讯工程学院出版社,1985.
[3] 李树钰. 数值计算方法[M]. 天津:天津科学技术出版社,1994.



褚国祯 (1964-),男,山东人,1987 年毕业于哈尔滨科技大学应用物理专业,理学学士学位,1995 年起从事广播技术工作,高级工程师。



林伟 (1966-),男,上海人,1996 年于日本筑波大学获硕士学位(MBA)。后在日本立花公司工作,现在日本微系统公司任部门负责人。从事信息系统等方面的研究。



林世明 (1935-)男,福建人,1956 年毕业于厦门大学。曾兼任 IEEE AP 会议专题会议主席等职,现为西北工业大学教授,兼任全国天线学会委员,以及英国物理研究所出版社的审稿专家等职。主要从事天线,电磁散射和逆散射等方面的研究。



程刚 (1944-),男,陕西人,1969 年毕业于西北工业大学。曾兼任造船学会专业领导成员,以及欧洲科技发展学会审稿人等职,现为西北工业大学教授,兼任《探测与控制学报》编委等职。长期从事通信与信息系统的研究。

(上接第 178 页)

参考文献

[1] R E Collin, F J Zucker. Antenna Theory[M]. Part 1. N. Y., McGraw-Hill Book Co., 1968.
[2] 郭燕昌等. 相控阵和频率扫描天线原理[M]. 北京:国防工业出版社出版,1978.
[3] 林世明. 微波天线设计的数学方法[M]. 北京:航空专业教材编审组,1983.

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，一直致力和专注于微波、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>